

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANO SERAMİK FOTONİK KRİSTALLERİN
ÜRETİMİ VE UYGULAMADA GEOMETRİK
TASARIMLARIN ARAŞTIRILMASI**

Fatemeh NASİRPOUR

Ağustos, 2016

İZMİR

**NANO SERAMİK FOTONİK KRİSTALLERİN
ÜRETİMİ VE UYGULAMADA GEOMETRİK
TASARIMLARIN ARAŞTIRILMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı**

Fatemeh NASİRPOUR

Ağustos, 2016

İZMİR


YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

FATEMEH NASIRPOUR, tarafından PROF. DR. İ. AKIN ALTUN yönetiminde hazırlanan “NANO SERAMİK FOTONİK KRİSTALLERİN ÜRETİMİ VE UYGULAMADA GEOMETRİK TASARIMLARIN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

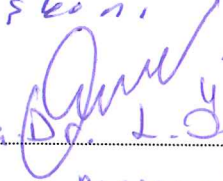

Prof. Dr. İ. Akın ALTUN

Yönetici

yerine Prof. Dr. Erdal Çelik
Anabilim Dalı Başkanı


Prof. Dr. Aydoğdu Sarı

Jüri Üyesi


Yard. Doç. Dr. L. İzzet Karaca

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında, göstermiş olduğu yakın ilgi, destek ve özverisinden dolayı çok sevgili hocam Prof. Dr. İ. Akın ALTUN' a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım ve simülasyon sırasında, çok değerli bilgi ve birikimleriyle bana yardımcı olan hocam Sayın Prof. Dr. Erdal ÇELİK' e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda sonsuz destek ve güvenini gördüğüm sevgili dostum Arş. Gör. Ramazan DALMIŐ' a teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın en kıymetli insanlarına, her aşamada yanımda olan ve sevgi, ilgi ve desteklerini her zaman hissettiğim Annem, Babam ve Ağabeyimin ellerinden öpüp ve sonsuz sevgimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Fatemeh NASİRPOUR

NANO SERAMİK FOTONİK KRİSTALLERİN ÜRETİMİ VE UYGULAMADA GEOMETRİK TASARIMLARIN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Bu çalışma kapsamında silika esaslı fotonik kristal üretimi ve geometrik tasarımın araştırılması gerçekleştirilmiştir. Üretim prosesinin ilk aşamasında PMMA (Polimetilmetakrilat) küreleri sentezi yapılmıştır. SEM analizi sonuçlarına göre kürelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan küreler polimer şablon olarak kullanılmak üzere hazır hale gelmiştir.

Üretim prosesinin aşamasında vakum ile sol-jel infiltrasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde silika esaslı solüsyon oluşturularak PMMA küreleri etrafında silika biriktirmesi sağlanmıştır.

Kuruma sonrası tozlara 550 Santigrad Derece’ de kalsinasyon işlemi uygulanarak polimer şablonun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Elde edilen tozlar SEM, XRD ve PSD analizleri ile nicel olarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonrası opal yapının üretildiği gözlemlenmiştir. Üretimin ikinci aşamasında kürelerin ve aralıkların boyutu değiştirilerek incelenmiştir.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında ise üretilen silika esaslı fotonik kristalin özellikleri ve elde edilen analizlere dayanarak, simülasyon yapılmış ve onun geometrisine bakmak için RSOF (Robinson Yöntem) yazılımı kullanılmıştır. Fotonik kristalin 3D (3 boyutlu) ve amorf olduğuna göre, kürelerin aralıkları 10 nm, 30 nm ve 100 nm ve tane boyutları 200 nm, 800nm, 1000 nm ve 1200 nm olması gerektiği analizlerden elde edilmiştir. Bu yazılım da ilk başta üretilen silika esaslı fotonik kristal tasarımı yapılmış daha sonra ilk Brillouin bölgesi ve domain yapısı ve son aşamasında da enerji aralığı elde edilmiştir. Sonuçlara dayanarak üretilen fotonik kristalin özellikleri gereken hesaplamalardan sonra optimize edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Nano seramik fotonik kristal, RSOF, Simülasyon

PRODUCTION OF NANO CERAMIC PHOTONIC CRYSTALS AND INVESTIGATION OF GEOMETRICAL DESIGN APPLICATION

ABSTRACT

In this work, production and characterization of silicabased photonic crystal and investigation of geometrical designs in application were carried out. In the first step of the production process, synthesis of PMMA (Polymethylmethacrylate) spheres was performed. After the resulting solution was centrifuged at different times and speed, it was allowed to dry for 1 week. After drying obtained PMMA powders were made to SEM analysis and thus process optimization was achieved. According to SEM analysis results, occurrence of spheres was observed. The resulting spheres were made ready to be used as template.

In the second step of the production process, sol-gel infiltration method was used by vacuum. In this method, silica-based solution was created. It was dropped to the distributed polymer powders over the filter paper in the funnel. Thus, silica was allowed to accumulate around the PMMA spheres.

After drying, removal of the polymer template was provided by applying calcination at 550 Degrees Celsius. Obtained the powders examined by SEM, XRD and PSD analysis methods quantitatively. After the analyses were made, opal structure produced was observed. The second sphere beyond the experimental stages and was examined by changing the size of the range production.

In the last stage of the study, the produced photonic crystal based on silica, that was gotten its analaliz, has been simulated by using the RSOF T software (Robinson Software) to look at its geometry. According to the photonic crystal, sphere of intervals is 10, 30, 100 nm and the particle size is 200, 800, 1200 nm which resulted from the analysis. By application at first, produced silica based photonic crystal have been simulated, secondly birilloun region and the domains have been observed, and finally stages of the band gap range was obtained. After the calculations required to

produce photonic crystal properties were studied based on the results to be optimized.

Keywords: Nano ceramic photonic crystal, RSOF, Simulation



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.	x
TABLolar LİSTESİ.	xii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Genel.....	1
1.2 Tezin Organizasyonu.....	3
BÖLÜM İKİ – TEORİK İNCELEME	5
2.1 Fotonik Kristal.....	5
2.1.1 Fotonik Kristallerin Genel Özellikleri.....	5
2.1.1.1 Boyutlarına göre fotonik kristaller.....	5
2.1.2 Bragg Yasası.....	7
2.1.3 İlk Brillouin Bölgesi.....	8
2.1.4 Fotonik Kristallerin Bant Yapısı.....	10
2.1.5 Kare Örgülü Fotonik Kristaller.....	12
2.1.6 Maxwell Denklemleri.....	13
2.1.7 Fotonik Kristal Uygulamaları.....	14
2.1.8 Opal ve Ters Opal.....	14
2.1.8.1 Opaller.....	14
2.1.8.2 Ters Opaller.....	15
2.2 Simülasyon Metodları	17
2.2.1 Düzlem Dalga Metodu.....	17
2.2.2 RSOFT (Robinson yöntem) Metodu	17
2.2.3 FDTD (Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi) Metodu.....	20

BÖLÜM ÜÇ– DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMALAR21

3.1 Çalışmanın Amacı	21
3.1.1 Malzemeler	21
3.1.2 Üretim Prosesi.....	22
3.1.2.1 PMMA Küreleri Sentezi	22
3.1.2.2 Santrifüjleme.....	23
3.1.2.3 Vakum ile Sol-jel İnfiltrasyon	24
3.1.2.4 Kalsinasyon.....	26
3.1.3 Malzeme Karakterizasyonu.....	27
3.1.3.1 X-Işınları Difraksiyonu (XRD).....	27
3.1.3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	27
3.1.3.3 Tane Boyutu Analizi.....	27
3.2 Numerik Çalışmalar.....	27

BÖLÜM DÖRT– SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR32

4.1 Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi.....	32
4.1.1 Malzeme Karakterizasyonu.....	32
4.1.1.1 Mikroyapı Analizleri.....	32
4.1.1.2 Faz Analizi.....	37
4.1.2 Partikül Boyut Analizi.....	38
4.1.2.1 PMMA Küreleri İçin Partikül Boyut Analizi.....	38
4.1.2.2 Silika Esaslı Fotonik Kristali Partikül Boyut Analizi.....	38
4.2 Numerik Sonuçların Değerlendirilmesi.....	39
4.2.1 Geometri Tasarımı.....	39
4.2.2 İlk Brillouin Bölgesi ve Domain.....	40
4.2.3 Band Yapısı.....	42
4.3 Optimizasyon.....	41
4.3.1 Parametrelerin Hesaplanması.....	44
4.3.2 Optimizasyon Algoritmanın Genel Yapısı.....	46
4.3.3 Simülasyon Sonuçları.....	52

BÖLÜM BEŞ - DENEYSEL SONUÇLAR.....	58
5.1 Genel Sonuçlar.....	58
5.2 Öneriler.....	60
KAYNAKLAR.....	61



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristaller.....	5
Şekil 2.2 Bir boyutlu fotonik kristal.....	6
Şekil 2.3 İki boyutlu fotonik kristal örnekleri.....	6
Şekil 2.4 Üç boyutlu fotonik kristal örneği. Fotonik bant aralığına sahip ilk üç boyutlu fotonik kristal.....	7
Şekil 2.5 Işığın kristalde kırınımı.....	7
Şekil 2.6 Tek boyutlu doğrusal ve buna ait birillouin bölgesi.....	9
Şekil 2.7 İki boyutlu kare örgü ve buna ait brillouin bölgesi.....	9
Şekil 2.8 FCC ilk birillouin.....	10
Şeki 2.9 Band aralığı eğrisi.....	10
Şekil 2.10 Doğada olan fotonik kiristaller.....	11
Şekil 2.11 Kristallerin fotonik özelliklerin gösteren genel fotonik band yapısı.....	12
Şekil 2.12 Band aralığı içerisindeki dalga boylarında dalgalar.....	12
Şekil 2.13 a) Kare örgü şeklinde dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal (Örgü sabiti a , silindirik çubukların çapı $0, 2a$ 'dır) b) Ters uzayda simetri noktaları Γ , X ve M dir.....	13
Şekil 2.14 a) Doğal Opal, b) Girişim etkisiyle renk etkilerini sağlayan opal nano yapısının SEM görüntüsü, c) Nanoyapıdaki kafesin tarifi için kullanılan YMK kafes.....	15
Şekil 2.15 Ters opal hazırlanmasının genel adımları.....	16
Şekil 2.16 Ters opallerin 3 farklı morfolojisi. Soldan sağa; kabuk yapısı, dolu hacim yapısı, iskelet yapısı.....	17
Şekil 2.17 Yee örgüsü içindeki TM ve TE dalgalarının 2 boyuttaki dizilimi.....	18
Şekil 2.18 Üç boyutta Yee örgüsü.....	19
Şekil 3.1 PMMA küreleri sentezi deney düzeneği şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.2 a) PMMA küreleri sentezi deney düzeneği b) Sentez donrası elde edilen süspansiyon.....	23
Şekil 3.3 Santrifüjleme cihazı.....	24
Şekil 3.4 Santrifüjleme sonrası kuruyan tozların görüntüleri.....	24
Şekil 3.5 Vakum ile infiltrasyon deney düzeneği.....	25

Şekil 3.6 Huni içerisinde PMMA (Polimetilmetakrilat) tozları görüntüsü.....	25
Şekil 3.7 Kalsinasyon sonrası elde edilen tozların görüntüleri.....	26
Şekil 3.8 Rsoft yazılımı iletişim penceresi.....	28
Şekil 3.9 Parametre tanımlama penceresi.....	28
Şekil 3.10 Genel parametreler bölümü.....	29
Şekil 3.11 Fotonik kristal kafes penceresi.....	30
Şekil 3.12 Band solve simülasyon ayarları.....	31
Şekil 4.1 a) bir saat reaksiyon ve b) bir saat santrifüjleme sonrası PMMA kürelerinin SEM görüntüleri.....	33
Şekil 4.2 a) İki saat reaksiyon ve b) İki saat santrifüjleme sonrası PMMA kürelerinin SEM görüntüleri.....	34
Şekil 4.3 a) İki saat reaksiyon ve b) 24 saat santrifüjleme ile elde edilen PMMA kürelerinin SEM görüntüleri.....	35
Şekil 4.4 Opal yapısı 10000X SEM görüntüsü.....	36
Şekil 4.5 Opal yapısı 15000X kristal SEM.....	36
Şekil 4.6 Opal örneğin XRD grafiği.....	37
Şekil 4.7 PMMA küreleri için tane boyutu analizi grafiği.....	38
Şekil 4.8 Opal örneğin tane boyut analizi grafiği.....	39
Şekil 4.9 Üretilen silica esaslı fotonik kristalin geometrisi.....	39
Şekil 4.10 Domain.....	40
Şekil 4.11 İlk brillouin bölgesi.....	40
Şekil 4.12 Üretilen fotonik kristalin band yapısı.....	41
Şekil 4.13 İlk optimize yapılan fotonik kristalin domaini.....	42
Şekil 4.14 İlk optimize yapılan fotonik kristalin brillouin bölgesi.....	42
Şekil 4.15 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin domaini.....	43
Şekil 4.16 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin brillouin bölgesi.....	43
Şekil 4.17 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin domaini.....	43
Şekil 4.18 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin brillouin bölgesi.....	44
Şekil 4.19 İlk optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.....	47
Şekil 4.20 İkinci optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.....	48
Şekil 4.21 Üçüncü üretim yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.....	48
Şekil 4.22 Gözenekler 50 nm yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.....	49

Şekil 4.23 Gözenekler100 nm yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.....	49
Şekil 4.24 Gözenekler500 nm yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.....	50
Şekil 4.25 Domain.....	50
Şekil 4.26 Brillouin bölgesi.....	51
Şekil 4.27 Birinci optimize edilen fotonik kristalin band yapısı.....	52
Şekil 4.28 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin band yapısı.....	53
Şekil 4.29 Üçüncü optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin band yapısı.....	53
Şekil 4.30 Sadece çapı değiştirilerek optimize edilen silika esaslı fotonik kristalin band yapısı (200 nm).....	54
Şekil 4.31 Sadece çapı değiştirilerek optimize edilen silika esaslı fotonik kristalin band yapısı (800 nm).....	54
Şekil 4.32 Sadece çapı değiştirilerek optimize edilen silika esaslı fotonik kristalin band yapısı (1200 nm).....	55

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 PMMA küreleri sentezi için kullanılan malzemeler ve formülleri.....	22
Tablo 3.2 Sol-jel süreç için çözelti hazırlamada kullanılan malzemeler ve formülleri.....	22
Tablo 4.1 Sonuçlar ve değerlendirmeler.....	56
Tablo 4.2 Küre çapını sabit tutarak sonuçlar ve değerlendirmeler.....	57



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Genel

Fotonik, ışığı oluşturan fotonların üretilmesi yönlendirilmesi, madde ile olan etkileşimi, algılanması ve taşınması ile uğraşan bir alandır. Fotonik kristaller dielektrik sabitinin periyodik olarak değiştiği yapılardır. Son yıllarda ışığın kontrol edilerek istenilen değişikliklerin yapılmasını ve farklı optik uygulamaların ortaya çıkmasını sağladığı için fotonik kristaller modern teknolojinin gelişiminde oldukça önemlidir. Bu durumda, yarıiletken malzemelerdeki elektronların yerini, fotonik kristallerde fotonlar almaktadır. Buna göre bu maddeler içinde ışığın yayılımını anlamak için, periyodik ortamlarda dalga yayılımının incelenmesi yapılmalıdır. Fotonik kristaller bir, iki ya da üç boyutta periyodik olabilirler (Dildar, 2013).

Fotonik kristaller ancak laboratuvar da bulunmaktadır ve çok küçük ışık ölçülerde ışığın hareketini kontrol edildiği için son yıllarda pek çok araştırmada kullanılmaktadır. yapılmaktadır. Elektromanyetik dalgaların periyodik yapılar içinde ilerlemesi ilk kez 1887 yılında Lord Rayleigh tarafından araştırılmıştır. Daha sonra bu olay 2 ve 3 boyutlu incelenmiştir (Erdiven, 2012).

Shahid Beheshti Üniversitesi'nde Mina Tabakhian ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, tavus kuşu tüylerindeki renk üretimi kökeni incelenmiştir. İlk olarak, mikroyapısal araştırılmıştır. Daha sonra, bu mikro-yapı içinde iki boyutlu fotonik kristaller modellenmiştir. Bu çalışmada düzlem dalga (plane wave) metodu kullanarak kanatdaki tüylerin kısmen boşlukların renk sağlamasına sebep olması beyan edilmiştir. Aynı zamanda kanatın geometrisine bakıp ve modellendirilmiştir (Tabakhian ve ark., 2010).

Tehran Üniversitesi'nde Nozari'nin yaptıkları çalışmada bir Mach Sander interferometer fotonik kristalleri kullanılarak ve dalga boyu 55/1 µm olarak bir alt-tabaka InP olan pencerede tasarım yapılmıştır. Bu çalışmada RSOFT (Robinson

metodu) yazılımı kullanarak kare çubuk kafesi simüle edilmiştir. RSOFT düzlem dalga metodun kullanarak kafes sabitleri 580 nm ve uygun değer yarıçap 110 nm, elde edilmiştir. Öncelikle çıkış portlarda kullandığımız gücün oranı belli olması için optik gücün bölmede farklı yönlü olan interferometrelerden farklı boyutlarda kullanılmıştır. Ardından, bir ideal Y bağlantısı tanıtılmış ki optimizasyon da iletim bant genişliği ve transfer karakteristiği eş zamanlı olarak artmıştır. Bu çalışmanın geometrisi va analizi RSOFT ile yapılmıştır (Nozari, 2007).

Hart ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; fotonik kristal cihazların performansı kendi geometrisine güvendiklerini belirtmekte ve onların temel fizik optimum şekil bakımından sayısal tasarım arama teknikleri, yüksek performanslı düzenleri belirlemek amacıyla kullanılması gerektiğini anlatmaktadırlar. Bu çalışmada bu tür optimizasyon problemin çözmek için stratejileri tartışılmıştır. En önemli zorluk yararlı tasarımların muazzam büyüklüğü ve potansiyel olarak varsayılan şekillerin değerlendirmesi ve nispeten yüksek hesaplama ile performansın maliyeti arasındaki çatışmadır. Burada önerilen optimizasyon ve bir tekniği olan parametrik olmayan şekil tanımlı varsayılan tasarımların performansı sayısal analiz çözünürlük açısından doğruluk seviyelerini arttırarak üzerinde çalışır. Bu elektromanyetik cihaz, her türlü potansiyel şekil tasarım problemini uygulayabilen genel bir yöntemdir. Ayrıca, bu işlem ile üretilen optimal sağlamlığını değerlendirmek kendi performansı üzerinde imalat hataları etkisini araştırmak için bir yöntem göz önünde bulundurur. Bir örnek olarak, bir iki boyutlu fotonik kristal yapısının tasarımında bu teknoloji uygulanmıştır ve sonuç olarak büyük tam bant boşluk yapısı ve daha önce yayınlanmış tasarımlardan farklı bir topoloji bulunmuştur (Hart ve ark., 2012).

Massey Üniversitesinde Geoffrey Waterhouse ve Mark Waterland'ın yaptıkları çalışmada silika sol-jel kullanılarak polimer kürelerinin etrafında SiO_2 , TiO_2 ve CeO_2 biriktirmesi ile üretim yapılmıştır. Üretim sonrasında polimer şablonu kaldırmak için elde edilen yapı 550 °C 'de kalsine edilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen gözenekli amorf silika, nano kristal titanyum ve nano kristal seryumdan ince çerçeveler halinde boşlukların ayrıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlerde silikanın fotonik özelliğe sahip olduğunu saptamışlardır. PMMA küreleri periyodik

olarak üç boyutlu bir madde oluşturmaları için yapısının yüzde 24'ünün boşluk olması gerekir (Waterhouse, 2006).

Yapılan çalışmalar incelendiğinde teorik ve deneysel olarak fotonik kristallerin üretimi ve geometrik modelmesine ait çok çalışmalar yapılmıştır. Fotonik kristallerin özelliklerini incelemek ve geometrilerini araştırmak, üretimi gibi pek kolay bir araştırma olmadığından dolayı, fotonik özelliklerin bulunduğu çok karışık matematiksel ve fiziksel hesaplamalar yapılmalıdır. Hem teorik hem de deneysel çalışmalar genelde literatürde yeterli miktarda bulunmamaktadır.

1.2 Tezin Organizasyonu

Literatürdeki bilgiler ışığında bu tez çalışmasında silika esaslı fotonik kristal üretimi hedeflenmiştir. Bu amaçla önce polimer şablon olarak PMMA (Polimetilmetakrilat) küreleri sentezi yapılmıştır. Daha sonra vakum ile sol-jel infiltrasyon yöntemiyle polimer şablon üzerine silika oluşturulmuştur. Bu yöntem öncesinde polimer şablon olarak kullanacağımız PMMA (Polimetil metakrilat) küreleri sentezi yapılmıştır. PMMA (Polimetil metakrilat) küreleri oluşturulduktan sonra sol-jel yöntemine geçilerek polimer şablon etrafında silika birikmesi gerçekleştirilmiştir. Vakum ile sol-jel infiltrasyon yönteminin ilk aşamasında başlatıcı olarak seçtiğimiz malzemenin hidrolizi gerçekleştirilmiş, sonrasında alkol ve su ile solüsyon oluşturulmuştur. Bunu takiben kurutma ve kalsinasyon işlemleri sonucu elden edilen numunelere yapısal ve mikroyapısal karakterizasyon uygulanmıştır.

Literatürde PMMA (Polimetil metakrilat) küre sentezi için üç yöntem uygulanmıştır. Hangi yöntemin en kaliteli küreleşmeyi sağladığını belirlemek amacıyla çeşitli hazırlama yöntemleri kullanılmıştır. Fotonik kristallerin özellikleri incelemek ve geometrinin araştırmak, pek kolay bir araştırma değildir. Ayrıca bu yapıların fotonik özellikleri olduğu çok karışık matematik ve fiziksel hesaplamalar gerekmektedir. Bu analizleri kısa sürede yapmak için ve daha dikkatli olunması için araştırmalarda çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımların hızı ve hassasiyeti

bunların seçiminde ön planda bulunmaktadır. Bu çalışmada da bu konuyu dikkate alarak gerekli deneysel bilgiler elde ettikten sonra, RSOFY yazılımını kullanarak üretilen fotonik kristalin enerji aralığı (band gap) bulunup geometrisi simüle edilmiştir.

Bu tez 5 bölümden oluşmaktadır. Bölüm bir de, genel bilgiler, literatür taraması ve açık noktaları içeren giriş kısmı beyan edilmiştir. Bu kapsamda fotonik kristallerle ilgili temel kavramları içermektedir. İlave olarak yapılan çalışmaların amacı ve önemi açıklanmaktadır. Bölüm 2’de teorik alt yapı olarak fotonik kristallerle ilgili temel bilgiler, fotonik özellikler ve simülasyon metotlar sunulmaktadır. Bölüm 3’de iki ana çalışma bulunmaktadır. Bunlar deneysel çalışmalar ve teorik hesaplama tekniğidir. İlk kısımda kullanılan malzemeler, deneysel çalışmalar, metotlar ve karakterizasyon çalışmaları ve ikinci kısımda ise tasarım ve hesaplama tekniği bulunmaktadır. Bölüm 4’de deneysel ve numerik sonuçların değerlendirilmesi ve tartışılması yapılmıştır. Bölüm 5’de genel sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

BÖLÜM İKİ

TEORİK ALTYAPI

2.1 Fotonik Kristal

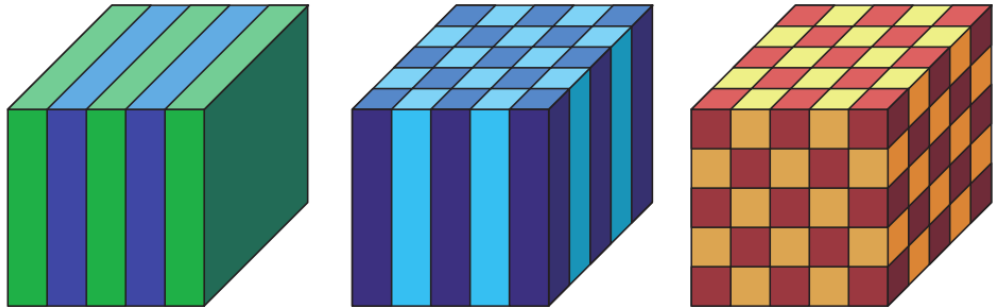
Fotonik kristaller başlangıçta yapay maddeler olarak düşünülmesine rağmen doğada var olduğu kanıtlanmıştır.Örneğin opaller doğal fotonik kristallerin en bilinenlerindedir.Bununla birlikte biyolojide de doğal fotonik yapıların bulunduğu gözlemlenmiştir.Örneğin bazı kelebek kanatları ve tavus kuşu tüyleri renk pigmentleri içermediği halde fotonik kristaller sayesinde güzel renklere sahiptir. Doğada fotonik kristallerin bulunmasına rağmen, bilim adamları fotonik yapıları ancak 20. yüzyılda yapay olarak üretmeye başlamış ve çeşitli uygulamalar geliştirmiştir (Dildar, 2013).

Fotonik kristallerin oldukça fazla kullanım alanları vardır.Bunlar, Lazer teknolojileri, fiber optik yapılar, ışığı bükebilen metamalzemeler, sensörlerde, optik çoklayıcı ve tekleyicilerdir (Çetin ve ark., 2011).

2.1.1 Fotonik Kristallerin Genel Özellikleri

2.1.1.1 Boyutlarına Göre Fotonik Kristaller

Fotonik kristaller bir, iki ya da üç boyutta periyodik yalıtkan (dielektrik) yapılardır. Fotonik kristal örnekleri Şekil 2.1’de görülmektedir (Çetin ve ark., 2011).



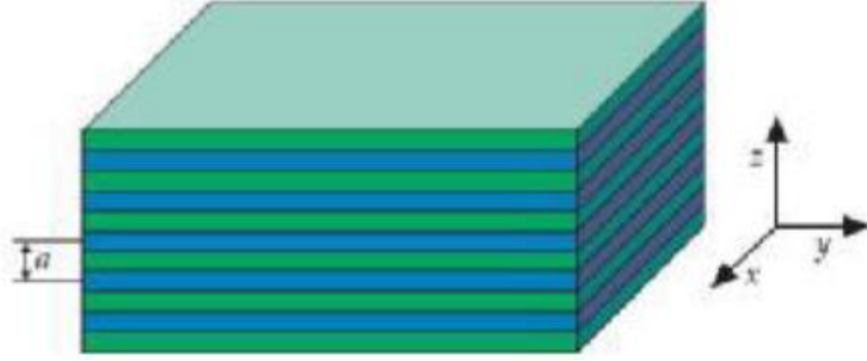
Bir boyutta periyodik

İki boyutta periyodik

Üç boyutta periyodik

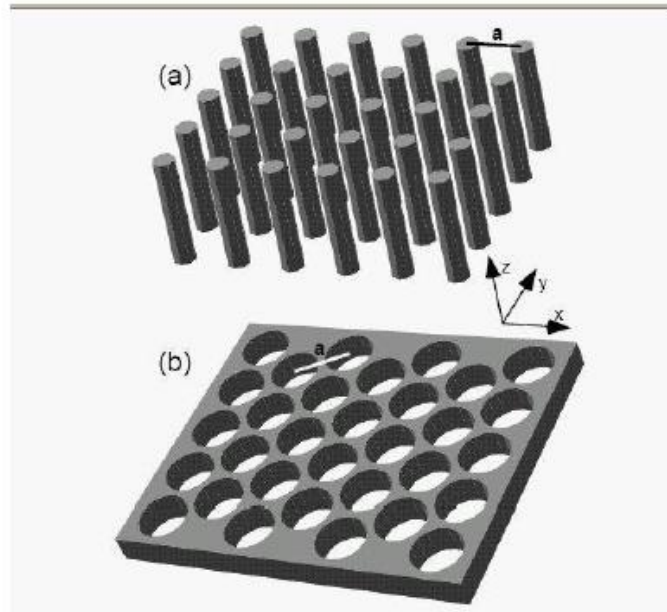
Şekil 2.1 Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristaller (Joannopoulos, 2008)

En basit ve en kolay şekilde yapılan fotonik kristaller ki farklı dielektrik tabakaların üst üste yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır (Çetin ve ark., 2011).



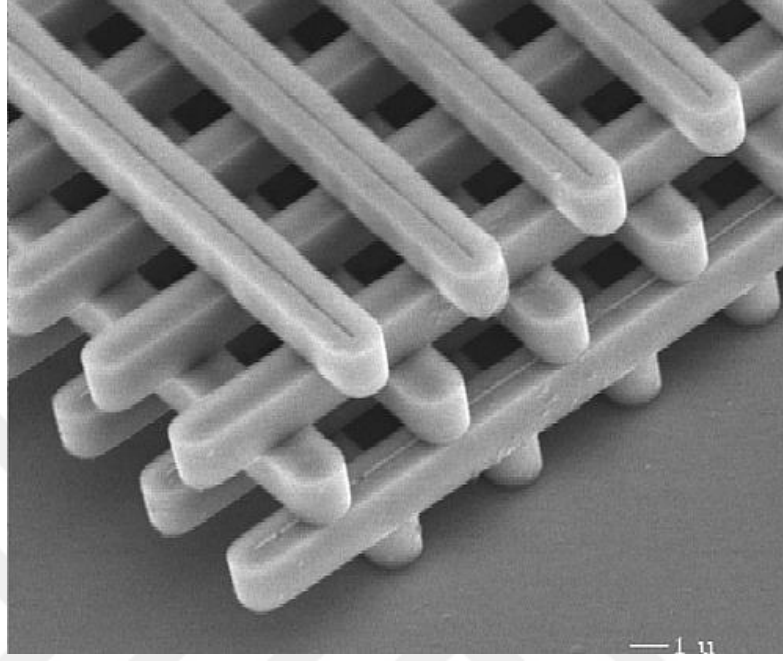
Şekil 2.2 Bir boyutlu fotonik kristal (Joannopoulos, 2008)

Boyutların birden ikiye ve üçe çıkması ile yeni durumlar ortaya çıkar. Farklı şekillerde iki boyutlu fotonik kristal oluşturmak mümkündür. Hava içindeki dielektrik çubukların kare örgüsü ve dielektrik plaka içindeki hava boşluklarının altıgen örgüsü bunlardan bazılarıdır. Şekil 2.3.a'da birbirine paralel dik sütunlar z yönündedir ve xy düzlemine diktir. xy düzlemi boyunca gönderilen ışık xy düzleminde periyodiktir ve z yönünde serbestçe yayılabilir (Dildar, 2013).



Şekil 2.3 İki boyutlu fotonik kristal örnekleri (Johnson ve Joannopoulos, 2002)

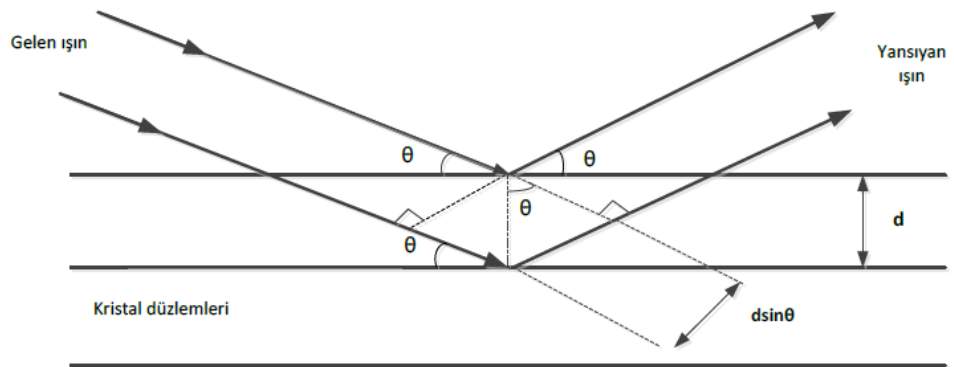
Karmaşık ve zor olan üç boyutlu fotonik kristal üretiminin deneysel açıklaması 1991’de yapılmıştır (Dildar, 2013).



Şekil 2.4 Üç boyutlu fotonik kristal örneği. Fotonik bant aralığına sahip ilk üç boyutlu fotonik kristal (Joannopoulos ve ark.,2008)

2.1.2 Bragg Yasası

Kristal üzerine gönderilen x-ışınları demeti, kristalde kırılma uğrayarak saçılır. saçılan ışın bir film üzerine düşürülürse kırılımlın deseni oluşur. Kırınım olayının ilk açıklaması Bragg tarafından yapılmıştır (Dildar, 2013).



Şekil 2.5 Işığın kristalde kırınımı (Özby, 2012).

Birbirine paralel kristal düzlemleri arasındaki mesafe d olursa, komşu iki düzlem arasındaki yol farkı $2d\sin\theta$ olmaktadır. Ardışık iki düzlemden kırılan dalgaların aynı fazda olması için yol farkının λ dalga boyunun tam katları olması gerekir(Dildar, 2013).

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) örgünün periyodik oluşunun sonucu olarak ortaya çıkıp ve Bragg yasası olarak ifade edilmektedir. Kırınımın gerçekleşebilmesi için $\lambda < 2d$ olmalıdır (Dildar, 2013).

2.1.3 İlk Brillouin Bölgesi

Fotonik kristallerde elektromanyetik periyodikliğe bağlı olarak fotonik kristalin band yapısı ortaya çıkmaktadır. Band yapısının oluşturulmasında Brillouin bölgeleri önemlidir çünkü, fotonik kristallerde yansımaları veren tüm dalga vektörleri Brillouin bölgesi içerisinde sınırlandırılır. Bir Brillouin bölgesi ters örgüde Wigner-Seitz ilkel hücresi olarak tanımlanır. Bu hücre en küçük hacimli bölgedir. Bu yüzden bu bölge içerisinde en küçük özdeğer yani girişim desenindeki en küçük frekanslı kip elde edilir. En küçük özdeğerün elde edildiği bu bölge birinci Brillouin bölgesidir (Erdiven, 2012). Buna göre,

$$\mathbf{k} = \mathbf{k} + \mathbf{G} \quad (2.2)$$

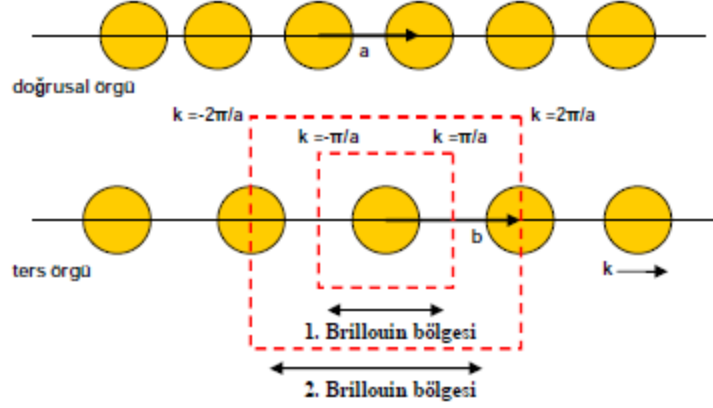
Burada \mathbf{k} 'yansıyan dalganın dalga vektörü, \mathbf{G} ters örgü vektörüdür. Her iki tarafın karesi alınırsa

$$K'^2 = K^2 + 2\mathbf{K}\mathbf{G} + G'^2 \quad (2.3)$$

olur. Dalganın esnek saçıldığı düşünülür $k'^2 = k^2$ olur.

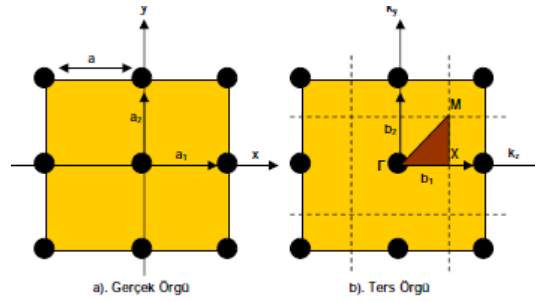
$$2KG=G^2 \quad (2.4)$$

Şekil 2.6’de tek boyutta kristal örgü ve ters örgüsü verilmektedir. Sınırlar $k = \pm \frac{\pi}{2a}$ ’dadır. Bu sınırlar 1. Brillouin bölgesini oluşturur (Erdiven, 2012).

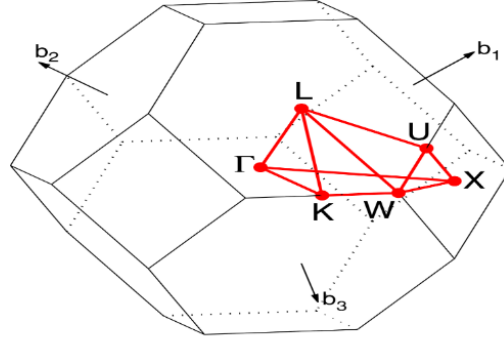


Şekil 2.6 Tek boyutlu doğrusal ve buna ait Brillouin bölgesi (Özbay, 2012).

Şekil 2.7’de iki boyutlu kare örgü verilmektedir. Şekil 2.7.a’da yapının gerçek uzaydaki a aralıklı kare örgüsü verilmektedir. Örgü vektörleri $1a$ ve $2a$ ile gösterilmektedir (Erdiven, 2012). Şekil 2.8 YMK yapının ilk Brillouin bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 2.7 iki boyutlu kare örgü ve buna ait Brillouin bölgesi (Shen, 2006).

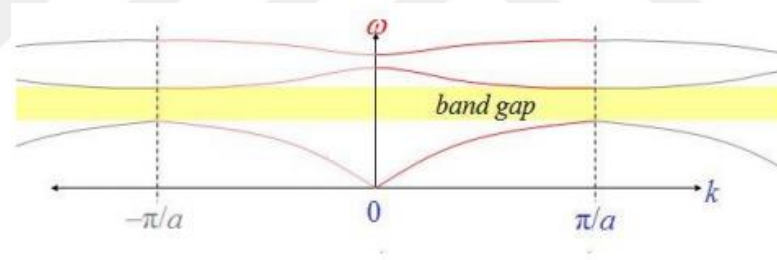


FCC path: Γ -X-W-K- Γ -L-U-W-L-K|U-X

Şekil 2.8 FCC ilk Brillouin (Camargo, 2003)

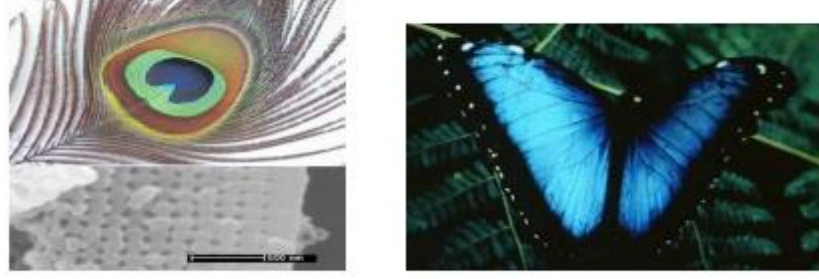
2.1.4 Fotonik Kristallerin Bant Yapısı

Fotonik de durduran veya yasak band veya enerjisi olmayan band aralığıdır ki bazı frekanslar veya dalga boyları o aralıktan geçemezler. Bu özellik bir çok uygulamalarda, mesela dalga kılavuzları tasarımında kullanılmaktadır.



Şekil 2.9 Band aralığı eğrisi (Özbay, 2012).

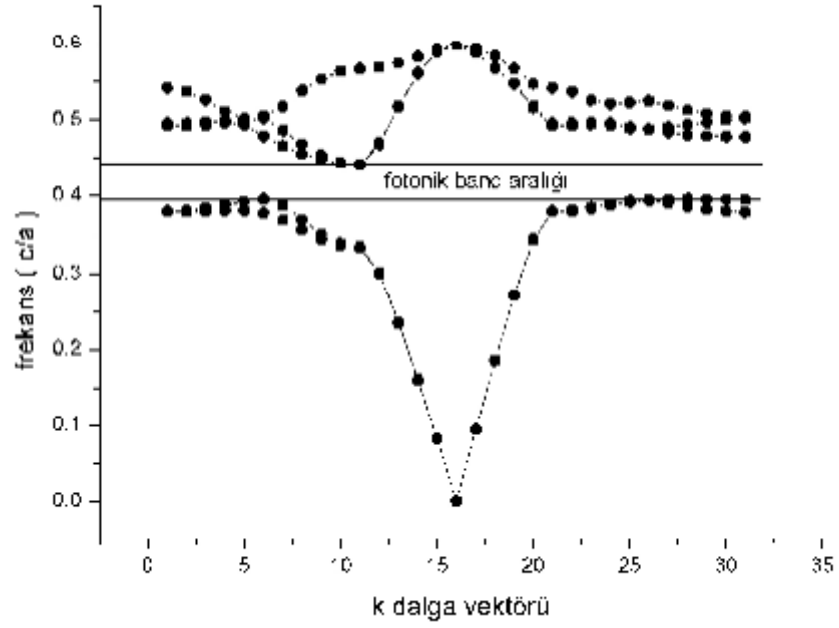
Fotonik kristallerde band aralığı etkisi doğada görülmektedir. Örneğin tavus kuşu kanadındaki renk periyodik mikroyapıdaki doğal olaylardan oluşur. Periyodik mikroyapılar kanatda bir band aralık oluşur ve bir sıra özel frekansların yayılmasını engellemekte ve sonuçta ışık geri dönüş yapıp, şeffaf renkler görünmektedir.



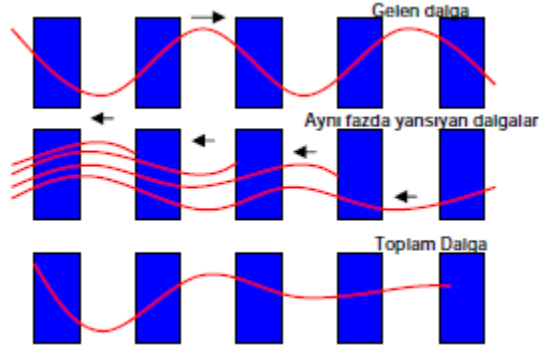
Şekil 2.10 Doğada olan fotonik kiristaller (Nozari, 2007)

Bu durumda fotonik kristallerin diğer kristallere benzer özellik taşıdığı noktalardan olan band yapısı ortaya çıkar. Kristallerin elektronik özellikleri incelendiğinde elektronlar valans ve iletkenlik bandında bulunur. Bu bantlarda elektronlara ait durum yoğunlukları vardır. Valans bandı ve iletkenlik bandı arasında, elektronların bulunmalarının yasak olduğu (durum yoğunluğu sıfır) band aralığı vardır. Aynı şekilde Şekil 2.11’de görüldüğü gibi fotonik kristallerde fotonlar valans bandına benzer dielektrik band, iletkenlik bandına benzer hava bandı içerisinde yer alır. Dielektrik band ve hava bandı arasında fotonların bulunmalarının yasak olduğu bölgeye fotonik band aralığı denir. Tek boyuttaki periyodik yapı boyunca elektromanyetik dalga, band aralığı aşağısındaki frekanslarda dielektrik band içerisinde olduğundan dielektrik çubuklara bağlı olarak, band aralığı yukarısındaki frekanslarda hava bandı içerisinde olduğundan dielektrik çubuklara bağlı olmadan yayılabilmektedir. Ancak fotonik band aralığı içerisindeki frekanslarda elektromanyetik dalga fotonik kristal içerisinde yayılamaz ve tamamen geri yansır (Erdiven, 2012).

Şekil 2.12’da gösterildiği gibi, band aralığı içindeki dalgaboyundaki dalgalar yapının her bir tabakasından geri yansır.



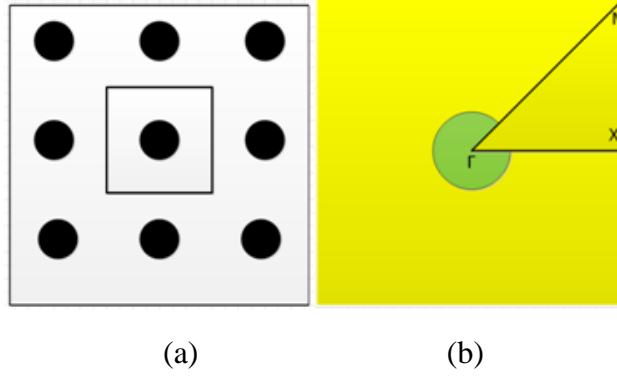
Şekil 2.11 Kristallerin fotonik özelliklerini gösteren genel fotonik band yapısı (Özbay, 2012).



Şekil 2.12 Band aralığı içerisindeki dalga boylarında dalgalar (Yablonovitch, 2001).

2.1.5 Kare Örgülü Fotonik Kristaller

Kare örgülü bir fotonik kristalin özelliklerini incelememize istinaden örgüye göre dizilmiş dielektrik çubuklardan oluşan fotonik Kristal Şekil 2.13.a'daki gibidir (Çetin ve ark., 2011).



Şekil 2.13 (a) Kare örgü şeklinde dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal (Örgü sabiti a , silindirik çubukların çapı $0.2a$ 'dır) (b) Ters uzayda simetri noktaları Γ , X ve M dir.

Şekil 2.13.a'daki yapının geometrisi ters uzayda Şekil 2.13.b'de gösterilmiştir. Bu yapının yasaklı bant aralığını hesaplayabilmek için indirgenemez Brillouin alanlarının kenarlarına denk gelen k dalga vektörlerinde yapının harekete izin verdiği frekansları hesaplamak gerekir. Bir bandın minimum ve maksimumları her zaman bu Brillouin alanının uçlarında görülebilir (Çetin ve ark., 2011).

2.1.6 Maxwell Denklemleri

Bu bölümde fotonik kristallerde elektromanyetik dalga hareketinin incelenmesi amaçlanmıştır. Elektromanyetik alanın bir ortam içerisindeki hareketi Maxwell denklemleri olarak ifade edilir. Temel elektrik ve manyetizma yasaları kullanılarak elde edilmiş olan 3 ana Maxwell denklemi bulunmaktadır (Dildar, 2013). Maxwell Denklemleri (SI birim sisteminde) aşağıdaki gibidir:

$$\nabla B = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla D = \rho \quad (2.6)$$

$$\nabla_x E + \frac{\partial}{\partial t} B = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla_x H - \frac{\partial}{\partial t} D = J \quad (2.8)$$

İlk iki eşitlik sırasıyla manyetik alan ve yer değiştirme alanı için Gauss yasaları olarak adlandırırken, . Son iki eşitlik sırasıyla, Faraday ve Amper yasaları olarak

bilinmekte dir. Bu denklemlerde E ve D sırasıyla elektrik alan ve elektriksel yer değiştirme, H ve B ise sırasıyla manyetik alan ve manyetik indüksiyona karşılık gelmektedir (Dildar, 2013).

2.1.7 Fotonik Kristal Uygulamaları

Fotonik kristaller, ışığın yayılmasını değiştirebilir. Elektromanyetik işlevsellikleri sayesinde malzemelerde çok geniş kullanıma sahiptirler. Bazı durumlarda özel bant yapıları, bant kenarı yakınında yavaş fotonlar içerebilmektedir. Fotonik kristallerin uygulama alanlarına fotonik kristal lifleri, ultra-düşük eşik lazerler, verimli ışık yayan diyotlar, ışın bölücüler ve kimyasal sensör malzemeleri örnek verilebilir. Bu yapıların optik özellikleri son derece duyarlıdır. Bu durum, kullanım esnasında son derece duyarlılık sağlar. Farklı alanlardaki bu uygulamalar, kafes içindeki hata dağılımının kontrolüyle de ilişkilidir (Sharifi, 2013).

2.1.8 Opal ve Ters Opal

2.1.8.1 Opaller

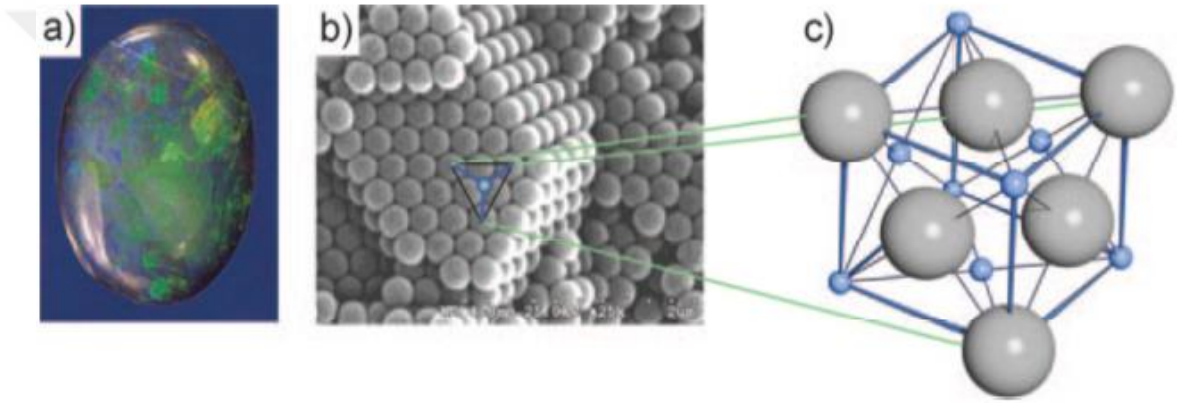
Fotonik kristal çalışmalarında duyulan “opal” ismi, adını opal taşından almaktadır. Bu taş, su içeren silika ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ortamında paketlenmiş silika kürelerden oluşan doğal bir 3D fotonik kristaldir. Suni opaller, sıkı paketlenmiş kürelerin 3D yapısını meydana getiren farklı metotlarla üretilmiştir.

Aslında opal yapı, tam fotonik bant aralığına sahip olamaz. Ancak kısmi bant aralığı, bu yapının infiltrasyonu ile gerçekleşir. Bu nedenle opallerin yapı taşlarından seçimi, bir sonraki planlanmış proseslere bağlıdır.

Silika; mekanik, kimyasal ve termal özellikleri sayesinde infiltrasyon için en iyi seçimdir. Diğer taraftan, çözünmesi daha zordur. Diğer durumlarda polimer küreler bazı avantajlara sahiptir. Daha iyi kristalleşme gösterirler. Farklı malzemelerle daha kolay bütünleşebilirler ve daha kolay çıkarılabilirler.

Ancak bazı dezavantajları da vardır. Polimer küreler ısıya karşı dirençli değildir. Kurutma esnasında çatlak oluşumuna neden olan belirgin büzülme gösterirler.

Kürelerin sıkı paketlenmiş yapısı, boşluğun %74'ünü kaplar. Bu kısım, hava ile dolu olan boş alandan daha yüksek kırılma indisine sahiptir. Ters opal durumunda, yüksek doldurma faktörü problemi bulunmaz. İlavenen teorik hesaplama, ters opal yapısının tam fotonik bant boşluğuna sahip olabileceğini göstermektedir. Ancak ters opal bant aralığı, sadece kırılma indeksi üzerinde meydana gelebilir (Sharifi, 2013).



Şekil 2.14 (a) Doğal Opal, (b) Girişim etkisiyle renk etkilerini sağlayan opal nano yapısının SEM görüntüsü ve (c) Nanoyapıdaki kafesin tarifi için kullanılan YMK kafes (Sharifi, 2013).

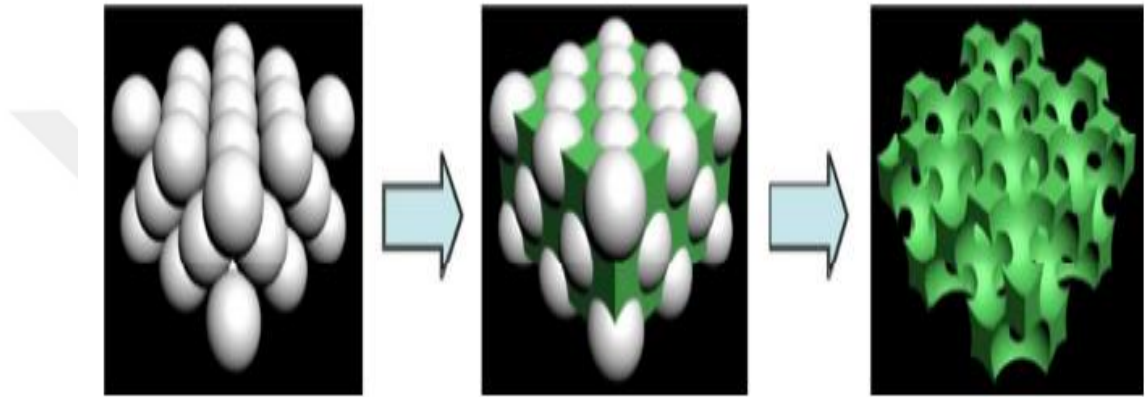
2.1.8.2 Ters Opaller

Ters opal yapısı, 3D fotonik kristal yapı için önerilen yapılardan biridir. Bu yapı, opal filmdeki koloidal kristaller ile çıkarılan küreler arasındaki boşluklar doldurularak elde edilmiştir. Burada opal, ters opal yapısı için şablon görevi görür.

İnfiltrasyon, gaz veya sıvı fazdan biri kullanılarak yapılabilir. Koloidal küreler, ön-katılaşmadan sonra çıkarılmalıdır. Opal filmlerde koloidal küreler daha çok polimer veya silis küre oldukları için ısı işlem, çözücü ekstraksiyonu veya kimyasal

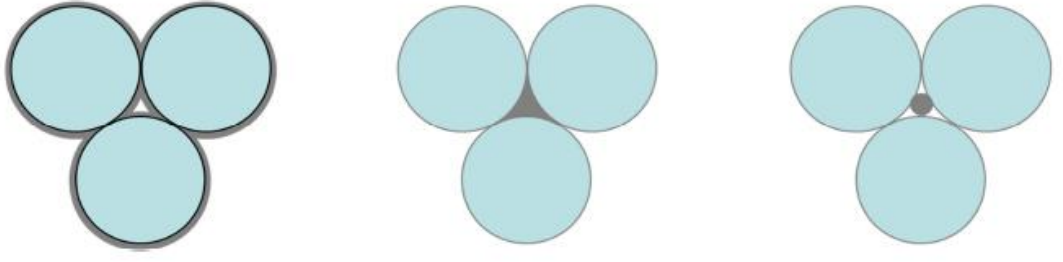
dağlama ile temizlenebilir. Sonuç olarak, kapalı paketlenmiş içi boş kürelerden oluşan makro gözenekli sağlam bir yapı kalacaktır.

Çeşitli malzemeler istenilen uygulamaya bağlı olarak, ters opal yapısına sahip sağlam bir ağ oluşturabilir. Bunlar karbon, metaller, yarı-iletkenler, polimerler, hidrojel, kompozitler gibi oksitler, üçlü oksitler veya oksit olmayan malzemeler olabilir.



Şekil 2.15 Ters opal hazırlanmasının genel adımları (Sharifi, 2013).

Deney koşullarından birisi değiştirilerek, bu morfolojinin değiştirilmesi mümkündür. Küreler ön-madde tarafından şiddetle ıslatılırsa, bir kabuk yapısı ortaya çıkacaktır. Küçük delikler, küreler arasındaki temas noktalarından beslenirler. Küreler arasındaki bütün boş kısımların doldurulmasıyla dolu bir hacim yapısı elde etmek mümkündür. Diğer bir morfoloji, küreler ve ön-madde arasındaki zayıf bir çekim kuvvetiyle elde edilir. Burada çubuk benzeri bir ağ ortaya çıkabilir. Bu yapıya, iskelet yapısı denir. Şekil 2.16 şematik olarak bahsedilen bütün bu olasılıkları göstermektedir.



Şekil 2.16 Ters opallerin 3 farklı morfolojisi. Soldan sağa; kabuk yapısı, dolu hacim yapısı, iskelet yapısı (Sharifi, 2013).

Farklı olasılıklar içinde malzeme seçiminde, farklı uygulamalar için istenen çeşitli gereksinimleri uygun özellikleri karşılayabilmesi nedeniyle titanyum dioksit dikkat çeker.

2.2 Simülasyon Metodları

2.2.1 Düzlem Dalga Metodu

Fotonik kristaller ve onlara ait fotonik bant aralıklarının dispersiyon özelliklerini hesaplamak için kullanılan metotlardan birisi düzlem dalga metodudur. Düzlem dalga metodu öz-frekansları ve bir yapı içindeki kiplerin özalanlarını bulmak için kullanılan bir frekans bölgesi (k , w) tekniğidir. Bu yüzden öz-değer problemini çözmek ve Eşitlik (2.8)'i kullanmak gerekir (Erdiven, 2012).

$$\eta(G - G') = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} d^3r \epsilon_r(r) e^{-i(G-G') \cdot r} \quad (2.9)$$

2.2.2 RSOF (Robinson Yöntem) Metodu

Klasik elektromanyetik'de pek çok hesaplama için kullanılan simülasyon araçları vardır: Bu hesaplama araçlarından en uygun olanlarından birisi RSOF algoritmasıdır. RSOF algoritması Maxwell eşitliklerini zamana bağlı olarak çözmek için düzenli bir örgü içerisinde uzay ve zamana ayırır. Maxwell curl eşitlikleri

diğerinin uzaysal değişiminin fonksiyonu olarak bir alanın zamandaki değişimi ile ilgilidir (Erdiven, 2012). Maxwell curl eşitlikleri

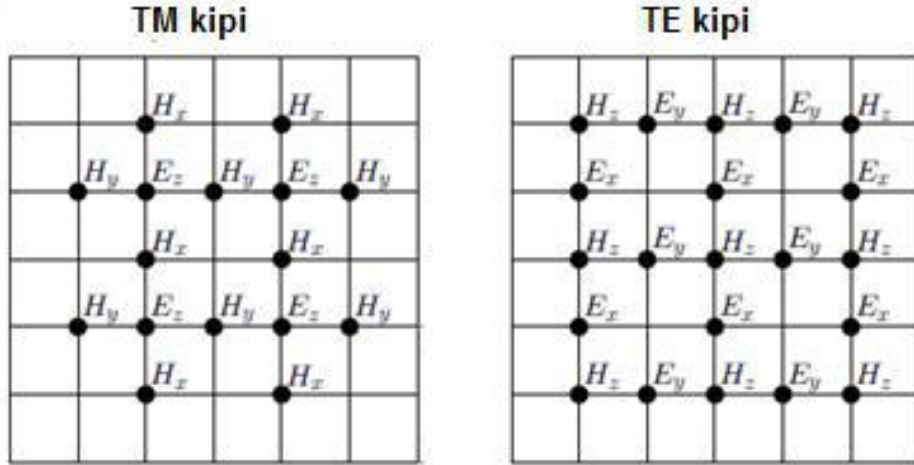
$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0 \mu} \nabla \times E \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \nabla \times H \quad (2.11)$$

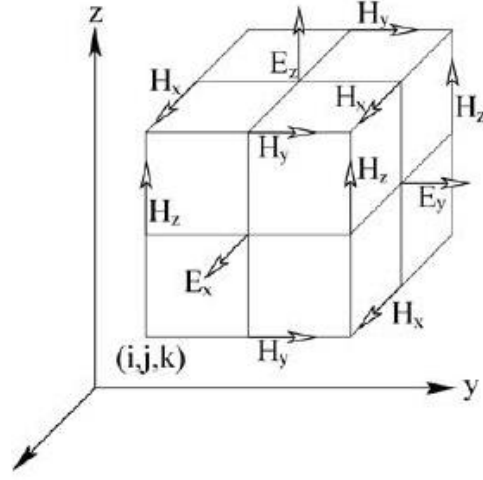
Kartezyen ve silindirik koordinatlara bağlı olarak alan hesaplamaları yapılabilir.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial t} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (2.12)$$

RSOFT, uzay ve zaman içinde elektrik ve manyetik alanları çözerken derecelendirir ve bu derecelendirmeyi yarım piksel ile her bir alan bileşenini kaydırarak farklı uzaysal bölgelere dağıtır. Bu Yee örgü ayrıklaştırılması (Yee grid discretization) olarak adlandırılır (Erdiven, 2012). Bu hücreler içerisindeki alanlar TM ve TE kutuplarına göre şekillendirilir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 Yee örgüsü içindeki TM ve TE dalgalarının 2 boyuttaki dizilimi



Şekil 2.18 Üç boyutta Yee örgüsü (Taflove, 2000).

Yee örgüsünün üç boyuttaki görünümü Şekil 2.18’de verilmektedir. Uzaysal hücrenin her bir düğüm noktası $(i, j, k) = (iDx, jDy, kDz)$ koordinatları ile tanımlıdır. Dx, Dy, Dz ise x, y, z yönleri boyunca olan uzaysal çoğalmaları ifade eder. Aynı şekilde, zaman adımı $n = nDt$ şeklinde tanımlanırken Dt zaman çoğalmasını ifade eder (Erdiven, 2012).

RSOFT’de önemli olan bir nokta da sınır şartının belirlenmesidir. Sınır şartları belirlenirken mükemmel uyum tabakaları (Perfect Matched Layers-PML) metodu kullanılır. Önemli olan diğer bir nokta ise alanların uzay içinde hızlı bir şekilde değişimine neden olan yapıları ağ (mesh) yapma durumudur. Bu yüzden Dt zaman çoğalmasını Dx, Dy, Dz uzaysal çoğalması cinsinden ifade etmek gerekir (Erdiven, 2012).

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2.13)$$

2.2.3 FDTD (Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi) Metodu

Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi metodu, zamana bağlı olarak uzay içindeki elektromanyetik alanların değişimini inceler. Sınırlı yapı içinde iletim ve yansıma spektrumlarını kolayca hesaplar. Ortam içerisinde dalganın yayılmasını zamana bağlı olarak gözlemlenmesini sağlar. Frekansa bağlı olma durumunu ve kayıpları, bu metod gözönünde tutar (Erdiven, 2012).



BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMALAR

3.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada silika esaslı fotonik kristal üretimi ve karakterizasyonu amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda malzeme üretimi için sol-jel infiltrasyon yöntemiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Üretimin ilk aşamasında şablon oluşumu için PMMA küreleri sentezi yapılmıştır. Bu işlem sonrasında elde edilen süspansiyon santrifüjlenerek PMMA koloidal kristali elde edilmiştir. Elde edilen PMMA koloidal kristali vakum ile sol-jel infiltrasyonu gerçekleştirilerek, toz elde edilmiştir. Elde edilen tozlara 550 Santigrad Derece’de kalsinasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon işlemi ile şablon olarak kullanılan PMMA koloidal kristali uzaklaştırılmıştır.

SEM, XRD ve PSD cihazları kullanılarak ilgili tozların karakterizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. XRD, SEM ve PSD cihazlarıyla sırasıyla tozların faz analizi, mikroyapıları ve partikül boyut dağılımı incelenmiştir. Bu bilgileri elde edildikten sonra uygulama üzerinde üretilen malzemelerin enerji aralığı ve fotonik kristali etkileyen optik ve yapı parametreler incelenmiştir.

3.1.1 Malzemeler

PMMA küreleri sentezi için saf su, monomer olarak metil metakrilat (MMA, % 99), başlatıcı olarak potasyum persülfat kullanılmıştır (Tablo 3.1). Bu malzemeler ile PMMA koloidal kristali üretilip sol-jel prosesine geçilmiştir. Sol-jel prosesi için TetraEthylOrthoSilicate (TEOS, %98), HCl (%37 su), etanol ve saf su kullanılmıştır. Ayrıca şablon olarak PMMA koloidal kristali sol-jel prosesi kapsamında şablon olarak kullanılmıştır. Bu malzemelere ait bilgiler Tablo 3.2’ de verilmiştir. Yukarıda adı geçen kimyasallar ile çözeltiler hazırlanıp toz üretimi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1 PMMA küreleri sentezi için kullanılan malzemeler ve formülleri

Katkılar	Formül
Metil Metakrilat (MMA)	$C_5H_8O_2$
Potasyum Persülfat	$K_2S_2O_8$
Saf Su	H_2O

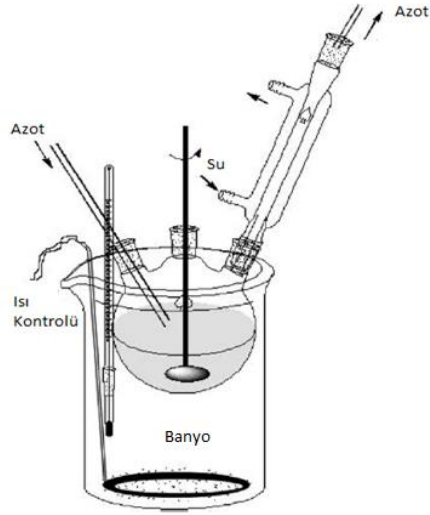
Tablo 3.2 Sol-jel prosesi için çözelti hazırlamada kullanılan malzemeler ve formülleri

Katkılar	Formü
TEOS	$SiC_8H_{20}O_4$
Hidroklorik asit	HCl
Etanol	C_2H_6O
Saf su	H_2O

3.1.2 Üretim Prosesi

3.1.2.1 PMMA Küreleri Sentezi

Bu çalışmada daha önce belirttiğimiz gibi silika esaslı fotonik kristal üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimin ilk aşamasında PMMA koloidal kristali için PMMA küreleri sentezi yapılmıştır. Bu proses kapsamında 180 ml saf su 300 rpm hızla karıştırmaya başlanmış ve atmosferin dengelenmesi için 30 dk. azot gazı verilmiştir. Daha sonra 20 ml metil metakrilat (MMA) sisteme eklenmiştir. Sıcaklığın 80 Santigrad Derece'ye çıkması beklenmiştir. Başlatıcı olarak, 20 ml suda çözdüğümüz potasyum persülfat sisteme eklenmiştir. Daha sonra iki saat reaksiyonun gerçekleşmesi için karıştırmaya devam edilmiştir. Bu sistem için kullanılan düzenek Şekil 3.1 ve 3.2' de verilmiştir.



Şekil 3.1 PMMA küreleri sentezi deney düzeneği şematik gösterimi (Chan, 2007).



(a)

(b)

Şekil 3.2 (a) PMMA küreleri sentezi deney düzeneği ve (b) sentez sonrası elde edilen süspansiyon.

3.1.2.2 Santrifüjleme

PMMA küreleri sentezi sonrasında süspansiyon olarak elde ettiğimiz PMMA kürelerine üç farklı süreyle santrifüjleme işlemi uygulanmıştır. Tüplere eklenen süspansiyonlar santrifüjleme cihazına eklenmiştir (Şekil 3.3). İlk olarak bir saat süreyle 4000 rpm hızda, ikinci olarak iki saat süreyle 4000 rpm hızda ve son olarak

24 saat süreyle 1500 rpm hızla santrifüjleme yapılmıştır. Santrifüjlüme sonrasında suyu alınarak oluşan çamur 1 hafta kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.3 Santrifüjleme cihazı



Şekil 3.4 Santrifüjleme sonrası kuruyan tozların görüntüleri

Kuruma işleminden sonra elde edilen tozların (Şekil 3.4) mikro yapısına bakılarak kürelerin oluştuğu görülmüştür. Vakum ile sol-jel infiltrasyon prosesinde şablon olarak kullanmak için hazır hale gelmiştir.

3.1.2.3 Vakum ile Sol-jel İnfiltrasyon

Sol-jel prosesi için sırasıyla 8 ml etanol, 12 ml TEOS 6 ml saf su cam beher içerisine eklenerek karıştırma işlemine başlanmıştır. Karıştırma sırasında sisteme 2 ml hidroklorik asit damla damla eklenerek 30 dk. karıştırma işlemine devam edilerek solüsyon hazırlanmıştır.



Şekil 3.5 Vakum ile infiltrasyon deney düzeneği

Bu süreç kapsamında vakumla infiltrasyon işlemi için düzenek hazırlanmıştır (Şekil 3.5). Düzenekte bulunan huni içerisine filtre kâğıdı eklenerek etanolle ıslatılmıştır. PMMA koloidal kristalleri huni içindeki filtre kâğıdı üzerine eklenerek vakuma başlanmıştır. Oluşturduğumuz solüsyon pipet yardımıyla tozların üzerine damla damla eklenerek tüm yüzey ile nüfuz etmesi sağlanmıştır (Şekil 3.6). Bu işlemden sonra, bir saat boyunca vakuma devam edilmiştir. Bu işlem sonrasında tozlar kurumaya bırakılarak 24 saat beklenmiştir. Böylece şablon olarak üretilen ve sol- jel prosesi içerisinde hazırlanan solüsyonun, PMMA küreleri etrafına dizilerek çerçeve oluşturması sağlanmıştır.

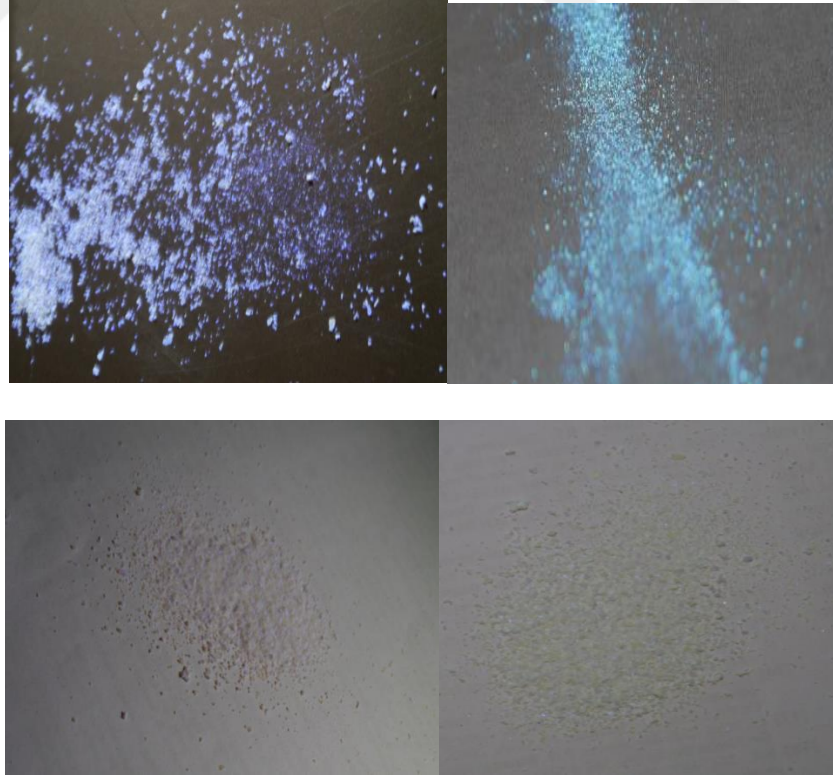


Şekil 3.6 Huni içerisinde PMMA tozları görüntüsü.

3.1.2.4 Kalsinasyon

Sol- jel prosesi sonrasında polimer şablonu kaldırmak için kalsinasyon işlemine geçilmiştir. Kalsinasyon prosesi kapsamında elde edilen toz ürünler, 25 Santigrad Derece'den 300 Santigrad Derece'ye dakikada 2 Santigrad Derece artırılıp 300 Santigrad Derece' de 5 saat beklenmiştir. Daha sonra 300 Santigrad Derece'den 550 Santigrad Derece'ye dakikada 2 Santigrad Derece artırılarak 550 Santigrad Derece' de 12 saat beklenmiştir. Daha sonra ürün fırın içinde soğumaya bırakılmıştır. Kalsinasyon sonrası elde edilen tozlar Şekil 3.7' da gösterilmiştir.

Kalsinasyon sonrası elde edilen tozların görüntüleri Şekil 3.7'de görülmektedir. Elde edilen tozlar görünür ışık altında gözle muayene edildiğinde farklı bakış açılarına göre renk değiştirdikleri görülmektedir. Şekil 3.7'deki resimlerde mor, turkuaz, açık yeşil ve pembemsi renklerin varlığı saptanmıştır. Elde edilen tozların XRD, SEM ve ZETA Sizer cihazlarında karakterizasyon işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.7 Kalsinasyon sonrası elde edilen tozların görüntüleri

3.1.3 Malzeme Karakterizasyon

3.1.3.1 X-Işınları Difraksiyonu (XRD)

Sol-jel yöntemiyle üretilmiş tozlarda mevcut fazların tespiti, X-ışınları difraksiyon analiz yöntemiyle Rigaku D/MAX-2200/RC marka difraktometre kullanılarak tespit edilmiştir. Ölçümler Cu tüpüne 40 kV voltaj ve 30 mA akım uygulanarak CuK_{α} ışınımı ($\lambda=0,15418$ nm) kullanılarak yapılmıştır. Işın demeti maddenin üç boyutlu kristal kafeslerini difraksiyona uğratmakta ve bu maddeye ait difraksiyon desenleri elde edilmektedir. Difraksiyon desenlerinin incelenmesi ve bileşiminin belirli standart desenleri ile karşılaştırılması sonucu maddenin kristal yapısı ortaya çıkmıştır.

3.1.3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Tozların mikro yapıları ve yüzey özelliklerini belirlemek amacıyla JEOL JSM-6060 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu çalışması; yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların bir numune üzerine gönderilmesi sonucu, elektronlarla numune atomları üzerinde oluşan çeşitli etkileşimlerden yararlanılarak yapılması prensibi ile oluşur.

3.1.3.3 Tane Boyutu Analizi (PSD)

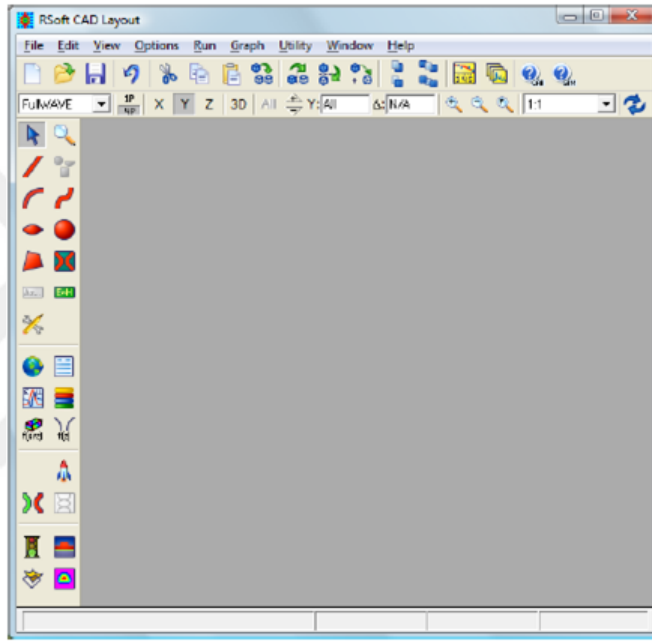
Kalsinasyon işlemi sonrası üretilen tozların tane boyutu analizi için Malvern PSD ZS90 cihazı kullanılmıştır. Ölçümleri yapabilmek için dispersant olarak su ve oda sıcaklığında işlemler yapılmıştır.

3.2 Numerik Çalışmalar

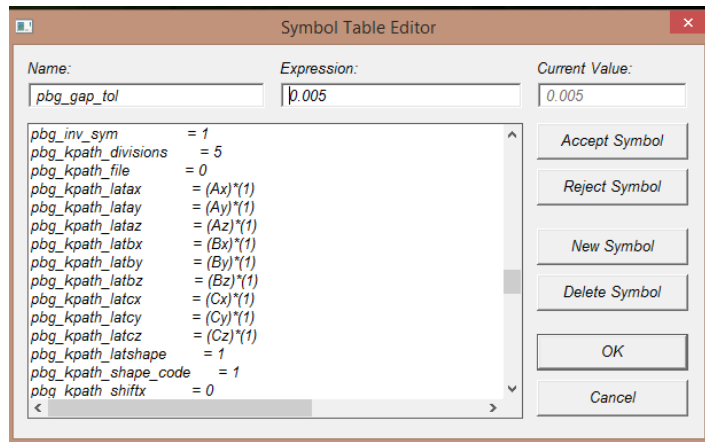
RSOFT programı kullanılarak üretilen silika esaslı fotonik kristallerin simülasyonu yapılmıştır. Burada modelleme, tasarım ve nümerik çalışmalar

yapılmıştır. Program kurulup ve çalıştırıldıktan sonra Şekil 3.8’de görüldüğü gibi açılmaktadır. Programda parametreler tanımlanarak tasarım işlemleri yapılmıştır.

Tasarıma başlamadan önce simülasyon için istenilen parameterelerin girilmesi ve hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu işlemi yapmak için Edit Symbols tıklayıp, gereken pencere Şekil 3.9’da gösterildiği açılmaktadır. “New Symbol” tıkladığında “NAME” parametresiyle adı ve “Expression” ile miktarı girilmektedir. Son onay için “Accept” sembolü tıklanmaktadır. Bunun sonucu olarak “Pbg_gap_tol =0.005”, “Bbetap=9” ve “Beta=betap/Period” yapılmaktadır.

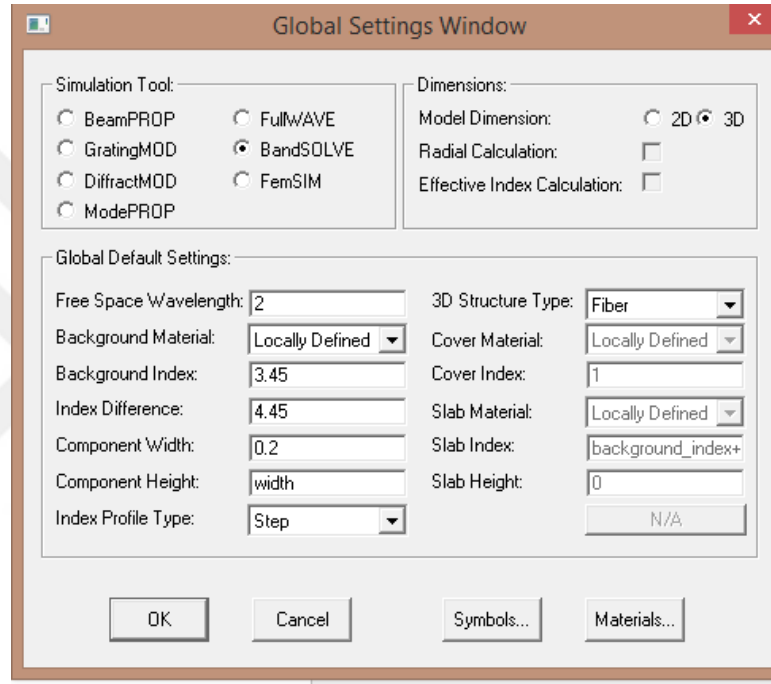


Şekil 3.8 RSOFT yazılımı iletişim penceresi



Şekil 3.9 Parametr tanımlama penceresi

“New Circuit” tıkladığında ve Şekil 3.10’deki gibi bir durum bulanmaktadır. Bondsolve seçip ve aynı zamanda simülasyon alanında 3D seçilmektedir. Genel parametre bölümünde ise dalga boyun 2 μm ve tane boyutlarında 0.2 μm seçilmektedir. Burada alt yapının kırılma indisi 3.45 ve indis farkı 4.45 girilmektedir. Bu rakamı seçmek kürelerimizin havadan oluştuğunu ifade etmektedir. Fotonik kristal kafesi yapmak için “Utility” kısmı tıklanıp, “Arrey Layout” seçilmektedir. Bu işlemle Şekil 3.11’de gösterilen gibi bir pencere açılmaktadır.



Şekil 3.10 Genel parametreler bölümü

Programın “Dimensions” kısmında üretilen fotonik kristalin yüzey merkezli kubik (YMK) yapısı olduğu için, 3 boyutlu seçilip ve “Lattice Type” ‘da yapının tipi YMK olarak seçilmektedir. “Lattice size” ‘da fotonik kristalin sayısı her yönde tanımlanabilmektedir. “Unit Cell” bölümünde tanelerimizin hangi yapıda gerektiği seçilmektedir. Burada üretilen tane yapısı küresel yapıda seçilmektedir.

Belli kırılma indisi ile, 10*5*7 boyutta ve 3D koordinatlarında YMK fotonik kristalin band aralığını bulmak için ayarlanmalıdır.

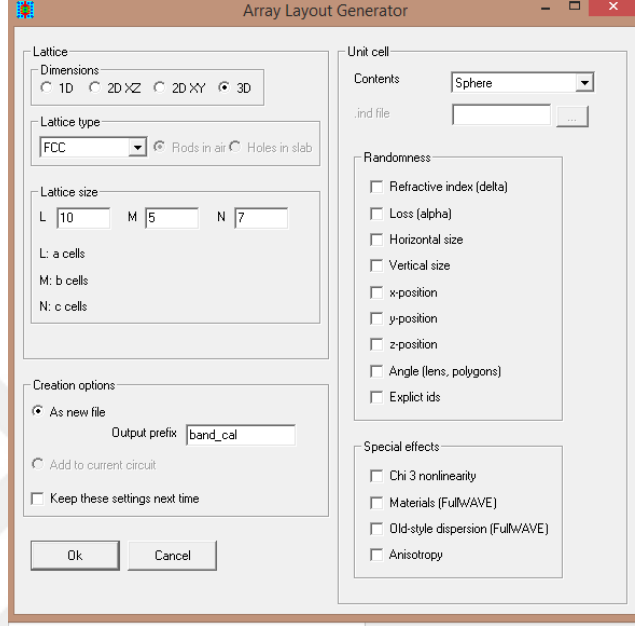
Lattice Dimension: 3D

Lattice Type: YMK

Lattice Size: L=10, M=5, N=7

Unit cell Contents: Circle

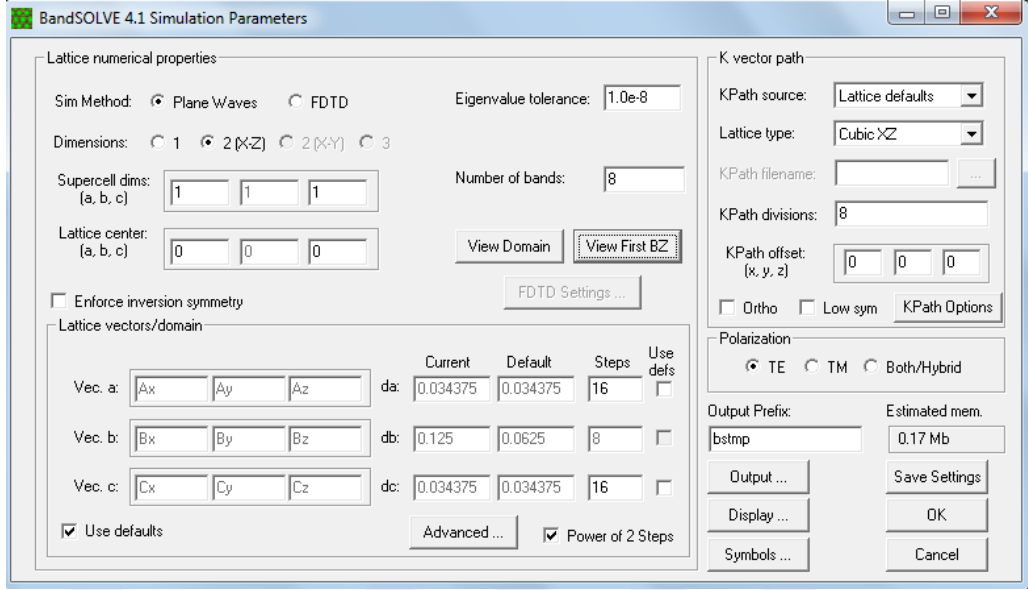
Output prefix: band_cal



Şekil 3.11 Fotonik kristal kafes penceresi

Son onaydan sonra beklenen yapı düzenlenmektedir. Buraya kadar istenilen yapıyı oluşturmak sağlanmıştır. Fakat fotonik kristallerle ilgili iki önemli parametre hala belirlenmemiştir. Bunlar birisi kafes parametresi ve diğeri ise kürelerin yarıçapıdır. Bu iki parametreyi belirlemek için tasarım alanında “EDİT” sembolü tıklamakla ve burada “period” parametresi seçerek istenilen rakamları girmektediriz. Kafes parametrimiz 540 nm ve yarıçapının kafes parametresi 0.37 alınmıştır.

Yapıyı analiz yapmak için “Perform Simulation” seçeneği seçilmektedir. “BOND SOLVE” simülasyon penceresini açmak için tıklanmaktadır. Bu pencere Şekil 3.12’de gösterilmiştir. “Simulation Method” bölümünde, “plane” ve “wave” seçilmektedir. Kafesin merkezi koordinatlarını görmek için aynı zamanda “Lattice Center” ile belirlenmektedir. İlk Brillouin alanını görmek için “Viwe First BZ” tuşuna tıklanmaktadır.



Şekil 3.12 Band solve simülasyon ayarları

“Number of bands” kısmında gereken band sayısını belli edilmektedir. “Polarization” kısmında ise TE veya TM modunda olup olmasını veya ikisini aynı zamanda gösterilmesi belirlemektedir. Bunun sonucunda “OK” denilip sonuç bulunmaktadır.

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

4.1 Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

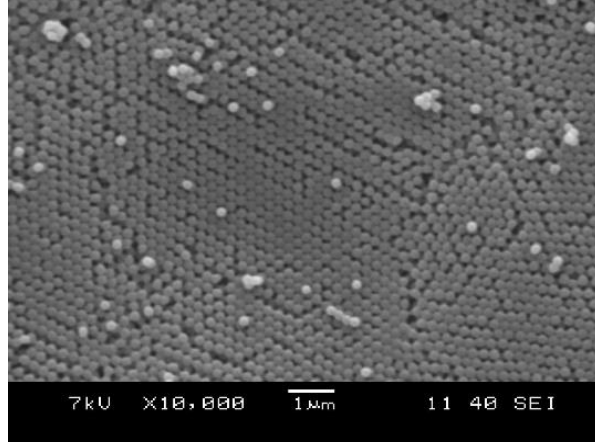
Opal üretimi için vakum ile sol-jel infiltrasyon yöntemi kullanılarak tozlar üretilmiştir. Bu tozların üretimi kapsamında ilk aşamada şablon olarak kullanılmak üzere PMMA küreleri sentezi ile PMMA tozları elde edilmiş olup, süreç optimizasyonu açısından kürelerin oluşup oluşmadığının istenen değerlerde olup olmadığının tespiti için karakterizasyon işlemi gerçekleştirilerek tozların mikroyapı özellikleri incelenerek, istenen değerlerde olduğu saptanmıştır.

Karakterizasyon işlemi sonrası başarı sağlanmasının ardından vakum ile sol-jel prosesine geçilerek PMMA küreleri etrafında silikanın çerçeve oluşturması sağlanmıştır. Daha sonra oluşan tozlar belli bir sıcaklık rejimine göre kalsine edilerek PMMA tozlarının uzaklaşması sağlanmıştır. Elde edilen toz ürün karakterizasyon yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

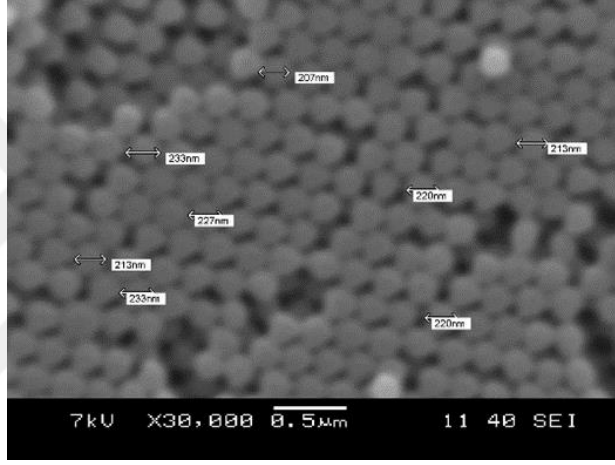
4.1.1 Malzeme Karakterizasyonu

4.1.1.1 Mikroyapı Analizleri

PMMA küreleri sentezi yapıldıktan sonra, PMMA küreleri için SEM analizleri yapılmıştır. Bu analiz neticesinde kürelerin oluşup oluşmadığı periyodik dizilime sahip olup olmadıkları saptanmıştır. Aşağıda farklı reaksiyon sürelerinde ve farklı santrifüjleme sürelerinde hazırlanmış PMMA tozlarına ait SEM mikrografları görülmektedir. Elde edilen mikrograflar genel anlamda incelendiğinde reaksiyon süreleri ve santrifüjleme süreleri açısından 2 adet değişken ile dizilimleri ve küre çapları hakkında yorum yapılabilir.



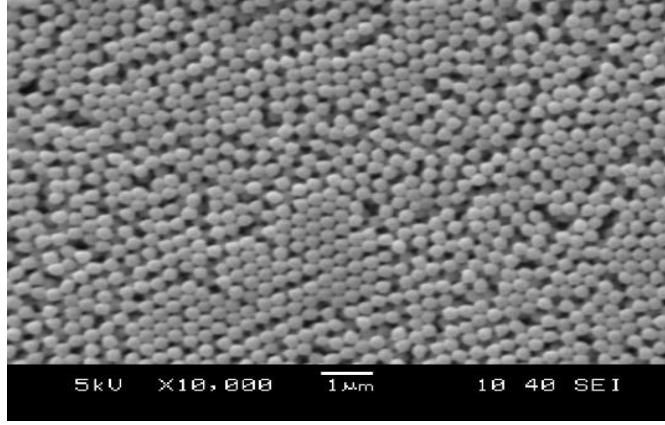
(a)



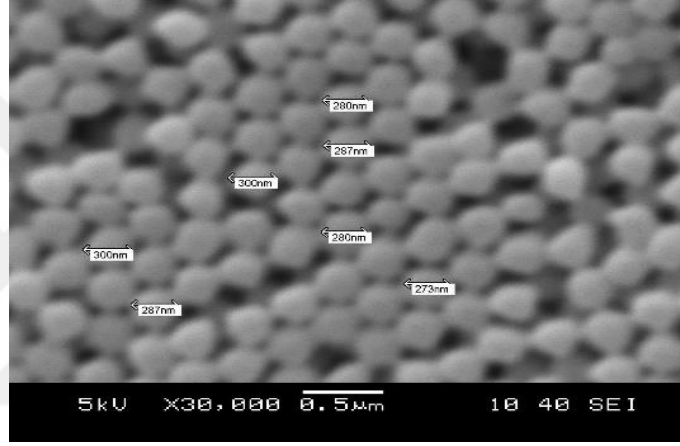
(b)

Şekil 4.1 (a) bir saat reaksiyon ve (b) bir saat santrifüjleme sonrası PMMA kürelerinin SEM görüntüleri.

Reaksiyon süresini değiştirmek suretiyle kürelerin dizilimleri hakkında yorum yapılabilir. Örneğin ilk olarak Şekil 4.1’de bir saat reaksiyon süresinde hazırlanmış ve bir saat santrifüjlenmiş numunelerin, Şekil 4.2’de iki saat reaksiyon süresinde hazırlanmış ve iki saat santrifüjlenmiş numunelerin ve Şekil 4.3’te iki saat reaksiyon süresinde hazırlanmış ve 24 saat santrifüjlenmiş numunelerin 10000X ve 30000X büyütmede çekilmiş görüntüleri incelenmiştir.



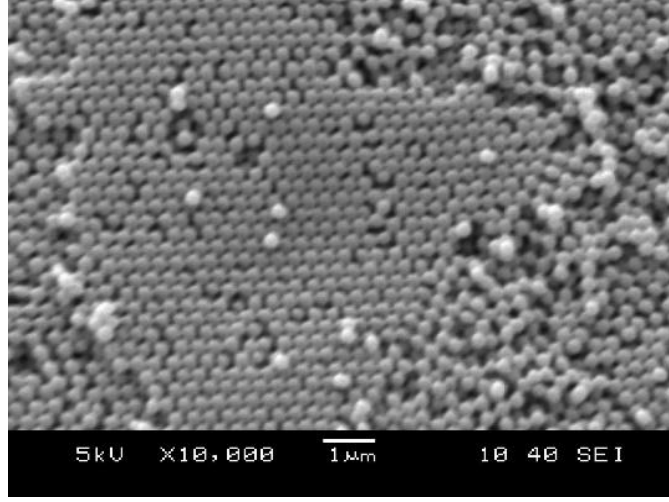
(a)



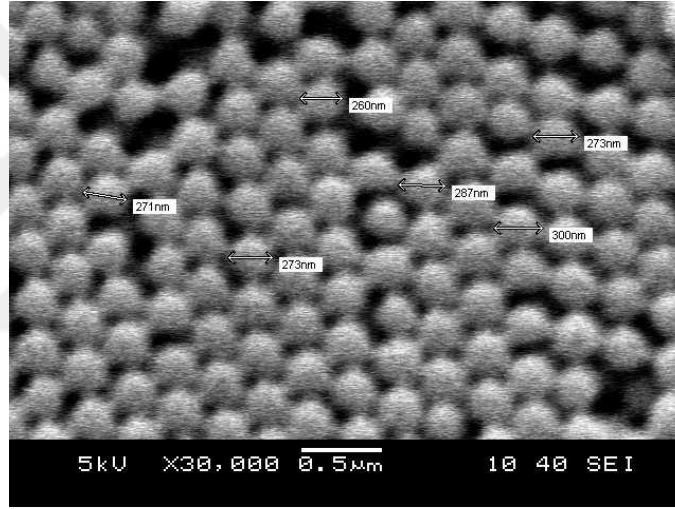
(b)

Şekil 4.2 (a) iki saat reaksiyon ve (b) iki saat santrifüjleme sonrası PMMA kürelerinin SEM görüntüleri.

Şekil 4.1' deki SEM görüntülerine göre bir saat reaksiyon süresiyle hazırlanan ve bir saat santrifüjleme yapılan numunede kürelerin diziliminin diğerlerinden daha düzenli olduğu görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 4.2'de iki saat reaksiyon süresi ve iki saat santrifüjleme ile hazırlanan numunenin görüntüleri incelendiğinde, bir saat reaksiyon süresi ve bir saat santrifüjleme ile hazırlanan numuneye göre daha düzensiz, Şekil 4.3'te iki saat reaksiyon ve 24 saat santrifüjlenen numunenin görüntülerine göre daha düzenli olduğu gözlemlenmektedir.



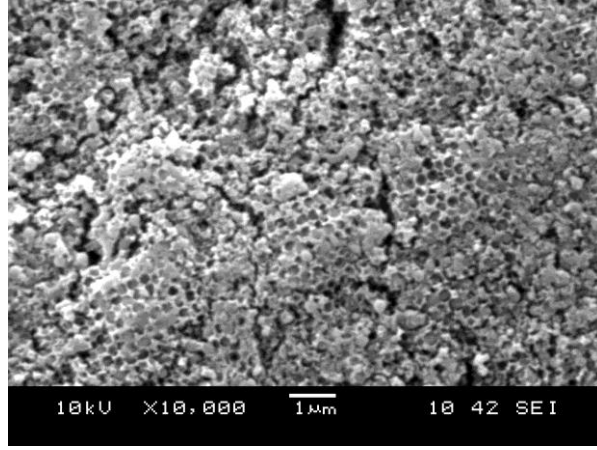
(a)



(b)

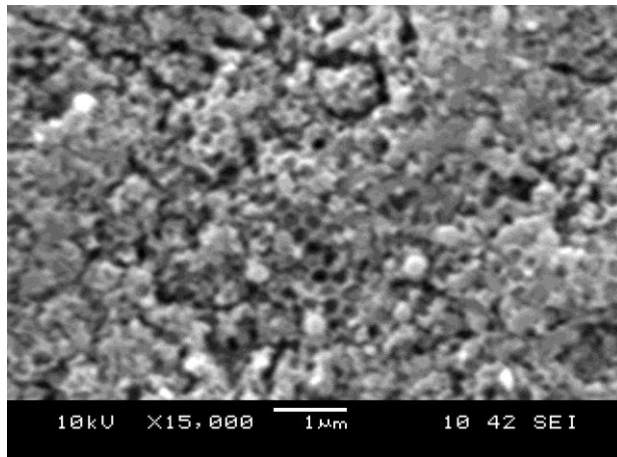
Şekil 4.3 (a) iki saat reaksiyon ve (b) 24 saat santrifüjleme ile elde edilen PMMA kürelerinin SEM görüntüleri.

Görüntüler incelendiğinde en düzensiz dizilim iki saat reaksiyon süresi ve 24 saat santrifüjleme süresiyle hazırlanan numuneye ait olduğu saptanmaktadır. Küre çapları açısından bakıldığında ise yine aynı sonuçla karşılaşılmaktadır. Reaksiyon süresi ve santrifüjleme süresi arttıkça kürelerin çaplarında göreceli bir artış gerçekleşmektedir.



Şekil 4.4 Opal yapısı 10000X SEM görüntüsü

Şekil 4.4 ve 4.5’de üretilen opalin SEM görüntüsü görülmektedir. Sol-jel prosesi sonrası kalsinasyon ile uzaklaştırdığımız PMMA şablonun etrafında silikanın çerçeve oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.4 incelendiğinde, 10000X büyütme ile oluşan görüntüde, gözenekli yapıyı elde edildiği görülmektedir. Vakum ile sol-jel infiltrasyon yöntemi kullanarak elde edilen opalin kalsinasyon işlemi sonrasında elde edilen bu görüntülerde, kalsinasyon işleminde yok olan PMMA kürelerinin yerlerinde boşluk oluştuğu saptanmıştır. Şekil 4.5’e bakıldığında, yine aynı şekilde boşlukları daha yakından görmek mümkündür. PMMA kürelerinin üretim koşullarına bağlı olarak, oluşan bu çerçevelerin boyutları değiştirilebilir.

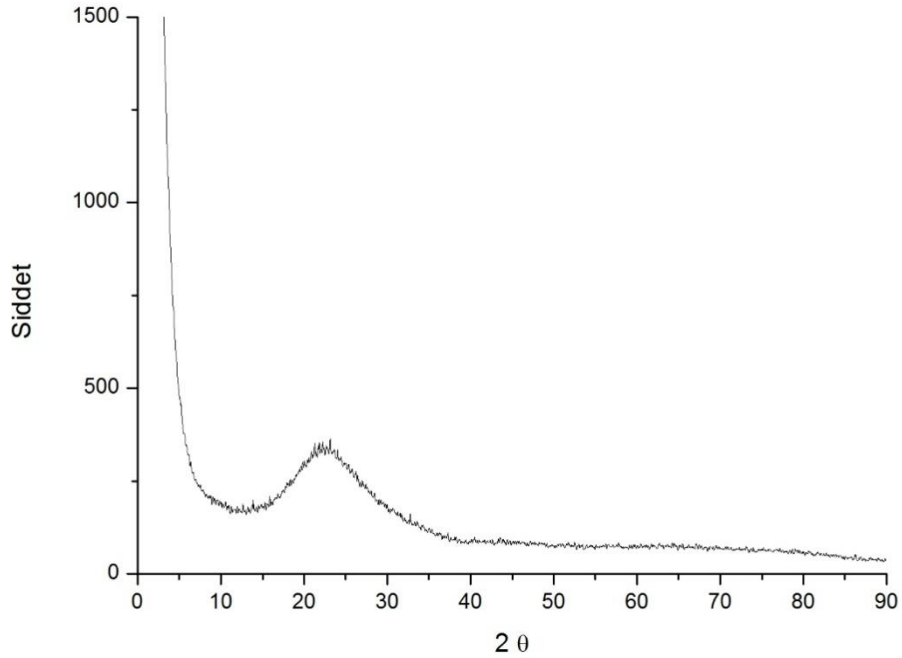


Şekil 4.5 Opal yapısı 15000X kristal SEMgörüntüsü

PMMA küreleri sentezi prosesinde yaptığımız çalışmalarda ve karakterizasyon sonrası elde ettiğimiz sonuçlara bakıldığında küre boyutları ve dizilimlerin düzenliliği, deney aşamalarına göre farklılık göstermekteydi. Tüm bu koşullar göz önüne alınarak PMMA kürelerinin boyutları değiştirilebilmekle beraber istenilen boyutlarda elde edilebilir. Bunun sonucunda yapılacak vakum ile sol- jel infiltrasyon deneyi ve kalsinasyon sonrasında oluşacak gözeneklerin boyutları istenilen şekilde ayarlanabilir.

4.1.1.2 Faz Analizi

Üretilen numunelerin karakterizasyon çalışmalarında XRD analizi Şekil 4.6’te görülmektedir. Analiz sonrası silika esaslı numunemizin amorf olduğu sonucuna varılmıştır. Üretilen malzemenin faz dönüşüm sıcaklıklarında kalsine edilmediği için herhangi bir faz dönüşümüne uğramadan amorf yapısını korumuştur. Bu yüzden XRD paterninde herhangi bir pike rastlanmamıştır.

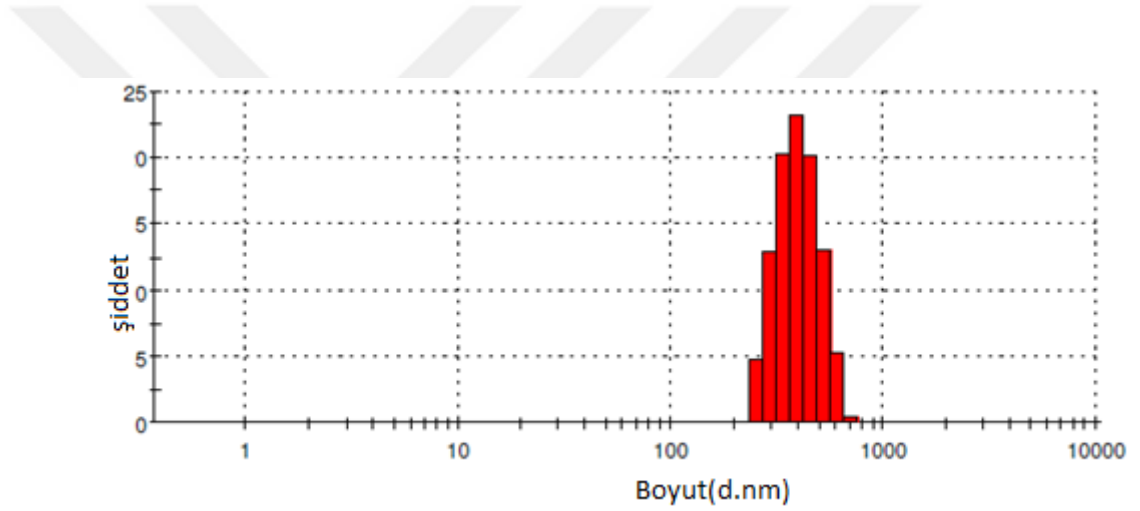


Şekil 4.6 Opal örneğın XRD paterni.

4.1.2 Partikül Boyut Analizi

4.1.2.1 PMMA Küreleri İçin Partikül Boyut Analizi

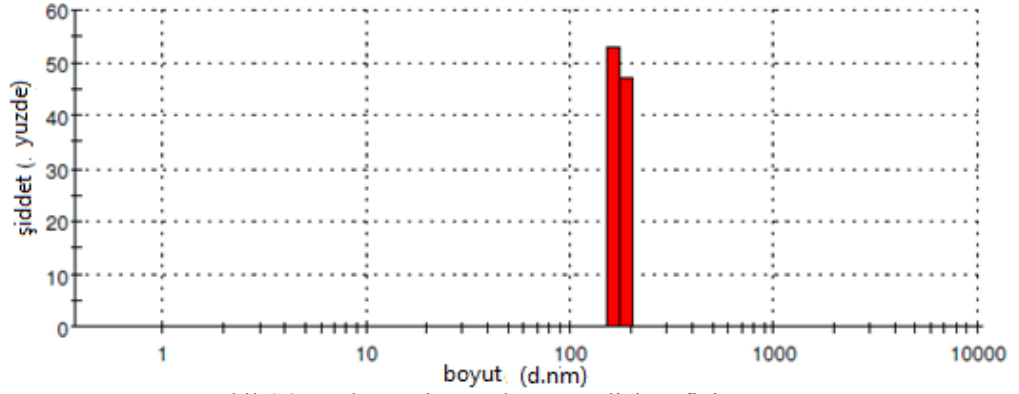
Şekil 4.7’da PMMA küreleri için yapılan partikül boyut analizinin yoğunluk–boyut grafiği verilmiştir. Bu grafikten elde edilen verilere göre partikül boyutunun 150 nm ile 850 nm arasında değiştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre partiküllerin % 23 ünün 400 nm boyutunda olduğu anlaşılmaktadır. Tamamen homojen bir dağılım göstermemekle birlikte, göreceli olarak iyi bir dağılım gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.7 PMMA küreleri için tane boyutu analizi grafiği (Erdem, 2014).

4.1.2.2 Silika Esaslı Fotonik Kristali Partikül Boyut Analizi

Şekil 4.8 de üretmiş olduğumuz silika esaslı fotonik kristal numunesi için yapılan partikül boyut analizine ait yoğunluk- boyut grafiği görülmektedir. Grafikten elde edilen sonuçlara göre partikül boyutunun 180 nm ile 200 nm arasında olduğu görülmektedir. Partikül dağılımına bakıldığında partiküllerin %55’ inin 160 ile 180 nm arasında, %45’ inin ise 160 ile 180 nm arasında değiştiği sonucu çıkmaktadır. Bu grafik için homojen bir dağılım olduğu söylenebilir. Ayrıca partiküllerin dar bir aralıkta çıkması ve partikül boyut değerlerinin birbirlerine yakın olması oldukça iyi bir dağılım olduğunu göstermektedir.



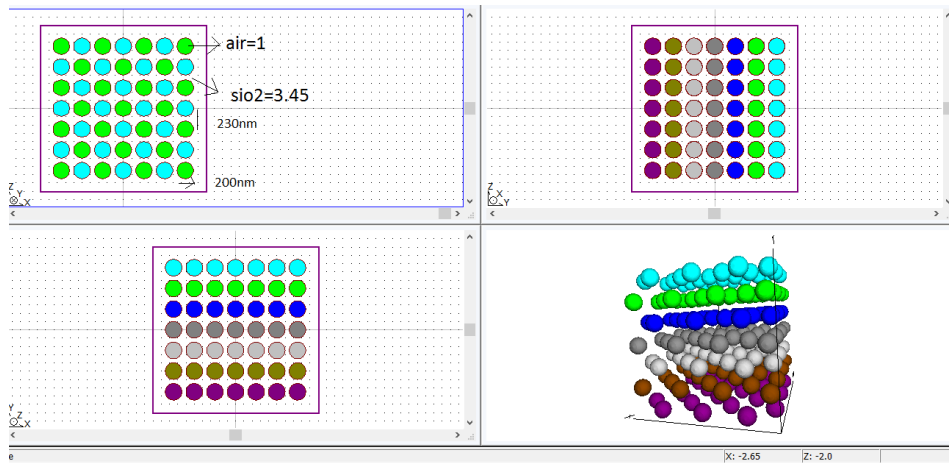
Şekil 4.8 Opal örneğin tane boyut analizi grafiği.

4.2 Numerik Sonuçların Değerlendirilmesi

Fotonik kristallerin özelliklerini incelemek ve geometrisini araştırmak için gerekli bilgileri elde ettikten sonra RSOF yazılımı kullanılarak üretilen fotonik kristalin enerji aralığı bulunup, geometrisi simüle edilmiştir.

4.2.1 Geometri Tasarımı

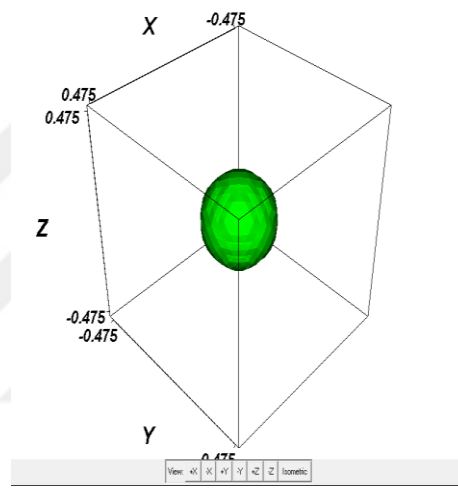
Şekil 4.9' da PMMA küreleri için yapılan partikül tasarımı verilmiştir. Bu geometriden elde edilene göre parçacık boyutu 200 nm gözükmektedir. 3D fotonik kristal 3 farklı yönde yani x, y, ve z yönünde göstermektedir aynı zaman da 3 boyutlu geometrisi de elde edilmiştir.



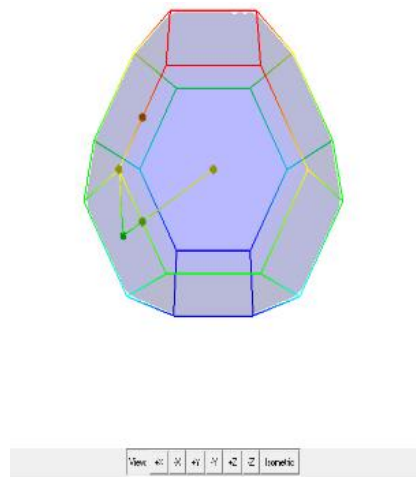
Şekil 4.9 Üretilen silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.

4.2.2 İlk Brillouin Bölgesi ve Domain

PMMA küreleri geometrisin tasarladıktan sonra, yaptığımız silika esasli fotonik kristaller için ilk Brillouin bölgesi ve domain yapılmıştır. Bu tasarım neticesinde simlasyonun dogru yolda yürüyüb yürümemesini gösteriyor. View domain simülasyonun dogru olduğunu ispatlamak için çok önemlidir. Bu simülasyonda kafesin ortasin koordinat kaynağı farz ediyoruz. View domain bir partikül alanın gösteriyor.



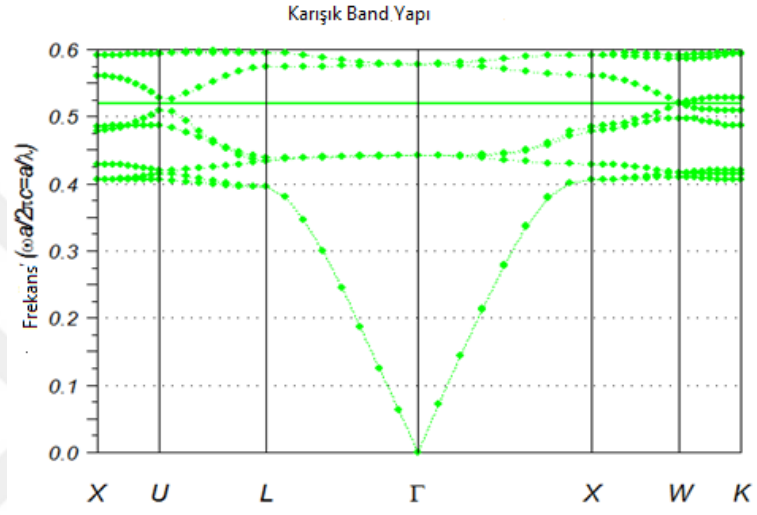
Şekil 4.10 Domain



Şekil 4.11 İlk Brillouin bölge.

4.2.3 Band Yapısı

Tez kapsamında yapılan simülasyon çalışmalarının en önemli bölümü olan enerji aralığını bulmaktır. Analiz sonrası silika esaslı numunenin amorf olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen enerji aralığı herhangi bir aralığa raslanmamıştır. Sadece çok yüksek şiddetlerde küçük bir aralık görünmektedir (Şekil 4.12).

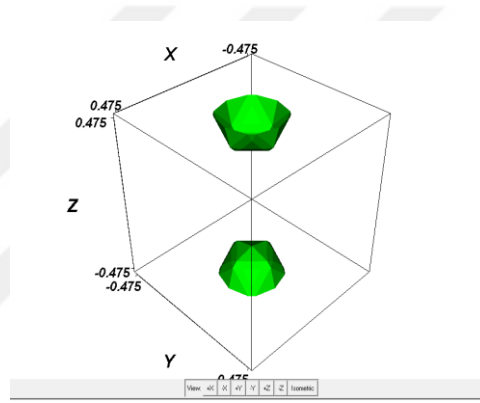


Şekil 4.12 Üretilen fotonik kristalin band yapısı.

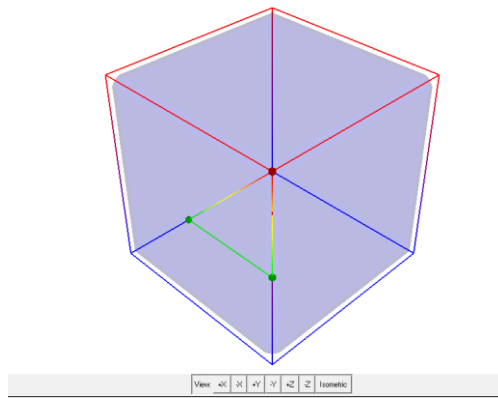
4.3 Optimizasyon

Daha önce vurguladığımız gibi bu tez çalışmasının amacı ilk olarak üretilen silika esaslı fotonik kristalin simüle edilmesi ve daha sonra bilgisayar ortamında elde ettiğimiz veriler ışığında fotonik kristal üretiminin optimize edilmesidir. Böylece silika esaslı fotonik kristallerin modelleme yoluyla araştırılması öngörülmektedir.

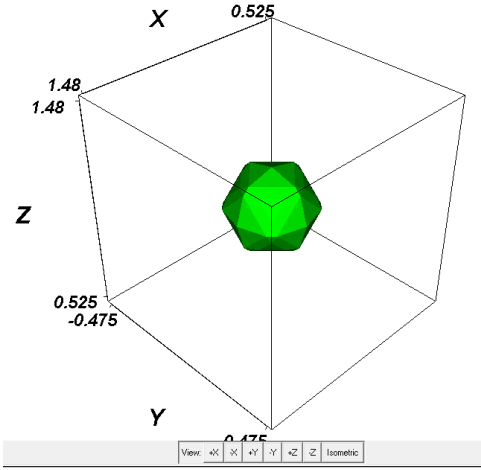
Çalışmanın bu kısmında tasarlanacak olan fotonik kristalin, fotonik bant aralığı bulunacak ve hangi renk skalasında ışık yansıttığı bulunacaktır. Bu çalışmada, PMMA küreleri YMK yapıda sıkı şekilde dizilerek üç boyutlu fotonik kristal oluşturulacaktır. Sonrasında sol gel yöntemi ile küre çeperlerinde silika oluşturulacak ve PMMA kürelerinin yakılıp bünyeden uzaklaştırılması ile de silika ters opal fotonik kristalleri elde edilecektir. Partiküllerin yarıçapı 0,8, 1 ve 1,2 μm 'dır. Silikonun kırılma indisi 3,46'dır. Şekil 4.13, 4.15 ve 4.17'de optimize yapılan fotonik kristalin domaini ve şekil 4.14, 4.16 ve 4.18'de optimize yapılan fotonik kristalin brillouin bölgesi gösterilmiştir.



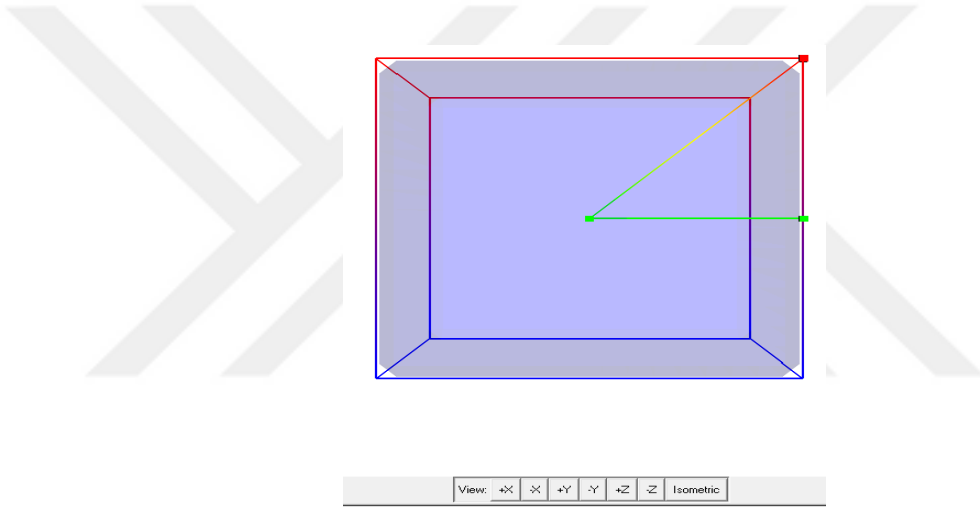
Şekil 4.13 İlk optimize yapılan fotonik kristalin domaini



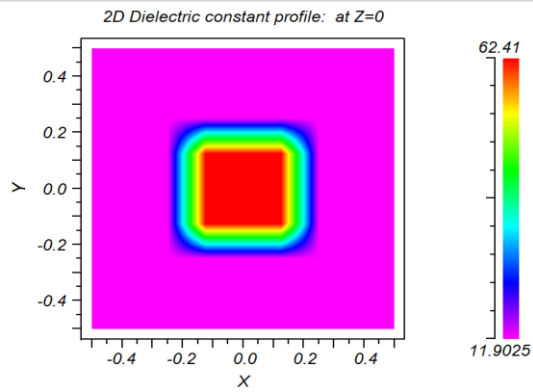
Şekil 4.14 İlk optimize yapılan fotonik kristalin brillouin bölgesi



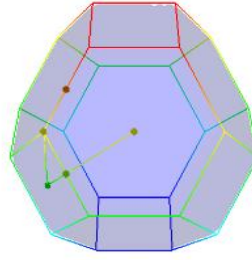
Şekil 4.15 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin domaini



Şekil 4.16 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin brillouin bölgesi



Şekil 4.17 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin domaini



Şekil 4.18 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin brillouin bölgesi

Fotonik bant aralığında fotonlar güçlü bir yansıma özelliği gösterir ve bant aralığı bu frekanslardaki ışığın ilerlemesini engeller. Dielektrik çubuklar eksen boyunca öteleme metrisine sahip olduğu için, EM dalgalar iki enine polarize kipe ayrılır. TM tek frekanslı kipler, TE ise çift frekanslı kiplere ait bantlardır. Dielektrikçubuklarda TM kipi için mutlak fotonik bant aralığı oluşurken, TE kipi için kısmi bant aralığı oluşmaktadır. Bu durumda bu yapıda çubuklar için en uygun olan TM kipi dir. Çünkü TM ışığı sisteme gönderildiğinde ışığın bir kısmı fotonik bant aralığı içindeki frekanslarda tam yansımaya uğrar, bir kısmı ise fotonik bant aralığı ışındaki frekanslarda kırılarak geçer. Fotonik bant aralığı içindeki frekanslarda gelen dalgalar ile birbirini kuvvetlendirerek yansıyan aynı fazda dalgalar birbirini sönmümler (Çetin ve ark., 2011).Periyodik yapı içinde ilerleyemez.

Birim hücrede TM kipleri için bant diyagramına bakacak olursak, $0, 257 < \omega < 0, 440$ ($2\pi c/a$ biriminde, c vakım içinde ışık hızı) ve $0, 552 < \omega < 0, 600$ frekanslarında fotonik bant aralığı oluşturulur.

4.3.1 Parametrelerin Hesaplanması

YMK yapısının bant aralığının hesaplanması iki adımda yapılmalıdır. İlk adımda her gözenek bir periyodik hücre olarak analiz edilmiştir. Ondan sonra ışık koni parametreleri hesaplanıp bir koyu alanı olarak diyagram üzerine çekilmiştir. Sistemin belirlenmiş halleri için PWE metodu kullanılmıştır.

$E(z, t)$ Optik darbesini Fourier İntegral bileşenlerle yazılabilir

$$E(z, t) = \int E(z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4.1)$$

Darbenin Z-ekseni boyunca yayılmasını dikkate alıyoruz.

$$\psi(z, \omega) = E(z, \omega) \quad (4.2)$$

$$\psi(z, \omega) = icB(z, \omega) \quad (4.3)$$

Elektromanyetik alan iki bileşenli vektör dalga fonksiyonuyla ifade edilir:

$$\psi(z, \omega) = \psi_1(z, \omega) \psi_2(z, \omega) \quad (4.4)$$

Yani elektrik alanını $z=0$ iniş alanıyla şu şekilde $E_i(\omega)$ belirtebiliriz .

$$\psi(z, \omega) = E_i(0, \omega) \{ [1 + r(\omega)] e^{-ikz} + i[1 - r(\omega)] e^{ikz} \} \quad (4.5)$$

$\psi(0, \omega)$ belli olmasıyla darbenin uzay-zaman davranışı hesaplanabilir. Tüm frekans bileşenlerinin entegrasyonu ile

$$E(z, t) = \int \psi_1(z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4.6)$$

$$Q_{11}(z, \omega) = \int E_i(0, \omega) \{ [1 + r(\omega)] + i[1 - r(\omega)] Q_{12}(z, \omega) \} e^{i\omega t} d\omega \quad (4.7)$$

Sınırlı Fotonik Kristal etkin refraktif indeksi :

$$n(\omega) = n(\omega) + ik(\omega) \quad (4.8)$$

ki nakil oranı eşittir $\sqrt{T} e^{i(\omega)}$ ve denklemin hakiki bölümü eşittir

$$n(\omega) = \frac{c(\omega)}{L(\omega)} \quad (4.9)$$

4.3.2 Optimizasyon Algoritmasının Genel Yapısı

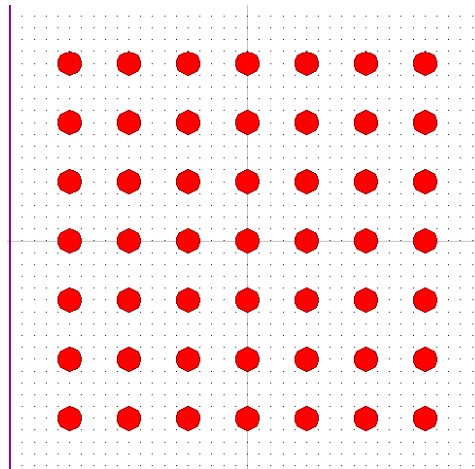
Bu bölümde 3 boyutlu genişletilmiş düz dalga metodu daha geniş bant aralığı elde etmek için kullanılmıştır. Taneciklerin boyutları ve aralıkları optimizasyon parametresi olarak alınmıştır. Optimizasyon için yapay zeka algoritmaları kullanılmıştır. Yapay Zeka, Artificial Intelligence ya da “AI”, bilim ve teknoloji dünyasının yıllarca üzerinde çalıştığı bir kavramdır. Makinelerin, bilgisayarların ya da robotların zeki varlıklar -yani insanlar- gibi davranması amaçlanan bu kavram, aslında çok da uzağında olmadığımız bir teknolojidir. Yapay zekanın birçok örneğini çevremizde görebiliriz, bu konuda verebileceğimiz en tanıdık örnek simülasyon algoritmalarıdır. Parametre sayısının çok olduğu ve verilerin normal toplanmadığı birçok kombinatorik optimizasyon (combi-natorial optimization) ve mühendislik problemlerinin çözümünde bilgisayarlar kullanılmaktadır. Bu tür optimizasyon problemlerinin çözümünde klasik optimizasyon teknikleri yetersiz kalmakla beraber son yıllarda yapay zeka optimizasyon tekniklerinin karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Yapay zeka optimizasyon tekniklerinin kullanılmasındaki amaç düşük maliyet ve zamandan tasarruf sağlayarak en uygun çözüme ulaşmaktır. Geliştirilen teknikler doğrultusunda doğru analiz yapabilme ve anında karar verme gibi insana özgü olan yetileri kullanarak karar veren veya tavsiyelerde bulunan sistemlerin geliştirilmesi ile daha hızlı ve gerçekçi çözümler elde edilecektir. Bu çalışmada klasik optimizasyon tekniklerinden ve yapay zeka optimizasyon tekniklerinden bahsedilerek literatürde bulunan bazı örnekler verilerek sınıflandırma yapılmıştır. Böylece genel maksimum noktalarını bulmanın yanı sıra yerel maksimum noktalarını da bulabilmektedir. Algoritma akışı şu şekildedir: ilk olarak girilen veriler üniform olarak seçilir ve bant aralığı parametrelerin hepsi bu şekilde seçilir. Yapılan optimizasyonlarda taneciklerin aşağıdaki kodlar ve yukarıdaki denklemlerden elde ettiğimiz parametreleri girerken en iyi sonucu elde etmeğe çalışıyoruz.

Lattice Dimension: 3D

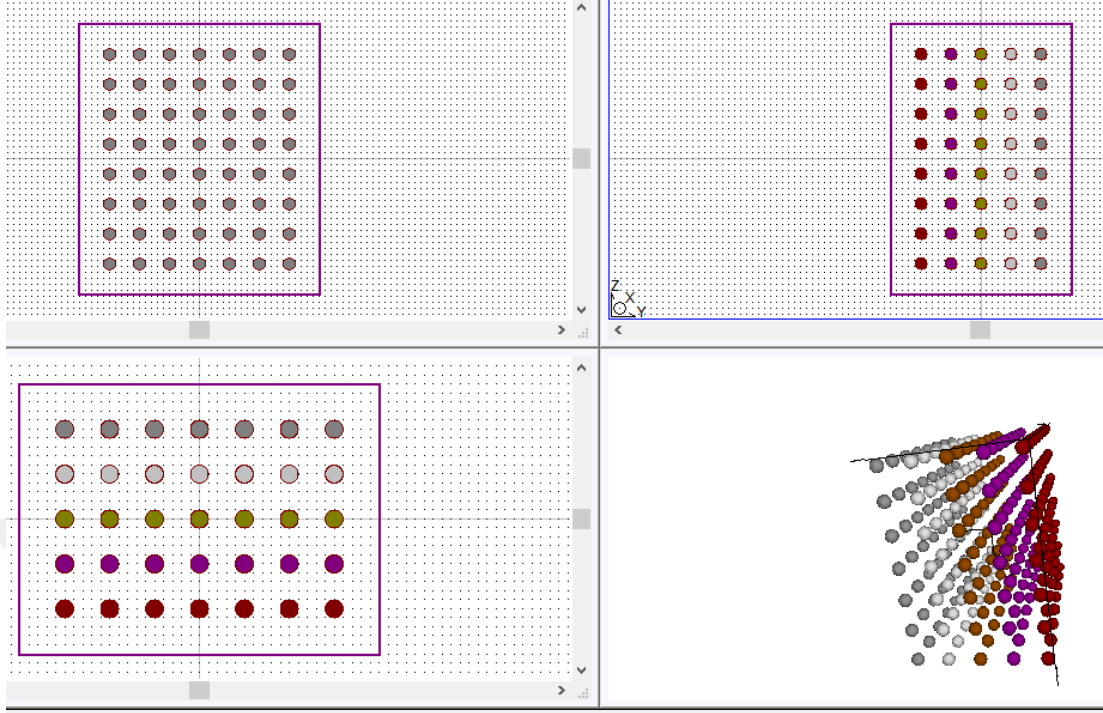
Lattice Type: YMK

Lattice Size: L=6, M=6, N=6

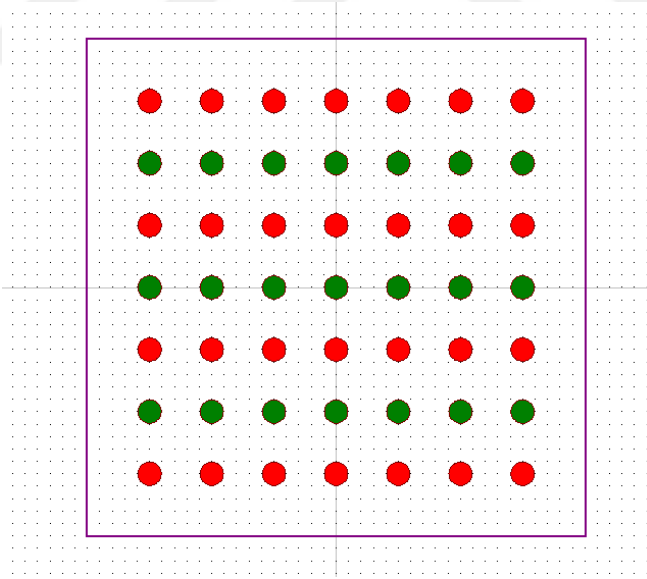
Unit cell Contents: Circle
Output prefix: foton_d
,
Lattice Dimension: 3D
Lattice Type: YMK
Lattice Size: L=12, M=5, N=8
Unit cell Contents: Circle
Output prefix: gap_cal
,
Lattice Dimension: 3D
Lattice Type: YMK
Lattice Size: L=12, M=5, N=8
Unit cell Contents: Circle
Output prefix: foton_d
Pbg_cal_tool =0.001
Beta=7
Betap =beta/period
Free-space-wavelength =1/55
Xmax=-Xmax=-4
Ymax= (NY+1)/2*PeriodY=4
fdtd_stop_time=fdtd_time_step*2^12=128
launch_type=LAUNCH_GAUSSIAN=3



Şekil 4.19 İlk optimize edilen silika esaslı fotonik kristalin geometrisi .



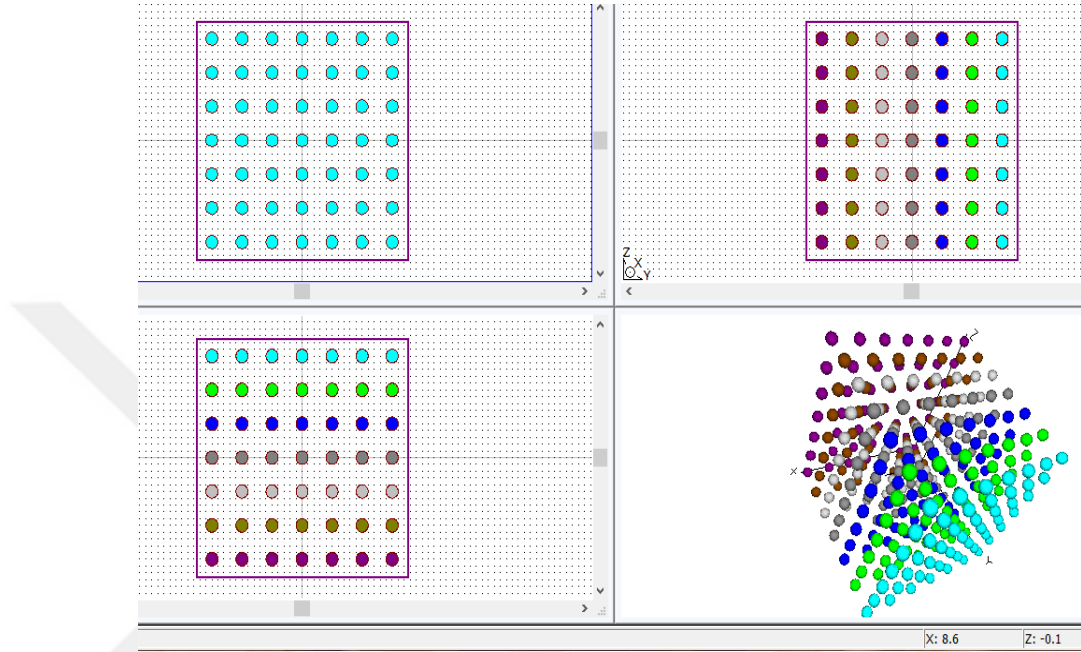
Şekil 4.20 İkinci optimize edilen silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.



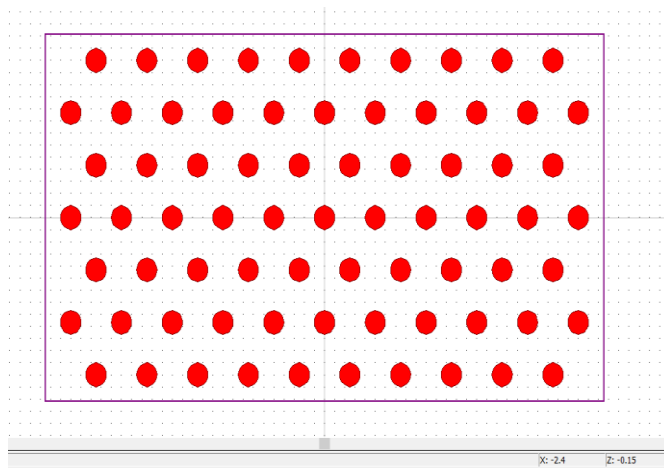
Şekil 4.21 Üçüncü optimize edilen silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.

Çalışmanın diğer aşamasında gözenek boyutlarının etkisine bakmak için tüm fiziksel ve optiksel paramatereleri sabit tutarak gözenek boyutları 50 nm 100 nm 500nm olarak incelenmiştir.

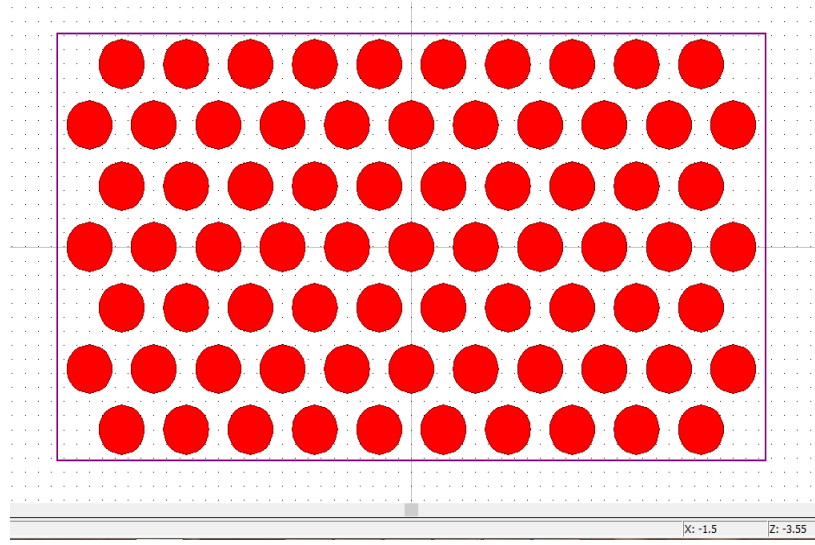
Şekil 4.22da PMMA küreleri için yapılan partikül tasarımı verilmiştir. Bu geometriden elde edilene göre parçacık boyutu 50 nm, 100, 500 gözükmemektedir. 3D fotonik kristal 3 farklı yönde yani x, y, ve z yönünde gösterilmektedir, aynı zamanda 3 boyutlu geometrisi de elde edilmiştir.



Şekil 4.22 Gözenekler 50 nm yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.

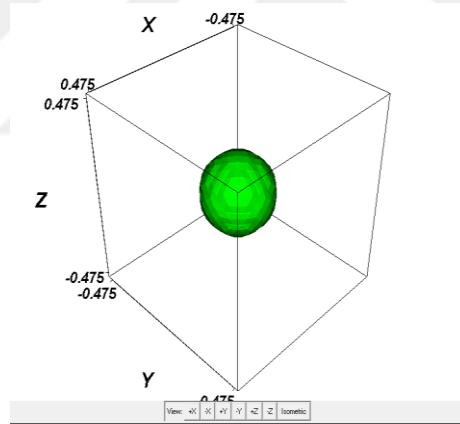


Şekil 4.23 Gözenekler 100 nm yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.

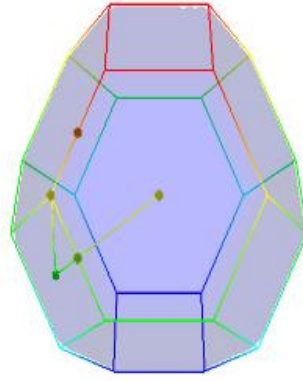


Şekil 4.24 Gözenekler 500 nm yapılan silika esaslı fotonik kristalin geometrisi.

Domain ve ilk brilion sadece yarıçapa bağlı olmadığına göre bu aşamada şekillerin değişmemesi beklenmiştir.



Şekil 4.25 Domain



Şekil 4.26 Brillouin bölgesi

YMK yapısının bant aralığının hesaplanması iki adımda yapılmalıdır. İlk adımda her gözenek bir periyodik hücre olarak analiz edilmiştir. Ondan sonra ışık koni parametreleri hesaplanıp bir koyu alanı olarak diyagram üzerine çekilmiştir. Sistemin belirlenmiş halleri için PWE metodu kullanılmıştır.

Bu boyutlar için optimizasyon algoritması ilk olarak girilen veriler üniform olarak seçilir ve bant aralığı parametrelerin hepsi bu şekilde seçilir. Yapılan optimizasyonlarda taneciklerin yarı çapı 50 nm, 100 nm, 500nm olarak belirlenmiştir, aşağıdaki kodlar ve yukarıdaki denklemlerden elde ettiğimiz parametreler kullanarak en iyi sonucu elde etmeğe çalışılmıştır.

Lattice Dimension: 3D

Lattice Type: YMK

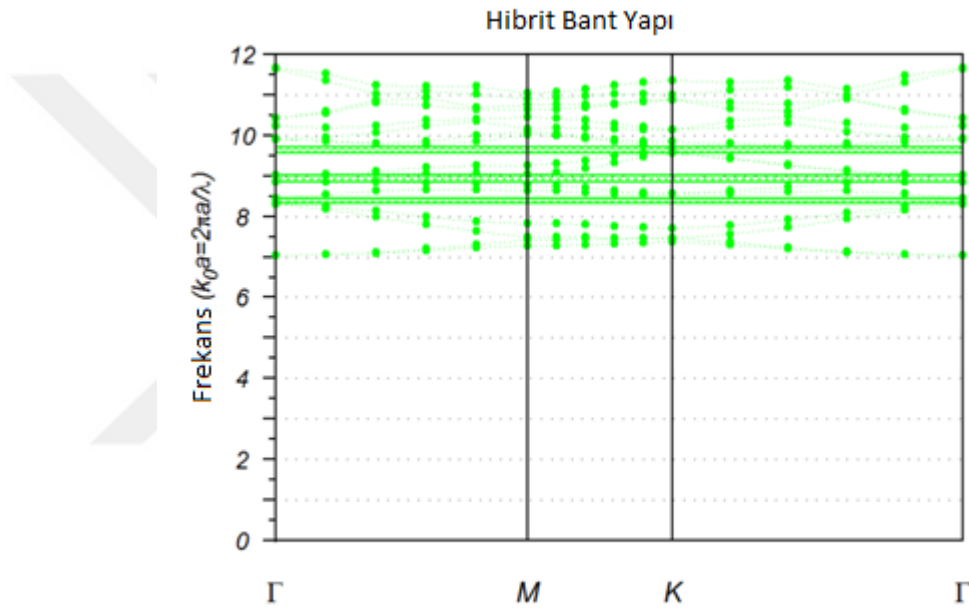
Lattice Size: L=10, M=5, N=7

Output prefix: band_cal

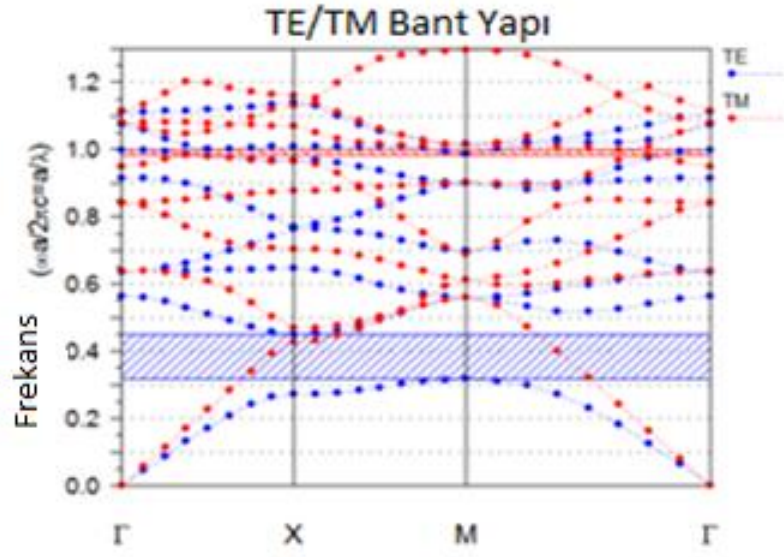
4.3.3 Simülasyon Sonuçları

Renkli olan kısımlar hava ve beyaz olan kısımlar SiO_2 olarak farz edilmiştir. Bu yapıların giriş verisi olarak algoritmaya verilmiştir ve algoritma ekstremum noktalarına ait olan parametreleri bulmaktadır.

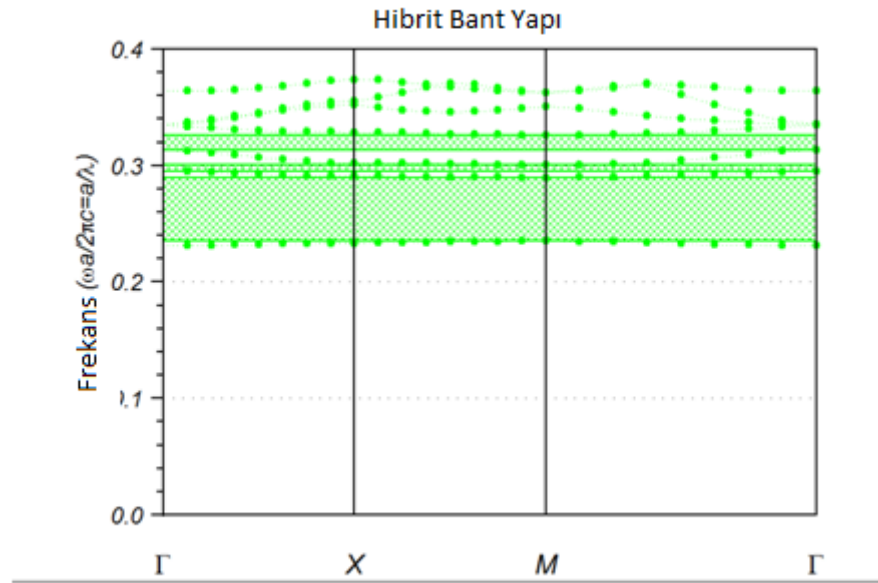
Şekil 4.27, 4.28, ve 4.29'de optimize edilen fotonik kristalin band yapısı olarak sonuçlanmıştır ve şekli 4.30, 4.31 ve 4.32'de sadece çapı değiştirerek optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin band yapısı gösterilmiştir.



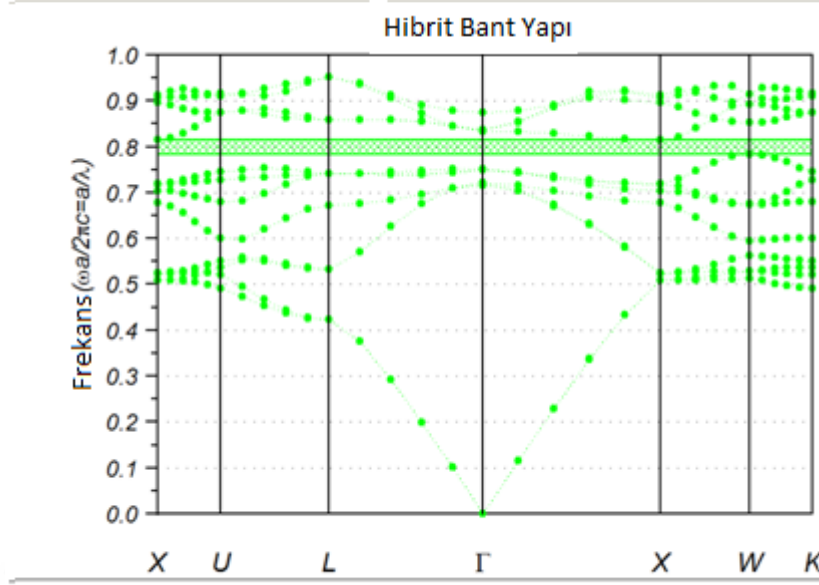
Şekil 4.27 Birinci optimize edilen fotonik kristalin band yapısı



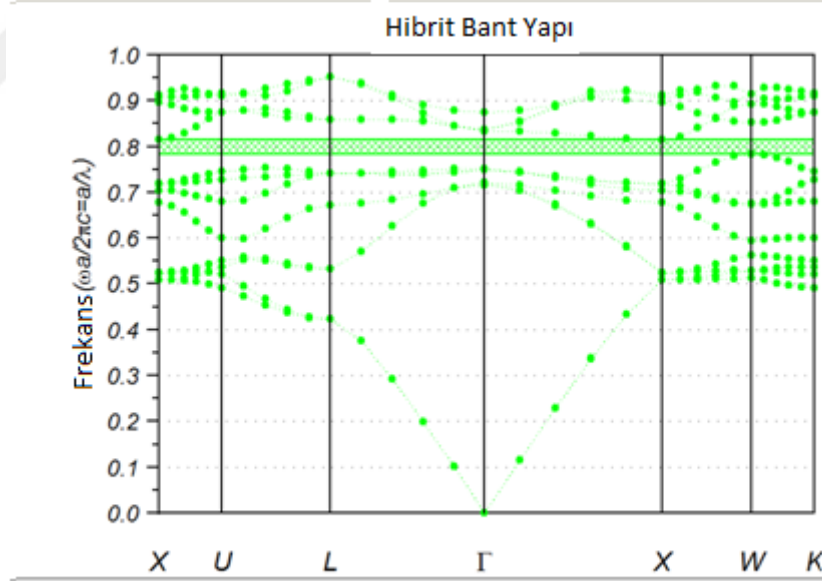
Şekil 4.28 İkinci optimize yapılan fotonik kristalin band yapısı



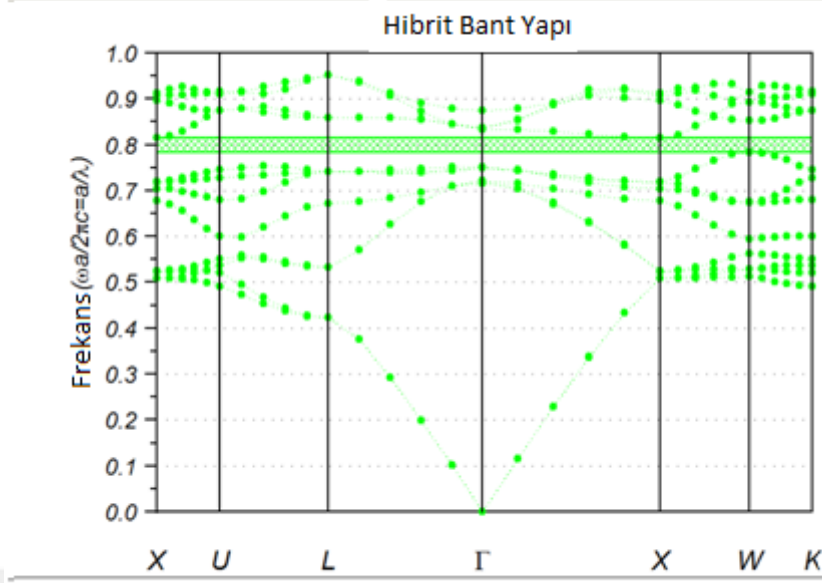
Şekil 4.29 Üçüncü optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin band yapısı.



Şekil 4.30 Sadece çapı değiştirerek optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin band yapısı (200nm).



Şekil 4.31 Sadece çapı değiştirerek optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin band yapısı (800nm).



Şekil 4.32 Sadece çapı değiştirerek optimize yapılan silika esaslı fotonik kristalin band yapısı (1200nm).

Yapı amorf olduğuna göre, hesaplara dayanarak bizim taneciklerin boyutlarına çok bağlı olmaması şeklindedir. Aynı zamanda Domain birilion ve band aralığı şekil ve renk olarak aynı sonuçlanmıştır.

Daha geniş band yapısı görmek için Tablo 4.1 de görüldüğü gibi şiddet, index ve malzemelerin değişmesi önemli dir.

Tablo 4.1 Sonuçlar ve değerlendirmeler

	Yarıçap	Gelen ışığın Dalga boyu	Kafes parametresi	Kafes boyu	LAUNCH_ GAUSSIAN	Sonuç
Üretilmiş silika esaslı fotonik kristal	0/2 μm	2 μm	540nm	10*5*7 μm	1/5	Band aralığı görünmüyor sadece çok yukarı şiddetlerde küçük band aralığı görünür
Birinci Optimize	0/8 μm	4 μm	540nm	6*6*6 μm	5.253	Şiddet çok olduğu zaman küçük band aralıkları ulaşmış ki kırmızı renkleri kapsıyor
İkinci optimize	1/2 μm	7 μm	540nm	12*5*8 μm	4.324	Daha büyük band aralığı elde edilmiştir ki kırmızı renkten ilave sarı renkte görünmeye başlamış
Üçüncü optimizasyon	1 μm	0/5 μm	540nm	7*7*7 μm	3	En iyi ve büyük band aralığı elde ettiğimiz durum. Bu boyutlarda mor renkte kapsanmaya başlanmıştır

Aldaki tabloda küre çapın sabit tutarak elde edilen sonuç gösterilmiştir.

Kullandığımız program yetersiz kaldığı için rengin koyu veya açık olması tam belli olmamıştır, fakat band aralığı frekansına dayanarak bakıldığında renklerin kırmızı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.2 Küre çapını sabit tutarak sonuçlar ve değerlendirmeler

	Yarıçap	Gelen ışığın dalğa boyu	Kafes paramertesi	Kafes boyu	LAUNCH_GAU SSIAN	Sonuç
Birinci optimazisyon	0/05 μm	2 μm	540nm	10*5*7 μm	3	kırmızı olarak görünmektedir
İkinci optimazisyon	0/1 μm	2 μm	540nm	10*5*7 μm	3	kırmızı olarak görünmektedir
Üçüncü optimazisyon	0/5 μm	2 μm	540nm	10*5*7 μm	3	kırmızı olarak görünmektedir

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Genel Sonuçlar

Bu çalışmada vakum ile sol-jel infiltrasyon yöntemi ile Silikaesaslı fotonik kristal üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda süreç optimizasyonu sağlanmıştır. Projenin ilk aşamasında PMMA küreler sentezi yapılarak, şablon olarak kullanmak üzere polimer küreler elde edilmiştir. Daha sonra vakum ile sol-jel infiltrasyon işlemi gerçekleştirilerek polimer kürelerin etrafına SiO₂ birikmesi sağlanmıştır. Daha sonra yapılan kalsinasyon işlemi ile polimer şablon uzaklaştırılarak SiO₂ gözenekli yapısı elde edilmiştir ve sonunda elde ettiğimiz parametrelerde, üretilen fotonik kristali yazılım üzerinde simülasyon yapıp, ve geometrisi incelenmiştir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

1) Prosesin ilk aşamasında şablon olarak kullanmak için PMMA küreleri sentezi gerçekleştirilmiştir. Bu proses kapsamında yapılan çalışmalarda monomerden polimer kürelerinin eldesi toz olarak sağlanmıştır. Elde edilen PMMA tozlarına yapılan SEM analizinde düzenli bir dizilim elde edildiği saptanmıştır. Ayrıca polimer kürelerinin çaplarının istenilen boyutlarda olduğu görülmektedir. Prosesin ilk aşamasında başarı sağlanarak üretilen tozlar prosesin ikinci aşaması olan vakum ile sol-jel infiltrasyon yöntemi için hazır hale gelmiştir.

2) Üretim prosesinin ikinci aşamasında vakum ile sol-jel infiltrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte polimer tozlar şablon olarak kullanılarak polimer küreler etrafında silika birikmesi amaçlanmıştır. Kuruma sonrası polimer şablon uzaklaştırılarak gözenekli bir yapı elde edilmiştir.

3) Yapılan karakterizasyon çalışmalarından SEM görüntüleri incelendiğinde PMMA kürelerini düzenli dizilime sahip küreler şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Prosesin ikinci aşaması olan vakum ile sol-jel infiltrasyon işlemi ve kalsinasyon

süreci sonrasında elde edilen toz numunenin SEM analizinde gözenekli yapıların varlığı saptanmıştır.

4) Yapılan XRD analizinde elde ettiğimiz nihai ürünün amorf özellik taşıdığı saptanmıştır. Yapılan ısı işleme amorf özelliğini korumaktadır. Biz ürünü 550 Derece Santigrad ' de kalsinasyon işlemine tabi tuttuğumuz için ürünümüz amorf özelliğini yitirmemiştir.

5) Karakterizasyon aşamasında partikül boyutu analizinde PMMA ve Silika esaslı fotonik kristal için incelemeler yapılarak grafikler elde edilmiştir. Bu grafikler yorumlandığında PMMA için homojen bir dağılım gözlenmemekle beraber parçacık boyutunun 150 nm ile 850 nm arasında değiştiği saptanmıştır. Aynı şekilde silika için yapılan analizde ise yüksek homojenlikte bir dağılım olduğu görülmektedir. Ve partikül boyut aralığı 160 ile 200 nm arasında bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

6) Analizlerin sonuçların elde ettikten sonra simülasyon işlemlerine başlanmıştır. Maxwell denklemlerin kullanarak gerekli hesaplamalar yapıp ,tasarıma başlanmıştır. Geometri tasarımında üretilen silika esaslı fotonik kristallerin aynı geometrisi tasarlanmıştır. Simülasyonda ilk birliouin bölgesinin ve domaninin tamamen doğru çıkması için düzenli çalışmasını onaylamıştır. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında YMK olan silika esaslı fotonik kristalinde band aralığı bulunmamaktadır. Sadece çok yüksek şiddetlerde çok küçük bir band aralığı elde edilmiştir.

7) Üretilen silika esaslı fotonik kristali simüle ettik sonra optimizasyon yapılmıştır. Üç farklı optimizasyondan sonra en iyi sonuç tani boyutları 1000 nm olduğu zaman gözükmiştir. Bu durumda en büyük band aralığı elde edip, bir çok renk görülmesi sağlanmıştır.

8) Yapı amorf olduğuna göre bizim beklentimiz hesaplara dayanarak taneciklerin boyutlarına çok bağlı olmaması beklenmiştir. Daha geniş band yapısı görmek için, index ve malzemelerin değişmesi gerekmiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada silika esaslı fotonik kristaller elde edilmiştir. Fotonik kristal üretim prosesindeki santrifüj aşamasının optimizasyonu üzerine durulmuştur. Özellikle PMMA kürelerinin santrifüjlenme aşaması irdelenmiştir. Tane boyutu, faz analizi ve mikro yapısı incelenmiştir. Optik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca daha büyük band aralığı elde etmek için tane boyutları aralıklarının daha fazla olması önerilmiştir. Onun dışında kullanılan malzemenin havayla kırılma endeksinin farkı ne kadar büyük olursa bir o kadar band aralığının büyük olmasına sebep olur. Bundan dolayı sonraki çalışmalarda TiO_2, CeO_2 katılarak optik özellikler araştırılmalıdır. Bu malzemede optik özellikler için UV, kırılma indisi refraktansı analizleri bir sonraki çalışmanın araştırma konularıdır.

KAYNAKLAR

- Asan, Ö. (2010). *Fotonik kristaller*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Block, I. D., Ganesh, N., Lu, M. ve Cunningham, B. T. (2008). A sensitivity model for predicting photonic crystal biosensor performance. *Sensors Journal*, 8, 274.
- Block, I. D., Chan, L. L. ve Cunningham, B. T. (2006). Photonic crystal optical biosensor incorporating structured low-index porous dielectric. *Sensors and Actuators B*, 120, 187–193.
- Borel, P. I., Frandsen, L. H., Harpoth, A., Kristensen, M., Jensen, J. S. ve Sigmund, O. (2005). Topology optimised broadband photonic crystal Y-splitter. *Electronics Letters*, 41, 2.
- Boscolo, S., Midrio, M. ve Kauss, T. F. (2002). Y junctions in photonic crystal channel waveguides: high transmission and impedance matching. *Optical Letters*, 27, 1001.
- Camargo, E. A., Jugessur, A. S., Ntakos, I. ve Rue, R. D. (2003). Photonic crystal waveguide Mach-Zhender structures for thermo-optic switching. *Proceedings of SPIE*, 4944, 376.
- Cao, H., Zhu Y., Tang, L., Yang, X. ve Li, C. (2008). A Glucose Biosensor Based on Immobilization of Glucose Oxidase into 3D Macroporous TiO₂. *Electroanalysis*, 20, 2223.
- Chan, L. L., Gosangari, S. L., Watkin, K. L. ve Cunningham, B. T. (2008). Label-free imaging of cancer cells using photonic crystal biosensors and application to cytotoxicity screening of natural compound library. *Sensors and Actuators B*. 83, 97-117.

- Chen, H. (1981). Transverse electric fields guided by doubly-periodic structures. *Journal of Applied Physics*, 52 (8), 4926-4937
- Chew, X., Zhou, G., Chau, F. S., Deng, J., Tang, X. ve Loke, Y. C. (2010). An in plane nano-mechanics approach to achieve reversible resonance control of photonic crystal nanocavities. *Optical Express*, 18, 22232.
- Choi, C. J., Belobraydich, A. R., Chan, L. L., Mathias, P. C. ve Cunningham, B. T. (2010). Comparison of label-free biosensing in microplate, microfluidic, and spot-based affinity capture assays. *Analytical Biochemistry*, 405, 1–10.
- Chow, E., Lin, S. Y., Wendt, J. R., Johnson, S. G. ve Joannopoulos, J. D. (2001). Quantitative analysis of bending efficiency in photonic-crystal waveguide bends at $\lambda= 1.55\mu\text{m}$ wavelengths. *Opticals Letters*, 26, 286–288.
- Chutinan, A., Okano, M. ve Noda, S. (2002). Wider bandwidth with high transmission through waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs. *Applied Physics Letters*, 80, 1698-1700.
- Cunningham, B. T., Li, P., Schuls, S., Lin, B. Baird, C., Gerstenmaier, J. ve Cunningham A. J. (1998). *Introduction to bioanalytical sensors*. NewYork: Wiley.
- Datta, M., Pruessner, M. W., Kelly, D. P. ve Ghodssi, R. (2004). Design of MEMS-Tunable novel monolithic optical filters in InP with horizontalbragg mirrors. *Solid- State Electronics*, 48, 1959.
- Dildar, Y. (2013). Fotonik kristal dalga kilavuzu temelli küçük optik filtrelerin tasarlanması ve sayısal çözümlenmesi: Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.

- Erden, T., Göçmen A. B. ve Hoşafoglu, A. (2005). *Silika esaslı fotonik kristalüretimi ve karakterizasyonu*. Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- Erdiven, U. (2012). *Fotonik kristaller: optiksel devre ve sensor uygulamaları*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.
- Espinola, R. L., Ahmad, R. U., Pizzuto, F., Steel, M. J. ve Osgood, R. M. (2001). A study of high-index-contrast 90 degree waveguide bend structures. *Optical Express*, 8, 517-528.
- Fan, S., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., Manolatou, C. ve Haus, H. A. (2000). Waveguide branches in photonic crystals. *Journal of Optical Society of America*, B, 18, 162.
- Ganesh, N., Block, I. D. ve Cunningham, B. T. (2006). Near ultravioletwavelength photonic crystal biosensor with enhanced surface-to-bulk sensitivity ratio. *Applied Physics Letters*, 89, 23901.
- Ge, C., Lu, M., Zhang, W. ve Cunningham B. T. (2010). Distributed feedback laser biosensor incorporating a titanium dioxide nanorod surface. *Applied Physics Letters*, 96, 163702.
- Hao, R., Cassan, E., Kurt, H., Hou, J., Xavier, L. R., Morini, D. M ve ark. (2010). Novel kind of semi-slow light photonic crystal waveguides with large delay band width product. *Photonics Technology Letters*, 22, 844.
- Hart, E. E., Söbester, A., Djidjeli, K., Molinari, M., Thomas, K. S. ve Cox, S.J. (2012). A geometry optimization framework for photonic crystal design. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 10 (1), 25-35.

- Ho, K. M., Chan, C. T., ve Soukoulis, C., M. (1990). Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Physical Review Letters*, 13, 3152- 3155.
- Jamois, C., Whersohn, R. B., Andreani, L. C., Hermann, C., Hess, O. ve Gösele, U. (2003). *Photonics and Nanostructures. Fundamentals and Applications*, 1, 10- 13.
- Joannopoulos, J. D., Meade, R. D. ve Winn, J. N. (2008). *Photonic crystals, molding the flow of light*. Princeton University Press: Princeton.
- John, S. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectricsuperlattices. *Physical Review Letters*, 58, 2486–2489.
- Kafi, A. K., Wu, G. ve Chen, A. (2008). A novel hydrogen peroxide biosensor based on the immobilization of horseradish peroxidase onto Au-modified titanium dioxide nanotube arrays. *Biosensors and Bioelectronics*, 24, 566.
- Kawakami, A. ve Watts, J. (2002). Analytically solvable model of photonic crystal structures and novel phenomena. *Journal of Lightwave Technology*, 20, 1644-1650.
- Kelly, D. P., Pruessner, M. W., Amarnath, K., Datta, M., Kanakaraju, S., Calhoun, L. C. ve ark. (2004). Monolithic suspended optical waveguides for INP MEMS. *Journal of Photonics Technology Letters*, 16, 1298.
- Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T. Sato, T. ve Kawakami, S. (1998). Superprism phenomena in photonic crystals *Phys. Rapid Communications*, 58, 96.
- Krauss, T. F. (2007). Slow light in photonic crystal waveguides. *Journal of Physics: Applied Physics*, 40, 2666102.

- Kuhlenschmidt, M. ve Cunningham, B. T. (2009). Rapid specific and label-free detection of porcine rotavirus using photonic crystal biosensors. *Sensors Journal*, 9, 470–477.
- Kurt, H. (2009). Bend free optical power transfer using photonic crystal waveguide arrays. *Journal of Lightwave Technology*, 27, 1402.
- Labbani, A., Saoudi, R. ve Benghalia, A. (2009). Photonic band gaps in oneandtwo-dimensional photonic crystals based on a nanocomposite of ZnS and glass. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 11, 085103.
- Li, Y., Liu, X., Yuan, H. ve Xiao, D. (2009). Glucose biosensor based on the room temperature phosphorescence of TiO₂/SiO₂ nanocomposite. *Sensors*, 10, 4855-4886.
- Lin, B., Qiu, J., Gerstenmaier, J., Li, P., Pien, H. M., Pepper, J. ve ark. (2002). A label free technique for detecting small molecule interactions. *Sensors*, 17, 827–834.
- Liu, M. Y. ve Chou, S. Y. (1996). High modulation depth and short cavity length silicon Fabry Perot modulator with two grating Bragg reflectors. *Applied Physics Letters*, 68, 170.
- Lord, R. (1887). On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure. *Philosophical Magazine*, 24, 145-159.
- Luan, P. G. ve Chang, K. D. (2007). Periodic dielectric waveguide beam splitter based on co-directional coupling. *Optical Express*, 15, 4536.
- Maes, B., Ibanescu, M. ve Joannopoulos, J. D. (2007). Microcavities based on multimodal interference. *Optical Express*, 15, 6268.

- Mahmoud, M. Y., Bassou, G., Taalibi, A. ve Chekroun, Z. M. (2012). Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators. *Optics Communications*, 285, 368.
- Manolatou, C., Johnson, S. G., Fan, S., Villeneuve, P. R., Haus, H. A. ve Joannopoulos, J. D. (1999). High-density integrated optics. *Journal of Lightwave Technology*, 17, 1682-1692.
- Mekis, A., Chen, J. C., Kurland, I., Fan, S., Villeneuve, P. R. ve Joannopoulos, J. D. (1996). High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. *Physical Review Letters*, 77, 3787-3790.
- Nguyen, H. M., Dundar, M. A., Vander, R. W., Vander, E. W. Salemink, H. W. M., Rogge, S. ve ark. (2010). Compact Mach-Zhender interferometer based on self-collimation of light in a silicon photonic crystal. *Optical Express*, 18, 6437.
- Nozari, M. (2007). *Couplers semi-insulating InP-based photonic crystals on the substrate at a wavelength 55/1 integration capabilities with other active and passive optical components*. Yüksek Lisans Tezi, Tehran Üniversitesi, Tehran, Iran.
- Ofoolain, L., Schulz, S. A., Beggs, D. M., White, T. P., Spasenovic, M., Kuipers, L. ve ark. (2010). Loss engineered slow light waveguides. *Optical Express*, 18, 27627.
- Oskool, A. F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J. D. ve Johnson, S. G. (2010). MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Computer Physics Communications*, 181, 687.

- Özbay, E., Bulu, İ., Çağlayan, H., Aydın, K. ve Güven, K. (2012). *Fotonik kristallerin fiziği ve uygulamaları*. Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- Özyağlı, ö., (2003) Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Park, W., King, J. S., Neff, C. W., Liddell, C. ve Summers, C. J. (2002). ZnS-based photonic crystals. *Physica Status Solidi, B*, 229, 949.
- Perahia, R., Cohen, J. D., Meenehan, S., Alegre, T. P. M. ve Painter, O. (2010). Electrostatically tunable optomechanical zipper cavity laser. *Applied Physics Letters*, 97, 191112.
- Plihal, S. ve Maradudin, A. (1991). Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice. *Review Letters*, B 44, 8565-8571.
- Pruessner, M. W., King, T. T., Kelly, D. P., Grover, R., Calhoun, L. C. ve Ghodssi, R. (2003). Mechanical property measurement of InP-based MEMS for optical communications. *Sensors and Actuators, A*, 105, 190.
- Reshak, A. H. ve Auluck, S. (2007). Ab initio calculations of the electronic, linear and nonlinear optical properties of zinc chalcogenides. *Physical, B*, 388, 34.
- Robertson, T. (1992). Measurement of photonic band structure in a twodimensional periodic dielectric array. *Physical Review Letters*, 68, 2023-2026.
- Schulz, S. A., Ofaolain, L., Beggs, D. M. White, T. P., Melloni, A. ve Krauss T. F. (2010). Dispersion engineered slow light in photonic crystals: a comparison. *Journal of Optics*, 12, 104004.
- Shi, S. Y., Sharkawy, A., Chen, G. H., Pustal, D. M. ve Prather, D. W. (2004). Dispersion-based beam splitter in photonic crystal. *Optical Letters*, 29, 617.

- Smith, D. A. ve Kash, K. (1994). Novel applications of photonic band gap materials: Low-loss bends and high Q cavities. *Journal of Applied Physics*, 75, 4753-4755.
- Smith, F. (1993). Photonic band structure and defects in one and two dimensions. *Journal of the Optical Society of America, B*, 10 (2), 314-321.
- Soljagic, M., Ibanescu, M., Johnson, S. G., Fink, Y. ve Joannopoulos, J. D. (2005). Optimal bistable switching in nonlinear photonic crystals. *Physical Review E*, 66, 055601.
- Song, M., Zhang, R. ve Wang, X. (2006). Nano-titanium dioxide enhanced biosensing of the interaction of dacarbazine with DNA and DNA bases. *Materials Letters*, 60, 2143.
- Tabakhian, M., Ansari, N., Tehranchi, M. M., Heidari, F. ve Abhati, B. (2010). Tavus kusu kanatlarinin renkli yapisinin taninmasi ve moddelestirilmesi. *Optik ve Fotonik üzerinde Onaltıncı Konferansı*, Yazd, İran.
- Waterhouse A. B, Mark R., Geoffery I. N. ve Waterland B. (2006). Opal and inverse opal photonic crystals, Fabrication and characterization. *Polyhedron*, 26, 2007, 356–368.
- White, I. M. ve Fan, X. (2008). On the performance quantification of resonant refractive index sensors. *Optical Express*, 16, 1020.
- Wilson, R., Karle, T. J., Moerman, I. ve Krauss, T. F. (2003). Efficient photonic crystal Y-junctions. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 5, 76.
- Winn, J. N. (1994). Two-dimensional photonic band-gap materials. *Journal of Modern Optics*, 41 (2), 257-273.

- Winn, J. N. (1998). Omnidirectional reflection from a one-dimensional photonic crystal. *Optical Letters*, 23 (20), 1573-1575.
- Yablonovitch, T. (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical Review Letters*, 58, 2059–2062.
- Zhang, Z. E. ve Sashi, S. (1990). Electromagnetic wave propagation in periodic structures, Bloch wave solutions of Maxwell's equations. *Physical Review Letters*, 65, 2650.
- Zhao, D., Zhang, J., Yao, P., Jiang, X. ve Chen, X. (2008). Photonic crystal Mach-Zehnder interferometer based on self-collimation. *Physical Review Letters*, 90, 231114.