

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ VE ÜÇ BOYUTLU FOTONİK ORTAMLARDA KIZILÖTESİ SOĞURUM  
VE SEZİM VERİMLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Zeki HAYRAN**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT**

**Mart 2018**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 141211045 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Zeki HAYRAN**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**İKİ VE ÜÇ BOYUTLU FOTONİK ORTAMLARDA KIZILÖTESİ SOĞURUM VE SEZİM VERİMLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI**" başlıklı tezi **22.03.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Hamza KURT** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Prof. Dr. Kestutis STALIUNAS** .....  
Katalonya Politeknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Rohat MELİK (Başkan)** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY** .....  
Bilkent Üniversitesi

**Prof. Dr. Halime Gül YAĞLIOĞLU** .....  
Ankara Üniversitesi



## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Zeki HAYRAN



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### İKİ VE ÜÇ BOYUTLU FOTONİK ORTAMLARDA KIZILÖTESİ SOĞURUM VE SEZİM VERİMLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI

Zeki HAYRAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Mart 2018

Işığın geniş bir tayfsal aralıkta verimli bir şekilde sezilmesi, görüntülemeye kadar çok geniş bir yelpazede kilit rol oynamaktadır. İyi bir sezim gerçekleştirilebilmesi, ortamdaki ışığın verimli bir şekilde soğurulmasına bağlıdır. Kızılötesi gibi çok zengin uygulamalar barındıran frekanslarda tipik soğurucuların (örneğin grafen) soğurma verimlilikleri düşüktür. Dahası, bu tip soğurucuların frekans seçicilikleri zayıftır. Diğer bir deyişle, soğurucu malzeme sezilen ışığın şiddetini algılayabiliyor iken, ışığın tayfsal içeriğini tespit edememektedir. Bu durum frekansa duyarlı ve yüksek soğuruma sahip pratik kızılötesi detektörlerin ihtiyacını doğurmaktadır. Diğer taraftan yakın-alan görüntülemeye kullanılan optik detektörlerin, kırınım kısıtından ötürü ölçümü çok yakın bir mesafede gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Ancak ölçümün çok yakın bir mesafede gerçekleşmesi, ölçüm alınan bölgedeki elektromanyetik dalgayı bozulmaya uğratabilmektedir. Sonuçta elde edilen ölçümde detay kaybı meydana gelebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ışığın fotonik yapılarda yerleştirilmesi ve verimli bir şekilde sezilmesi konusu incelenmiştir. Tezin ilk bölümünde ışığın yerleştirilmesi amacıyla özgün fotonik mimariler geliştirilmiştir. Geliştirilen fotonik yapılarda ışığın yerleştirilmesi yavaş ışık konsepti veya Hermitian-olmayan ortamlar sayesinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yavaş ışık konsepti sayesinde ortamdaki ışığın Fourier bileşenlerine ayrılması ve tuzaklanması sağlanmıştır. Bu sayede yüksek verimlilikte frekansa duyarlı soğurum elde edilebildiği gösterilmiştir. Bir diğer fotonik aygıtta ise, yerleşen dalganın yavaş ışık konsepti sayesinde frekans seçici kusurlar tarafından yüksek iletim verimliliği ve kalite faktörü ile sezilebildiği gösterilmiştir. Ayrıca Hermitian-olmayan ortamlarda dengeli bir şekilde yerleştirilmiş kazanç ve kayıp bölgelerinin dalga yerleşmesine neden olduğu gösterilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, sensör görünmezliği üzerine özgün yöntemler sunulmuştur. Önerilen yöntemler ile herhangi bir şekle sahip nesnelerin (örneğin sensor uçlarının) görünmezliği sağlanmıştır. Görünmezlik, nesnelerin saçılım potansiyellerinin doğrudan manipüle edilmesiyle elde edilmiştir. Bu sayede saçılımlar, gelen dalga vektöründen çözülmüş olduğundan nesne etkin bir şekilde görünmez kılınmıştır. Kuramsal olarak elde edilen görünmez nesneler, mikrodalga frekanslarında deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, kararlı hal elektrik alan dağılımları ve açısız saçılım örgüleri ölçümleri yapılarak, önerilen yöntemler deneysel olarak doğrulanmıştır. Önerilen yöntemler, sensör görünmezliğinden anten kaportalarına kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Yavaş ışık, Fotonik kristal, Kızılötesi detektörler, Hermitian-olmayan optik ortamlar, Görünmezlik, Dalgaboyu seçici aygıtlar, Saçılımsız ortamlar.



## **ABSTRACT**

Master of Science

### **ENHANCEMENT OF INFRARED ABSORPTION AND SENSING IN TWO- AND THREE-DIMENSIONAL PHOTONIC MEDIA**

Zeki HAYRAN

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Hamza KURT

Date: March 2018

The detection of light over a broad spectrum plays a key role in a wide variety of fields ranging from imaging to communication. The ability to detect light efficiently depends on the level of absorption of the available light. At the infrared regime, where potential optical applications are abundant, the intrinsic absorption efficiency of typical absorbers (e.g. graphene) are usually low. Moreover, such absorbers have a low frequency selectivity. In other words, while the absorber is able to detect the amplitude of light, it can not sense the spectral content of it. Hence, there is a need for highly efficient frequency-selective infrared detectors. On the other hand, near-field optical detectors are required to make measurements very near the object due to the diffraction limit. However, due to the closeness of the object and the detector, the field along the object can get distorted, resulting in detrimental effects of image quality.

In this thesis, the phenomenon of light trapping and sensing in engineered photonic structures has been investigated. In the first part of this thesis, novel photonic architectures have been proposed to achieve light trapping. The trapping of light in

such structures has been achieved via the concept of slow light and non-Hermitian optics. Owing to the slow light based design principle, it has been shown that light can be trapped and be separated into its Fourier components. In result, highly efficient multicolor infrared absorption has been achieved. In another proposed photonic device, it has been shown that owing to the slow light phenomena, the trapped light can be selectively filtered with high transmission efficiency and quality factor via frequency sensitive cavities. Furthermore, it has been shown that in non-Hermitian optical media having balanced gain and loss regions, that the incoming light can be localized at predefined locations.

In the second part of this thesis, various novel invisibility methods have been proposed to achieve sensor invisibility. By means of the proposed methods, the invisibility of arbitrary shaped objects (e.g. tip of a sensor) have been achieved. The proposed invisibility technique is based on the judicious tailoring of the scattering potential of a given object. Owing to such a tailoring, it has been shown that certain scattered waves can be uncoupled from the incident radiation, leading to invisibility effects. The theoretically analyzed cloaks have been experimentally realized at the microwave regime. In this regard, by measuring the steady-state electric field profiles and angular scattering patterns, the proposed methods have been experimentally verified. The proposed methods may find useful applications especially in cloaked sensor and antenna radome applications.

**Keywords:** Slow light, Infrared detectors, Non-Hermitian optical media, Invisibility, Wavelength selective devices, Scattering-free media.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans süresi boyunca beni yönlendiren, değerli vaktini ve emeğini esirgemeyen Prof. Dr. Hamza KURT ve Prof. Dr. Kestutis STALIUNAS ile çalışma imkanına sahip oldum. Öncelikle tez danışmanlarım Prof. Dr. Hamza KURT'a ve Prof. Dr. Kestutis STALIUNAS'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca birlikte çalışmış olmaktan büyük mutluluk duyduğum Doç. Dr. Ramon HERRERO ve Doç. Dr. Muriel BOTTEY'e de teşekkür etmek istiyorum.

Yaptığım araştırmalar boyunca birlikte çalışma imkanına sahip olduğum Prof. Dr. Saulius JUODKAZIS, Prof. Dr. Vygantas MIZEIKIS, Dr. Mangirdas MALINAUSKAS ve Darius GAILEVICIUS'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez yazım sürecinde bana yardımcı olan Yusuf Abdulaziz YILMAZ'a başta olmak üzere, şu andaki ve geçmişteki laboratuvar arkadaşlarıma, alfabetik sıraya göre, Ahmet Mesut ALPKILIÇ, Ahmet ÖZER, Aydan YELTIK, Aytekin ÖZDEMİR, Bilgehan Barış ÖNER, Ceren BABAYIĞIT, Döne YILMAZ, Emre BOR, Eyüp Mert GAYUR, Fehmiye KELEŞ, İbrahim Halil GİDEN, İbrahim MAHARİQ, Khalil DADASHI, Mediha TUTGUN, Melih Göktuğ CAN, Melike GÜMÜŞ, Nazmi YILMAZ, Neslihan ETİ, Utku Görkem YASA, Takiyettin Oytun KILINÇ, Tolga YILDIRIM ve Waqas W. AHMED'e teşekkür etmek istiyorum.

Son olarak yüksek lisans süresi boyunca finansal destekte bulunan NATO'ya (SPS-985048 nolu proje kapsamında) ve burs sağladığı için TOBB ETÜ'ye teşekkür ediyorum.



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. FOTONİK ORTAMLARDA SOĞURUM ARTTIRIMI</b> .....	<b>3</b>
2.1 Üç Boyutlu Fotonik Kristallerde Işığın Yavaşlatılmasıyla Elde Edilen Soğurum Arttırımı .....	3
2.1.1 Yöntem ve sonuçlar.....	4
2.1.2 FK yapısının eniyilenmesi .....	7
2.1.3 Dalga yerelleşmesinin soğurum arttırımına etkisi.....	13
2.2 Üç Boyutlu Fotonik Kristallerde Mikrodalga "Gökkuşuğu Tuzaklama" ....	15
2.2.1 Yöntem ve sonuçlar.....	16
2.2.2 Tasarımın deneysel gerçekleştirilmesi .....	20
2.3 Üç Boyutlu Fotonik Kristallerde Yüksek Verimlilikle Işık Filtreleme.....	23
2.3.1 Tasarım Ana Fikri .....	25
2.3.2 Tasarımın sayısal gerçekleştirilmesi.....	26
2.4 İki Boyutlu Hermitian-Olmayan Ortamlarda Işığın Yerelleştirilmesi .....	31
2.4.1 Tasarım ana fikri .....	31
2.4.2 Sayısal analiz ve sonuçlar .....	32
<b>3. SEZİM VERİMLİLİĞİ ARTTIRIMI İÇİN ÖNERİLEN GÖRÜNMEZLİK YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>35</b>
3.1 Hermitian-Olmayan Optik Tabanlı İsteğe Bağlı Görünmezlik .....	35
3.1.1 Tasarım ana fikri .....	36
3.1.2 Sayısal analizler ve sonuçlar .....	38
3.2 Kendiliğinden-Görünmez Dielektrik Nesnelere .....	44
3.2.1 Tasarım ana fikri .....	45
3.2.2 Sayısal analizler ve sonuçlar .....	46
3.2.3 Yöntemin deneysel gerçekleştirilmesi.....	46
3.3 Tümlayıcı Malzeme Tabanlı Yüzeysel Görünmezlik Pelerini .....	54
3.3.1 Tasarım ana fikri .....	54
3.3.2 Sayısal analiz ve sonuçlar .....	56
3.3.3 Yöntemin deneysel gerçekleştirilmesi .....	57
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>63</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>69</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1:	(a) Özel tasarlanmış bir fotonik ortam vasıtası ile o ortam içerisinde genişbant bir dalga yerelleşmesi ve soğurumu elde edilebilir. (b) Sensöre bir görünmezlik pelerini giydirilerek, sensörün yerleşen dalgayı bozmadan yakın alanda ölçüm alması sağlanabilir.....	1
Şekil 1.2:	(a) p-n eklemi tabanlı geleneksel bir fotodetektör. (b) Derecelendirilmiş bir FK yapısı. FK yapısında (c) Elektrik alan genliği ve (d) ışık şiddeti dağılımı. (e) YBA alt ve üst kesim frekanslarının uzamsal değişimi. (f) Yerel fotonik bant diyagramı.....	2
Şekil 2.1:	(a) p-n eklemi tabanlı geleneksel bir fotodetektör. (b) Derecelendirilmiş bir FK yapısı. FK yapısında (c) Elektrik alan genliği ve (d) ışık şiddeti dağılımı. (e) YBA alt ve üst kesim frekanslarının uzamsal değişimi. (f) Yerel fotonik bant diyagramı.....	4
Şekil 2.2:	Derecelendirilmiş 3B FK'in yerel YBA frekans değişimini kullanarak, ışığı aşamalı olarak yavaşlatıp, yavaşlatılmış bölgelerde yüksek verimlilikte foton soğurumu yapılabilir.....	5
Şekil 2.3:	(a) 3B FK'in genel şematik çizimi ve (b) yan kesit görüntüsü. (c) 3B FK'in bant diyagramı verilmiştir.....	7
Şekil 2.4:	Katman periyoduna göre (a) YBA değişimi, (b) YBA büyüklüğü değişimi ve doluluk oranı değişimi.....	8
Şekil 2.5:	Enine periyoda göre (a) YBA değişimi, (b) YBA büyüklüğü değişimi ve doluluk oranı değişimi.....	8
Şekil 2.6:	Önerilen (a) kule ve (b) yan tip 3B FK'lerin şematik çizimleri.....	9
Şekil 2.7:	Kule tipi 3B FK'in (a) $xz$ - ve $yz$ -, (b) $xy$ - kesitsel şematik görüntüsü. (c) Yapısal parametreler verilmiştir.....	10
Şekil 2.8:	(a,b) 1790 nm ve (c,d) çalışma dalgaboyları için kararlı hal elektrik alan (a,c) dağılımı ve (b,d) elektrik alan kesiti verilmiştir.....	10
Şekil 2.9:	yanal tip 3B FK'in (a) $xz$ - (b) $yz$ - kesitsel şematik görüntüsü. (c) Yapısal parametreler verilmiştir.....	11
Şekil 2.10:	(a) Dalga hareketi yönünde elektrik alan şiddeti tayfi. (b,c) 1730 nm ve (d,e) 1530 nm çalışma dalgaboyları için kararlı hal elektrik alan (b,d) dağılımı ve (c,e) kesiti verilmiştir.....	11
Şekil 2.11:	Voksel boyutuna göre (a) YBA değişimi, (b) YBA büyüklüğü değişimi ve doluluk oranı değişimi.....	12
Şekil 2.12:	Voksel boyutu derecelendirilmiş 3B FK'in (a) $xz$ - kesitsel şematik görüntüsü ve (b) yapısal parametreleri verilmiştir.....	12

Şekil 2.13:	(a) Dalga hareketi yönünde elektrik alan şiddeti tayfı. (b,c) 1830 nm ve (d,e) 1900 nm çalışma dalgaboyları için kararlı hal elektrik alan (b,d) dağılımı ve (c,e) alan kesiti verilmiştir.....	13
Şekil 2.14:	Grafen tekkatmanı dahil edilmiş 3B FK'in şematik gösterimi verilmiştir.....	13
Şekil 2.15:	Serbest uzayda grafen kızılötesi soğurumu.....	13
Şekil 2.16:	(a) Kule tipi FK'e dahil edilmiş grafen tekkatmanının soğurum tayfı. Soğurum tayfı ayrıca kesit olarak (b) 11.3 $\mu\text{m}$ , (c) 8.6 $\mu\text{m}$ ve (d) 6.0 $\mu\text{m}$ soğurucu pozisyonları için verilmiştir.....	15
Şekil 2.17:	(a) Yanal tipi FK'e dahil edilmiş grafen tekkatmanının soğurum tayfı. Soğurum tayfı ayrıca kesit olarak (b) 11.3 $\mu\text{m}$ , (c) 8.6 $\mu\text{m}$ ve (d) 6.0 $\mu\text{m}$ soğurucu pozisyonları için verilmiştir.....	15
Şekil 2.18:	(a) Mikrodalga frekansları için tasarlanan 3B FK'in şematik gösterimi verilmiştir. (b) YBA'nın pozisyona göre yerel olarak değişimi. (c) Uyarılan yöne bağlı olarak yerelleşen ışık, hava veya dielektrik ortamında konsantre olmaktadır.....	16
Şekil 2.19:	(a) 3B FK'in sayısal olarak hesaplanmış banddiagramı. (b) Katmanlar arası mesafeye göre yerel YBA'ları değişimi. (c) Diğer simetri noktaları için yerel YBA değişimleri.....	17
Şekil 2.20:	(a) $a/\lambda = 0.450$ , (b) $a/\lambda = 0.468$ ve (c) $a/\lambda = 0.496$ normalize frekansları için 3B FK içerisinde bir Gaussian atımının zaman evrimi. (d) Kararlı hal elektrik alan şiddeti tayfı. (e) $a/\lambda = 0.450$ , (f) $a/\lambda = 0.468$ ve (g) $a/\lambda = 0.496$ normalize frekansları için kararlı hal elektrik alan şiddeti dağılımları.....	18
Şekil 2.21:	Faz birikimi ve elektrik alan şiddeti arttırımı.....	19
Şekil 2.22:	(a) 7.51 GHz, (b) 7.60 GHz, (c) 7.63 GHz ve (d) 7.66 GHz frekansları için kesitsel elektrik alan şiddet profilleri.....	19
Şekil 2.23:	Derecelendirilmiş 3B FK'in mikrodalga karakterizasyonu için kullanılan deney düzeneğinin şematik çizimi.....	20
Şekil 2.24:	(a) 7.52 GHz, (b) 7.80 GHz ve (c) 7.91 GHz frekanslarında deneysel olarak ölçülen elektrik alan şiddet profilleri. Benzer şekilde, (d) 7.52 GHz, (e) 7.80 GHz ve (f) 7.91 GHz frekanslarında sayısal olarak elde edilen elektrik alan şiddet profilleri. (g) 7.52 GHz, (h) 7.80 GHz ve (i) 7.91 GHz frekanslarında ölçülen ortalama group indisleri. ....	21
Şekil 2.25:	(a) Sayısal ve (b) deneysel olarak elde edilmiş elektrik alan şiddet tayfları.....	21
Şekil 2.26:	(a) Elektrik alan şiddet arttırımı ölçümü için kullanılan deney düzeneğinin şematik çizimi. (b) 9.25 cm ve (c) 17.15 cm mesafelerde ölçülen ve sayısal olarak hesaplanan elektrik alan şiddetleri.....	22
Şekil 2.27:	(a) Geleneksel bir kusur-tabanlı bir FK filtresinde, sistemin simetrisinden ötürü iletim verimliliği % 50'yi aşamamaktadır. (b) Filtre sistemine FK boyunca local YBA'ları ekleyerek simetri kırılabilir ve iletim verimliliği % 100'e ulaşabilir.....	24



Şekil 2.28:	(a) Geleneksel bir kusur-tabanlı FK filtresi verilmiştir. (b) Bir yansıma geribeslemesi ile iletim verimliliği % 100'e yaklaşabilir. (c) Kusur ile DK arasındaki mesafe arttırılarak, filtrenin kalite faktörü arttırılabilir. (d) Önerilen kurulum.....	26
Şekil 2.29:	Önerilen yavaş ışık tabanlı optik filtre sisteminin (a) şematik çizimini ve (b) $xy$ - kesitsel şematik görüntüsü verilmiştir.....	27
Şekil 2.30:	(a) 3B FK bünyesinde bir kusur oluşturarak, ışın bu bölgede hapsolması sağlanabilir. (b) FK'in enine periyoduna bağlı olarak rezonans frekansı ve kalite faktörü değişimi. (c) $a_x = 0.8a$ ve (d) $a_x = 1.2a$ için kusur bölgesinde oluşan elektrik alan dağılımları verilmiştir.....	28
Şekil 2.31:	(a) FK'in enine periyodu derecelendirilerek, DK içerisinde yerelleme meydana getirilebilir. (c) Yerelleşme mesafesinin frekansa göre değişimi verilmiştir.....	28
Şekil 2.32:	(a) Enine periyottaki değişim, kusurun rezonans frekansını ve DK yerelleşme frekansını zıt yölerde etkilemektedir. $a/\lambda = 0.456$ normalize frekansı için verilen elektrik alan şiddeti dağılımı (b) DK ile ve (c) kusur ile aynı $z$ - yüksekliğinde verilmiştir.....	30
Şekil 2.33:	Derecelendirilmiş ve derecelendirilmemiş FK filtreleri için elde edilmiş iletim tayfları.....	30
Şekil 2.34:	(a) Optiksel ortamın saçılım potansiyeli yerel olarak değiştirilerek, dalganın belli bir bölgede yoğunlaşması sağlanabilir. (b) Referans ortamın kırıcılık indisi dağılımı. (c) Elde edilen ortamın kırıcılık indisinin gerçel ve sanal kısımlarının dağılımları.....	32
Şekil 2.35:	(a) 77.0 fs ve (b) 288.6 fs anlarında alınmış anlık elektrik alan şiddeti dağılımları gösterilmiştir. Benzer şekilde, 1 $\mu$ m bel uzunluklu bir Gaussian kaynak için (c) 77.0 fs ve (b) 288.6 fs anlarında alınmış anlık elektrik alan şiddeti dağılımları verilmiştir.....	33
Şekil 2.36:	Saf kayıplı olarak tasarlanmış ortamda (a) 77.0 fs (5 $\mu$ m bel uzunluklu bir Gaussian kaynak ile) ve (b) 81.8 fs (1 $\mu$ m bel uzunluklu bir Gaussian kaynak ile) anlarında alınmış anlık elektrik alan şiddeti dağılımları gösterilmiştir.....	34
Şekil 3.1:	(a) Yarı düzlemdeki tüm dalga vektörü bileşenleri filtrelenirse, (b) tam tekyönlü görünmezlik elde edilir. (c) Dalga vektörü bileşenlerinin kısmı olarak filtrelenmesi ile (d) isteğe-bağlı görünmezlik elde edilebilir.....	36
Şekil 3.2:	(a-1) Önerilen görünmezlik yönteminin tasarım aşamaları verilmiştir. Verilen dağılımların karşılık geldiği değişkenler şekillerin sağında verilmiştir.....	39
Şekil 3.3:	Referans nesne için (a) 208° (b) 180° (c) 32° derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları. Benzer şekilde, kısmı görünmez nesne için (a) 208° (b) 180° (c) 32° derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları verilmiştir.....	40

Şekil 3.4:	(a) Referans nesnenin elektriksel hassasiyet dağılımı. Simetrik görünmezlik bölgeleri için elde edilen elektriksel hassasiyet dağılımının (b) gerçel ve (c) sanal kısımları.....	40
Şekil 3.5:	Referans nesne için (a) 24° (b) 190° (c) 270° derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları. Benzer şekilde, kısmı görünmez nesne için (a) 24° (b) 190° (c) 270° derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları verilmiştir.....	41
Şekil 3.6:	(a) Referans ve (b) kısmı görünmez nesne saçılım potansiyeli. (c) Referans ve (d) kısmı görünmez nesne için farklı uyarım açılarında hesaplanmış kesitsel elektrik alan dağılımları. (e) Referans ve (f) kısmı görünmez nesne için elde edilmiş SWR değerleri.....	42
Şekil 3.7:	(a) Referans nesne elektriksel hassasiyet dağılımı. Simetrik görünmezlik bölgeleri için elde edilen elektriksel hassasiyet dağılımının (b) gerçel ve (c) sanal kısımları.....	43
Şekil 3.8:	(a) 2.0, (b) 3.0 ve (c) 4.0 başlangıç indislerine sahip referans nesne için elektrik alan dağılımları. Benzer şekilde (d,g) 2.0, (e,h) 3.0 ve (f,i) 4.0 başlangıç indislerine sahip görünmez nesne için, (d-f) görünmezliğin aktif olduğu yönde ve (g-i) görünmezliğin aktif olmadığı yönde, elektrik alan dağılımları verilmiştir.....	43
Şekil 3.9:	Görünmezliğin aktif olduğu yönde aktif olmadığı durumlarda elde edilen SWR değerleri.....	44
Şekil 3.10:	(a) Herhangi bir şekle ve boyuta sahip bir nesnenin (b) saçılım potansiyeli modifiye edilerek, o nesnenin kendiliğinden görünmez olması sağlanabilir.....	45
Şekil 3.11:	Asıl nesnenin (a) kırıcılık indisi dağılımı, (b) saçılım potansiyeli ve (c) kararlı hal elektrik alan dağılımı. Benzer şekilde, kendiliğinden görünmez nesnenin (d) kırıcılık indisi dağılımı, (e) saçılım potansiyeli ve (f) kararlı hal elektrik alan dağılımı verilmiştir.....	47
Şekil 3.12:	(a) Kendiliğinden görünmez nesnenin deneysel ölçümleri için kullanılan deney düzeneğini şematik çizimi verilmiştir. (b) Üretilen yapıların fotoğraflık görüntüleri verilmiştir.....	48
Şekil 3.13:	Deneysel ölçümler: (a) Referans, (b) asıl ve (c) gizlenmiş nesnelere için +y yönünde dalga hareketi. (d) Referans, (e) asıl ve (f) gizlenmiş nesnelere için -y yönünde dalga hareketi. Sayısal hesaplamalar: (g) Referans, (h) asıl ve (i) gizlenmiş nesnelere için +y yönünde dalga hareketi. (j) Referans, (k) asıl ve (l) gizlenmiş nesnelere için -y yönünde dalga hareketi.....	49
Şekil 3.14:	(a) Asıl ve (b) kendiliğinden görünmez nesne için deneysel olarak elde edilen açısız saçılım örgüleri verilmiştir.....	50
Şekil 3.15:	Asıl nesne için (a) +x, (b) -y ve (c) -x yönlerinde deneysel olarak elde edilen açısız saçılım örgüleri. Benzer şekilde, görünmez nesne için (a) +x, (b) -y ve (c) -x yönlerinde açısız saçılım örgüleri verilmiştir.....	51

Şekil 3.16:	(a) Referans nesne için deneysel olarak elde edilen elektrik alan tayfi. (b) Asıl ve (c) kendiliğinden görünmez nesne için $+y$ yönünde elde edilen elektrik alan tayfi. (d-i) Diğer yönler için elektrik alan tayfları verilmiştir.....	52
Şekil 3.17:	(a) Asıl ve (b) kendiliğinden görünmez nesne için 3B boyutlu uzayda farklı geliş açılarında kesitsel elektrik alan dağılımları verilmiştir.....	53
Şekil 3.18:	Asıl nesne için (a) indis dağılımı, (b) saçılım potansiyeli, (c) $-y$ ve (d) $+y$ yönünde alan dağılımı verilmiştir. Tek yönde ( $-y$ ) görünmez nesne için indis dağılımının (e) gerçel ve (f) sanal kısmı, (g) saçılım potansiyeli, (h) $-y$ yönünde ve (i) $+y$ yönünde alan dağılımı verilmiştir. (j-n) Benzer şekilde, $+y$ yönünde için indis, saçılım ve alan dağılımları verilmiştir.....	54
Şekil 3.19:	(a) Geleneksel görünmezlik tekniklerinde uzayda bir boşluk yaratılarak, gelen ışığın o boşluk etrafında hareket etmesi sağlanır. (b) Önerilen görünmezlik yönteminde dalga vektörü alanında bir boşluk yaratılarak, saçılımın sıfırlanması amaçlanmaktadır. (c) Evrik alanda dalga vektörü izahı. (d) Önerilen yöntemin aşamaları.....	56
Şekil 3.20:	(a) Asıl nesne ve tümleyici nesnenin kırıcılık indisi dağılımları. (b) Görünmez nesnenin saçılım potansiyeli ve kırıcılık indisi dağılımı. (c) Asıl nesne için elektrik alan dağılımları (üst), görünmez nesne için elektrik alan dağılımları (alt).....	56
Şekil 3.21:	(a) Tek yönlü görünmezlik için nesne ve tümleyici nesnenin kırıcılık indisi dağılımları. (b) Tek yönde görünmez nesnenin saçılım potansiyeli ve kırıcılık indisi dağılımı. (c) Asıl nesne için elektrik alan dağılımları (üst), Tek yönde görünmez nesne için elektrik alan dağılımları (alt).....	57
Şekil 3.22:	(a) Önerilen yöntem ile görünmezlik kazandırılmış nesne ve görünmezlik pelerinin kırıcılık indisi dağılımı. (b) Nesne metalmalzemeler ile, görünmezlik pelerini ise dielektrik çubuklar ile deneysel olarak gerçekleştirilebilir.....	58
Şekil 3.23:	(a) Nesne ve görünmezlik pelerini şematik olarak verilmiştir. (b) Görünmezlik pelerini doluluk oranı yerel olarak değişen dielektrik çubuk ile, (c) nesne ise özel olarak tasarlanan metalmalzemeler ile gerçekleştirilebilir. (d) Dielektrik çubukların ve (e) metalmalzemenin etkin kırıcılık indisleri.....	59
Şekil 3.24:	(a) Referans, (b) Asıl ve (c) görünmez nesnelere için $+x$ yönünde elektrik alan tayfları. Benzer şekilde $-x$ yönünde (d) referans, (e) Asıl ve (f) görünmez nesnelere için elektrik alan tayfları verilmiştir.....	59



## KISALTMALAR

<b>1B</b>	: Bir Boyutlu
<b>2B</b>	: İki Boyutlu
<b>3B</b>	: Üç Boyutlu
<b>DDA</b>	: Düzlem Dalga Açılımı
<b>DK</b>	: Dalga Kılavuzu
<b>FD</b>	: Fourier Dönüşümü
<b>FK</b>	: Fotonik Kristal
<b>FR4</b>	: Bor Epoksi Laminatı
<b>Im</b>	: Sanal (Imaginary)
<b>KK</b>	: Kramers-Kronig
<b>k.b.</b>	: Keyfi Birim
<b>Maks.</b>	: Maksimum
<b>Re</b>	: Gerçel (Real)
<b>TE</b>	: Enine Elektrik (Transverse Electric)
<b>TFD</b>	: Ters Fourier Dönüşümü
<b>TM</b>	: Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
<b>YBA</b>	: Yasaklı Bant Aralığı
<b>ZASF</b>	: Zaman- alanında Sonlu-farklar



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

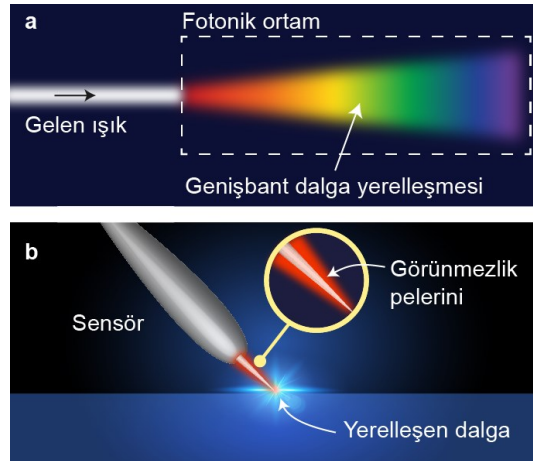
Simgeler	Açıklama
$a$	Örgü sabiti
$a_x$	$x$ yönünde katman periyodu
$a_y$	$y$ yönünde katman periyodu
$a_z$	$z$ yönünde katman periyodu
$a_{xy}$	$xy$ düzleminde periyod
$d_z$	$z$ yönünde voksel boyutu
$d_{xy}$	$xy$ yönünde voksel boyutu
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
$\varepsilon$	Elektrik geçirgenlik
$E$	Elektrik alan
$E_x$	$x$ yönündeki elektrik alan bileşeni
$E_y$	$y$ yönündeki elektrik alan bileşeni
$E_z$	$z$ yönündeki elektrik alan bileşeni
$H$	Manyetik alan
$H_x$	$x$ yönündeki manyetik alan bileşeni
$H_y$	$y$ yönündeki manyetik alan bileşeni
$H_z$	$z$ yönündeki manyetik alan bileşeni
$\vec{P}$	Poynting vektörü
$\vec{\nabla}$	Diverjans operatörü
$\lambda$	Dalga boyu
$P_{abs}$	Soğurulan güç
$\Re$	Gerçel kısım
$\Im$	Sanal kısım
$\lambda$	Dalga boyu
$f$	Doluluk oranı
$n$	Kırıcılık indisi
$k$	Dalga sayısı
$k_x$	$x$ yönünde dalga sayısı
$k_y$	$y$ yönünde dalga sayısı
$k_z$	$z$ yönünde dalga sayısı
$\sigma$	Gauss fonksiyonu sapması

$l_c$	Kuplör uzunluğu
$T$	İletim verimliliği
$Q$	Kalite faktörü
$r$	Silindir yarıçapı
$h$	Silindir yüksekliği
$d_{\min}$	Minimum dielektrik şerit genişliği
$\tau$	Sönümlenme katsayısı
$\omega$	Açısal frekans
$\omega_0$	Rezonans frekansı
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alümina
$\theta$	Normal ile yapılan açı
$w_x$	$x$ yönünde yapısal uzunluk
$w_y$	$y$ yönünde yapısal uzunluk
$w_{xy}$	$x$ ve $y$ yönünde yapısal uzunluk
$h_z$	$z$ yönünde yapısal uzunluk
$\Delta\phi$	Faz farkı
$\sigma^{xx}$	$x$ yönünde elektriksel iletkenlik
$\sigma^{yy}$	$y$ yönünde elektriksel iletkenlik
$A$	Saçılım potansiyeli
$A_n$	$n$ . yineleme sonrası saçılım potansiyeli
$\Theta$	Görünmezlik alanı
$e_s^{(n)}$	$n$ . dereceden saçılan elektrik alan genliği
$b$	Derecelendirme yönünde örgü sabiti
$\phi$	Azimutal açı
$\chi$	Elektriksel hassasiyet
$\epsilon_x$	$x$ yönünde elektriksel geçirgenlik
$\epsilon_y$	$y$ yönünde elektriksel geçirgenlik
$\mu_x$	$x$ yönünde manyetik geçirgenlik
$\mu_y$	$y$ yönünde manyetik geçirgenlik
$\vec{p}$	Yönlü alan
$\vec{r}$	Yarıçap vektörü



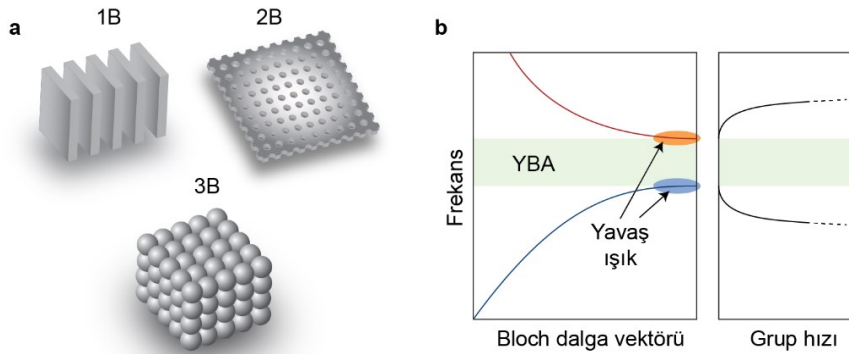
## 1. GİRİŞ

Optik sensörlerin çalışma prensibi, elektromanyetik enerjinin ışığa duyarlı bir malzeme yardımıyla elektrik sinyaline çevrilmesi mantığına dayanır. Bu bağlamda sensörün verimliliği, doğrudan soğrulma işleminin verimliliği ile orantılıdır [1]. Soğrulma işleminin verimliliği ise soğurucu malzemenin içsel ve dışsal verimliliğine bağlıdır. İçsel verimlilik, malzemenin atomik veya moleküler yapısına bağlıdır ve bu nedenle artırılması ancak malzemenin kimyasal özelliklerinin değiştirilmesi ile mümkündür. Diğer taraftan, yakın zamanda optik ve fotonik alanında yapılan çalışmalar sonucunda, ışığın belli bir alanda yoğunlaştırılmasının mümkün olduğu anlaşılmıştır. Bu sayede soğurucu malzemenin dışsal verimliliğinin artırılması söz konusu olmaktadır. Bu tip çalışmalara örnek olarak; fotonik kristal (FK) kusurları [2,3], çok katmanlı dielektrik yapılar [4], periyodik olarak dizilmiş grafen katmanları [5] ve yüzey plazmonları [6-8] verilebilir. Bu tarz yaklaşımlar ile yüksek soğrulma verimliliği elde edilebiliyor olmasına rağmen, soğrulma işlemi oldukça dar bantgenişliklerde gerçekleşmektedir. Ayrıca, mevcut çalışmalarda elde edilen soğrulma tayfının ihtiyaca göre modifiye edilme imkanları sınırlıdır.



Şekil 1.1: (a) Özel tasarlanmış bir fotonik ortam vasıtası ile o ortam içerisinde genişbant bir dalga yerelleşmesi ve soğurumu elde edilebilir. (b) Sensöre bir görünmezlik pelerini giydirilerek, sensörün yerelleşen dalgayı bozmadan yakında ölçüm alması sağlanabilir.

Fotonik kristaller, ışığın istenilen yönde ve hızda ilerlemesini sağlayabilmeleri ile öne çıkan periyodik yapılardır (bakınız Şekil 1.2(a)). Fotonik kristallerin yapısal özelliklerinin modifiye edilmesi ile, Şekil 1.2(b)'de gösterildiği üzere, ışığın yavaşlatılması ve belli alanlarda yerelleşmesi sağlanabilmektedir [9]. Bu sayede yapı içerisinde yerleştirilen ışığın dalga boyu ve bant genişliği, yapının yalnızca opto-geometrik değerlerinin ayarlanması ile değiştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasının ilk bölümünde, iki ve üç boyutlu (2B ve 3B) fotonik yapıların, yapısal parametreleri dereceli olarak değiştirilerek, yapı içerisinde ilerleyen ışığın kademeli olarak yavaşlatılıp, belli noktalarda yerleştirilmesi ve bu sayede ışık ile soğurucu malzeme arasındaki etkileşimin artırılması hedeflenmektedir. Tez çalışmasının ikinci kısmında ise sensör ile ışık arasındaki etkileşimi arttırmak amacıyla sensör görünmezliği üzerine önerilen yöntemler tanıtılacaktır. Sensör görünmezliği üzerine daha önce yöntemler önerilmiş olmasına rağmen [10-16], kompleks yapıli nesnelere görünmezliğini sağlamak henüz üzerinde çalışılan bir konudur. Bu tez çalışmasında, fotodetektör gibi oldukça karmaşık yapıli bileşenler içeren nesnelere görünmezliği üzerine geliştirilen yöntemler sunulacaktır. Bu yöntemler sayesinde sezici bölgeyi optiksel olarak görünmez hale getirip, sezim hassasiyetinin artırılması gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında ayrıca Hermitian-olmayan optik ortamların dalga yerelleştirilmesi ve görünmezlik üzerine etkileri incelenecektir. Bu tarz ortamlar, dengeli bir şekilde yerleştirilmiş kayıp ve kazanç bölgelerinden oluşmaktadır ve son derece özgün fotonik aygılların tasarımını olağan kılabilirler.



Şekil 1.2: (a) FK'lar, örgü sabitleri çalışma dalga boyu ile orantılı 1B, 2B veya 3B periyodik yapılardır. (b) FK'lar ile malzeme özelliklerini değiştirmeden yalnızca yapısal değişimler vasıtasıyla yavaş ışık elde etmek mümkündür.

## 2. FOTONİK ORTAMLARDA SOĞURUM ARTTIRIMI

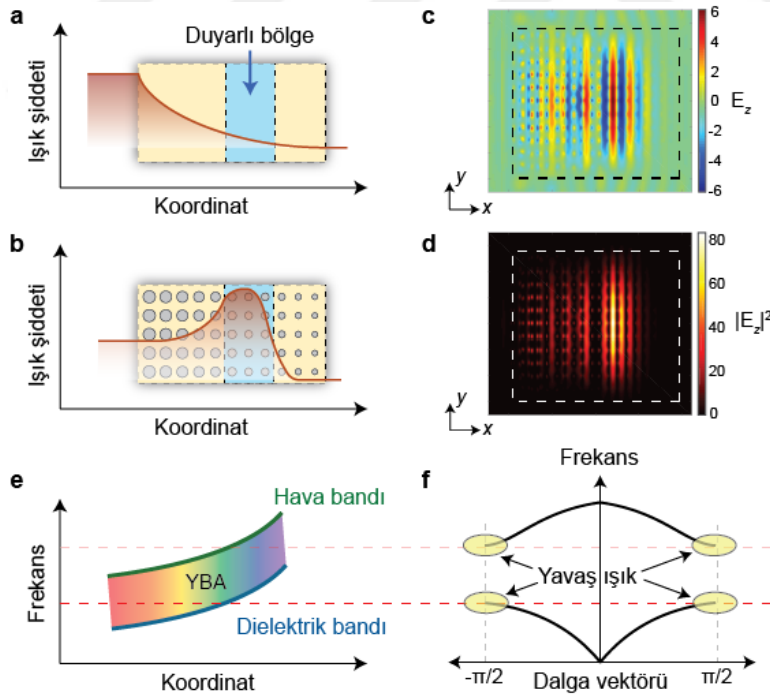
### 2.1 Üç Boyutlu Fotonik Kristallerde Işığın Yavaşlatılmasıyla Elde Edilen Soğurum Arttırımı

Elektromanyetik dalgaların verimli bir şekilde soğurulması iyi tasarlanmış fotonik ortamlar ile mümkün olabilmektedir. Bu ortamlar arasında FK'lar ışığın hareketini manipüle etme kabiliyetleri nedeniyle oldukça elverişlidirler. Benzersiz yapısal dispersiyon özellikleri nedeniyle, FK'lar daha önce dalga yerelleştirme ve soğurum arttırımı için kullanılmıştır. Bu çalışmalar arasında; dağıtılmış Bragg yansıması [17], kılavuzlanmış rezonans [18], mikro- [19] ve nano-kusurlar [20] sayılabilir. Bu tarz yöntemler ile yüksek verimlilikte soğurum elde edilebiliyor olmasına rağmen, soğurumun gerçekleştiği bantgenişliği rezonans etkilerden dolayı genellikle çok küçük olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla, bünyesinde birden fazla rezonans etki destekleyecek bir fotonik ortam tasarlanabilir.

"Tuzaklanmış gökkuşağı" adı verilen olguda, ışık kademeli olarak yavaşlayarak Fourier bileşenlerine, diğer bir deyişle frekans bileşenlerine, ayrılmaktadır [21]. Benzer fenomenler; plazmonik kılavuzlama mikroyapılarda [22], 2B FK'larda [23,24] ve hiperbolik metamateryallerde [25] yapısal parametrelerin dereceli olarak manipüle edilmesi ile elde edilmiştir. Ancak bu tip yapılarda, tuzaklanan ışığın mod hacmi içerisinde bulunduğu DK'nın hacmi ile sınırlıdır. Bu durum tuzaklanan ışığın şiddetinin ve foton soğurumunu sınırlamaktadır. Bu sorunu kaldırmak amacıyla ışık bir DK'dan ziyade bütün bir yapı boyunca tuzaklanabilir. Bu sayede tuzaklanan ışığın soğurucu malzeme ile etkileşiminin artması sonucu ışığın soğurumu kolaylaşabilir. Akustik dalgalar için bu tarz bir konfigürasyon daha önce incelenmiş olmasına rağmen [26], elektromanyetik dalgalar için bu çözüm henüz gerçekleştirilmemiştir.

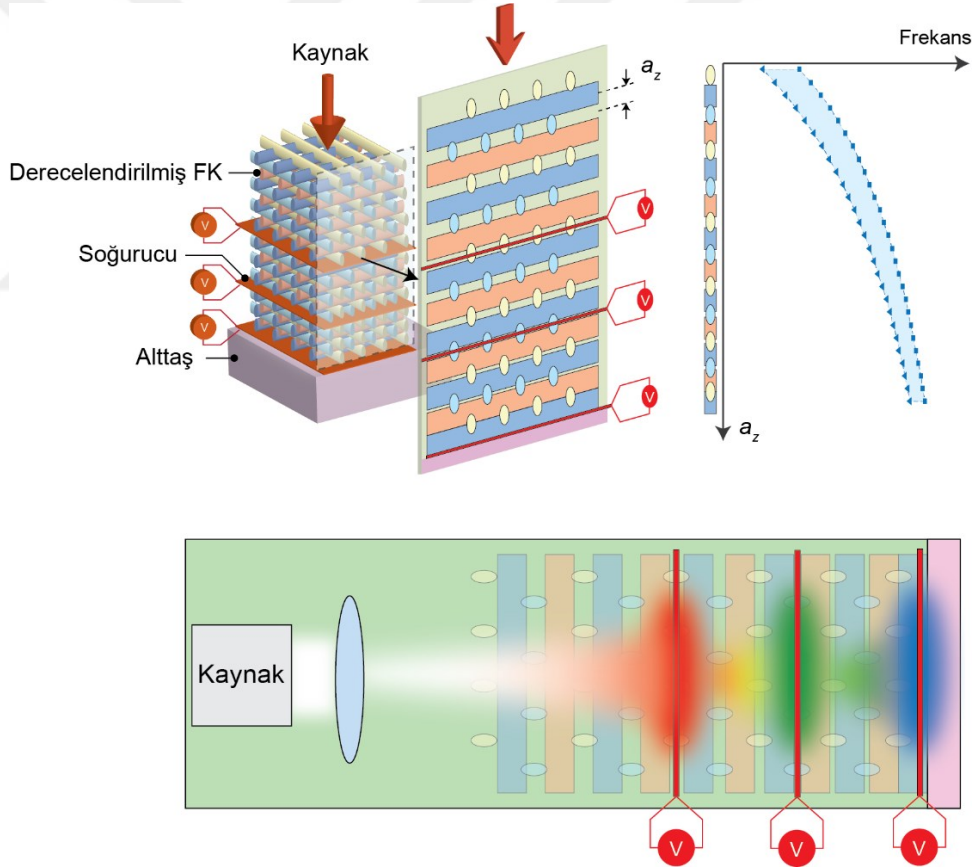
### 2.1.1 Yöntem ve sonuçlar

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, ışığın tasarlanmış fotonik yapılar içerisinde yavaşlatılarak durdurulması fikri, ışığın soğurulma verimliliğini önemli ölçüde arttırabilir [27]. Geleneksel bir fotodetektörde, Şekil 2.2(a)’da gösterildiği üzere, ışığın şiddeti soğurumun gerçekleştiği bölgeye kadar azalır. Diğer taraftan 2.2(b)’de gösterildiği üzere, yapısal parametreleri hareket yönünde derecelendirilmiş bir yapıda ışığın şiddetinin belli bir noktaya arttırılması sağlanabilir. Bu tarz bir yapıda, Şekil 2.2(c) ve 2.2(d)’de gösterildiği üzere, ışık yapı içerisinde yavaşlatılıp tuzaklanabilir. Bu mekanizmanın ana prensibi derecelendirilmiş bir yapının fotonik bant yapısının, Şekil 2.2(e)’de gösterildiği gibi derecelendirilmiş bir hal alması ve, Şekil 2.2(f)’de gösterildiği üzere, ışığın kademeli olarak yavaş ışık bölgesine ulaşmasıdır. Bu fikri gerçeklemek amacıyla ilkörnek fotonik yapı olarak derecelendirilmiş bir 3B FK alınmıştır. Soğurucu malzeme daha sonra, bu yapı içerisinde ışık şiddetinin en yüksek olduğu noktalara yerleştirilerek, yüksek soğurum elde edilmesi planlanmaktadır. Bu tasarı özellikle kızılötesi frekansları gibi soğurucu malzemelerin



Şekil 2.1: (a) p-n eklemi tabanlı geleneksel bir fotodetektör. (b) Derecelendirilmiş bir FK yapısı. FK yapısında (c) Elektrik alan genliği ve (d) ışık şiddeti dağılımı. (e) YBA alt ve üst kesim frekanslarının uzamsal değişimi. (f) Yerel fotonik bant diyagramı.

tek başına yeterince yüksek soğurum verimliliği göstermediği frekans aralıklarında yararlı olabilir. Ayrıca bu tasarı, soğurma olayına "renk algılama" özelliği de getirebilir. Şekil 2.2'de gösterildiği üzere, yapısal parametrelerin dereceli olarak değişmesi sonucu, yapının dispersiyon özellikleri yerel olarak değişmektedir. Bu yerel değişim sonucu, gelen ışığın barındırdığı farklı frekanslar yapı içerisinde farklı grup indislerine maruz kalırlar. Farklı grup indislerine maruz kalmaları sonucunda, farklı frekanslar yapı içerisinde farklı grup hızları ile hareket ederler. Işığın bünyesindeki frekanslar, yapının yerel yasaklı bant aralığı (YBA) ile karşılaştığı anda grup hızları anlık olarak sıfıra iner. Her bir frekansının YBA ile karşılaştığı noktanın fotonik yapı boyunca farklı olması sebebiyle, ışık Fourier bileşenlerine ayrılarak yapı içerisinde anlık olarak durmuş ve tuzaklanmış olur. Şekil 2.2'de gösterildiği üzere tuzaklanmış ışık daha sonra, uygun bir soğurucu malzeme ile soğurulabilir.

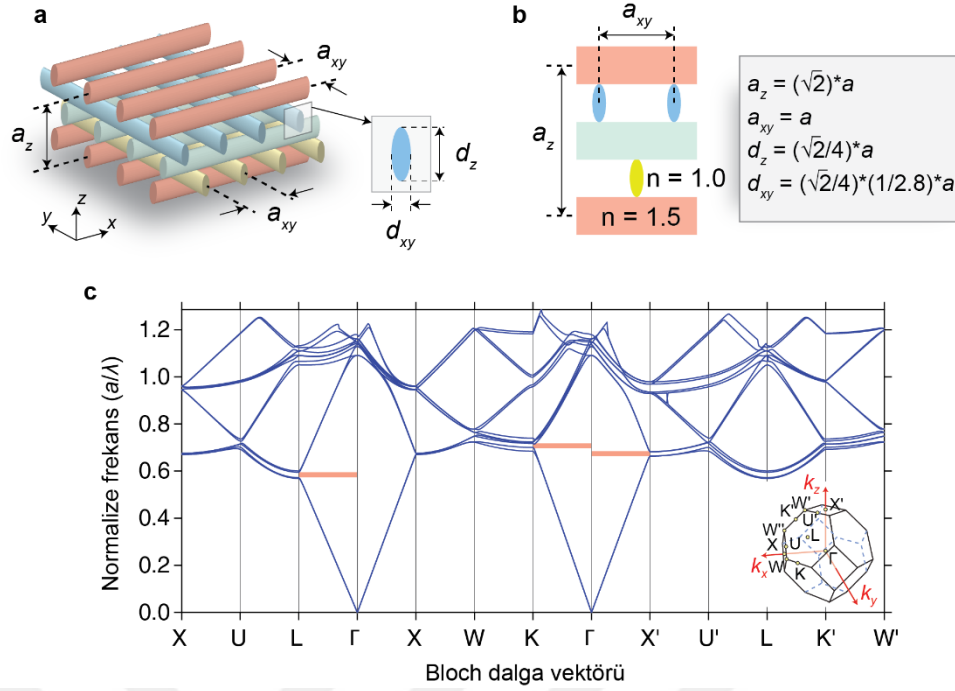


Şekil 2.2: Derelendirilmiş 3B FK'in yerel YBA frekans değişimini kullanarak, ışığı aşamalı olarak yavaşlatıp, yavaşlatılmış bölgelerde yüksek verimlilikte foton soğurumu yapılabilir.

3B FK'nin ışığın yavaşlatılarak durdurulması amacıyla tasarlanması genel olarak zor bir iştir. Öncelikle ışığın YBA'lar arasında tünellemesini engellemek amacıyla, YBA'lar yeterince geniş olacak şekilde tasarlanmalıdır. Daha sonra ideal bir yapısal derecelendirme bulunmalıdır. Zira, çok güçlü bir derecelendirme ışık tünellemesine yol açarken, zayıf derecelendirme gerçek dışı bir şekilde genişlemiş bir yavaş ışığa neden olabilir. Ayrıca, deneyde kullanılacak kırıcılık indisinin (polimer için bu değer 1.5'a tekabül etmektedir) sınırlı olduğu gerçeği de yapının çok iyi bir şekilde tasarlanması gerektiğini ortaya koyuyor. Bunlar haricinde yapının uzunluğunun deneysel olarak 50 katman ile sınırlı olması, tasarımda kullanılacak yapısal parametrelerin eniyilenmesi ihtiyacını doğurmaktadır.

Diğer taraftan çok kısa süreli atımlar kullanan doğrudan-lazer-yazımı yöntemi, 3B nanolitografi tekniklerini yukarıda bahsedilen yapısal parametrelerin ihtiyaç duyduğu çözünürlüğü sağlayacak şekilde ilerletmektedir [28]. Son bulgular, doğrudan-lazer-yazımı yöntemi sırasında yapılan polarizasyon kontrolü, voksel boyutlarının ince ayarının yapılması fırsatı verdiğini gösterdi [29]. Son olarak, hibrit organik-inorganik bir malzeme olan SZ2080, yüksek ışık şiddetli uygulamalar için iyi bir aday olarak görünüyor [30]. Bütün bu teknikler, önerilen yüksek soğurum sağlayan 3B fotonik yapıların üretiminde kullanılmasında iyi bir tercih haline gelmektedir.

Şekil 2.3(a) ve 2.3(b)'de görüldüğü üzere 3B FK'in her iki katmanından biri diğerine göre enine periyodun yarısı kadar kaydırılmıştır. Ayrıca katmanlar arası mesafe katman periyodunun dörtte birine tekabül etmektedir. Sonuç olarak 3B FK, yüzey-merkezli tetragonal bir simetriye sahip olmaktadır. Şekil 2.3(c) düzlem dalga açılımı (DDA) yöntemi [31] ile (MIT Photonics Band adlı sayısal çözümleyici yazılım aracılığıyla) sayısal olarak hesaplanmış bant diyagramını göstermektedir. Bu şekilde, sağ alttaki ilave şekil, Brillouin bölgesindeki simetri noktalarını göstermektedir. Şekil 2.3(c)'den görüleceği üzere, düşük kırıcılık indis farkından ötürü FK hiçbir frekansta tam YBA içermemektedir. Ancak, yine de ışığın hareket yönündeki ( $\Gamma$ -X' ve  $\Gamma$ -K) kısmı YBA'lar ışığın yavaşlatılmasında ve yerelleştirilmesinde kullanılabilir.



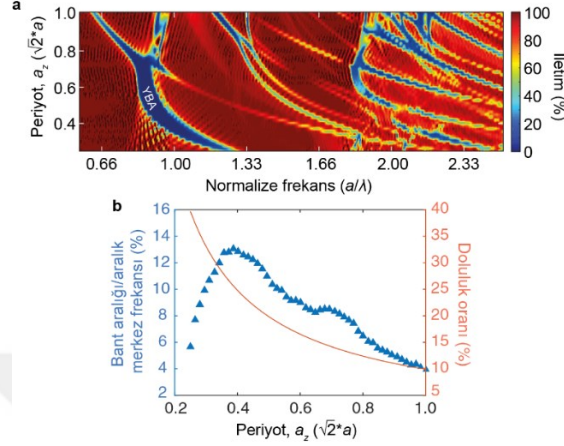
Şekil 2.3: (a) 3B FK'in genel şematik çizimi ve (b) yan kesit görüntüsü. (c) 3B FK'in bant diyagramı verilmiştir.

3B FK'daki YBA eksikliği düşük kırıcılık indis farkından dolayı beklenen bir durumdur. Zira 3B FK'lar YBA oluşturmaları için tipik olarak en az 2:1 gibi bir indis farkına ihtiyaç duymaktadırlar [32]. Diğer taraftan elde edilen kısmi YBA'nin bant-aralığı/aralık-merkez-frekansı oranı oldukça küçüktür (%4.0). Bu nedenle çalışmamıza kısmi YBA'nin eniyilenmesi ile devam ediyoruz. Eniyileme için en kritik etkenler doluluk oranları ve kırıcılık indisidir.

### 2.1.2 FK yapısının eniyilenmesi

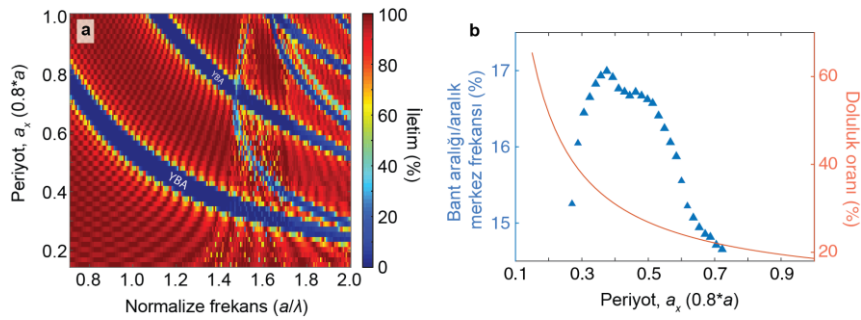
Katman periyodunu modifiye ederek, doluluk oranını değiştirebiliriz. Bu sayede en optimum YBA aralığını tayin edebiliriz. Bu bağlamda, Şekil 2.4(a), katman periyoduna göre  $\Gamma$ -X' yönündeki YBA analizini göstermektedir. Analizler Lumerical yazılımı ile zaman-alanında sonlu-farklar (ZASF) çözümleri ile gerçekleştirilmiştir [URL-1]. Ek olarak, daha yüksek frekanslardak YBA'ları analiz etmek adına frekans eksenini bu bağlamda genişletilmiştir. Yüksek frekanslarda, YBA'lar gözlemlenmiş olmasına rağmen bunların büyüklükleri ışık yavaşlatılma amacıyla kullanılmaya elverişli değildir. Ayrıca sayısal olarak bant-aralığı/aralık-merkez-frekansı oranları, yapının yerel doluluk oranlarıyla birlikte Şekil 2.4(b)'de verilmiştir. Bu şekilden

anlaşılacağı üzere, en optimum katman periyodu  $0.4\sqrt{2}a$ 'ya tekabül etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, derecelendirilmiş FK için aslında optimum bir katman periyodundan ziyade, bir katman aralığı belirlememiz gerektiğidir. Bu bağlamda, elde edilen optimum aralık  $0.35\sqrt{2}a-0.50\sqrt{2}a$ 'ya tekabül etmektedir.



Şekil 2.4: Katman periyoduna göre (a) YBA değışimi, (b) YBA büyüklüğü değışimi ve doluluk oranı değışimi.

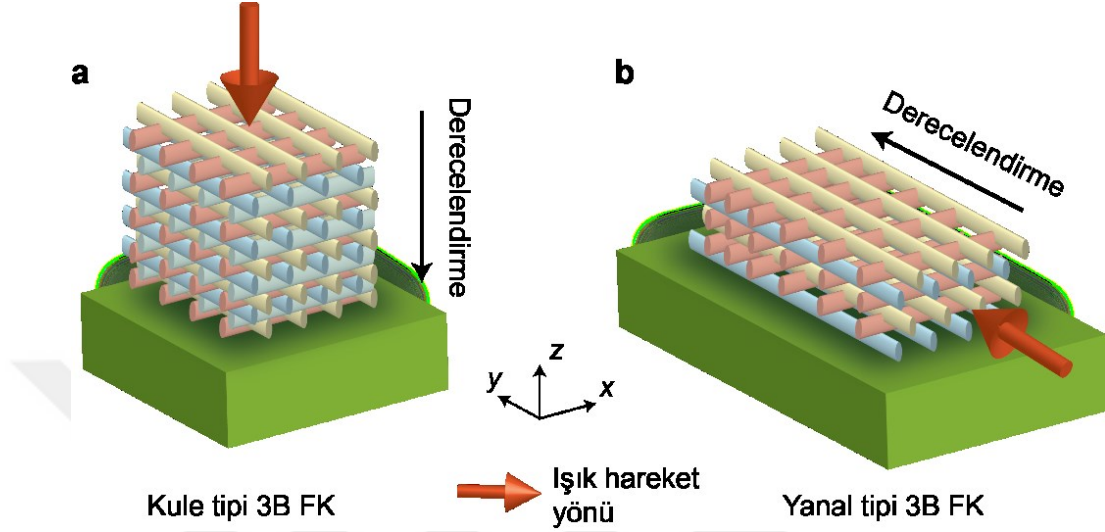
$\Gamma$ -K yönünde ışık yerleştirme için, bu yöndeki YBA eniylenmelidir. Bu yöndeki YBA'nın eniylenmesi amacıyla enine periyotlardan biri modifiye edilebilir. Enine periyotlardan birinin modifiye edilmesi, enine simetriyi bozacağından burada  $a_x$  ve  $a_y$  gibi iki farklı enine periyodundan bahsedebiliriz. Bu bakımdan, YBA'nın  $a_x$ 'e göre değışimini konu edinen analiz Şekil 2.5(a)'te görülebilir. Burada yeterli doluluk oranına ulaşmak adına  $a_y=0.80a$  ve  $a_z=0.42a$  alınmıştır. Bu değerler ile doluluk oranı %20'nin üzerinde olmaktadır, ve bu sınır değer YBA elde edilmesi için kullanılması gereken en düşük doluluk oranı olarak kabul edilebilir. Şekil 2.5(a) incelendiğinde azalan  $a_x$  ile birlikte YBA'nın daha yüksek frekanslara kaydığı gözlemlenebilir.



Şekil 2.5: Enine periyota göre (a) YBA değışimi, (b) YBA büyüklüğü değışimi ve doluluk oranı değışimi.



Diğer taraftan Şekil 2.5(b) sayısal olarak elde edilmiş YBA boyutlarını göstermektedir. Buradan, en optimum enine periyodun  $0.28a-0.48a$  olduğu sonucuna varılabilir. Bu değerlere karşılık gelen doluluk oranları ise  $0.24-0.33$ 'e tekabül etmektedir.

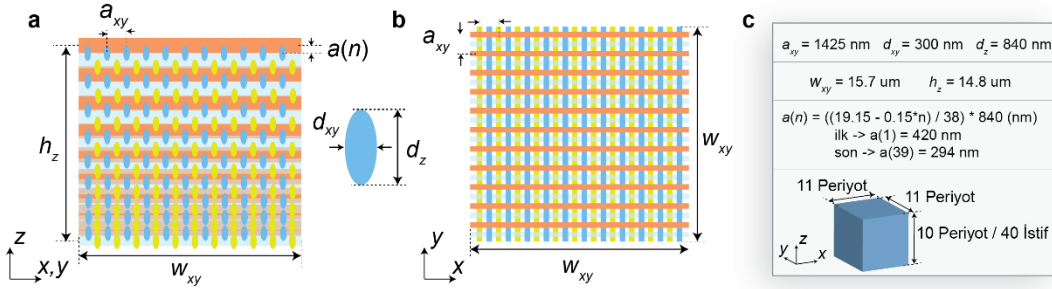


Şekil 2.6: Önerilen (a) kule ve (b) yanall tipi 3B FK'ların şematik çizimleri.

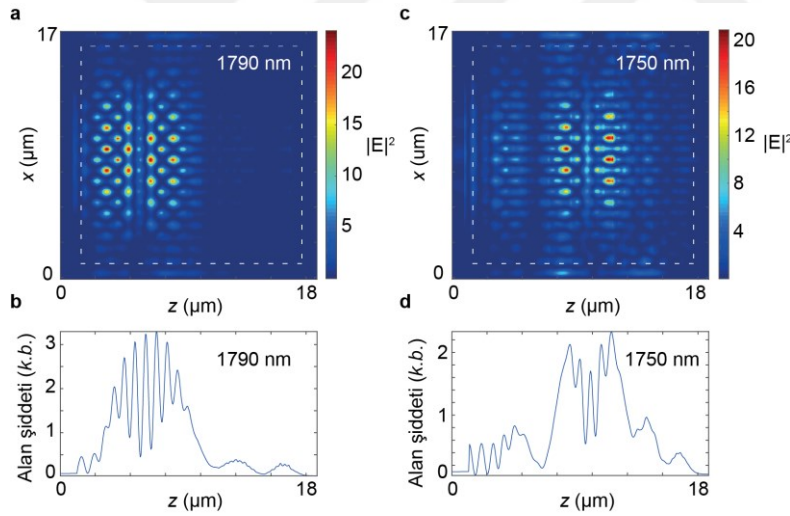
Yapısal parametrelerin eniyilemeleri sonrasında, 3B FK'lar modellenerek ışık yavaşlatma ve ışık şiddeti artırma özellikleri incelenmiştir. Bu bakımdan, yapısal parametreler kızılötesi frekanslarına (spesifik olarak  $1.5 \mu\text{m} - 2.0 \mu\text{m}$  aralığına) taşınmıştır. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere iki farklı modelde FK üzerinde çalışılmıştır: kule tipi (Şekil 2.6(a)) ve yanall (Şekil 2.6(b)) tipi 3B FK.

Şekil 2.7'de kule tipi FK'nin yapısal parametreleri verilmiştir. FK yapısını uyarmak için Gaussian tipi bir kaynak kullanılmıştır. Kararlı halde belli bir frekanstaki elektrik alan genliği, o frekanta enjekte edilen elektrik alanın genliğine bölünmüştür. Bu sayede, sunulan elektrik alan dağılımlarındaki genlikler ve şiddetler, aynı zamanda genlik veya şiddet arttırım oranını da vermektedir. Şekil 2.8(a)'da  $1790 \text{ nm}$  çalışma dalgaboyunda elde edilen elektrik alan şiddet dağılımı verilmiştir. Şekil 2.8(b)'de ise aynı frekansta  $x$  yönünde toplamları alınmış [33] elektrik alan şiddet kesiti verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere, gelen ışık beklendiği gibi yerel YBA bölgesine ulaştığında yerelleşmektedir. Ayrıca, yerelleşen ışığın belli bir şiddet arttırımına maruz kaldığı görülebilir. Spesifik olarak ışık şiddetinin 25 kat arttığı görülebilir. Bu da önemli ölçüde soğurum arttırımını sağlayabileceği öngörülebilir.

Diğer taraftan, yapının frekansa duyarlı olduğunu görmek adına, Şekil 2.8(c)'de 1750 nm çalışma dalga boyundaki elektrik alan şiddeti dağılımı verilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 2.8(d)'de ise aynı frekansta  $x$  yönünde toplamları alınmış elektrik alan şiddet kesiti verilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere, frekansın artması ile birlikte ışık daha ileri bir pozisyonda yerleşmektedir. Ayrıca, ışığın şiddetinin 20 kat arttığı görülebilir.

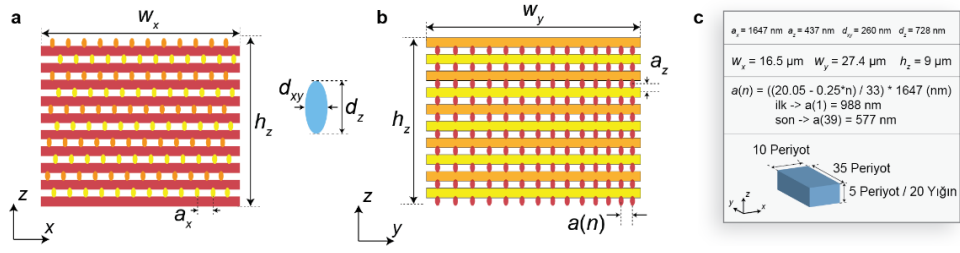


Şekil 2.7: Kule tipi 3B FK'nin (a)  $xz$ - ve  $yz$ -, (b)  $xy$ - kesitsel şematik görüntüsü. (c) Yapısal parametreler verilmiştir.



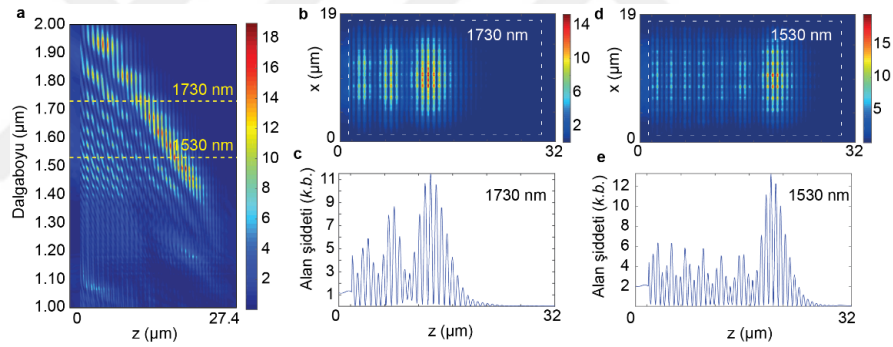
Şekil 2.8: (a,b) 1790 nm ve (c,d) çalışma dalga boyları için kararlı hal elektrik alan (a,c) dağılımı ve (b,d) elektrik alan kesiti verilmiştir.

Yukarıda bahsedilen yapı, katman periyodunun derecelendirilmesi ile edilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 2.6(b)'de görüleceği üzere, enine periyodunun derecelendirilmesi ile ışık yerleştirilmesi gerçekleştirilebilir. Şekil 2.9'da bu tarz bir yapının şematik görüntüleri ve yapısal parametreleri verilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere  $a_y$  derecelendirmeye maruz bırakılmıştır.



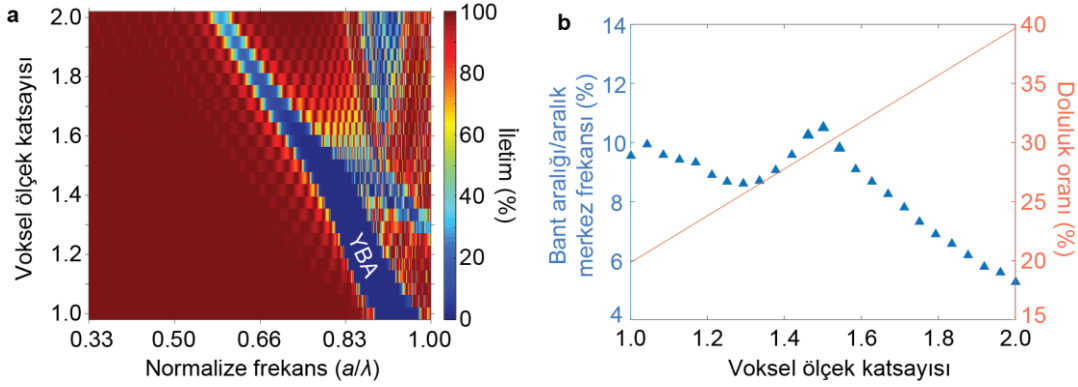
Şekil 2.9: Yanal tipi 3B FK'in (a) xz- (b) yz- kesitsel şematik görüntüsü. (c) Yapısal parametreler verilmiştir.

Şekil 2.10(a)'da, Şekil 2.9'da verilen yapının Gaussian tipi bir kaynak ile uyarılması sonucu sayısal olarak elde edilen hareket yönündeki elektrik alan tayfı gösterilmiştir. Spesifik olarak 1730 nm çalışma dalgaboyuna ait elektrik alan dağılımı ve kesiti sırasıyla Şekil 2.10(b) ve 2.10(c)'de verilmiştir. Benzer şekilde, 1530 nm çalışma dalgaboyuna ait elektrik alan dağılımı ve kesiti sırasıyla Şekil 2.10(d) ve 2.10(e)'de verilmiştir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, ışığın şiddetinin artması ile birlikte gelen ışık yapı boyunca frekans bileşenlerine ayrılmaktadır.



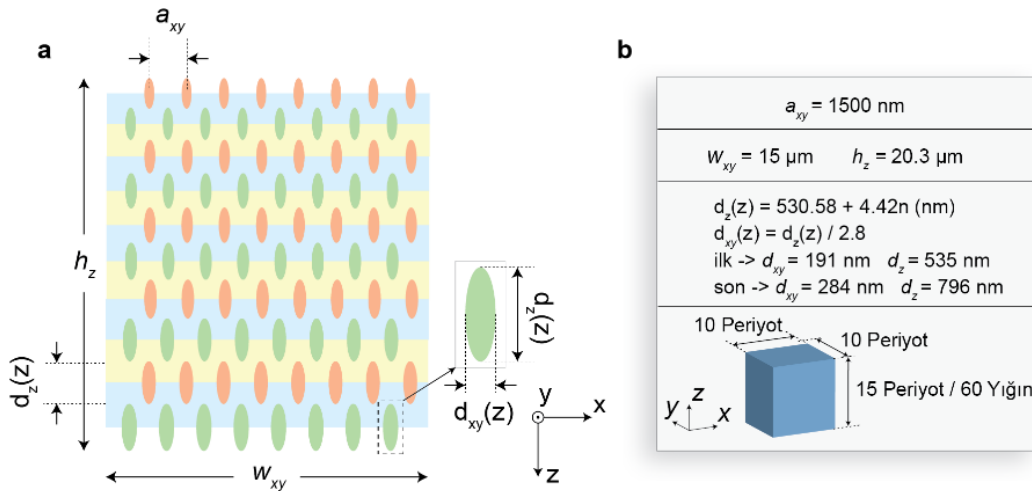
Şekil 2.10: (a) Dalga hareketi yönünde elektrik alan şiddeti tayfı. (b,c) 1730 nm ve (d,e) 1530 nm çalışma dalgaboyları için kararlı hal elektrik alan (b,d) dağılımı ve (c,e) kesiti verilmiştir.

3B FK'in derecelendirilmesinde kullanılabilecek diğer bir yöntem, FK'in voksel boyutlarını katmana göre derecelendirmektir. Bu bağlamda, Şekil 2.11(a) voksel boyutuna göre YBA analizini göstermektedir. Burada incelenen yapının parametreleri,  $a_z=0.35a$  hariç olmak üzere Şekil 2.3(b)'de verilen yapının parametreleri ile aynıdır. Diğer taraftan, Şekil 2.11(b)'de sayısal olarak elde edilen YBA büyüklüğünün voksel boyutuna göre analizi verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, YBA'yi eniyileyen voksel ölçek katsayılarının 1.0-1.5 arasında olduğu görülebilir.

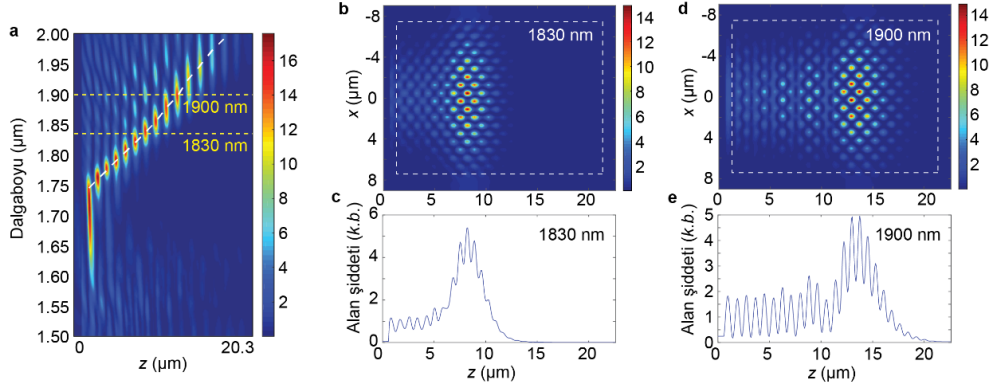


Şekil 2.11: Voksel boyutuna göre (a) YBA değışimi, (b) YBA büyüklüğü değışimi ve doluluk oranı değışimi.

Şekil 2.12’de parametreleri eniyilenmiş FK yapısı ve parametreleri görülebilir. Bu şekilden görülebileceği üzere, yapının voksel büyüklükleri  $z$  yönünde derecelendirilmiştir. Verilen yapı, Gaussian tipi bir kaynak ile uyarıldığında elde edilen elektrik alan şiddeti tayfı Şekil 2.13(a)’da verilmiştir. Ayrıca, 1830 nm için elde edilen elektrik alan dağılımını ve kesiti sırasıyla Şekil 2.13(b) ve 2.13(c)’de verilmiştir. Benzer şekilde, 1900 nm için elde edilen alan dağılımı ve kesiti sırasıyla Şekil 2.13(d) ve 2.13(e) verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, gelen dalganın frekansına bağlı olarak belli bir mesafede yerleştiği görülebilir. Ayrıca yerleşen ışığın şiddetinin yaklaşık olarak 14 kat arttığı sonucuna da varılabilir.



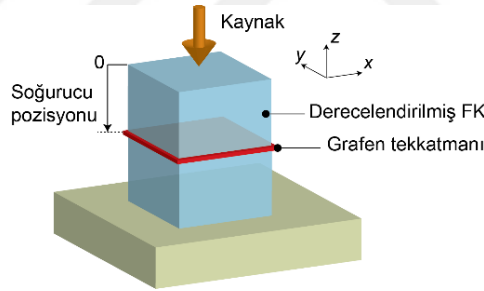
Şekil 2.12: Voksel boyutu derecelendirilmiş 3B FK’in (a)  $xz$ - kesitsel şematik görüntüsü ve (b) yapısal parametreleri verilmiştir.



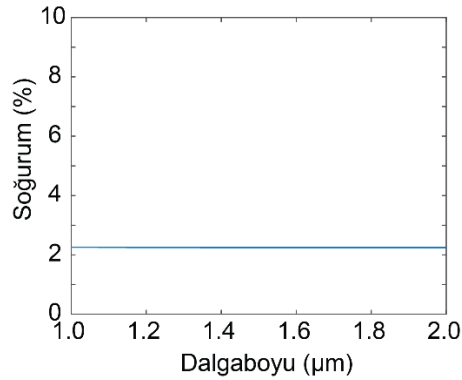
Şekil 2.13: (a) Dalga hareketi yönünde elektrik alan şiddeti tayfı. (b,c) 1830 nm ve (d,e) 1900 nm çalışma dalgaboyları için kararlı hal elektrik alan (b,d) dağılımı ve (c,e) kesiti verilmiştir.

### 2.1.3 Dalga yerelleşmesinin soğurum arttırımına etkisi

Gelen ışığın yerelleşmesi ve şiddetinin artması gözlemlendikten sonra, bir sonraki adım olarak yerleşen ışığın soğurumu incelenmiştir. Bunun için FK yapısının içerisine, Şekil 2.14’de gösterildiği gibi, ışığın yerelleştiği bölgelere grafen tekkatmanları yerleştirilmiştir.



Şekil 2.14: Grafen tekkatmanı dahil edilmiş 3B FK’in şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.15: Serbest uzayda grafen kızılötesi soğurumu.

Kuramsal olarak grafenin soğurum verimliliği, Eşitlik (2.1)'de verildiği gibi, Poynting vektörün diverjansının soğurumun gerçekleştiği yüzey boyunca integrali alınarak bulunabilir.

$$P_{abs} = -\frac{1}{2} \iint \Re\{\vec{V} * \vec{P}\} dx dy \quad (2.1)$$

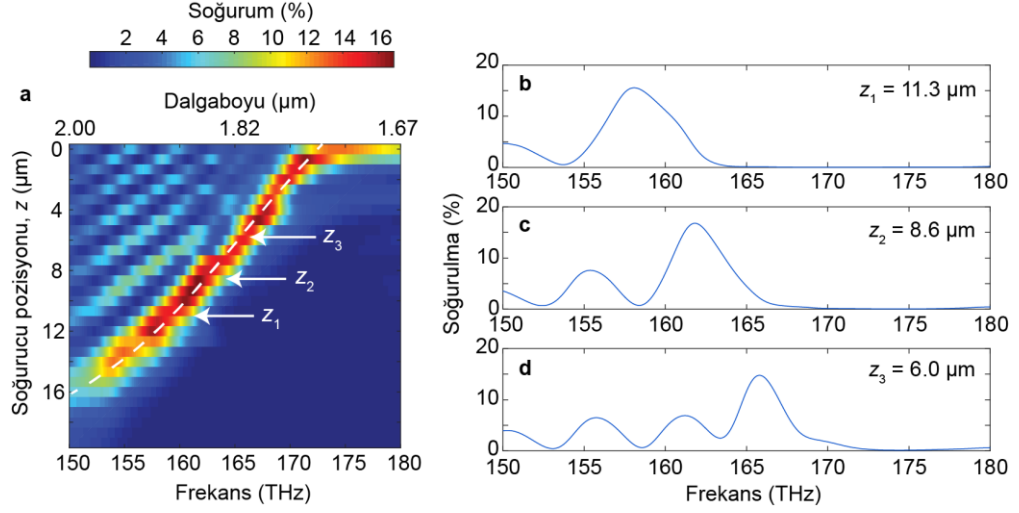
Eşitlik (2.1) grafen tekkatmanının  $xy$  düzleminde olduğu varsayılarak Eşitlik (2.2) şeklinde yazılabilir.

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \iint \left( \Re\{\sigma^{xx}\} * |E_x|^2 + \Re\{\sigma^{yy}\} * |E_y|^2 \right) dx dy \quad (2.2)$$

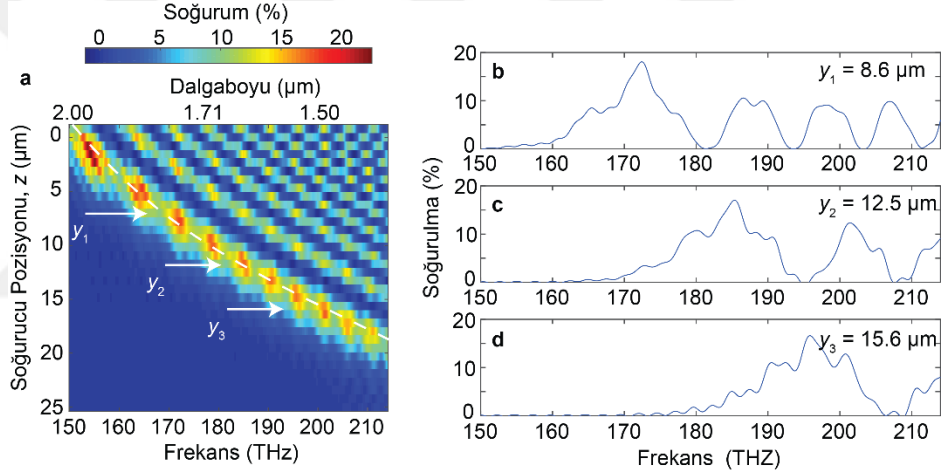
Eşitlik (2.2) incelendiğinde soğurulan gücün, elektrik alan şiddeti ile orantılı olduğu görülebilir. Bu nedenle, derecelendirilmiş FK yapısı ile elde edilen ışık şiddet arttırımının aynı zamanda soğurum arttırımına neden olacağı sonucuna varabiliriz.

Soğurum arttırımını sayısal olarak gözlemlemek için öncelikle grafen tekkatmanının serbest uzaydaki soğurumu incelendi. Bunun için grafen çevresine periyodik sınır koşulları eklendi ve bir düzlem dalga ile kızılötesi frekanslarında uyarıldı. Soğurum verimliliğini Eşitlik (2.2)'de verilen denklem ile hesaplama mümkün olmasına rağmen, verimliliği geleneksel "iletim kutusu" yöntemiyle hesaplamak daha az işlem gücü gerektirmektedir. Bu yöntemde soğurucu malzemenin çevresine konulan iletim hesaplayıcı monitörler aracılığı ile, soğurucu malzeme bölgesine giren ve bu bölgeden çıkan dalgaların enerjilerinin farkı alınarak, bu bölge içerisinde soğurulan enerji elde edilebilir. Serbest uzayda elde edilen soğurum tayfı Şekil 2.15'te verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere, kızılötesi dalgaboylarında grafen tekkatmanı yaklaşık olarak %2.3 soğurum verimliliğine sahiptir. Ayrıca tayf incelendiğinde, soğurum verimliliğinin oldukça eşit dağılımlı olduğu görülebilir.

Grafen tekkatmanının serbest uzaydaki soğurum verimliliği elde edildikten sonra, grafen tekkatmanı derecelendirilmiş FK yapıları içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 2.16, kule tipi FK içerisine yerleştirilen grafen tekkatmanın soğurum verimliliği tayfını pozisyona bağlı olarak göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 2.17, yanal tipi derecelendirilmiş FK içerisine yerleştirilen grafen tekkatmanın soğurum verimliliği tayfını temsil etmektedir. Bu şekiller incelendiğinde, grafen soğurumunun beklendiği gibi pozisyona bağlı olduğu ve soğurumun %20'nin üzerine çıktığı görülebilir.



Şekil 2.16: (a) Kule tipi FK'e dahil edilmiş grafen tekkatmanının soğurum tayfı. Soğurum tayfı ayrıca kesit olarak (b) 11.3  $\mu\text{m}$ , (c) 8.6  $\mu\text{m}$  ve (d) 6.0  $\mu\text{m}$  soğurucu pozisyonları için verilmiştir.

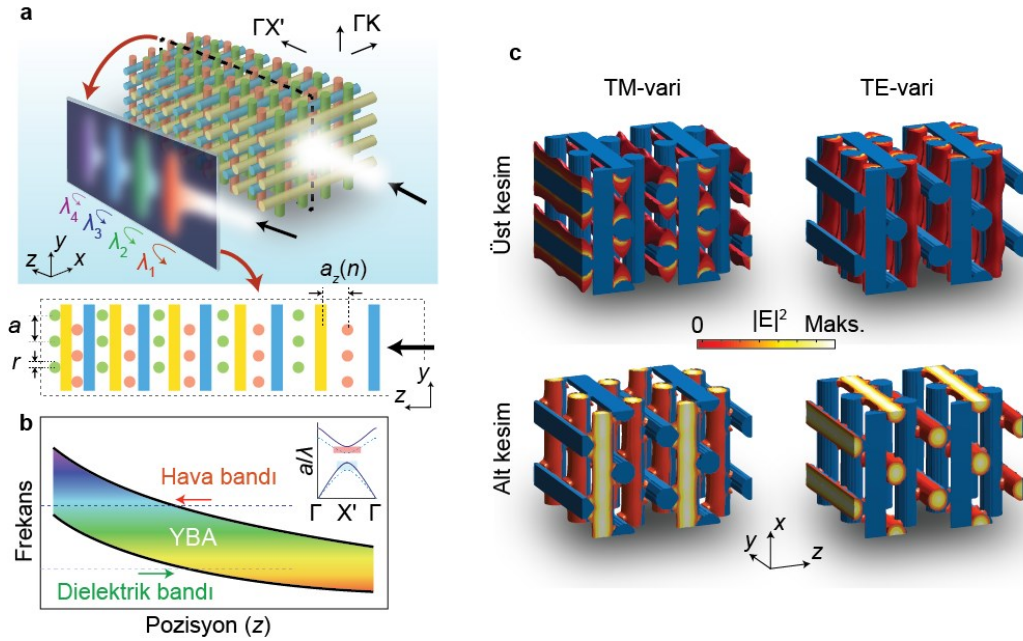


Şekil 2.17: (a) Yanal tipi FK'e dahil edilmiş grafen tekkatmanının soğurum tayfı. Soğurum tayfı ayrıca kesit olarak (b) 11.3  $\mu\text{m}$ , (c) 8.6  $\mu\text{m}$  ve (d) 6.0  $\mu\text{m}$  soğurucu pozisyonları için verilmiştir.

## 2.2 Üç Boyutlu Fotonik Kristallerde Mikrodalga "Gökkuşuğu Tuzaklama"

Bir önceki bölümde önerilen ışık yavaşlatma mekanizmasının mikrodalga frekanslarında karakterizasyonu yapılmıştır [34-36]. Bu bağlamda, Şekil 2.18(a)'da gösterildiği üzere  $\text{Al}_2\text{O}_3$  çubukları ile önerilen derecelendirilmiş 3B FK kurulmuştur. Kurulan yapı tam bir YBA desteklemektedir ve Şekil 2.18(b)'de görüleceği üzere bir ışık kaynağı tarafından iki farklı yönden de uyarılabilir. Uyarım yönüne bağlı olarak

Şekil 2.18(c)'de temsil edildiği üzere gelen ışık hava veya dielektrik ortamında yerelleşebilmektedir. Spesifik olarak, yapı azalan derecelendirme yönünde uyarıldığında, ışık üst kesim frekansına yaklaşmaktadır. Bu durumda, dalga hava bandı modunda, hava ortamında yerelleşmektedir. Tersisi durumda, yapı artan derecelendirme yönünde uyarıldığında ise, dalga dielektrik modunda dielektrik ortamında yerelleşmektedir. Işığın hava ortamında soğurulmasının daha kolay olmasından dolayı, yapıyı üst kesim frekansından uyarmayı tercih ediyoruz. Bu nedenle yapıyı azalan derecelendirme yönünde uyarılacaktır. Şekil 2.18(c)'den çıkarılabilecek diğer bir sonuç, üst kesim frekansında  $x$  yönünde polarize olan ışığın  $y$  doğrultusunda ve alt kesim frekansında  $x$  yönünde yerelleşmesidir.



Şekil 2.18: (a) Mikrodalga frekansları için tasarlanan 3B FK'in şematik gösterimi verilmiştir. (b) YBA'nın pozisyona göre yerel olarak değişimi. (c) Uyarılan yöne bağlı olarak yerelleşen ışık, hava veya dielektrik ortamında konsantre olmaktadır.

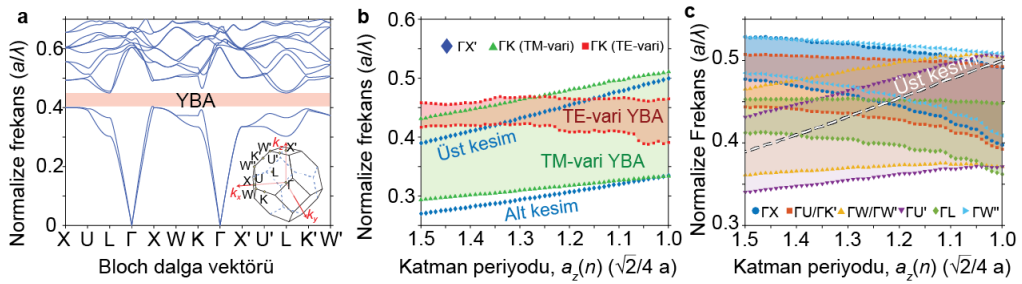
## 2.2.1 Yöntem ve sonuçlar

Şekil 2.18'de verilen mikrodalga FK'nin bant diyagramı analizi Şekil 2.19'de verilmiştir. Buradan görüleceği üzere, yüksek indis farkında dolayı FK bir tam YBA desteklemektedir. Ayrıca, şekilden görüleceği üzere yerel katman periyodunun artması ile birlikte alt ve üst kesim frekansları azalmaktadır. Bu benzerliklerine



rağmen, alt ve üst kesim frekansları arasında önemli bir fark vardır: yukarıda da bahsedildiği üzere üst kesim frekansında yerleşme elde edebilmek için katman periyodunun azalması, alt kesim frekansında yerleşme elde edilmek için ise katman periyodunun artması gerekmektedir. Bu fark haricinde, Şekil 2.19(b) ve 2.19(c) incelendiğinde iki kesim frekansı arasında bir fark daha ortaya çıkmaktadır.  $\Gamma X'$  yönündeki üst kesim frekansı, genel olarak diğer simetri noktalarının kesim frekanslarının bünyesinde yer almaktadır.

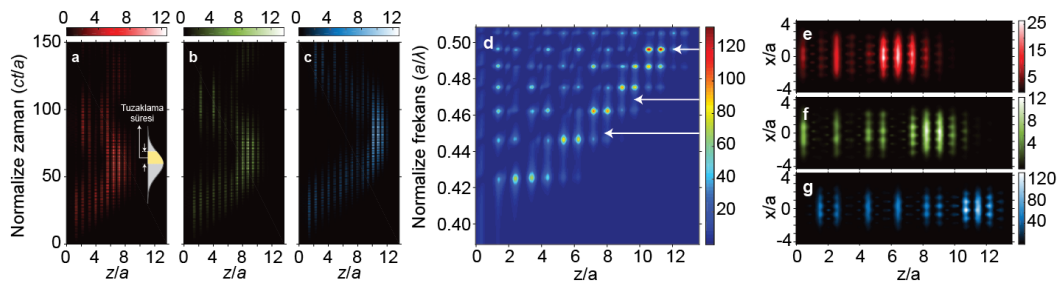
Diğer taraftan,  $\Gamma X'$  yönündeki alt kesim frekansı diğer simetri noktalarının kesim frekanslarının dışında kalmaktadır. Bu da demek oluyor ki, alt kesim frekansında yerleşen mod enine kayıplara karşı daha hassas iken üst kesim frekansında yerleşen mod enine kayıplara karşı daha dirençli olmaktadır. Bu durum, yapılan azalan derecelendirme yönünde uyarılmasının diğer bir sebebi olarak sayılabilir. Şekil 2.19 incelenirse bütün katman periyotları için tüm yönlerde ışığın tuzaklanmasının mümkün olmadığı görülebilir. Zira, katman periyodunun değiştirilmesi, FK'in düşük simetrisini daha fazla kırmaktadır ve sonuç olarak yapının anizotropisini daha da artmaktadır [37]. Yine de, Şekil 2.18'e göre  $\{1.15-1.35\}\sqrt{2}/4a$  aralığında, üst bantta yerleşen dalğanın pek çok yönden tuzaklanabildiği sonucunu çıkarabiliriz. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir konu, yapıya giren ışığın yavaş ışık bölgesinden uzak olması gerektiği (kuplaj verimliliğini arttırmak için) ve foton tünellemesini engellemek için yapının sonuna fazladan katman eklenmesi gerektiğidir. Bu nedenle yapımızda katman periyodu aralığı olarak  $\{1.00-1.50\}\sqrt{2}/4a$  tercih ediyoruz.



Şekil 2.19: (a) 3B FK'in sayısal olarak hesaplanmış bant yapısı. (b) Katmanlar arası mesafeye göre yerel YBA'ları değişimi. (c) Diğer simetri noktaları için yerel YBA değişimleri.

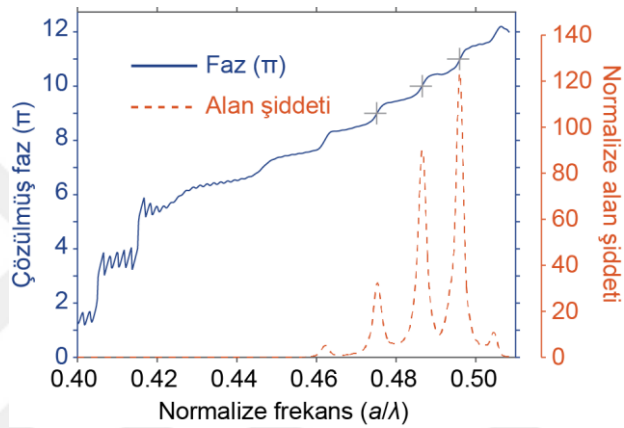
Yapı sayısal olarak modellendikten sonra, ZASF yöntemiyle yapı içerisinde ilerleyen dalga incelenmiştir. Bunun için FK yapısı, atım süresi  $ct/a = 30$  olan Gaussian tipi bir kaynak ile uyarılmıştır. Kaynak yapının  $0.2a$  kadar önüne yerleştirildi. Şekil 2.20(a), 2.20(b) ve 2.20(c) sırasıyla  $a/\lambda = 0.450$ ,  $0.468$  ve  $0.496$  merkez frekanslarına sahip atımların zaman evrimleri verilmiştir. Bu şekiller, her bir frekansın farklı noktalarda ve farklı zaman aralıklarında yerleştiğini önermektedir. Daha detaylı olarak, gelen dalga yavaşlayarak yerleşme bölgesine ulaşır. Burada belli bir süre boyunca tuzaklanır. Eğer tuzaklanma süresi, dalganın şiddetinin maksimum değerinin  $1/e$ 'de birine düştüğü süre olarak kabul edilirse,  $a/\lambda = 0.450$ ,  $0.468$  ve  $0.496$  merkez frekansları için tuzaklama süreleri sırasıyla  $ct/a = 18.9$ ,  $20.3$  ve  $24.1$  olarak hesaplanabilir. Atımların zaman evrimlerinden çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise, dalganın şiddetinin yerleşme bölgesine kadar arttığıdır. Bu durumun sebebi olarak, yerel enerji yoğunluğunun dalganın grup hızıyla ters orantılı olması sayılabilir [38].

Sayısal analizlerin devamında, yapı genişbant bir ile kaynak uyarılmıştır ve Şekil 2.20(b) verilen kararlı hal elektrik alan şiddeti tayfı hesaplanmıştır. Eğer dalganın dönüş noktası, ışık şiddetinin maksimum olduğu yer olarak tanımlanırsa, dönüm noktalarının frekans ile doğru orantılı olarak arttığı görülebilir. Bunun sebebi olarak, üst kesim frekansının katman periyoduna doğrusal olarak bağlı olması ve FK derecelendirmesinin doğrusal olması gösterilebilir. Ayrıca  $a/\lambda = 0.450$ ,  $0.468$  ve  $0.496$  frekansları için kararlı hal elektrik alan şiddet dağılımları sırasıyla Şekil 2.20(e), 2.20(f) ve 2.20(g)'de verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere, yerleşen dalga beraberinde durağan bir dalga oluşturmaktadır.

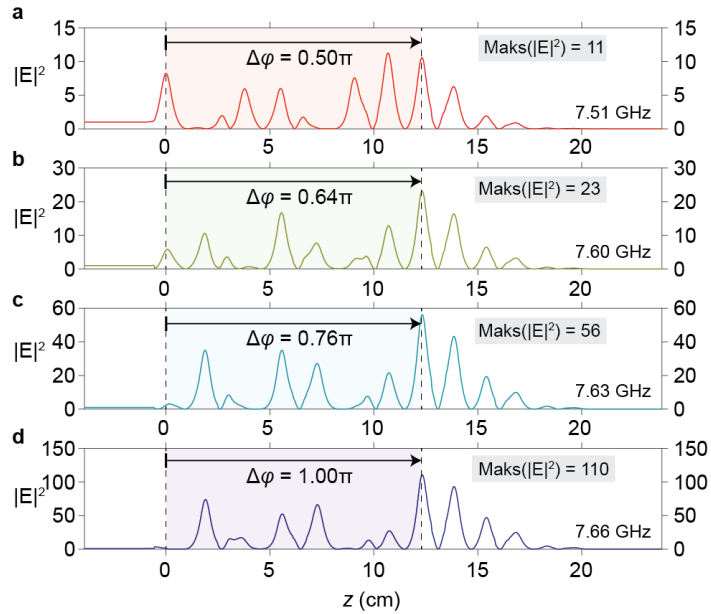


Şekil 2.20: (a)  $a/\lambda = 0.450$ , (b)  $a/\lambda = 0.468$  ve (c)  $a/\lambda = 0.496$  normalize frekansları için 3B FK içerisinde bir Gaussian atımının zaman evrimi. (d) Kararlı hal elektrik alan şiddeti tayfı. (e)  $a/\lambda = 0.450$ , (f)  $a/\lambda = 0.468$  ve (g)  $a/\lambda = 0.496$  normalize frekansları için kararlı hal elektrik alan şiddet dağılımları.

Şekil 2.20(d)'den yapılabilecek diğer bir çıkarım, ışık şiddetinin özellikle yüksek olduğu bazı "sıcak nokta"ların varlığıdır. Bu sıcak noktaların varlığını, yapının girişi ile dönüş noktası arasında gerçekleşen salımlara bağlıyoruz. Şekil 2.21'den görüleceği üzere, eğer yerelleşen dalganın fazı yapının girişine göre  $\pi$ 'nin tam katı olduğunda, ışık şiddeti arttırımı maksimum olmaktadır. Bu durum yapının aynı zamanda bir rezonatör olarak davrandığını göstermektedir. Bu durumu daha detaylı görebilmek adına, Şekil 2.22 farklı faz farkları için şiddet profillerini göstermektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere faz farkı, ışık şiddeti arttırımında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 2.21: Faz birikimi ve elektrik alan şiddeti arttırımı.

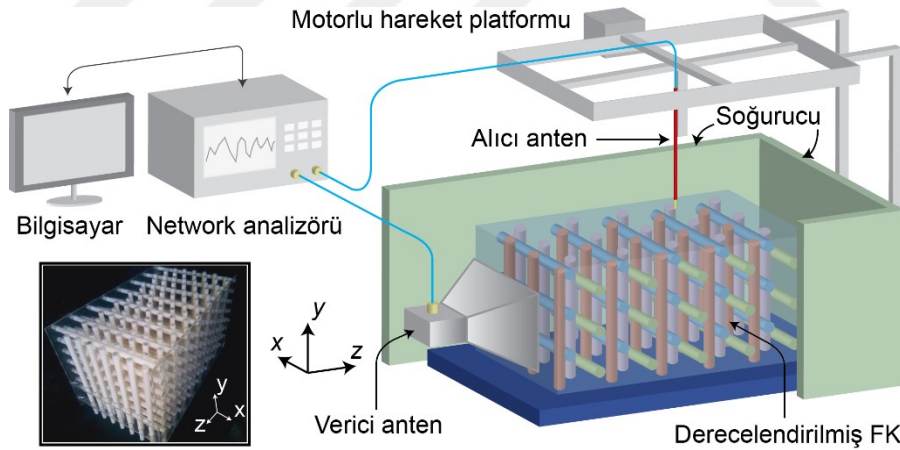


Şekil 2.22: (a) 7.51 GHz, (b) 7.60 GHz, (c) 7.63 GHz ve (d) 7.66 GHz frekansları için kesitsel elektrik alan şiddet profilleri.

## 2.2.2 Tasarımın deneysel gerçeklemesi

Önerilen FK yapısını mikrodalga frekanslarında test etmek adına Şekil 2.23’de verilen deney düzeneği kurulmuştur. Bu şekilden görüleceği üzere, deney düzeneği bir ađ analizörü, birer alıcı ve verici anten ve bir motorlu hareket platformundan oluşmaktadır. Sayısal hesaplamalardan farklı olarak deneylerimizde, FK yapısının yalnızca üst kısmındaki elektrik alan dağılımını gözlemleyebilmekteyiz.

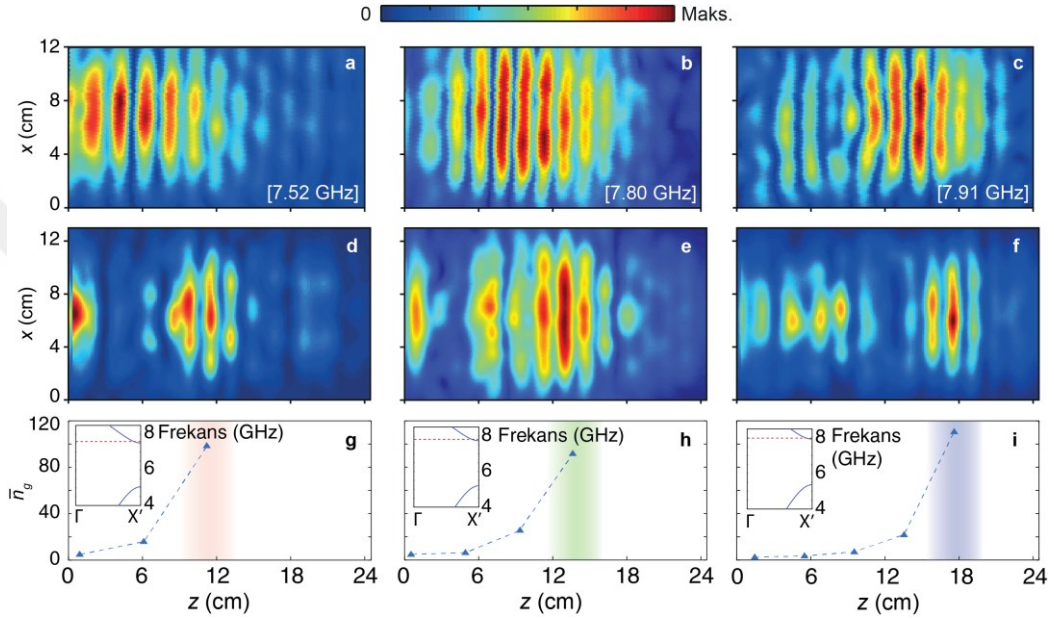
Motorlu hareket platformu  $xy$  düzleminde 1 mm çözünlükle hareket ettirilerek bu düzlemdeki elektik alan dağılımını elde edilmiştir. Şekil 2.24(a), 2.24(b) ve 2.24(c) sırasıyla 7.52 GHz, 7.80 GHz ve 7.91 GHz frekanslarındaki elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Şekil 2.24(d), 2.24(e) ve 2.24(f) ise aynı frekanslarda sayısal olarak hesaplanmış sonuçları vermektedir. Bu şekiller bize gösteriyor ki, elde edilen elektrik alan dağılımlarındaki dönüş noktaları deneysel ve sayısal durumlar için oldukça benzerlik göstermektedir. Aradaki farkı deneysel ve sayısal durumlarda kullanılan kaynağın hüzmeye şeklinin farklılığına atfekteyiz. Yine de bu sonuçlar bize dalgaının frekansına bağlı olarak farklı noktalarda yerleştiğini ve geri yansıdığını göstermektedir.



Şekil 2.23: Derecelendirilmiş 3B FK’in mikrodalga karakterizasyonu için kullanılan deney düzeneğinin şematik çizimi.

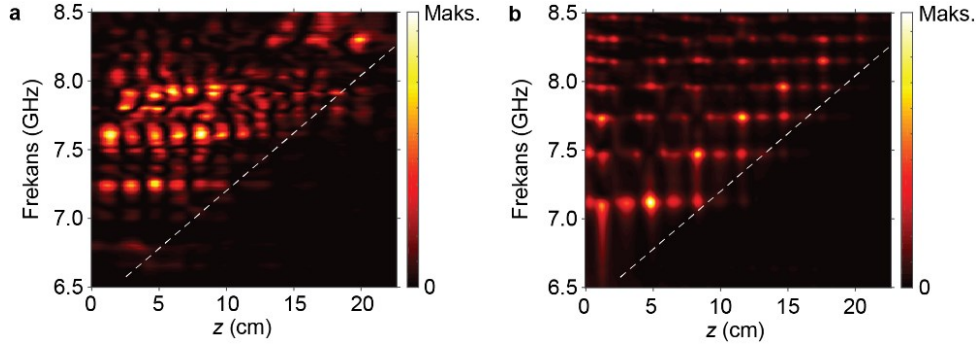
Gelen dalgaının, grup hızının dönüş noktalarında sıfıra yakınsadığını deneysel olarak gözlemek için, dalgaının grup erteleme süreleri FK içerisinde farklı noktalarda ölçülmüştür. Daha sonra ölçülen süreler arasındaki fark ile ölçüm yapılan noktalar arasındaki mesafe farkı ile oranlanarak ortalama grup hızı elde edilmiştir. Son olarak

elde edilen grup hızları ışık hızına bölünerek grup indisleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 7.52 GHz, 7.80 GHz ve 7.91 GHz frekansları için sırasıyla Şekil 2.24(g), 2.24(h) ve 2.24(i)'de verilmiştir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, her frekanstaki mod dönüş noktasına yaklaşırken, maruz kaldığı grup indisi artmaktadır. Diğer bir deyişle grup hızı azalmaktadır. Dönüş noktalarında elde edilen ortalama grup indisleri 90-100 arasında değişmektedir. Bu durum yavaş ışık tabanlı elektromanyetik dalga yerelleşmesini kanıtlamaktadır [33].



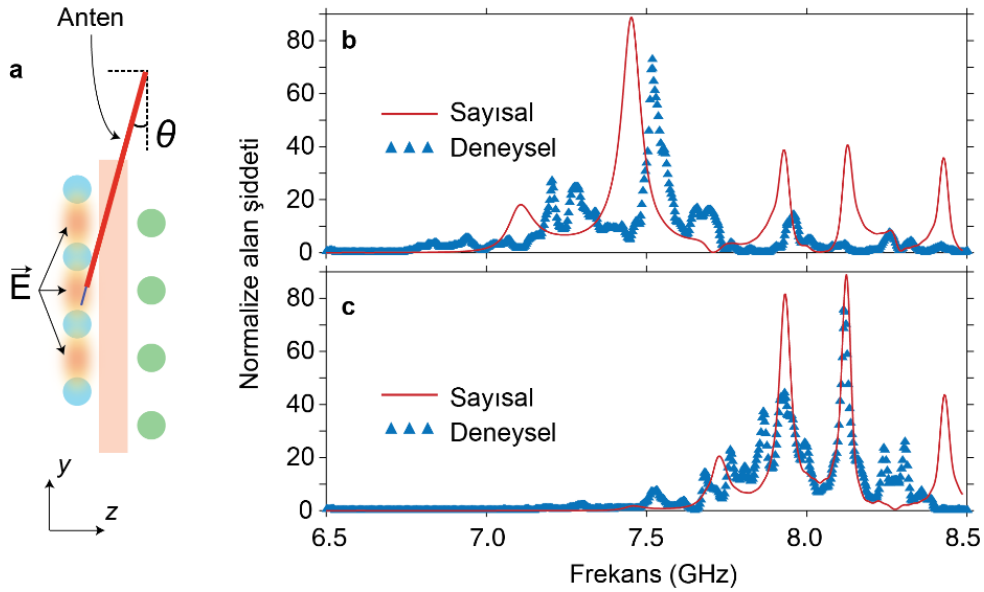
Şekil 2.24: (a) 7.52 GHz, (b) 7.80 GHz ve (c) 7.91 GHz frekanslarında deneysel olarak ölçülen elektrik alan şiddet profilleri. Benzer şekilde, (d) 7.52 GHz, (e) 7.80 GHz ve (f) 7.91 GHz frekanslarında sayısal olarak elde edilen elektrik alan şiddet profilleri. (g) 7.52 GHz, (h) 7.80 GHz ve (i) 7.91 GHz frekanslarında ölçülen ortalama group indisleri.

Genişbant bir deneysel tayf elde edebilmek adına, FK yapısının üzerinde hareket yönündeki elektrik alan şiddeti ölçülmüştür. Bu sonuç, sayısal sonuç ile birlikte, sırasıyla Şekil 2.25(a) ve 2.25(b)'de verilmiştir. Şekil 2.25'de görüleceği üzere, elde edilen deneysel ve sayısal tayflar benzerlik göstermektedir. Aradaki farkları deneysel ölçüm ve üretim hatalarına atfetmekteyiz. Şekil 2.24 ve Şekil 2.25'de verilen sonuçlar ile gelen dalganın belli mesafelerde durma noktasına geldiğini deneysel olarak kanıtladıktan sonra, bu noktalarda elektrik alan şiddet arttırımını deneysel olarak merceğe altına aldık.



Şekil 2.25: (a) Sayısal ve (b) deneysel olarak elde edilmiş elektrik alan şiddet tayfları.

Elektrik alan şiddet arttırımını deneysel olarak gözlemlemek için verici anten, Şekil 2.26(a)'da gösterildiği gibi, yapı içerisine eğik olarak yerleştirildi. Ölçümler yapının girişine göre 9.25 cm ve 17.15 cm mesafelerde gerçekleştirildi. Bu mesafeler için elde edilen deneysel ve sayısal tayflar sırasıyla Şekil 2.26(b) ve 2.26(c)'de verilmiştir. Bu tayflardan görüleceği üzere, deneysel olarak elde edilen elektrik şiddet arttırımları 72-74 arasında değişirken, sayısal olarak elde edilen şiddet arttırımları 88-89 arasında değişmektedir. Oluşan bu farkları, üretim hatalarına, alıcı antenin doğrusal olmayan sezim verimliliğine, antenin bükülmesinden kaynaklanan ölçüm farkına atfetmekteyiz.



Şekil 2.26: (a) Elektrik alan şiddet arttırımı ölçümü için kullanılan deney düzeneğinin şematik çizimi. (b) 9.25 cm ve (c) 17.15 cm mesafelerde ölçülen ve sayısal olarak hesaplanan elektrik alan şiddetleri.

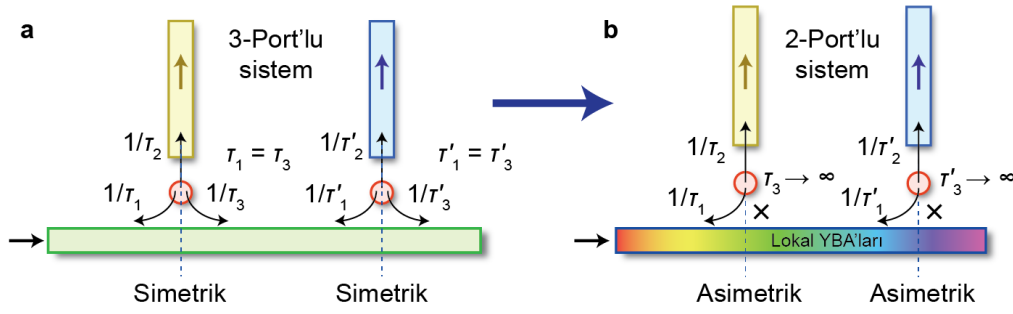
Özet olarak, deneyin ilk aşamasında dalga yerelleşmesi, ikinci aşamasında ise elektrik alan şiddet arttırımı gözlemlendi. Sonuçta, önerilen FK yapısında, gelen elektromanyetik alanın frekansına bağlı olarak belli mesafelerde grup hızının sıfıra yakınsadığını ve bu bölgelerde yerleştiğini deneysel olarak mikrodalga frekanslarında kanıtlamış olduk.

### 2.3 Üç Boyutlu Fotonik Kristallerde Yüksek Verimlilikle Işık Filtreleme

Nanofotonik yapılar arasında kusur tabanlı FK yapıların ışığın tuzaklanması için çok ideal ortamlar olduğu gösterilmiştir [39]. Kusursuz bir FK yapısından bir miktar malzeme çıkartarak veya FK yapısına bir miktar malzeme ekleyerek, FK yapısında eklenen veya çıkarılan bölgelerde fotonlar tuzaklanabilir [40]. Ek olarak seçici bir kuplaj mekanizması ile FK tabanlı dalgaboyu seçici aygıtlar tasarlanabilir. Bu bağlamda 2B FK tabanlı optik filtreler literatürde daha önce önerilmiştir [41-46]. Bu tarz filtrelerin performansı iki parametre tarafından karakterize edilebilir: iletim verimliliği ve kalite faktörü. İletim verimliliğini veya kalite faktörünü arttırmak için literatürde farklı öneriler getirilmiş olmasına rağmen, bu iki parametreyi aynı anda arttıracak bir çözüm şu ana kadar getirilememiştir.

2B FK tabanlı optik filtrelerinde karşılaşılan diğer bir problem, dikey yönde YBA eksikliğinden dolayı yayılma kayıpları meydana geliyor olmasıdır. Dikey yöndeki foton hapsedilmesi, tam iç yansıma mekanizmasına bağlı olduğu için FK için kullanılacak malzemenin oldukça yüksek kırıcılık indisine sahip olması gerekmektedir. Bu sorunu aşmanın bir çözümü 3B FK kullanmaktan geçmektedir. Bu bağlamda, 3B FK tabanlı optik filtreler daha önce literatürde önerilmiştir [47-50]. Ancak bu çözümler ya düşük iletim verimliliği ya da düşük kalite faktörü sorunundan muzdariptir.

Kusur tabanlı FK filtrelerinde yüksek verimliliği engelleyen faktörü anlamının yolu bu tarz yapılardaki rezonans koşullarını incelemekten geçmektedir. Şekil 2.27(a)'da görülebileceği üzere, geleneksel bir 3-port'lu sistemde, çıkış DK kusur merkezi etrafında simetriktir. Bu nedenle, kusur modu giriş DK'nun iki tarafına da eşit sönüm



Şekil 2.27: (a) Geleneksel bir kusur-tabanlı bir FK filtresinde, sistemin simetrisinden ötürü iletim verimliliği % 50'yi aşamamaktadır. (b) Filtre sistemine FK boyunca lokal YBA'ları ekleyerek simetri kırılabilir ve iletim verimliliği % 100'e ulaşabilir.

hızları ile sönümlenecektir. Ayrıca kritik kuplaj şartı, kusur modunun giriş ve çıkış DK'larına eşit sönümlenme hızları ile sönümlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple, giriş DK'nun tek bir tarafına olan sönümlenme hızı çıkış DK tarafına olan sönümlenme hızının iki katı olması gerekmektedir. Sonuç olarak, çıkış DK'nda ideal durumda %50 iletim verimliliği elde edilmiş olmaktadır. Bu sınırlama, iyi bilinen kuplanmış-mod kuramı ile de açıklanabilir [43,44,46]. Kuplanmış-mod, zaman-çevrimi simetrisi ve enerji korunumu kuramları kullanılarak 3-port'lu bir sistemde iletim verimliliği Eşitlik (2.3)'teki gibi elde edilebilir.

$$T(\omega) = \left| \frac{\sqrt{\frac{4}{\tau_1 \tau_2}}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3}} \right| \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3) incelenirse, maksimum iletim verimliliği (yukarıda da bahsedildiği üzere)  $\tau_1 = \tau_3 = 2\tau_2$  durumunda gerçekleşmektedir. Bu değerler ile iletim verimliliği %50'ye tekabül etmektedir.

Eğer giriş DK'un sağ tarafına olan sönümlenme ( $\tau_3$ ) bir şekilde iptal edilebilirse, kritik kuplaj şartı giriş DK'un sol tarafına olan sönümlenme hızının çıkış DK'na olan sönümlenme hızına eşit olmasını öngörülecektir. Böyle bir durumda, kusur modundan giriş DK'na iletilen dalga ile kaynaktan gele dalga birbirlerini sönümlendirecektir. Sonuçta bütün enerji çıkış DK'na yönlendirilmiş olacaktır. Analitik olarak iletim verimliliği Eşitlik (2.4)'deki formu alacaktır.

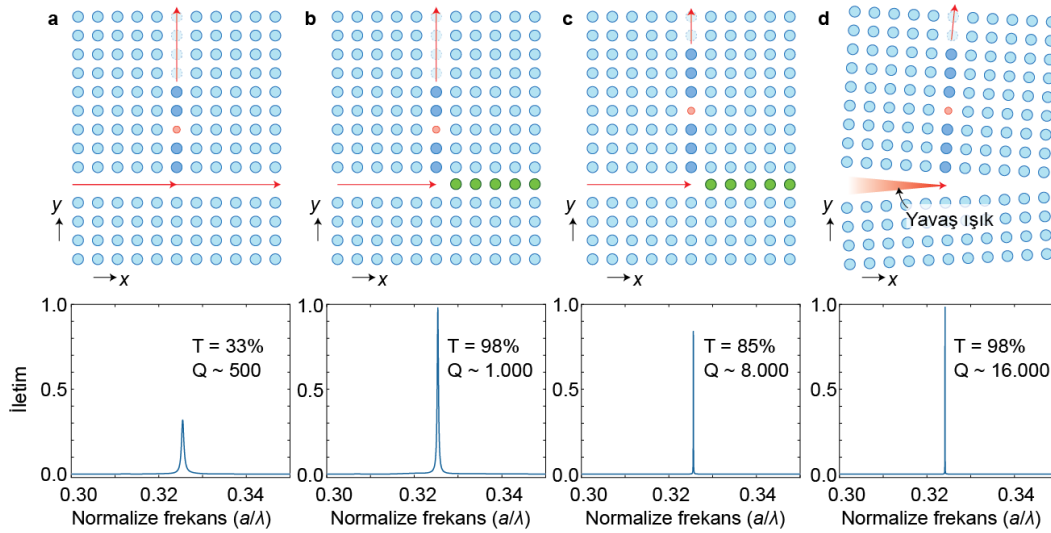


$$T(\omega) = \left| \frac{\sqrt{\frac{4}{\tau_1 \tau_2}}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}} \right| \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)'e göre  $\tau_1 = \tau_2$  durumunda %100 iletim verimliliği mümkün olabilmektedir. Bu durumu gerçeklemek için en basit çözüm giriş DK'nu kusur pozisyonunda sınırlandırmaktır. Ancak böyle bir durumda bütün çıkış kanalları aynı pozisyonda birikmiş olacağından sadece tek kanallı (veya çift kanallı, eğer DK'un alt bölgesi de kullanılabilir durumdaysa) bir filtre tasarlanmış olacaktır. Bu sebeple, Şekil 2.27(b)'deki gibi, her bir frekanstaki kusurun yalnızca o frekanstaki dalganın giriş DK'nun sağ tarafına sızamayacağı basit olmayan bir çözüme ihtiyaç vardır.

### 2.3.1 Tasarım Ana Fikri

Yukarıda bahsedilen konuya bir çözüm bulabilmek adına Şekil 2.28'de verilen tasarım adımları izlenebilir [51,52]. Daha önce de bahsedildiği üzere, Şekil 2.28(a)'daki gibi bir geleneksel bir 3-port'lu filtre sisteminde yapısal simetriden ötürü iletim verimliliği %50'yi aşamamaktadır. Bu sorunu aşmak için Şekil 2.28(b)'deki gibi kusur merkez düzleminin sağ tarafı sınırlandırılabilir. Diğer taraftan, Şekil 2.28(c)'deki gibi, kusurun etrafında birim hücre sayısı artırılarak çıkış tayfının kalite faktörü artırılabilir. Ancak böyle bir durumda, kusur modundan giriş ve çıkış DK'larına olan kuplaj verimliliği azalacağından, sistemin iletim verimliliği düşecektir. Bu sorunu aşmak için Şekil 2.28(d)'deki gibi bir çözüm öneriyoruz. Önerimiz, giriş DK'yi yavaş ışık destekleyecek şekilde tasarlayıp gelen ışığın kusur merkez düzlemine sıfır grup hızı ile ulaşmasını sağlamayı kapsamaktadır. Bu sayede kusur modu giriş DK'nun sağ tarafına sızamayacağı için iletim verimliliği %100'e ulaşabilecektir. Ayrıca, yavaş ışık etkisinden ötürü giriş DK'nda ilerleyen dalga dış FK ortamına daha fazla sızma gerçekleştirebileceğinden kusur ile DK arasındaki etkileşim artacaktır. Bunun sonucunda iletim verimliliğinin artmasını beklemekteyiz. Ayrıca kusuru çevreleyen birim hücre sayısının da artmasından dolayı böyle bir sistemde yüksek kalite faktörü de elde edilmesi beklenir. Ek olarak, her bir frekanın yerel YBA farklı bir konumda olduğundan, giriş DK boyunca birden fazla kusur ve çıkış DK yerleştirilebilir.

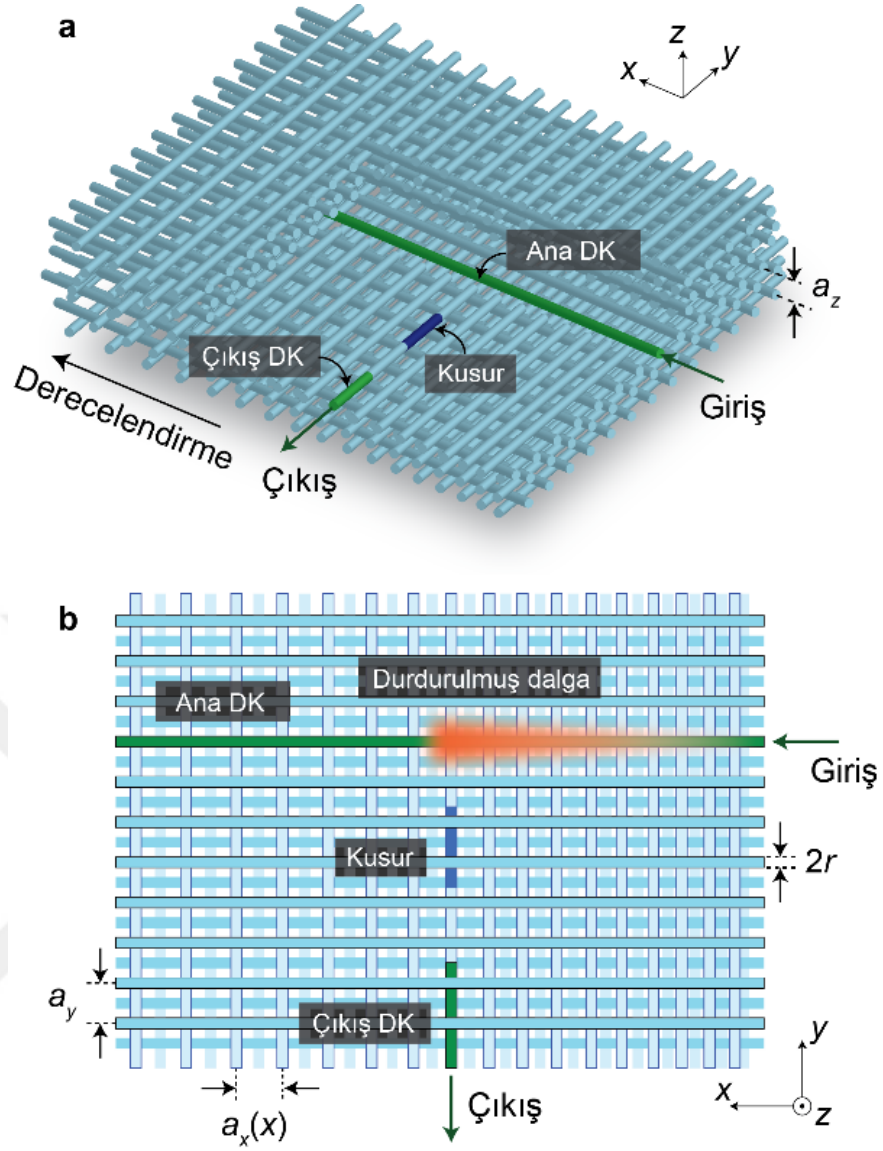


Şekil 2.28: (a) Geleneksel bir kusur-tabanlı FK filtresi verilmiştir. (b) Bir yansıma geribeslemesi ile iletim verimliliği % 100'e yaklaşabilir. (c) Kusur ile DK arasındaki mesafe artırılarak, filtrenin kalite faktörü artırılabilir. (d) Önerilen kurulum.

### 2.3.2 Tasarımın sayısal gerçekleştirilmesi

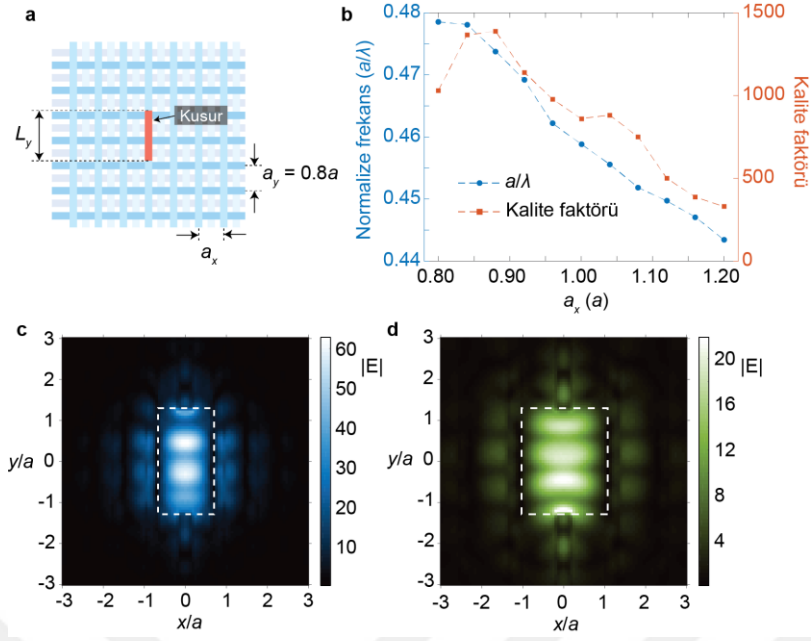
Yukarıda bahsedilen öneriyi gerçekleştirmek adına, Şekil 2.29'deki gibi bir 3B FK yapısı modelliyoruz. FK yarıçapı  $r = 0.177a$  ve yüksekliği  $h = 15.20a$  olan  $Al_2O_3$  çubuklarından oluşmaktadır. Yapının  $y$  yönündeki periyodu ( $a_y$ )  $0.80a$ 'dır, diğer taraftan  $x$  yönündeki periyot ( $a_x$ )  $1.20a$ 'dan  $0.80a$ 'ya doğrusal biçimde azalmaktadır.  $z$  yönündeki katman periyodu ( $a_z$ ) ise  $1.41a$ 'ya karşılık gelmektedir. FK yapısı toplamda  $x$  yönünde 10 periyottan,  $y$  yönünde 18 periyottan ve  $z$  yönünde 24 katmandan oluşmaktadır.

Yapı içerisinde bir DK oluşturmak için  $x$  yönünde bir çubuk çıkarılmıştır. Bir kusur oluşturmak için ise  $y$  yönünde çubuğun bir kısmı çıkarılmıştır. Kusurun uzunluğu  $2.5a$ 'ya sabitlenmiştir. Son olarak çıkış DK'nu oluşturmak için kusuru barındıran çubuğun bir kısmı ek olarak çıkarılmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere, kusur DK yerleşmesinin gerçekleştiği noktaya yerleştirilmelidir. Ancak  $x$  yönündeki derecelendirmenin hem kusur rezonans frekansını hem de DK yerleşme frekansını etkileyeceğinden, hem kusur frekansının hem de DK yerleşme frekansının aynı değer aldığı yerel periyot değeri bulunmalıdır. Bunun için bir sonraki bölümde, kusur rezonans frekansının ve DK yerleşme frekansının yapının  $x$  yönündeki periyoduna bağlılığını inceleyeceğiz.



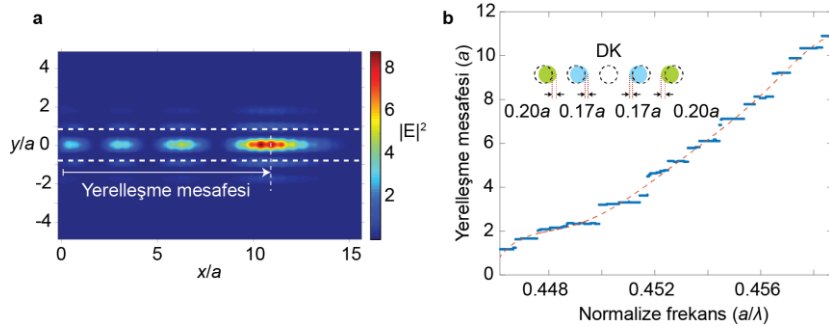
Şekil 2.29: Önerilen yavaş ışık tabanlı optik filtre sisteminin (a) şematik çizimini ve (b)  $xy$ - kesitsel şematik görüntüsü verilmiştir.

Şekil 2.30'da kusur rezonans frekansının yapının  $x$  yönündeki periyoduna bağlılığı özetlenmiştir. Şekil 2.30(a)'da kusur yapısının şematik çizimi verilmiş, ve Şekil 2.30(b)'de rezonans frekansının ve kalite faktörünün periyoda göre değişimi verilmiştir. Bu şekle göre, hem rezonans frekansı hem de kalite faktörü artan periyot ile birlikte genel olarak azalmaktadır. Şekil 2.30(c) ve Şekil (d)'de ise iki farklı periyot için elektrik alan dağılımları verilmiştir. Bu şekilden gördüğümüz üzere, fotonlar yüksek oranda kusur bölgesinde tuzaklanmaktadır.



Şekil 2.30: (a) 3B FK bünyesinde bir kusur oluşturarak, ışın bu bölgede hapsolmesi sağlanabilir. (b) FK'in enine periyoduna bağlı olarak rezonans frekansı ve kalite faktörü değişimi. (c)  $a_x = 0.8a$  ve (d)  $a_x = 1.2a$  için kusur bölgesinde oluşan elektrik alan dağılımları verilmiştir.

Diğer taraftan, DK yerelleşme frekansının yapının  $x$  yönündeki periyoduna bağlılığı Şekil 2.31'de özetlenmiştir. Burada Şekil 2.31(a)'da yerelleşen modun elektrik alan şiddet dağılımı görülebilir. İlk analizler, kusur rezonans frekansı ile DK yerelleşme frekansının birbiri ile örtüşmediğini gösterdi. Bu sebeple, DK'na komşu olan çubuklar  $0.06a$  kadar bir mesafe ile birbirlerine yaklaştırıldı. Şekil 2.31(b)'de yerelleşme frekansının periyoda göre değişimi verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere, artan periyot ile birlikte (periyot yerelleşme mesafesi ile artmaktadır) DK yerelleşme frekansı artmaktadır.



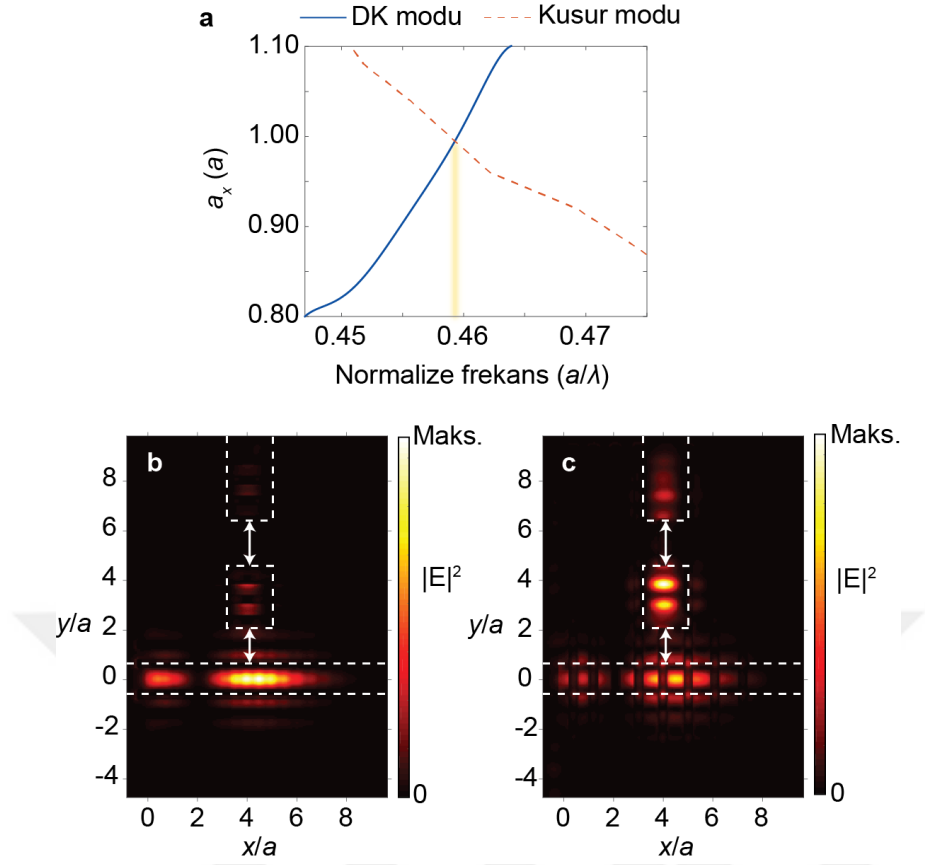
Şekil 2.31: (a) FK'in enine periyodu derecelendirilerek, DK içerisinde yerelleme meydana getirilebilir. (b) Yerelleşme mesafesinin frekansa göre değişimi verilmiştir.

Şekil 2.32(a) kusur rezonans frekansı ile DK yerleşme frekansını periyoda bağlı olarak vermektedir. Bu şekilden anlayacağımız üzere,  $a/\lambda = 0.450$  normalize frekansında hem kusur hem de DK aynı yerel periyoda sahip olmaktadır. Bu sebeple kusur, bu yerel periyodun bulunduğu bölgeye (yapının başında itibaren 5. periyot) yerleştirildi.

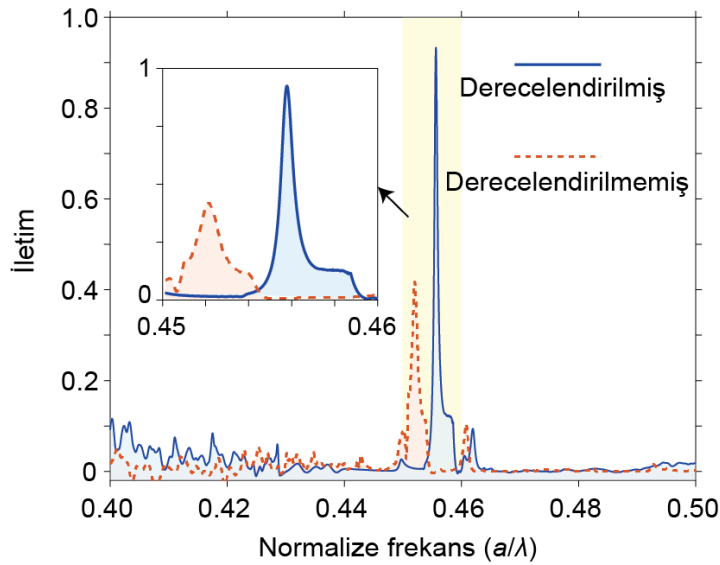
Giriş/çıkış DK'ları ile kusur modu arasındaki en iyi etkileşimi sağlayan mesafelerin 2.10a (kusur ile giriş DK arası) ve 1.90a (kusur ile çıkış DK arası) olduğu bulunmuştur. Şekil 2.32(b) ve 2.32(c) hesaplanan elektrik alan dağılımlarını sırasıyla DK ve kusur yüksekliğinde vermektedir (3B FK'in doğasından ötürü DK ve kusur aynı yükseklikte değildirler ve ardışık katmanlarda yer almaktadırlar). Bu şekiller DK ile kusur arasındaki etkileşimi kanıtlamaktadır.

Son olarak Şekil 2.33, derecelendirilmiş ve derecelendirmemiş durumdaki FK için iletim tayflarını göstermektedir. Derecelendirilmemiş FK, kusurun yerleştirildiği bölgedeki periyota sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.33 incelendiğinde, derecelendirilmiş FK için hem iletim verimliliğinin hem de kalite faktörünün, derecelendirmemiş duruma göre yüksek olduğu görülebilir. Daha önce de belirtildiği üzere, bu artışların nedeni olarak, hızı azalan ışığın kusur bölgesi ile daha kolay etkileşimde bulunması ve yerel YBA'dan dolayı kusur modundan giriş DK'nun sağ tarafına herhangi bir sızıntı olmaması gösterilebilir.

Bu bölümde, 3B bir FK'de kusur ve DK modu arasındaki etkileşimin nasıl arttırılabileceği üzerinde durduk. Önerilen yapıya yalnızca tek bir kusur eklenmiş olmasına rağmen, kusur sayısı (dolayısıyla filtrelenen frekans sayısı) isteğe bağlı olarak arttırılabilir. Bunu yapmak için, kusurun boyutu değiştirilerek, Şekil 2.30 ve 2.31'de sunulan analizlerin tekrarı yapılmalıdır. Bu analizlerin ardında, DK ve kusur modunun aynı frekansta ortak sahip olduğu periyot bulunmalıdır. Burada önerilen yapı verimli ve çok-renkli kızılötesi algılamada kullanılabilir.



Şekil 2.32: (a) Enine periyottaki değişim, kusurun rezonans frekansını ve DK yerleşme frekansını zıt yölerde etkilemektedir.  $a/\lambda = 0.456$  normalize frekansı için verilen elektrik alan şiddeti dağılımı (b) DK ile ve (c) kusur ile aynı  $z$ - yüksekliğinde verilmiştir.



Şekil 2.33: Derecelendirilmiş ve derecelendirilmemiş FK filtreleri için elde edilmiş iletim tayfları.

## 2.4 İki Boyutlu Hermitian-Olmayan Ortamlarda Işığın Yerelleştirilmesi

Işığın hareketini ve yönünü kontrol altına almak pek çok araştırmaya konu olmuştur. Bunlar arasında, dönüşüm optiği [53,54], Hermitian olmayan optik [55-57] ve düz-yüzey optiği [58,59] ışığın kontrolünü doğrudan sağlayan önde gelen alanlardır. Düz-yüzey optiği bu kontrolü uygun bir şekilde yapılandırılmış dalgaboyu-altı elemanlar ile elde ederken, dönüşüm optiği ve Hermitian olmayan optik, ortamın optik özellikleri ile dalğanın hareketi arasında yakın bir ilişki kurar. Bu bölümde, ışığın hareketi ile ortamın optiksel özellikleri arasındaki bağı güçlendirmek için, "yönlü alanlar" adlı yeni bir konsept öneriyoruz. Bu yeni yöntem, kontrol kaynağını dinamik olarak şekillendirmek ve dalğanın üzerinde hakimiyet sağlamak için güçlü bir mekanizma sunmaktadır. Bu yeni yöntem dalga dinamikleri alanında çok zengin ve yenilikçi uygulamaları yol açabilir.

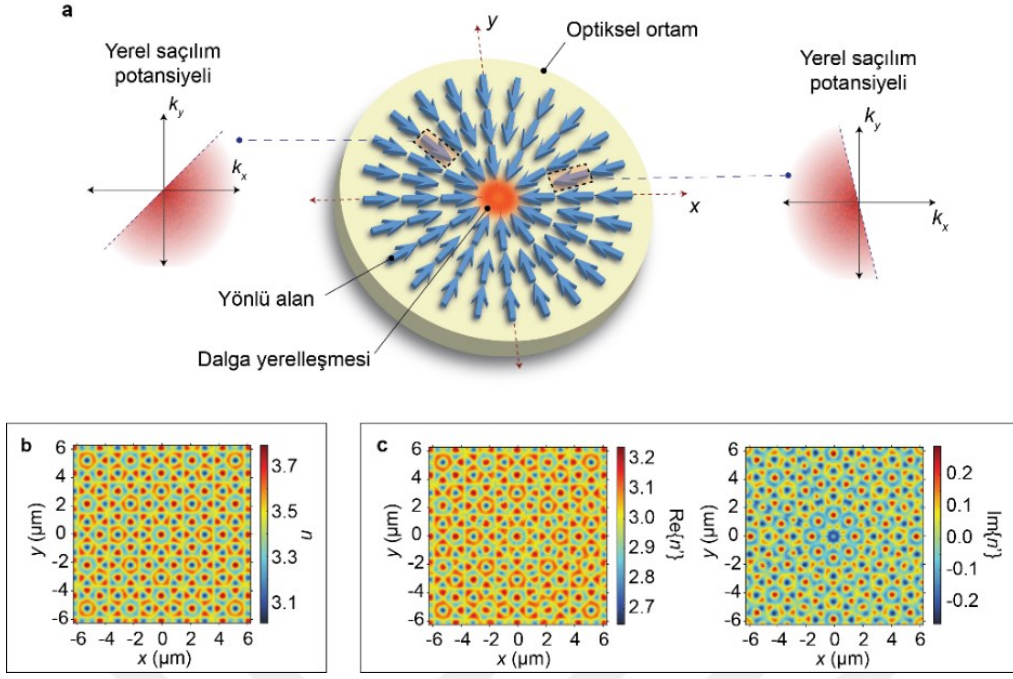
### 2.4.1 Tasarım ana fikri

Bu bölümde önerilen ana fikir Şekil 2.34'te özetlenmiştir. Şekil 2.34(a)'dan görüleceği üzere, optik ortam boyunca yerel bir Hilbert dönüşümü uygulayarak, varolan bir potansiyel modifiye edilmiştir [60]. Elde edilen potansiyel hem gerçel hem de sanal bir kırıcılık barındıran bir Hermitian olmayan potansiyeldir.

Şekil 2.34(b)'de kırıcılık indisinin gerçel kısmı verilmişken, Şekil 2.34(c) modifiye edilmiş kırıcılık indisinin gerçel ve sanal kısımları verilmiştir. Burada uygulanan yönlü alan, Eşitlik (2.5)'de verilen formdadır.

$$\vec{p}(\vec{r}) = -\vec{r}/|\vec{r}| \quad (2.5)$$

Şekil 2.34(a)'da da görüleceği üzere, bu formda bir yönlü alan merkezde yerleşme meydana getirebilir. Şekil 2.34'den çıkarılabilecek diğer bir sonuç, sanal kısımdaki kipleme ile gerçel kısımdaki kiplemenin aynı oranda olmasıdır. Bu durum Hilbert dönüşünün doğrudan bir sonucudur.



Şekil 2.34: (a) Optiksel ortamın saçılım potansiyeli yerel olarak değiştirilerek, dalganın belli bir bölgede yoğunlaşması sağlanabilir. (b) Referans ortamın kırıcılık indisi dağılımı. (c) Elde edilen ortamın kırıcılık indisinin gerçel ve sanal kısımlarının dağılımları.

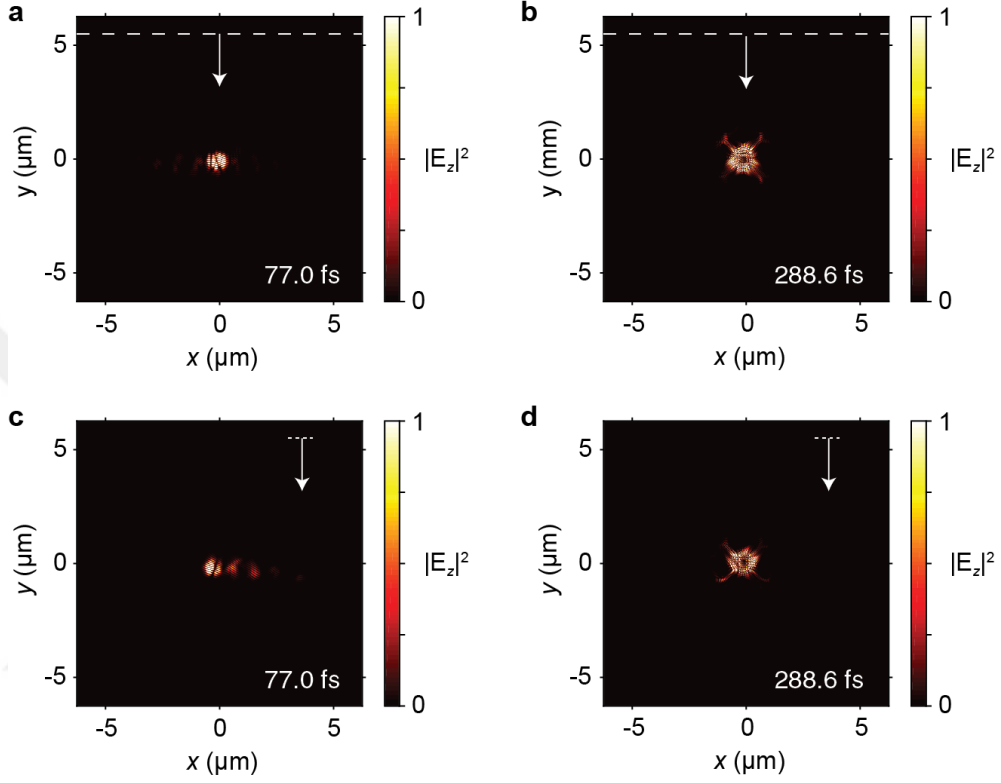
#### 2.4.2 Sayısal analiz ve sonuçlar

Modifiye edilmiş optik potansiyeli elde edildikten sonra, elde edilen ortam bir kaynak tarafından uyarılmıştır ve ortamdaki elektrik alan dağılımları gözlemlenmiştir. Şekil 2.35 toplu olarak farklı zaman noktalarında ve farklı bel uzunluklu Gaussian kaynaklar için elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Bu şekiller bize yerleşme için iki ayrı mekanizmanın var olduğunu göstermektedir. Şekil 2.35(a) ve 2.35(c)'de gele ışık alan yönelimi nedeniyle yerleşmektedir. Diğer taraftan, Şekil 2.35(b) ve 2.35(d) yönelim-sonrası bir yerleşmenin belirtisini göstermektedir.

Önerilen yönlü alanlar konseptinin diğer bir avantajı, elde edilen potansiyelin tümüyle kayıplı ortam ile oluşturulabilmesidir. Diğer bir deyişle, kazanç ortamına ihtiyaç duymadan yalnızca soğurucu malzemeler ile önerilen konsept gerçekleştirilebilir.

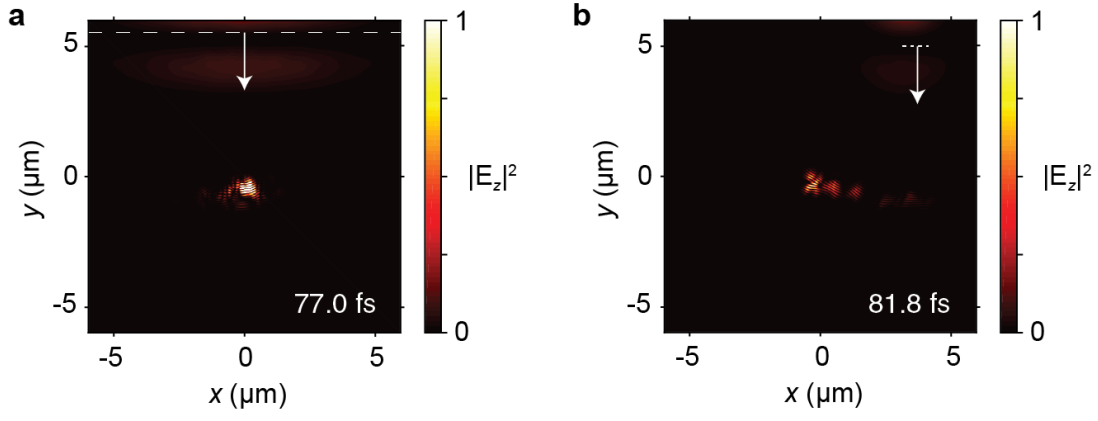


Şekil 2.34(c)'de verilen modifiye edilmiş ortamı kazanç ortamından arındırmak için kırıcılık indis dağılımına, ortamdaki en küçük sanal indisinin mutlak değeri kadar bir sanal indisten oluşan bir "offset" ekliyoruz. Bu sayede indis dağılımında negatif bölgede bir sanal indis kalmayacağından ortam yalnızca soğurucu malzemeler ile gerçekleştirilebilir hale gelecektir.



Şekil 2.35: (a) 77.0 fs ve (b) 288.6 fs anlarında alınmış anlık elektrik alan şiddeti dağılımları gösterilmiştir. Benzer şekilde, 1 μm bel uzunluklu bir Gaussian kaynak için (c) 77.0 fs ve (d) 288.6 fs anlarında alınmış anlık elektrik alan şiddeti dağılımları verilmiştir.

Şekil 2.36 yukarıda anlatılan yöntem ile edilmiş saf kayıplı ortamdaki dalga hareketini farklı bel uzunluklu Gaussian kaynaklar için göstermektedir. Bu şekiller bize, gelen dalganın şeklinden bağımsız olarak, önerilen yönlü alanlar konsepti doğrultusunda belirlenen bölgede yerleşebildiğini göstermektedir. Bu durum bize aynı zamanda önerilen konseptin saf kayıplı ortamda da geçerli olduğunu göstermektedir. Bu durumun nedeni eklenen sabit sanal kısmın Fourier dönüşümün (FD) bir dürtü fonksiyonuna tekabül etmesi ve bu sebeple modifiye edilmiş saçılım potansiyelini bozulmaya uğratmamasıdır.



Şekil 2.36: Saf kayıplı olarak tasarlanmış ortamda (a) 77.0 fs (5  $\mu\text{m}$  bel uzunluklu bir Gaussian kaynak ile) ve (b) 81.8 fs (1  $\mu\text{m}$  bel uzunluklu bir Gaussian kaynak ile) anlarında alınmış anlık elektrik alan şiddeti dağılımları gösterilmiştir.

### 3. SEZİM VERİMLİLİĞİ ARTTIRIMI İÇİN ÖNERİLEN GÖRÜNMEZLİK YÖNTEMLERİ

#### 3.1 Hermitian-Olmayan Optik Tabanlı İsteğe Bağlı Görünmezlik

Bu bölümde, belli yönlerde ve belli frekanslarda saçılmayı azaltan gerçekleştirilebilir bir görünmezlik tekniği öneriyoruz. Bu tekniğe "isteğe bağlı görünmezlik" adını veriyoruz. Bu bağlamda, tasarlanacak nesnenin karmaşık kırıcılık indis dağılımının elde edilmesini sağlayan genelleştirilmiş bir Hilbert dönüşümü öneriyoruz. Önerilen fikri, ZASF yöntemi ile sayısal olarak doğruluyoruz. Ayrıca, tasarlanacak nesneyi kazanç ortamlarından arındırmak amacıyla yinelemeli bir yöntem sunuyoruz. Sunulacak yöntem, yalnızca karmaşık indis dağılımlarına sahip yeni ortamlar tasarlamayı mümkün kalmıyor, aynı zamanda Hermitian ve Hermitian-olmayan optik alanları arasında yeni bir bağlantı sağlıyor.

Hermitian-olmayan optik tabanlı görünmezlik teknikleri daha önce literatürde önerilmiştir [55,56,61,62]. Bu yöntemlerde görünmezlik nesnenin yalnızca bir tarafından elde edilebiliyor iken nesnenin diğer tarafı halen görünür durumdadır. Bu özellik karmaşık olarak kiplenmiş potansiyeller ile mümkün olabilmektedir. Optiksel olarak bakıldığında bu karmaşık potansiyeller, dengeli bir şekilde yerleştirilmiş kazanç ve kayıp ortamları kapsamaktadır.

Daha yakın zamanda, tek taraflı görünmezlik Kramers-Kronig (KK) bağıntılarını sağlayan Hermitian-olmayan optik ortamlar ile ilişkilendirilmiştir [57]. Zaman alanında nedensellik ilkesine benzer şekilde, uzamsal alanda da KK bağıntıları "geçmişe dönük" bir görünmezlik sağlayabileceği gösterilmiştir. Uzamsal alanda KK bağıntıları Eşitlik (2.6) ve (2.7)'de verilmiştir.

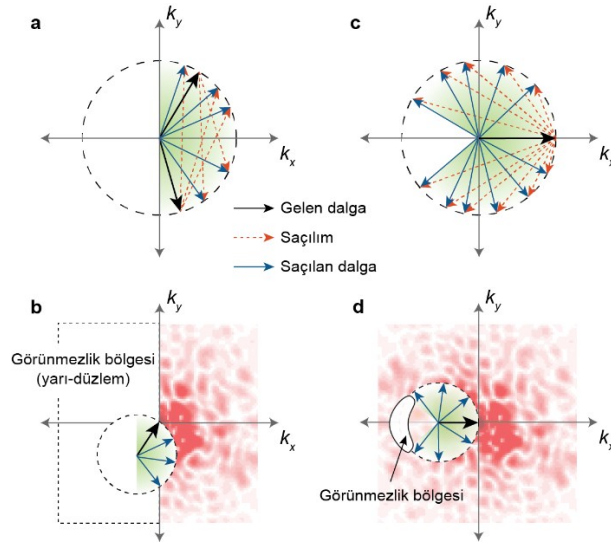
$$\chi_{\text{im}}(x, y) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\chi_{\text{re}}(x_1, y)}{(x-x_1)} dx_1 \quad (2.6)$$

$$\chi_{re}(x, y) = \frac{-1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\chi_{im}(x_1, y)}{(x-x_1)} dx_1 \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.6) ve (2.7)'de verilen eşitlikleri sağlayan potansiyeller soldan sağa uyarıldığında saçılma yaratmazlar. Bu durum Şekil 3.1(a) ve 3.1(b)'de özetlenmiştir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere, bütün saçılımlar  $k_x < 0$  durumunda geliş dalgasından çözülmüş olmaktadır.

### 3.1.1 Tasarım ana fikri

Bu bölümde isteğe bağlı görünmezlik adıyla yeni bir konsept öneriyoruz [58]. Bu bağlamda, nesnenin ilk ve modifiye edilmiş elektriksel hassasiyet dağılımlarını ilişkilendiren bir integral bağıntısı öneriyoruz. Şekil 3.1(c) ve 3.1(d)'de özetlendiği şekilde, yalnızca belli yönlerde ve belli frekanslarda görünmezlik sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem ile belirlenen yönlerde ve frekanslarda görünmez olan nesnelere tasarlanabilir veya varolan bir nesne görünmez olması için modifiye edilebilir. Önerilen yöntem ile, uzamsal KK bağıntılarının beraberinde getirdiği sanal kısımdaki yüksek kipleme oranını azaltmayı hedeflemekteyiz. Ayrıca, uzamsal KK bağıntılarında yavaş yakınsamanın neden olduğu sonsuz boyuttaki nesne sorununu çözmeyi amaçlamaktayız. Son olarak uzamsal KK bağıntılarındaki nesnelere 2B ve 3B olarak tasarlanması zorluğunun önerilen yöntem ile aşılabileceğini gösteriyoruz.



Şekil 3.1: (a) Yarı düzlemdeki tüm dalga vektörü bileşenleri filtrelenirse, (b) tam tekyönlü görünmezlik elde edilir. (c) Dalga vektörü bileşenlerinin kısmı olarak filtrelenmesi ile (d) isteğe-bağlı görünmezlik elde edilebilir.

Öncelikle, Eşitlik (2.8)'de verilen optik potansiyelin yerel kiplenişinden doğan saçılmayı göz önüne alalım.

$$\chi_{re}(x, y) = \chi_{arkaplan} + a(x, y) \quad (2.8)$$

Potansiyelin birinci dereceden form etkeni, Eşitlik (2.9)'de verildiği üzere optik potansiyelin FD'si ile eşdeğerdir.

$$A(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int A(x, y) \exp(ik_x x + ik_y y) dx dy \quad (2.9)$$

$k_0$  dalga vektörüne sahip düzlem dalgalar, optik potansiyelin bünyesindeki  $k$  dalgavektörleri ile kipleme uğrayarak, Eşitlik (2.10)'da gösterildiği gibi yeni bir  $k_1$  dalga vektörüne sahip olur.

$$\vec{k}_1 = \vec{k} + \vec{k}_0 \quad (2.10)$$

Bu nedenle, Şekil 3.1(c) ve 3.1(d)'de gösterildiği üzere, belli bir frekans ve açı aralığı için saçılımın önlenmesi, o bölgedeki  $k$  dalgavektörlerinin filtrelenmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu işlem Eşitlik (2.11)'de gösterilmiştir.

$$A_1(k_x, k_y) = A(k_x, k_y) - A(k_x, k_y) \ominus(k_x, k_y) \quad (2.11)$$

Eşitlik (2.11) evrik alandan uzamsal alana taşınırsa, Fourier alanındaki alan uzamsal alanda evrişime dönüşeceğiinde, Eşitlik (2.12)'deki ifade edilir.

$$A_1(x, y) = A(x, y) - \frac{1}{2\pi} \iint A(x_1, y_1) \ominus(x - x_1, y - y_1) dx_1 dy_1 \quad (2.12)$$

Bu durumda görünmez potansiyeli elde edebilmek için, belirlenen görünmezlik alanının uzamsal alandaki dönüşümü bulunup Eşitlik (2.12)'deki evrişim hesaplanmalıdır.

Özel olarak Eşitlik (2.13)'de verilen durumda  $k_x < 0$  için bütün dalgavektörleri filtrelenmiş olacağından, sonuç olarak uzamsal alanda KK bağıntıları elde edilmiş olacaktır. Bu bağlamda, Eşitlik (2.12)'de verilen ifade ile uzamsal KK bağıntılarını genelleştirmiş bulunmaktayız.

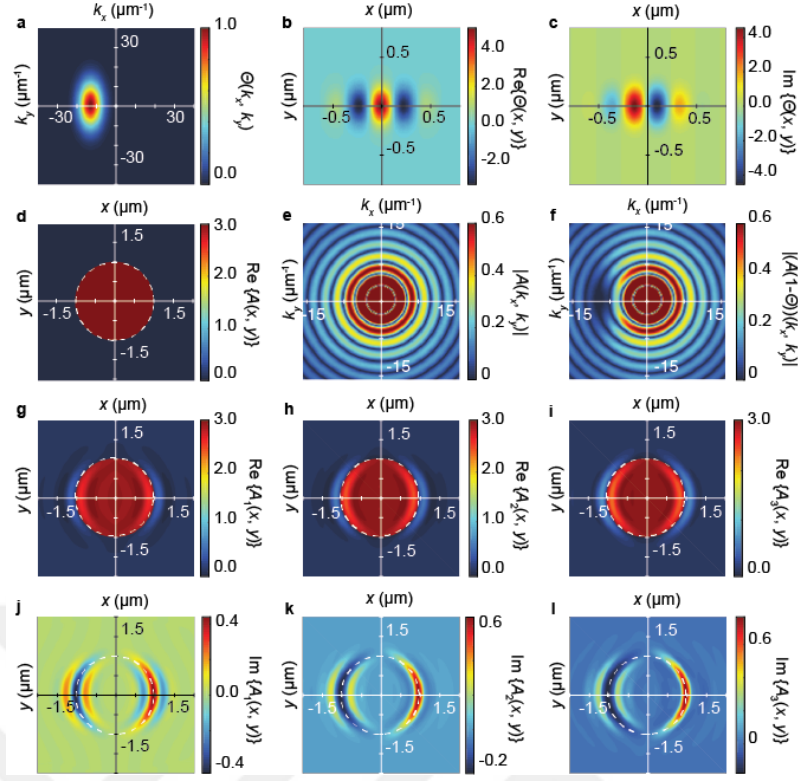
$$\Theta(k_x, k_y) = 0 \rightarrow \Theta(x, y) = \frac{-i}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.13)$$

### 3.1.2 Sayısal analizler ve sonuçlar

Önerilen konsepti doğrulamak için Şekil 3.2(a)'da gösterilen görünmezlik alanı ile prosedüre başlamaktayız. Şekil 3.2(b) ve 3.2(c) sırasıyla görünmezlik alanının uzamsal alandaki dağılımının gerçel ve sanal kısımlarını vermektedir. Diğer taraftan Şekil 3.2(d), referans nesnenin elektriksel hassasiyet dağılımını göstermektedir. Şekil 3.2(e) nesnenin evrik alandaki görüntüsünü verirken, Şekil 3.2(f) nesnenin Eşitlik (2.12) uygulandıktan sonraki evrik alandaki görüntüsünü vermektedir. Bu şekilden görüleceği üzere, evrik alanda görünmezlik istenen frekans ve açı aralığında bir filtreleme meydana gelmektedir.

Elde edilen nesnenin elektriksel hassasiyetinin gerçel ve sanal kısımları sırasıyla Eşitlik 3.2(g) ve 3.2(j)'de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, nesnenin hem kazanç hem de kayıplı malzemelerinden oluştuğu görülebilir. Çoğu optik uygulamalarında kazanç ortamı beraberinde zorluklar getirmektedir. Bu nedenle, elde edilen nesnenin kazanç ortamından arındırılması istenebilir. Bunu gerçekleştirmek için yinelemeli bir yöntem öneriyoruz. Bu yöntemde, Eşitlik (2.12) uygulandıktan sonra negatif değere sahip elektriksel hassasiyetlerin değerlerini sıfıra eşitliyoruz ve Eşitlik (2.12)'yi tekrar uyguluyoruz. Bu işlem yeteri kadar tekrar edildiği takdirde, potansiyeldeki kazanç ortamları en aza inmektedir. Örnek olarak Şekil 3.2(h) ve 3.2(k) ilk iterasyon sonrası gerçel ve sanal elektriksel hassasiyeti gösterirken, Şekil 3.2(i) ve 3.2(l) ikinci iterasyon sonrası gerçel ve sanal elektriksel hassasiyeti göstermektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere, her bir iterasyon sonrası kazanç ortamı önemli ölçüde azalmaktadır.

Önerilen yöntemi sayısal olarak doğrulamak için, ZASF benzetimleri kullanılmıştır. Özlülük adına burada sonuçları yalnızca TM polarizasyon için sunuyoruz ancak yöntem aynı zamanda TE polarizasyon için de geçerlidir. Nesne, belli bir uzaklığa yerleştirilmiş bir nokta kaynak tarafından belli açılarda uyarılmıştır. Uyarım açısı y eksenini ile saat yönünde yapılan açı olarak tanımlanmıştır.

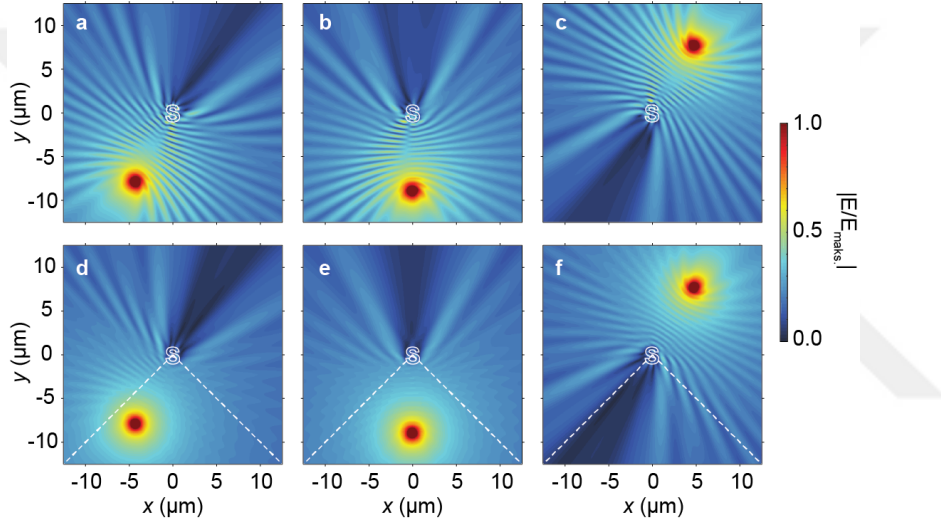


Şekil 3.2: (a-l) Önerilen görünmezlik yönteminin tasarım aşamaları verilmiştir. Verilen dağılımların karşılık geldiği değişkenler şekillerin sağında verilmiştir.

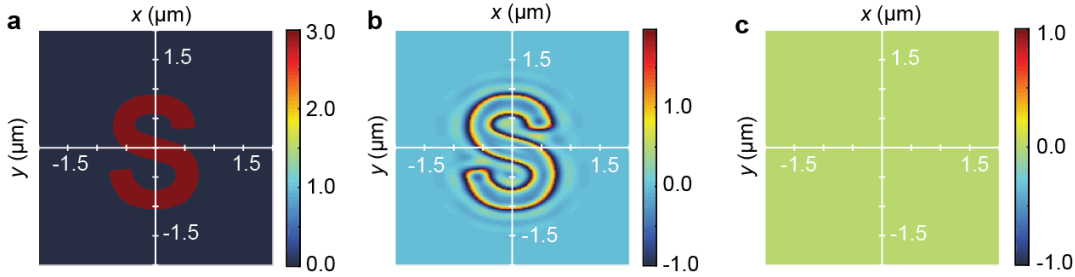
Şekil 3.3(a), 3.3(b) ve 3.3(c) başlangıç nesnesi için elektrik alan dağılımlarını farklı uyarım açıları için vermektedir. Burada uyarım açısı, dikey eksen ile saat yönünde yapılan açı olarak tanımlanmıştır. Nesnenin yarattığı saçılmayı bu şekillerdeki girişim desenlerinden anlayabiliriz. Nesne daha sonra  $(k_x, k_y)=(0, -20.0)\mu\text{m}^{-1}$  merkezli ve  $k_x$  ve  $k_y$  yönlerinde standart sapması  $7.0 \mu\text{m}^{-1}$  olan bir görünmezlik alanı ile kısmi görünmez hale getirilmiştir. Kullanılan toplam iterasyon sayısı 15'tir. Elde edilen kısmi görünmez nesnenin elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.3(d), 3.3(e) ve 3.3(f)'de verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere, kaynak tanımlanan görünmezlik açı aralığı içerisinde iken girişim desenleri kaybolmaktadır. Bu durum, elde edilen kısmi-görünmez nesnenin görünmezlik açı aralığında beklendiği gibi saçılımın ortadan kaldırıldığını göstermektedir.

Önerilen yöntemin bir diğer ilginç özelliği, görünmezlik bölgesinin orijine göre simetrik olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Böyle bir durumda görünmezlik bölgesinin FD'si tümüyle gerçel olacağından, son durumda elde edilen nesnede herhangi bir kazanç ve kayıp ortamı bulunmayacaktır. Bu özelliği örneklemek için

Şekil 3.4(a)'da verilen nesne ile başlıyoruz. Bu nesneye  $(k_x, k_y)=(0, \pm 11.4)\mu\text{m}^{-1}$  merkezlerinde yer alan ve  $k_x$  ve  $k_y$  yönlerinde standart sapması  $6.0\mu\text{m}^{-1}$  olan bir Gaussian görünmezlik bölgesi uyguluyoruz. Elde edilen elektriksel hassasiyetin gerçel ve sanal kısımları sırasıyla Şekil 3.4(b) ve 3.4(c)'de verilmiştir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, elde edilen nesne yalnızca gerçel bir kısımdan oluşmaktadır ve ne kazanç ne de kayıp ortamı barındırmaktadır. Şekil 3.5 referans ve elde edilen nesne için ZASF sonuçlarını göstermektedir. Bu şekil bize gösteriyor ki, beklendiği gibi kısmi görünmez nesnenin belirtilen açı aralığında saçılması engelleniyor. Diğer taraftan belirtilen açı aralığı dışında oluşan girişim deseninden anlaşılacağı üzere, kısmi görünmez nesne halen saçılıma neden olmaktadır.



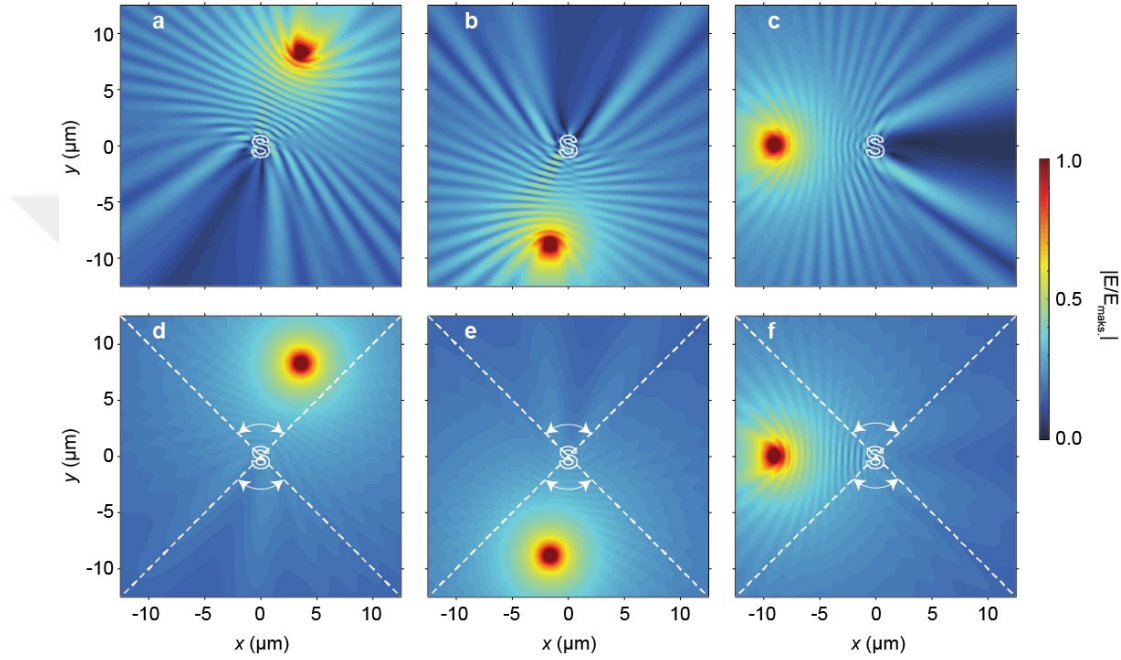
Şekil 3.3: Referans nesne için (a)  $208^\circ$  (b)  $180^\circ$  (c)  $32^\circ$  derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları. Benzer şekilde, kısmi görünmez nesne için (a)  $208^\circ$  (b)  $180^\circ$  (c)  $32^\circ$  derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları verilmiştir.



Şekil 3.4: (a) Referans nesnenin elektriksel hassasiyet dağılımı. Simetrik görünmezlik bölgeleri için elde edilen elektriksel hassasiyet dağılımının (b) gerçel ve (c) sanal kısımları.

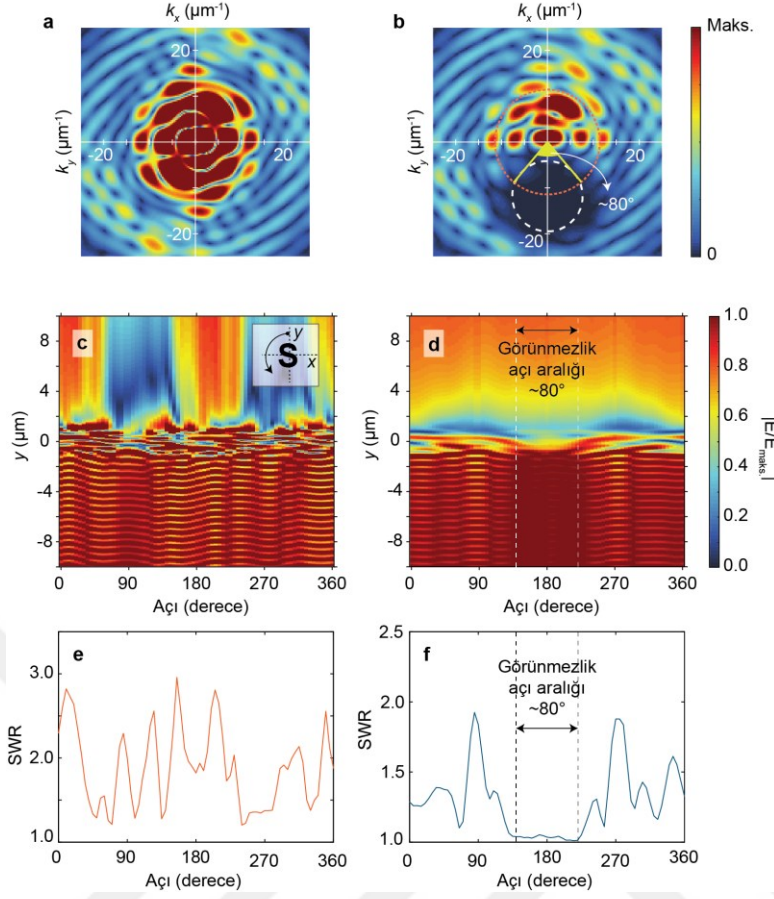


Saçılımın belirtilen açı aralığında azaldığını nicel olarak kanıtlamak için Şekil 3.6'de sunulan analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizde Şekil 3.6(a) referans saçılım potansiyelini, Şekil 3.6(b) ise elde edilen kısmı-görünmez saçılım potansiyelini vermektedir. Uygulanan görünmezlik bölgesi  $(k_x, k_y)=(0, -11.4)\mu\text{m}^{-1}$  merkezinde yer alan ve  $k_x$  ve  $k_y$  yönlerinde standart sapması  $6.0\mu\text{m}^{-1}$  olan bir Gaussian şeklindedir. Şekil 3.6(b)'den  $1.1 \mu\text{m}$  çalışma dalgaboyu için görünmezlik açı aralığının yaklaşık olarak  $80^\circ$  olduğu görülebilir (sarı kesikli çizgiler ile gösterilmiştir).



Şekil 3.5: Referans nesne için (a)  $24^\circ$  (b)  $190^\circ$  (c)  $270^\circ$  derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları. Benzer şekilde, kısmı görünmez nesne için (a)  $24^\circ$  (b)  $190^\circ$  (c)  $270^\circ$  derecelerde nokta kaynak ile uyarılmış elektrik alan dağılımları verilmiştir.

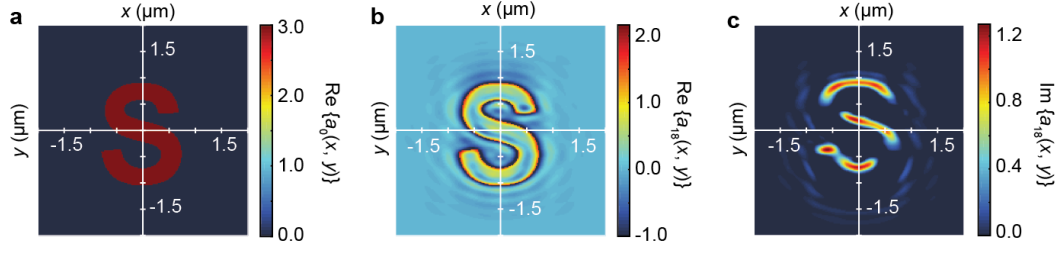
Şekil 3.6(c) ve 3.6(d)'de sırasıyla referans ve kısmı-görünmez nesne için ZASF sonuçları verilmiştir. Verilen sonuçlar, elektrik alanın uyarım yönündeki kesitinin uyarım açısına bağlılığını özetlemektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde, girişim deseninin kaybolduğu açı aralığının tahmin edilen görünmezlik açısı ile uyumlu olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca, Şekil 3.6(e) ve Şekil 3.6(f)'de sırasıyla referans ve kısmı-görünmez nesne için elde edilen SWR değerleri özetlenmiştir. Görünmezlik bölgesinde elde edilen ortalama SWR değerleri referans ve kısmı-görünmez nesne için 2.16 ve 1.03'tür. Bu durum bize beklediği gibi kısmı-görünmez nesne için belirtilen açı aralığında saçılımının azaldığını göstermektedir.



Şekil 3.6: (a) Referans ve (b) kısmi görünmez nesne saçılım potansiyeli. (c) Referans ve (d) kısmi görünmez nesne için farklı uyarım açılarında hesaplanmış kesitsel elektrik alan dağılımları. (e) Referans ve (f) kısmi görünmez nesne için elde edilmiş SWR değerleri.

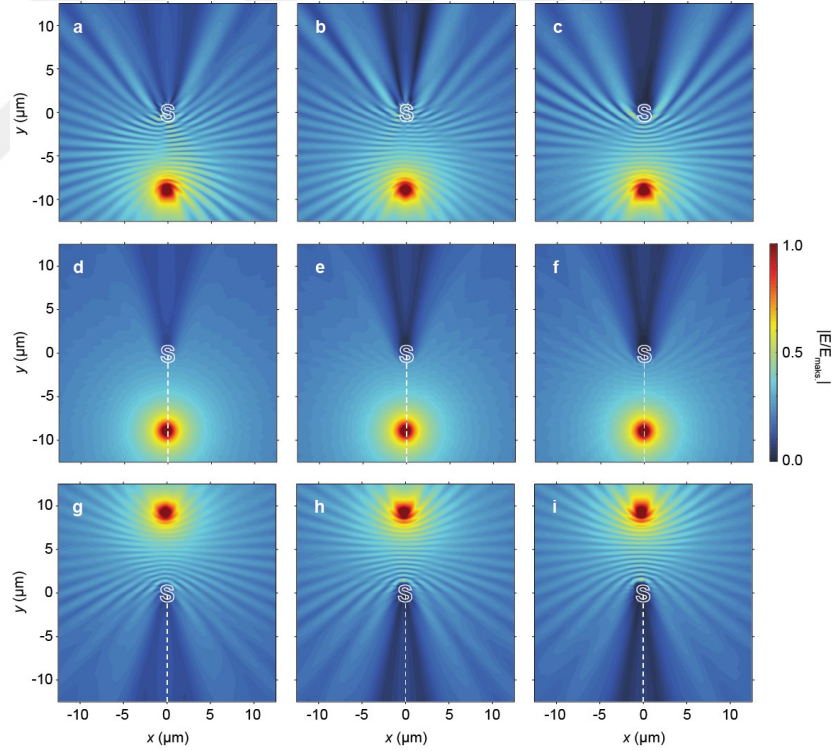
Bir sonraki aşamada tümüyle görünmezlik için bir örnek veriyoruz. Şekil 3.7(a)'da gösterilen nesne ile başlıyoruz. Bu nesneye merkezleri  $(k_x, k_y)=(0, -5.5)\mu\text{m}^{-1}$  ve  $(0, -13.5)\mu\text{m}^{-1}$  ve yarıçapları  $5.5\mu\text{m}^{-1}$ ,  $13.5\mu\text{m}^{-1}$  olan iki tane dairenin arasındaki kalan hilal şeklindeki alanı görünmezlik bölgesi olarak uyguluyoruz. Hilal şeklinde bir görünmezlik alanı seçmemizin nedeni, bütün birinci dereceden saçılımların bu alan içerisinde yer almasıdır. Bu sayede bütün birinci dereceden saçılımlar engellenmiş olacaktır. Burada verilen örnekleminin bir diğer özelliği, birinci dereceden saçılımların tamamen kaybolması bütün yüksek dereceli saçılımların da kaybolmasına neden olmasıdır. Bu durumu anlamak için Eşitlik (2.14)'de verilen saçılım serilerini inceleyebiliriz.

$$e_s^{(n)}(k) = \frac{-k_0^2 G(k)}{2\pi} \int A(k - k') \tilde{e}_s^{(n-1)}(k') dk' \quad (2.14)$$



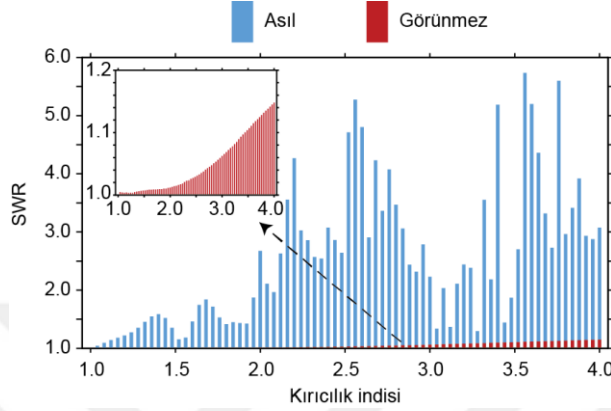
Şekil 3.7: (a) Referans nesne elektriksel hassasiyet dağılımı. Simetrik görünmezlik bölgeleri için elde edilen elektriksel hassasiyet dağılımının (b) gerçel ve (c) sanal kısımları.

Eşitlik (2.14) incelenirse,  $e_s^{(1)}$  tamamen ortadan kaldırıldığında, diğer bir deyişle değeri sıfırlandığında, bütün yüksek dereceli saçılımlar da beraberinde sıfırlanmış olacaktır. Şekil 3.8, Şekil 3.7’de verilen referans ve tümüyle görünmez nesnenin ZASF benzetim sonuçları görülebilir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere, tümüyle görünmez nesne oldukça yüksek kırıcılık indisleri için bile görünmezliğini korumaktadır (yukarıda bahsedilen nedenden ötürü).



Şekil 3.8: (a) 2.0, (b) 3.0 ve (c) 4.0 başlangıç indislerine sahip referans nesne için elektrik alan dağılımları. Benzer şekilde (d,g) 2.0, (e,h) 3.0 ve (f,i) 4.0 başlangıç indislerine sahip görünmez nesne için, (d-f) görünmezliğin aktif olduğu yönde ve (g-i) görünmezliğin aktif olmadığı yönde, elektrik alan dağılımları verilmiştir.

Tümüyle görünmez nesnenin görünmezliğini nicel olarak gözlemlemek adına, kaynak ile nesne arasında oluşan girişim deseninin SWR değerleri başlangıç kırıcılık indisine bağlı olarak hesaplanmış ve elde edilen sonuç Şekil 3.9'da verilmiştir. Bu sonuçtan da görüleceği üzere, SWR değerleri görünmez nesne için geniş bir kırıcılık indisi aralığında düşük değerlerde kalmaktadır.



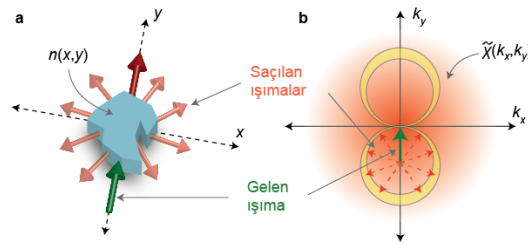
Şekil 3.9: Görünmezliğin aktif olduğu yönde aktif olmadığı durumlarda elde edilen SWR değerleri.

### 3.2 Kendiliğinden-Görünmez Dielektrik Nesnelere

Kendiliğinden-görünmez nesnelere veya potansiyeller uzamsal KK bağıntıları kullanılarak daha önce literatürde önerilmiştir [57, 64-66]. Bu tarz nesnelere veya potansiyeller halihazırda görünmez oldukları için özellikle "görünmez sensörler" [10-16,67,68] gibi uygulamalar için biçilmiş birer kaftandır. Ancak önerilen bu yöntemlerin bazı dezavantajları mevcuttur. Öncelikle kendiliğinden-görünmez olan potansiyeller zorunlu olarak karmaşık olması gerektiğinden, bu potansiyelleri gerçekleştirmek için kayıp ve kazanç ortamları gerekmektedir. Bu durum bunların deneysel analizlerini zorlaştırmaktadır. Diğer bir dezavantaj ise elde edilen potansiyellerin belirli bir şekile sahip olmaması ve sonsuz bir uzama sahip olmalarıdır. Bu durum bu potansiyellerin kullanım alanlarını önemli ölçüde daraltmaktadır. Belirli bir şekle ve boyuta sahip kendiliğinden-görünmez nesnelere tasarlamak adına koruge edilmiş metal teller önerilmiştir [69]. Ancak önerilen bu metal tellerde görünmezlik metalin rezonant doğasından kaynaklandığından, elde edilen görünmezlik çok bir dar bir bantgenişliğe sahiptir. Sonuç olarak, genişbant kendiliğinden-görünmez nesnelere halen keşfedilmeye açıktır.

### 3.2.1 Tasarım ana fikri

Bu bölümde kendiliğinden-görünmez tasarlamaaya yarayan benzersiz bir yöntem önerilecektir [70,71]. Bu yöntem ile, görünmez nesnelerin elektriksel hassasiyet dağılımının elde edilebileceğini ve elde edilen nesnelerin yalnızca eşyönlü dielektrik malzemelerden oluşturulabileceği gösterilecektir. Önerilen konsept daha sonra mikrodalga frekanslarında deneysel olarak gerçekleştirilmesi sunulacaktır. Önerilen yöntem, herhangi bir nesnenin saçılım özelliklerinin o nesnenin saçılım potansiyeline (nesne manyetik bileşenler içermediği durumda elektriksel hassasiyet dağılımına) bağlı olması prensibine dayanır. Bir önceki bölümde bu prensipten yararlanılarak nesnelerin görünürlüklerini isteğe bağlı nasıl tasarlanacağı üzerinde durulmuştu. Bu bölümde kendiliğinden-görünmezlik elde edebilmek için, tüm yönlerdeki saçılımların azaltılması gerekmektedir. Şekil 3.10'da gösterildiği üzere bu tarz bir saçılım engelleme, saçılım potansiyelinden hilal şeklinde bir alanın filtrelenmesi ile mümkün olabilmektedir. Buradaki yöntemin bir özelliği, birbirlerine simetrik hilal şeklinde iki alan kullanılması durumunda, elde edilecek elektriksel hassasiyet değerleri tamamen gerçel olacaktır. Diğer bir deyişle, kazanç veya kayıp ortamlarına ihtiyaç duyulmayacaktır. Bu durum, bu tarz yapıların deneysel gerçekleştirilmesini önemli ölçüde kolaylaştıracaktır. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta, önerilen yöntem Born-yaklaşımı tabanlı olmasına rağmen, yöntemin yüksek kırıcılık indisleri için de çalışması beklenmektedir. Bu durumun nedeni, bir önceki bölümde de anlatıldığı üzere, birinci dereceden saçılımların tümüyle engellenmesinin aynı zamanda yüksek dereceli saçılımların da ortaya çıkmasını engellemesidir. Diğer bir neden olarak, görünmezlikten dolayı dalga vektörünün değişime uğramaması ve sonuçta Şekil 3.10'da verilen alanların pozisyonlarının değişmemesi gösterilebilir.



Şekil 3.10: (a) Herhangi bir şekle ve boyuta sahip bir nesnenin (b) saçılım potansiyeli modifiye edilerek, o nesnenin kendiliğinden görünmez olması sağlanabilir.

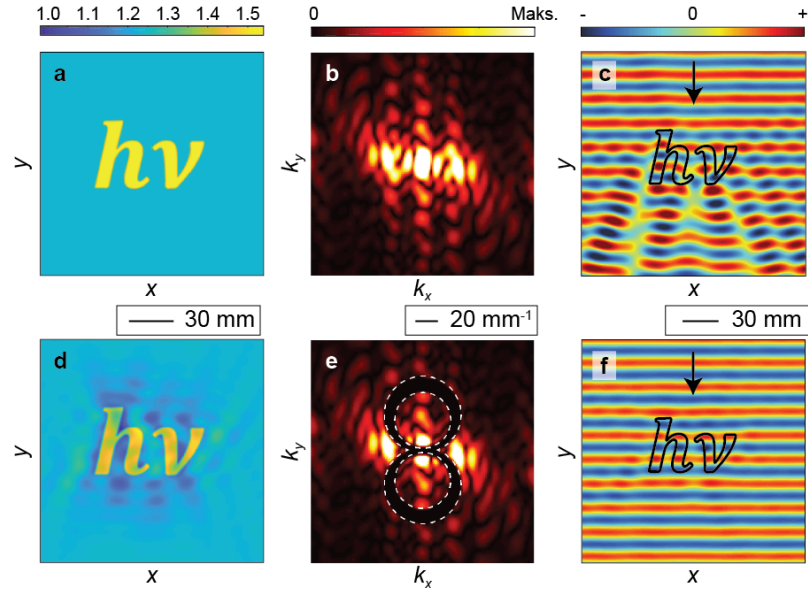
### 3.2.2 Sayısal analizler ve sonuçlar

Yukarıda açıklanan yöntemi örneklemek adına Şekil 3.11(a)'da verilen nesne referans alınarak yöntemin gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Şekil 3.11(b)'de bu nesnenin elektriksel hassasiyet dağılımı, diğer bir deyişle saçılım potansiyeli, verilmiştir. Diğer taraftan verilen nesnenin ZASF benzetim sonucu Şekil 3.11(c)'de verilmiştir. Bu sonuçtan görüleceği üzere, nesne gelen dalgayı saçılmaya uğratarak dalga önyüzünün bozulmasına neden olmaktadır. Bu saçılımları engellemek adına, Şekil 3.11(c)'de verilen saçılım potansiyeli, merkezleri  $(0, \pm 2.60) \text{ cm}^{-1}$  ve  $(0, \pm 3.10) \text{ cm}^{-1}$  ve yarıçapları  $2.50 \text{ cm}^{-1}$  ve  $3.20 \text{ cm}^{-1}$  olan iç içe dairelerin oluşturduğu hilal şeklindeki alan ile filtrelenmiştir. Elde edilen nesnenin kırıcılık indisi dağılımı Şekil 3.11(d)'de, elde edilen saçılım potansiyeli ise Şekil 3.11(e)'de verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta filtrelenen hilal şeklindeki alanlarının saçılım potansiyelinin merkezinde göreceli olarak büyük bir kalınlığa sahip olmalarıdır. Bunun nedeni, ileri saçılan dalgaların daha verimli bir şekilde filtrelenmesini sağlamaktadır. Filtrelenen alanın büyüklüğü, daha sonra sunulacak deneysel analizde kullanılan malzeme ile uyumlu olacak şekilde seçilmiştir. Filtreleme sonucu elde edilecek görünmezliğin kuramsal olarak 10.5 GHz ve 12.9 GHz arasında olmasını beklemekteyiz.

Elde edilen kendiliğinden-görünmez nesnenin ZASF benzetim sonucu Şekil 3.11(f)'de verilmiştir. Bu şekilden, gelen dalganın saçılımı neredeyse mükemmel bir şekilde ortadan kaldırıldığı ve dalga önyüzünün herhangi bir bozulmaya uğramadığı görülebilir. Şekil 3.11'de dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, birin altında bir kırıcılık indisini engellemek adına, dağılıma belli bir indis ofseti eklenmiştir [72-76]. Dolayısı ile nesne serbest uzaydan ziyade belli bir indise sahip bir ortam içerisinde yer almaktadır.

### 3.2.3 Yöntemin deneysel gerçekleştirilmesi

Önerilen yöntemi deneysel olarak, Şekil 3.12(a)'da gösterildiği üzere, gerçekleştirmek adına, Şekil 3.11'de verilen yapılar 2.4 mm kalınlığında Pleksiglas malzemesi ile üretilmiştir. Pleksiglas malzemesinin kırıcılık indisinin 1.59 olduğu daha önceki deneysel analizler ile bulunmuştur. Üretilen yapılar Şekil 3.12(b)'de verilmiştir.



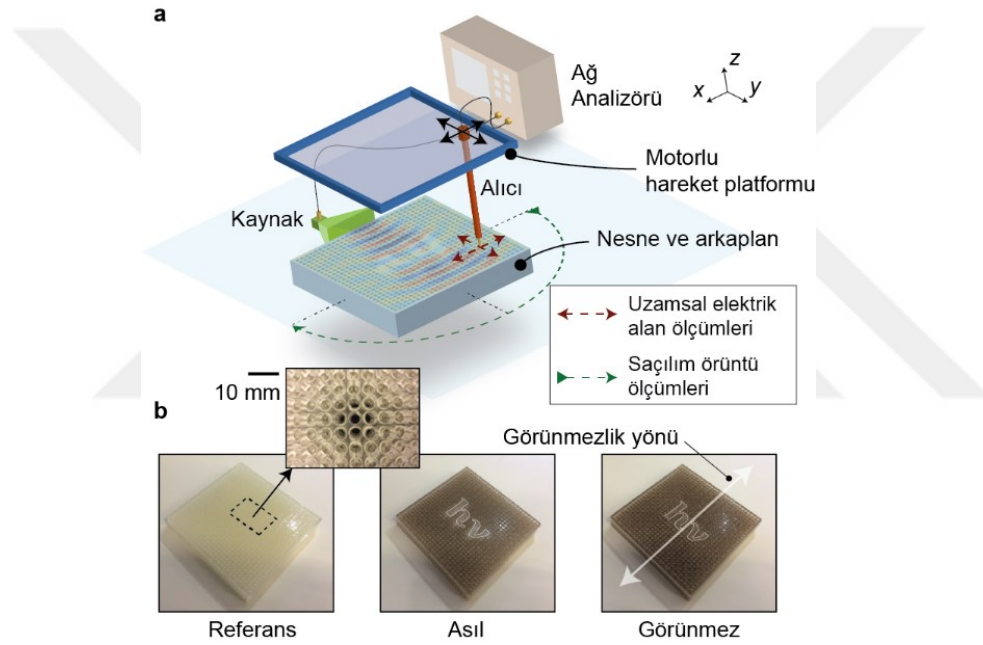
Şekil 3.11: Asıl nesnenin (a) kırıcılık indis dağılımı, (b) saçılım potansiyeli ve (c) kararlı hal elektrik alan dağılımı. Benzer şekilde, kendiliğinden görünmez nesnenin (d) kırıcılık indis dağılımı, (e) saçılım potansiyeli ve (f) kararlı hal elektrik alan dağılımı verilmiştir.

Yapıların derecelendirilmiş indisleri, yarıçapları değişen delikler vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, Pleksiglas malzemesinin delik yarıçapına bağlı olarak etkin kırıcılık indis analizi yapılmıştır. Elde edilen analiz ile deliklerin pozisyonu ve yarıçaplarının tayini mümkün olmuştur. Şekil 3.11’de verilen yapılara ek olarak, bu yapılarda kullanılan arkaplan kırıcılık indisine sahip bir yapı daha üretilmiştir. Bu üretilen yapıdan hareketle, gelen dalganın nesnesiz ortamda hareketinin incelenmesi amaçlanacaktır.

Kullanılan deneysel düzenek, Şekil 3.12(a)’da görülebileceği üzere, bir ağ analizör, bir alıcı ve averci anten ve bir motorlu hareket platformundan oluşmaktadır. Hareket platformunu  $xy$  düzleminde hareket ettirerek, bu düzlemdeki kararlı hal elektrik alan dağılımı elde edilebilir. Buradan hareketle, 12.0 GHz frekansında, Şekil 3.13’te

verilen elektrik alan dağılımları ölçülmüştür. Şekil 3.13’te ilk satır deneysel sonuçları verirken ikinci satır aynı senaryodaki sayısal sonuçları vermektedir. Bu şekiller incelenirse, görünmez nesne için elde edilen elektrik alan dağılımının referans yapıda elde edilen alan dağılımına benzediği görülebilir. Ayrıca asıl nesne için elde edilen alan dağılımında saçılımlar ve dalga önyüzü bozulmaları görülebilir. Bu sonuçlarda görülebilecek bir ilginç durum, yöntemin aslında düzlem dalga için uygulanmış

olmasına rağmen, elde edilen nesne küresel bir dalga için de görünmezlik gösterebilmektedir. Bu durumun nedeni olarak, Şekil 3.11’de verilen hilal şeklindeki dalga vektörü alanlarının belli bir açı ile eğildiklerinde yine de filtrelenen alanlar içerisinde yer alması sayılabilir. Şekil 3.13 incelenirse elde edilen sonuçların mükemmel olmadığı görülebilir. Bu durumu, üretimde kullandığımız ayrıklaştırma yöntemine bağlıyoruz. Ayrıklaştırma yönteminde örgü sabiti 5 mm olarak alınmıştır. Bu durumda 12 GHz için örgü sabiti dalga boyunun beşte birine tekabül etmektedir. Burdan çıkardığımız sonuç, sonuçların iyileştirilmesi için daha düşük örgü sabiti destekleyen üretim tekniklerinin kullanılması gerektiridir. Ancak yine de elde edilen sonuçlar, yöntemin kullanılan örgü sabitinde geçerli olduğunu göstermektedir.

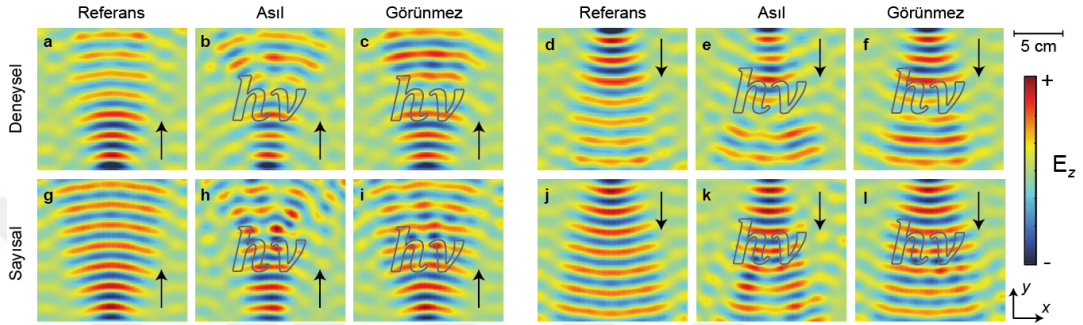


Şekil 3.12: (a) Kendiliğinden görünmez nesnenin deneysel ölçümleri için kullanılan deney düzeneğini şematik çizimi verilmiştir. (b) Üretilen yapıların fotoğraflık görüntüleri verilmiştir.

Şekil 3.13’ten çıkarılabilecek diğer bir sonuç, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında kısmen de olsa belli bir farkın bulunmasıdır. Bu farkın sebepleri arasında, alıcı anten ile yapı içerisinde hareket eden elektromanyetik dalganın etkileşimi sayılabilir. Zira alıcı anten yapı içerisinde hareket eden elektromanyetik dalganın uç kısımları ile etkileşimi girdiğinden, yapı boyunca kırıcılık indisinin arttığı bölümlerde elektromanyetik dalganın uç kısmının genliği azalacağından burada sezilen dalganın genliği de düşük olacaktır.



Elde edilen nesnenin saçılım özelliklerini sayısal olarak çözümlmek için, yapıların açılal saçılım örgüleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 3.12(a)'da gösterildiği üzere, yapının merkezinden 135 mm mesafede elektriksel alan şiddeti dairesel olarak ölçüldü. Yalnızca nesneden kaynaklı saçılımları dikkate almak için, ölçülen alan şiddetleri, referans yapıda ölçülen alan şiddetlerinden çıkarıldı ve sonucun mutlak değeri alındı. Ayrıca, sonuçlar yapı olmadan elde edilen elektrik alan şiddet tayfı ile normalize edilmiştir.

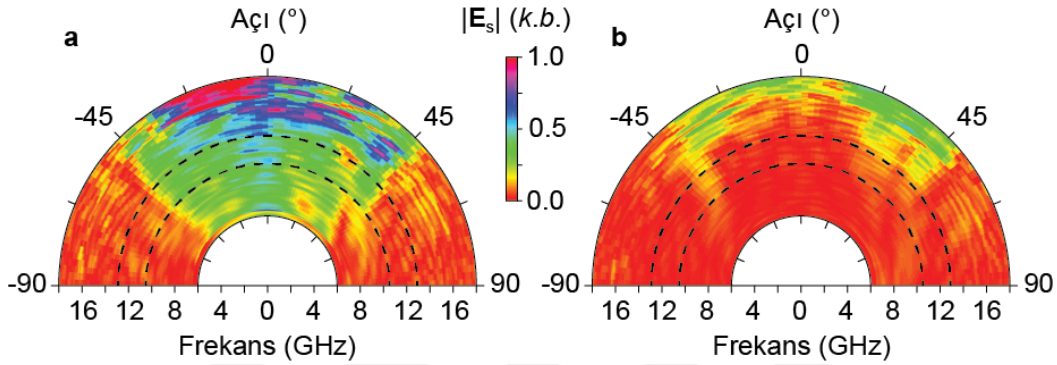


Şekil 3.13: Deneysel ölçümler: (a) Referans, (b) asıl ve (c) gizlenmiş nesnelere için  $+y$  yönünde dalga hareketi. (d) Referans, (e) asıl ve (f) gizlenmiş nesnelere için  $-y$  yönünde dalga hareketi. Sayısal hesaplamalar: (g) Referans, (h) asıl ve (i) gizlenmiş nesnelere için  $+y$  yönünde dalga hareketi. (j) Referans, (k) asıl ve (l) gizlenmiş nesnelere için  $-y$  yönünde dalga hareketi.

Şekil 3.14,  $+y$  dalga hareket yönü için elde edilen açılal saçılım örgülerini göstermektedir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere, saçılım şiddeti belirlenen frekans aralığında (siyah kesikli çizgiler ile gösterilmiştir) önemli ölçüde azalmaktadır. Sonuçların mükemmel olmayışı, üretim hatalarına ve anten ile dalga arasındaki etkileşime bağlanmıştır. Bu sonuçlardan yapılabilecek bir diğer çıkarım, saçılım şiddetinin tasarlanan frekans aralığının dışında daha düşük frekanslarda da azalmış olmasıdır. Bu durumun nedeni olarak filtrelenen dalga vektörü alanlarının aynı zamanda düşük frekanslar için ileri saçılma bileşenlerini de içermesi sayılabilir. Diğer bir deyişle, düşük frekanslar için sabit dalga vektörü çemberinin filtreleme alanı ile teğetsel örtüşmesi yüksek frekanslar için sabit dalga vektörü çemberinin filtreleme alanı ile teğetsel örtüşmesinden yüksek olması nedeniyle, düşük frekanslar için saçılımlar büyük ölçüde engellenmiş olmaktadır. Ayrıca, yüksek frekanslar için sabit dalga vektörü çemberinin filtreleme alanı ile kısmen de olması nedeniyle bu frekanslarda da saçılım azalması meydana gelmektedir. Bu durum özellikle önerilen

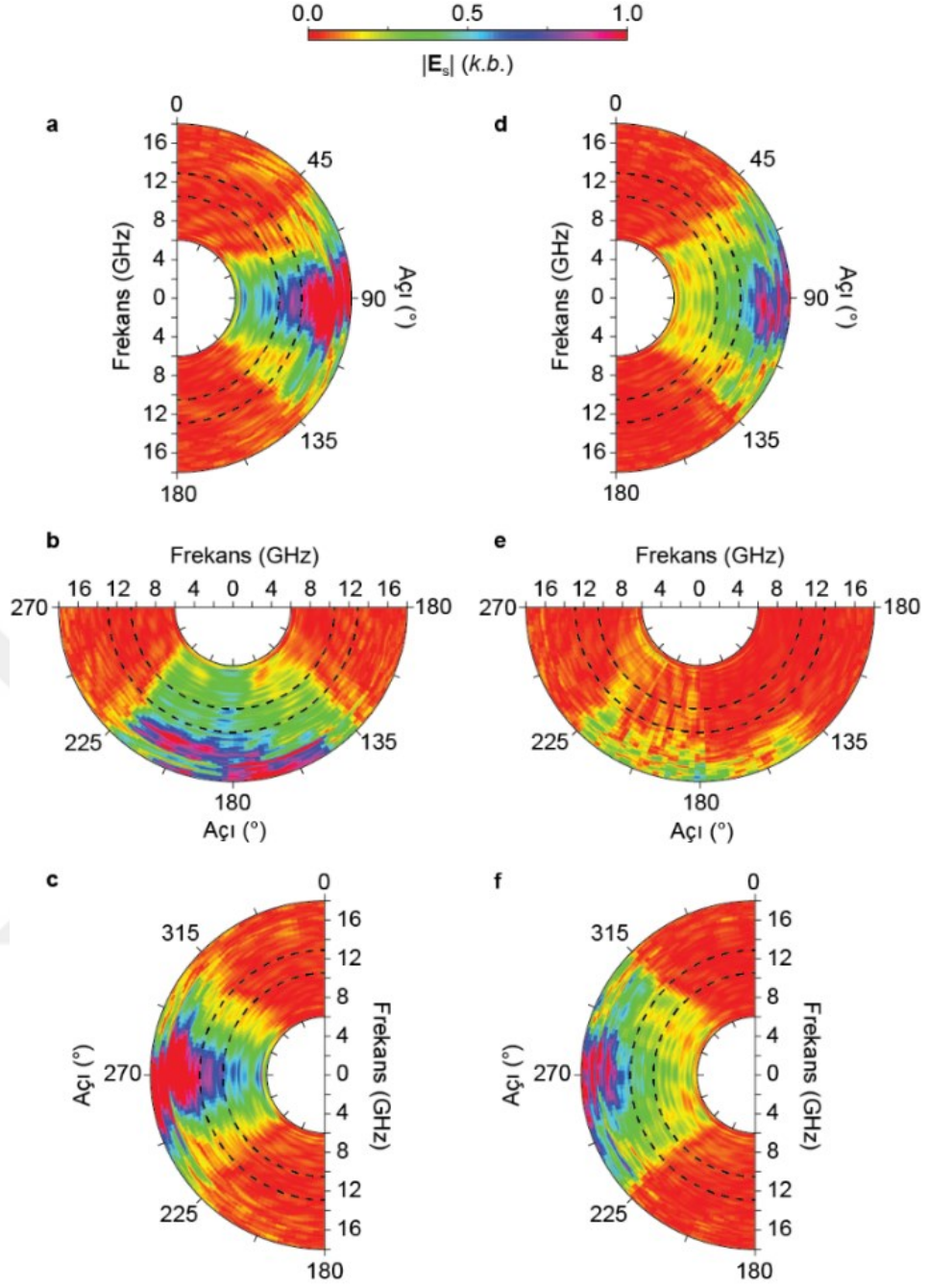
yöntemi, saçılımın frekans aralığı dışında arttığı [77,78] geleneksel görünmezlik tekniklerinden farklı kılmaktadır.

Şekil 3.15’te diğer yönler için açısız saçılım örgüleri verilmiştir. Bu örgüler incelendiğinde,  $-y$  yönünde benzer bir saçılım azalması görülebilir. Diğer taraftan diğer yönlerde, beklendiği gibi deneysel olarak herhangi bir saçılım azalması gözlemlenmemiştir.



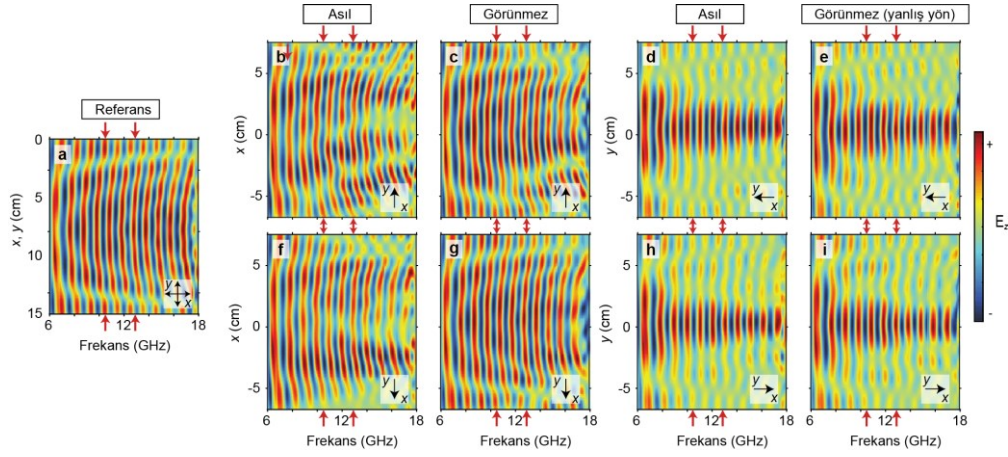
Şekil 3.14: (a) Asıl ve (b) kendiliğinden görünmez nesne için deneysel olarak elde edilen açısız saçılım örgüleri verilmiştir.

Deneysel olarak gelen dalganın önyüzündeki değişimi incelemek adına, yapıların 5 mm kadar arkasındaki elektrik alan fazı ile beraber ölçülmüştür ve elde edilen sonuçlar, Şekil 3.16’da özetlenmiştir. Açısız saçılım örgülerinde gözlemlendiği gibi, görünmez nesne için saçılım, belirlenen frekans aralığında önemli ölçüde azalmıştır. Burada verilen sonuçlar incelenirse, tasarlanan görünmezlik yönlerinde görünmez nesne için dalga önyüzleri referans yapı için elde edilen dalga önyüzleri ile benzerlik taşımaktadır. Diğer yönlerde ise dalga önyüzleri önemli bir değişime uğramamaktadır.



Şekil 3.15: Asıl nesne için (a)  $+x$ , (b)  $-y$  ve (c)  $-x$  yönlerinde deneysel olarak elde edilen açısall saçılım örgüleri. Benzer şekilde, görünmez nesne için (a)  $+x$ , (b)  $-y$  ve (c)  $-x$  yönlerinde açısall saçılım örgüleri verilmiştir.

Görünmezliğin olmadığı yönlerde meydana gelen zayıf değişikliklerin nedeni, filtrelenen dalga vektörü alanının bu yönlerdeki sabit dalga vektörü çemberleri ile kısmen örtülmesidir. Dolayısıyla, saçılım potansiyelinde  $y$  yönünde yapılan değişim, diğer yönlerde meydana gelen saçılımları da kısmen etkilemektedir.



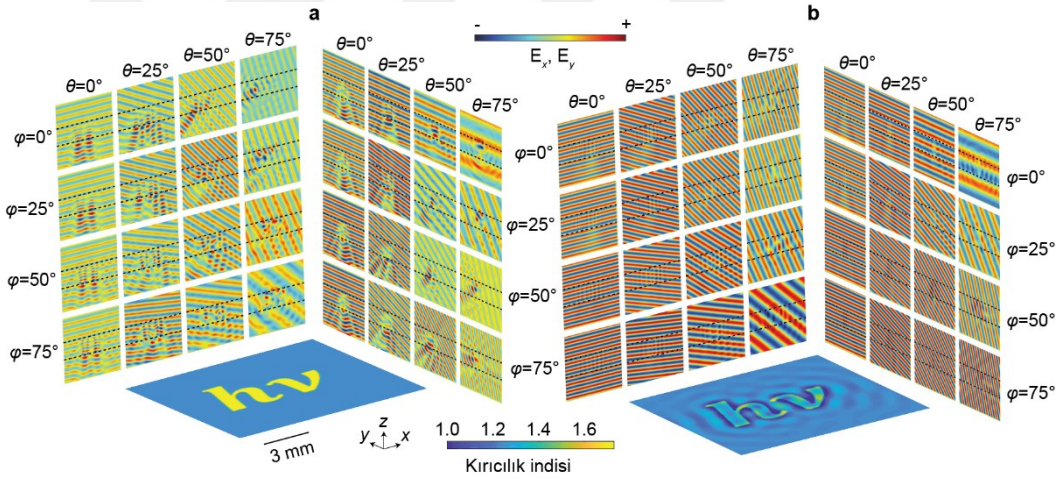
Şekil 3.16: (a) Referans nesne için deneysel olarak elde edilen elektrik alan tayfi. (b) Asıl ve (c) kendiliğinden görünmez nesne için  $+y$  yönünde elde edilen elektrik alan tayfi. (d-i) Diğer yönler için elektrik alan tayfları verilmiştir.

Önerilen yöntemin 3B uzayda da görünmezlik sağladığını doğrulamak için, Şekil 3.11’de verilen nesne üzerinde 3B ZASF benzetimleri gerçekleştirildi. Bu bağlamda, nesnenin 3B saçılım potansiyeli, ebrik uzayda eksen  $z$  üzerinde ve yarıçapı  $4.09 \text{ cm}^{-1}$  olan bir silindirik dalga vektörü alanı ile filtrelenmiştir (12 GHz kesim frekansı ile 3B görünmezlik elde edebilmek için). Yapının  $z$  yönündeki kalınlığı ise 5.0 cm olarak ayarlanmıştır. Elde edilen nesne, ZASF sonuçları ile birlikte Şekil 3.17’de özetlenmiştir. Verilen sonuçlar incelenirse, görünmez nesnenin 3B uzayda her açıda saçılımın çok düşük değerlerde olduğu görülebilir. Ayrıca 12 GHz’ten daha yüksek frekanslarda da saçılımın azaldığı görülebilir.

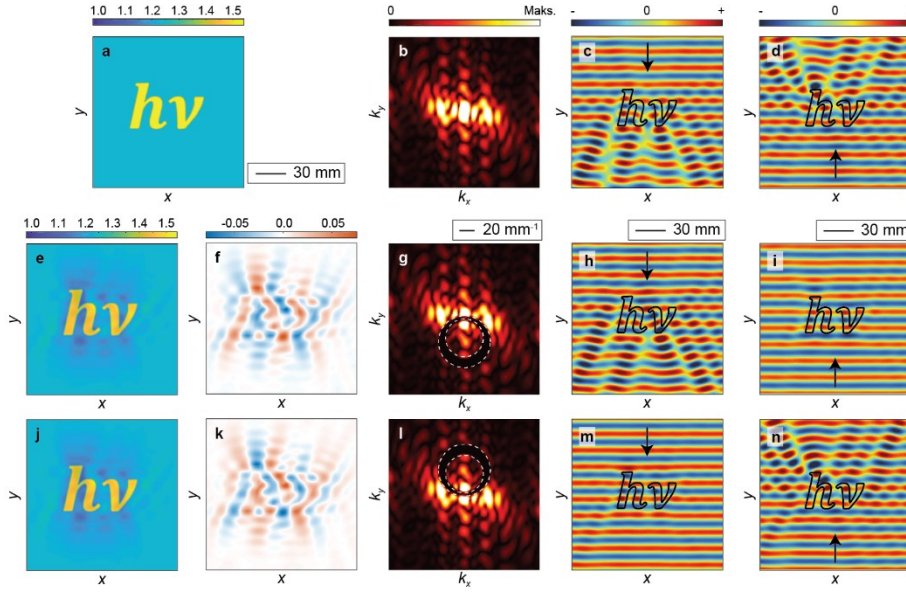
Bu bölümde, simetrik iki dalga vektörü alanı kullanılarak elde edilen nesnenin kayıp ve kazanç ortamları barındırmaması sağlanmıştır. Bu durum, bu yöntemin deneysel gerçekleştirmesini önemli ölçüde kolaylaştırmıştır. Bu noktada ortaya çıkan bir soru var: önerilen yöntem yalnızca tek yönde çalışacak şekilde Hermitian-olmayan potansiyellere genişletilebilir mi? Ayrıca, dalga kazanç ve kayıp içeren böyle bir ortamda genliği sabit kalacak şekilde ilerleyebilir mi?

Bu soruların yanıtını Şekil 3.18’de veriyoruz. Şekil 3.18(a) ve 3.18(b) sırasıyla nesnenin kırıcılık indisi dağılımını ve saçılım potansiyelini vermektedir. Şekil 3.18(c) ve 3.18(d) ise bu nesnenin ZASF benzetim sonuçlarını iki farklı yön için göstermektedir. Bu şekillerden nesnenin yarattığı saçılım ve dalga deformasyonu açık bir şekilde gözlemlenebilir. Nesne daha sonra yalnızca  $-y$  yönde görünmez

olacak şekilde önerilen yöntem uygulandığında elde edilen kırıcılık indisinin gerçel ve sanal kısımları sırasıyla Şekil 3.18(e) ve 3.18(f)'deki gibi olmaktadır. Saçılım potansiyeli ise Şekil 3.18(g)'de verilmiştir. Bu nesneye ait, Şekil 3.18(h) ve 3.18(i)'de verilen, ZASF benzetim sonuçları incelendiğinde beklendiği gibi nesnenin yalnızca  $-y$  yönünde görünmezlik özelliği gösterdiğini görebilmekteyiz. Diğer taraftan nesne  $+y$  yönünde görünmez olacak şekilde tasarlandığında, kırıcılık indis dağılımının gerçel ve sanal kısımları ve saçılım potansiyeli sırasıyla Şekil 3.18(j), 3.18(k) ve 3.18(l)'deki gibi ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.18(m) ve 3.18(n)'de verilen ZASF benzetim sonuçları incelendiğinde nesnenin beklendiği gibi yalnızca  $+y$  yönde görünmezlik sergilediği sonucuna varılabilir. Burada dikkate almaya değer bir nokta, sistemde kayıp ve kazanç ortamları olmasına rağmen gelen dalganın şiddeti sabit kalmaktadır. Dahası sistem parite-zaman simetrisine [55] sahip olmamasına rağmen, gerçel dalgavektörlerine sebebiyet verebilmektedir.



Şekil 3.17: (a) Asıl ve (b) kendiliğinden görünmez nesne için 3B boyutlu uzayda farklı geliş açılarında kesitsel elektrik alan dağılımları verilmiştir.



Şekil 3.18: Asıl nesne için (a) indis dağılımı, (b) saçılım potansiyeli, (c)  $-y$  ve (d)  $+y$  yönünde alan dağılımı verilmiştir. Tek yönde ( $-y$ ) görünmez nesne için indis dağılımının (e) gerçel ve (f) sanal kısmı, (g) saçılım potansiyeli, (h)  $-y$  yönünde ve (i)  $+y$  yönünde alan dağılımı verilmiştir. (j-n) Benzer şekilde,  $+y$  yönünde için indis, saçılım ve alan dağılımları verilmiştir.

### 3.3 Tümleyici Malzeme Tabanlı Yüzey Görünmezlik Pelerini

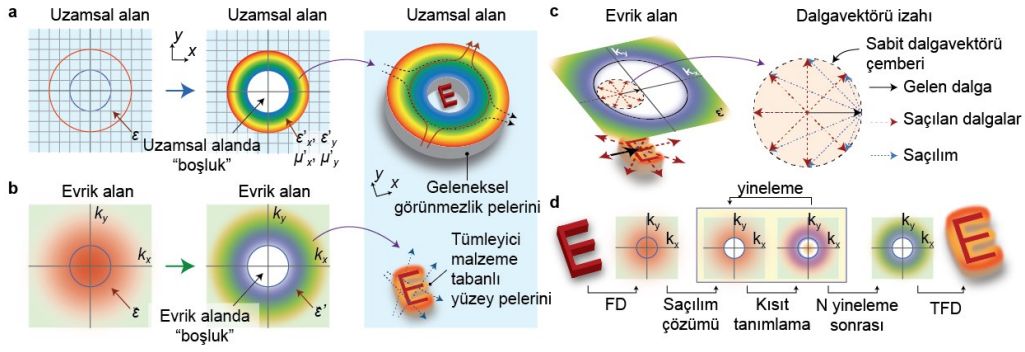
Bu bölümde, bir önceki bölümden farklı olarak, verilen bir nesneyi değişime uğratmadan o nesnenin çevresine yapılacak bir kaplama ile o nesneye görünmezlik sağlayan bir yöntem önerilecektir. Önerilen yöntem karmaşık yapıli sensörlerin görünmez kılınması yönünde önemli bir adım olabilir. Bu konuda daha önce yapılan çalışmalarda, saçılım engellemenin analitik zorluğu nedeniyle, silindir ve küre gibi basit geometriye sahip nesnelere üzerinde durulmuştur [10-16]. Karmaşık yapıli nesnelere görünmezliği daha önce bazı benzetim yöntemleri kullanılarak aşılmıştır [79,80]. Ancak benzetim araçları, fiziksel kavrayış ve sezgi sağlamamaları ile beraber oldukça yüksek işlem gücü gerektirirler. Ayrıca benzetim yöntemleri yerel minimum veya maksimum noktalarında tuzaklanabilir. Bütün bu nedenler, bu alanda yeni bir görünmezlik yönteminin ihtiyacını gözler önüne sermektedir.

#### 3.3.1 Tasarım ana fikri

Şekil 3.19(a)'da dönüşüm optiği tabanlı geleneksel bir görünmezlik pelerinin tasarım aşamaları verilmiştir. Geleneksel görünmezlik pelerinde uzayda bir

boşluk yaratılarak (noktasal bir bölgeyi örneğin dairesel bir bölgeye dönüştürerek) gelen ışığın bu boşluk etrafında hareket etmesi sağlanmaktadır. Bu sayede boşluk gelen dalgadan soyutlanmış olduğundan bu boşluk bölgesine yerleştirilen bir nesne dışarıdaki bir gözlemciye göre görünmez duruma gelmektedir. Ancak böyle bir yöntemde boşluk ve ışık arasındaki etkileşim olmadığından bu yöntem "görünmez sensörler" gibi uygulamalarda kullanılamazlar. Ayrıca uzayın dönüşümünden kaynaklı olarak elde edilen optiksel parametreler (manyetik ve elektriksel geçirgenlik) yüksek derecede eşyönsüzlüğe sahip olmaktadır. Diğer taraftan, Şekil 3.19(b) evrik uzayda benzer bir dönüşümü göstermektedir. Şekil 3.19(c) incelenirse, evrik uzayda böyle bir dönüşümün, nesnenin bütün saçılımlarını ortadan kaldıracığı ve o nesneyi etkin bir şekilde görünmez kılacağı anlaşılabilir. Ayrıca, saçılımların engellenmesinden kaynaklı olarak gelen dalga, dalga önyüzünü koruyacağından, nesnenin içerisine nüfuz edebilmektedir. Bu durum bu tip bir görünmezliği sensör uygulamaları için uygun kılmaktadır.

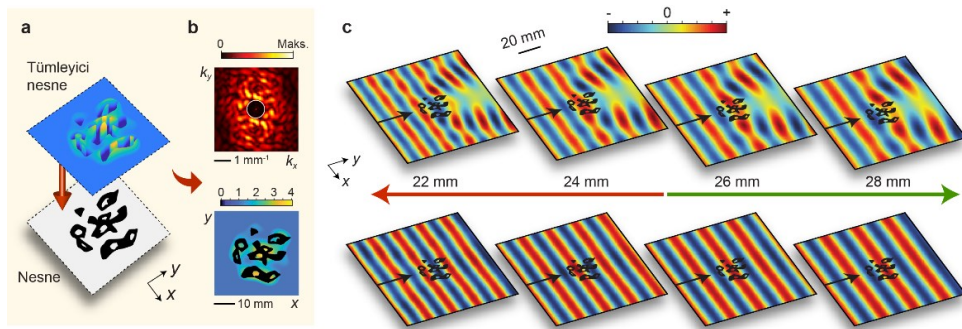
Şekil 3.19(a)'da verilen uzamsal dönüşümü yapmak analitik olarak kolaydır, zira uzay oldukça tekbiçimlidir. Ancak Şekil 3.19(b)'de verilen evrik uzay dönüşümünü yapmak oldukça zordur, çünkü herhangi bir nesnenin saçılım potansiyeli oldukça karmaşık yapıdadır. Bu zorluğu aşmak için Şekil 3.19(d)'de verilen tasarım adımları önerilmiştir. Bu yöntemde göre, ilk aşamada verilen nesnenin elektriksel hassasiyetinin FD'si alınarak saçılım potansiyeli bulunur. Daha sonra, saçılım potansiyelinde filtreleme gerçekleştirerek, saçılımların gelen dalgadan çözülmesi sağlanır. Ardından gerekli kısıtlar uygulanır. Öncelikle nesnenin aynı kalmasını sağlamak için, nesnenin elektriksel hassasiyet dağılımı bu aşamada tekrar eski haline çevrilir. Ardından isteğe bağlı olarak elde edilecek görünmezlik pelerini için ek kısıtlar girilir. Bu kısıtlar arasında görünezlük pelerini için arzulanan en düşük veya en yüksek kırıcılık indisi gibi koşullar sayılabilir. Kısıtların uygulanması, saçılım potansiyelini deforme edeceğinden, saçılım çözümü ve kısıt uygulama adımlarının tekrar edilmesi gerekmektedir. Bu adımlar, yeterli bir çözüme yakınsadığında elde edilen saçılım potansiyelinin TFD'si alınarak görünmezlik kazandırılmış nesne elde edilebilir.



Şekil 3.19: (a) Geleneksel görünmezlik tekniklerinde uzayda bir boşluk yaratılarak, gelen ışığın o boşluk etrafında hareket etmesi sağlanır. (b) Önerilen görünmezlik yönteminde dalga vektörü alanında bir boşluk yaratılarak, saçılımın sıfırlanması amaçlanmaktadır. (c) Evrik alanda dalga vektörü izahı. (d) Önerilen yöntemin aşamaları.

### 3.3.2 Sayısal analiz ve sonuçlar

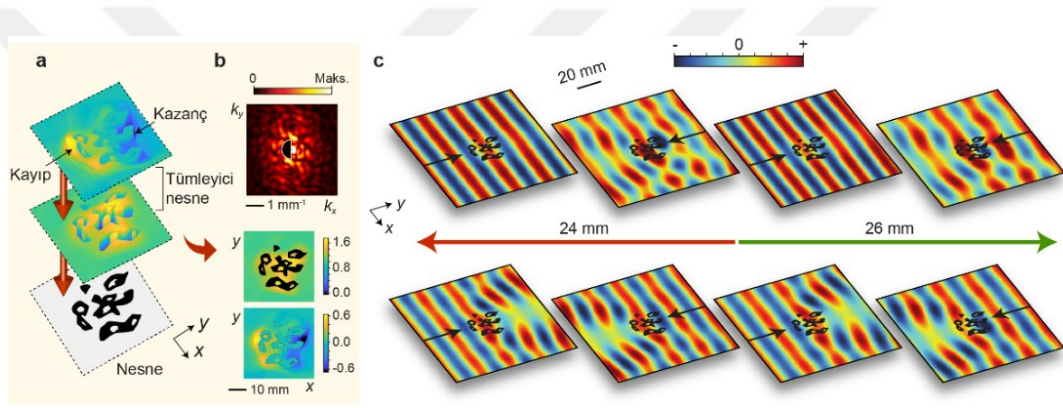
Yukarıda bahsedilen yöntemi örneklemek adına, Şekil 3.20(a)'da verilen nesneyi kullanıyoruz. Önerilen yöntem bu nesne üzerinde uygulandığında, tümleyici nesne ve saçılım potansiyeli sırasıyla Şekil 3.20(a) ve 3.20(b)'deki gibi elde edilebilir. Yöntem, 25 mm dalgaboyundan daha yüksek dalgaboyları için görünmezlik elde etme amacıyla uygulanmıştır. Şekil 3.20(c) asıl ve görünmez nesne için farklı dalgaboylarında ZASF benzetim sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere, görünmez nesne gelen dalganın saçılımını azaltmaktadır. Ayrıca şekil incelenirse, tasarlanan kesim frekansının üzerinde de saçılım azalması meydana geldiği görülebilir. Bu durumun nedeni, filtrelenen dalga vektörü alanının, yüksek frekanslar için ileri saçılım bileşenlerini içermesidir.



Şekil 3.20: (a) Asıl nesne ve tümleyici nesnenin kırıcılık indisi dağılımları. (b) Görünmez nesnenin saçılım potansiyeli ve kırıcılık indisi dağılımı. (c) Asıl nesne için elektrik alan dağılımları (üst), görünmez nesne için elektrik alan dağılımları (alt).



Önerilen yöntemin aynı zamanda Hermitian-olmayan potansiyelleri de kapsadığını göstermek adına Şekil 3.21’de tek yönlü görünmezlik durumunu ele alıyoruz. Şekil 3.20’de verilen nesneyi bu sefer yalnızca  $+y$  yönünde görünmezlik için önerilen yöntem uygulandığında, ek olarak Şekil 3.21(a)’da görüleceği üzere kayıp ve kazanç ortamları ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.21(b)’den saçılı potansiyelin beklendiği gibi yarım küre şeklinde bir filtrelenmiş alan barındırdığı görülebilir. Şekil 3.21(c)’de verilen ZASF benzetim sonuçları incelendiğinde, nesnenin beklendiği gibi yalnızca tek yönde görünmezlik sergilediği görülebilir. Ayrıca iki yönlü duruma benzer olarak, görünmezliğin kesim frekansının daha yüksek frekanslar için bile saçılımı azalttığı görülebilir. Sonuçta, bu bölümde elde edilen sonuçlar ile istenen yönlerde mükemmel görünmezlik elde edilebileceği görülmüştür.



Şekil 3.21: (a) Tek yönlü görünmezlik için nesne ve tümleyici nesnenin kırıcılık indisi dağılımları. (b) Tek yönde görünmez nesnenin saçılım potansiyeli ve kırıcılık indisi dağılımı. (c) Asıl nesne için elektrik alan dağılımları (üst), Tek yönde görünmez nesne için elektrik alan dağılımları (alt).

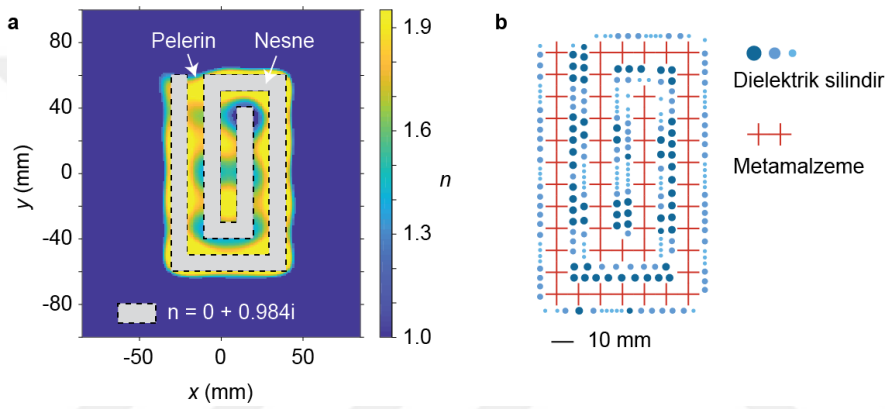
### 3.3.3 Yöntemin deneysel gerçekleştirilmesi

Önerilen yöntemi deneysel olarak gerçekleştirmek için Şekil 3.22(a)’da verilen nesne kullanılmıştır. Buradaki nesnenin yapısal olarak karmaşık ancak deneysel olarak gerçekleştirilebilir olmasına dikkat edilmiştir. Önerilen yöntem uygulandığında Şekil 3.22(a)’da görüleceği üzere derecelendirilmiş bir kırıcılık indise sahip bir pelerin ortaya çıkmaktadır. Nesne ve pelerin gerçekleştirilmesi için Şekil 3.22(b)’de görüleceği üzere iki farklı üretim yaklaşımı kullanılmıştır.

Önerilen yöntem ile görünmezlik pelerinin birden yüksek kırıcılık indisine sahip olması sağlanmıştır. Bu sayede Şekil 3.32(a)’da gösterildiği üzere pelerin dielektrik

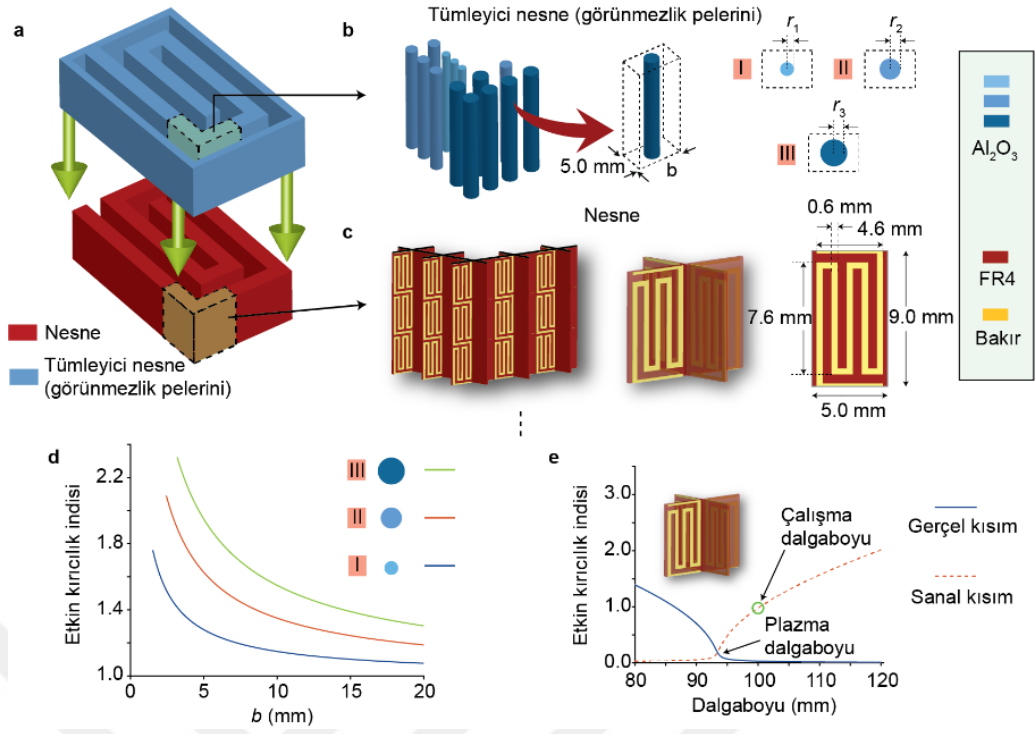
yerel doluluk oranı değişen  $Al_2O_3$  silindirleri ile gerçekleştirilebilir. Nesne, negatif bir elektriksel geçirgenliğe sahip olduğundan bu geçirgenliğe sahip Şekil 3.23(b)'deki gibi bir metamalzeme kullanılmıştır.

Metamalzeme daha sonra, eşyönlü bir etkin kırıcılık indisi oluşturabilmesi için  $z$  eksenini etrafında döndürülmüştür.  $Al_2O_3$  silindirlerinin ve metamalzemenin etkin kırıcılık indisleri sırasıyla Şekil 3.23(d) ve 3.23(e)'de verilmiştir. Şekil 3.23(d)'de  $Al_2O_3$  silindirlerinin etkin indisi beklendiği gibi yerel doluluk oranını ayarlayarak değiştirilebileceği görülmektedir. Şekil 3.23(e)'de ise, çalışma dalgaboyunda metamalzemenin beklenen negatif elektriksel geçirgenliğe sahip olduğu görülebilir.

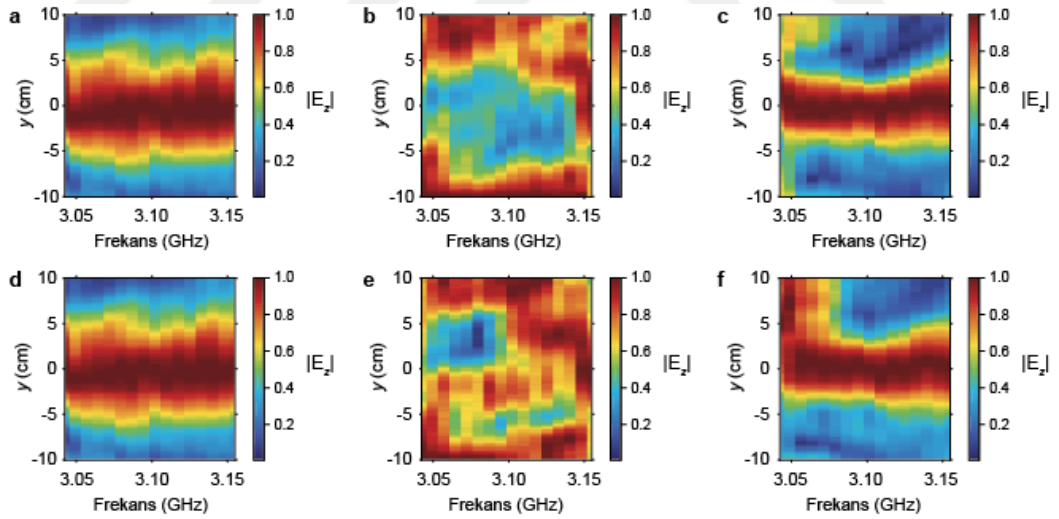


Şekil 3.22: (a) Önerilen yöntem ile görünmezlik kazandırılmış nesne ve görünmezlik pelerinin kırıcılık indisi dağılımı. (b) Nesne metamalzeme ile, görünmezlik pelerini ise dielektrik çubuklar ile deneysel olarak gerçekleştirilebilir.

Şekil 3.23'de verilen yapıtaşları ile Şekil 3.22'de verilen nesne ve görünmezlik pelerini üretildikten sonra, mikrodalga frekanslarda deneysel gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Bu bağlamda, serbest uzayın, asıl ve görünmez nesnelerin elektriksel tayfları ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 3.24'de verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere, beklendiği gibi görünmez nesnenin elektrik alan tayfı serbest uzayda ölçülen elektrik alan tayfı ile benzerlik taşımaktadır. Diğer taraftan, görünmez olmayan nesnenin elektrik alan tayfında, dalga deformasyonları ve saçılımlar gözlemlenebilir. Sonuçların mükemmel olmayışı, ölçüm ve üretim hatalarına bağlanmıştır. Ayrıca deneysel olarak elde edilen görünmezliğin çalışma frekansının tasarlanan çalışma frekansında kısmen sapması, metamalzeme üretimin hatalarına bağlanmıştır. Zira metamalzemenin metalik bileşenlerinin boyutlarının değişmesi, metamalzemenin frekans cevabını etkilemektedir.



Şekil 3.23: (a) Nesne ve görünmezlik pelerini şematik olarak verilmiştir. (b) Görünmezlik pelerini doluluk oranı yerel olarak değişen dielektrik çubuk ile, (c) nesne ise özel olarak tasarlanan metamalzemenin ile gerçekleştirilebilir. (d) Dielektrik çubukların ve (e) metamalzemenin etkin kırıcılık indisleri.



Şekil 3.24: (a) Referans, (b) Asıl ve (c) görünmez nesnelere için  $+x$  yönünde elektrik alan tayfları. Benzer şekilde  $-x$  yönünde (d) referans, (e) Asıl ve (f) görünmez nesnelere için elektrik alan tayfları verilmiştir.



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında fotonik nanoyapılarda kızılötesi frekanslarında dalga yerelleşmesi ve soğurulması fenomenleri incelenmiştir. Dalga yerelleşmesi amacıyla derecelendirilmiş bir 3B FK kullanılmıştır. Önerilen FK yapısının mikrodalga frekanslarında prototip seviyesinde deneysel karakterizasyonu yapılarak çalışma prensibi doğrulanmıştır. Sayısal olarak 3B FK kızılötesi soğurumunda kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu bağlamda, 3B FK'in yapısal parametrelerin eniyilenmesi üzerinde durulmuştur ve performans iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Eniyileştirmeler üç farklı FK yapısı üzerinde uygulanmış ve bu yapıların kızılötesi frekansları için üretiminin kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmanın bir sonraki aşamalarında, önerilen FK yapısına grafen tekkatmanları ekleyerek, renk-duyarlı kızılötesi sensör pratiğe dönüştürülebilir. Bunun için doğrudan-lazer-yazımı gibi nano üretim teknikleri çok uygundur. Ayrıca, kullanılan malzeme yelpazesi genişletilip ve daha yüksek kırıcılık indisleri kullanılıp elde edilen soğurum daha da arttırılabilir. Kızılötesi dalga sezimi için ayrıca 3B FK tabanlı alternatif konfigürasyon önerilmiştir. Bu konfigürasyonda yavaş ışık konsepti ile DK içerisinde yerleşen dalganın verimli bir şekilde FK kusurları tarafından filtrelenmesi konu edinilmiştir. Önerilen yöntemin, daha önceki yöntemlere göre önemli avantajları olduğu gösterilmiştir. Elde edilen avantajlar arasında yüksek kalite faktörü, yüksek iletim ve düşük iletim kaybı sayılabilir. Bu çalışmanın sonraki aşamalarında, FK yapısına birden fazla filtreleme kanalı ekleyerek, yapının çok-renkli bir sensör olarak çalışması prensipte mümkün kılınabilir. Ayrıca önerilen yapının doğrudan-lazer-yazımı gibi nano üretim teknikleri ile kızılötesi frekanslarında gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

Hermitian-olmayan optik ortamlar vasıtası ile de dalga yerelleşmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Yöntemde, optik ortamın yerel saçılım potansiyelleri değiştirilerek, ortama gelen elektromanyetik dalganın hareketini kontrol altında

tutma fikri önerilmiştir. Buradan hareketle, verilen bir kırıcılık indisi dağılımına ek olarak bir kayıp-kazanç ortamı türetilmiştir. Kayıp-kazanç ortamının verilen ortama eklenmesiyle istenen dalga hareketinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Spesifik olarak, ortam içerisinde dalga yerleşmesi elde edebilmek adına kayıp-kazanç ortamı elde edilmiştir. Elde edilen bu ortam ile gelen dalganın iki farklı mekanizma ile yerleşebildiği gösterilmiştir. Ayrıca, bu yöntemin deneysel olarak gerçekleştirilmesini kolaylaştırmak adına, elde edilen ortamın yalnızca kayıp ortamı ile sınırlandırılarak da dalga yerleşmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmanın ileriki aşamalarında, metamalzemeler vasıtası ile yöntem gerçekleştirilebilir. Bunun için, yöntem sonucunda elde edilen sanal kırıcılık indislerini sağlayan metamalzeme yapıları tasarlanabilir. Ayrıca, dışarıdan bir enerji ile kazanç ortamı sağlayan metamalzeme bileşenleri de kullanılabilir. Bu yöntem aynı zamanda lazerlerin demet kalitesini arttırmak için de kullanılabilir.

Tezin ikinci aşamasında, sensör görünmezliği üzerine farklı yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerden ilki parite-zaman simetrik örgülerin geliştirilmesi üzerine idi. Bu yöntemde, herhangi bir nesnenin elektriksel hassasiyetinin değiştirilerek, o nesnenin belli frekans aralıklarda ve belli açılarda yansız olması sağlanmıştır. Ayrıca, yöntemin yalnızca Hermitian-olmayan değil aynı zamanda Hermitian potansiyelleri de kapsadığı gösterilmiştir. Gelecekte bu çalışmanın deneysel gerçekleştirmeleri mikrodalgadan optik frekanslara kadar geniş bir yelpazede yapılabilir. Bunun için ilgilenilen çalışma frekansında gerekli kayba sahip malzemeler elde edilmelidir. Bu malzemelerden doğan etkin kırıcılık indisleri vasıtası ile Hermitian-olmayan ortamlar tasarlanabilir. Ayrıca kayıpsız malzemeler ile de Hermitian ortamlar tasarlanabilir. Nesnelere kendiliğinden-görünmezlik özelliği kazandırmak adına bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem ile görünmez sensörlerin tasarlanmasının kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Yöntem mikrodalga frekanslarda gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, yöntemde kullanılan malzemeler standart dielektrik malzemeler olduğundan, yöntemin gerçekleştirilmesi optik frekanslara taşınabilir. Ayrıca yöntemin bütün geliş açıları için çalışacak şekilde genişletilmesi sağlanabilir. Son olarak, herhangi bir şekilde sahip nesnelere yüzeylerine yapılabilecek bir kaplama ile görünmez olmaları üzerine bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, karmaşık şekilli sensörlerin görünmezliğini sağlamada fayda sağlayabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Yu, Z., Raman, A., Fan, S.,** (2011). Nanophotonic light-trapping theory for solar cells, *Applied Physics A*, 105, 329-339.
- [2] **Shiue, R.J., Gan, X., Gao, Y., Li, L., Yao, X., Szep, A., Walker, D. Hone, J., Englund, D.,** (2013). Enhanced photodetection in graphene-integrated photonic crystal cavity, *Applied Physics Letters*, 103, 241109.
- [3] **Gan, X., Mak, K.F., Gao, Y., You, Y., Hatami, F., Hone, J., Heinz, T.F. Englund, D.,** (2012). Strong enhancement of light–matter interaction in graphene coupled to a photonic crystal nanocavity, *Nano letters*, 12, 5626-5631.
- [4] **Liu, J.T., Liu, N.H., Li, J., Jing Li, X., Huang, J.H.,** (2012). Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal, *Applied Physics Letters*, 101, 052104.
- [5] **Thongrattanasiri, S., Koppens, F.H., De Abajo, F.J.G.,** (2012). Complete optical absorption in periodically patterned graphene, *Physical Review Letters*, 108, 047401.
- [6] **Rockstuhl, C., Fahr, S., Lederer, F.,** (2008). Absorption enhancement in solar cells by localized plasmon polaritons, *Journal of Applied Physics*, 104, 123102.
- [7] **Schaadt, D.M., Feng, B., Yu, E.T.,** (2005). Enhanced semiconductor optical absorption via surface plasmon excitation in metal nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 86, 063106.
- [8] **Beck, F.J., Polman, A., Catchpole, K.R.,** (2009). Tunable light trapping for solar cells using localized surface plasmons, *Journal of Applied Physics*, 105, 114310.
- [9] **Baba, T.,** (2008). Slow light in photonic crystals, *Nature Photonics*, 2, 465.
- [10] **Alù, A., Engheta, N.,** (2009). Cloaking a sensor, *Physical Review Letters*, 102, 233901.
- [11] **Greenleaf, A., Kurylev, Y., Lassas, M., Uhlmann, G.,** (2011). Cloaking a sensor via transformation optics, *Physical Review E*, 83, 016603.
- [12] **Alù, A., Engheta, N.,** (2010). Cloaking a receiving antenna or a sensor with plasmonic metamaterials, *Metamaterials*, 4, 153-159.
- [13] **Chen, X., Uhlmann, G.,** (2011). Cloaking a sensor for three-dimensional Maxwell's equations: transformation optics approach, *Optics Express*, 19, 20518-20530.

- [14] **Alù, A.**, (2009). Mantle cloak: Invisibility induced by a surface, *Physical Review B*, 80, 245115.
- [15] **Chen, P.Y., Monticone, F., Alù, A.**, (2011). Suppressing the electromagnetic scattering with an helical mantle cloak, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 1598-1601.
- [16] **Chen, P.Y., Alù, A.**, (2011). Mantle cloaking using thin patterned metasurfaces, *Physical Review B*, 84, 205110.
- [17] **Zhou, D., Biswas, R.**, (2008). Photonic crystal enhanced light-trapping in thin film solar cells, *Journal of Applied Physics*, 103, 093102.
- [18] **Piper, J.R., Fan, S.**, (2014). Total absorption in a graphene monolayer in the optical regime by critical coupling with a photonic crystal guided resonance, *ACS Photonics*, 1, 347-353.
- [19] **Liu, J.T., Liu, N.H., Li, J., Jing Li, X., Huang, J.H.**, (2012). Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal, *Applied Physics Letters*, 101, 052104.
- [20] **Gan, X., Mak, K.F., Gao, Y., You, Y., Hatami, F., Hone, J., Heinz T. F., Englund, D.**, (2012). Strong enhancement of light-matter interaction in graphene coupled to a photonic crystal nanocavity, *Nano Letters*, 12, 5626-5631.
- [21] **Tsakmakidis, K.L., Boardman, A.D., Hess, O.**, (2007). ‘Trapped rainbow’ storage of light in metamaterials, *Nature*, 450, 397.
- [22] **Gan, Q., Fu, Z., Ding, Y.J., Bartoli, F.J.**, (2008). Ultrawide-bandwidth slow-light system based on THz plasmonic graded metallic grating structures, *Physical Review Letters*, 100, 256803.
- [23] **Baba, T., Mori, D., Inoshita, K., Kuroki, Y.**, (2004). Light localizations in photonic crystal line defect waveguides, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 10, 484-491.
- [24] **Kurt, H., Yilmaz, D.**, (2013). Rainbow trapping using chirped all-dielectric periodic structures, *Applied Physics B*, 110, 411-417.
- [25] **Hu, H., Ji, D., Zeng, X., Liu, K., Gan, Q.**, (2013). Rainbow trapping in hyperbolic metamaterial waveguide, *Scientific Reports*, 3, 1249.
- [26] **Romero-Garcia, V., Pico, R., Cebrecos, A., Sanchez-Morcillo, V.J., Staliunas, K.**, (2013). Enhancement of sound in chirped sonic crystals, *Applied Physics Letters*, 102, 091906.
- [27] **Gailevicius, D., Hayran, Z., Turduev, M., Kurt, H., Juodkazis, S., Malinauskas, M., Mizeikis, V., Staliunas, K.**, (2017). Nanostructures for highly efficient infrared detection, *In Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics X. International Society for Optics and Photonics*, 10115, 101150Z.
- [28] **Malinauskas, M., Žukauskas, A., Hasegawa, S., Hayasaki, Y., Mizeikis, V., Buividas, R., Juodkazis, S.**, (2016). Ultrafast laser processing of



materials: from science to industry, *Light: Science & Applications*, 5, e16133.

- [29] **Rekštytė, S., Jonavičius, T., Gailevičius, D., Malinauskas, M., Mizeikis, V., Gamaly, E.G., Juodkazis, S.,** (2016). Nanoscale precision of 3D polymerization via polarization control, *Advanced Optical Materials*, 4, 1209-1214.
- [30] **Jonušauskas, L., Gailevičius, D., Mikoliūnaitė, L., Sakalauskas, D., Šakirzanovas, S., Juodkazis, S., Malinauskas, M.,** (2017). Optically clear and resilient free-form  $\mu$ -optics 3D-printed via ultrafast laser lithography, *Materials*, 10, 12.
- [31] **Johnson, S.G., Joannopoulos, J.D.,** (2001). Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis, *Optics Express*, 8, 173-190.
- [32] **Gralak, B., de Dood, M., Tayeb, G., Enoch, S., Maystre, D.,** (2003). Theoretical study of photonic band gaps in woodpile crystals, *Physical Review E*, 67, 066601.
- [33] **Engelen, R.J.P., Mori, D., Baba, T., Kuipers, L.,** (2008). Two regimes of slow-light losses revealed by adiabatic reduction of group velocity, *Physical Review Letters*, 101, 103901.
- [34] **Hayran, Z., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2016). Light localization in chirped woodpile photonic crystals, *18th International Conference on Transparent Optical Networks*, IEEE, 1-3.
- [35] **Hayran, Z., Turdnev, M., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2017). Stopped microwave-rainbow in 3D chirped photonic crystals, *In Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXV. International Society for Optics and Photonics*, 10098, 100981I.
- [36] **Hayran, Z., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2017). Rainbow trapping in a chirped three-dimensional photonic crystal. *Scientific Reports*, 7, 3046.
- [37] **Taverne, M.P., Ho, Y.L.D., Rarity, J.G.,** (2015). Investigation of defect cavities formed in three-dimensional woodpile photonic crystals, *JOSA B*, 32, 639-648.
- [38] **Soljačić, M., Joannopoulos, J.D.,** (2004). Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals, *Nature Materials*, 3, 211.
- [39] **Fan, S., Villeneuve, P.R., Joannopoulos, J.D., Haus, H.A.,** (1998). Channel drop filters in photonic crystals, *Optics Express*, 3, 4-11.
- [40] **Noda, S., Chutinan, A., Imada, M.,** (2000). Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure, *Nature*, 407, 608.
- [41] **Chutinan, A., Mochizuki, M., Imada, M., Noda, S.,** (2001). Surface-emitting channel drop filters using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs, *Applied Physics Letters*, 79, 2690-2692.

- [42] **Imada, M., Noda, S., Chutinan, A., Mochizuki, M., Tanaka, T.,** (2002). Channel drop filter using a single defect in a 2-D photonic crystal slab waveguide, *Journal of Lightwave Technology*, 20, 873-878.
- [43] **Kim, S., Park, I., Lim, H., Kee, C.S.,** (2004). Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters of three-port system with reflection feedback, *Optics Express*, 12, 5518-5525.
- [44] **Ren, H., Jiang, C., Hu, W., Gao, M., Wang, J.,** (2006). Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection microcavity, *Optics Express*, 14, 2446-2458.
- [45] **Akosman, A.E., Mutlu, M., Kurt, H., Ozbay, E.,** (2011). Compact wavelength de-multiplexer design using slow light regime of photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 19, 24129-24138.
- [46] **Hayran, Z., Turdnev, M., Botey, M., Herrero, R., Staliunas, K., Kurt, H.,** (2016). Numerical and experimental demonstration of a wavelength demultiplexer design by point-defect cavity coupled to a tapered photonic crystal waveguide, *Optics Letters*, 41, 119-122.
- [47] **Bayindir, M., Ozbay, E.,** (2002). Dropping of electromagnetic waves through localized modes in three-dimensional photonic band gap structures, *Applied Physics Letters*, 81, 4514-4516.
- [48] **Kohli, P., Christensen, C., Muehlmeier, J., Biswas, R., Tuttle, G., Ho, K.M.,** (2006). Add-drop filters in three-dimensional layer-by-layer photonic crystals using waveguides and resonant cavities, *Applied Physics Letters*, 89, 231103.
- [49] **Liu, R.J., Li, Z.Y., Feng, Z.F., Cheng, B.Y., Zhang, D.Z.,** (2008). Channel-drop filters in three-dimensional woodpile photonic crystals, *Journal of Applied Physics*, 103, 094514.
- [50] **Stieler, D., Barsic, A., Biswas, R., Tuttle, G., Ho, K.M.,** (2009). A planar four-port channel drop filter in the three-dimensional woodpile photonic crystal, *Optics Express*, 17, 6128-6133.
- [51] **Hayran, Z., Turdnev, M., Gailevičius, D., Mizeikis, V., Juodkazis, S., Malinauskas, M., Staliunas, K., Kurt, H.,** (2017). Enhanced cavity-waveguide interaction in three-dimensional photonic crystals, *In Photonic and Phononic Properties of Engineered Nanostructures. International Society for Optics and Photonics*, 10112, 1011228.
- [52] **Hayran, Z., Staliunas, K., Kurt, H.,** (2017). Light localization and filtering in three dimensional photonic structures. *18th International Conference on Transparent Optical Networks*, IEEE, 1-4.
- [53] **Pendry, J.B., Schurig, D., Smith, D.R.,** (2006). Controlling electromagnetic fields, *Science*, 312, 1780-1782.
- [54] **Leonhardt, U.,** (2006). Optical conformal mapping, *Science*, 312, 1777-1780.
- [55] **Guo, A., Salamo, G.J., Duchesne, D., Morandotti, R., Volatier-Ravat, M., Aimez, V., Siviloglou, A.G., Christodoulides, D.N.,** (2009).

Observation of PT-symmetry breaking in complex optical potentials, *Physical Review Letters*, 103, 093902.

- [56] **Lin, Z., Ramezani, H., Eichelkraut, T., Kottos, T., Cao, H., Christodoulides, D.N.,** (2011). Unidirectional invisibility induced by P T-symmetric periodic structures, *Physical Review Letters*, 106, 213901.
- [57] **Horsley, S.A.R., Artoni, M., La Rocca, G.C.,** (2015). Spatial Kramers–Kronig relations and the reflection of waves, *Nature Photonics*, 9, 436.
- [58] **Hayran, Z., Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2017). Invisibility on demand based on a generalized Hilbert transform, *arXiv preprint arXiv:1703.09490*.
- [59] **Pfeiffer, C., Grbic, A.,** (2013). Metamaterial Huygens’ surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets, *Physical Review Letters*, 110, 197401.
- [60] **Yu, N., Capasso, F.,** (2014). Flat optics with designer metasurfaces, *Nature Materials*, 13, 139.
- [61] **Ahmed, W.W., Herrero, R., Botey, M., Hayran, Z., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2017). Directionality Fields generated by a Local Hilbert Transform, *Physical Review A*.
- [62] **Kulishov, M., Laniel, J.M., Bélanger, N., Azaña, J., Plant, D.V.,** (2005). Nonreciprocal waveguide Bragg gratings, *Optics Express*, 13, 3068-3078.
- [63] **Longhi, S.,** (2011). Invisibility in-symmetric complex crystals, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44, 485302.
- [64] **Longhi, S.,** (2016). Bidirectional invisibility in Kramers–Kronig optical media, *Optics Letters*, 41, 3727-3730.
- [65] **Ye, D., Cao, C., Zhou, T., Huangfu, J., Zheng, G., Ran, L.,** (2017). Observation of reflectionless absorption due to spatial Kramers–Kronig profile, *Nature Communications*, 8, 51.
- [66] **Jiang, W., Ma, Y., Yuan, J., Yin, G., Wu, W., He, S.,** (2017). Deformable broadband metamaterial absorbers engineered with an analytical spatial Kramers-Kronig permittivity profile, *Laser Photonics Reviews*, 11, 1600253.
- [67] **de Abajo, F.J.G.,** (2009). Seeing without being seen, *Physics*, 2, 47.
- [68] **Castaldi, G., Gallina, I., Galdi, V., Alù, A., Engheta, N.,** (2010). Power scattering and absorption mediated by cloak/anti-cloak interactions: A transformation-optics route toward invisible sensors, *JOSA B*, 27(10), 2132-2140.
- [69] **Ye, D., Lu, L., Joannopoulos, J.D., Soljačić, M., Ran, L.,** (2016). Invisible metallic mesh, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 2568-2572.
- [70] **Hayran, Z., Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2017). Polarization-independent broadband bidirectional optical cloaking

using a new type of inverse scattering approach, *18th International Conference on Transparent Optical Networks*, IEEE, 1-4.

- [71] **Hayran, Z., Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2017). All-dielectric self-cloaked structures, *arXiv preprint arXiv: 1708.00637*.
- [72] **Valentine, J., Li, J., Zentgraf, T., Bartal, G., Zhang, X.,** (2009). An optical cloak made of dielectrics, *Nature Materials*, 8, 568.
- [73] **Fischer, J., Ergin, T., Wegener, M.,** (2011). Three-dimensional polarization-independent visible-frequency carpet invisibility cloak, *Optics Letters*, 36, 2059-2061.
- [74] **Gharghi, M., Gladden, C., Zentgraf, T., Liu, Y., Yin, X., Valentine, J., Zhang, X.,** (2011). A carpet cloak for visible light, *Nano Letters*, 11, 2825-2828.
- [75] **Ergin, T., Stenger, N., Brenner, P., Pendry, J.B., Wegener, M.,** (2010). Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths, *Science*, 328, 337-339.
- [76] **Gabrielli, L.H., Cardenas, J., Poitras, C.B., Lipson, M.,** (2009). Silicon nanostructure cloak operating at optical frequencies, *Nature Photonics*, 3, 461.
- [77] **Monticone, F., Alù, A.,** (2013). Do cloaked objects really scatter less?, *Physical Review X*, 3, 041005.
- [78] **Monticone, F., Alù, A.,** (2016). Invisibility exposed: physical bounds on passive cloaking, *Optica*, 3, 718-724.
- [79] **Silveirinha, M. G., Alù, A., Engheta, N.,** (2008). Cloaking mechanism with antiphase plasmonic satellites, *Physical Review B*, 78, 205109.
- [80] **Tricarico, S., Bilotti, F., Alù, A., Vegni, L.,** (2010). Plasmonic cloaking for irregular objects with anisotropic scattering properties, *Physical Review E*, 81, 026602.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Zeki HAYRAN  
**Uyruđu** : T.C.  
**Dođum Tarihi ve Yeri** : 23.08.1991 – ESSLİNGEN/ALMANYA  
**E-posta** : zekihayran@etu.edu.tr

### ÖĐRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-2018	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Burslu Y. Lisans Öğrencisi

**YABANCI DİL:** İngilizce, Almanca

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Hayran, Z.**, Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K., 2018. All-dielectric self-cloaked structures, *ACS Photonics* (kabul edildi).
- **Hayran, Z.**, Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K., 2018. Experimental demonstration of broadband perfect invisibility cloak composed of all-dielectric materials, Proceedings of SPIE Photonics West: Photonic and Phononic Properties of Engineered Nanostructures VIII. International Society for Optics and Photonics, January 27 – February 1, San Francisco, USA.
- Ahmed, W.W., Herrero, R., Botey, M., **Hayran, Z.**, Kurt, H., Staliunas, K., 2018. Directionality Fields generated by a Local Hilbert Transform, *Physical Review A* (kabul edildi).

- **Hayran, Z.**, Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Rainbow trapping in a chirped three-dimensional photonic crystal. *Scientific Reports*, 7(1), 3046.
- **Hayran, Z.**, Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Invisibility on demand based on a generalized Hilbert transform, *arXiv preprint arXiv:1703.09490*.
- **Hayran, Z.**, Moein, T., Juodkazis, S., Kurt, H., 2017. Complete optical absorption in graphene at the surface of 3D photonic crystals, Proceedings of NANOTR-13: 13th Nanoscience & Nanotechnology Conference, October 22-25, Antalya, Turkey.
- **Hayran, Z.**, Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Broadband bidirectional optical cloaking by a generalized Hilbert transform, Proceedings of NANOP: Nanophotonics and Micro/Nano Optics International Conference, September 13-35, Barcelona, Spain.
- **Hayran, Z.**, Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Invisibility on Demand, Proceedings of META-17: 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, July 25-28, Seoul, South Korea.
- **Hayran, Z.**, Staliunas, K., Kurt, H., 2017. Light localization and filtering in three dimensional photonic structures, Proceedings of ICTON: 18th International Conference on Transparent Optical Networks, July 2-6, Barcelona, Spain.
- **Hayran, Z.**, Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Polarization-independent broadband bidirectional optical cloaking using a new type of inverse scattering approach, Proceedings of ICTON: 18th International Conference on Transparent Optical Networks, July 2-6, Barcelona, Spain.
- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Stopped microwave-rainbow in 3D chirped photonic crystals, Proceedings of SPIE Photonics West: Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXV. International Society for Optics and Photonics, January 28 – February 2, San Francisco, USA.
- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Gailevičius, D., Mizeikis, V., Juodkazis, S., Malinauskas, M., Staliunas, K., Kurt, H., 2017. Enhanced cavity-waveguide interaction in three-dimensional photonic crystals, Proceedings of SPIE Photonics West: Photonic and Phononic Properties of Engineered Nanostructures. International Society for Optics and Photonics, January 28 – February 2, San Francisco, USA.
- Gailevicius, D., **Hayran, Z.**, Turduev, M., Kurt, H., Juodkazis, S., Malinauskas, M., Mizeikis, V., Staliunas, K., 2017. Nanostructures for highly efficient infrared detection, Proceedings of SPIE Photonics West: Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics X. International Society for Optics and Photonics, January 28 – February 2, San Francisco, USA.
- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Botey, M., Herrero, R., Staliunas, K., Kurt, H., 2016. Numerical and experimental demonstration of a wavelength demultiplexer design by point-defect cavity coupled to a tapered photonic crystal waveguide, *Optics Letters*, 41(1), 119-122.
- **Hayran, Z.**, Kurt, H., Staliunas, K., 2016. Light localization in chirped woodpile photonic crystals, Proceedings of ICTON: 18th International Conference on Transparent Optical Networks, July 10-14, Trento, Italy.

- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Botey, M., Herrero, R., Staliunas, K., Kurt, H. 2016. Slow light enabled wavelength demultiplexing, Proceedings of ICTON: 18th International Conference on Transparent Optical Networks, July 10-14, Trento, Italy.
- **Hayran, Z.**, Kurt, H., Staliunas, K., 2016. Chirped woodpile photonic crystals for light trapping and spectrum splitting, Proceedings of MediNano-8: 8th Mediterranean Conference on Nano-Photonics, June 2-30, Athens, Greece.
- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Botey, M., Herrero, R., Staliunas, K., Kurt, H., 2015. Tunable wavelength-demultiplexer by tapered photonic crystal waveguide, Proceedings of ICTON: 17th International Conference on Transparent Optical Networks, July 5-9, Budapest, Hungary.

#### DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Turduev, M., Giden, I. H., Babayiğit, C., **Hayran, Z.**, Bor, E., Boztuğ, Ç., Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Mid-infrared T-shaped photonic crystal waveguide for optical refractive index sensing, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 245, 765-773.
- Özdemir, A., **Hayran, Z.**, Takashima, Y., Kurt, H., 2017. Polarization independent high transmission large numerical aperture laser beam focusing and deflection by dielectric Huygens' metasurfaces, *Optics Communications*, 401, 46-53.
- Eti, N., Giden, I. H., **Hayran, Z.**, Rezaei, B., Kurt, H., 2017. Manipulation of photonic nanojet using liquid crystals for elliptical and circular core-shell variations, *Journal of Modern Optics*, 64(15), 1566-1577.
- Yilmaz, Y. A., Tandogan, S. E., **Hayran, Z.**, Giden, I. H., Turduev, M., & Kurt, H., 2017. Theoretical and experimental investigations of efficient light coupling with spatially varied all dielectric striped waveguides. *Journal of Applied Physics*, 122(3), 033101.
- Kilinc, T. O., **Hayran, Z.**, Kocer, H., Kurt, H., 2017. Wave study of compound eyes for efficient infrared detection, Proceedings of SPIE Optics + Photonics: Infrared Sensors, Devices, and Applications VII. International Society for Optics and Photonics, August 6-10, San Diego, USA.
- Yilmaz, Y. A., **Hayran, Z.**, Yildiz, F., Kilinç, T. O., Karabacak, C., Bor, E., Kurt, H., 2017. Guided-mode resonance based multicolor germanium infrared photodetector, Proceedings of NUSOD-2017: Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, July 24-27, Copenhagen, Denmark.
- Kilinç, T. O., **Hayran, Z.**, Kurt, H., 2017. Wave analysis of bio-inspired eye structures for infrared detection. Proceedings of NUSOD-2017: Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, July 24-27, Copenhagen, Denmark.
- Gailevicius, D., Jonušauskas, L., Sakalauskas, D., **Hayran, Z.**, Kurt, H., Turduev, M., Šakirzanovas, S., Juodkazis, S., Mizeikis, V., Gadonas, R., Staliunas, K., Malinauskas, M., 2017. Laser nanolithography and pyrolysis of SZ2080 hybrid for slowing light in 3D photonic crystals. Proceedings of SPIE Photonics West: Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and

Photonics X. International Society for Optics and Photonics, January 28 – February 2, San Francisco, USA.

- Turduev, M., **Hayran, Z.**, Kurt, H., 2016. Focusing of light beyond the diffraction limit by randomly distributed graded index photonic medium, *Journal of Applied Physics*, 120(24), 243102.
- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Bor, E., Kurt, H., 2016. Different approaches for subwavelength light focusing, Proceedings of MediNano-8: 8th Mediterranean Conference on Nano-Photonics, June 2-30, Athens, Greece.
- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Kurt, H., 2015. Sub-wavelength light focusing with random photonic medium. Proceedings of ICTON: 17th International Conference on Transparent Optical Networks, July 5-9, Budapest, Hungary.
- Parim, A. B., Turduev, M., **Hayran, Z.**, Bor, E., Kurt, H., 2014. Optical Resonators Modified by Random Modulation of Refractive Index, Proceedings of AES: Advanced Electromagnetics Symposium, December 7-10, Hangzhou, China.
- **Hayran, Z.**, Turduev, M., Parim, A. B., Bor, E., Kurt, H., 2014. Light Focusing by Randomly Distributed Index Gradient Medium, Proceedings of AES: Advanced Electromagnetics Symposium, December 7-10, Hangzhou, China.