

**PERİYODİK VE KUAZİ-PERİYODİK FOTONİK
KRİSTALLERDE İLETİM VE YAVAŞ IŞIK ANALİZİ**

**SLOW LIGHT AND TRANSMISSION ANALYSIS IN
PERIODIC AND QUASI-PERIODIC PHOTONIC CRYSTALS**

HASAN HÜSEYİN ÖZBENLİ

Prof. Dr. ERDEM YAZGAN
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2014

HASAN HÜSEYİN ÖZBENLİ' nin hazırladığı **“Periyodik Ve Kuazi-Periyodik Fotonik Kristallerde İletim Ve Yavaş Işık Analizi”** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Başkan

.....

Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Danışman

.....

Doç. Dr. Hamza KURT

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Mehmet DEMİRER

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26 / 09 / 2014

HASAN HÜSEYİN ÖZBENLİ

ÖZET

PERİYODİK VE KUAZİ-PERİYODİK FOTONİK KRİSTALLERDE İLETİM VE YAVAŞ IŞIK ANALİZİ

Hasan Hüseyin ÖZBENLİ

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Eylül 2014, 96 sayfa

Bu tez çalışmasında genel olarak kuazi kristal malzemelere vurgu yapılarak periyodik ve kuazi-periyodik fotonik kristallerin iletim özellikleri ve yavaş ışık elde edilmesi araştırmaları sunulmaktadır. Fotonların madde ile etkileşimi sonucu elde edilen yavaş ışık, optik sinyallerin işlenmesi ve kontrolü için umut verici bir çözümdür. Bu amaçla kullanılan nanofotonik kristaller oda sıcaklığında çip üstüne entegre edilebilmesi ve geniş bant aralığında bozulmaya uğramadan ışığı iletebilmesi gibi özellikleri sayesinde yavaş ışık elde edilmesi için oldukça kullanışlıdır. Fotonik kristaller sahip oldukları simetri özellikleri sayesinde ortaya çıkan yasaklı bant aralıkları gibi ışığı iletim özellikleri ile ışığın belirli frekans bölgesinde kontrolünü sağlamaktadır. Bu amaçla yavaş ışık çalışmaları için yıllardır araştırma konusu olan fotonik kristal yapılara ek olarak bu çalışmada sahip oldukları döngüsel simetri özellikleriyle kristalografi biliminde kristal tanımının değişmesine neden olan kuazi yani yarı periyodik kristal yapılara vurgu yapılmıştır. Fotonik kuazi kristal malzemelerin ışığı taşıma mekanizmaları, iletim ve dağıtım özellikleri zaman-etki alanında yapılan çalışmalarla sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmanın özgün değerlerini özetlemek gerekirse fotonları yavaşlatmak için önerilen yapının kompakt olması ve ilk defa böyle bir amaç

için kullanılacak olması, çalışma mekanizmasının farklı olması, tasarım aşamasında orijinal değişimlerin sunulması ve uygulama alanlarına dönük olmasını sayabiliriz.

Anahtar Kelimeler: Nanofotonik kristaller, kuazi kristaller, yavaş ışık, dağınım

ABSTRACT

SLOW LIGHT AND TRANSMISSION ANALYSIS IN PERIODIC AND QUASI-PERIODIC PHOTONIC CRYSTALS

Hasan Hüseyin ÖZBENLİ

**Master of Science, Department of Electrical Electronics
Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Erdem YAZGAN

September 2014, 96 pages

In this study, in general, with special emphasis on quasi-crystalline materials, transmission properties and slow light studies of periodic and quasi-periodic photonic crystals are presented. Interaction of photons with matter as a result of slow light is a promising solution for optical signal processing and control of light in a matter. To obtain a slow light, nanophotonic crystals are very useful for this purpose that can be integrated on the chip at room temperature and transmitting light without any distortion in wide-bandwidth. By means of the symmetry properties of photonic crystals that emerges forbidden band gap during transmission of light, it provides controlling of light in certain frequencies. For this purpose, slow light phenomenon has been pursued by various studies over the years. In addition to the photonic crystal structures in slow-light researches, we explore slow light behavior of specially designed quasi or semi periodic crystal structures because of having rotational symmetry. We emphasized these structures specifically due to their remarkable symmetric properties noted that it had changed the definition of crystal material in the science of crystallography after its exploration. We examine the design and analysis of novel photonic quasicrystal waveguides about their transport mechanisms of light, transmission and dispersion

characteristics systematically by time-domain analysis. To summarize, the proposed structure is used for the first time for such a purpose in this work and the structure is compact for slowing down the photons, has different operating mechanism and original changes are performed in the design phase.

Keywords: Nanophotonic crystals, Quasicrystals, Slow light, Dispersion

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca ve tez çalıŐmalarım boyunca karŐılaŐtıđım her zorlukta hep yanımda olan ve emeğini benden bir an bile eksik etmeyen saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Erdem YAZGAN'a bana olan katkılarından ve anlayıŐlarından dolayı teŐekkürlerimi sunarım.

Hayatımın son 3 yılında ve akademik çalıŐmalarım sürece desteğini benden hiç esirgemeyen ve her ihtiyacım olduğunda mesaisini ayırmakta tereddüt etmeyen kıymetli hocam ve yol göstericim Sayın Doç. Dr. Hamza KURT'a;

Eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan hocalarıma, her zaman desteklerini gördüğüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve bölüm personelimize;

Hayatımdaki her başarıyı kendilerine borçlu olduğum ve attığım her adımda yanımda olan annem, babam, ablalarım ve bütün aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR | v |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | ix |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| SİMGELER DİZİNİ | xiv |
| KISALTMALAR DİZİNİ | xiv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. FOTONİK ve KUAZİ KRİSTALLER | 5 |
| 2.1. Kristal Malzemeler | 5 |
| 2.2. Fotonik Kristaller | 5 |
| 2.3. Kuazi Kristaller | 6 |
| 2.4. Fotonik ve Kuazi Kristal Malzemeler ile Işığın Kontrolü..... | 7 |
| 3. ZAMAN DÜZLEMİNDE SONLU FARKLAR (ZDSF) YÖNTEMİ | 10 |
| 3.1. Nümerik Yöntemler..... | 10 |
| 3.2. Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF)..... | 10 |
| 3.2.1. Maxwell Denklemleri | 11 |
| 3.2.2. Yee Algoritması | 12 |
| 3.3. Meep Algoritması..... | 15 |
| 3.3.1. Sınır Koşulları ve Simetriler | 17 |
| 3.3.2. Izgaralar | 17 |
| 3.3.3. İletim/Yansıma Spektrumu | 18 |
| 3.3.4. Rezonans modları..... | 19 |
| 4. ZAMAN DÜZLEMİ ANALİZİ İLE FOTONİK YAPILARDA DALGA KILAVUZU MODU DAĞINIM İLİŞKİSİNİN ELDE EDİLMESİ | 20 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4.1. | Frekans Düzlemi Analizi..... | 23 |
| 4.2. | Zaman Düzlemi Analizi | 26 |
| 4.3. | Zaman ve Frekans Düzlemi Sonuçlarının Karşılaştırılması..... | 30 |
| 5. | FARKLI ÖRGÜLERDE KUAZİ KRİSTALLERİN İLETİM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ..... | 38 |
| 5.1. | Kuazi Kristal Yapıların Farklı Örgü Çeşitleri İletim Özellikleri | 40 |
| 6. | 8-KAT SİMETRİK KUAZİ KRİSTALLERDE YAVAŞ IŞIK BAŞARIMI | 55 |
| 6.1. | İletim Spektrumu ve Bant Aralığı Özellikleri | 56 |
| 6.2. | Yavaş Işık Yayılımının Zaman Düzleminde Analizi | 59 |
| 7. | FARKLI ÇÖZÜNÜRLÜKLERDE OLUŞTURULAN YAPILARIN VE FARKLI REZONANS FREKANSLARININ İLETİM ÖZELLİKLERİNİN VE YAVAŞLAMA MİKTARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ..... | 62 |
| 7.1. | Çözünürlük Değerinin İletilen Frekans Değerine ve Yavaşlama Miktarına Etkisi | 65 |
| 7.1.1. | Çözünürlük=12 Durumunda Yavaşlama Faktörü Hesabı | 65 |
| 7.1.2. | Çözünürlük=30 Durumunda Yavaşlama Faktörü Hesabı | 65 |
| 7.2. | Ele Alınan Uzun Dalga Kılavuzlarında İletim Özellikleri, Yavaşlama Miktarı ve Optimum Dalga Kılavuzu Genişliğinin İncelenmesi..... | 67 |
| 8. | SONUÇ | 70 |
| 9. | KAYNAKLAR | 75 |
| EKLER | | 86 |
| EK 1: GAUSS DALGASI ve ÖZELLİKLERİ..... | | 86 |
| Bir Dalga Denklemi Çözümü Olarak Gauss Dalgası..... | | 86 |
| Dalga Denklemi | | 87 |
| Tek renkli (Monokromatik) Dalga..... | | 87 |
| Kompleks Gösterim ve Helmholtz Denklemi..... | | 88 |
| Kompleks Dalga Fonksiyonu..... | | 88 |
| Kompleks Genlik..... | | 89 |

| | |
|--|-----------|
| Helmholtz Denklemi | 89 |
| Düzlem Dalga | 90 |
| Küresel Dalga..... | 91 |
| Parabol Dalga : Küresel Dalgaya Fresnel Yaklaşımı..... | 91 |
| Paraksiyal Dalgalar | 92 |
| Paraksiyel Helmholtz Denklemi..... | 93 |
| ÖZGEÇMİŞ | 96 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1 Optik sistemlerde kullanılan yavaş ışık uygulamaları [10]..... | 2 |
| Şekil 2.1 Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristal tabakalar | 6 |
| Şekil 3.1 (a) Yee uzay örgüsünün kübik olarak alınan bir hücresinde elektrik ve manyetik alan vektör bileşenleri (b) Yee algoritmasında alan bileşenlerinin 1-boyutlu düzlemde uzay-zaman gösterimi..... | 13 |
| Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan üçgensel örgü fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD) yapısı. Dielektrik arka planda periyodik olarak oluşturulan hava boşlukları kristal yapıyı oluşturmaktadır. Hava boşluklarının yarıçapı $r=0.3a$, dalga kılavuzu kenarları boyunca değiştirilmiş hava boşlukları yarıçapı $rd=0.4375$, dielektrik arka planın kırılma indeksi değeri ise 3.46'dır..... | 22 |
| Şekil 4.2 Fotonik bant diyagramı. Fotonik kristal dalga kılavuzu dağınım diyagramı olarak da bilinmektedir. Fotonik bant aralığının olduğu bölgede oluşan dalga kılavuzu modu (rezonans) kalın mavi çizgiyle gösterilmektedir. | 24 |
| Şekil 4.3 Yavaş-ışık bölgesinde frekans-etki alanında hesaplanan grup indeks değerleri. Hesaplanan veri noktaları daire içine alınmıştır..... | 25 |
| Şekil 4.4 Dalga kılavuzu modunda zaman-etki alanında çıkarımı yapılan grup indeks değerleri. Mavi noktalar ile gösterilen grup indeks hesaplamaları, Gauss darbenin yapıya her bir frekansta ayrı ayrı gönderilmesiyle elde edilen sonuçlardır. | 25 |
| Şekil 4.5 Yapı içerisinde yavaşlayarak ilerleyen optik sinyalin grup hızı bilgisi v_g 'nin elde edilmesi. Dalga kılavuzu, $z = L$ genişliği ile ifade edilmektedir. | 26 |
| Şekil 4.6 $f_c = 0.2480$ frekansında güdümlü olarak bozulmadan ilerleyen zaman-etki darbelerinin, FKD yapı (grafığın üst kısmında gösterildiği şekilde) içinde $100a$ aralıklarla belirlenen ölçüm noktalarında görüntülenmesi | 28 |
| Şekil 4.7 FKD içerisinde 7 farklı ölçüm noktasında görüntülenenen optik sinyalin zaman-gecikme bilgisi..... | 28 |
| Şekil 4.8 Farklı örgülerde ve kusurlar oluşturularak elde edilen FKD yapıları | 30 |
| Şekil 4.9 (a) Kusurlu (kırmızı çizgi) ve kusursuz (mavi çizgi) durumlarda elde edilen karesel örgüdeki (S-Örgü) FKD yapısının iletim spektrumu (b) Farklı uzunluklarda oluşturulan dört FKD ($10a$ uzunluğunda farklarla) yapısının çıkışlarında elde edilen dört zaman düzlemi | |

| | |
|---|----|
| darbesi (c) $H(\omega) = H(\omega) e^{-j\phi(\omega)}$ sisteminin faz tepkisi $\phi(\omega) = -\text{Arg}[H(\omega)]$ (d) Farklı uzunluklarda oluşturulan dalga kılavuzlarındaki optik sinyallerin gecikme-zaman bilgisi..... | 34 |
| Şekil 4.10 (a) Kusurlu (kırmızı çizgi) ve kusursuz (mavi çizgi) durumlarda elde edilen üçgensel örgüdeki (T-Örgü) FKD yapısının iletim spektrumu (b) Farklı uzunluklarda oluşturulan dört FKD (10a uzunluğunda farklarla) yapısının çıkışlarında elde edilen dört zaman düzlemi darbesi (c) $H(\omega) = H(\omega) e^{-j\phi(\omega)}$ sisteminin faz tepkisi $\phi(\omega) = -\text{Arg}[H(\omega)]$ (d) Farklı uzunluklarda oluşturulan dalga kılavuzlarındaki optik sinyallerin gecikme-zaman bilgisi..... | 36 |
| Şekil 4.11 (a) Kusurlu (kırmızı çizgi) ve kusursuz (mavi çizgi) durumlarda elde edilen üçgensel örgüdeki (T2-Örgü) FKD yapısının (daha yüksek n_g elde etmek için kenar delikleri büyütülen dalga kılavuzu) iletim spektrumu (b) Farklı uzunluklarda oluşturulan dört FKD (10a uzunluğunda farklarla) yapısının çıkışlarında elde edilen dört zaman düzlemi darbesi (c) $H(\omega) = H(\omega) e^{-j\phi(\omega)}$ sisteminin faz tepkisi $\phi(\omega) = -\text{Arg}[H(\omega)]$ (d) Farklı uzunluklarda oluşturulan dalga kılavuzlarındaki optik sinyallerin gecikme-zaman bilgisi..... | 37 |
| Şekil 5.1 Farklı çeşitlerdeki simetrilere sahip kristaller. 5’li simetriye sahip yapının kendini tekrarlamadığı gözlemlenmektedir [98]. | 38 |
| Şekil 5.2 İletim spektrumları incelenen yapılardan örnek olarak verilen 8-kat simetrik “octogonal” kuazi kristal yapı (a) Yapı içerisine yollanan elektromanyetik dalga TM polarizasyonudur ve elektrik alan yapı düzlemine diktir. Yarıçapı 0.30a olan dielektrik silindirlere oluşan arka planı hava (boşluk) olan bir yapıdır. (b) Yapı içerisine yollanan elektromanyetik dalga TE polarizasyonudur ve manyetik alan yapı düzlemine diktir. Yarıçapı 0.30a olan hava boşluklarından oluşan yapının arka planının kırılma indeksi 3.46’dır..... | 41 |
| Şekil 5.3 (a) 5-Kat Simetrik KK (b) 6-Kat Simetrik FK (c) 7-Kat Simetrik KK (d) 8-Kat Simetrik KK (e) 9-Kat Simetrik KK (f) 10-Kat Simetrik KK (g) 11-Kat Simetrik KK (h) 12-Kat Simetrik KK (i) 13-Kat Simetrik KK (j) 14-Kat Simetrik KK (k) 15-Kat Simetrik KK (l) 16-Kat Simetrik KK | 42 |
| Şekil 5.4 5-Kat Simetrik (Penrose) kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları..... | 43 |
| Şekil 5.5 6-Kat Simetrik fotonik kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları | 43 |
| Şekil 5.6 7-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları | 44 |
| Şekil 5.7 8-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları | 44 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.8 9-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları | 45 |
| Şekil 5.9 10-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları | 45 |
| Şekil 5.10 11-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları..... | 46 |
| Şekil 5.11 12-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları..... | 46 |
| Şekil 5.12 13-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları..... | 47 |
| Şekil 5.13 14-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları..... | 47 |
| Şekil 5.14 15-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları..... | 48 |
| Şekil 5.15 16-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları..... | 48 |
| Şekil 5.16 Farklı kat örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılarda, TE ve TM polarizasyonlarında ortak bant aralıklarının belirlenmesi..... | 52 |
| Şekil 6.1 (a) 8-kat simetriye sahip “octagonal” örgülü kuazi kristal yapı. (b) Kuazi kristal yapı kullanılarak oluşturulan dalga kılavuzu | 57 |
| Şekil 6.2 Kuazi kristal yapının ve dalga kılavuzu oluşturulmuş yapının iletim spektrumları . | 57 |
| Şekil 6.3 Farklı uzunluklara sahip fotonik dalga kılavuzları..... | 58 |
| Şekil 6.4 Üç farklı zamanda hesaplanan elektrik alanın dalga kılavuzu içerisindeki dağılımları | 59 |
| Şekil 6.5 Üç farklı zamanda hesaplanan elektrik alanın daha uzun bir dalga kılavuzu içerisindeki dağılımları | 59 |
| Şekil 6.6 Dalga kılavuzunda ilerleyen optik sinyalin grup hız bilgisinin çıkarımı. Δx yapının uzunluğunu temsil etmektedir. | 60 |
| Şekil 6.7 Dalga kılavuzunda ilerleyen sinyalin yol-zaman grafiği | 60 |
| Şekil 7.1 Çözünürlük=12 değerinde kusurlu ve kusursuz yapıların iletim özelliklerinin incelenmesi..... | 62 |
| Şekil 7.2 Çözünürlük=20 değerinde kusurlu ve kusursuz yapıların iletim özelliklerinin incelenmesi..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Şekil 7.3 Çözünürlük=30 değerinde kusurlu ve kusursuz yapıların iletim özelliklerinin incelenmesi..... | 63 |
| Şekil 7.4 Fotonik kuazi kristal dalga kılavuzu içerisinde alınan ölçüm noktalarının gösterimi | 64 |
| Şekil 7.5 Normalize frekans = 0.4695 değerinde yavaş ışık elde edilmesi (a) Yapı içerisine yerleştirilen ölçüm noktalarında görülen Gauss dalga yayılımları (b) Gauss dalgaların uzunluk ve gecikme bilgi değerleri kullanılarak yavaşlama faktörü hesaplanması | 66 |
| Şekil 7.6 Işığın yavaşlama miktarı n_g hesabı için üç farklı uzunlukta ele alınan KK yapıların gösterimi | 67 |
| Şekil 7.7 Dalga kılavuzu genişliği artırılarak incelenen yapıların gösterimi | 67 |
| Şekil 7.8 Dalga kılavuzu genişlikleri artırılarak elde edilen FKD yapıların iletim durumları. | 68 |
| Şekil 7.9 Dalga kılavuzunun büyüklüğünün 180 birime artırılmasıyla çalışılan yapı | 69 |
| Şekil 7.10 FKD genişliğinin 0.2 ve 0.3 kadar artırılmasıyla yapı içerisindeki ölçüm noktalarında gözlemlenen Gauss dalgalar | 69 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Çizelge 3.1 Maxwell denklemleri | 11 |
| Çizelge 5.1 5~8 kat simetrik KK örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılarda, TE ve TM polarizasyonda gönderilen optik sinyale karşı iletim özelliklerinin, FBB ve T-FBB bant aralıklarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi | 49 |
| Çizelge 5.2 9~12 kat simetrik KK örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılarda, TE ve TM polarizasyonda gönderilen optik sinyale karşı iletim özelliklerinin, FBB ve T-FBB bant aralıklarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi | 50 |
| Çizelge 5.3 13~16 kat simetrik KK örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılarda, TE ve TM polarizasyonda gönderilen optik sinyale karşı iletim özelliklerinin, FBB ve T-FBB bant aralıklarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi | 51 |
| Çizelge 5.4 Ortak bant aralıklarının normalize frekans değerleri | 53 |
| Çizelge 7.1 Farklı çözünürlüklerde oluşturulan yapıların rezonans frekans değerleri ve kayma miktarları | 64 |

SİMGELER DİZİNİ

KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|-------|--|
| FBB | Fotonik Bant Boşluğu |
| FKD | Fotonik Kristal Dalga kılavuzu |
| ZDSF | Zaman Düzleminde Sonlu Farklar |
| MM | Moment Yöntemi |
| IE | Integral Denklem Yöntemi |
| FE | Sonlu Elemanlar Yöntemi |
| TLM | İletim Hattı Matrisi |
| TUEK | Perfectly Matched Layer – Tam Uyumlu Eşleşmiş Katman |
| FK | Fotonik Kristal |
| KK | Kuazi Kristal |
| HFD | Hızlı Fourier Dönüşümü |
| AFD | Ayrık Fourier Dönüşümü |
| T-FBB | Tam Fotonik Bant Boşluğu |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |

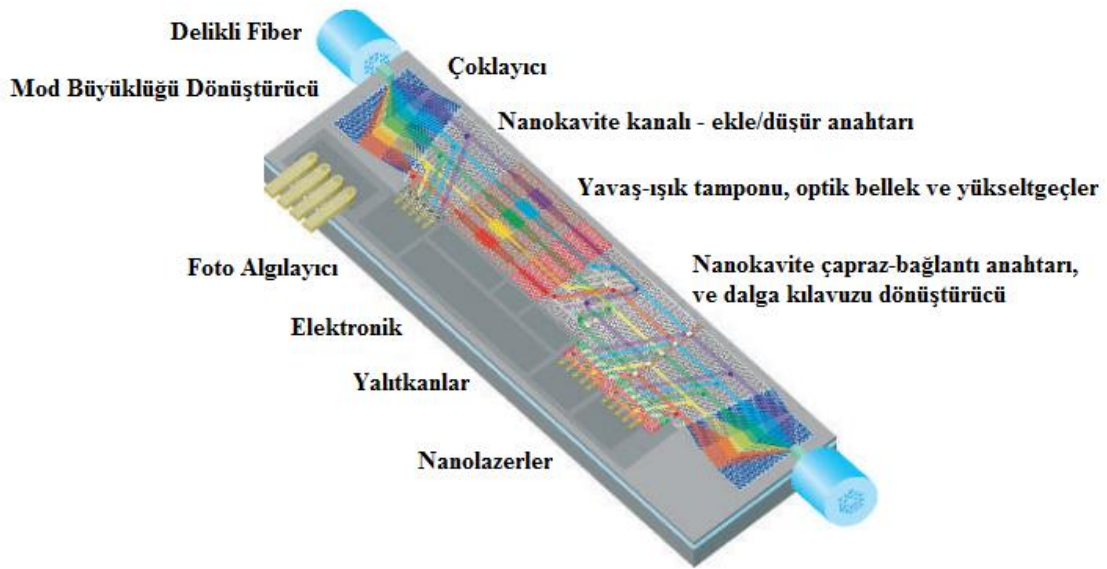
1. GİRİŞ

Yavaş ışık, ışığın grup hızında meydana gelen azalmalar neticesinde ışık yayılımına verilen isimdir. Yavaş ışık, optik sinyallerin zaman düzleminde işlenmesi ve tamponlama işlemleri gibi konular için umut verici bir çözümdür. Bununla beraber optik enerjinin hapsedilmesi, doğrusal ve doğrusal olmayan optik etkilerin geliştirilmesi için yeni olanaklar sunmaktadır. Bu amaçla kullanılan fotonik kristaller gibi nano fotonik malzemeler oda sıcaklığında çip üstüne entegre edilebilmesi ve geniş bant aralığında bozulmaya uğramadan ışığı iletebilmesi gibi özellikleri sayesinde yavaş ışık elde edilmesi için oldukça kullanışlı cihazlardır.

Işık boşlukta bilindiği gibi 3×10^8 m/s'lik hız ile yayılmaktadır. Bu ışığın 1 ns'de 300 mm yol alabileceği anlamına gelmektedir. Yani ışık bir saniyede dünyanın çevresini 7.5 kez turlayabilir. Bu çok yüksek hız iki nokta arasında verinin verimli bir şekilde aktarılması için oldukça cazip imkanlar sunar. Bununla birlikte ışığın yüksek hızda olması zaman düzleminde optik sinyallerin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Yavaş ışık teknolojisi ile bu sorunun üstesinden gelmek için yapılan çalışmalar son yıllarda üzerinde durulan bir araştırma konusudur. Bu hızın daha düşük değerlere çekilmesi beraberinde çok farklı uygulama alanlarına öncülük edeceğinden birçok araştırmacı farklı yöntemler kullanarak fotonları yavaşlatmaya çalışmışlardır [1-15]. Tüm bu yöntemleri iki başlık altında toplayabiliriz. İlk gruptaki yöntemler maddesel yayınma (dispersion) olayına dayanmakta olup egzotik ortamları (atomik ortamlar) kullanmaktadır [4-9]. Bu yöntemlerin maliyeti yüksek olup, gerekli teknoloji karmaşık bir yapıya sahiptir. Ayrıca oda sıcaklığında gerçekleştirilmeleri güçtür ve çalıştıkları bant aralığı kHz mertebesindedir. Daha pratik ve kullanışlı yöntemler ise ikinci kategoride bulunmaktadır. Bunların başında yakın zaman önce önerilmiş olan yüksek kırılma indeksine sahip, dalga boyutunda periyodik yapılar olan fotonik kristaller gelmektedir [10-16]. Bu amaçla daha önce tasarlanan ancak tepki süresinin uzun ve verimsiz olması nedeniyle pek önerilmeyen optik-elektronik dönüştürücüler yerine fotonik yönlendiriciler üzerinde durulmaktadır. Optik tamponlama elemanları, ışık paketlerinin geçici bir süre depolanması ve zamanlanması için kullanılmaktadır.

Son yıllarda iletişim ağlarında optik paketlerinin ağ düğümlerinde kayıpsız olarak yön değiştirmesi önem kazanmıştır. Ağ sistemlerinde trafik akışının düzenli bir şekilde, yüksek veri hızında, yüksek verimlilikte ve düşük güç tüketimi ile sağlanması için kullanışlı çözümler gerekmektedir. Günümüzde optik anahtarlama ve gecikme hatlarının kullanıldığı mekanik yöntemler mevcuttur. Ancak bunların tepki süresinin yavaş olması nedeniyle fotonik aygıtlar

üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Böylece yavaş ışık hızı mekanik yöntemlere göre çok daha etkin bir tepkime hızı ile kontrol edilebilmektedir. Bu sadece tamponlama için değil aynı zamanda geciktirme, oğullama ve evrişim tümlevi hesaplanması gibi problemler için de çözümler sağlamaktadır. Yavaş ışık uygulaması geleneksel girişimlerlere (interferometre) göre daha hassas frekans duyarlılığına sahip olması nedeniyle küçük boyutlarda frekans algılayıcı ve kompakt yüksek çözünürlüklü spektrometre oluşturmak için de kullanılabilir. Buna ek olarak yavaş ışık, ışık madde etkileşimin artırılması yoluyla optik sinyalin ve enerjinin sıkıştırılması gibi avantajlar sunmaktadır. Böylece birim uzunluktaki optik kazancın, emilimin ve doğrusalsızlığın iyileştirilmesiyle Şekil 1.1’de gösterildiği gibi nanolazerler, yükselteçler, oklayıcılar, foto algılayıcılar, emilim modlatrleri ve dalgaboyu dönüştürücüleri gibi optik cihazlar daha küçük boyutlarda elde edilebilmektedir.



Şekil 1.1 Optik sistemlerde kullanılan yavaş ışık uygulamaları [10]

ışık madde içerisinde ilerlerken, maddenin kırılma indisine dayalı fiziksel etkenler nedeniyle boşluktaki hızı c ’den daha düşük bir hızla yayılmaktadır. Yavaş ışık uygulamaları grup hızı v_g ile tanımlanmaktadır. Grup hızı, ışık enerji paketinin ortamda birim zamanda aldığı yolu belirtir. Grup hızı ilerlediği maddenin sadece kırılma indisine değil aynı zamanda frekansa göre değişir. Kırılma indeksi dağınım ilişkisinde, kısa bir frekans aralığında gerçekleşen ani indeks değişimleri olduğunda, grup hızı çok düşük değerlere ulaşabilmektedir.

Bir malzemenin ışık davranışını basitçe anlamak için, zaman düzleminde sinüs fonksiyonlar, bozulmaları sınırlandırarak şekilde yapıya gönderilir. Yapı içerisinde ışık-madde etkileşimi ile ışık, ışık hızı c 'den daha düşük hızda yani faz hızı ile ilerler. Işık ve faz hızı arasındaki oran kırılma indeksini verir. Kırılma indeksi ele alınan malzeme için sabit değildir. Ortamın sıcaklığına, basıncına ve özellikle sinüs ışık dalgasının frekansına bağlıdır. Bu da bozunma (dispersiyon) ya da diğer bir deyişle dağılım denilen bir etkiye yol açar.

Genellikle ışık grup hızı v_g 'nin yavaşlaması, ışığın madde içerisinde ilerlerken ışık-madde etkileşimi neticesinde bozulmaya uğramasıyla oluşan optik rezonans durumuyla oluşur. İlk önce yavaş ışık çok güçlü bozulma sağlayan cihazlarla elde edilmiştir. Ancak daha sonra ilerleyen mühendislik çalışmalarıyla çip üstü entegre edilebilen fotonik kristal dalga kılavuzlarının kullanılması, ışığın hızının yavaşlatılması çalışmalarında önemli olanaklar sağlamıştır.

Işığın yavaşlatılması için kullanılan malzemeler arasında yer alan fotonik kristaller, optik dalga boyu λ 'ya göre düzenli, periodik olarak değişen çok boyutlu periyodik yapılardır. Fotonik kristaller, 1970'li yılların sonlarına doğru özellikle 1980'li yıllarda fotonik bant teorisinin gelişmesiyle beraber araştırmalara konu olmuştur [16-18]. Fotonik bant teorisi, elektronik bant teorisine benzer şekilde fotonik kristal yapı içerisinde ışığın dağılımı özelliklerini incelemek için kullanılmaktadır. Bu teori, bazı frekansların iletilmediği yani yasaklı optik modları barındıran fotonik bant boşluklarının (FBB) varlığını ön görmektedir. 1990'lı yıllarda sonra ise fotonik bant aralıkları oluşturan fotonik kristaller bir çok optik uygulama için incelenmektedir [19-27]. Doğrusal ve doğrusal olmayan optik uygulamaları, optik geciktirme hatları, optik arabellerer ve çok hassas çalışan algılayıcılar sayabileceğimiz uygulama örneklerinden sadece bazılarıdır [28-33].

Tezin ikinci bölümünde, yaptığımız çalışmalar kapsamında kullandığımız, dielektrik ortamlarda ışığın yavaşlatılması için kullanılan, sırasıyla yönlü ve dögüsel simetri özellikleri ve dolayısıyla sahip oldukları yasaklı bant boşlukları ile optik uygulamalar için farklı imkanlar sunan fotonik ve kuazi kristal malzemeler ve özellikleri üzerinde durulmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde, optik uygulamaların zaman düzleminde analizi yapılırken kullanılan Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF) ele alınmıştır. Işığın yapı içerisindeki davranışının ve ilerleyişini gözlemlemek de zaman düzleminde için kullanılan bu yöntemin amaçlarından biridir.

Dolayısıyla ZDSF yönteminin amacı, işleyişi ve kullanım alanlarıyla beraber tez çalışması kapsamında kullandığımız ZDSF yöntemini kullanan ve MIT tarafından geliştirilen elektromanyetik simülasyon yazılımı Meep'in işleyişi üzerinde durulmuştur. ZDSF yönteminin ve dolayısıyla Meep algoritmasının temelini oluşturan Maxwell denklemleri ve Yee algoritmasının teoretiği üzerinde durulmuş bunun yanında yöntemde üzerinde durulması gereken sınır ve simetri koşulları, ızgaralar, iletim ve yansıma spektrumu elde edilmesi ve rezonans modları konularına değinilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde zaman düzleminde sonlu farklar yöntemiyle (ZDSF) zaman-etki alanında kullanılan darbeler analiz edilerek, fotonik yapıların dalga kılavuzu modlarının dağılım özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Bu amaç doğrultusunda grup hızı dağılım özellikleri ve elde edilen sonuçların zaman ve frekans etki alanında karşılaştırılması yapılmıştır. Bunun için yavaş ışığın elde edildiği farklı dizilişteki fotonik kristal yapı örnekleri kullanılarak karşılaştırılan sonuçların tutarlılığı gösterilmeye çalışılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde düzlemsel farklı katlardaki yarı-kristal desenleri TM ve TE yayılma özellikleriyle ayrı ayrı ZDSF kullanılarak incelenmiştir. Böylece döngüsel simetri özelliklerine sahip farklı örgüdeki kuazi kristal yapıların fotonik bant aralığı özelliklerini keşfetmek için sistematik çalışmalar yapılmıştır.

Tezin altıncı bölümünde önceki çalışmalar doğrultusunda yavaş ışık iletimi için ele alınan farklı kuazi kristal yapılardan özellikle 8-kat simetrik kuazi kristal yapılar üzerinde durulmuştur. Bu yapılarda farklı konfigürasyonlarda düzenlenen düzlemsel dalga kılavuzu yapılarının oluşturulmasıyla çalışmaya başlanmış, ZDSF yöntemi kullanılarak dalga kılavuzu rezonans modların iletim özellikleri araştırılmış ve uygun modda yapıya gönderilen ışık paketinin grup hızında yavaşlama miktarı hesaplanmıştır.

Tezin son bölümünde farklı çözünürlükte oluşturulan dielektrik yapıların ve oluşturulan dalga kılavuzlarında iletilen rezonans modlarının ışığın iletim durumuna ve yavaşlama miktarına etkisi üzerinde durulmuştur. Bu amaç doğrultusunda farklı çözünürlükte oluşturulan yapıların iletim spektrumları incelenerek bant boşluklarında oluşan rezonans frekans değerleri belirlenmiş ve yavaşlama faktörleri hesaplanmıştır. Buna ek olarak, uzun yapı içerisinde ışığın dalga kılavuzu içerisinde ilerlemesi zor olduğundan ışığın yapı sonundaki zaman gecikmesini elde etmek zorlaşmaktadır. Bundan yola çıkarak ışığın dalga kılavuzunda daha rahat ilerlemesi için dalga kılavuzu genişliği belirli miktarda artırılarak önce uygun frekans seçimi yapılmış daha sonra zaman gecikmesi hesaplanmaya çalışılmıştır.

2. FOTONİK ve KUAZİ KRİSTALLER

Son zamanlarda dielektrik malzemeler içerisinde ışığın yavaşlatılması için kullanılan fotonik ve kuazi kristaller, sırasıyla yönlü ve döngüsel simetri özellikleriyle düzenli dizilime sahip, yüksek kırılma indeksli, çok boyutlu yapılardır. Yapılan çalışmalar kapsamında dielektrik ortamlarda ışığın taşınma mekanizmasının incelenmesi amacıyla fotonik ve kuazi kristal yapıdaki malzemeler ele alınmıştır.

2.1. Kristal Malzemeler

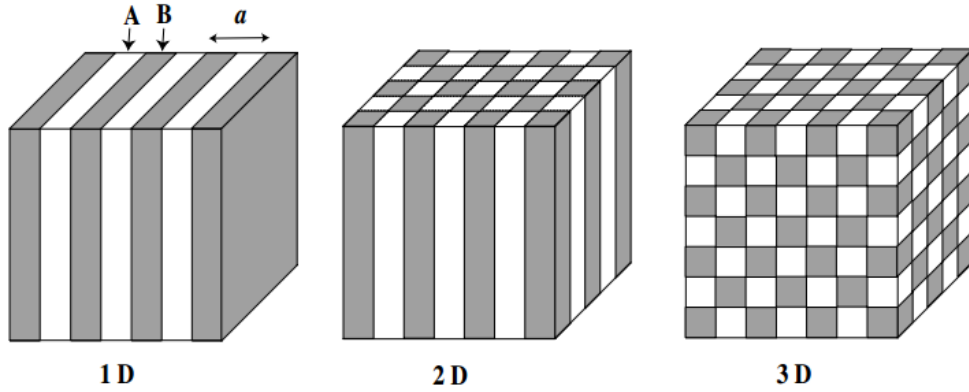
Katı maddeler genellikle iyon, molekül ve atomlarının uzayda düzenli olarak diziliş gösterdiği kristal yapıdadır. Atomların kimyasal özelliklerine göre farklı şekilde tekrar eden desenler oluşturmasıyla sınıflandırılan birçok kristal yapı mevcuttur. Kısaca kristaller periyodik olarak dizilen atom ya da moleküllerin oluşturdukları yapılardır. Kristalin düzenli dizilimi yani belirli bir yönde ilerlediğimizde aynı şekilde görülmesi onun simetri özelliğini gösterir. Birbirini tekrar ederek desen oluşturan birim hücreler düzeni yani periyodikliği oluşturan temel unsurdur. Bu periyodik düzenin çatısını oluşturan yapıya örgü denir.

2.2. Fotonik Kristaller

Fotonik kristaller, atom ve moleküllerin düzenli olarak dizildiği, yani dielektrik sabitinin düzenli olarak değiştiği periyodik sistemlerdir [16]. Sahip oldukları periyodiklik ya da boşluklar sayesinde üzerinden geçen elektromanyetik dalganın belli frekans aralıklarında ve belirli yönlerde ilerlemesine olanak sağlar. Farklı dielektrik sabitine sahip maddeler ya da farklı geometrik dizilişler oluşturularak, elektromanyetik dalganın ya da ışığın ilerlemesi fotonik kristaller yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Bu yüzden son yıllarda fotonik kristaller ve uygulamaları konusunda birçok bilimsel araştırma yapılmıştır [19-33].

Kristal içerisinde kendini tekrar eden bu temel yapılar bütün yapıyla aynı karakteristiğe sahiptir. Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristal desen tabakalar Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Örneğin iki boyutlu örgü şekillerinde, atomların her birinin diğerine aynı mesafede olduğu diziliş şekline karesel örgü denir. Dörtlü simetriye sahip bu yapılarda x ve y eksenlerinde ilerlendiğinde yapının deseni değişmez. Yani bu desen 90 derece döndürülürse aynı deseni elde edilmektedir. Aynı şekilde atomların kendisine komşu olan bütün atomlara aynı mesafede olduğu altılı simetri özelliği gösteren yapı 60 derece döndürüldüğünde ve bir

atomun üç atom tarafından çevrildiği üçlü simetride-üçgensel örgü gösteren yapı 120 derece döndürüldüğünde aynı yapı elde edilmektedir.



Şekil 2.1 Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristal tabakalar

2.3. Kuazi Kristaller

Fotonik kristal yapılardan farklı olarak örneğin pentagonal yani beşli simetri özelliği gösteren yapılarda x ve y eksenlerinde ilerlendiği zaman aynı yapıyı elde etmek mümkün değildir. Beşgensel örgü belirli yönde kendini tekrar etmeye kalktığında desenin bozulduğu ve kristal içerisinde boşluklar oluştuğu görülmektedir.

Bu durum kristalografi biliminde kristal yapı için 2, 3, 4 ve 6'lı simetri dışında simetrinin imkansız olduğunun kanıtıydı. 1984'de Kimyacı Daniel Shechtman laboratuvarında yaptığı deneyler esnasında magnezyum-alüminyum alaşımı bir maddeyi elektron mikroskopunda incelerken mükemmel bir düzen içerisinde, simetri özelliği gösteren ve kendini hiç bir şekilde tekrar etmeyen bir yapı gözlemledi [97]. Shechtman yapıyı 72 derece döndürdüğünde aynı deseni elde ediyordu yani beşli simetri özelliği gösteren bir yapıyı keşfetmişti. Daha sonra sekizli ve onikili simetriye sahip yapılar da bulundu. Rastgele olmayan ve kendini tekrar etmeyen bu yapıların keşfi önceleri bilim dünyasında pek itibar görmese de daha sonra kristalografi alanında çok güçlü bir etki bırakmıştır. Kristal ve kristal olmayan diye sınıflandırılan geleneksel kristal yapılara benzemeyen ve simetri özelliğine yeni bir anlayış getiren bu yapılara kuazi kristal adı verilmiştir. Bu keşifle beraber 1992 yılında Uluslararası Kristalografi Birliği'nin kristal tanımı değişmiştir. Daha önce "kendisini oluşturan parçacıkların düzenli ve tekrarlayan üç boyutlu desenler biçiminde istiflendiği bir madde" olan kristal tanımı,

"temelde ayrık bir kırınım desenine sahip olan katı" olarak değiştirilmiştir. Daniel Shechtman kuazi kristallerde yaptığı araştırmalardan ötürü 2011 Nobel Kimya ödülünü almaya hak kazanmıştır [98].

2.4. Fotonik ve Kuazi Kristal Malzemeler ile Işığın Kontrolü

Fotonik ve kuazi kristaller, farklı dielektrik özelliklere sahip en az iki maddenin birleştirilmesiyle yapay olarak oluşturan periodik kompozit (hetero) meta kristallerdir. Maxwell denklemleri ve Schrodinger denklemi sırasıyla elektromanyetik dalgaların ve elektronların kristal malzemeyle etkileşimi sonrası davranışını incelemek için kullanılmaktadır. Bu kristal malzemeler optik ve iletişim araçlarda ışığın tam kontrolü için kullanılmaktadır. Örnek olarak filtreler, kayıpsız dalga kılavuzları ve aynalar, optik mikrokaviteler, negatif kırılma indeksine sahip lens ve mercekler de kullanım alanlarından bazılarıdır. Bu uygulamalar için ön koşul kullanılan kristal malzemenin yön ve polarizyon bağımsız yasaklı ve geçiş bant aralıklarına sahip olmasıdır. Malzeme düzeninde yapılan uygun bozulmalar sonucu geçiş bant aralıklarında dar geçiş bandı oluşturulabilir.

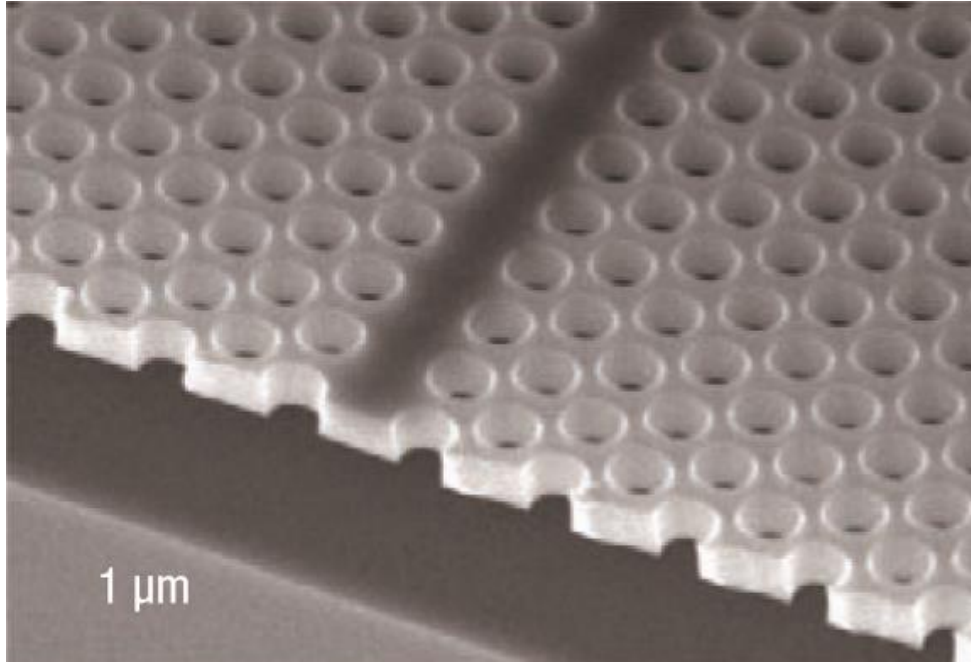
Fotonik kristallerde bant aralığı, yapı içerisindeki dielektrik kısımların periyodik dizilişine ve dielektrik katsayısına bağlı olarak değişmektedir. En uygun periyodiklik ve kırılma indeksi değeri sağlanarak bant genişliği düzgün bir şekilde ayarlanabilmektedir.

Yüksek derecede döngüsel simetriye sahip kuazi kristallerde ise Bragg yansımalarının yoğun bir şekilde gerçekleşmesinden dolayı yüksek frekanslardaki harmonikler periyodik sistemlere göre daha zayıftır. Bu yapılar içerisinde ışığın davranışı bir yandan yayılım ve ilerleme gösterirken bir yandan lokalize olacak şekilde davranış göstermektedir. Bu tür yapılarda Bloch-dalga yayılımını mümkün değildir.

Işığın yavaşlatılması amacıyla yüksek indeksli ince film tabakaya açılan dizi şeklindeki hava delikleriyle oluşturulan iki boyutlu fotonik kristal tabakalar, basit üretim süreci ve optik kayıpların az olması sayesinde günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD), fotonik kristal tabakadaki hava deliklerinin çizgi halinde kaldırılması sonucu yani yapıda kusur oluşturulmasıyla elde edilmektedir [34-44]. Böylece açılan hat yani kusur boyunca ışık yayılımını gerçekleştirir. Işık bu kılavuz içerisinde uygun frekansın seçilmesiyle, toplam iç yansıma ve Bragg yansıması vasıtasıyla dağılmadan yayılır ve yönlendirilir. Bu dalga kılavuzlarında fotonik bant aralıklarının yakınındaki

frekanslarda yani yüksek bozulma etkisine sahip frekanslarda yavaş ışık elde etme çalışmaları yapılmıştır [15, 45-55].

Fotonik kristal dalga kılavuzlarında (FKD) yavaş ışık elde ederken üzerinde durulması gereken iki optik özellik vardır. Bunlar frekans bant genişliği ve yüksek derecede bozulma etkisidir [56]. Genellikle birçok uygulamada geniş bant aralığı istenilen bir durum olsa da bu aynı zamanda daha az gecikme durumunu beraberinde getirir. Yani ışığın yavaşlama miktarı bant genişliğinin yüksek olmasıyla dengelenmektedir.



Şekil 1.1 Fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD) elektron mikroskobu görüntüsü [11]

İkinci olarak, yüksek bozulma yani dağınıklık etkisi daha çok basit FKD'lerde meydana gelen ve optik sinyalin ciddi derece bozulmasına, zarar görmesine neden olur. Bu problem birbirine zıt, farklı yayılım özelliği gösteren FKD'lerin bir araya getirilmesiyle ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır [56-62]. Aynı şekilde modifiye edilmiş FKD'ler [63-69] ve kavite oluşturularak elde edilen çiftlenmiş-rezonatör optik dalga kılavuzları yavaş ışığın bozulmadan elde edilmesi çalışmalarından bazılarıdır [70-79]. Bunun gibi benzer yaklaşımlar sonucunda kısa optik sinyalin yavaşlatıldığı görülmektedir.

İki boyutlu fotonik kristaller üçgensel örgü ve karesel örgü olmak üzere iki gruba ayrılabilir. İlk türdeki yapılar foton hızını düşürmek için önerilen yapıların başında gelmektedir. Fakat bu

yapılardan elde edilen dalga kılavuzları tek ve çift mod olmak üzere iki farklı dalga modunu barındırırlar ve bu modlar arasında etkileşim olabilmektedir. Öte yandan karesel örgü fotonik kristal dalga kılavuzunda tek mod oluşmaktadır. Dolayısıyla dalga kılavuzunda hareket eden fotonların karakteristikleri üçgensel örgü fotonik kristaller için daha karmaşık bir hal almaktadır. İki yapı arasındaki bir diğer önemli farklılık ise düşük-foton hızının olduğu dispersiyon aralığından kaynaklanmaktadır. Karesel örgülü yapıda $k_{\parallel} = 0$ bölgesinde dalga kılavuzundaki fotonların yavaşlaması beklenirken üçgensel örgü fotonik kristal dalga kılavuzunda ise $k_{\parallel} = \pi/a$ olduğu zaman foton hızında düşüş görülmektedir. Bu farklılık üçgensel örgülü yapıların daha kompakt olacağı anlamına gelmektedir. Zira yavaşlatılmak istenen optik sinyali dalga kılavuzuna dik yönde salınım gösterirken, diğer yapıda dalga kılavuzu doğrultusunda salınım gerçekleşmektedir.

Bu çalışmada ışığın fotonik ve kuazi yapılarda taşınma mekanizmasının incelenmesi amacıyla zaman düzleminde sonlu farklar yöntemiyle (ZDSF) zaman-etki alanında kullanılan darbeler analiz edilmiştir. ZDSF yöntemi, kristal yapıların bant boşluklarının oluşumunu gözlememizi sağlamaktadır. Işığın yapı içerisindeki davranışının ve ilerleyişini gözlemlemek de zaman düzleminde için kullanılan bu yöntemin amaçlarından biridir.

3. ZAMAN DÜZLEMİNDE SONLU FARKLAR (ZDSF) YÖNTEMİ

Tez çalışmasının bu bölümünde optik uygulamaların zaman düzleminde analizi yapılırken kullanılan nümerik yöntemlerden Zaman Düzleminde Sonlu Farklar (ZDSF) Yöntemi ele alınmaktadır.

3.1. Nümerik Yöntemler

Optik biliminde elektromanyetik problemler ele alınırken analitik yöntemlerle beraber nümerik yani sayısal yöntemler de kullanılmaktadır. Analitik yöntemlerin ancak basitleştirilmiş ve ideal yapılar için kullanılması, sayısal çözüm yollarının önemini artmıştır. Bu yöntemlerin elektromanyetik problemleri zaman düzlemiyle beraber frekans düzleminde de çözmesi kullanım alanını genişletmektedir. Bu yöntemlere Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF), Moment Yöntemi (MY), Integral Denklem Yöntemi (ID), Sonlu Elemanlar Yöntemi (SE) ve İletim Hattı Matrisi (İHM) gibi örnekler verilebilir.

Zaman düzleminde elektromanyetik simülasyonu basit olarak, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin belli zaman aralıklarında ayrıklaştırılıp çözülmesi işlemidir. Geniş bir alanda kullanılan bu yöntemin başlıca kullanım alanları ise şunlardır:

- **İletim ve Yansıma Spektrumları:** Çok kısa bir bant genişliğine sahip darbenin Fourier Dönüşümü alınarak, geniş bir frekans spektrumu üzerinde saçılma genlikleri hesaplanabilmektedir.
- **Rezonans modları ve frekansları:** Sistemin kısa bir darbeye tepkisi analiz edilerek, kritik frekanslar, azalma oranları, sistemin harmonik modlarının alan örüntüleri (dalga kılavuzu ve kavite modları ve kayıplar dahil) elde edilebilmektedir.
- **Alan örüntüleri (Field patterns):** Herhangi bir kaynağa karşılık gelen alan örüntüleri (Green fonksiyonları) çıkarılabilmektedir.

3.2. Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF)

Bu sonuçlardan yola çıkarak, örneğin Green fonksiyonları bileşenleri yardımıyla taşınan ve iletilen modların bölgesel yoğunlukları gibi sonuçlar hesaplanabilir. Meep'in [80] programlanabilir arayüzü, bu tür farklı türdeki hesaplamaları sıralı ya da paralel bir şekilde hesaplayabilmeyi mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada, bahsedilen nümerik yöntemlerden Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF) kullanılmıştır. ZDSF algoritması genel hatlarıyla zaman ve uzay düzleminin düzenli ızgaralara bölünmesi ve Maxwell denklemlerinin zaman düzleminde benzetiminin yapılması şeklindedir [81]. Bu yüzden uzayın belirli bir noktasında ve belirli bir anında elektrik ve manyetik alan değerlerini birbirine bağlayan Maxwell denklemleri bu yöntemin temelini oluşturur.

3.2.1. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri kısaca elektriksel yüklerin elektrik ve manyetik alanlar için nasıl kaynak oluşturduğunu tanımlamaktadır. Maxwell denklemleri, dört denklemden yani yasadan oluşmaktadır. Bunlar; zamanla değişen manyetik alanlar çevresinde dolaşan elektrik alanını tanımlayan Faraday yasası, Maxwell'in katkısı ile zamanla değişen elektrik alanlar çevresinde dolaşan manyetik alanı tanımlayan Ampere yasası, ve alanların yüklerden nasıl oluştuğunu tanımlayan elektrik ve manyetik alan için Gauss yasalarıdır.

Çizelge 3.1 Maxwell denklemleri

| | |
|--|--|
| Faraday Yasası | Ampere Yasası |
| $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E}$ | $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J}$ |
| $\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$ | $\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} - \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$ |
| Elektrik Alan için Gauss Yasası | Manyetik Alan için Gauss Yasası |
| $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ $\iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \rho \quad (\rho = 0)$ | $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ $\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ |

Çizelge 3.1'de gösterilen Maxwell denklemlerinde \vec{E} elektrik alanı (V/m), \vec{D} elektrik akı yoğunluğunu (C/m^2), \vec{H} manyetik alanı (A/m), \vec{B} manyetik akı yoğunluğunu (W/m^2), $d\vec{A}$ yüzel alanı A 'yı tanımlayan diferansiyel normal vektörünü (m^2), $d\vec{l}$ yatay sınır l 'yi tanımlayan diferansiyel uzunluk vektörünü (m), \vec{J} elektrik akım yoğunluğu (A/m^2), A herhangi bir üç boyutlu yüzeyi, l ise A yüzeyini çevreleyen yatay sınırı ifade etmektedir. Faraday ve Ampere denklemlerinin kartezyen koordinatlarda çözülmesiyle Eşitlik 3.1'de gösterilen 6 adet kısmi türev alan denklemi elde edilmektedir.

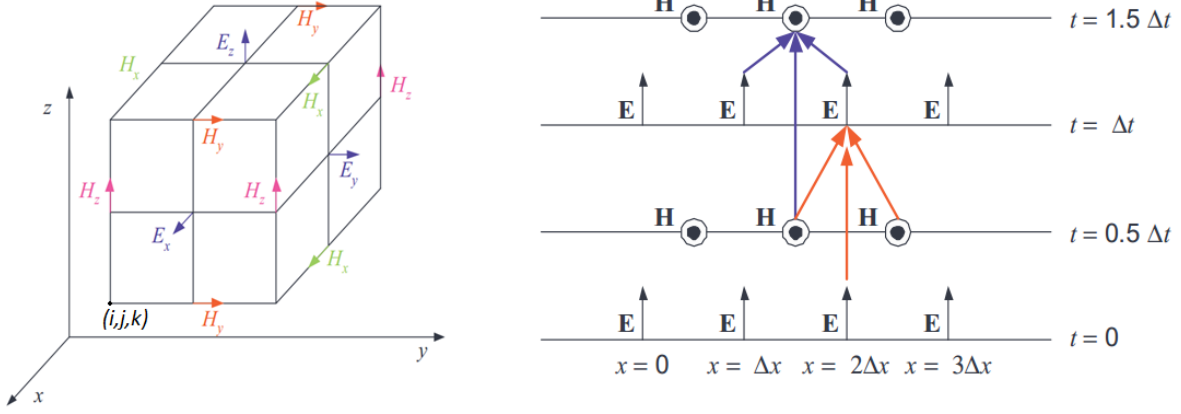
$$\begin{aligned}
\frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\
\frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\
\frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \\
\frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \\
\frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \\
\frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right)
\end{aligned}$$

(3.1)

Eşitlik 3.1'deki Maxwell denkleminin çözülmesiyle elde edilen bu kısmi türev operatörlerinin ($\frac{\partial H_{x,y,z}}{\partial t}$, $\frac{\partial E_{x,y,z}}{\partial t}$) kayıpsız ortamda ($\sigma = 0$) doğrudan zaman ve konum düzleminde çözülmesi için ise Yee algoritması kullanılmaktadır.

3.2.2. Yee Algoritması

Zaman düzleminde ayrıklaştırılan Maxwell denklemleri, ele alınan yapıya ait sınır koşulları da dikkate alınarak yinelemeli (iteratif) olarak çözülür. 1966'da Kane Yee tarafından ortaya atılan bu yöntem, en genel haliyle, üç elektrik ve üç manyetik alan bileşenlerinin uzayın seçilen ayrık noktalarında ve ayrık zaman aralıklarında hesaplanmasına dayanır [81]. Yee algoritması, genel dalga denkleminin alan bileşenlerinin tek tek hesaplanması yerine, Maxwell denklemleriyle elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin uzay ve zamanda beraber çözülmesini sağlamaktadır. Ele alınan yapı birim hücrelerin toplamı şeklinde düşünüldükten sonra ZDSF tekniği ile iteratif çözümler üretilmektedir. ZDSF yönteminde, Maxwell denklemindeki Faraday ve Ampere denklemlerinden yola çıkılarak kısmi diferansiyel işleticiler sayısallaştırılıp sonlu farklar eşdeğerleri ile değiştirilerek düzenlenirse Şekil 3.1'de görüldüğü gibi uzayın her noktasında üç elektrik ve üç manyetik alan bileşenini içeren iteratif denklemler elde edilir. Mevcut ele alınan yapının sınır koşulları da sağlanarak, elde edilen Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3'de verilen ayrık denklemler iteratif olarak çözülmektedir.



Şekil 3.1 (a) Yee uzay örgüsünün kübik olarak alınan bir hücresinde elektrik ve manyetik alan vektör bileşenleri (b) Yee algoritmasında alan bileşenlerinin 1-boyutlu düzlemde uzay-zaman gösterimi

Genel olarak, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin uzayın ayırık noktalarında ve ayırık zaman aralıklarında Maxwell denklemleri yardımıyla teker teker hesaplanmasına dayanan ZDSF yönteminde, yakınsama, dağıtım ve optimizasyon problemleri oldukça önem arz etmektedir. Ele alınan üç boyutlu yapı, birim hücrelerin toplamı şeklinde düşünülerek birbirlerine eş ve boyutları $\Delta_x \cdot \Delta_y \cdot \Delta_z$ olan, $N_x \cdot N_y \cdot N_z$ adet dikdörtgen prizmadan oluşan yüzbinlerce küçük hücreye bölünür ve her bir hücreye ZDSF hücresi adı verilmektedir. Hücre numaraları sırasıyla x, y ve z düzlemlerindeki hücre numaraları olmak üzere tam sayı değerleri (i, j, k) ile belirtilir. Eşitlik 3.1’de elde edilen 6 alan bileşeni, dört bağımsız değişken ile oluşturulan $u(x, y, z, t)$ fonksiyonu olarak tanımlandığında; uzayda ele aldığımız ızgara noktasında alan bileşeni $(i, j, k) = (i\Delta_x, j\Delta_y, k\Delta_z)$ olarak tanımlanmaktadır. Zamanda ayırıklaştırma adımı Δt konumda ise $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ’dir. Her hücrede bütün bileşenler için hesaplama yapmak için $T = n \cdot \Delta t$ kadar süre gerekmektedir. T toplam hesaplama için geçen süreyi, n tam sayısı her bir zaman adımını, Δt ise hesaplama zaman aralığını göstermektedir. Zaman ve konum düzlemlerinde merkezi farklara dayalı karşılıkları ile değiştirilen Maxwell denklemleri her bir hücrede farklı konumlarda yer alan üç elektrik ve üç manyetik alan bileşeni olarak aralarında zaman farkı olacak şekilde iteratif hesaplanır. Elde edilen manyetik alan eşitlikleri:

$$\begin{aligned}
H_x^{n+1/2}(i, j, k) &= H_x^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu(i, j, k)} \left[\frac{E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta y} \right] \\
H_y^{n+1/2}(i, j, k) &= H_y^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu(i, j, k)} \left[\frac{E_z^n(i+1, j, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i, j, k+1) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta z} \right] \\
H_z^{n+1/2}(i, j, k) &= H_z^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu(i, j, k)} \left[\frac{E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta x} \right]
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

Elde edilen elektrik alan eşitlikleri ise, $C_{i,j,k} = \frac{1 - \frac{\sigma(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon(i,j,k)}}{1 + \frac{\Delta t\sigma(i,j,k)}{2\varepsilon(i,j,k)}}$, $D_{i,j,k} = \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon(i,j,k)}}{1 + \frac{\Delta t\sigma(i,j,k)}{2\varepsilon(i,j,k)}}$ olmak üzere,

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1}(i, j, k) &= C_{i,j,k} E_x^n(i, j, k) \\
&+ D_{i,j,k} \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+1/2}(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+1/2}(i, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n+1/2}(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \right] \\
E_y^{n+1}(i, j, k) &= C_{i,j,k} E_y^n(i, j, k) \\
&+ D_{i,j,k} \left[\frac{H_x^{n+1/2}(i, j, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n+1/2}(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{H_z^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k) - H_z^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} \right] \\
E_z^{n+1}(i, j, k) &= C_{i,j,k} E_z^n(i, j, k) \\
&+ D_{i,j,k} \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k) - H_y^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k) - H_x^{n+1/2}(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} \right]
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

Görüldüğü gibi uzayın bir noktasındaki manyetik alan bileşeni aynı noktada bir önceki kendi değerine ve diğer eksenlerdeki komşu elektrik alan değerlerine bağlıyken, aynı şekilde elektrik alan bileşeni de önceki değeri ile komşu manyetik alan değerleriyle belirlenmektedir. Elektrik alan bileşenleri $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t,$ zaman adımlarında hesaplanırken manyetik alan

bileşenleri $t = 0, \Delta t/2, 3\Delta t/2, 5\Delta t/2$, adımlarında hesaplanmaktadır. Yani elektrik ve manyetik alanlar birbirinden $\Delta t/2$ kadar farklı zamanlarda hesaplanmaktadır. Böylece hesaplama bir elektrik alan bir manyetik alan şeklinde iteratif olarak yapılmaktadır. n zaman adımındaki alan bileşeni örneğin E_x^n olarak gösterilmektedir.

3.3. Meep Algoritması

Elektromanyetik sistemleri modellemek için kullanılan ve MIT tarafından geliştirilen zaman düzleminde sonlu farklar (ZDSF) simülasyonu yapmaya yarayan Meep yazılım paketi [80]; rastgele seçilmiş, yön bağımlı, doğrusal olmayan veya dağınımlı (dispersive) elektrik ve manyetik ortamlarda, simetri ve tam uyumlu eşleşmiş katmanlar içeren sınır koşullarında ve kartezyen ya da silindirik koordinatlarda eş zamanlı çalışabilen, alan hesaplamaları sonuçlarını elde etmek için esnek bir kullanım imkanı sağlamaktadır. Meep; programlanabilir olması, uyarlanabilir optimizasyon yetenekleri, zaman düzlemi sonuçlarından frekans düzlemi için çözümler sağlaması, rezonans modlarının analizi gibi gelişmiş sinyal işleme yeteneklerine sahiptir.

Meep algoritmasında ZDSF çözümü için başlangıç noktası olarak zaman-düzlemindeki Maxwell denklemlerini ele alınmaktadır.

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = -\nabla \times \bar{E} - \bar{J}_B - \sigma_B \bar{B} \quad \bar{B} = \mu \bar{H} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = -\nabla \times \bar{H} - \bar{J} - \sigma_D \bar{D} \quad \bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.4-7'de \bar{E} ve \bar{H} elektrik ve manyetik alan şiddetlerini, \bar{D} ve \bar{B} elektrik ve manyetik akı yoğunluğunu, \bar{J} elektrik yük akım yoğunluğunu, \bar{J}_B gerçek olmayan manyetik yük akım yoğunluğunu, σ_B ve σ_D ise frekansa bağlı magnetik ve elektrik iletkenliğini belirtmektedir. Doğrusal dağınımsız (dispersionless) ortamda, ϵ ve μ sırasıyla elektrik ve manyetik geçirgenlik olmak üzere, elektrik ve manyetik akı yoğunlukları ise sırasıyla $\bar{D} = \epsilon \bar{E}$ ve $\bar{B} = \mu \bar{H}$ şeklindedir.

$$\nabla \cdot \bar{B} = -\int (\nabla \cdot \bar{J}_B(t') + \sigma_B \cdot \bar{B}) dt' \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = -\int (\nabla \cdot \bar{J}(t') + \sigma_D \cdot \bar{D}) dt' \equiv \rho \quad (3.7)$$

Genel olarak, elektriksel geçirgenlik değeri ε konumla birlikte frekansa (maddesel bozunma) ve elektrik alan şiddetinin \bar{E} kendisine (doğrusal olmayan) bağlıdır. Bu kayıp ya da kazanç olacağı anlamına gelmektedir. Bu etkiler ve sonuçları Meep algoritmasında anlatılmaktadır [80].

Zaman düzlemindeki hesaplamalarda, ilk değer problemi çözümü olarak alan şiddetleri ve akım değerleri, $t < 0$ anı için sıfır olarak varsayılır. Buna ek olarak, pratik olarak ZDSF algoritması “boyutsuz” yani boyuttan bağımsız $\varepsilon_0 = \mu_0 = c = 1$ olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu seçimle boyuttan bağımsız oranlar elde edilmekte böylece Maxwell denklemlerinin ölçek değişmezliği (scale invariance) ön plana çıkartılarak, iletim spektrumu, frekanslar gibi neredeyse bütün bulgular oran olarak ifade edilerek anlamlı sonuçlar elde edilmektedir. Boyutlar belirlenirken, örneğin herhangi bir a uzaklığı birim uzaklık olarak tanımlanır ve bütün uzaklıklar bu birim cinsinden ifade edilir. Böylece, bütün zaman değerleri zaman birimi olarak a/c cinsinden, bütün frekans değerleri de c/a (buna bağlı açısal frekans ω , birim olarak $2\pi c/a$ cinsinden, optik periyot T ise $f = 1/T$ olduğundan a/c cinsinden ifade edilmektedir. Aynı şekilde λ boşluktaki dalgaboyu olmak üzere $f = a/\lambda$ eşitliği de frekans değerini belirtmektedir. Bloch dalga vektörü \bar{k} nın birimi ise kartezyen düzlemde $2\pi/a$ olarak belirtilmektedir.

Örneğin, kızılötesi frekanslarda nanofotonik yapılar üzerinde çalışırken uzaklıklar büyüklük olarak mikron seviyesindedir. Üzerinde çalıştığımız örnek yapıda birim uzaklık değerini a alır ve $\lambda = 1.65$ dalga boyunda bir kaynak tanımlarsak, frekans değerimiz $f = a/\lambda = 1/1.65 = 0.6060$ ’a eşit olur. Böylece simülasyonu 100 periyot için koşturmak istediğimizde, $165 (= 100/f)$ zaman birimi kadar simülasyon çalışmaktadır.

3.3.1. Sınır Koşulları ve Simetriler

Çalıştığımız problem uzayın sadece belli bir bölgesinde tanımlandığı için, ele alacağımız sistemi ve çalıştıracağımız simülasyonu belli sınır koşullarında sonlandırmamız gerekmektedir. Sonlandırma işlemi sınır koşullarında tanımlanan tam (mükemmel) uyumlu eşleşmiş katmanlar (TUEK) ile yapılır [80]. TUEK'ler tam olarak sınır koşulu olarak kabul edilmez. Bunlar belirlediğimiz sınırlara yerleştirilen, hiç yansıma yapmadan üzerine gelen dalgayı tamamen soğurma özelliğine sahip ideal çok ince tabakalardır. Bu yapıların yansıma katsayısı teorik olarak sıfır kabul edilmesine rağmen yapılan çalışmalarda bazı yansımaların olduğu görülmüş bu yüzden tabakalara kalınlığı belirli ölçülere getirilerek yansıma minimize edilmeye çalışılmıştır. L büyüklüğünde ele alınan ve periyodik olarak dizilen basit birim hücreye ait alan bileşenleri $f(x+L) = f(x)$ eşitliğini sağlamaktadır. *Bloch periyodikliği* sınır koşulları, herhangi bir *Bloch dalga vektörü* \bar{k} için $f(x+L) = e^{jk_x L} f(x)$ genellemesini yapabilmemizi sağlar [82]. Bu eşitlik, çalışmada da yer alan fotonik kristaller ve dalga kılavuzları modlarının çözümü için kullanılmaktadır.

3.3.2. Izgaralar

ZDSF yöntemi başlangıç noktası olarak, uzay ve zamanı belirli büyüklükteki dikdörtgenel izgaralara ayırır. Ele alınan problemdeki yapı birim hücrelerin toplamı şeklinde düşünülerek binlerce küçük eş hücreye bölünür. Bu hücrelerde farklı yerlerde konuşlandırılan elektrik ve manyetik alan bileşenleri aralarında zaman farkı olacak şekilde belirlenen süre içerisinde iteratif olarak çözülür. Bunun için *Yee izgara* ayrıklaştırma tekniği kullanılır [83]. Buna göre, uzay ve zaman boyutunda kademelere ayrılmış elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin her bir kademedeki örneklemeleri alınarak uygun sınır koşullarında basit doğrusal interpolasyon tekniği ile bir araya getirilir. Böylece zaman ve konum aralıkları arasında bir kararlılık ve süreklilik sağlanmış olur. [83-87]. Eğer bu izgaraların uzaysal çözünürlüğüne Δx denilirse (belirlenen çözünürlük x , y ve z koordinatlarında aynıdır), her bir zaman adımı $\Delta t = S\Delta x$ ile ifade edilir. Bu ifadede S Courant faktörüdür ve $S < n_{\min} / \sqrt{\text{boyut sayısı}}$ eşitliğini sağlamak zorundadır. n_{\min} değeri, minimum yansıma katsayısıdır ve sistemin kararlı olması açısından genellikle $n_{\min} = 1$ olarak kabul edilir. Yapılan simülasyonlarda, bir boyutlu yapılardan üç boyutlu yapılara kadar Courant faktörü değeri öntanımlı olarak $S = 0.5$ seçilmiştir. Bu seçim,

$\Delta t = S\Delta x$ ifadesine göre, yapılan simülasyonlarda ızgara çözünürlüğünü iki katına çıkardığımızda simülasyon süresinin de iki katına çıkacağını gösterir.

3.3.3. İletim/Yansıma Spektrumu

Üzerinde çalışılan yapıların iletim ya da saçılma spektrumu hesaplaması ZDSF yönteminin en sık kullanıldığı durumlardan biridir. Zaten ZDSF yöntemiyle zaman düzleminde simülasyon yapılmasındaki asıl amaç, ele alınan yapının geniş frekans aralığında davranışının incelenmesidir. Zaman düzleminde yapıya gönderilen kısa darbenin tepkisi, Fourier dönüşümü ile geniş frekans aralığında hesaplanarak iletim ya da yansıma spektrumu çıkartılır. Yapıya gönderilen işaret, düzlem ya da Gauss dalga şeklinde belirlenir. Gauss dalgasının elde edilmesi ve özellikleri EK:1'de verilmiştir. Genel olarak, Eşitlik 3.8'de gösterildiği gibi belli bir frekansta yapının ilettiği güç değeri, Poynting vektörü \hat{n} , elektrik ve manyetik alan şiddetleri kullanılarak aşağıdaki integral eşitliği ile hesaplanır:

$$P(\omega) = \text{Re } \hat{n} \cdot \int \bar{E}_\omega(x)^* \times \bar{H}_\omega(x) d^2x \quad (3.8)$$

$\bar{E}_\omega(x)$ ve $\bar{H}_\omega(x)$ değerlerinin akı düzlemindeki her bir noktada Fourier dönüşümü alınarak, n zaman aralığında seri toplam şeklinde de $P(\omega)$ değeri hesaplanabilir:

$$\tilde{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_n e^{j\omega n\Delta t} f(n\Delta t)\Delta t \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{j\omega t} f(t) dt \quad (3.9)$$

Ancak güç değeri $P(\omega)$ tek başına kullanışlı değildir. Bu yüzden her bir frekansta başlangıç güç değerine bölünerek normalize edilmesi gerekir. Bu uygulama için ise simülasyonu iki defa koşturmak gerekir. Birincisi simülasyon, yapı olmaksızın başlangıç dalgasını göndererek; ikincisi ise, saçılmaya neden olan tasarladığımız yapı içerisine dalga gönderilerek gerçekleştirilir. Sonuç olarak, birinci güç hesabı normalize işlemi için kullanılır. Bununla

beraber iletim spektrumu yanında, yansıma spektrumu da hesaplanabilir. Bu hesap, dalganın ilerleyen yönünün tersinde akı hesabıyla gerçekleştirilemez. Çünkü bu hesap bize yansıyan güçle birlikte başlangıç gücünün toplamını vermektedir. Aynı şekilde, geri dönen yani yansıyan akıdan başlangıç akısını çıkaratarak iletilen akıyı hesaplamak da mümkün değildir. Çünkü iletilen ve yansıyan dalgalar arasında girişim etkileri söz konusudur. Bu yüzden yansıma güç hesabı, Fourier dönüşümü alınmış başlangıç alan şiddetleri $\bar{E}_\omega^{(0)}(x)$ ve $\bar{H}_\omega^{(0)}(x)$ değerlerinin, $\bar{E}_\omega(x)$ ve $\bar{H}_\omega(x)$ değerlerinden çıkarılarak Eşitlik 3.10'da gösterilen integral eşitliği ile hesaplanır:

$$P_r(\omega) = \text{Re } \hat{n} \cdot \int [\bar{E}_\omega(x) - \bar{E}_\omega^{(0)}(x)]^* \times [\bar{H}_\omega(x) - \bar{H}_\omega^{(0)}(x)] d^2x \quad (3.10)$$

Aynı şekilde normalize işlemi için, yapı olmaksızın ve yapıyla beraber simülasyon iki kez koşturulup, akı hesaplanmadan çıkarma işlemi yapılarak yansıma spektrumu hesaplanabilmektedir.

3.3.4. Rezonans modları

ZDSF ile fiziksel bir problemin çözümü için gerçekleştirilen benzetimlerde önemli bir husus da frekans analizidir. Ele alınan yapının rezonans modlarının ya da eigen modların çıkarılması, ZDSF'nin kullanım alanlarından biridir. Örneğin, fotonik kristal ya da dalga kılavuzunun belli bir dalga vektörü \bar{k} için harmonik modları çıkartılabilir. Bununla beraber, belli bir bölgede ışığı uzun süre hapseden resonant kavitelelerin modlarının belirlenmesinde, rezonans frekansı ω ve kalite faktörü Q hesabında bu yöntem kullanılmaktadır. Bu değerli frekansların çıkartılmasında izlenecek yol şu şekildedir: Öncelikle Bloch-periyodikliğe ve tam uyumlu eşleşmiş katmanlara (TUEK) sahip sınır koşullarına sahip periyodik yapı oluşturulduktan sonra dar-bantlı kısa darbe; kavite, dalga kılavuzu ya da yapının içerisine istenilen bir yere yerleştirilir. Kaynak belli süreyle çalıştırıldıktan sonra kapatılır ve alanların yapı içerisinde sıçrama yaptığı yerler, dağılımlar belirlenerek, değerli frekans değerleri analiz edilir. Harmonik analiz, en basit şekliyle her bir noktadaki alan değerlerinin Fourier dönüşümünün alınmasıyla yapılır. Geniş frekans aralığında analiz edilen sistemde, keskin iniş ve çıkış yapan tepe noktası değerleri gözlemlenerek harmonik modlar belirlenir. Bu modların frekansları belirlendikten sonra, simülasyon belirlenen frekansta ve dar-bant aralığında tekrar çalıştırılır böylece tek bir modda yapı içerisindeki alan dağılımları gözlemlenmektedir.

4. ZAMAN DÜZLEMİ ANALİZİ İLE FOTONİK YAPILARDA DALGA KILAVUZU MODU DAĞINIM İLİŞKİSİNİN ELDE EDİLMESİ

Bu bölümde zaman düzleminde sonlu farklar yöntemiyle (ZDSF) zaman-etki alanında kullanılan darbeler analiz edilerek, fotonik yapıların dalga kılavuzu modlarının dağınım özellikleri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. ZDSF yöntemi, basitçe kusursuz yapıda bant boşluklarının oluşumunu gözlememizi sağlar. Yapıda oluşturulan kusurlar ise rezonans modlarının ortaya çıkmasına neden olur. Bu çalışmadaki yaklaşımı doğrulamak için oluşturulan test ortamında kullanılan fotonik kristal dalga kılavuzları, temel olarak karesel ve üçgenel örgüye sahiptir. Bu tür dalga kılavuzlarında dağınım ilişkisi dalga vektörü üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan bağımlılığa sahiptir. Bu çalışmada zaman düzlemi ölçümleriyle, doğrusal dağınım ilişkisine sahip bölgede frekans düzleminde elde edilen dispersiyon yani dağınım ilişkisi hesaplanmaya çalışılmıştır. Dalga kılavuzu yapısının doğru karakteristik özellikleri ancak grup indeks değerinin çok kısa dalga boyu aralığında hızlı bir şekilde değiştiği yavaş ışık bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Periyodik olmayan ya da yarı periyodik yapılarda çok büyük süper-hücre kullanmak gerektirdiğinden dağınım ilişkisi çıkarımı gibi frekans-etki alanı hesaplamaları yapmak çok zordur. Dolayısıyla zaman-etki alanı yöntemleri kullanarak dağınım diyagramlarının elde edilmesi özellikle periyodik olmayan yapılar için alternatif bir yaklaşımdır. Buna ek olarak, ele alınan yapı zaman düzlemi yaklaşımıyla, ayrık Fourier dönüşümü hesaplaması ve faz bilgisi çıkarımı yapılmasıyla, yavaş ışık bölgesinde yavaşlama faktörü n_g değeri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, spektral analiz sonuçları ve zaman düzlemi sonuçları önce ayrı ayrı ele alınmış yavaşlama faktörü n_g değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra zaman düzlemi sonuçlarından Fourier dönüşümü yardımıyla dağınım ilişkisi değerleri hesaplanmıştır. Kıyaslama yapmak için yavaş ışık n_g değeri üzerinde durulmuş ve iki farklı düzlemde sonuçlar arasında uyum elde edildiği görülmüştür. Bu çalışma, fotonik periyodik ve periyodik olmayan yapıların diğer türleri için dağınım ilişkisi ve grup hızı gecikmesi gibi sonuçların elde edilmesi için kullanılabilir.

Fotonik yapılarda elektromanyetik dalga yayılımı, optik frekans ω ve dalga vektörü k arasındaki ilişki olarak tanımlanan dağınım (bozunma) ilişkisi $\omega(k)$ ile belirlenir. Her dalga kılavuzu yapısı iletilen modun spektral özelliklerini barındırır. Genellikle frekans düzlemi analizi dağılım eğrilerinin elde edilmesiyle yapılmaktadır. Fotonik kristaller olarak bilinen

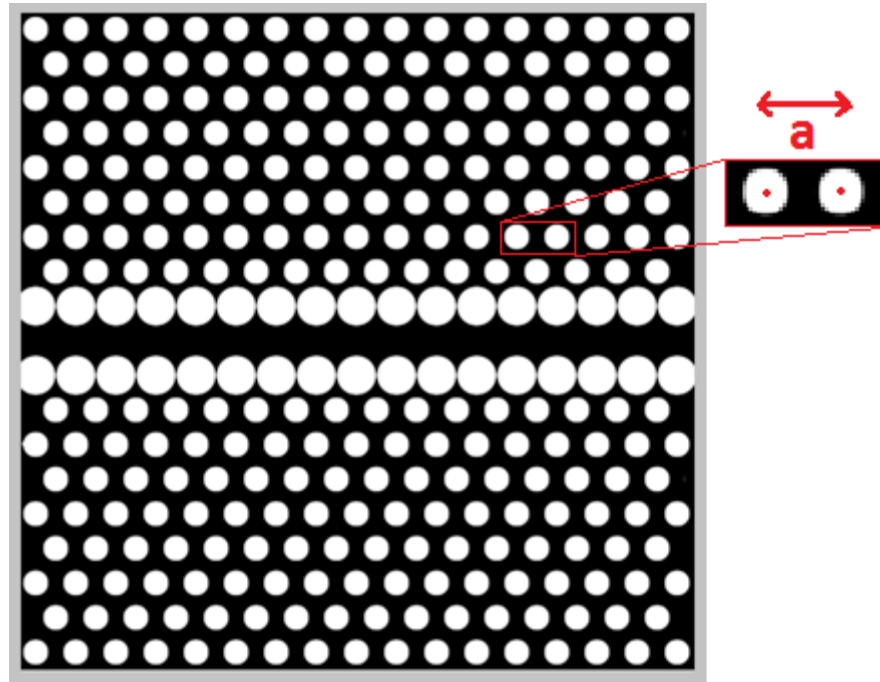
periyodik fotonik yapıların dağılım ilişkisini elde etmek için güçlü ve basit bir sayısal yöntem olan düzlem dalga yöntemi (PWM) kullanılmaktadır [88]. PWM, alan profillerinin ortaya çıkarılmasına ek olarak, iletilen modlarının tek ya da çift olduğunun ve bu modların sayısının belirlenmesi ya da bant diyagramlarının incelenerek dalga kılavuzu modunun kesim frekanslarının anlaşılması için de kullanılmaktadır. Optik dalga kılavuzlarında iletilen modun grup hızı v_g , dispersiyon çizgisinin eğimi ve grup indeks değeri ile belirlenir. Bu değer de bir ışık dalgasının dalga kılavuzu boyunca ilerlerken hızlı ya da yavaş nasıl hareket ettiğinin ölçüsüdür.

Fotonların iletimini sağlamak ve akış yönünü değiştirmek için güçlü optik yeteneklere sahip fotonik kristal dalga kılavuzları (FKD) son yıllarda önemli bir araştırma konusudur. Periyodik yapılarda sistematik, düzenli bir şekilde oluşturulan kusurlar sayesinde elde edilen geometrilerle dalga kılavuzunun oluşturulması sağlanmaktadır [82]. Bu tip dalga kılavuzlarının kırılma endeksi-sınırlandırıcı dielektrik dalga kılavuzları ile karşılaştırıldığında üstünlüğü sınırlandırıcı mekanizması farklılığından kaynaklanmaktadır. Fotonik bant aralığı (FBB) etkisi, fotonik kristal dalga kılavuzlarında (FKD) ışığın toplam iç yansıma şeklinde hapsedilerek taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır. FBB bölgesinde belirli bir frekans aralığında çok düşük grup hızı elde edilebilir. Fotonik kristal dalga kılavuzlarında, yavaş ışık rejiminin dağılım etkisinin doğru analiz edilmesi çok önemlidir. Çünkü bu tür optik geciktirme hatları, optik tamponlar ve doğrusal olmayan optik sistemler gibi pek çok uygulamayı gerçekleştirmek için doğru analiz yöntemleri büyük önem taşımaktadır [11, 48-49, 55, 58, 89-91].

Bu bölümde, zaman düzleminde FKD yapıları içerisinde dalga iletimi analizi sonuçlarından dalga kılavuzu modunun dağılım etkisinin elde edilmesi üzerinde durulmaktadır. Zaman düzleminde sonlu farklar (ZDSF) yöntemi, bu amaç doğrultusunda yapı içerisinde yayılan ışık dalgasının iletimininin gerçek uzayda analizi için oldukça uygundur. FKD içerisinde yayılan ışığın grup hızı v_g ve grup indeks değeri n_g ile ilişkisinin belirlendiği bu çalışma için önerilen yöntem bir sonraki aşamada anlatılmıştır. Buna göre, dar bantta yapı içerisine gönderilen optik dalganın zamansal dinamiklerinin elde edilmesiyle, dalga kılavuzu modunun frekans düzleminde spektral özellikleri ortaya çıkarılabilmektedir.

FKD yapılarının dağılım ilişkisinin ortaya çıkartılması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genel olarak zaman-uçuş ölçümü, Fabry-Perot rezonansları, Fourier düzlemi analizi, Mach-Zender girişim ölçerlerinin saçak analizi ve k uzayı sönümlenen bağlaşım yöntemi gibi yaklaşımlara dayanmaktadır [47-48, 60, 91-95]. Grubu dizini ve grup hızı hesaplamaları bu

çalışmalarda bildirilmiştir. Yavaş ışık bölgesinde ışık dalgasının spektral özelliklerini elde etmek oldukça zordur. Çünkü bu bölgede yüksek oranda bozulma gerçekleşmesi, grup index değeri belirlenmeden veri noktalarının ara değerlerini hesaplamaya zorlamaktadır. Fabry-Perot rezonanslarından doğabilecek ek salınımlar, girişim ölçmeye dayanan tekniklerin kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kullanılan Fourier dönüşümü tekniğiyle zaman düzleminde geniş bir bant kaynağı kullanılarak, tek bir ölçüm ile spektral özellikler ortaya çıkartılabilmektedir. Zaman-uçuş yöntemi aynı anda birçok hesaplama gerektirdiğinden optik dalganın bozulma durumu dikkatli bir şekilde incelenmelidir.



Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan üçgensel örgü fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD) yapısı. Dielektrik arka planda periyodik olarak oluşturulan hava boşlukları kristal yapıyı oluşturmaktadır. Hava boşluklarının yarıçapı $r=0.3a$, dalga kılavuzu kenarları boyunca değiştirilmiş hava boşlukları yarıçapı $r_d=0.4375$, dielektrik arka planın kırılma indeksi değeri ise 3.46'dır.

Daha önce belirtildiği gibi dalga kılavuzu modu frekans düzleminde düzlem dalga metodu (PWM) ile elde edilmektedir. Buna göre dağılım eğrisinin eğimi grup hızını $v_g = \partial\omega / \partial k$

vermektedir. Ayrıca, c boşlukta ışık hızı olmak üzere, grup indeks değeri $n_g = c/v_g$ denklemiyle elde edilmektedir.

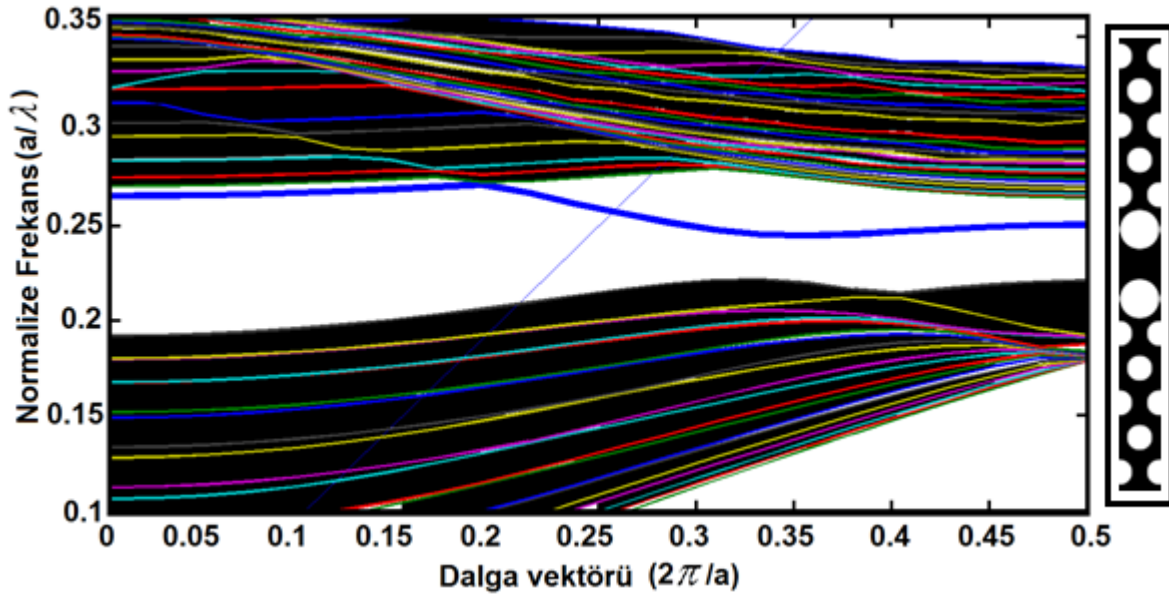
Zaman düzleminde ise frekans düzlemiyle elde edilen sonuçlar farklı şekilde elde edilmektedir. Bu tür yapıların grup indeks değerini hesaplamak için iki yol vardır. İlk yöntemde aynı FKD içinde farklı noktalarda ölçüm değerleri alınır. İkinci yöntemde ise farklı uzunluğa sahip FKD yapıların sonuna Gauss ışık sinyalinin varış zamanı hesaplanarak grup indeks değeri elde edilir. Bu iki yöntemin de uygulanabilir olmasının nedenleri, ele alınan FKD örneklerinin dalga kılavuzu boyunca simetrik olması ve Gauss dalganın uygun kesim frekansında seçilmesiyle bozulmaya uğramadan dalga kılavuzu içerisinde ilerleyebilmesidir. Böylece iki yöntemde de aynı sonuçlara varıldığı gözlemlenmiştir. Bölüm 4.4'de ele alınan ikinci yöntem sonuçların tutarlılığını göstermektedir. Bu bölümde şu şekilde bir yöntem izlenmiştir: İlerleyen optik sinyalin grup hızıyla ilişkisi, ΔL , iki farklı noktada ele alınan ölçüm noktaları arasındaki uzunluk yani optik yol ve $\Delta t = t_2 - t_1$, sinyalin bu noktalar arasında geçirdiği süre olmak üzere $v_g = \Delta L / \Delta t$ denklemiyle ifade edilir. Gauss olarak ayarlanmış sinüs dalgası L mesafesi boyunca ilerlerken, gecikme süresi sinyalin dalga kılavuzu içerisinde farklı noktalarda alınan örnekleri görüntülenerek hesaplanır.

Giriş darbesinin merkez frekansı kapsayacak şekilde ayarlanmasıyla dalga kılavuzu modunun dağıtım ilişkisi tam olarak çıkarılabilmektedir. Bu yöntemin zorluğu, dalga kılavuzu modunun alt sınırlarında yer alan yavaş ışık bölgesinde bozulmalardan kaynaklanan sorunlardır. Bunun için gönderilen sinyal mümkün olduğunca uygun frekansta ve dar bant aralığında gönderilerek dağıtım ilişkisi doğru bir şekilde elde edilmeye çalışılmaktadır.

4.1. Frekans Düzlemi Analizi

Zaman düzleminde ZDSF analizi ve frekans düzleminde PWM sonuçlarını karşılaştırabilmek amacıyla ele alınan yapı, dielektrik arka plana hava deliklerinin açılmasıyla oluşan Şekil 4.1'deki iki boyutlu üçgensel örgü dalga kılavuzu yapısıdır. Dalga kılavuzu, z yönünde (ΓX simetri yönünde) hava deliklerinin sıra halinde kaldırılmasıyla oluşturulmuştur. Işık-madde etkileşiminin artırılması amacıyla dalga kılavuzu kenarlarındaki hava deliklerinin boyutları artırılmıştır. Fotonik kristal yapısını tanımlayan parametreler $r/a = 0.3$ ve $\epsilon_r = 12$ 'dir. Hava çubuklarının yarıçapı r , örgü birimi ise a ile ifade edilir. Dalga kılavuzu bölümünün kenarındaki deliklerin yarı çapı yüksek n_g elde etmek için $r/a = 0.4375$ 'e artırılmıştır. Ayrıca dağıtım grafiği olarak da bilinen fotonik bant diyagramının hesaplanması için TE

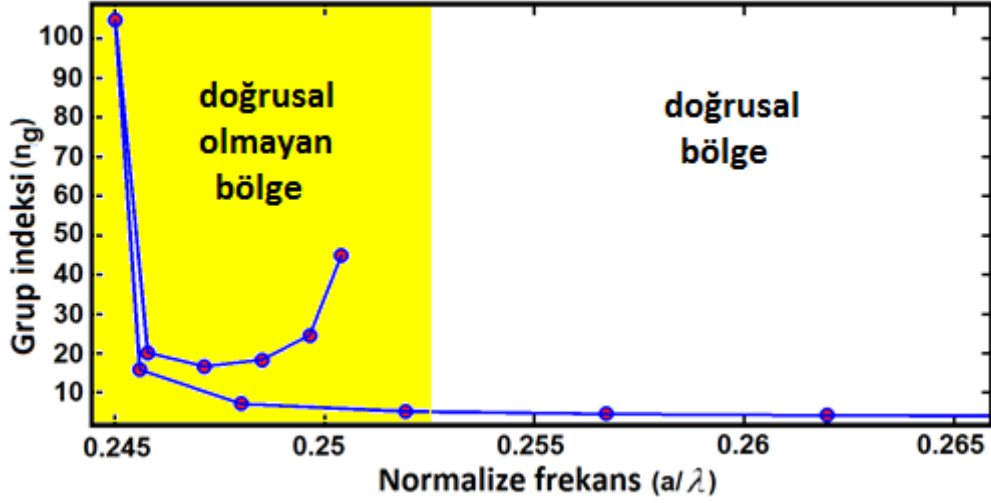
polarizyonunda düzlem dalga metodu PWM ile süper-hücre yapısı kullanılmıştır [88]. İncelenen birim hücre yapısı Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. FKD yapısının dağınım diyagramını elde etmek için MIT'nin ücretsiz kullanılabilir frekans düzlemi analizi yapan MPB yazılımı kullanılmıştır [88]. Dalga vektörü yoğun bir şekilde ayrıklaştırılmıştır ve öz-değer yakınsaması yeterli sayıda düzlem dalga kullanarak sağlanmaya çalışılmıştır. Kalın mavi çizgi ile gösterilen dalga kılavuzu modu, Şekil 4.2'deki bant diyagramında gösterildiği gibi koyu renkli süreklilik arz eden devamlı bant durumları tarafından çevrilmiştir.



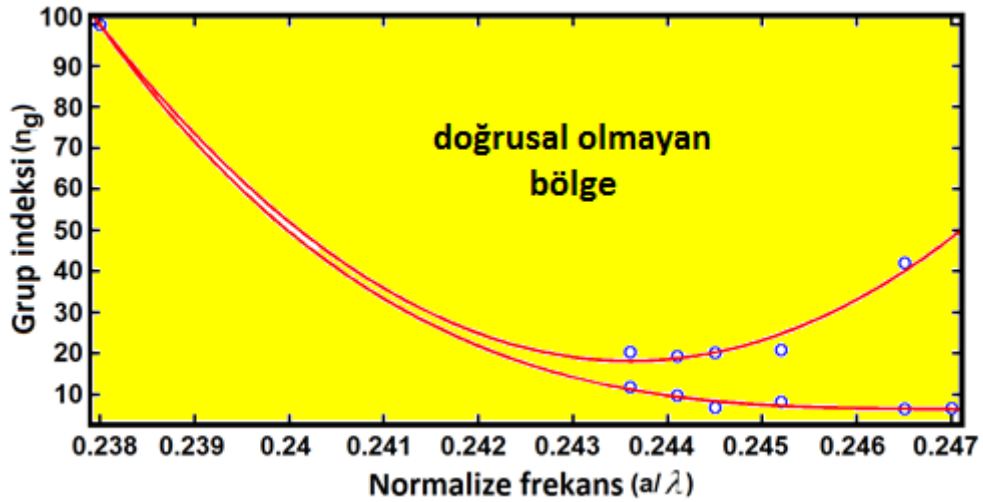
Şekil 4.2 Fotonik bant diyagramı. Fotonik kristal dalga kılavuzu dağınım diyagramı olarak da bilinmektedir. Fotonik bant aralığının oluştuğu bölgede oluşan dalga kılavuzu modu (rezonans) kalın mavi çizgiyle gösterilmektedir.

Dalga kılavuzu modunun üst sınırı hava bantlarının devamlı durumları (continuum states) ile birleşmiştir ancak dielektrik bantların süreklilik durumları ortaya çıkmadan önce alt sınır bir fotonik bant boşluk bölgesi ile bir sınır paylaşmaktadır. Dalga vektörünün iletilen mod için gerçel kısmı vardır ve sanal kısmı sıfırdır. Öte yandan, fotonik bant boşlukları bölgesi içinde dalga sönümlenmektedir ve dalga vektörü sıfır olmayan sanal kısma sahiptir. Düzlem dalga yönteminde, k-noktaları ayrık değerler alır. Bundan dolayı dağınım eğrisi üzerine ikinci dereceden bir polinom oturtularak grup hızı hesaplanabilir. Bu dönüşüm Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, yüksek frekans bölgesinde grup hızı doğrusaldır. Frekans değeri kesim frekans değerine yaklaştıkça doğrusallıktan uzaklaşmaktadır.

Dalga boyu yavaş ışık bölgesine ($k_{||} = 0.5 \times 2\pi a / c$) girdiğinde grup hızı değeri çok küçük değerlere yaklaşmaktadır. Dielektrik arka planda hava deliklerinin açılmasıyla oluşan iki boyutlu fotonik kristal yapıların polarizasyon duyarlılığına göre bu çalışmada sadece TE polarizasyonunda (düzlemde elektrik alanlar hesaplanarak) çalışılmıştır.



Şekil 4.3 Yavaş-ışık bölgesinde frekans-etki alanında hesaplanan grup indeks değerleri. Hesaplanan veri noktaları daire içine alınmıştır.

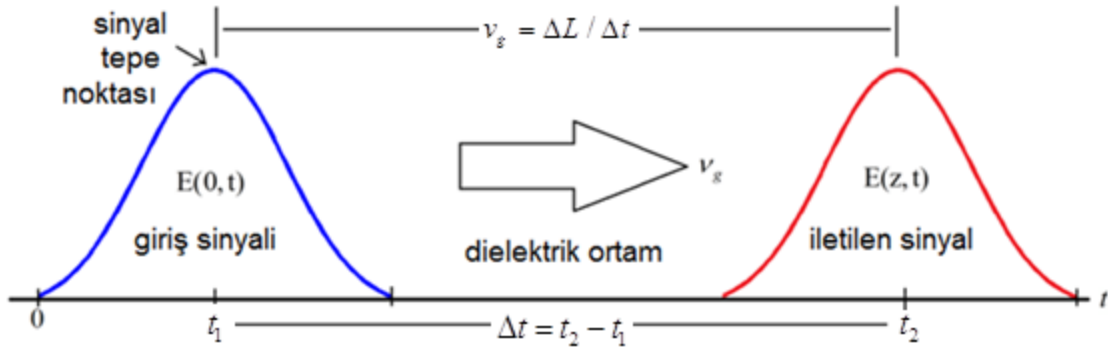


Şekil 4.4 Dalga kılavuzu modunda zaman-etki alanında çıkarımı yapılan grup indeks değerleri. Mavi noktalar ile gösterilen grup indeks hesaplamaları, Gauss darbenin yapıya her bir frekansta ayrı ayrı gönderilmesiyle elde edilen sonuçlardır.

4.2. Zaman Düzlemi Analizi

Fotonik kristal yapıda sıra halinde bir satır hava çubuklarının kaldırılmasıyla oluşan dalga kılavuzu FKD yapısında, çift tipinde sadece tek bir mod oluşmaktadır. Kılavuzlu yani iletilen modun kesim dalga boyları 0.245'ten 0.272'ye kadar olan normalize frekans bölgesini kapsamaktadır. Bu bölümün amacı, zaman-etki analizi kullanarak FKD modunun dağınım ilişkisini elde etmek ve frekans etki alanı sonuçları ile karşılaştırarak sağlamasını yapmaktır. ZDSF yöntemi daha önce bahsedildiği gibi niteliği değiştirilmiş Gauss sinyallerinin yapı içerisinde görüntülenmesini sağlamak için kullanılır. Böylece ışık yayını ve yapı içinde yayını denetlenebilir. Yöntemin uygulanacağı hesaplama alanı, tam uyumlu eşleşmiş katmanlar (TUEK) kullanılarak çevrelenir [81, 96]. Ele alınan FKD, incelenen dalga boyu aralığı içinde tek modlu dalga kılavuzudur ve çift modu desteklemektedir. Yani, dalga kılavuzu modunun uyarımı, giriş sinyalinin çift simetri özelliğine sahip olmasını gerektirmektedir.

Dielektrik yapı içerisine doğru ilerleyen ışık miktarı, bazı frekans aralıklarında yani yasaklı bölgelerde (FBB) sifira yaklaşmaktadır. Bu özellik iletim spektrumuna bakıldığında, frekans boşluklarında oluşan güdümlü modların belirlenmesi için önemlidir. Bu modlar kalite faktörleri mertebesinde ışığı yavaşlatma yeteneğine sahiptir ve merkez frekans aralığında sabit grup index değerini alırlar.



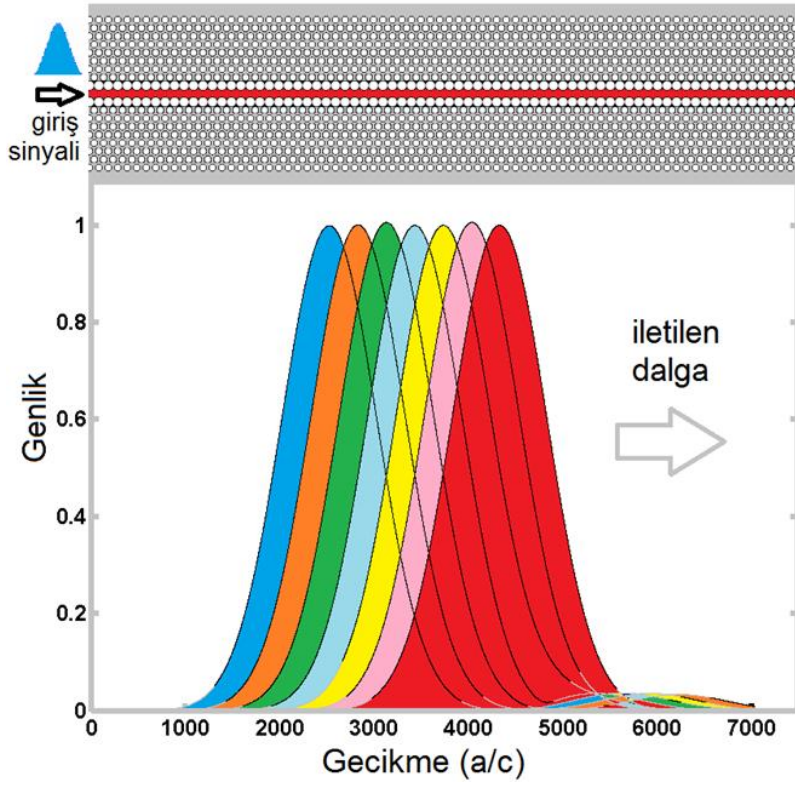
Şekil 4.5 Yapı içerisinde yavaşlayarak ilerleyen optik sinyalin grup hızı bilgisi v_g 'nin elde edilmesi. Dalga kılavuzu, ΔL genişliği ile ifade edilmektedir.

Bu modlar dalga kılavuzunun girişinde uyarıldığında Şekil 4.5'de gösterildiği üzere yapı girişinde ve yapı sonundaki Gauss darbesinin gecikme bilgileri elde edilmektedir. Bu nedenle, zaman etki alanı analizinin ilk adımı, iletim spektrumunun elde edilmesi ve sonrasında bunların incelenmesiyle fotonik kristal yapının bant aralık (FBB) özelliklerinin belirlenmesini içerir.

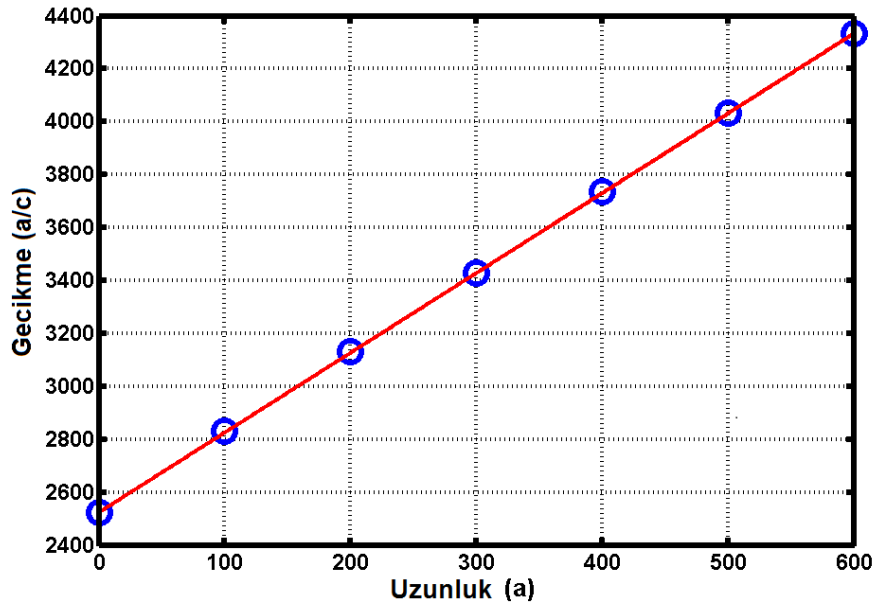
Zaman düzlemi analizi sonucu elde edilen yavaşlama faktörü n_g elde için yapılan çalışmalar Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Farklı genişliklere sahip dalga kılavuzlarına gönderilen ışık sinyalinin elektrik alan dağılımı Şekil 4.6’da, FKD içerisinde belirli aralıklarla konumlandırılan ölçüm noktalarından elde edilen zaman-gecikme bilgisi ise Şekil 4.7’de sunulmuştur.

Elde edilen bu şekiller incelenerek dalga kılavuzunda ışığın iletim mekanizması anlaşılabilir. Farklı zamanlarda dalga kılavuzunda iletilen sinyalin alan dağılımı, ışık yayılması ile ilgili bize farklı sonuçlar sunmaktadır. Örneğin, alan genliğinin yapı içerisinde hangi bölümlerde artıp azaldığını ya da ışığın nerelerde yoğunlaştığını belirlemek mümkün olmaktadır. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterildiği gibi, yayılan ışığın grup hızı bilgisi dalga kılavuzu içinde farklı genişlikteki noktalarda ayrı ayrı hesaplanır. Referans alınan düzlem dalgaya göre en iyi şekilde karşılaştırma yapmak amacıyla, ölçüm noktalarında görüntülenen ışık dalgalarının genlikleri normalize edilmiştir. İlk olarak, dalga kılavuzu bölümünde belirli aralıklarla ($100a$) alınarak ölçüm noktalarının yerleri belirlenir. Bu arada dalga kılavuzuna gönderilen sinyal bozulmaya uğramadan güdümlü bir şekilde ilerleyecek şekilde ayarlanmıştır. Uygun frekans seçimi yapılarak Gauss sinyalinin yapı sonuna ulaştığında ne kadar süre geciktiği araştırılmıştır. Işık kaynağı, dalga kılavuzunun tam olarak girişine konumlandırılmıştır. Gauss kaynağın normalize edilmiş frekansı $\omega a / 2\pi c = 0.2480$ olarak seçilmiştir. Optik sinyal, bu frekansta dalga kılavuzuna gönderilir ve farklı ölçüm noktalarına varış süresi hesaplanarak grup indeks değeri hesaplanır. Bilindiği gibi, ışığın yapı içerisinde ne kadar yavaşladığını gösteren grup indeks değerinin belirlenmesi için grup hızı değeri bilinmek zorundadır. Dolayısıyla grup hızı farklı ölçüm noktalarına varış süreleri belirlenerek hesaplanır. Şekil 4.7, dalga kılavuzu içinde farklı ölçüm noktalarında ilerleyen optik sinyalin gecikme süresi bilgilerini içerir. Önce ilerleyen dalganın tepe noktası değerleri belirlenir. Böylece bu nokta değerlerinin doğrusal interpolasyon ile birleştirilmesiyle oluşan doğrunun eğimi bize grup indeks değerini verir.

Şekil 4.6’da FKD içinde $100a$ aralıklarla alınan ölçüm noktaları ve bu noktalara geliş zamanları gösterilmiştir. Örgü sabiti a büyüklük olarak nanometre cinsinden olduğundan, zaman ölçeği $10^{-15} s$ mertebesinde olacak şekilde grafiğin x eksenini a/c açısından temsil edilir. Giriş sinyali olarak seçilen Gauss darbesinin yarı-tepe genişliği (FWHM) 0.001 büyüklüğünde alınır. $100a$ mesafesi kadar aralıklarla yerleştirilen algılayıcılara ışığın varış süreleri farklıdır. Şekil 4.6’dan da görüldüğü gibi, analizde kullanılan sınırlı bant genişliğine sahip bu darbelerin zaman



Şekil 4.6 $f_c = 0.2480$ frekansında güdümlü olarak bozulmadan ilerleyen zaman-etki darbelerinin, FKD yapı (grafığın üst kısmında gösterildiği şekilde) içinde 100a aralıklarla belirlenen ölçüm noktalarında görüntülenmesi



Şekil 4.7 FKD içerisinde 7 farklı ölçüm noktasında görüntülenene optik sinyalin zaman-gecikme bilgisi

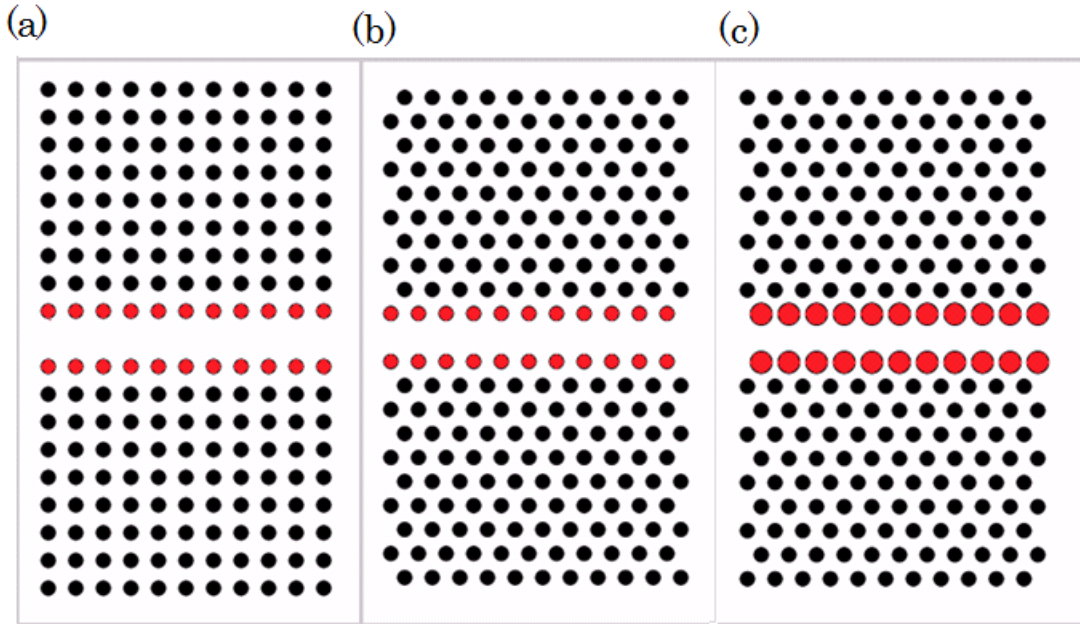
gecikmeleri kolaylıkla okunabilmektedir.

Seçilen giriş darbesi bozulmadan bağımsızdır çünkü darbenin merkez dalga boyu dağınım eğrisinin doğrusal olduğu bölgede seçilmiştir. Bu seçim, grup hızı dağınımının yokluğu anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, ω ve k arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu bölgede grup indeks değerini hesaplamak kolaydır. Şekil 4.3, parametreleri yukarıda belirtilen darbenin grup indeks değerini belirlemek için daha önce sunulmuştu. Şekil 4.4’de, frekans eksenini aralığının yavaş ışık elde edilen frekans bölgesinden yani doğrusal olmayan bölgede olduğuna dikkat edilmelidir. Giriş darbesinin merkez frekansı, doğrusal olmayan dağınım ilişkisine sahip yavaş ışık bölgesine yaklaştığında, darbenin bant genişliği önemli bir parametre haline gelmektedir. Bu bölgede darbenin bozulması şiddetlidir. Ancak bu zorluğa rağmen yavaş ışık bölgesinde dağınım ilişkisi ve hesaplanması üzerinde durulmuştur. Ölçümler belirli bir frekans noktasında seçilir ve değerler şekildeki daireler içinde gösterildiği gibi alınmıştır. Sonuçlar bize, grup indeks değerlerinde artış olduğunu ancak yine de PWM yönteminden elde edilen sonuçlara göre değerlerin daha aşağıda olduğunu göstermiştir. Yavaş ışık bölgesinde dalga kılavuzu modunun eğimi çok küçük bir dalga boyu aralığında önemli ölçüde değişmiştir. Bu bölgede yüksek derecede bozulmanın etkisinin görülmesinden dolayı spektral özelliklerini daha ayrıntılı incelemek için giriş darbesinin FWHM değeri beşte bir oranında küçültülerek 0.0002 değerine getirilmiştir. Daha önce bahsedilen aşamalara benzer şekilde, dar bantlı darbelerle yavaş ışık bölgesinde dalga iletiminin zaman gecikmesi ortaya çıkarılmıştır. Burada sadece yavaş ışık bölgesine yoğunlaşmıştır. Neticede bu yeni giriş darbesiyle sadece bu bölümün dağınım ilişkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4’te gösterilmiştir ve şekilde oluşan farklılık net bir şekilde görülebilir. Grup indeks değeri dalga kılavuzunun kesim modu yakınlarına doğru önemli ölçüde artmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, yavaş ışık bölgesinde büyük sapma gerçekleşmiştir. Eğer giriş darbesi, yavaş ışık bölgesinin yanında yüksek frekans değerlerini de kapsayacak şekilde geniş bant aralığında gönderilirse bu sefer grup indeks değeri göz ardı edilmiş olur. Dağınım eğrisinin doğrusal olduğu bölgede, farklı bant genişliklerine sahip iki dalganın grup indeks değeri aynı olduğundan, darbenin bant genişliği çok önem arz etmez. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te görüldüğü gibi, grup indeks değerleri birbirlerine çok yakındır ancak bu değerlere karşılık gelen frekans değerlerinde bir miktar farklılık olmuştur. Yavaş ışık bölgesinde gerçekleşen bozulmalar grup indeks değerinin elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Şekil 4.4’te de görüldüğü gibi bu sorun ancak çok dar bant aralığında gönderilen darbeyle mümkündür. Ancak dar bantta gönderilen giriş sinyalin çok daha fazla hesaplama yapmayı beraberinde getirdiği unutulmamalıdır. Düzlem dalga yöntemine (PWM) kayıp, kazanç ve

dağınım bağımlılığı gibi parametreleri dahil etmek oldukça güçtür. Öte yandan, ZDSF yöntemi bu parametreleri analiz etme yeteneğine sahiptir. Sonuç olarak zaman etki alanında gerçekleştirilen bu çalışma, PWM yöntemini kullanmanın uygun olmadığı daha karmaşık yapıların dalga kılavuzu modlarının dağınım eğrisi analizini gerçekleştirmek için bize kolaylık sağlamaktadır.

4.3. Zaman ve Frekans Düzlemi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, grup hızı dağınım özellikleri ve elde edilen sonuçların zaman ve frekans etki alanında karşılaştırılması yapılmıştır. Bunun için yavaş ışığın elde edildiği farklı dizilişteki fotonik kristal yapı örnekleri kullanılarak karşılaştırılan sonuçların tutarlılığı gösterilmeye çalışılmıştır. Grup indeks değerinin zaman düzleminde elde edilmesine alternatif olarak, periyodik olmayan yapılarda uygulanabilirliği olmayan frekans-etki analizi sonuçlarından da grup indeks değeri çıkartılarak, iki yöntemden de elde edilen sonuçların sağlanması yapılmıştır.



Şekil 4.8 Farklı örgülerde ve kusurlar oluşturularak elde edilen FKD yapıları

Bilindiği gibi grup hızı, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi sinyal paketinin tepe noktasının hızıdır ve sadece dar bantlı darbeler için uygulanabilirliği söz konusudur. Malzeme içinde ilerleyen ışığın yavaşlama miktarı n_g değerinin hesaplanması amacıyla kullanılan ZDSF yöntemi basitçe elektromanyetik dalganın farklı yapılar içerisinde ilerleyişini gözlemlemek için

kullanılmaktadır. Zaman düzleminde bir elektromanyetik simülasyon yöntemi olan ZDSF basit olarak Maxwell denklemlerini alır ve bazı sonlu hesaplama bölgelerinde zamanla bunların başarımının gerçekleştirir. Dielektrik kristal yapı içinde dalga yayılımını izlemek amacıyla kullanılan Meep-ZDSF simülasyonunun sonuçları TM polarizasyonunda elektrik alan şiddetinin kendisidir. ZDSF programı kararlı hale ulaşmaya kadar yeterli süre çalıştırıldıktan sonra, belirlediğimiz ilgili her frekansa karşılık gelen genlik ve faz sonuçlarını elde edebiliriz. Sistem kuramı, eğer kaynak olarak bir ani darbe kullanılırsa her frekansta buna karşılık gelen cevabı alabileceğimizi söylemektedir.

Fourier dönüşüm tekniği geniş bir bant kaynağı kullanır böylece tek bir ölçüm ile yapının spektral özellikleri elde edilebilir. Öte yandan, yinmeli olan zaman-uçuş yöntemi çok fazla hesaplama gerektirdiğinden, optik sinyallerin bozulmaları dikkatle incelenmelidir. Bu çalışmada, optik kaynak olarak dar bantlı bir Gauss sinyali kullanılmıştır. Daha sonra yapı içerisine gönderilen bu dalga tamamen sönmülene kadar ZDSF programı çalıştırılmıştır. Bir sonraki aşamada Fourier dönüşü tekniği kullanılmıştır. Yapı içerisindeki belirlenen noktalarda ve frekanslarda (f_m) hesaplanan E-alanların $E(t)$ Fourier dönüşümü alınarak, faz ve genlik bilgisi elde edilmiştir. Bu dönüşümde Eşitlik 4.1 kullanılmıştır:

$$E(f_m) = \int_0^{t_T} E(t) \cdot e^{-j2\pi f_m t} dt, \quad (4.1)$$

$t_T = T$, integralin zaman üst sınırı olmak üzere, bu ZDSF simülasyonunun sona erdiği süredir.

Eşitlik 4.1, sonlu farklar şeklinde yazılırsa, Eşitlik 4.2 elde edilmektedir:

$$E(f_m) = \sum_{k=1}^T E(k \cdot \Delta t) e^{-j2\pi f_m (k \cdot \Delta t)}. \quad (4.2)$$

Bu denklemde T , hesaplamadaki yineleme sayısını ve Δt ise zaman adımını vermektedir. Dolayısıyla toplam geçen süre $t_T = T \cdot \Delta t$ 'dir. Eşitlik 4.2, gerçel ve sanal kısımlarına ayrıldığında,

$$E(f_m) = \sum_{k=1}^T E(k \cdot \Delta t) \cos(2\pi f_m k \Delta t) - j \sum_{k=1}^T E(k \cdot \Delta t) \sin(2\pi f_m k \Delta t), \quad (4.3)$$

elde edilir. Herhangi bir k noktasında, $E(f_m)$ 'in gerçel ve sanal kısımlarından, f_m frekansındaki genlik ve faz bilgisi elde edebilmektedir. Zaman düzleminden genlik ve faz bilgisi çıkarımı için, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılır. HFD, sonlu düzlemdeki ayrık zaman fonksiyonlarının Fourier dönüşümünü elde etmeyi sağlayan Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD)'nin özel bir türüdür. MATLAB'ta kullanılan $Y = \text{fft}(X, n)$ HFD algoritması, n-nokta AFD hesaplaması için kullanılmaktadır.

Bilindiği gibi z yönünde ilerleyen tek renkli düzlem dalgaya ait elektrik alan şiddeti $E(z) = E(0) e^{-jkz}$ ile ifade edilir. $E(z)$ burada x ya da y bileşenleri cinsinden ifade edilir. Dalga vektörü k , frekansa bağlıdır ve $k(\omega) = \omega \sqrt{\epsilon(\omega) \mu_0}$ şeklinde belirtilir. Dolayısıyla ilerleyen dalga ifadesini frekans değeri ω 'ye bağlı olarak Eşitlik 4.4'teki şekliyle yazabiliriz:

$$\bar{E}(z, \omega) = e^{-jkz} \bar{E}(0, \omega). \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4, uzay-zaman cinsinden yazılırsa:

$$e^{j\omega t} \bar{E}(z, \omega) = e^{j(\omega t - kz)} \bar{E}(0, \omega), \quad (4.5)$$

elde edilir. Bir dalga paketi ya da darbesine farklı frekans bileşenlerinin eklenmesi sonucu yeniden oluşturulmasıyla, yani Ters Fourier Dönüşümü ile:

$$E(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j(\omega t - kz)} \bar{E}(0, \omega) d\omega, \quad (4.6)$$

elde edilmektedir. Bilindiği üzere, $\bar{E}(0, \omega)$ ifadesi $z=0$ olduğu yerde $E(0, t)$ 'in Fourier dönüşümüdür. Bundan dolayı,

$$E(z, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-jkz} \bar{E}(0, \omega) d\omega \Leftrightarrow \bar{E}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega t} E(0, t) dt, \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eşitlik 4.4'ün çarpım hali bize iletilen dalgayı bir sistemin çıkışı olarak düşünmemizi sağlar. Bu sistemin frekans tepkisi ise Eşitlik 4.8 ile gösterildiği gibi,

$$H(z, \omega) = e^{-jk(\omega)z}, \quad (4.8)$$

'dir. Dolayısıyla, giriş/çıkış ilişkisi olan bir sistemin frekans tepkisi $H(\omega)$ frekans düzleminde şu şekilde ifade edilir:

$$E_{out}(\omega) = H(\omega) \bar{E}_{input}(\omega) \Rightarrow H_{ij} = H_i / H_j, \quad (4.9)$$

$i > j$ ve H_i, H_j farklı uzunluktaki dalga kılavuzu yapılarına karşılık gelen frekans tepkisini göstermektedir. Genel olarak, bir frekans bağımlı sistem olan $H(\omega) = |H(\omega)| e^{-j\phi(\omega)}$ için, grup gecikmesi t_g ifadesi sistemin faz-gecikme tepkisi cinsinden ifade edilebilir. Bu da, $\phi(\omega) = -\text{Arg}[H(\omega)]$ yani faz tepkisinin negatif değerine eşittir. Buradaki ifadede $\phi(\omega) = k(\omega)z$ 'dir.

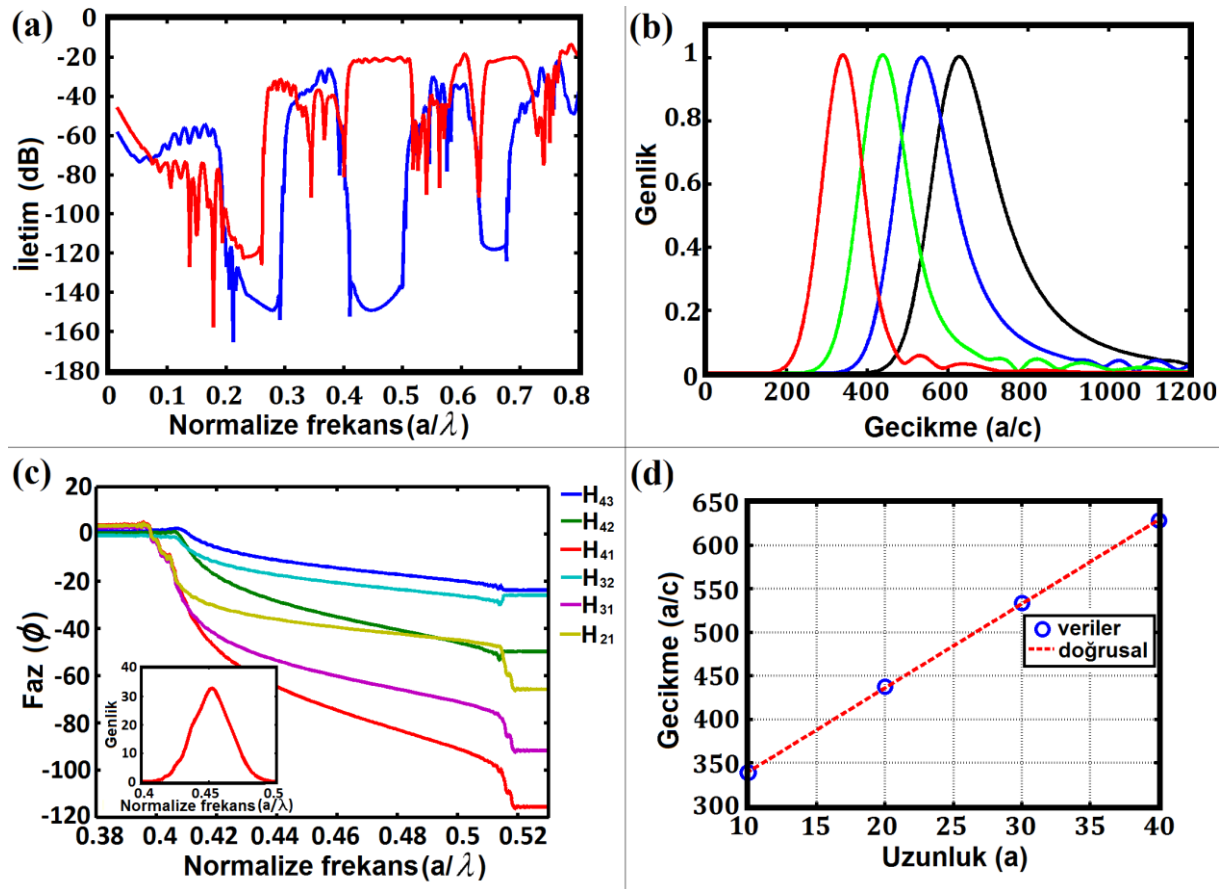
$$t_g = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} = \frac{d\phi}{d\omega} = \frac{\Delta \phi}{\Delta \omega} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\omega_2 - \omega_1} = \alpha = \text{faz-eğrisinin eğimi} \quad (4.10)$$

Yukarıdaki eşitlikler temel alınarak, Eşitlik 4.10'da yer alan t_g ifadesi kolaylıkla grup hızı ve grup indeks değeri n_g cinsinden ifade edilebilir:

$$t_g = \frac{d\phi}{d\omega} = \left(\frac{d\phi}{d\omega}\right)_z = \frac{z}{v_g} \Rightarrow v_g = \alpha^{-1} \cdot L \Rightarrow n_g = c/v_g \quad (4.11)$$

Bu ifadedeki uzaklık ifadesi $z = L$ 'ye eşittir.

Frekans ve zaman düzleminde ayrı ayrı ele alınan hesaplamaların birbiriyle karşılaştırılması ve sonuçların tutarlılığını incelemek amacıyla, Şekil 4.8.'de gösterilen üç farklı türdeki FKD yapısı ele alınmıştır. Farklı yapıların ele alınmasının nedeni iki farklı düzlem sonuçlarının ve uyumunun sağlanmasını yapmak içindir. Şekil 4.8(a) karesel örgülü, Şekil 4.8(b) üçgensel örgülü, Şekil 4.8(c) ise yüksek n_g değeri elde etmek amacıyla dalga kılavuzu kenarındaki deliklerin boyutlarının artırılmasıyla düzenleme yapılarak oluşturulan üçgensel örgüdeki FKD yapılarıdır. Bu yapılar, arka planı hava boşluğu olmak üzere, kırılma indeksi 3.46 ve yarıçapı $r = 0.30a$ olan dielektrik silindirlere oluşmuştur.

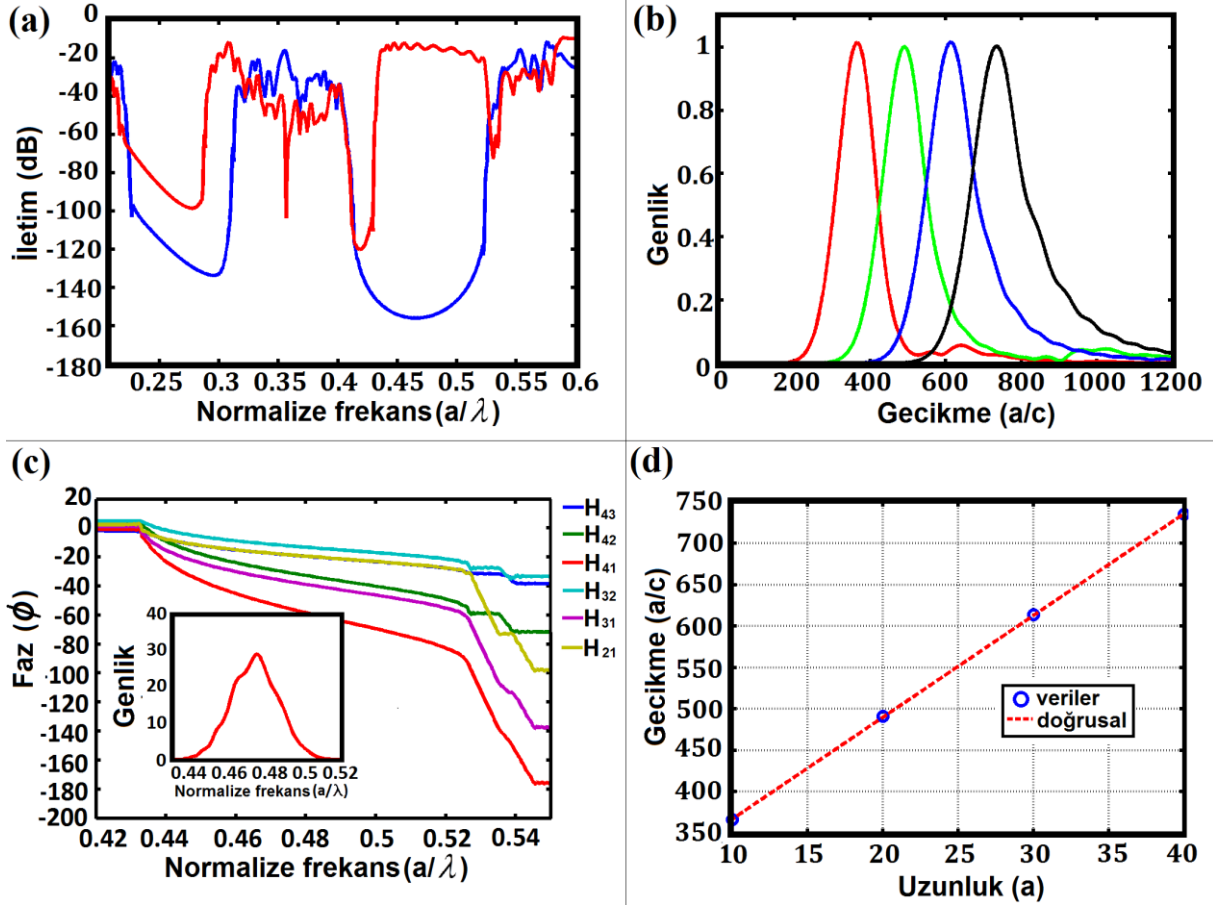


Şekil 4.9 (a) Kusurlu (kırmızı çizgi) ve kusursuz (mavi çizgi) durumlarda elde edilen karesel örgüdeki (S-Örgü) FKD yapısının iletim spektrumu (b) Farklı uzunluklarda oluşturulan dört

FKD (10a uzunluğunda farklarla) yapısının çıkışlarında elde edilen dört zaman düzlemi darbesi (c) $H(\omega) = |H(\omega)| e^{-j\phi(\omega)}$ sisteminin faz tepkisi $\phi(\omega) = -\text{Arg}[H(\omega)]$ (d) Farklı uzunluklarda oluşturulan dalga kılavuzlarındaki optik sinyallerin gecikme-zaman bilgisi

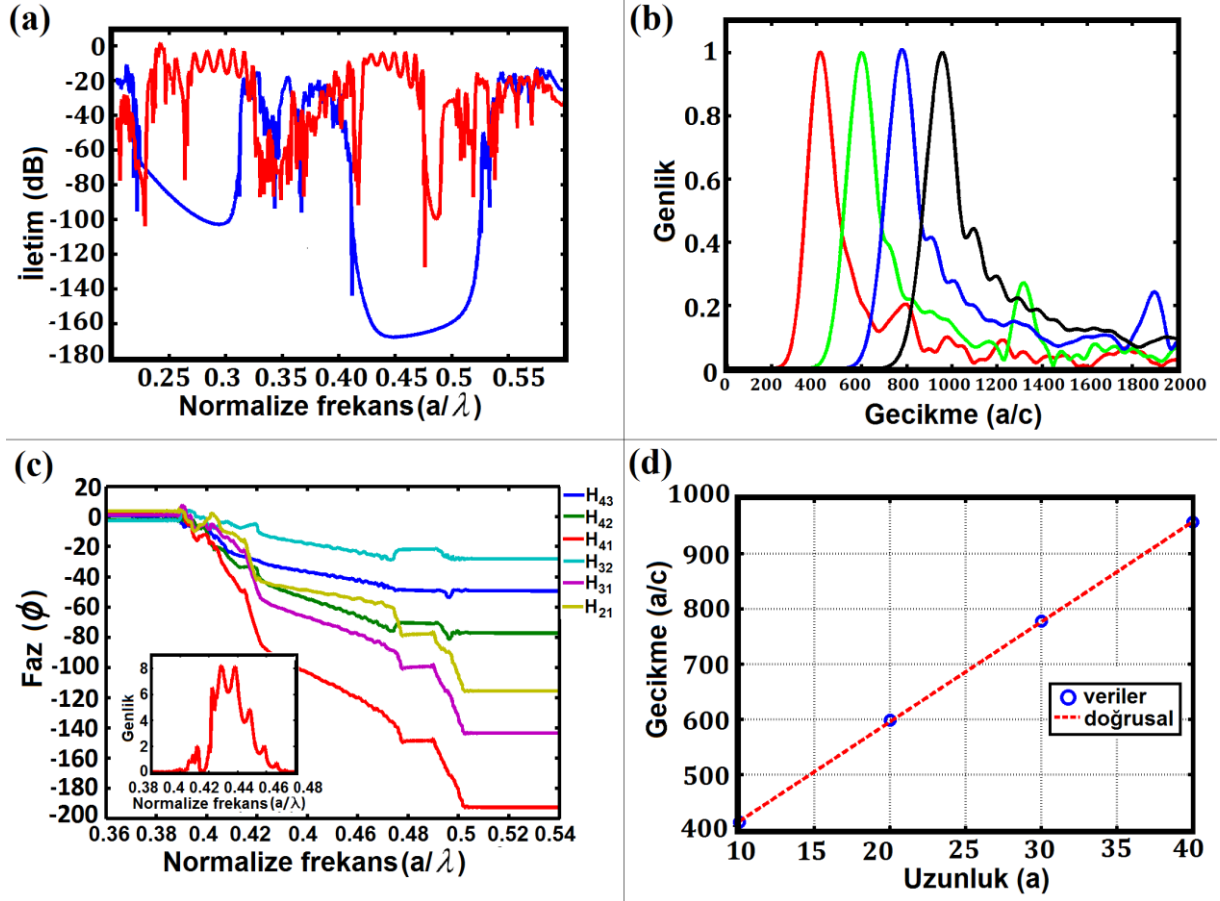
Üç durumda da yapılara gönderilen Gauss darbelerinin yarı-tepe genişlik değeri (FWHM) 0.09 alınmıştır. Bu yapılara ait iletim spektrumu Şekil 4.9(a), Şekil 4.10(a) ve Şekil 4.11(a)'da sırasıyla sunulmuştur. Elde edilen iletim spektrumlarının incelenmesiyle bant boşluklarında oluşan rezonans durumlarından yola çıkılarak üç yapıda, dalga kılavuzunun girişinde uyarılan Gauss kaynağının normalize frekans değeri Şekil 4.8(a)'deki karesel örgü FKD yapısı için $\omega a / 2\pi c = 0.4521$, Şekil 4.8(b)'deki üçgensel örgü FKD yapısı için $\omega a / 2\pi c = 0.4780$, Şekil 7(c) yapısı yapılandırılmış üçgensel örgü FKD yapısı için $\omega a / 2\pi c = 0.4382$ olarak seçilmiştir. İki boyutlu fotonik kristallerin polarizasyon duyarlılıklarına göre, TM polarizasyonu seçilmiştir. Yavaş ışık miktarının hesaplanması amacıyla ilk olarak, zaman etki alanı analizi için, grup indeks değeri darbenin farklı genişlikteki yapıların sonuna varış süresi hesaplanarak belirlenir. Ölçüm noktaları yapının sonunda alınır, daha sonra yapının uzunluğu bir miktar daha artırılarak bu sefer bu yapıda belirlenen ölçüm noktasından gecikme süresi tekrar hesaplanır. Yapı içerisinde ilerleyen optik Gauss sinyallerin farklı uzunluklardaki FKD çıkışlarında görüntülenmesi Şekil 4.9(b), Şekil 4.10(b) ve Şekil 4.11(b)'de sunulmuştur. Elde edilen noktaların enterpolasyon tekniğiyle birleştirilmesi sonucu elde edilen doğrunun eğiminin hesaplanmasıyla Şekil 4.9(d), Şekil 4.10(d) ve Şekil 4.11(d)'de gösterildiği gibi grup indeks değeri n_g değeri elde edilmektedir. Buna alternatif olarak, önerilen Fourier analizi yöntemiyle, farklı uzunluklardaki yapıların sonlarında hesaplanan E-alanlarının Fourier dönüşümleri alınarak, farklı yapıların frekans tepkilerinin faz bilgileri Şekil 4.9(c), Şekil 4.10(c) ve Şekil 4.11(c)'de gösterildiği üzere çıkartılmıştır. Yukarıda denklemlerde ve Eşitlik (4.11)'de ifade edilen faz eğrilerinin eğimi bize grup indeks değerini vermektedir.

Şekil 4.9(c), Şekil 4.10(c), Şekil 4.11(c)'de görüldüğü gibi farklı uzunluklarda FKD yapılarının faz tepkileri aynıdır. Bu nedenle farklı uzunlukların eğimleri birbirine eşittir. Bu çalışmada iki farklı düzlemde de yaklaşık olarak aynı grup indeks değerine ulaşılmıştır. Frekans düzleminde elde edilen üç farklı örgüdeki FKD yapılarında (S-Örgü, T-Örgü, T2-Örgü) hesaplanan grup indeks değeri sırasıyla $n_g = 2.5$ (S-Örgü), $n_g = 3.2$ (T-Örgü), $n_g = 4.7$ (T2-Örgü)'dir. Zaman düzleminde elde edilen sonuçlar ise $n_g = 2.4$ (S-Örgü), $n_g = 3.2$ (T-Örgü), $n_g = 4.5$ (T2-Örgü)'dir.



Şekil 4.10 (a) Kusurlu (kırmızı çizgi) ve kusursuz (mavi çizgi) durumlarda elde edilen üçgensel örgüdeki (T-Örgü) FKD yapısının iletim spektrumu (b) Farklı uzunluklarda oluşturulan dört FKD ($10a$ uzunluğunda farklarla) yapısının çıkışlarında elde edilen dört zaman düzlemi darbesi (c) $H(\omega) = |H(\omega)| e^{-j\phi(\omega)}$ sisteminin faz tepkisi $\phi(\omega) = -\text{Arg}[H(\omega)]$ (d) Farklı uzunluklarda oluşturulan dalga kılavuzlarındaki optik sinyallerin gecikme-zaman bilgisi

Özetle, bu bölümde Fourier dönüşümü yardımıyla, zaman düzleminde sonlu farklar yöntemi (ZDSF) kullanarak fotonik kristal dalga kılavuzlarında dağınım ilişkisi çıkarımı yapmak için bir teknik sunulmuştur. Öncelikle, frekans düzleminde elde edilen grup indeks değerleriyle, zaman düzleminde her bir frekans değerinde hesaplanan grup indeks değerleri arasında uyum olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra birinci bölümdeki yöntemden farklı şekilde grup indeks değeri çıkarımı yapılmıştır. Bu bölümde FKD yapısı doğrusal bir sistem olarak ele alınmıştır. Fourier dönüşümü tekniğiyle zaman düzlemi analiz sonuçlarından sistemin yani yapının frekans tepkisi değerlendirilmiştir. Böylece faz bilgisi ve dolayısıyla grup indeks değerleri

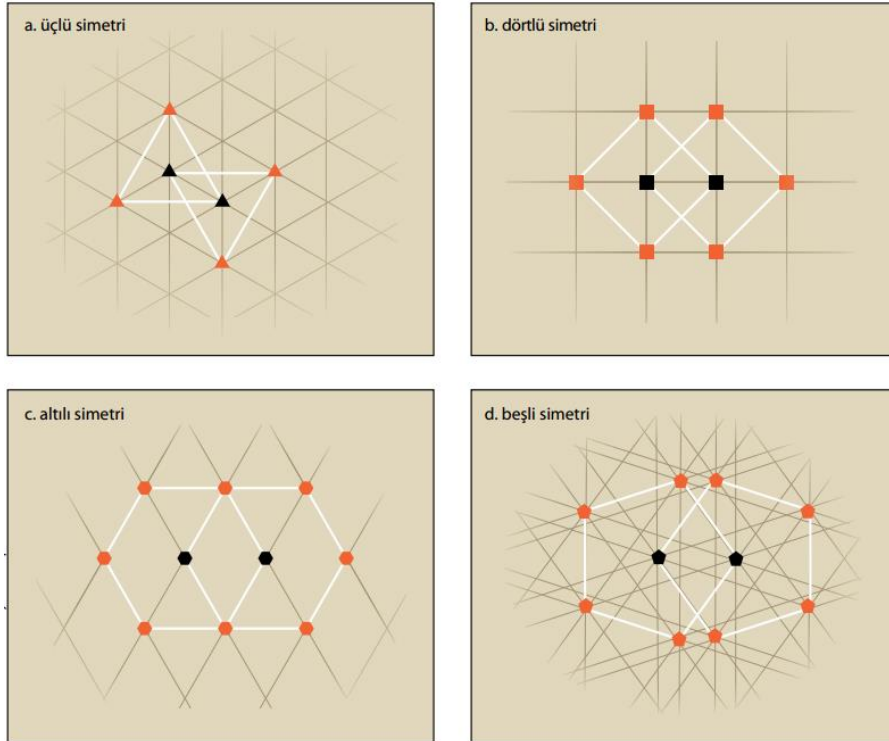


Şekil 4.11 (a) Kusurlu (kırmızı çizgi) ve kusursuz (mavi çizgi) durumlarda elde edilen üçgensel örgüdeki (T2-Örgü) FKD yapısının (daha yüksek n_g elde etmek için kenar delikleri büyütülen dalga kılavuzu) iletim spektrumu (b) Farklı uzunluklarda oluşturulan dört FKD ($10a$ uzunluğunda farklarla) yapısının çıkışlarında elde edilen dört zaman düzlemi darbesi (c) $H(\omega) = |H(\omega)| e^{-j\phi(\omega)}$ sisteminin faz tepkisi $\phi(\omega) = -Arg[H(\omega)]$ (d) Farklı uzunluklarda oluşturulan dalga kılavuzlarındaki optik sinyallerin gecikme-zaman bilgisi

hesaplanabilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma farklı simetri şekillerine sahip yapıların yalnızca zaman düzlemi analizi yetenekleri kullanarak dağınım ilişkisinin çıkarımının yapılabileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır. Böylece, bu yöntemin yavaş-ışık konseptine büyük katkı sağlamakla beraber daha karmaşık yapılarda da tamamen optik yöntemler kullanarak bilgi taşıma çalışmalarına katkı sağlayacağını söyleyebiliriz.

5. FARKLI ÖRGÜLERDE KUAZİ KRİSTALLERİN İLETİM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kristaller, farklı simetrik özellikler gösteren tekrarlı desenlerden oluşan yapılardır. Örneğin, her bir atomun tekrarlanan bir desen içinde birbirine eş üç atom tarafından çevrenmesiyle oluşan üçlü simetri özelliği gösteren yapılarda, görüntü 120 derece döndürüldüğünde aynı desen elde edilir. Aynı şekilde, dörtlü simetri özelliği gösteren yapı 90 derece, altılı simetri özelliği gösteren yapı 60 derece döndürüldüğünde aynı desen elde edilmektedir. Ancak beşli simetri özelliği gösteren ve Penrose kristaller olarak adlandırılan yapılarda bu mümkün değildir. Bu sebepten dolayı Daniel Shechtman'ın 1982 yılındaki keşfine kadar bilim dünyasında kristallerin beşli simetri özelliği göstermesi imkansız sayılıyordu [97]. Yedili ve üstü simetrisi için de aynı durum söz konusuydu. Yapılan bu araştırma sonucu desen 72 derece döndürüldüğünde aynı yapının elde edildiği keşfedilmiştir. Bu yapıların en önemli özelliklerinden biri ise bilimde ve sanatta altın oran τ 'nun bu yapılarda sürekli tekrarlanmasıdır.



Şekil 5.1 Farklı çeşitlerdeki simetrisiye sahip kristaller. 5'li simetriye sahip yapının kendini tekrarlamadığı gözlemlenmektedir [98].

Örneğin Penrose mozaikini oluşturan kalın ve ince eşkenar dörtgenleri sayısı arasındaki oran ve yapıyı oluşturan atomlar arasındaki çeşitli uzaklıkların birbirine oranı τ ile ilişkilidir. Tao matematiksel sabiti, 13. yy.'da İtalyan matematikçi Fibonacci tarafından keşfedilen bir sayı dizisiyle açıklanmıştır. Kendini tekrarlamadığı halde düzenlilik gösteren; 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, ...vb. Fibonacci dizisinde bir sayı kendinden önceki sayıya bölündüğünde altın oran τ 'ya yakın bir sayı elde edilmektedir. Kuazi kristallerin de kendini tekrarlamadığı halde düzen oluşturmaları yani matematiksel bir kural izlemesi, bu tarz yapıların Fibonacci dizisiyle ilişkili olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Shechtman'ın bu keşfiyle beraber 1992 yılında Uluslararası Kristolografî Birliği, "kristal" tanımını değiştirmiştir. Keşiften önce "kendisini oluşturan atom, molekül ve iyonların oluşturduğu desenlerin düzenli bir şekilde tekrarlandığı bir yapı" şeklinde tanımlanırken keşiften sonra "temelde ayırık bir kırınım desenine sahip bir yapı" olarak tanımlanmıştır. Kuazi kristallerin bu keşfiyle, Dan Shechtman 2011 yılında Nobel Kimya Ödülü'nü kazanmıştır [98].

Daha önce de bahsedildiği gibi fotonik kristaller olarak bilinen yapay olarak oluşturulmuş yapılar, elektronlar için yarı iletken malzeme özelliği gösteren yapılara benzer şekilde fotonlar için fotonik bant aralıkları oluşmasına imkan sağlar. Fotonik bant boşluğu oluşturan maddeler gelecek nesil optik cihaz teknolojisi için geniş imkanlar sunmaktadır. Mikro-optik devreler [99], lazerler [100], ışık yayan diyotlar [101], optik anahtarlar [102], dalgaboyu çoklayıcıları [103] tasarlanan yapılara örnek verilebilir. Genel olarak, tam bant boşluğuna sahip fotonik kristal yapı yüksek dielektrik yoğunluğa sahip ve ötelenme simetrisi içeren yapıdır. Fotonik kristal içerisinde oluşturulan kusurlar, optik bant boşluğunda kusur hallerinin oluşumunu sağlar. Bu kusurlar, düşük dielektrik bölgelerinde dalga kılavuzu oluşturmak için [104] ya da keskin virajlı dalga kılavuzuna sahip entegre (tümleşik) optik cihazlarda ışığın hapsedilmesi için kullanılmaktadır [105].

Tam periyodik fotonik kristallerle beraber, yarı periyodik kuazikristal yapılarda fotonik bant oluşumlarının gözlemlenmesi ile ilgili çalışmalar ve araştırma sonuçları mevcuttur [106]. Bu yapılardaki ilk çalışmalar, tek boyutlu kuazi kristallerde, Fibonacci dizine göre oluşturulmuş çok katmanlı dielektrik yapılarda [107] ve iki boyutlu yarı periyodik olarak dizilen çubuklarla oluşturulmuş yapılarda fotonik bant boşluklarının gözlemlendiği çalışmalardır. Daha sonra ise farklı kuazi kristal yapılarda çalışmalar yapılmıştır. Örnek olarak, döngüsel simetri özelliği gösteren 5-kat simetrik (Penrose örgü) [108], 8-kat simetrik (octogonal) [109], 10-kat simetrik (decagonal) [110], 12-kat simetrik (dodegonal) [111] yapılarda çalışmalar yapılmıştır. Döngüsel simetri özelliği gösteren kuazikristal yapılar, uzun menzilli öteleme simetri özelliği

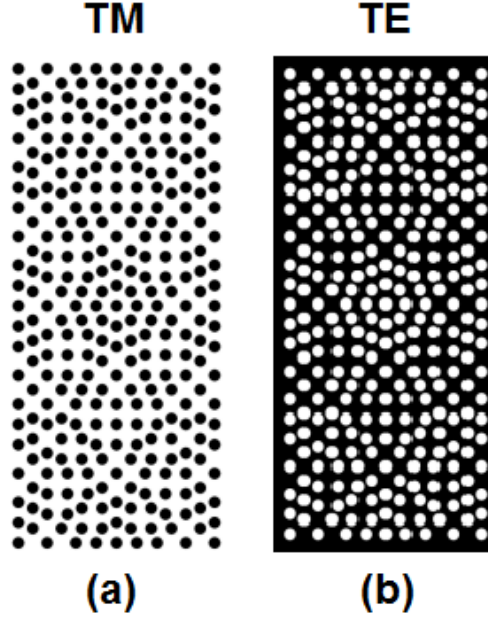
gösteren geleneksel fotonik kristallerin aksine kısa erimli düzene sahiptir [112]. Buna ek olarak, dögüsel simetri özelliğinden dolayı, yayılma açısına göre bant aralığı oluşumu daha az değişiklik göstermekte [113], diğeri bir çalışmada ise yapının dielektrik kontrast seviyesi esnekliği sayesinde yapılan çalışmalarda kolaylık sağlamaktadır [114].

Bu çalışmada farklı katlardaki dögüsel simetri özelliklerine sahip kuazi kristal yapıların fotonik bant aralığı özelliklerini sistematik keşfetmek için çalışmalar yapılmıştır. Düzlemsel farklı katlardaki yarı-kristal desenleri TM ve TE yayılma özellikleriyle ayrı ayrı ZDSF kullanılarak incelenmiştir. Simüle edilmiş iletim grafikleri farklı iletim yönlerinde farklı dielektrik sabitleri ve farklı maddeler kullanılarak denemeler yapılmıştır.

ZDSF analizi sayesinde, çok büyük ızgara alanlar makul bir hesaplama zamanı ve bellek gereksinimi ile ayrıştırılarak analiz edilebilmektedir. Izgara üzerindeki noktalarda hesaplanan elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin (E ve H) Fourier dönüşümü alınarak, çalışılan kuazi kristal yapının dalgaboyu, iletim yönü ve polarizasyon eğrileri (TE ve TM) gibi değişkenlere göre iletim özellikleri ortaya çıkarılmaktadır. Üzerinde çalışılan yapının dış çevresi boyunca TUEK yerleştirilmiştir. Şekil 5.2(b)'de gösterildiği gibi dielektrik çubukların hava üzerinde yerleştirildiği yapıda gelen düzlemsel dalga ilerlediği yönde Hz bileşeni ile TE polarizasyon olarak seçilir. Bunun aksine dielektrik arka plan üzerine hava delikleri açılarak oluşturulan Şekil 5.2 (a)'daki yapıda ise gelen düzlemsel dalga ilerlediği yönde Ez bileşeni ile TM polarizasyon olarak seçilir. İletim spektrumları incelenen yapıların genişliği $20a$, yüksekliği ise $40a$ olarak seçilmiştir. İki yapıda da seçilen silindirlerin yarıçapları $0.30a$ 'dır. Silindirlerde ve dielektrik silindirlerde kullanılan malzemenin kırılma indeksi 3.46'dır. Hesaplamalar için yapı içerisindeki referans noktalarında her dalga boyu için birim genlik kullanılmaktadır. Kırılma indeksi normalde artan dalga boyuyla beraber azalmasına rağmen ZDSF hesaplamalarında sabit olarak alınmaktadır.

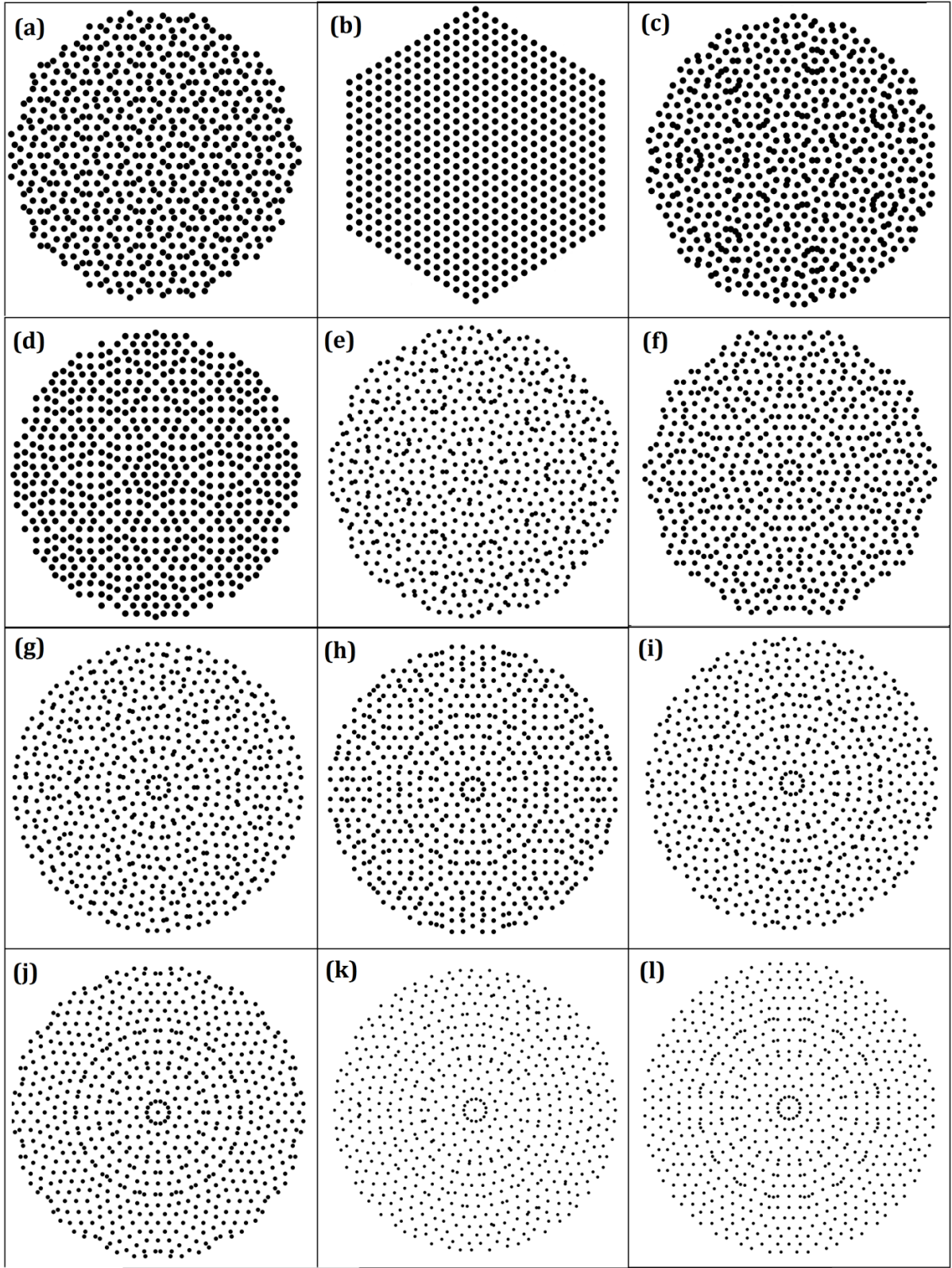
5.1. Kuazi Kristal Yapıların Farklı Örgü Çeşitleri İletim Özellikleri

Yarı-kristal yapıların iletim özellikleri farklı örgü çeşitleri kullanılarak belirlenmiştir. "Penrose" örgüsüne sahip 5-kat simetrik yapıdan başlanarak, 6-kat, 7-kat, 8-kat, 9-kat, 10-kat, 11-kat, 12-kat, 13-kat, 14-kat, 15-kat, 16-kat simetriye sahip yapıların özelliklerinin beraber ele alınmasıyla karşılaştırma imkanı elde edilmiştir. Yalnız önemli bir husus 6-kat olarak ele alınan yapı, yarı-kristal değil üçgensel örgüye sahip tam simetrikli fotonik kristal yapıdır.

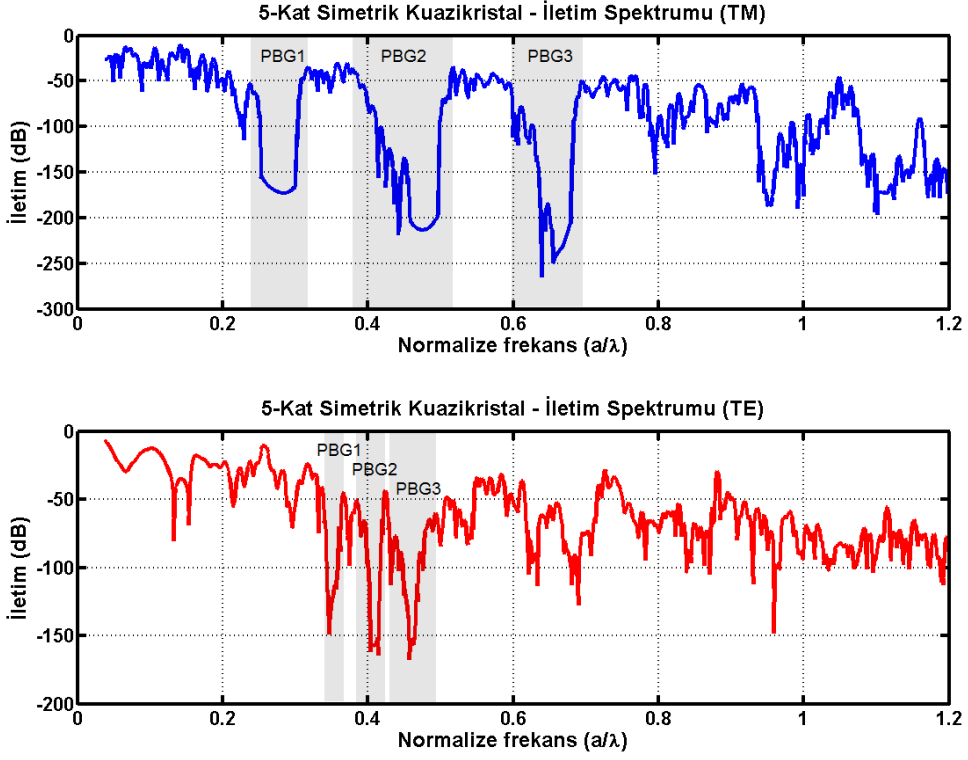


Şekil 5.2 İletim spektrumları incelenen yapılardan örnek olarak verilen 8-kat simetrik “octogonal” kuazi kristal yapı (a) Yapı içerisine yollanan elektromanyetik dalga TM polarizasyonudur ve elektrik alan yapı düzlemine diktir. Yarıçapı $0.30a$ olan dielektrik silindirlere oluşan arka planı hava (boşluk) olan bir yapıdır. (b) Yapı içerisine yollanan elektromanyetik dalga TE polarizasyonudur ve manyetik alan yapı düzlemine diktir. Yarıçapı $0.30a$ olan hava boşluklarından oluşan yapının arka planının kırılma indeksi 3.46 'dır.

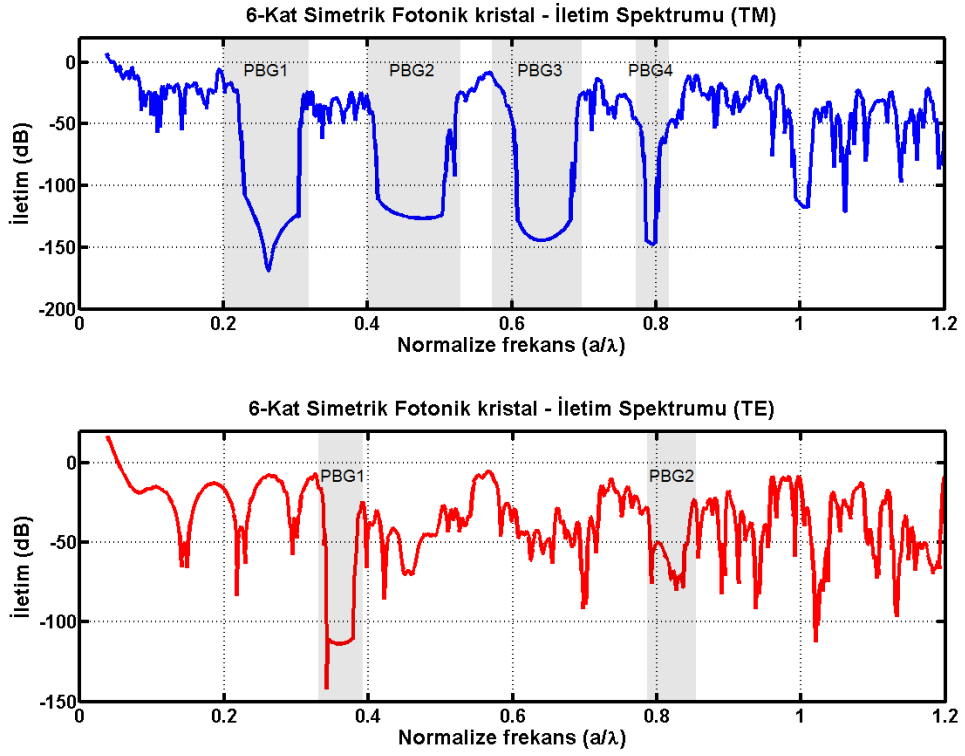
Yapılan çalışmada yapıların elde edilen iletim özellikleri ve belirlenen bant aralık bölgeleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Her bir yapı için TE ve TM polarizasyonunda tespit edilen bant aralıkları ve bunların büyüklükleri farklı örgüdeki kuazi kristallerin iletim özellikleri konusunda bizlere önemli sonuçlar vermektedir. Daha önce belirtildiği gibi bant aralığı oluşumu yapının simetrik özellikleri ile ilgilidir. Döngüsel simetri özelliğine sahip kuazi kristallerde gelişmiş fotonik bant aralığı (FBB) oluşumu gözlemlenmektedir. Burada incelenmesi gereken noktalardan ilki her bir örgü çeşidi için TE ve TM polarizasyonlarında elde edilen bant aralıklarıdır. İkinci olarak, bu yapılarda polarizasyondan bağımsız olarak yani TE-TM polarizasyonlarında ortak elde edilen bant aralıklarıdır. Bu tür bant aralıkları tam bant aralığı ya da T-FBB olarak adlandırılır. Şekil 5.3'deki her bir kuazi kristal çeşidinin iletim spektrumları hesaplanmıştır. Şekil 1-12'de yapıların TE ve TM polarizasyonlarında elde edilen bu bant aralıkları Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'de sayısal olarak, bu değerlerin Şekil 5.16'ya aktarılmasıyla ise görsel olarak sunulmuştur.



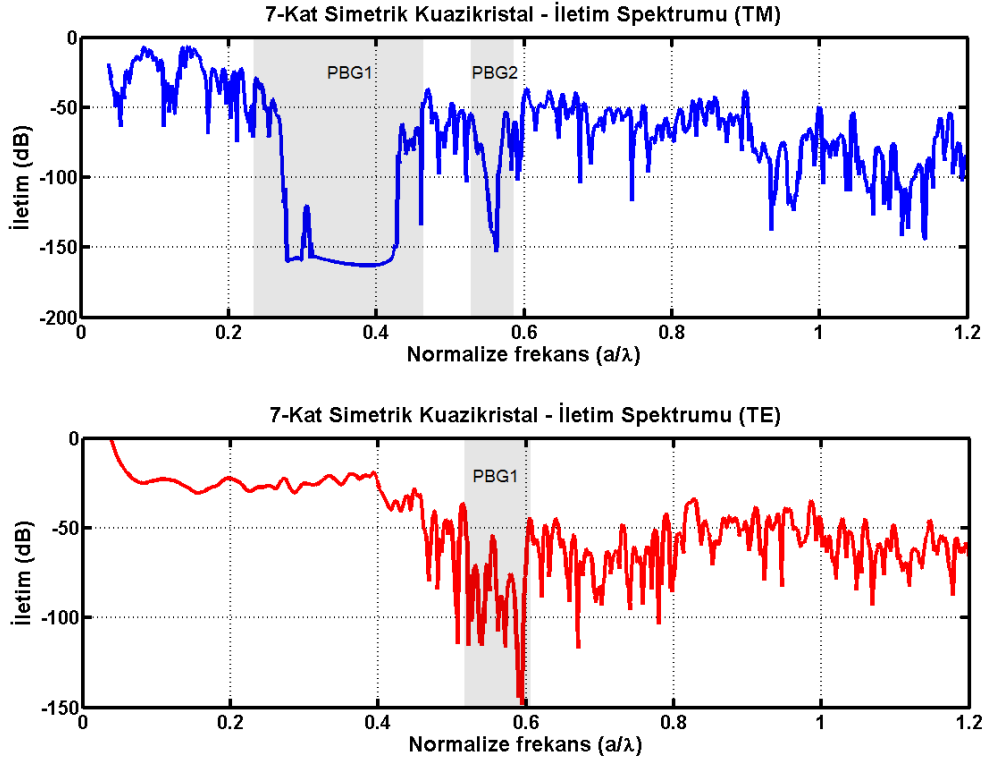
Şekil 5.3 (a) 5-Kat Simetrik KK (b) 6-Kat Simetrik FK (c) 7-Kat Simetrik KK (d) 8-Kat Simetrik KK (e) 9-Kat Simetrik KK (f) 10-Kat Simetrik KK (g) 11-Kat Simetrik KK (h) 12-Kat Simetrik KK (i) 13-Kat Simetrik KK (j) 14-Kat Simetrik KK (k) 15-Kat Simetrik KK (l) 16-Kat Simetrik KK



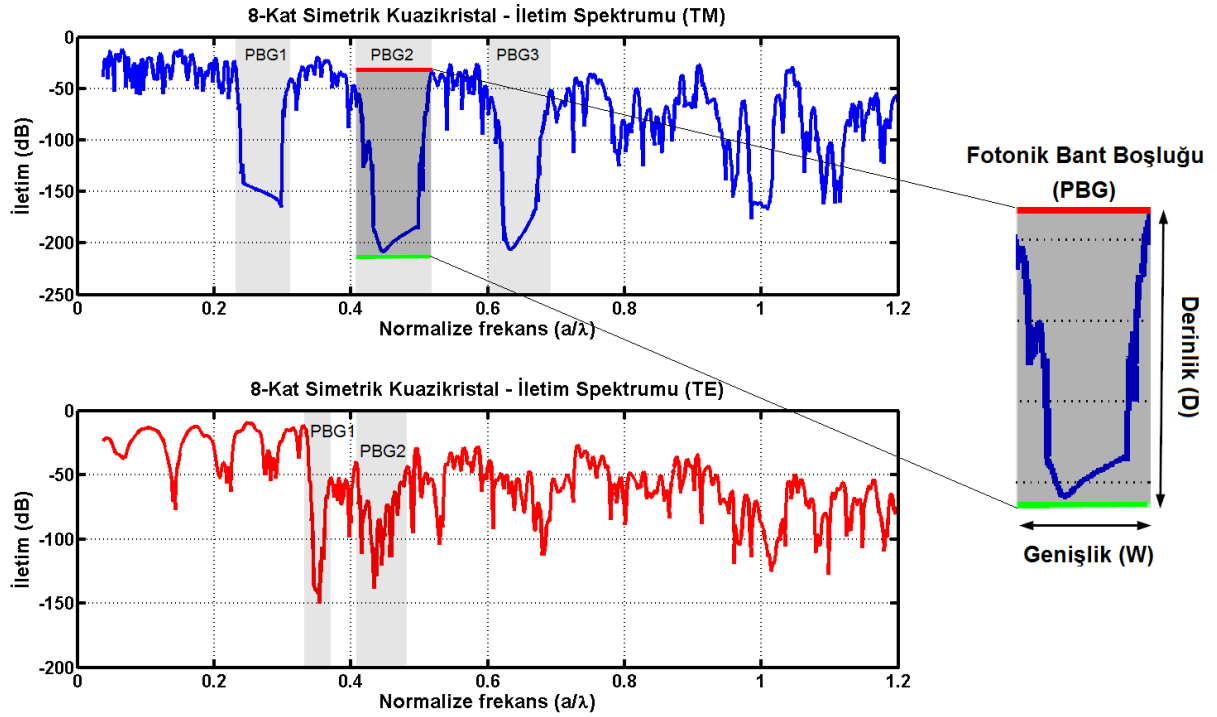
Şekil 5.4 5-Kat Simetrik (Penrose) kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



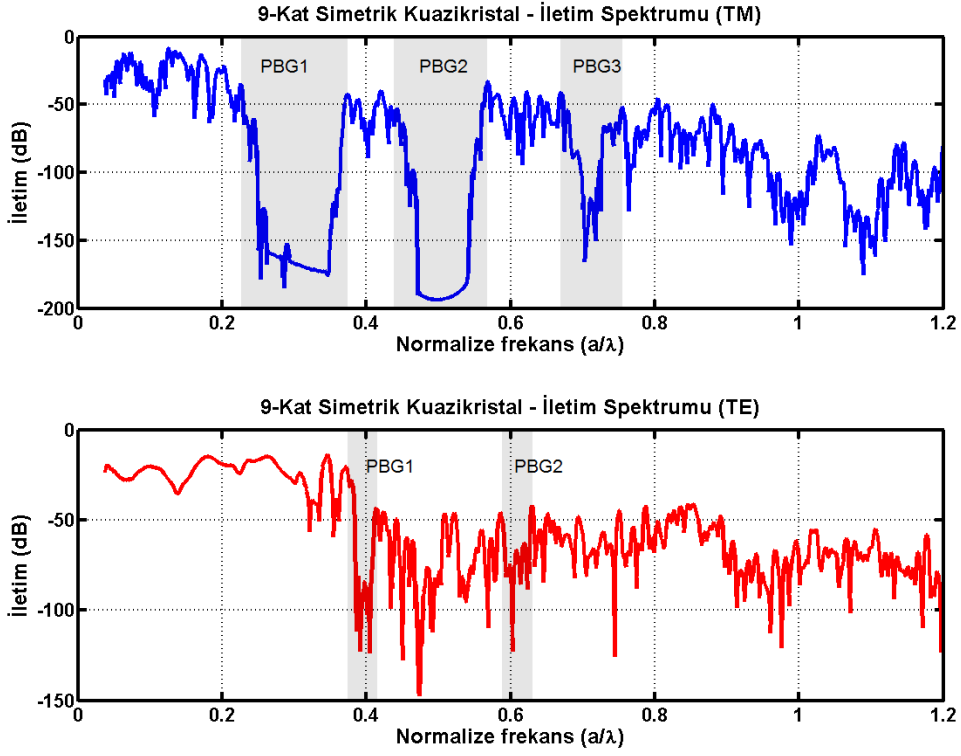
Şekil 5.5 6-Kat Simetrik fotonik kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



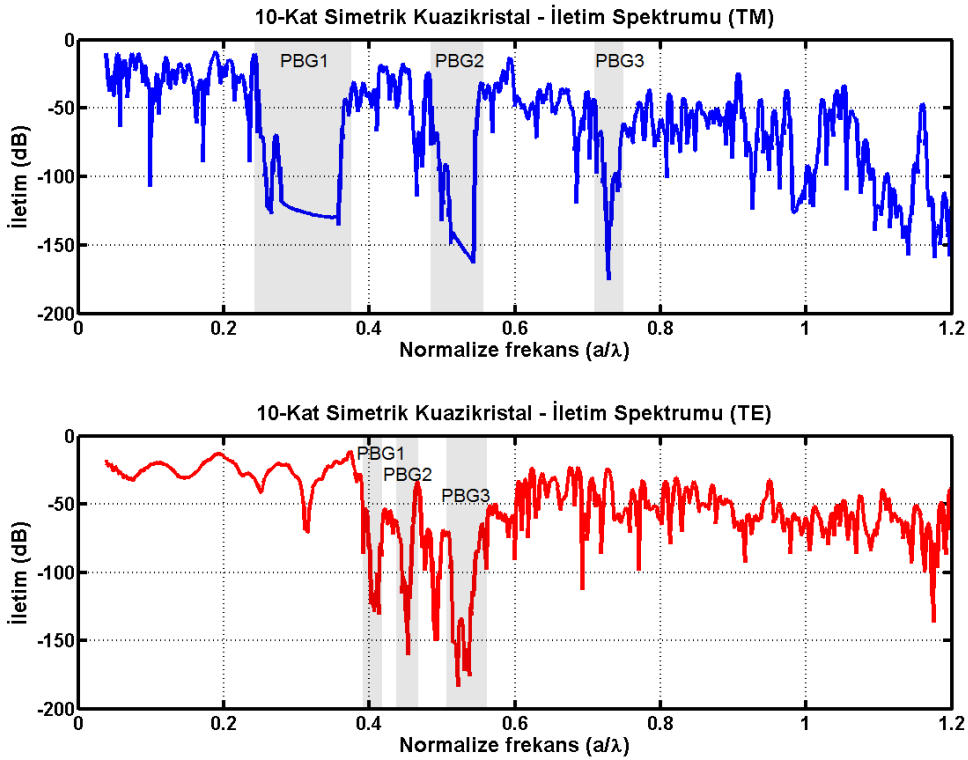
Şekil 5.6 7-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



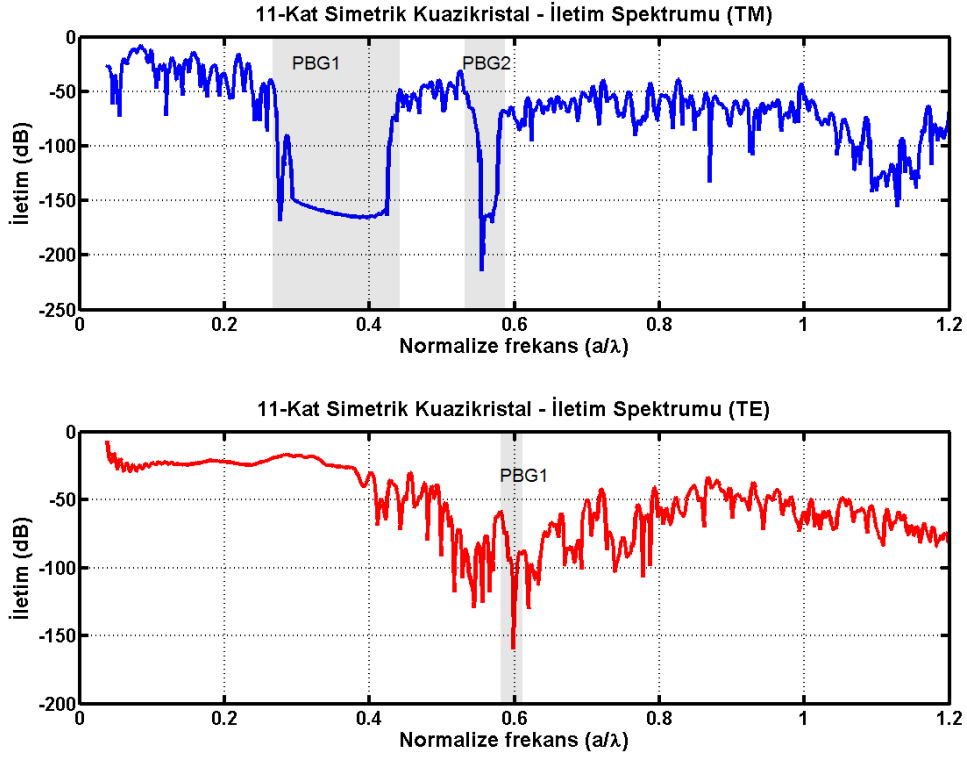
Şekil 5.7 8-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



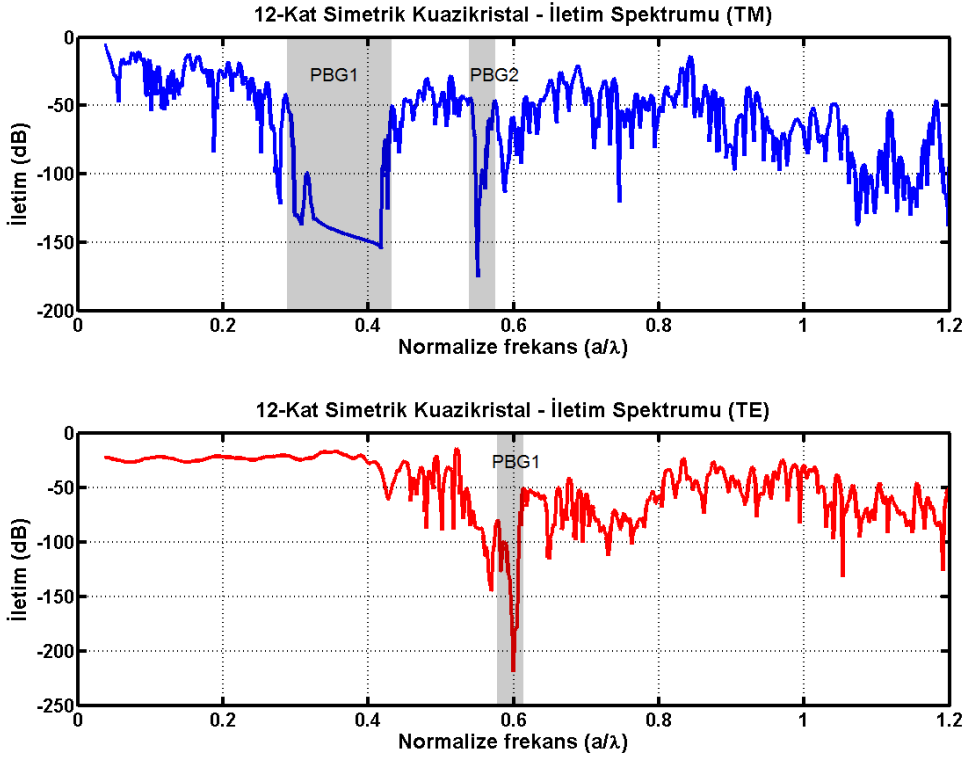
Şekil 5.8 9-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



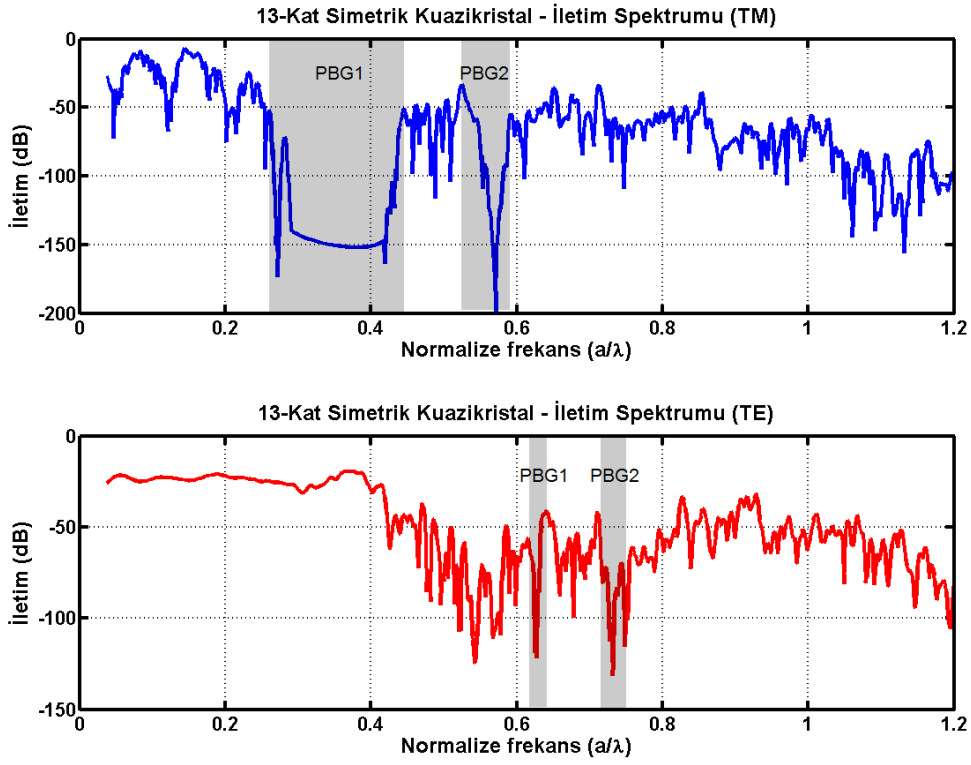
Şekil 5.9 10-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



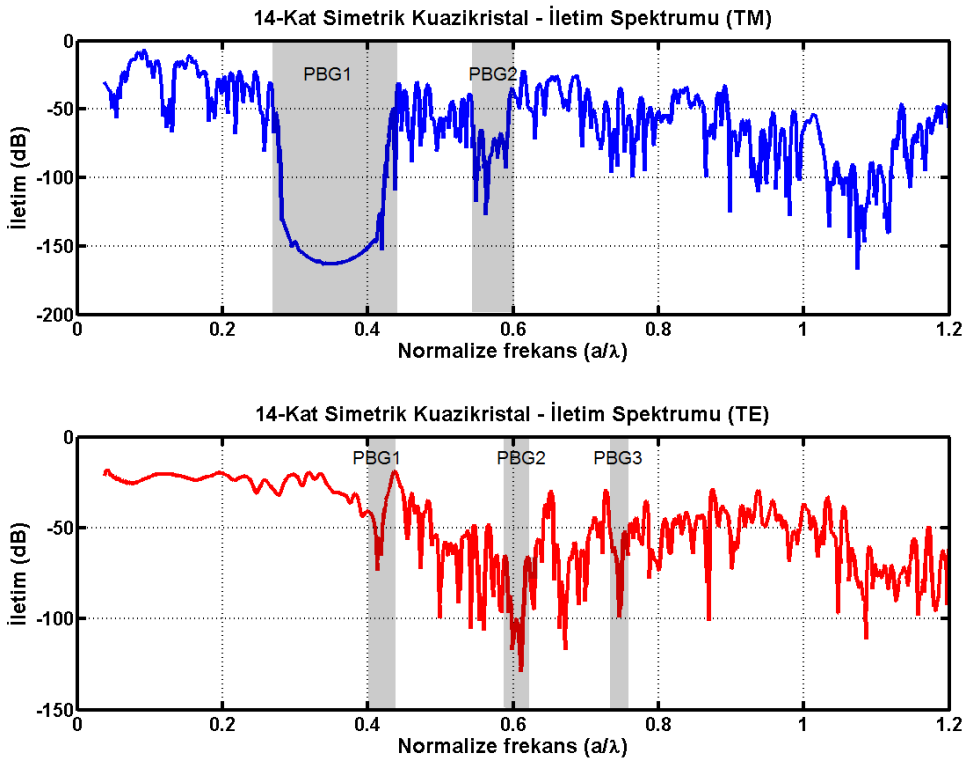
Şekil 5.10 11-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



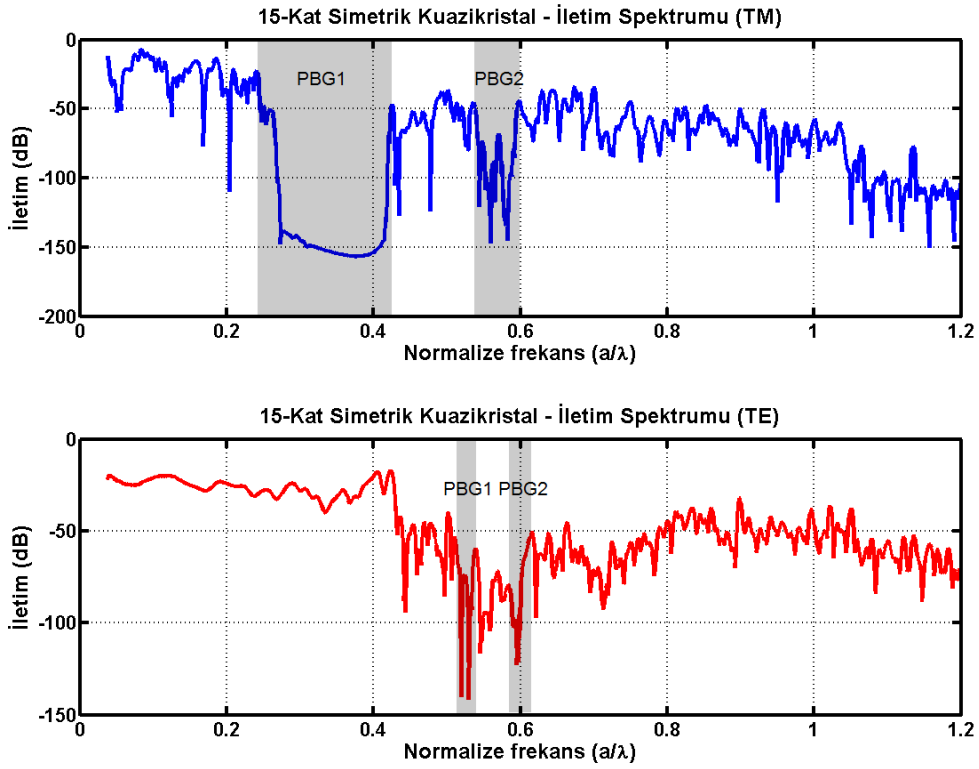
Şekil 5.11 12-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



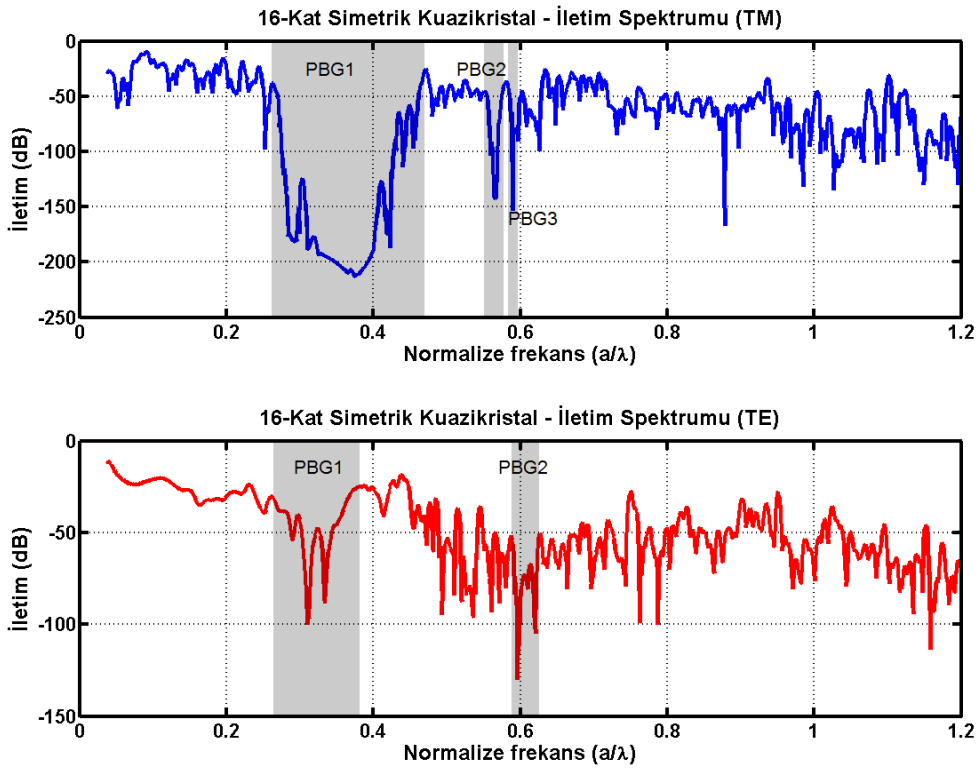
Şekil 5.12 13-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



Şekil 5.13 14-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



Şekil 5.14 15-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları



Şekil 5.15 16-Kat Simetrik kuazi kristal yapının TM ve TE polarizasyonunda iletim spektrumları

Çizelge 5.1 5~8 kat simetrik KK örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılarda, TE ve TM polarizasyonda gönderilen optik sinyale karşı iletim özelliklerinin, FBB ve T-FBB bant aralıklarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi

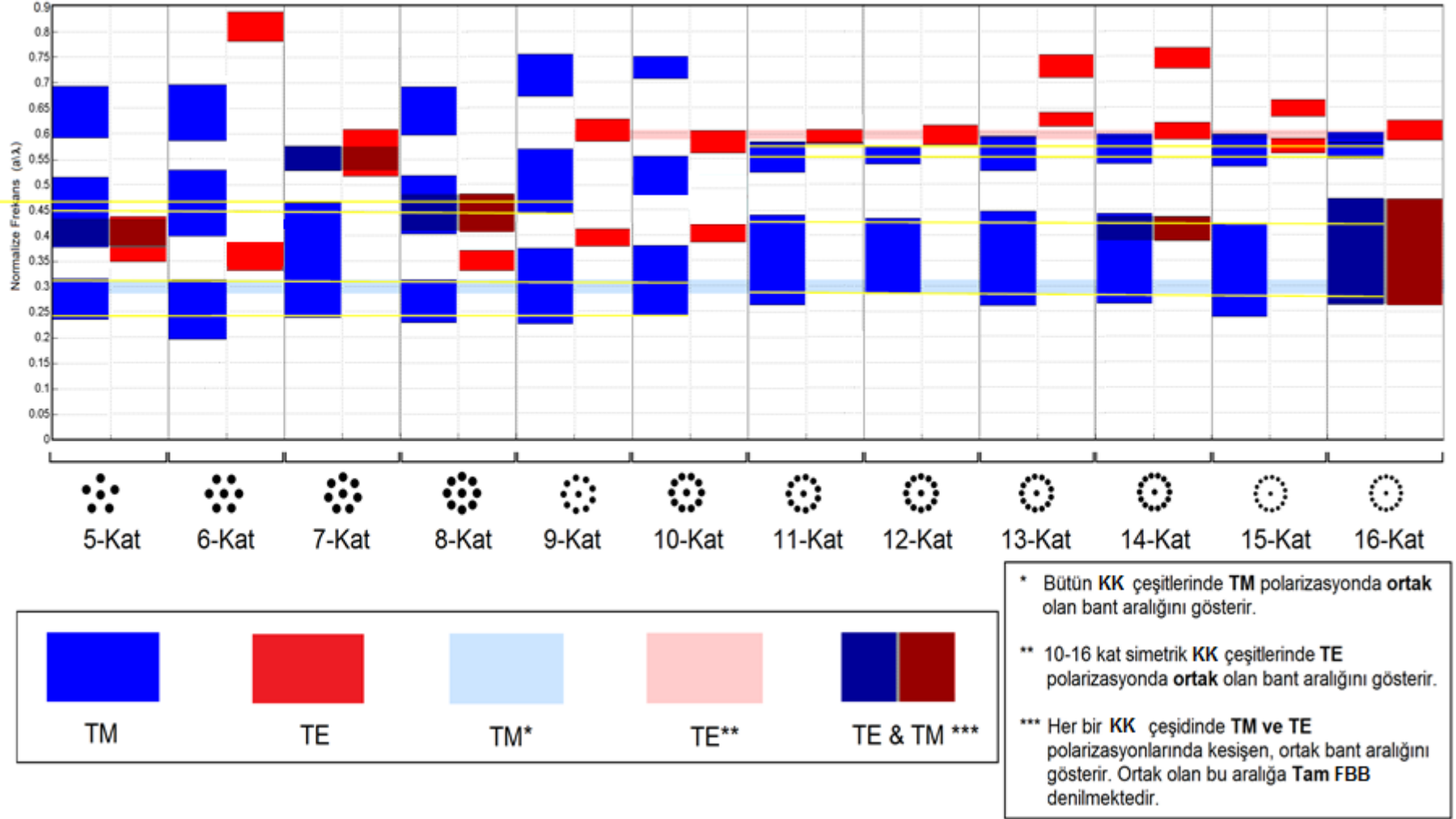
| | | FBB1 | | | | FBB2 | | | | FBB3 | | | |
|-----------|-----|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| KK Çeşidi | Mod | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ |
| 5-Kat | TM | 0.2368 | 0.3162 | 0.0794 | % 7.94 | 0.3787 | 0.5166 | 0.1379 | % 13.79 | 0.5934 | 0.6949 | 0.1015 | % 10.1 |
| | TE | 0.3357 | 0.3644 | 0.0287 | % 2.87 | 0.3670 | 0.3839 | 0.0169 | % 1.69 | 0.3852 | 0.4242 | 0.039 | % 3.9 |
| 6-Kat | TM | 0.1952 | 0.3123 | 0.1171 | % 11.71 | 0.3982 | 0.5283 | 0.1301 | % 13.01 | 0.5856 | 0.6962 | 0.1106 | % 11 |
| | TE | 0.3266 | 0.3917 | 0.0651 | % 0.651 | 0.786 | 0.8511 | 0.0651 | % 6.51 | - | - | - | - |
| 7-Kat | TM | 0.2381 | 0.4633 | 0.2252 | % 22.52 | 0.5270 | 0.5752 | 0.0482 | % 4.82 | - | - | - | - |
| | TE | 0.5140 | 0.6051 | 0.0911 | % 9.11 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8-Kat | TM | 0.2290 | 0.3136 | 0.0846 | % 8.46 | 0.4034 | 0.5179 | 0.1145 | % 11.45 | 0.5973 | 0.6923 | 0.095 | % 9.5 |
| | TE | 0.3305 | 0.3696 | 0.0391 | % 3.91 | 0.4073 | 0.4815 | 0.0742 | % 7.42 | - | - | - | - |

Çizelge 5.2 9~12 kat simetrik KK örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılarda, TE ve TM polarizasyonda gönderilen optik sinyale karşı iletim özelliklerinin, FBB ve T-FBB bant aralıklarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi

| | | FBB1 | | | | FBB2 | | | | FBB3 | | | |
|-----------|-----|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| KK Çeşidi | Mod | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ |
| 9-Kat | TM | 0.2251 | 0.3735 | 0.1484 | % 14.84 | 0.4424 | 0.5687 | 0.1263 | % 12.63 | 0.6715 | 0.7548 | 0.0833 | % 8.33 |
| | TE | 0.3800 | 0.4138 | 0.0338 | % 3.38 | 0.5856 | 0.6298 | 0.0442 | % 4.42 | - | - | - | - |
| 10-Kat | TM | 0.2407 | 0.3787 | 0.138 | % 13.8 | 0.4424 | 0.5517 | 0.0683 | % 6.83 | 0.70 | 0.7548 | 0.0548 | % 5.48 |
| | TE | 0.3865 | 0.4216 | 0.0351 | % 3.51 | 0.5856 | 0.6076 | 0.0234 | % 2.34 | - | - | - | - |
| 11-Kat | TM | 0.2642 | 0.4411 | 0.1769 | % 17.69 | 0.5244 | 0.5843 | 0.0599 | % 5.99 | - | - | - | - |
| | TE | 0.5804 | 0.6077 | 0.0273 | % 2.73 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12-Kat | TM | 0.2850 | 0.4333 | 0.1483 | % 14.83 | 0.5400 | 0.5739 | 0.0339 | % 3.39 | - | - | - | - |
| | TE | 0.5765 | 0.6142 | 0.0377 | % 3.77 | - | - | - | - | - | - | - | - |

Çizelge 5.3 13~16 kat simetrik KK örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılarda, TE ve TM polarizasyonda gönderilen optik sinyale karşı iletim özelliklerinin, FBB ve T-FBB bant aralıklarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi

| | | FBB1 | | | | FBB2 | | | | FBB3 | | | |
|-----------|-----|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| KK Çeşidi | Mod | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ | $\omega_{düşük}$ ($a/2\pi c$) | $\omega_{yüksek}$ ($a/2\pi c$) | $\Delta\omega$ ($a/2\pi c$) | % $\Delta\omega$ |
| 13-Kat | TM | 0.2603 | 0.4450 | 0.1847 | % 18.47 | 0.5244 | 0.5921 | 0.0677 | % 6.77 | - | - | - | - |
| | TE | 0.6142 | 0.6415 | 0.0273 | % 2.73 | 0.7105 | 0.7548 | 0.0443 | % 4.43 | - | - | - | - |
| 14-Kat | TM | 0.2655 | 0.4424 | 0.1769 | % 17.69 | 0.540 | 0.5986 | 0.0586 | % 5.86 | - | - | - | - |
| | TE | 0.3891 | 0.4359 | 0.0468 | % 4.68 | 0.5882 | 0.6207 | 0.0355 | % 3.55 | - | - | - | - |
| 15-Kat | TM | 0.2407 | 0.4242 | 0.1835 | % 18.35 | 0.5361 | 0.5986 | 0.0625 | % 6.25 | - | - | - | - |
| | TE | 0.5101 | 0.5387 | 0.0286 | % 2.86 | 0.5830 | 0.6155 | 0.0325 | % 3.25 | - | - | - | - |
| 16-Kat | TM | 0.2629 | 0.4711 | 0.2071 | % 20.71 | 0.5505 | 0.5804 | 0.0299 | % 2.99 | 0.5817 | 0.6025 | 0.0208 | % 2.08 |
| | TE | 0.2603 | 0.3748 | 0.1145 | % 11.45 | 0.5869 | 0.6259 | 0.0390 | % 3.90 | - | - | - | - |



Şekil 5.16 Farklı kat örgülerde ele alınan kuazi kristal yapılar, TE ve TM polarizasyonlarında ortak bant aralıklarının belirlenmesi

Şekil 5.16.'de mavi renkle gösterilen bant aralıkları TM, kırmızı renkle gösterilen bant aralıkları ise TE polarizasyonundaki bant aralıklarıdır.

Çizelge 5.4 Ortak bant aralıklarının normalize frekans değerleri

| Herbir KK çeşidinde TM ve TE polarizasyonlarda kesişen, ortak bant aralığı (T-FBB) | | | Bütün KK çeşitlerinde TM polarizasyonda ortak olan bant aralığı | 10-16 Kat Simetrik KK Çeşitlerinde Ortak TE bant aralığı |
|--|---------------------------------|--------------------------|---|--|
| KK Çeşidi | Frekans Aralığı (a/λ) | Bant Aralığı Yüzdesi (%) | Frekans Aralığı (a/λ) – Bant Aralığı Yüzdesi | Frekans Aralığı (a/λ) – Bant Aralığı Yüzdesi |
| 5-Kat | 0.3787-0.4242 | 4.53 | 0.2850 - 0.3123 % 2.73 | 0.5804 -0.6077 % 2.73 |
| 6-Kat | - | - | | |
| 7-Kat | 0.5270-0.5752 | 4.82 | | |
| 8-Kat | 0.4073-0.4815 | 7.42 | | |
| 9-Kat | - | - | | |
| 10-Kat | - | - | | |
| 11-Kat | - | - | | |
| 12-Kat | - | - | | |
| 13-Kat | - | - | | |
| 14-Kat | 0.3891-0.4359 | 4.68 | | |
| 15-Kat | - | - | | |
| 16-Kat | 0.2629-0.3748 | 11.19 | | |

Bunların ortak olarak yer aldığı değerlerin belirtildiği TE-TM bant aralıkları yani T-FBB, yine aynı şekil üstünde farklı bir renkle gösterilmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesinden sonra ise üçüncü olarak üzerinde durulması gereken nokta örgü çeşidinden bağımsız elde edilen TE-FBB, TM-FBB ve T-FBB bant aralıklarıdır. Yapıdan yani örgü çeşidinden bağımsız 5-kat~16-kat simetri özelliklerinde elde edilen bant aralıkları gönderilen dalganın polarizasyon özelliği ya da ele alınan yapının simetri özelliğinden bağımsız olarak, optik dalganın frekans değerleri konusunda esnek imkanlar sunabilir. Bundan yola çıkılarak, Şekil 5.16'de açık mavi şerit halinde gösterilen bölgeler, farklı örgülerdeki ortak TM polarizasyondaki bant aralıklarıdır. Aynı şekilde açık kırmızı şerit halinde gösterilen bölgeler ise ortak TE polarizasyondaki bant aralıklarıdır. Çizelge 5.1-3'de elde edilen bu ortak bant aralıklarının sayısal değerleri Çizelge 5.4'de gösterilmiştir. Buna göre bütün KK çeşitlerinde TE-TM ortak bant aralıkları tespit edilememiştir. Sadece 5-kat, 7-kat, 8-kat, 14-kat ve 16-kat simetrik KK çeşitlerinde T-FBB aralığı bulunmuştur. Elde edilen bant frekans

aralıkları ve yüzdeleri Çizelge 5.4'de hesaplanmıştır. Böylece bu frekans aralıklarında yapıya gönderilen sinyal, polarizasyondan bağımsız olarak yasaklı bant aralığında bulunduğu için yapıda ilerleyemez. Buna ek olarak 0.2850 ile 0.3123 normalize frekans değerleri arasında bütün KK çeşitlerinde ve TM polarizasyonunda, örgü çeşidinden bağımsız olarak yasaklı bant aralığı tespit edilmiştir. Bunda çıkarılacak sonuç, yapıdan bağımsız ışığın TM polarizasyonda belirli frekans aralığında ışığa yasaklı olduğudur. Son olarak, 10-16 kat simetrik KK çeşitlerinde 0.5804 ile 0.6077 normalize frekans değerleri arasında TE polarizasyonunda ortak yasaklı bant bölgesi tespit edilmiştir.

Kuazi kristallerde farklı katlardaki dögüsel simetri özelliklerine sahip yapıların FBB özelliklerinin sistematik olarak incelendiği bu bölümde herbir örgü çeşidinde farklı polarizasyonda fotonik bant boşluklarının frekans değerleri ve FBB büyüklüklerinin yüzde değerleri hesaplanmıştır. Yarı-kristal desenlerin TM ve TE yayılma özelliklerinin sistematik olarak incelenmesi sonucu örgü çeşidinden ve polarizasyondan bağımsız ışığın ilerleyebildiği frekans değerleri sunulmuştur. Tespit edilen frekans değerleri, optik uygulamalarda kullanılan kuazi kristaller malzemelerin farklı simetrik özelliklerine sahip çeşitlerinin kullanılmasında yeni imkanlar sunabilir.

6. 8-KAT SİMETRİK KUAZİ KRİSTALLERDE YAVAŞ IŞIK BAŞARIMI

Bu bölümde sekiz kat simetrik yarı (kuazi) periyodik kristal yapılarda yavaş ışık iletimi anlatılmaktadır. İşlem, önce farklı konfigürasyonlarda düzenlenen düzlemsel dalga kılavuzu yapılarının oluşturulmasıyla başlamıştır. Zaman düzleminde sonlu farklar yöntemi (ZDSF) kullanılarak, kusursuz ve kusurlu yapılarda gözlenebilir fotonik bant aralığı elde edilmiştir. Bundan yola çıkılarak, dalga kılavuzunda rezonans modun iletim özellikleri incelenmiş ve bu rezonans frekanslarında ışığın grup hızında yavaşlama gerçekleştirilmiştir. Işığın dalga kılavuzu içerisindeki ilerleyişi gözlemlenmiştir. Dalga kılavuzunun önünde dar-bantlı bir gauss sinyali oluşturulmuş, yapı sonundaki sinyal gözlemlenerek ışığın yavaşlama faktörü hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları yarı-periyodik fotonik yapıların yavaş ışık uygulamalarında gelecek vaat eden bir fotonik ortam olduğunu göstermektedir.

Düzenli sıralı dağılmış ya da düzensiz olmayan şekilde dizilmiş dielektrik yapılar iki farklı duruma karşılık gelmektedir. Simetrik olarak dizilen periyodik kristallere (fotonik kristaller) ek olarak farklı açılarda döngüsel simetrik özelliği de mevcuttur [82, 115]. Tamamen periyodik bir yapıyı tanımlamak için birim hücre yeterli olmaktadır. Bu birim hücrelerin düzenli olarak dağılmasıyla oluşan fotonik kristaller olarak bilinen yapıların optik analizi kolaylıkla yapılmaktadır. Bu periyodik yapılarla elde edilen fotonik cihazlar üzerinde uzun süreden beri çalışılmaktadır. Buna ek olarak, düzensiz olarak dizilmiş simetrik olmayan yapılar ışık dalgaları için çoklu saçılmaya neden olmaktadır ve bu fotonların hareketini gerçekleştiren girişimler sonucunda tahmin etmek zorlaşmaktadır. Elektromanyetik dalganın fotonik kristallerle etkileşiminin sonuçlarını elde etmek için frekans ya da zaman düzleminde Maxwell denklemleri kullanılmaktadır. Dalgalar bu tür ortamlarda ilerlerken çoklu saçılmaya uğramakta ve sonuç olarak, ışığın yasaklı olduğu yani yayılamadığı frekans aralığı olan bant aralıkları ve iletim bantları ortaya çıkmaktadır.

Kuazi kristaller düzenli olarak dizilişe sahip olan ancak tam simetri özelliğine sahip olmayan yarı-periyodik yapılardır. Bu yapılar N-kat simetrik yapılar olarak adlandırılır. Özellikle 5-kat örgüler “Penrose”, 8-kat örgüler “octogonal”, 10-kat örgüler “decagonal”, 12-kat örgüler ise “dodegonal” yapılar olarak literatürde geçmektedir. Fotonik kuazi kristaller, sahip oldukları fotonik bant aralıklarından ışığın taşınma mekanizmalarına kadar birçok uygulama için araştırma konusudur [112, 116-118]. Literatürde periyodik yapılar için fotonik bant

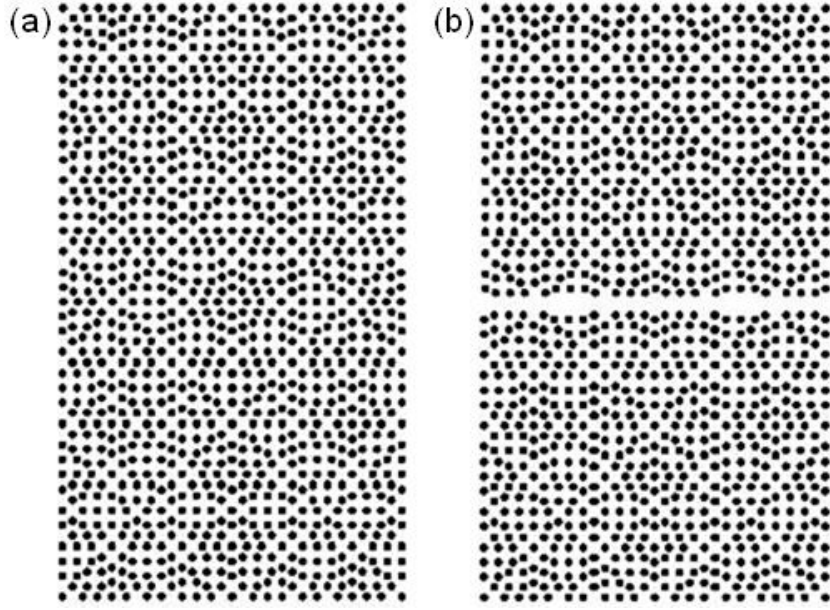
yapısının düzlem-dalga metoduna dayanarak kendini tekrarlayan birim hücre yaklaşımı ile hesaplanması yarı-periyodik olan bu yapılar için de incelenmiştir [119].

Son zamanlarda dielektrik malzemeler içerisinde ışığın hızının yavaşlatılması konusunda yaygın olarak çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmada ise fotonik kuazi kristal malzemelerde ışığın taşıma mekanizması yavaş-ışık konsepti üzerinde vurgu yapılarak incelenmektedir. Daha önceki yavaş-ışık çalışmaları etkileşimli rezonatör optik dalga kılavuzlarında ışığın yayılma karakteristiğini analitik olarak anlatmıştır [70]. Bu tarz incelemelerde eşdeğer kaviteler arasında karşılıklı etkileşim yaklaşımları yapılmış ve bu kaviteler arasında zayıf da olsa bir etkileşim olduğu varsayılmıştır. Kuazi kristal dalga kılavuzlarında uygulayabileceğimiz analitik yöntemler bize bu yapılar hakkında öngörü sağlayabilir. Ancak yavaş-ışık konseptinde dispersiyon çalışmalarının yanında gecikme ve bant genişliği bilgisi de üzerinde durulması gereken konulardır [120-122]. Kuazi kristal dalga kılavuzu yapılarında ışığın yayılımı ve yavaş ışık etkisinin incelendiği bu çalışmada 8-kat yani “octagonal” örgülü yapı tercih edilmiş ve bu yapılarda dalga kılavuzu oluşturularak bazı önemli sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde fotonik kristallerde yavaş ışık özelliği incelenmiş olmasına rağmen iki boyutlu kuazi periyodik yapılar için henüz bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ele aldığımız yapı Şekil 1(a)’da gösterilmektedir. Yarıçapı 0.30a olan dielektrik silindirlerden oluşan arka planı hava (boşluk) olan bir yapıdır. Silindirlerin içindeki malzemenin kırılma indeksi 3.46’dır. Yapı içerisine yollanan elektromanyetik dalga TM polarizasyonudur ve elektrik alan yapı düzlemine diktir.

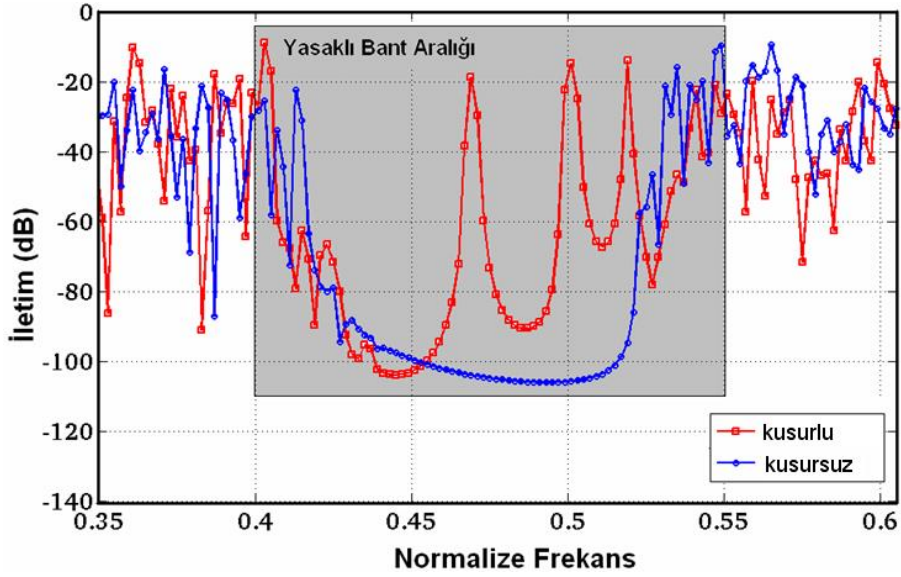
6.1. İletim Spektrumu ve Bant Aralığı Özellikleri

Bu çalışmada ilk olarak, iletim spektrumunun elde edilmesiyle kuazi kristal yapının bant aralığı özelliği incelenmiştir. Bu doğrultuda zaman düzleminde sonlu farklar yöntemi (ZDSF) kullanılmıştır [80]. İletim spektrumunda bazı frekans aralıklarında ışığın yapı içerisinde yayılma miktarının sıfıra yaklaştığı görülmüştür. Daha sonra bir doğrultudaki dielektrik çubukların kaldırılmasıyla farklı genişliklere sahip kuazi periyodik dalga kılavuzu konfigürasyonları oluşturulmuştur.

Şekil 6.1(b) elde edilen dalga kılavuzunu göstermektedir. Bu dalga kılavuzlarında elde edilen iletim spektrumuna bakıldığında daha önce incelenen yasaklı frekans bant aralığı içerisinde bazı modların oluştuğunun belirlenmesi önemlidir. Şekil 6.2 her iki duruma karşılık gelen sinyalin iletim katsayılarını göstermektedir. Yasaklı bant aralığı içerisinde rezonans modlar ortaya çıkmıştır. Bu rezonans modları sahip oldukları kalite faktörleri



Şekil 6.1 (a) 8-kat simetriye sahip “octagonal” örgülü kuazi kristal yapı. (b) Kuazi kristal yapı kullanılarak oluşturulan dalga kılavuzu

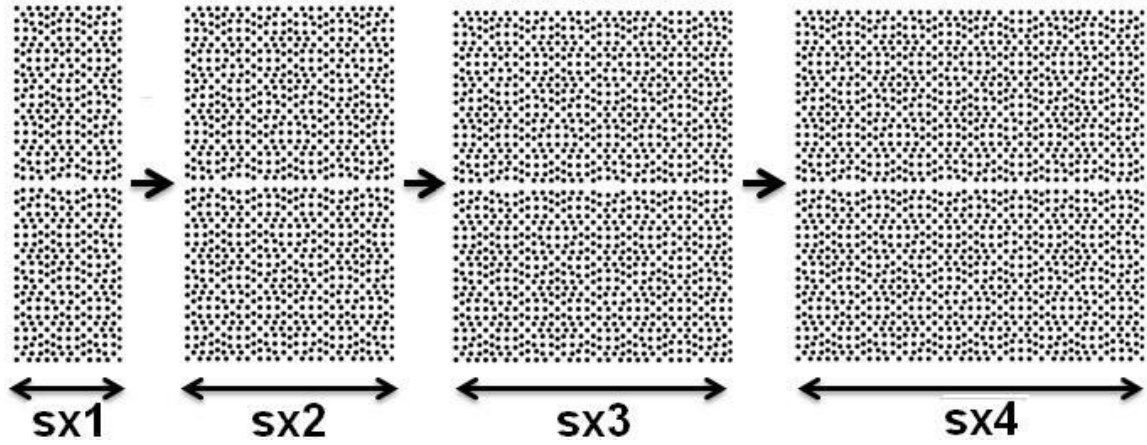


Şekil 6.2 Kuazi kristal yapının ve dalga kılavuzu oluşturulmuş yapının iletim spektrumları

Mertebesinde ışığı yavaşlatmaktadır ve merkez frekans bölgesinde sabit grup indeks değerine sahiptirler. Düzgün bir şekilde dalga kılavuzu girişinde uyarıldıktan sonra bu modların gecikme bilgilerini elde etmek gerekmektedir. Burada önemli hususlardan bir tanesi yapı içerisine gönderilen optik sinyalin dispersiyondan kaynaklanacak bozulmaların

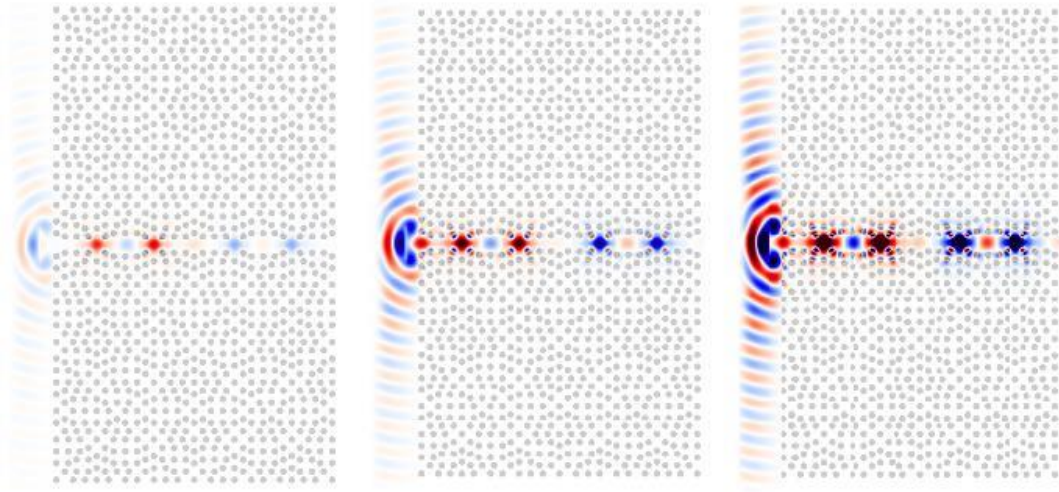
varlığıdır. Belirlenen rezonans frekanslarının doğru seçilmesiyle uyarılan modların saçılmaya uğramadan bilgiyi iletmesi amaçlanmaktadır.

Farklı genişlikte seçilen yapıların iletim spektrumları ayrı ayrı incelendiğinde, bu modların tepe noktası değerlerinin yapı boyutunun büyümesiyle yerlerinin küçük değişikliklere uğradığı ve genel olarak genliklerinin zayıfladığı görülmüştür.

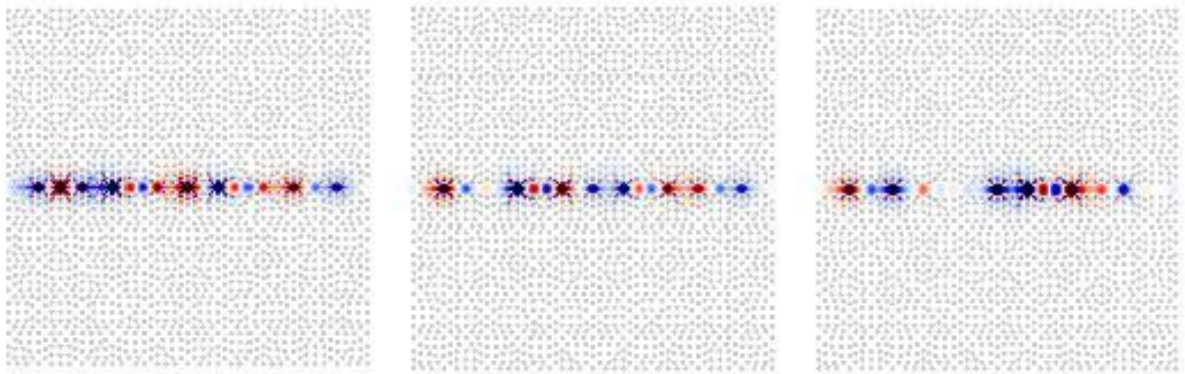


Şekil 6.3 Farklı uzunluklara sahip fotonik dalga kılavuzları

Şekil 6.3, dört farklı uzunluğa sahip dalga kılavuzunu göstermektedir. 0.4689 normalize frekans değerinde gönderilen Gauss sinyalinin geniş yapı içerisinde lokalize olarak ilerlediği ve saçılmadığı gözlemlenmiştir. Yapının boyutu değiştiği zaman dalga kılavuzu bölgesinde ortaya çıkan kavite benzeri yapıların çeşitliliği artmaktadır. Kaviteye benzeyen her bir bölgenin rezonans frekansı ve kalite faktörü değişik değerlere sahip olmaktadır. Yapının sonunda ortaya çıkan mod, her bir kavite benzeri alanların ortak rezonans değeridir. Dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen sinyalin farklı zamanlarda gözlemlenen alan dağılımları önemli bilgiler sunmaktadır. Örneğin optik sinyalin nerelerde lokalizasyon sonucu yoğunlaştığını ve genliğinin arttığını söylemek mümkündür. Sinyalin ilerlerken farklı zamanlarda elektrik alan dağılımlarına bakarak dispersiyon etkilerinden kaynaklanan bozulmaların olup olmadığını anlamak da mümkün olmaktadır. Şekil 6.4 ve Şekil 6.5 iki farklı uzunluktaki dalga kılavuzuna gönderilen optik sinyalin elektrik alan dağılımlarını sunmaktadır. Şekillere bakarak dalganın hangi yerlerde lokalize olduğu ve ilerleme mekanizmasını nasıl gerçekleştiği görülebilmektedir.



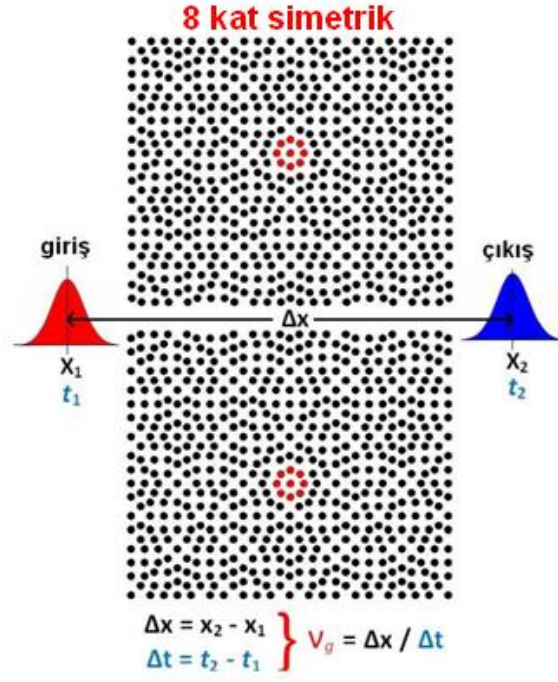
Şekil 6.4 Üç farklı zamanda hesaplanan elektrik alanın dalga kılavuzu içerisindeki dağılımları



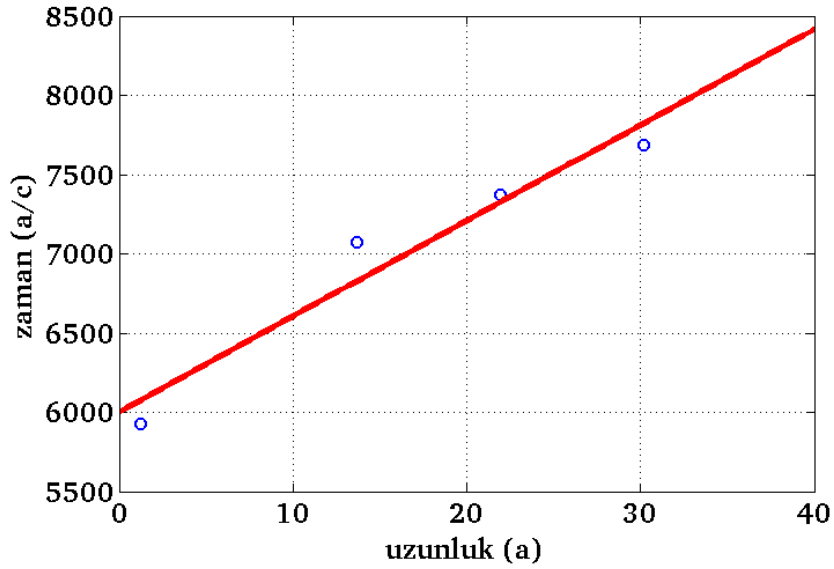
Şekil 6.5 Üç farklı zamanda hesaplanan elektrik alanın daha uzun bir dalga kılavuzu içerisindeki dağılımları

6.2. Yavaş Işık Yayılımının Zaman Düzleminde Analizi

Yavaş ışık uygulamalarında, dispersiyon etkisinin olduğu kristal yapı içerisinde yayılım özellikleri frekansa bağlı olduğundan, $k = k(\omega)$, yavaşlayan ışığın hız ifadesi için grup hızı v_g kullanılmaktadır. İletilen sinyalin tepe noktası v_g grup hızı ile ilerlemektedir. Işığın grup hızı, dalga sayısı k ile açısal frekans ω arasındaki ilişki ile belirlenir : $v_g = \partial\omega/\partial k$. Işık hızının grup hızına bölünmesi ile elde edilen yavaşlama faktörü $n_g = c/v_g$ ise grup indeksi olarak ifade edilmektedir. Grup hızı incelenirken giriş sinyalinin bant aralığının iletim bandında ortaya çıkan rezonans frekansın bant aralığı ile kıyaslanması gerekmektedir.



Şekil 6.6 Dalga kılavuzunda ilerleyen optik sinyalin grup hız bilgisinin çıkarımı. Δx yapının uzunluğunu temsil etmektedir.



Şekil 6.7 Dalga kılavuzunda ilerleyen sinyalin yol-zaman grafiği

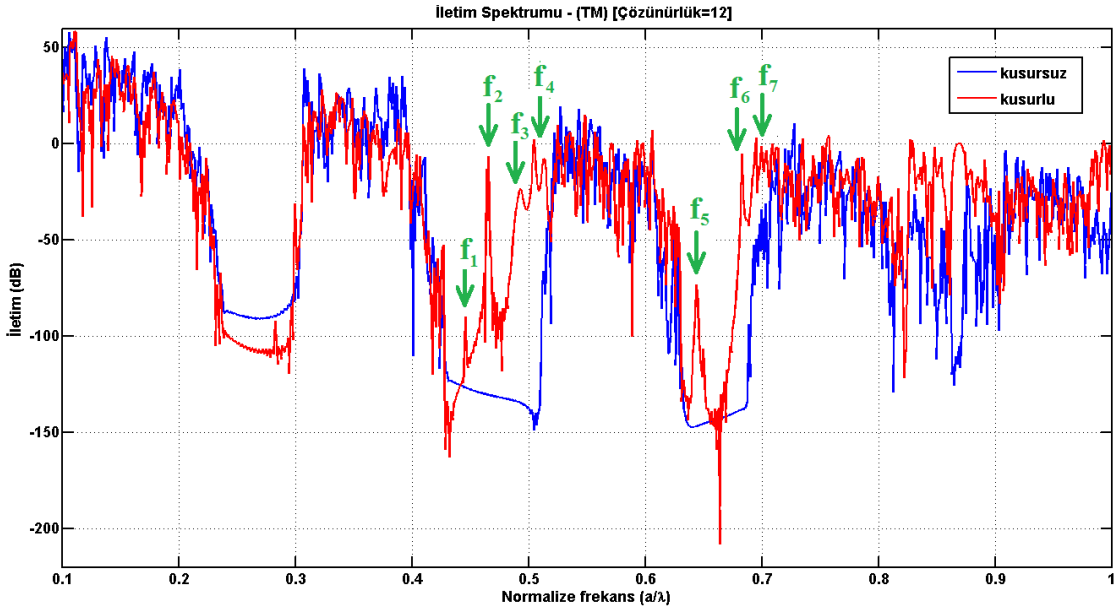
Dispersiyon etkisinin minimize edilmesi için giriş sinyalinin rezonans frekansından daha dar olması gerekmektedir. Bu sayede sabit grup indeks bölgesinde sinyal uyarılmış ve iletilmiş

olmakta böylece optik bozulmalar ortadan kalkmaktadır. Bu çalışma için tasarlanan yapıda iletilen sinyalin grup hızı dolayısıyla grup indeksi, yani yavaşlama faktörü değerinin hesaplanması için şu yol izlenmiştir : Dalga kılavuzlu yapının genişliği önce belli bir kalınlıkta alındıktan sonra daha sonra giderek kalınlığı artırılmıştır. Işığın yarı periyodik yapı içerisinde düzgün ilerlemesi için uygun frekans seçilerek Gauss sinyalin yapı sonuna varış süresi ve genliği incelenmektedir. Farklı uzunluklara sahip dalga kılavuzlarında ilerleyen sinyalin grup hız bilgisi Şekil 6.6'de gösterildiği üzere hesaplanabilmektedir. Işık kaynağı dalga kılavuzunun hemen önüne yerleştirilmiştir. Gaussian kaynağın normalize frekansı iletim spektrumundaki ilk rezonans frekansı olan $\omega a/2\pi c = 0.4689$ seçilmiştir. Dalga kılavuzuna uygun frekansta gönderilen bir optik sinyalin farklı noktalara geliş zamanları hesaplanarak grup indeksi hesaplanmıştır. Işığın yapı içerisinde ne kadar yavaşladığını belirlemek için hesaplanması gereken grup indeks değeri için öncelikle grup hız değerinin bilinmesi gerekir. Bunun için de ölçüm noktaları yapı sonlarında alınmış, daha sonra yapı belirli miktarlarda genişletilmiş tekrar ölçüm noktası alınmıştır. Böylece farklı genişlikteki yapıların sonundaki gecikme miktarına bakılarak ışığın grup hızı hesaplanmıştır. Şekil 6.7 farklı uzunluklara sahip dalga kılavuzunda ilerleyen optik sinyalin yol (delay)-zaman bilgisini içermektedir. Noktaların interpolasyonu sonucu oluşan eğimden grup indeks değeri hesaplanmıştır. Kuazi periyodik dalga kılavuzunda oluşan etkin grup indeksi 60'tır. Bu değer aynı zamanda ışığın 60 kat yavaşlatıldığını söylemektedir, $v_g = c / 60$.

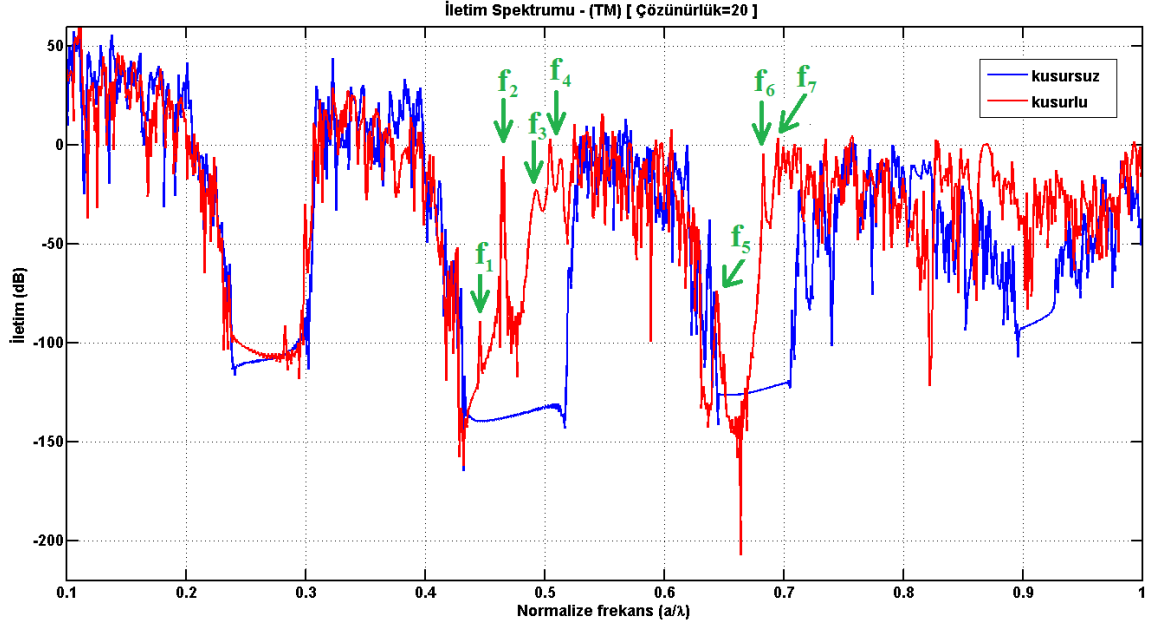
Kuazi periyodik yapılardan 8-kat simetrik KK, daha çok yasaklı bant aralıklarının araştırılması ve ışığın negatif kırılma özellikleri irdelenmesi açılarından çalışılmıştır. Yavaş ışık konseptinin yarı-periyodik yapılarda bazı avantajlara sahip olabilecek potansiyeli vardır. Tek tür dalga kılavuzu yerine farklı bozulmaların oluşturulması sayesinde çeşitli dalga kılavuzları elde etmek mümkündür. Araştırılan tek bir rezonans mod için ışığın 60 kat yavaşlatıldığı gösterilmiştir. Geri kalan rezonans modların karakteristikleri ve farklı tür simetriye sahip yapılar sayesinde yavaş ışık konusunda yarı-periyodik yapıların büyük katkı sağlayacağını söylemek mümkündür. Işığın yayılması konusunda farklı fotonik karakteristiklere sahip kuazi kristallerin kullanılması, zaman düzleminde bilgiyi taşıyan sinyalin yavaş-ışık konsepti doğrultusunda kontrol edilmesi için kullanılan anahtarlama, geciktirme, tamponlama, yönlendirme gibi optik yöntemlerde bizlere farklı alternatifler sunmaktadır. Bu sayede optik haberleşme sistemlerinde bilgiyi taşıyan sinyalin geniş bant aralığında ve bozulmadan işlenebilmesi doğrultusunda ilerleme sağlanacaktır.

7. FARKLI ÇÖZÜNÜRLÜKLERDE OLUŞTURULAN YAPILARIN VE FARKLI REZONANS FREKANSLARININ İLETİM ÖZELLİKLERİNİN VE YAVAŞLAMA MİKTARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

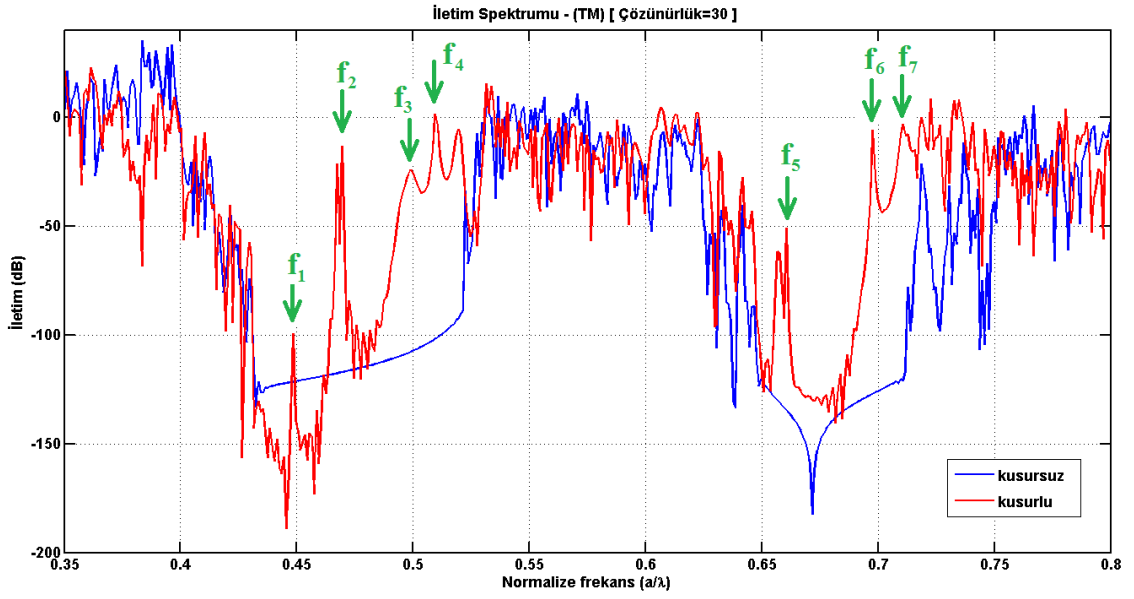
Tez çalışmaları kapsamında ışığın yayılması konusunda farklı fotonik karakteristiklere sahip dielektrik yapıdaki kuazi kristallerin optik özellikleri incelenmiştir. Farklı çözünürlükte oluşturulan dielektrik yapıların ve oluşturulan dalga kılavuzlarında iletilen rezonans modlarının ışığın iletim durumuna ve yavaşlama miktarına etkisi üzerinde durulması gereken konulardan biridir. Bu bölümde bu amaç doğrultusunda farklı çözünürlükte oluşturulan yapıların iletim spektrumları incelenerek bant boşluklarında oluşan rezonans frekans değerleri belirlenmiştir. Şekil 7.1, 7.2, 7.3.'de oluşan yasaklı bant aralıklarında işaretlenen frekans tepe noktası değerleri Çizelge 7.1.'de belirtilmiştir. Görüldüğü gibi çözünürlüğün 12 ve 20 olduğu durumlarda oluşan bant boşluklarındaki tepe noktası rezonans frekans değerleri birbirine çok yakındır. Ancak çözünürlüğün 30 olduğu durumda frekans kayması gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 7.1 Çözünürlük=12 değerinde kusurlu ve kusursuz yapıların iletim özelliklerinin incelenmesi



Şekil 7.2 Çözünürlük=20 değerinde kusurlu ve kusursuz yapıların iletim özelliklerinin incelenmesi

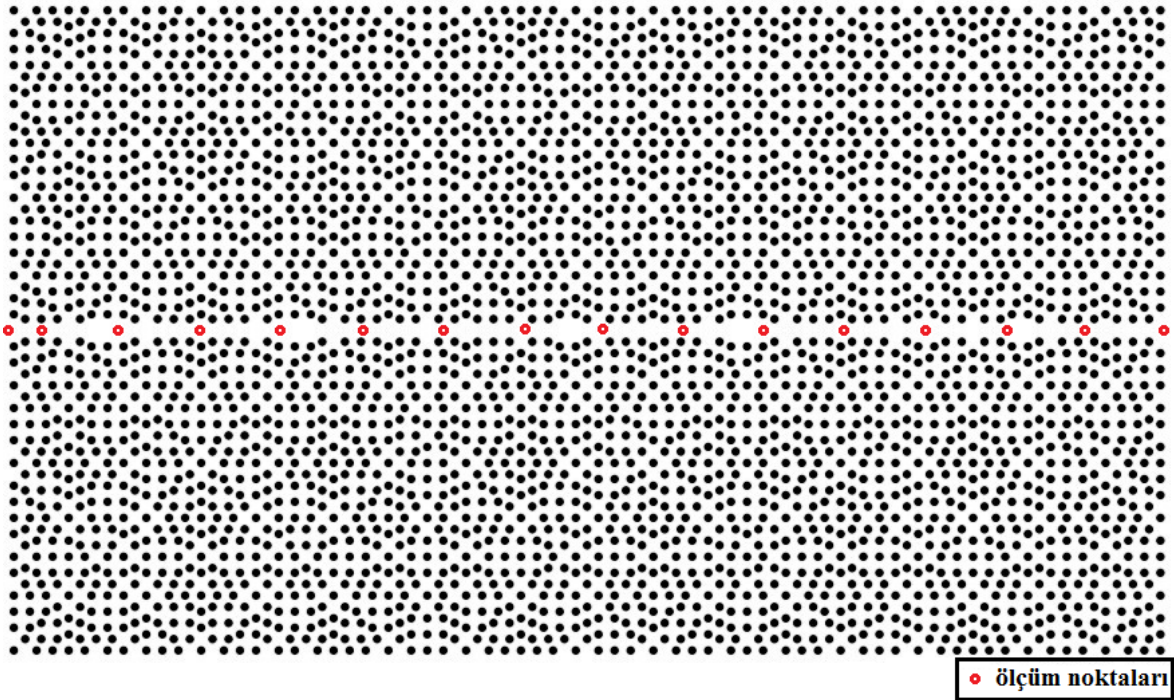


Şekil 7.3 Çözünürlük=30 değerinde kusurlu ve kusursuz yapıların iletim özelliklerinin incelenmesi

Çizelge 7.1 Farklı çözünürlüklerde oluşturulan yapıların rezonans frekans değerleri ve kayma miktarları

| | Çözünürlük = 12 | Çözünürlük = 20 | Çözünürlük = 30 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| f_1 | 0.4454 | 0.4454 | 0.4484 |
| f_2 | 0.4655 | 0.4655 | 0.4695 |
| f_3 | 0.4925 | 0.4915 | 0.4995 |
| f_4 | 0.5045 | 0.5045 | 0.5095 |
| f_5 | 0.6436 | 0.6436 | 0.6607 |
| f_6 | 0.6827 | 0.6827 | 0.6947 |
| f_7 | 0.6947 | 0.6947 | 0.7107 |

Farklı çözünürlüklerde elde edilen iletim spektrumlarındaki farklı rezonans tepe noktası değerlerinde gönderilen dalganın gecikme miktarları hesaplanmaya çalışılmıştır. Oluşturduğumuz yapı ve ölçüm noktaları gösterilmiştir. Şekil 7.4.'de gösterilen gecikme miktarlarının hesaplandığı yapı 70 birim genişliğindedir.



Şekil 7.4 Fotonik kuazi kristal dalga kılavuzu içerisinde alınan ölçüm noktalarının gösterimi

7.1. Çözünürlük Değerinin İletilen Frekans Değerine ve Yavaşlama Miktarına Etkisi

Çözünürlük değerinin iletilen frekans ve yavaşlama miktarına etkisini görebilmek amacıyla ikisi arasındaki frekans değerlerinde kayma miktarları arttığı için 12 ve 30 çözünürlük değerleri karşılaştırılmıştır.

7.1.1. Çözünürlük=12 Durumunda Yavaşlama Faktörü Hesabı

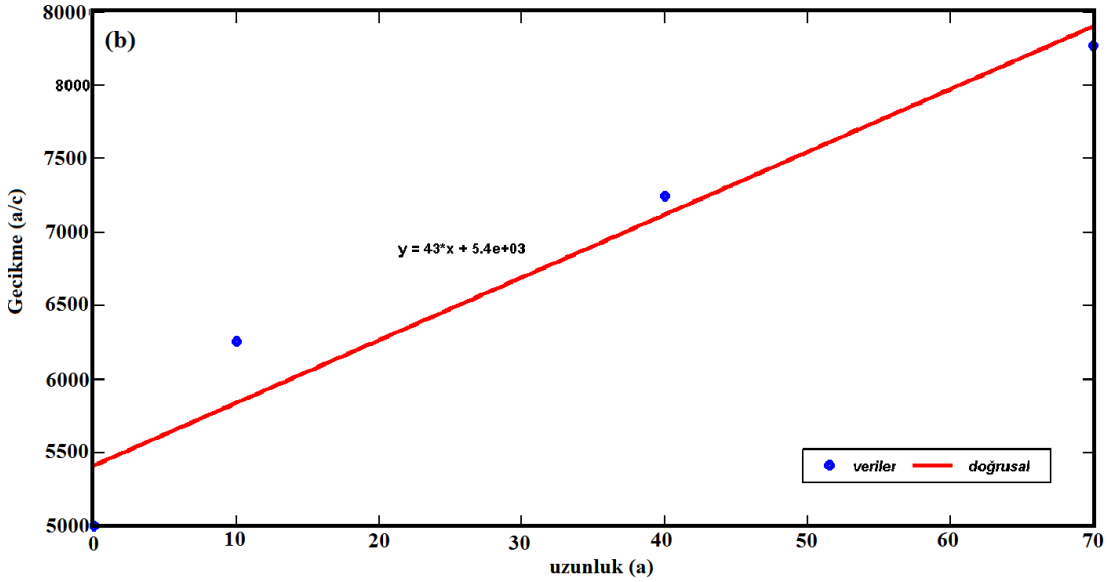
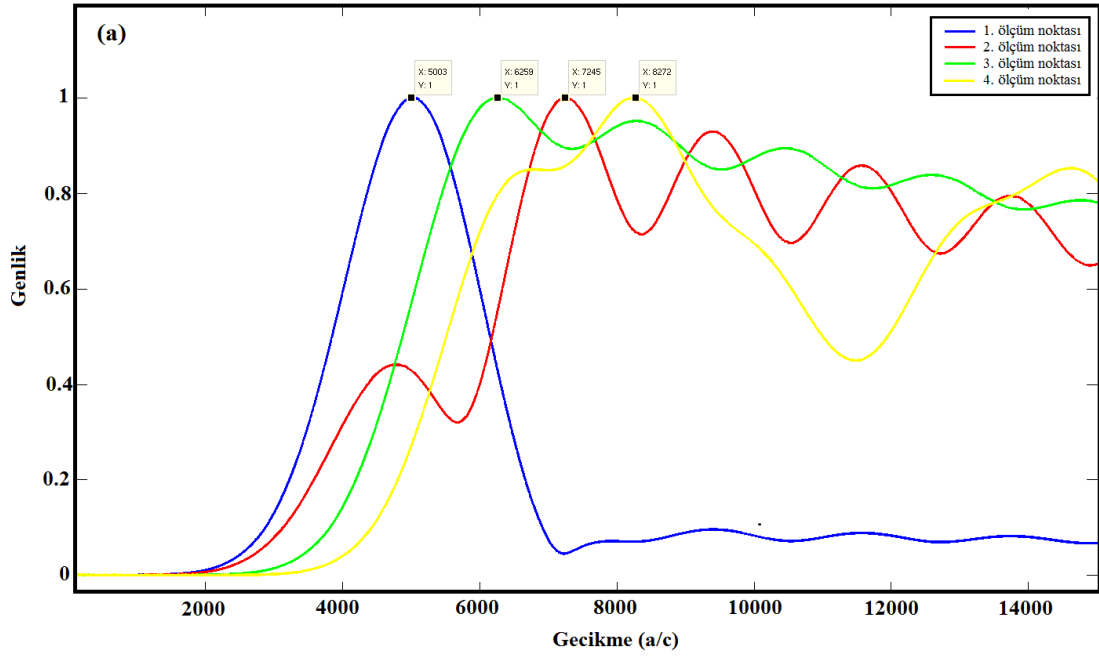
Görüldüğü gibi farklı frekanslarda gönderilen dalgalardan yalnız $f = 0.4454$ frekansında zaman gecikmesi elde edilmiştir. Diğer rezonans frekanslarında zaman gecikmesi olmamıştır. 70 birim genişliğinde ele alınan yapı ışığın yavaşlama miktarı n_g hesabı yapıldığında $n_g = (53435 - 50006) / 70 = 48.9857$ elde edilmiştir.

7.1.2. Çözünürlük=30 Durumunda Yavaşlama Faktörü Hesabı

Çözünürlük değerinin 30'a eşit olduğu durum için de bütün rezonans frekanslarında zaman gecikmesi bulunması için çalışmalar yapılmış ancak $f = 0.4695$ frekansı dışındaki rezonans durumlarında tutarlı ve sağlam sonuçlar elde edilememiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.5'de gösterilmiştir.

Şekil 7.5'de görüldüğü gibi ölçüm noktalarından alınan değerler doğrusal ayarlama yapılarak ortalama n_g değeri 43 hesaplanmıştır. Yüksek çözünürlükte, genişliği uzun yapı kullanmak simulasyon süresini hayli uzatması nedeniyle ve dalga kılavuzunun uzun olduğu yapılarda ışığın yapı sonuna ulaşması zorlaştığı için çözünürlüğün 30'a eşit olduğu 3 farklı genişlikte yapı kullanılmıştır. Böylece dalga kılavuzları sonundaki dalganın gecikme sürelerinin ortalamaları alınarak ortalama n_g değeri hesaplanmaya çalışılmıştır.

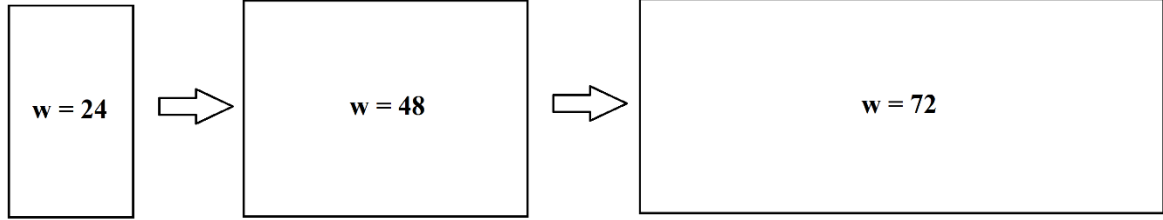
Yapılan çalışmada Şekil 7.6.'daki üç farklı uzunluktaki yapıda, yapının giriş ve çıkışındaki Gauss sinyallerin gecikme miktarları hesaplanmıştır. Yavaşlama miktarları incelendiğinde $w=24$ genişliğinde $n_g=27.5$, $w=48$ genişliğinde $n_g=52.9$, $w=72$ genişliğinde ise $n_g=44.7$ hesaplanmıştır. Işığın üç farklı yapıdaki yavaşlama miktarı olan n_g değerlerinin ortalamaları alındığında ortalama n_g değeri $(27.5+52.9+44.67)/3=41.69$ olarak hesaplanır.



Şekil 7.5 Normalize frekans = 0.4695 değerinde yavaş ışık elde edilmesi (a) Yapı içerisine yerleştirilen ölçüm noktalarında görülen Gauss dalga yayılımları (b) Gauss dalgaların uzunluk ve gecikme bilgi değerleri kullanılarak yavaşlama faktörü hesaplanması

Bu ilk bulduğumuz n_g değeri olan 43'e epey yakındır. Buradan çıkardığımız sonuç belirli uzunlukta aldığımız yapı içerisinde ölçüm noktaları olarak bulduğumuz n_g değeriyle, yapıyı bölerek elde ettiğimizde bulduğumuz n_g değerlerinin aynı olmasıdır. Bu da ancak dalga

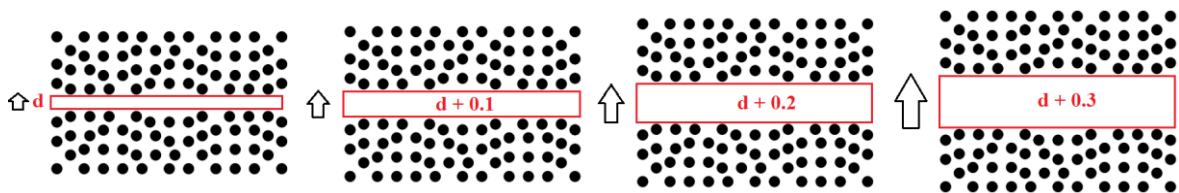
kılavuzu içerisine gönderilen sinyalin uygun frekansta seçilmesiyle mümkün hale gelmektedir.



Şekil 7.6 Işığın yavaşlama miktarı n_g hesabı için üç farklı uzunlukta ele alınan KK yapıların gösterimi

7.2. Ele Alınan Uzun Dalga Kılavuzlarında İletim Özellikleri, Yavaşlama Miktarı ve Optimum Dalga Kılavuzu Genişliğinin İncelenmesi

Uzun yapı içerisinde ışığın dalga kılavuzu içerisinde ilerlemesi zor olduğundan ışığın yapı sonundaki zaman gecikmesini elde etmek zorlaşmıştır. Bundan yola çıkarak ışığın dalga kılavuzunda daha rahat ilerlemesi için dalga kılavuzu genişliği belirli miktarda artırılarak önce uygun frekans seçimi yapılmış daha sonra zaman gecikmesi hesaplanmaya çalışılmıştır. Dalga kılavuzu genişliği artırılmış yapılar ve iletim spektrumları aşağıda gösterilmiştir.

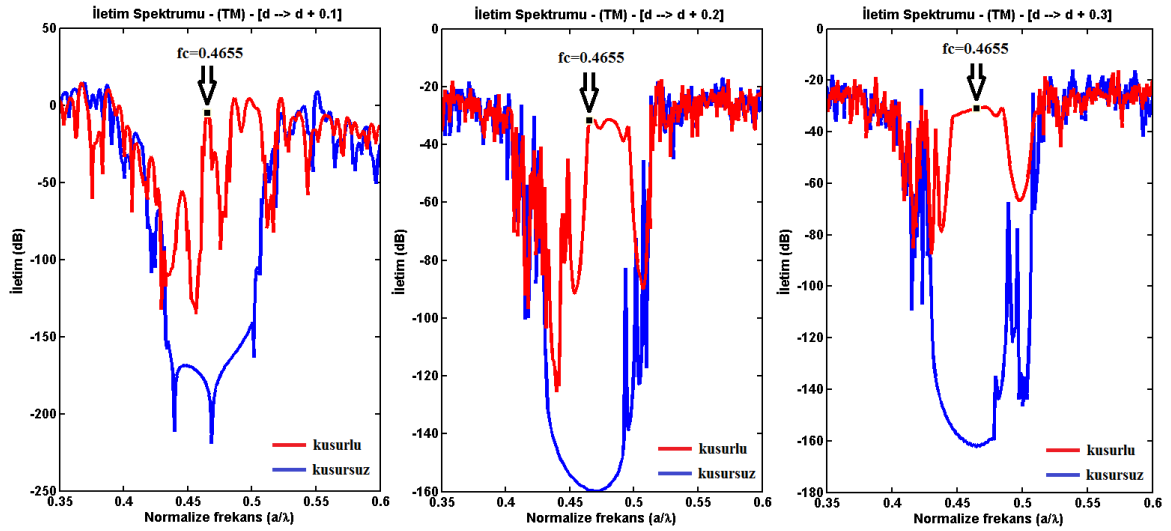


Şekil 7.7 Dalga kılavuzu genişliği artırılarak incelenen yapıların gösterimi

Dalga kılavuzlarının genişletilmesiyle elde edilen iletim spektrumları incelendiğinde normal olarak bant boşluklarında değişiklikler gözlemlenmiştir. Şekil 7.8’de görüldüğü gibi üç yapıda da 0.35-0.6 arasında oluşan bant aralıklarında dalga içerisine gönderdiğimiz ışıkların kesim frekansı 0.4655 seçilmiştir. Çünkü üç yapıda da bu frekansta dalga rezonans durumundadır.

Böylece yavaşlama miktarı karşılaştırılırken ışığın aynı frekansta gönderilmesiyle nedeniyle bu değişken hesaba katılmamış olur.

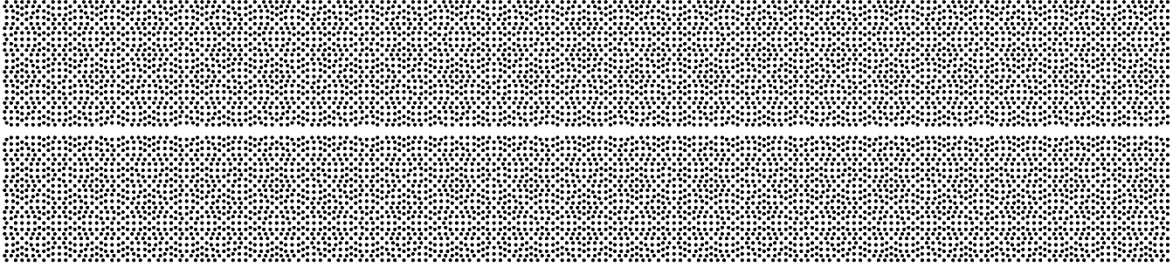
Yapılarda ışığın yavaşlama miktarı hesaplanırken birim uzunluğu $w=12$, $w=24$ ve $w=36$ genişliklerindeki yapılar kullanılmış ve bu yapıların dalga kılavuzu genişlikleri sırasıyla $d=0.1$, $d=0.2$ ve $d=0.3$ kadar artırılmış ve zaman gecikmeleri hesaplanmaya çalışılmıştır.



Şekil 7.8 Dalga kılavuzu genişlikleri artırılarak elde edilen FKD yapıların iletim durumları

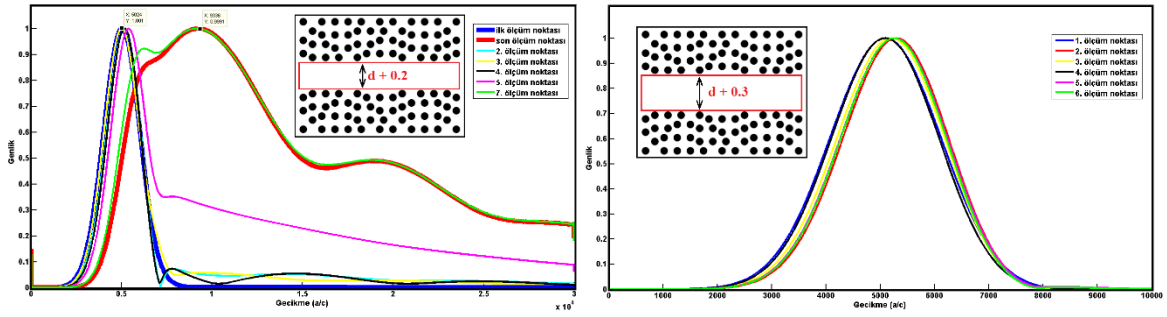
Ancak yapılan çalışmalarda dalga kılavuzu genişliği 0.3 birim kadar artırılan yapıda ışık dalga kılavuzu içerisinde kristal yapıyla fazla etkileşime uğramadan rahat bir şekilde ilerlediğinden zaman gecikmesi elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu yüzden yapı yeterince büyütülerek farklı denemeler yapılmıştır. Yapının dalga kılavuzu doğrultusunda yani y ekseninde uzatılmasıyla yapının yavaş ışık etkisi hakkında daha sağlıklı sonuçlar vermesi beklenmektedir. Ancak burada önemli noktalardan biri simülasyon süresidir. Yapının büyüklüğü artırıldığında sonlu farklar yöntemi yinelemeli bir şekilde çalıştığından simülasyon süresi epey uzamaktadır. Bu çalışmada yapının dalga kılavuzu uzunluğu Şekil 7.9’de gösterildiği gibi 180 birim olarak seçilmiştir.

Dalga kılavuzu uzunluğu artırılmasıyla yapılan çalışmalarda, genişlik 0.1 kadar artırıldığında ışık-madde etkileşiminin artması ve dalganın genliğinde bozulmalar olmasından dolayı zaman gecikmesinin belirlenmesi zordur. Şekil 7.11.’de genişliğin 0.2 ve



Şekil 7.9 Dalga kılavuzunun büyüklüğünün 180 birime artırılmasıyla çalışılan yapı

0.3 kadar artırılmasıyla yapı içerisindeki ölçüm noktalarında gözlemlenen Gauss dalgalar gösterilmiştir. Şekil 7.10'da gösterilen dalga kılavuzunda olduğu gibi 0.2 kadar artırıldığında beklenen duruma yaklaşılmıştır ve n_g değeri 23.96 olarak hesaplanmıştır. 0.3 kadar artırıldığında ise ışık malzeme etkileşimi azaldığından zaman gecikmesi görülmemiştir.



Şekil 7.10 FGD genişliğinin 0.2 ve 0.3 kadar artırılmasıyla yapı içerisindeki ölçüm noktalarında gözlemlenen Gauss dalgalar

Bu çalışmayla uzun dalga kılavuzlarında ışığın maddeyle etkileşmesi ancak genliğinin bozulmadan yapı sonuna kadar ulaşması için optimum dalga kılavuzluğu genişliğinin ne olması gerektiği hedeflenmiştir. Dalga kılavuzu genişliğinin 0.1 kadar artırılmasıyla ışık yapı içerisinde bozulmaya uğradığından yavaş ışık miktarı belirlenemezken, 0.3 kadar artırıldığında ise ışıkta belirgin bir yavaşlama gözlenmemiştir. 0.2 kadar artırılmasıyla ise Gauss dalganın bozulmadan hızında yaklaşık 29 kat yavaşlama olduğu hesaplanmıştır. Simülasyon süresinin büyük yapılarda çok fazla artmasından dolayı ele alınan 180 birim uzunluğundaki kuazi kristal dalga kılavuzunda, optimum dalga kılavuzu genişlik miktarı tam olarak belirlenememekle birlikte genişlik miktarının 0.1 - 0.2 aralığında bir değer kadar artırılmasıyla istenilen yavaş ışık faktörü n_g değerine ulaşılacağı öngörülmektedir.

8. SONUÇ

Bu tez kapsamında ışığın kayıpları en az indirecek şekilde iletilmesi, saklanması, işlenmesi ve kontrol edilmesi gibi işlemler için umut verici bir çözüm olan yavaş ışık uygulamaları üzerinde durulmuştur. Işık-madde etkileşiminin bir sonucu olarak ışığın grup hızında meydana gelen azalmalar neticesinde oluşan yavaş ışık, optik etkilerin geliştirilmesi için yeni imkanlar sunmaktadır. Grup hızı, ışık enerji paketinin ortamda birim zamanda aldığı yolu belirtir ve v_g ile tanımlanmaktadır. Grup hızı ilerlediği maddenin sadece kırılma indeksine değil aynı zamanda ışığın gönderildiği frekansa göre de değişkenlik göstermektedir. Işığın yavaşlama miktarını ya da ışığın gönderildiği malzemenin ışık davranışını basitçe anlamak için, zaman düzleminde sinüs fonksiyonlar, bozulmaları sınırlandırarak şekilde uygun frekans değerinde yapıya gönderilir. Yapı içerisinde ışık-madde etkileşimi ile ışık, ışık hızı c 'den daha düşük hızda yani faz hızı ile ilerler. Işık ve faz hızı arasındaki oran kırılma indeksini verir. Kırılma indeksi ele alınan malzeme için sabit değildir. Ortamın sıcaklığına, basıncına ve özellikle sinüs ışık dalgasının frekansına bağlıdır. Bu da bozunma (dispersion) ya da diğer bir deyişle dağınım denilen bir etkiye yol açar. Elde edilen kırılma indeksi dağınım ilişkisinde, kısa bir frekans aralığında ani indeks değişimleri olduğunda, grup hızı çok düşük değerlere ulaşabilmektedir. Yavaş ışık konsepti ve optik bilimindeki kullanım alanlarına değindikten sonra bu tez kapsamında bu amaç için kullandığımız farklı kristal malzeme çeşitleri üzerinde durulmuştur. Işığın yavaşlatılması için kullanılan malzemeler arasında yer alan fotonik kristallerin tercih edilmesinin nedeni, nano büyüklükte olması ve oda sıcaklığında çip üstüne entegre edilebilmesi, geniş bant aralığında bozulmaya uğramadan ışığı iletebilmesi gibi özelliklere sahip olmasıdır. Yaptığımız çalışmalar kapsamında dielektrik ortamlarda yavaş ışık elde edilmesi amacıyla kullanılan, sırasıyla yönlü ve döngüsel simetri özellikleri ve dolayısıyla sahip oldukları yasaklı bant boşlukları ile optik uygulamalar için farklı olanaklar sunan fotonik ve kuazi kristal malzemelerin özellikleri anlatılmıştır. Fotonik ve kuazi kristaller, optik ve iletişim araçlarda ışığın tam kontrolü için, farklı dielektrik özelliklere sahip en az iki maddenin birleştirilmesiyle yapay olarak oluşturan periodik kompozit (hetero) meta kristallerdir. Işığın yavaşlatılması amacıyla yüksek indeksli ince film tabakaya açılan dizi şeklindeki hava delikleriyle oluşturulan iki boyutlu fotonik kristal tabakalar, basit üretim süreci ve optik kayıpların az olması sayesinde günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Fotonik kristal tabakadaki hava deliklerinin çizgi halinde kaldırılması sonucu yani yapıda kusur oluşturulmasıyla fotonik kristal dalga kılavuzu elde edilir ve böylece açılan hat yani kusur

boyunca ışık yayılımı gerçekleşir. Işık bu kılavuz içerisinde uygun frekansın seçilmesiyle, toplam iç yansıma ve Bragg yansıması vasıtasıyla dağılmadan yayılır ve işlenerek yönlendirilir. Fotonik bant aralığı (FBB) etkisi, fotonik kristal dalga kılavuzlarında (FKD) ışığın toplam iç yansıma şeklinde hapsedilerek taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır. FBB bölgesinde belirli bir frekans aralığında çok düşük grup hızı elde edilebilmektedir. Yavaş ışık uygulamaları için son yıllarda oldukça fazla kullanılan fotonik kristallere ek olarak kuazi kristal malzemeler bu amaç için ilk defa önerilmiştir. Fotonik kristal yapılardan farklı olarak kuazi kristal örgüdeki yapılar, düzenli bir dizilime sahiptir ancak yönlü değil dögüsel simetri özelliklerini içinde barındırır. Bu yapılarda doğrusal olarak x ve y eksenlerinde ilerlendiği zaman aynı yapıyı elde etmek mümkün değildir. Rastgele olmayan ve kendini hiçbir şekilde tekrar etmeyen bu yapılar sahip oldukları simetri özellikleri nedeniyle ışığı iletirken oluşturdukları yasaklı bant aralıkları sayesinde optik uygulamalarda cezbedici ve güçlü bir etki bırakmıştır. Yüksek derecede dögüsel simetri özelliklerine sahip bu yapılarda ışık ilerlerken Bragg yansımalarının yoğun bir şekilde gerçekleşmesinden dolayı bir yandan yayılım ve ilerleme oluşurken bir yandan da ışık lokalize olacak şekilde davranış göstermektedir. Işığın madde içerisinde taşınma mekanizmasının zaman-etki alanında incelenmesi amacıyla kullanılan yöntem tezin üçüncü bölümünde anlatılmıştır. Buna göre fotonik ve kuazi kristaller kullanılarak beklenen hedeflerin ve gerçekleştirilen optik uygulamaların zaman düzleminde analizinin yapılması için Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF) kullanılmıştır. Işığın yapı içerisindeki davranışını ve ilerleyişini gözlemlemek ve beklenen sonuçlara ulaşmak amacıyla zaman düzleminde kullanılan Gauss darbeleri ayrıntılı olarak analizi yapılmıştır. Bu amaçla, ZDSF yöntemin kullanan ve MIT tarafından geliştirilen elektromanyetik simülasyon yazılımı Meep kullanılmıştır. ZDSF yönteminin ve dolayısıyla Meep algoritmasının temelini oluşturan Maxwell denklemleri ve Yee algoritmasının teoriği üzerinde durulmuş bununla beraber Meep yöntemi kullanılırken gereken sınır ve simetri koşulları, ızgara modeli, iletim ve yansıma spektrumu elde edilmesi ve rezonans modları konularına değinilmiştir. Yavaş ışık uygulamaları amacıyla kullandığımız fotonik ve kuazi kristal yapıların iletim ve bant özellikleri, ZDSF yöntemi ve Meep algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda bant boşluklarının olduğu gözlenmiştir. Tezin dördüncü bölümünde ZDSF yöntemiyle zaman-etki alanında kullanılan darbeler analiz edilerek, fotonik yapıların dalga kılavuzu modlarının dağılım özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Periyodik olmayan ya da yarı periyodik ortamlarda birim hücre modeliyle Bloch-dalga yayılımı mümkün değildir. Çünkü frekans düzlemi analiziyle periyodik fotonik yapıların dağılım ilişkisini elde etmek için güçlü ve basit bir sayısal

yöntem olan düzlem dalga yöntemi (PWM) kullanılmaktadır. PWM, alan profillerinin ortaya çıkarılmasına ek olarak, iletilen modlarının tek ya da çift olduğunun ve bu modların sayısının belirlenmesi ya da bant diyagramlarının incelenerek dalga kılavuzu modunun kesim frekanslarının anlaşılması için de kullanılmaktadır. Bu nedenle periyodik olmayan yapıların dağılım özelliklerinin frekans düzleminde gerçekleştirilmesi zor olduğundan zaman düzleminde kullanılan darbeler analiz edilerek dalga kılavuzu modlarının dağılım özellikleri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda yönlü simetri özelliğine sahip fotonik kristal dalga kılavuzlarının grup hızı dağılım özellikleri her iki düzlemde de elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak önerilen yöntemin tutarlılığı araştırılmıştır. Bu doğrultuda elde edilen sonuçların güvenilirliği ölçmek ve arttırmak amacıyla yavaş ışığın elde edilebildiği farklı dizilişteki fotonik kristal yapı örnekleri kullanılmıştır. Zaman-etki alanı yöntemleri kullanarak dağılım diyagramlarının elde edilmesi özellikle periyodik olmayan yapılar için alternatif bir yaklaşımdır. Bu yaklaşıma ek olarak yani zaman düzlemi sonuçlarından frekans-etki alanındaki sonuçlara ulaşabilmek amacıyla ele alınan yapı zaman düzlemi yaklaşımıyla, önce ayrık Fourier dönüşümü hesaplaması ve faz bilgisi çıkarımı yapılmasıyla, yavaş ışık bölgesinde yavaşlama faktörü n_g değeri hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen spektral analiz sonuçları ve zaman düzlemi sonuçları ayrı ayrı ele alınmış yavaşlama faktörü n_g değerleri hesaplanmıştır. Bu aşamadan sonra zaman düzlemi sonuçlarından Fourier dönüşümü yardımıyla dağılım ilişkisi değerleri hesaplanmıştır. Kıyaslama yapmak için yavaş ışık n_g değeri üzerinde durulmuş ve iki farklı düzlemde sonuçlar arasında uyum elde edildiği görülmüştür. Özetlemek gerekirse bu bölümde Fourier dönüşümü yardımıyla, zaman düzleminde sonlu farklar yöntemi (ZDSF) kullanarak fotonik kristal dalga kılavuzlarında dağılım ilişkisi çıkarımı yapmak için yeni bir teknik sunulmuştur. İlk olarak yapılan çalışmayla frekans düzleminde elde edilen grup indeks değerleriyle, zaman düzleminde her bir frekans değerinde hesaplanan grup indeks değerleri arasında uyum olduğu tespit edilmiştir. Daha sonraki aşamada ilk yöntemden farklı şekilde grup indeks değeri çıkarımı yapılmıştır. Bu bölümde FGD yapısı doğrusal bir sistem olarak ele alınarak Fourier dönüşümü tekniğiyle zaman düzlemi analiz sonuçlarından sistemin yani yapının frekans tepkisi değerlendirilmiştir. Yapının frekans tepkisinden, faz bilgisi ve dolayısıyla grup indeks değerleri hesaplanabilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma farklı simetri şekillerine sahip yapıların yalnızca zaman düzlemi analizi yetenekleri kullanarak dağılım ilişkisinin çıkarımının yapılabileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır. Böylece, bu yöntemin yavaş-ışık konseptine büyük katkı sağlamakla beraber daha karmaşık yapılarda da tamamen

optik yöntemler kullanarak bilgi taşıma çalışmalarına katkı sağlayacağını söyleyebiliriz. Tez çalışmasının beşinci bölümünde düzlemsel farklı katlardaki kuazi kristal desenlerin TM ve TE polarizasyon çeşitlerindeki yayılma özellikleri ayrı ayrı ZDSF kullanılarak olarak incelenmiştir. Böylece dögüsel simetri özelliklerine sahip farklı örgüdeki kuazi kristal yapıların fotonik bant aralığı özelliklerini, polarizasyondan ve örgü çeşidinden bağımsız ortak bant aralıklarını keşfetmek için sistematik çalışmalar yapılmış ve kayda değer sonuçlar elde edilmiştir. Bu amaçla elde edilen 5-kat simetrikten başlayarak 16-kat simetriye kadar uzanan farklı örgü çeşitlerindeki kuazi kristal yapıların, ZDSF tekniği yardımıyla iletim bant diyagramları farklı polarizasyonlarda sistematik olarak çıkarılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen fotonik bant boşluklarının frekans değerleri ve FBB büyüklüklerinin yüzde değerleri hesaplanmıştır. Yarı-kristal desenlerin TM ve TE yayılma özelliklerinin sistematik olarak incelenmesi sonucu örgü çeşidinden ve polarizasyondan bağımsız ışığın ilerleyebildiği frekans değerleri bulunmuştur. Tespit edilen frekans değerleri, optik uygulamalarda kullanılan kuazi kristaller malzemeleri farklı simetrik özelliklerine sahip çeşitlerinde kullanılmasıyla bu alanda yapılan çalışmalar için avantajlı kılmaktadır. Tezin altıncı bölümünde önceki çalışmalar doğrultusunda yavaş ışık iletimi için ele alınan farklı kuazi kristal yapılardan özellikle 8-kat simetrik kuazi kristal yapılar üzerinde durulmuştur. Bu yapılarda farklı konfigürasyonlarda düzenlenen düzlemsel dalga kılavuzu yapılarının oluşturulmasıyla çalışmaya başlanmış, ZDSF yöntemi kullanılarak dalga kılavuzu rezonans modların iletim özellikleri araştırılmış ve uygun modda yapıya gönderilen ışık paketinin grup hızında meydana gelen yavaşlama miktarı hesaplanmıştır. Kuazi periyodik yapılardan 8-kat simetrik KK, daha çok yasaklı bant aralıklarının araştırılması açısından çalışılmıştır. Yavaş ışık konseptinin yarı-periyodik yapılarda bazı avantajlara sahip olabilecek potansiyeli vardır. Tek tür dalga kılavuzu yerine farklı bozulmaların oluşturulması sayesinde çeşitli dalga kılavuzları elde etmek mümkündür. Araştırılan tek bir rezonans mod için ışığın 60 kat yavaşlatıldığı gösterilmiştir. Geri kalan rezonans modların karakteristikleri ve farklı tür simetriye sahip yapılar sayesinde yavaş ışık konusunda yarı-periyodik yapıların büyük katkı sağlayacağını söylemek mümkündür. Işığın yayılması konusunda farklı fotonik karakteristiklere sahip kuazi kristallerin kullanılması, zaman düzleminde bilgiyi taşıyan sinyalin yavaş-ışık konsepti doğrultusunda kontrol edilmesi için kullanılan anahtarlama, geciktirme, tamponlama, yönlendirme gibi optik yöntemlerde bizlere farklı alternatifler sunmaktadır. Bu sayede optik haberleşme sistemlerinde bilgiyi taşıyan sinyalin geniş bant aralığında ve bozulmadan işlenebilmesi doğrultusunda ilerleme sağlanmış olunacaktır. Tezin son bölümünde farklı çözünürlükte oluşturulan dielektrik yapıların ve oluşturulan

dalga kılavuzlarında iletilen rezonans modlarının ışığın iletim durumuna ve yavaşlama miktarına etkisi üzerinde durulmuştur. Bu amaç doğrultusunda farklı çözünürlükte oluşturulan yapıların iletim spektrumları incelenerek bant boşluklarında oluşan rezonans modları belirlenmiş ve yavaşlama faktörleri hesaplanmıştır. Buna ek olarak, uzun yapı içerisinde ışığın dalga kılavuzu içerisinde ilerlemesi zor olduğundan ışığın yapı sonundaki zaman gecikmesini elde etmek zorlaşmaktadır. Bundan yola çıkarak ışığın dalga kılavuzunda daha rahat ilerlemesi için dalga kılavuzu genişliği belirli miktarda artırılarak önce uygun frekans seçimi yapılmış daha sonra zaman gecikmesi hesaplanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmayla uzun dalga kılavuzlarında ışığın maddeyle etkileşmesi ancak genliğinin bozulmadan yapı sonuna kadar ulaşması için optimum dalga kılavuzluğu genişliğinin ne olması gerektiği hedeflenmiştir. Dalga kılavuzu genişliğinin 0.1 kadar artırılmasıyla ışık yapı içerisinde bozulmaya uğradığından yavaş ışık miktarı belirlenemezken, 0.3 kadar artırıldığında ise ışıktaki belirgin bir yavaşlama gözlenmemiştir. 0.2 kadar artırılmasıyla ise Gauss dalganın bozulmadan hızında yaklaşık 29 kat yavaşlama olduğu hesaplanmıştır. Simülasyon süresinin büyük yapılarda çok fazla artmasından dolayı ele alınan 180 birim uzunluğundaki kuazi kristal dalga kılavuzunda, optimum dalga kılavuzu genişlik miktarı tam olarak belirlenememekle birlikte genişlik miktarının 0.1 - 0.2 aralığında bir değer kadar artırılmasıyla istenilen yavaş ışık faktörü n_g değerine ulaşılabilecektir.

9. KAYNAKLAR

- [1] E. Parra and J. R. Lowell, "Toward applications of slow light technology," *Optics & Photonics News*, 18, 40-45, **2007**.
- [2] R. W. Boyd, D. J. Gauthier, and A. L. Gaeta, "Applications of slow light in telecommunications," *Optics & Photonics News* 7, pp.18-23, **2006**.
- [3] A. Melloni, F. Morichetti, and M. Martinelli, "Optical slow wave structures," *Opt. Photonics News* 14, pp. 44–48, **2003**.
- [4] L. Hau, S. Harris, Z. Dutton, and C. Behroozi, "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas," *Nature*, 397, pp. 594–598, **1999**.
- [5] S. E. Harris, "Electromagnetically induced transparency," *Physics Today*, 50, p. 36, **1997**.
- [6] C. Li, Z. Dutton, C. H. Behroozi, and L. V. Hau, "Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses," *Nature*, 409, pp. 490–493, **2001**.
- [7] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, "Storage of light in atomic vapor," *Physical Review Letter*, 86, pp. 783–786, **2001**. [8] M. Kash, V. Sautenkov, A. Zibrov, L. Hollberg, G. Welch, M. Lukin, Y. Rostovtsev, E. Fry, and M. Scully, "Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherently driven hot atomic gas," *Physical Review Letter*, 82, pp. 5229–5232, **1999**.
- [9] M. Lukin and A. Imamoglu, "Controlling photons using electromagnetically induced transparency," *Nature*, 413, pp. 273–276, **2001**.
- [10] T. Baba, "Photonic Crystals: Remember the light", *Nature Photonics*, 1, 11-12, **2007**.
- [11] T. Baba and D. Mori, "Slow light engineering in photonic crystals," *Journal of Physics D*, 40, pp. 2659-2665, **2007**.
- [12] M. F. Yanik, W. Suh, Z. Wang, and S. Fan, "Stopping light in a waveguide with an all-optical analog of electromagnetically induced transparency," *Physical Review Letter*, 93, p. 233903, **2004**.

- [13] M. Soljagic, S. Johnson, S. Fan, M. Ibanescu, E. Ippen, and J. D. Joannopoulos, “Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity”, *The Journal of the Optical Society of America B*, 19, p. 2052, **2002**.
- [14] L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen, and P. I. Borel, “Photonic crystal waveguides with semislow light and tailored dispersion properties,” *Optics Express*, 14, pp. 9444-9446, **2006**.
- [15] T. Baba, D. Mori, K. Inoshita, and Y. Kuroki, “Light localization in line defect photonic crystal waveguides”, *The IEEE Journal of Quantum Electronics*, 10, pp. 484-491, **2004**.
- [16] E. Yablonovitch, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics,” *Physical Review Letter*, 58, pp. 2059–2062, **1987**.
- [17] Ohtaka, K. Energy band of photons and low-energy photon diffraction. *Physical Review B*, 19, 5057–5067, **1979**.
- [18] John, S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letter*, 58, 2486–2489, **1987**.
- [19] Bowden, C. M., Dowling, J. P. & Everitt, H. O., Special issue on development and applications of materials exhibiting photonic band gaps, *The Journal of the Optical Society of America B* 10, 280–413, **1993**.
- [20] Joannopoulos, J. D., Meade, R. D. & Winn, J. N. Photonic Crystals– Moulding the Flow of Light (Princeton Univ. Press, Princeton, **1995**.
- [21] Photonic Band Gap Materials (ed. Soukoulis, C. M.) (Kluwer, Dordrecht, **1996**.
- [22] Scherer, A., Doll, T., Yablonovitch, E., Everitt, H. O. & Higgins, J. A. Special issue on electromagnetic crystal structures, design, synthesis, and applications, *Journal of Lightwave Technology*, 17, 1928–1930, **1999**.
- [23] Photonic Crystals and Light Localization in the 21st Century (ed. Soukoulis, C. M.) (Kluwer, Dordrecht, **2001**.
- [24] Krauss, T. K. & Baba, T. Feature section on photonic crystal structures and applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 724–956, **2002**.

- [25] Noda, S., Baba, T., *Roadmap on Photonic Crystals*, Kluwer, Norwell, **2003**.
- [26] Inoue, K., Ohtaka, K., *Photonic Crystals Physics, Fabrication and Applications*, Springer, Berlin, **2004**.
- [27] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D., *Photonic Crystals-Molding the Flow of Light 2nd*, Princeton Univ. Press, Princeton, **2008**.
- [28] F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultracompact optical buffers on a silicon chip," *Nature Photonics*, 1, pp. 65-71, **2007**.
- [29] M. Soljagic and J. D. Joannopoulos, "Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals," *Nature Materials*, 3, pp. 211–219, **2004**.
- [30] C. Peng, Z. Li, and A. Xu, "Rotation sensing based on a slow-light resonating structure with high group dispersion," *Applied Optics*, 46, pp. 4125-4131, **2007**.
- [31] M. Haurylau, G. Chen, H. Chen, J. Zhang, N. A. Nelson, D. H. Albonese, E. G. Friedman, and P. M. Fauchet, "On-chip optical interconnect roadmap: challenges and critical directions," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 12, pp. 1699–1705, **2006**.
- [32] M. J. Kobrinsky, B. A. Block, J.-F. Zheng, B.C. Barnett, E. Mohammed, M. Reshotko, F. Robertson, S. List, I. Young, and K. Cadien, "On-chip optical interconnects," *Intel Technology Journal*, 8, pp. 129–141, **2004**.
- [33] Z. Shi, R. W. Boyd, D. J. Gauthier, and C. C. Dudley, "Enhancing the spectral sensitivity of interferometers using slow-light media," *Optical Letters*, 32, pp. 915–917, 2007.
- [34] Baba, T., Fukaya, N. & Yonekura, J. Observation of light transmission in photonic crystal waveguides with bends, *Electronics Letters*, 35, 654–655, **1999**.
- [35] Loncar, M., Nedeljkovic, D., Doll, T., Vuckovic, J. & Scherer, A. Waveguiding in planar photonic crystals. *Applied Physical Letter*, 77, 1937–1939, **2000**.
- [36] Smith, C. J. M. et al. Low-loss channel waveguides with two-dimensional photonic crystal boundaries. *Applied Physical Letter*, 77, 2813–2815, **2000**.

- [37] Noda, S., Chutinan, A. & Imada, M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure. *Nature*, 407, 608–610, **2000**.
- [38] Notomi, M. et al. Singlemode transmission within photonic bandgap of width-varied single-linedefect photonic crystal waveguides on SOI substrates. *Electronics Letter*, 37, 293–295, **2001**.
- [39] Baba, T. et al. Light propagation characteristics of straight single line defect optical waveguides in a photonic crystal slab fabricated into a silicon-on-insulator substrate. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 743–752, **2002**.
- [40] Sugimoto, Y. et al. Low propagation loss of 0.76 dB/mm in GaAs-based single-line-defect twodimensional photonic crystal slab waveguides up to 1 cm in length. *Optics Express*, 12, 1090–1096, **2004**.
- [41] Notomi, M. et al. Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs. *Optics Express*, 12, 1551–1561, **2004**.
- [42] Bogaerts, W. et al. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology. *Journal of Lightwave Technology*, 23, 401–412, **2005**.
- [43] Dulkeith, E., McNab, S. J. & Vlasov, Y. A. Mapping the optical properties of slab-type twodimensional photonic crystal waveguides. *Physical Review B*, 72, 115102, **2005**.
- [44] Kuramochi, E. et al., Disorder-induced scattering loss of line-defect waveguides in photonic crystal slabs, *Physical Review B*, 72, 161318, **2005**.
- [45] Letartre, X. et al., Group velocity and propagation losses measurement in a single-line photonic crystal waveguide on InP membranes, *Applied Physical Letter*, 79, 2312–2314, **2001**.
- [46] Notomi, M. et al., Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs, *Physical Review Letter*, 87, 253902, **2001**.
- [47] Inoue, K. et al., Observation of small group velocity in two-dimensional AlGaAs-based photonic crystal slabs, *Physical Review Letter B*, 65, 121308, **2002**.

- [48] Asano, T., Kiyota, K., Kumamoto, D., Song, B. S. & Noda, S., Time-domain measurement of picosecond light-pulse propagation in a two-dimensional photonic crystal-slab waveguide, *Applied Physical Letter*, 84, 4690–4692, **2004**.
- [49] Vlasov, Y. A., O’Boyle, M., Hamann, H. F. & McNab, S. J., Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides, *Nature*, 438, 65–69, **2005**.
- [50] H. Gersen, T. J. Karle, R. J. P. Engelen, W. Bogaerts, J. P. Korterik, N. F. van Hulst, N. F., T. F. Krauss, and L. Kuipers, “Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides,” *Physical Review Letter*, 94, p. 073903, **2005**.
- [51] Finlayson, C. E. et al., Slow light and chromatic temporal dispersion in photonic crystal waveguides using femtosecond time of flight, *Physical Review Letter*, 73, 016619, **2006**.
- [52] Engelen, R. J. P. et al., The effect of higher-order dispersion on slow light propagation in photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 14, 1658–1672, **2006**.
- [53] Tanaka, Y. et al., Effect of third-order dispersion on subpicosecond pulse propagation in photoniccrystal waveguides, *Applied Physics Letter*, 89, 131101, **2006**.
- [54] Baba, T. & Mori, D., Slowlight engineering in photonic crystals, *Journal of Physic D* 40, 2659–2665, **2007**.
- [55] Krauss, T., Slow light in photonic crystal waveguides, *Journal of Physics D*, 40, 2666–2670, **2007**.
- [56] Mori, D. & Baba, T., Dispersion-controlled optical group delay device by chirped photonic crystal waveguides, *Applied Physics Letter*, 85, 1101–1103, **2004**.
- [57] Mori, D. & Baba, T., Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide, *Optics Express*, 13, 9398–9408, **2005**.
- [58] Povinelli, M. L., Johnson, S. G. & Joannopoulos, J. D., Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delay, *Optics Express*, 13, 7145–7159, **2005**.
- [59] Mori, D., Kubo, S., Sasaki, H. & Baba, T., Experimental demonstration of wideband dispersioncompensated slow light by a chirped photonic crystal directional coupler, *Optics Express*, 15, 5264–5270, **2007**.

- [60] Huang, S. C., Kato, M., Kuramochi, E., Lee, C. P. & Notomi, M., Time-domain and spectral-domain investigation of inflection-point slow-light modes in photonic crystal coupled waveguides, *Optics Express*, 15, 3543–3549, **2007**.
- [61] Kawasaki, T., Mori, D. & Baba, T., Experimental observation of slow light in photonic crystal coupled waveguides, *Optics Express*, 15, 10274–10281, **2007**.
- [62] Baba, T., Kawasaki, T., Sasaki, H., Adachi, J. & Mori, D., Large delay-bandwidth product and delay tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide, *Optics Express*, 16, 9245–9253, **2008**.
- [63] Sakai, A., Kato, I., Mori, D. & Baba, T., Anomalous low group velocity and low dispersion in simple photonic crystal line defect waveguides, Tech. Dig. IEEE/LEOS Annual Meeting ThQ5, Puerto Rico, IEEE/LEOS, **2004**.
- [64] Petrov, A. Y. & Eich, M., Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides, *Applied Physical Letter*, 85, 4866–4868, **2004**.
- [65] Settle, M. D. et al., Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth, *Optics Express*, 15, 219–226, **2007**.
- [66] Frandsen, L. H., Lavrinenko, A. V., Fage-Pedersen, J. & Borel, P. I., Photonic crystal waveguides with semislow light and tailored dispersion properties, *Optics Letter*, 14, 9444–9446, **2006**.
- [67] Kubo, S., Mori, D. & Baba, T., Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides, *Optics Letter*, 32, 2981–2983, **2007**.
- [68] Li, J., White, T. P., O’Faolain, L., Gomez-Iglesias, A. & Krauss, T. F., Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 16, 6227–6232, **2008**.
- [69] Hamachi, Y., Kubo, S. & Baba, T., Low dispersion slow light and nonlinearity enhancement in lattice-shifted photonic crystal waveguide, Tech. Dig. Quantum Electron. Laser Sci. Conf. QTuC1, San Jose, OSA, **2008**.
- [70] Yariv, A., Xu, Y., Lee, R. K. & Scherer, A. Coupled-resonator optical waveguide—A proposal and analysis. *Optics Letter*, 24, 711–713, **1999**.

- [71] Oliver, S. et al., Miniband transmission in photonic crystal coupled resonator optical waveguide. *Optics Letter*, 26, 1019–1021, **2001**.
- [72] Hosomi, K. & Katsuyama, T., A dispersion compensator using coupled defects in a photonic crystal. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 825–829, **2002**.
- [73] Martinez, A. et al., Group velocity and dispersion model of coupled-cavity waveguides in photonic crystals. *Journal of the Optical Society of America A*, 20, 147–150, **2003**.
- [74] Kim, W. J., Kuang, W. & O'Brien, J. D. Dispersion characteristics of photonic crystal coupled resonator optical waveguides. *Optics Express*, 25, 3431–3437, **2003**.
- [75] Fukamachi, T., Hosomi, K., Katsuyama, T. & Arakawa, Y. Group-delay properties of coupled-defect structures in photonic crystals. *Journal of Applied Physics*, 43, L449–L452, **2004**.
- [76] Khurgin, J. B. Expanding the bandwidth of slow-light photonic devices based on coupled resonators. *Optics Letter*, 30, 513–515, **2005**.
- [77] Poon, J. K., Zhu, L., De Rose, G. A. & Yariv, A. Transmission and group delay of microring coupled resonator optical waveguides. *Optics Letter*, 31, 456–458, **2006**.
- [78] Xia, F., Sekaric, L. & Vlasov, Y. Ultracompact optical buffers on a silicon chip. *Nature Photonics*, 1, 65–71, **2007**.
- [79] Kuramochi, E., Tanabe, T., Taniyama, H., Kato, M. & Notomi, M. Observation of heavy photon state in ultrahigh-Q photonic crystal coupled resonator chain. Tech. Dig. Quantum Phys. & Laser Sci. Conf. QMG2 (Baltimore, OSA, 2007).
- [80] 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 ZDSF method,” *Computer Physics Communication*, 181, 687–702, **2010**.
- [81] A. Taflove, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech, Norwood, MA, 3rd edn., **2005**.
- [82] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, R. D. Meade, J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton Univ. Press, 2nd edn., **2008**.

- [83] K. S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwells Equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antenna Propogation*, 14 (3), 302–307, **1966**.
- [84] M. J. Berger, J. Olinger, Adaptive Mesh Refinement for Hyperbolic Partial Differential Equations, *Journal of Computational Physics*, 53, 484–512, **1984**.
- [85] I. S. Kim, W. J. R. Hoefer, A Local Mesh Refinement Algorithm for the Time Domain-Finite Difference Method Using Maxwell’s Curl Equations, *IEEE Transactions on Microwave Theory Technology*, 38 (6), 812–815, **1990**.
- [86] S. S. Zivanovic, K. S. Yee, K. K. Mei, A Subgridding Method for the Time-Domain Finite-Difference Method to Solve Maxwell’s Equations, *IEEE Transactions on Microwave Theory Technology*, 39 (3), 471–470, **1991**.
- [87] M. Okoniewski, E. Okoniewska, M. A. Stuchly, Three-Dimensional Subgridding Algorithm for ZDSF, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45 (3), 422–429, **1997**.
- [88] S. Johnson, J. Joannopoulos, Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis, *Optics Express*, 8(3), 173, **2001**.
- [89] H. Gersen, T. J. Karle, R. J. Engelen, W. Bogaerts, J. P. Korterik, N. F. van Hulst, T. F. Krauss, and L. Kuipers, Direct Observation of Bloch Harmonics and Negative Phase Velocity in Photonic Crystal Waveguides, *Physical Review Letter*, 94(12), 123901, **2005**.
- [90] H. Kurt, H. Benisty, T. Melo, O. Khayam, and C. Cambournac, *Journal of Optical Society of America B*, 25(12), C1, **2008**.
- [91] R. S. Jacobsen, A. V. Lavrinenko, L. H. Frandsen, C. Peucheret, B. Zsigri, G. Moulin, J. Fage-Pedersen, and P. I. Borel, Direct experimental and numerical determination of extremely high group indices in photonic crystal wa[9]. 48-T. Asano, K. Kiyota, D. Kumamoto, B. S. Song, and S. Noda, *Applied Physics Letter*, 84, 4690, **2004**.
- [92] Yu. A. Vlasov, S. Petit, G. Klein, B. Hönerlage, and Ch. Hirlimann, Femtosecond measurements of the time of flight of photons in a three-dimensional photonic crystal, *Physical Review*, E 60, 1030, **1999**.

- [93] Lee M. W., Grillet C., Poulton C. G., Monat C., Smith CLC, Magi E., Freeman D., Madden S., Luther-Davies B., Eggleton B. J., Characterizing photonic crystal waveguides with an expanded k-space evanescent coupling technique, *Optics Express*, 16, 13800, **2008**.
- [94] S. Combrié, A. De Rossi, L. Morvan, S. Tonda, S. Cassette, D. Dolfi, and A. Talneau, Time-delay measurement in singlemode, low-loss photonic crystal waveguides, *Electronics Letter*, 42, 86-87, **2006**.
- [95] S. Assefa and Y. A. Vlasov, High-order dispersion in photonic crystal waveguides, *Opt. Express* 15, 17562 (2007).veguides," *Optics Express*, 13, 7861-7871, **2005**.
- [96] J. P. Berenger, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics*, 114, 185–200, **1994**.
- [97] Shechtman, D., Blech, I., gratias, D., and Cahn, J.W., Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry, *Physical Review Letter*, 53(20):1951-1954, **1984**.
- [98] “Crystal of golden porportions”, The Nobel Prize in Chemistry, **2011**.
- [99] P. I. Borel, L. H. Frandsen, A. Harpøth, J. B. Leon, H. Liu, M. Kristensen, W. Bogaerts, P. Dumon, R. Baets, V. Wiaux, J. Wouters, and S. Beckx, Bandwidth engineering of photonic crystal waveguide bends, *Electronics Letter*, 40 1263-1264, **2004**.
- [100] H. Park, J. Hwang, J. Huh, H. Ryu, S. Kim, J. Kim, and Y. Lee, Characteristics of Modified Single-Defect Two-Dimensional Photonic Crystal Lasers, *Quantum Electronics*, 38 1353-1365, **2002**.
- [101] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, Rate-equation analysis of output efficiency and modulation rate of photonic-crystal light-emitting diodes, *Quantum Electronics*, 36, 1123-1130, **2000**.
- [102] N. Hitoshi, Y. Sugimoto, K. Kanamoto, N. Ikeda, Y. Tanaka, Y. Nakamura, S. Ohkouchi, Y. Watanabe, K. Inoue, H. Ishikawa, and K. Asakawa, Ultra-fast photonic crystal/quantum dot alloptical switch for future photonic networks, *Optics Express*, 12, 6606-6614, **2004**.

- [103] M. E. Potter and R. W. Ziolkowski, Two compact structures for perpendicular coupling of optical signals between dielectric and photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 10, 691-698, **2002**.
- [104] L. B. Shaw, J. S. Sanghera, I. D. Aggarwal, and F. H. Hung, As-S and As-Se based photonic band gap fiber for IR laser transmission, *Optics Express*, 11, 3455-3460, **2003**.
- [105] Y. Roh, S. Yoon, H. Jeon, S. Han and Q. Park, Two-dimensional photonic crystal waveguides with multiple sharp bends, *SPIE International Society for Optics and Photonics*, 5360, 199-201, **2004**.
- [106] T. Hattori, N. Tsurumachi, S. Kawato, and H. Nakatsuka, Photonic dispersion relation in a one-dimensional quasicrystal, *Physical Review B*, 50, 4220-4223, **1994**.
- [107] C. Sibilia, I. S. Nefedov, M. Scalora, and M. Bertolotti, Electromagnetic mode density for finite quasi-periodic structures, *Journal of the Optical Society of America B*, 15, 1947-1952, **1998**.
- [108] M. A. Kaliteevski, S. Brand, R. A. Abram, T. F. Krauss, R. M. De La Rue and P. Millar, Two-dimensional Penrose-tiled photonic quasicrystals: From diffraction to band structure, *Nanotechnology*, 11, 274-280, **2000**.
- [109] C. J. Jin, B. Y. Cheng, B. Y. Man, Z. L. Li, D. J. Zhang, S. Z. Ban and B. Sun, Band gap and wave guiding effect in a quasiperiodic photonic crystal, *Applied Physics Letter*, 75, 1848-50, **1999**.
- [110] C. J. Jin, B. Y. Cheng, B. Y. Man, Z. L. Li and D. J. Zhang, Two-dimensional dodecagonal and decagonal quasiperiodic photonic crystals in the microwave region, *Physical Review B*, 61, 10762, **2000**.
- [111] X. Zhang, Z.-Q. Zhang, and C. T. Chan, Absolute photonic band gaps in 12-fold symmetric photonic quasicrystals, *Physical Review B*, 63, 081105, **2001**.
- [112] Y. S. Chan, C. T. Chan, and Z. Y. Liu, Photonic Band Gaps in Two Dimensional Photonic Quasicrystals, *Physical Review Letter*, 80, 956-959, **1998**.

- [113] S. S. M. Cheng, L.-M. Li, C. T. Chan, and Z. Q. Zhang, Defect and transmission properties of two- dimensional quasiperiodic photonic band-gap systems, *Physical Review B*, 59, 4091-4099, **1999**.
- [114] M. A. Kaliteevski, S. Brand, R. A. Abram, T. F. Krauss, P. Millar and R. De La Rue, Diffraction and transmission of light in low refractive index Penrose-tiled quasicrystals, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 13, 10459-10470, **2001**.
- [115] K. Sakoda, *Optical Properties of Photonic Crystals*, Springer, Berlin, **2001**.
- [116] J. B. Suck, M. Schreiber, P. Haüssler, *Quasicrystals*, Springer, Berlin, **2002**.
- [117] S. S. M. Cheng, L. M. Li, C. T. Chan, Z. Q. Zhang, Defect and transmission properties of two-dimensional quasiperiodic photonic band-gap systems, *Physical Review B*, 59, 4091-4099, **1999**.
- [118] R. C. Gauthier, K. Mnaymneh, Photonic band gap properties of 12-fold quasicrystal determined through ZDSF analysis, *Optics Express*, 13, 1985-1998, **2005**.
- [119] D. T. Roper, D. M. Beggs, M. A. Kaliteevski, S. Brand and R. A. Abram, “Properties of Two-Dimensional Photonic Crystals with Octagonal Quasicrystalline Unit Cells,” *Journal Modern Optics*, 53, 407-416, **2006**.
- [120] T. Baba, “Slow light in photonic crystals,” *Natural Photonics*, 2, 465–473, **2008**.
- [121] T. F. Krauss, “Why do we need slow light,” *Natural Photonics*, 2, 448–450, **2008**.
- [122] H. Kurt, K. Üstün, L. Ayas, “Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides”, *Optics Express* 18, 26965-26977, **2010**.
- [123] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley&Sons, Inc., **1991**.
- [124] Anonim, Elektromanyetik Spektrum, <http://nextbigfuture.com/2014/04/darpar-chip-sized-digital-optical.html>, Nisan, **2014**.

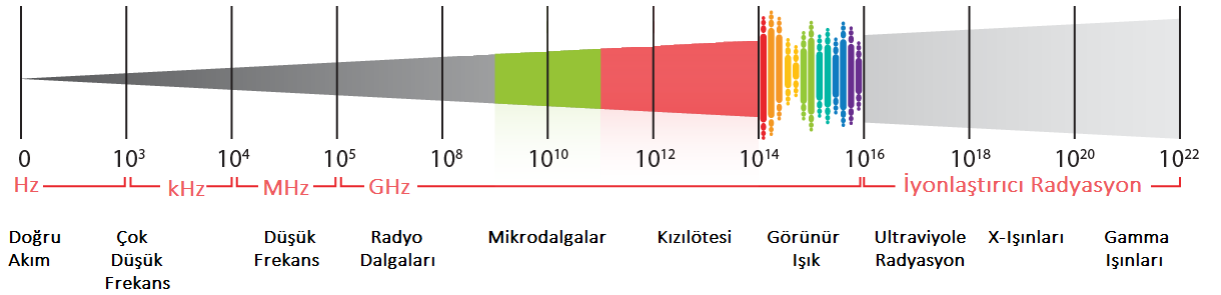
EKLER

EK 1: GAUSS DALGASI ve ÖZELLİKLERİ

Bir Dalga Denklemi Çözümü Olarak Gauss Dalgası

Gauss dalgası optik sistemlerde enine elektrik alan ve yoğunluk dağılımı Gauss fonksiyonu ile tanımlanmış elektromanyetik dalga olarak tarif edilir [123]. Lazerler gibi bir çok optik cihaz yaklaşık olarak Gauss dalgası profiline uygun bir ışın demeti üretir. Bu da lazerlerin temel enine yani TEM (Transvere Electromagnetic Mode) modunda çalıştığını gösterir. Bir mercekle ya da madde tarafından kırınım gerçekleştiğinde, Gauss ışını başka bir moda Gauss ışınına dönüşmektedir.

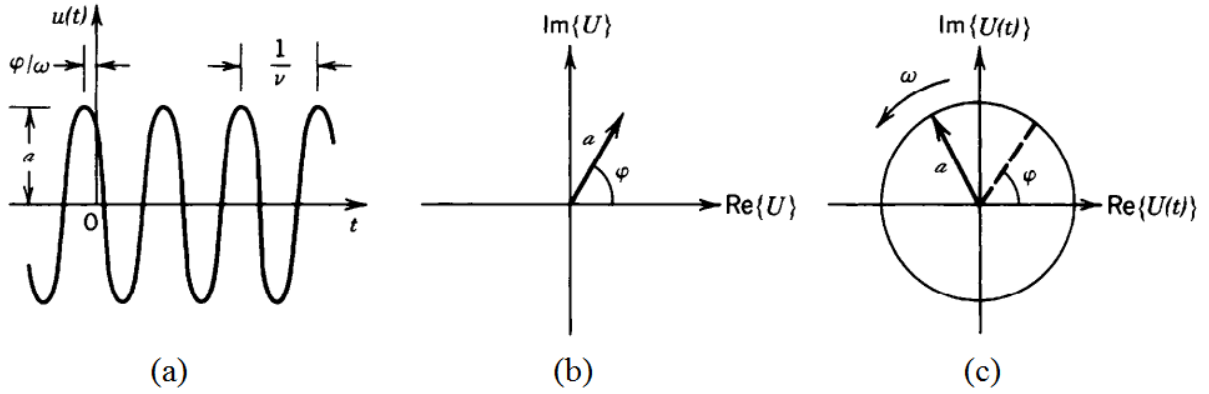
Işığın yayılımı dalgalar halindedir ve ışık dalgası boşlukta $3 \cdot 10^8$ m/s hızla yayılmaktadır. Optik dalgaboyu aralıkları 3 farklı bant aralığına ayrılmaktadır. Bunlar morötesi (ultraviole) ışınlar (10-390 nm), görünür ışınlar (390-760 nm) ve kızılötesi (760 nm-1mm) ışınlarıdır. Optik frekanslar ise Şekil 1.1'de görüldüğü gibi 3×10^{11} ile 3×10^{16} Hz aralığında yer almaktadır.



Şekil E.1 Elektromanyetik Spektrum [124]

Işığın dalga teorisi, ışın teorisini kapsamaktadır. Çünkü ışın, dalga yayılımının çok düşük dalga boylarında gerçekleşen halidir. Işık kendi dalga boyuna göre çok büyük boyutlara sahip maddeler ya da ortamlar ile etkileşim halinde olduğunda ışın teorisi devreye girmektedir. Işık dalga denklemini sağlayacak şekilde skaler bir fonksiyon yani dalga fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Dalga fonksiyonu ise Maxwell denklemlerini

sağlayacak şekilde elektrik ve manyetik alan bileşenleri şeklinde tanımlanmaktadır. Sonuç olarak ışın optiği, ışığın kendi dalgaboyundan büyük cisimler ile arasındaki etkileşimi yansıma-kırınım gibi basit geometrik kurallar ile açıklayan optik dalı; dalga optiği ise ışığın birçok özelliğini skaler dalga teorisi ile açıklayan optik dalıdır.



Şekil E.2 Tek renkli dalganın sabit konum \mathbf{r} 'deki gösterimi (a) Dalga fonksiyonu $u(t)$ 'nin zamanın harmonik fonksiyonu şeklinde gösterimi (b) Sabit fazör değerine sahip kompleks genlik $U = a \exp(j\varphi)$ (c) $\omega = 2\pi f$ rad/s açısal hızıyla dönen fazöre sahip kompleks dalga fonksiyonu $U(t) = U \exp(j2\pi ft)$ [123]

Dalga Denklemi

Işık dalgası, boşlukta ışık hızı c_0 ile yayılmaktadır. Kırılma indeksi n olan bir ortamda ışık hızı $c = c_0 / n$ hızıyla ilerler. Optik ışık dalgası $u(\mathbf{r}, t)$, matematiksel olarak konum $\mathbf{r} = (x, y, z)$ ve zaman t nin fonksiyonu olarak dalga fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzden de dalga denklemini $(\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0)$ sağlamaktadır. Burada ∇^2 Laplace operatörünü temsil eder ve $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ olarak ifade edilir. Dalga denklemini sağlayan her bir fonksiyon olası bir optik dalgayı işaret etmektedir.

Tek renkli (Monokromatik) Dalga

Monokromatik dalga harmonik zaman bağımlı bir dalga fonksiyonu ile ifade edilmektedir:

$$u(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}) \cos[2\pi f t + \varphi(\bar{\mathbf{r}})], \quad (\text{E.1})$$

$A(\mathbf{r})$ = genlik, $\varphi(\bar{r})$ = faz, f = frekans (Hz), $\omega = 2\pi f$ = açısal frekans (radyan/s) olmak üzere Şekil 1.2 (a)'da gösterilmektedir. Burada hem genlik hem de faz konum bağımlıyken, dalga fonksiyonu ise bütün konumlarda f frekansı ile birlikte zamanın harmonik fonksiyonudur. Optik dalganın frekans aralığı 3×10^{11} ile 3×10^{16} Hz arasında değişmektedir.

Kompleks Gösterim ve Helmholtz Denklemi

Kompleks Dalga Fonksiyonu

Gerçek dalga fonksiyonu $u(\mathbf{r},t)$ 'nin kompleks dalga fonksiyonu

$$U(\mathbf{r},t) = A(\mathbf{r}) \exp[j\varphi(\bar{r})] \exp(j2\pi ft) \quad (\text{E.2})$$

ile gösterimi şu şekilde yapılmaktadır:

$$u(\mathbf{r},t) = \text{Re} \{ U(\mathbf{r},t) \} = \frac{1}{2} [U(\mathbf{r},t) + U^*(\mathbf{r},t)]. \quad (\text{E.3})$$

$U(\mathbf{r},t)$, kompleks dalga fonksiyonu olmak üzere dalgayı tamamıyla tanımlarken, $u(\mathbf{r},t)$ dalganın sadece gerçel kısmın belirtir. Daha önce bahsedildiği üzere $u(\mathbf{r},t)$ gibi kompleks dalga fonksiyonu $U(\mathbf{r},t)$ de dalga denklemi

$$\nabla^2 U - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad (\text{E.5})$$

sağlanmaktadır. Bu iki fonksiyon da aynı sınır koşullarına sahiptir.

Kompleks Genlik

Eşitlik 1.2, $u(\mathbf{r},t) = A(\mathbf{r}) \cos[2\pi f t + \varphi(\bar{\mathbf{r}})]$, $U(\mathbf{r},t) = U(\mathbf{r}) \cos[2\pi f t]$ şeklinde yazılabilir. Bu denklemdeki $U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \exp[j\varphi(\bar{\mathbf{r}})]$ ifadesi **kompleks genlik** olarak tanımlanır. Buradan yola çıkılarak dalga fonksiyonu $u(\mathbf{r},t)$ 'nin kompleks genlik $U(\mathbf{r})$ ile ilişkisi şu şekilde gösterilebilir:

$$u(\mathbf{r},t) = \text{Re} \{ U(\mathbf{r}) \exp(j2\pi f t) \} = \frac{1}{2} [U(\mathbf{r},t) \exp(j2\pi f t) + U^*(\mathbf{r},t) \exp(-j2\pi f t)] \quad (\text{E.6})$$

Belirlenen konum \mathbf{r} 'de kompleks genlik $U(\mathbf{r})$, büyüklüğü dalganın genliği / $|U(\mathbf{r})| = A(\mathbf{r})$ ve fazı $\arg\{U(\mathbf{r})\} = \varphi(\bar{\mathbf{r}})$ olan bir kompleks değişken olmak üzere Şekil 1.2(b)'de gösterilmiştir. Burada *optik yoğunluk* değeri $I(\mathbf{r}) = |U(\mathbf{r})|^2$ 'dir. Faz değeri $\varphi(\bar{\mathbf{r}}) = \text{sabit}$ olduğu aynı faz yüzeylerine *dalga cephesi (wavefront)* denilmektedir. Sabit değerler 2π 'nin katları şeklindedir olduğu için $\arg\{U(\mathbf{r})\} = \varphi(\bar{\mathbf{r}}) = 2\pi q$ 'ya eşittir (q tam sayıdır). Kompleks dalga fonksiyonu $U(\mathbf{r},t)$ grafiksel olarak açısal hızı $\omega = 2\pi f$ radyan/s ile fazör gösterimde Şekil 2.1(c)'de olduğu gibi gösterilebilir.

Helmholtz Denklemi

Kompleks dalga fonksiyonu $U(\mathbf{r},t) = U(\mathbf{r}) \cos[2\pi f t]$ Eşitlik 1.5'in içine yazıldığında elde edilen diferansiyel denkleme,

$$(\nabla^2 + k^2)U(\bar{\mathbf{r}}) = 0. \quad (\text{E.7})$$

Helmholtz denklemi adı verilir. Burada k dalga sayısı olmak üzere

$$k = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}, \quad (\text{E.8})$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

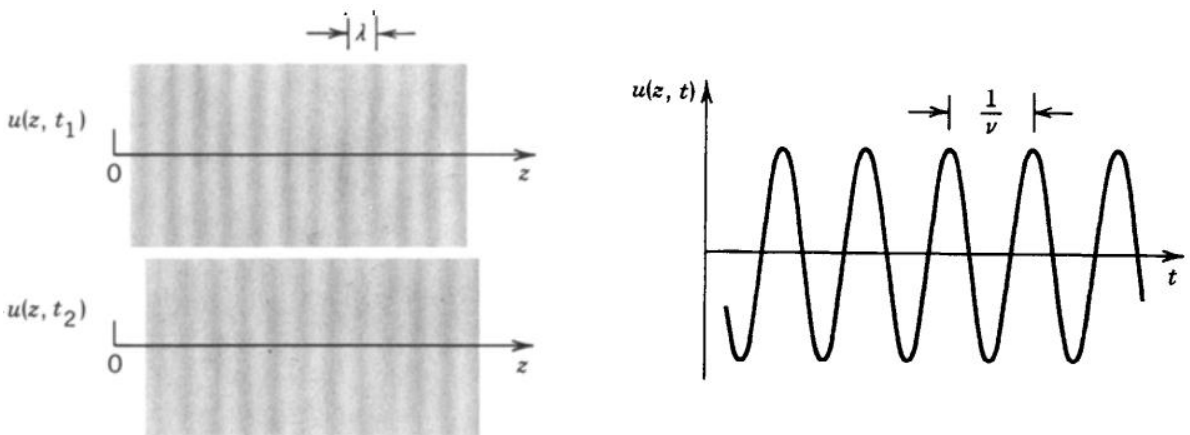
Homojen ortamda Helmholtz denkleminin en basit çözümü bize düzlem dalga ve küresel dalgayı vermektedir.

Düzlem Dalga

Düzlem dalga kompleks genliğe sahiptir. A kompleks sabit değer olmak üzere *kompleks zarf* olarak adlandırılır ve $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ *dalga vektörüdür*.

$$U(\mathbf{r}) = A \exp(-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = A \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z)], \quad (\text{E.9})$$

Bu denklem Eşitlik E.7'deki Helmholtz denklemini sağlamaktadır. $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2$ olması nedeniyle dalga vektörü \mathbf{k} 'nin büyüklüğü dalga sayısı k 'yi vermektedir. $\arg\{U(\mathbf{r})\} = \arg\{A\} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ faz bilgisi olmak üzere,



Şekil E.3 Düzlem dalganın z yönünde ilerlerken z ile konumsal periyot λ 'nin ve t ile zamansal periyot $1/f$ 'nin periyodik fonksiyonu şeklinde gösterimi [123]

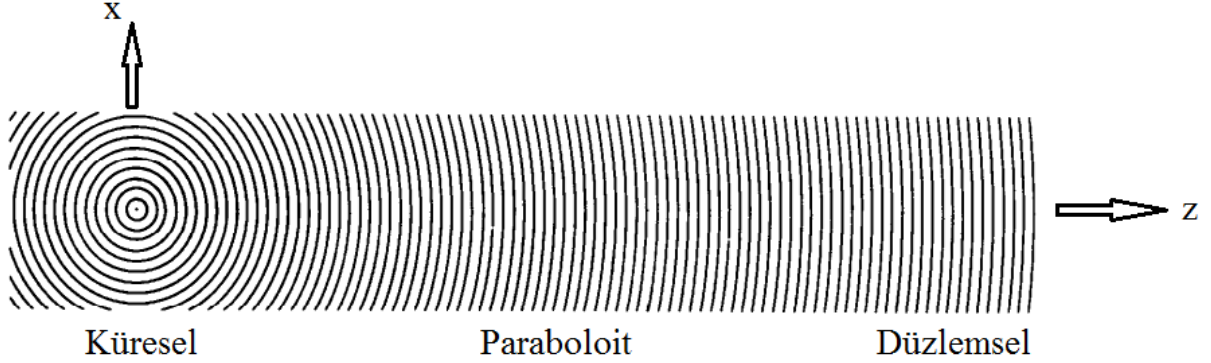
Eğer dalga vektörü \mathbf{k} nın yönü z eksenini olarak alınırsa $U(\mathbf{r}) = A \exp(-jkz)$ 'ye eşit olur.

Küresel Dalga

Helmholtz denkleminin diğer bir çözümü küresel dalgayı vermektedir. r orijinden olan uzaklık ve dalga sayısı $k = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}$ olmak üzere;

$$U(\mathbf{r}) = A/r \exp(-jkr). \quad (\text{E.10})$$

Burada *optik yoğunluk* değeri $I(\mathbf{r}) = |A|^2/r^2$ 'dir. Basitçe $\arg\{A\} = 0$ alındığında dalga cephesi yüzeyleri $kr = 2\pi q$ veya $r = q\lambda$ değerine eşit olmaktadır. Bunlar şekilde görüldüğü gibi iç içe geçmiş ve birbirlerinden $\lambda = 2\pi/k$ radyal mesafede olan küreler oluşturmaktadır.



Şekil E.4 Küresel dalganın z ekseninden uzaklaştıkça önce parabolit dalgaya daha da uzak noktalarda düzlem dalgaya yaklaşmasının gösterimi [123]

Parabol Dalga : Küresel Dalgaya Fresnel Yaklaşımı

Kaynak noktası $\mathbf{r} = \mathbf{0}$ 'de olan, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ koordinatlarına sahip, orijinden çok uzakta ve z eksenine oldukça yakın ($x, y \ll z$) olan bir küresel dalga ele alındığında $(x^2 + y^2)^{1/2} \ll z$

denkliği elde edilmektedir. Taylor seri açılımına dayanarak elde edilen eşitsizlik kullanılarak $\theta^2 = (x^2 + y^2) / z^2 \ll 1$,

$$\begin{aligned} r &= (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} = z(1 + \theta^2)^{1/2} = z\left(1 + \frac{\theta^2}{2} - \frac{\theta^4}{8} + \dots\right) \\ &\approx z\left(1 + \frac{\theta^2}{2}\right) = z + \frac{x^2 + y^2}{2z}, \end{aligned} \quad (\text{E.11})$$

eşitliği elde edilmektedir. Küresel dalga denkleminde $r = z + (x^2 + y^2) / 2z$ yerine yazdığımızda elde edilen aşağıdaki denkleme *küresel dalganın Fresnel yaklaşımı* yani *paraboloit dalga* adı verilmektedir:

$$U(\mathbf{r}) = \frac{A}{z} \exp(-jkz) \exp\left[-jk \frac{x^2 + y^2}{2z}\right]. \quad (\text{E.12})$$

Fazın hataya duyarlılığı daha fazla olduğu için r için yapılan bu yaklaşım faz için daha doğru sonucu vermektedir. Buna *Fresnel yaklaşımı* denilir. Bu yaklaşım optik dalganın iletimi teorisini kolaylaştırmak için kullanılan çok önemli bir yaklaşımdır.

Paraksiyal Dalgalar

Eğer bir dalganın dalga cepheleri paraksiyal ışınlar ise bu dalgaya paraksiyal dalga denir. Paraksiyel dalga oluşturmanın ilk adımı, $A \exp(-jkz)$ düzlem dalgasını taşıyıcı dalga olarak sayarak ve onu kompleks genlik A ile module edip, $A(\mathbf{r})$ fonksiyonu konumuna göre değişir hale getirmektir. Böylece module edilmiş dalganın kompleks genliği bu hale gelmektedir:

$$U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \exp(-jkz). \quad (\text{E.13})$$

$A(\mathbf{r})$ 'nin konuma göre değişimi dalga boyu $\lambda = 2\pi / k$ uzaklığına göre çok küçük olmak zorundadır. Böylece yaklaşık olarak dalga düzlem dalga doğası sınırları içinde kalmış olur. Dalga fonksiyonu $u(\mathbf{r},t) = |A(\bar{\mathbf{r}})| \cos[2\pi ft - kz + \arg\{A(\bar{\mathbf{r}})\}]$ 'nin z 'nin fonksiyonu ($t=0$ ve $x=y=0$) olarak gösterimi aşağıdaki Şekil 1.5(a)'da gösterilmiştir. Bu genliği $|A(0,0,z)|$ ve fazı $\arg\{A(0,0,z)\}$ olan z 'nin sinüs fonksiyonudur.

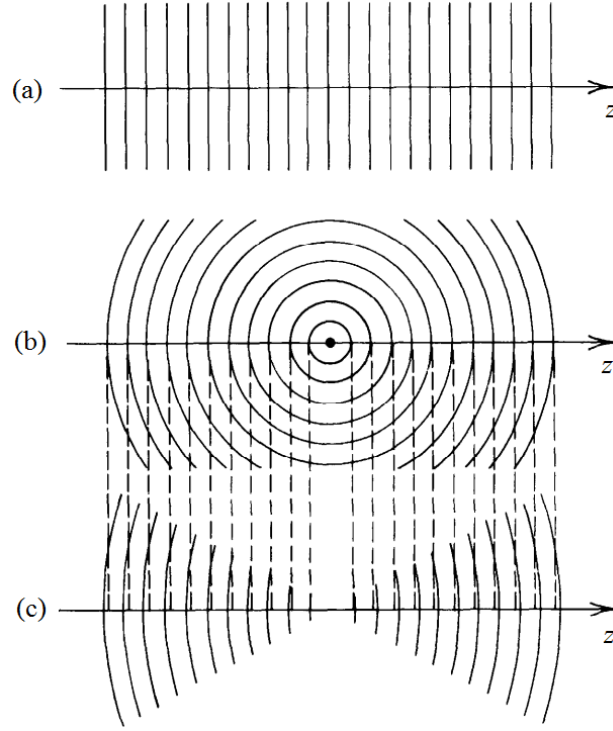
Paraksiyel Helmholtz Denklemi

Paraksiyel dalganın Helmholtz denklemin sağlaması için kompleks zarf $A(\mathbf{r})$ bazı şartlar gerekmektedir. Bunlar $A(\mathbf{r})$ 'nin $\Delta z = \lambda$ uzaklığına göre yavaş değişkenlik göstermesi ve ΔA 'nın A 'ya göre çok küçük olmasıdır ($\Delta A \ll A$). Bu sadeleştirmeler yapıldıktan sonra *Paraksiyel Helmholtz denklemi* elde edilir:

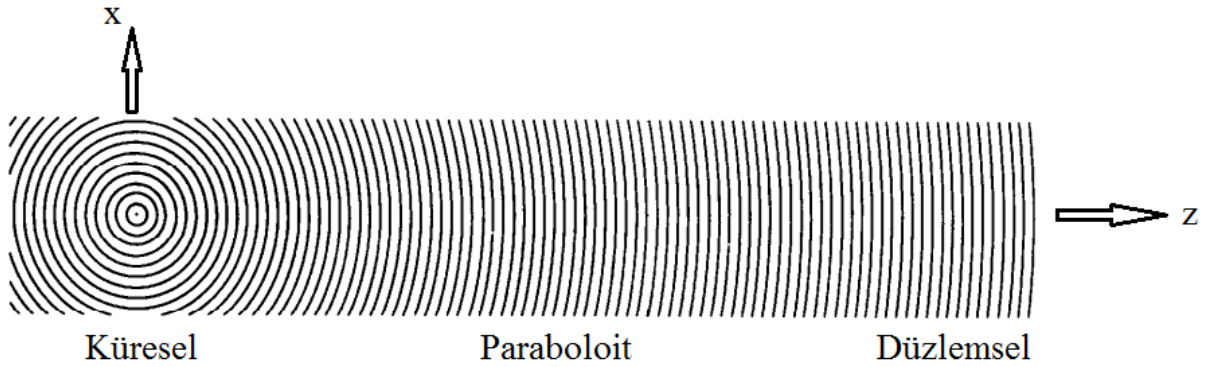
$$\nabla_T^2 A - j2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0. \quad (\text{E.14})$$

Bu denklem, Helmholtz denkleminin yavaş değişen zarf yaklaşımıdır ve $\nabla_T^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ ifadesi ters Laplace operatörüdür.

Bir düzlem dalga ve küresel dalga açısız ve konumsal iki durumda birbirinden farklı özellikler gösterir. Düzlem dalganın dalga cephesi normalleri dalganın yönüne paralel iken açısız olarak bir sapma ya da değişkenlik göstermez ve dalganın enerjisi konumsal olarak bütün uzayı kapsar. Küresel dalga ise tek bir noktadan doğar ve dalga cephesi normalleri bütün yönlerde birbirinden uzaklaşır. Buna ek olarak, z eksenine ile arasında çok küçük açılar yapan dalga cephesi normallerine sahip dalgalar ise paraksiyel dalgalar olarak adlandırılır. Bunlar paraksiyel Helmholtz denklemini sağlamaktadır. Bu denklemin önemli bir çözümü, optik demetin karakteristiğini ortaya çıkarmasıyla Gauss dalganın elde edilmesidir. Dalganın gücü esas olarak dalga eksenini saran küçük bir silindir ile konsantre edilir. Herhangi bir enine düzlemdeki yoğunluk dağılımı, dalga eksenine etrafında merkezlenmiş bir dairesel simetrik Gaussyan fonksiyonudur. Bu fonksiyonun genişliği, dalga belinde minimum ve her iki yönde de yavaş yavaş artar. Dalga cephesi, ışının bel hizasında yaklaşık olarak düzlemseldir ancak bel hizasından uzaklaştıkça küresel bir hal almaya başlar.



Şekil E.5 (a) Düzlem dalganın, (b) küresel dalganın (c) Gauss dalgasının dalga cepheleri [123]



Şekil E.6 Küresel dalganın z ekseninden uzaklaştıkça önce paraboloid dalgaya daha da uzak noktalarda düzlem dalgaya yaklaşması [123]

Paraksial Helmholtz denkleminin bir çözümü bize paraboloid dalgayı verirken

$$A(\mathbf{r}) = \frac{A_1}{z} \exp\left[-jk \frac{x^2 + y^2}{2z}\right], \quad \text{ki paraboloid dalga küresel dalga}$$

$A(\mathbf{r}) = A_1/r \exp(-jkr)$ 'nin paraksial yaklaşımı sonucu elde edilir.

Paraksiyel Helmholtz denkleminin diğerk bir çözüümü bize Gaussyan dalgayı vermektedir. Gauss dalga da paraboloid dalğanın basit bir dönüşümü sonucu elde edilir. z değerkinin sabit değerk

ζ kadar kaydırılması sonucu elde edilen denklem yine *paraksiyel helmholtz denklemi*

$\nabla_T^2 A - j2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0$ 'nin bir çözüümüdür. Ancak ζ kompleks değerk alırsa farklı sonuçlara

neden olur. Bu durumda ζ tamamen sanal kompleks bir değerk aldığında ($\zeta = -jz_0$) Gauss dalğanın kompleks zarfı,

$$A(\mathbf{r}) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left[-jk \frac{\rho^2}{2q(z)}\right], \quad \rho^2 = x^2 + y^2, \quad q(z) = z + jz_0, \quad (\text{E.15})$$

Eşitlik E.15'deki burada z_0 parametresi Rayleigh uzaklığı olarak adlandırılır.

Kompleks zarf değerkinin genlik ve fazını birbirinden ayırırsak, kompleks fonksiyonu $1/q(z) = 1/(z + jz_0)$ yeni $R(z)$ ve $W(z)$ fonksiyonları tanımlayarak gerçel ve sanal kısımlarına ayırarak yazabiliriz:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi W^2(z)}. \quad (\text{E.16})$$

Burada tanımladığımız değerkler $R(z)$ ve $W(z)$ fonksiyonları sırasıyla dalga cephesini eğrilik yarıçapı ve ışın demeti genişliğini vermektedir. Eşitlik E.16, Eşitlik E.13'de kullanılarak yerine konursa, Gauss dalğanın kompleks genliği $U(\mathbf{r})$ elde edilmektedir:

$$U(\bar{\mathbf{r}}) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2W(z)}\right] \exp\left[-jkz - jk \frac{\rho^2}{2R(z)} + j\xi(z)\right] \quad (\text{E.17})$$

Böylece paraksiyal dalga yaklaşımı ile Gauss dalgası teorik olarak elde edilmekte ve ortaya konular bu denklemler yardımıyla Gauss dalgasını belirleyen özellikler ifade edilebilmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Hasan Hüseyin ÖZBENLİ
Doğum Yeri : Ankara
Medeni Hali : Bekar
E-posta : hhozbenli@gmail.com
Adresi : Ayvalı Mah. Azam Sok. No:10/8 Keçiören/Ankara

Eğitim

Lise : Fethiye Kemal Mumucu Anadolu Lisesi, Ankara (2000-2004)
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü,
Ankara (2005-2010)
Yüksek Lisans :--
Doktora :--

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İleri

İş Deneyimi

TÜBİTAK BİLGEM Siber Güvenlik Enstitüsü, Araştırmacı, (2012 - ...)

Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Araştırma Görevlisi, (2010-2012)

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

H.H. Ozbenli, E. Yazgan, H. Kurt, "Slow light analysis in 8-fold symmetric quasicrystal waveguides", *20th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Fethiye, 2012