

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

**KIZILÖTESİ DEDEKTÖR TASARIMI İÇİN DOĞADAN ESİNLENMİŞ GÖZ  
YAPILARININ DALGA ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Takiyettin Oytun KILINÇ**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**NİSAN 2017**

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞLU**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

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

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151211004 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Takiyettin Oytun KILINÇ**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**KIZILÖTESİ DEDEKTÖR TASARIMI İÇİN DOĞADAN ESİNLENMİŞ GÖZ YAPILARININ DALGA ANALİZİ**" başlıklı tezi **07.04.2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

**Jüri Üyeleri :** **Yrd. Doç. Dr. Rohat Melik (Başkan)** .....  
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

**Doç. Dr. Hasan Koçer** .....  
Milli Savunma Üniversitesi

## TEZ BİLDİRİMİ

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

Takiyettin Oytun KILINÇ

## ÖZET

Yüksek Lisans

KIZILÖTESİ DEDEKTÖR TASARIMI İÇİN DOĞADAN ESİNLENMİŞ GÖZ

YAPILARININ DALGA ANALİZİ

Takiyettin Oytun KILINÇ

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

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Nisan 2017

Biyomimetik bilimi ile doğanın işleyişindeki sistem, hayatımızı kolaylaştıracak teknolojiler için ipucu sunabiliyor. Doğadaki materyaller ihtiyaç duyulan sağlamlık, hafiflik, esneklik gibi özelliklere sahiptir. Doğal görme yapıları özellikle küçük omurgasız hayvanlar, örneğin sinekler veya arılar için bileşik gözler, beyinlerini görüntü işleme ile aşırı yüklemekten kendi çevreleri hakkında yeterince görsel bilgi elde etmek için mükemmel şekilde uyarlanmış uzman görme tasarımına sahiptirler, aynı zamanda küçük hacimli optik birimlerden oluşmasına rağmen daha geniş açılı elektromanyetik dalgaları algılamasından, yansımaları daha düşük ve yüksek absorpsiyonlu olmasından ve çözünürlüğe paralel maliyete sahip olmasından dolayı büyük avantajlar sunarlar.

İnsan gözü ve doğadaki göz yapılarının ışık ile etkileşimi daha çok ray analizi ile yapılmaktadır. Işığın dalga özelliğinin dikkate alınmadığı bu tür analizlerde enerjinin odaklanması, yansıma ve soğurulmadan kaynaklanan kayıpların dikkate alınmaması gibi özellikler incelenememektedir.

Zaman Düzleminde Sonlu Farklar (Finite-Difference Time-Domain (FDTD)) yöntemi, elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan, popüler ve Maxwell denklemlerinin diferansiyel formunu ayrıklaştırmaya yarayan sade ve yaygın bir

sayısal yöntemdir. Yapılan kaynak taramalarında, bileşik görme yapılarında bu yöntem kullanılarak dalga analizi simülasyonları konusunu işleyen bir bilgiyle karşılaşılmamıştır.

Geleceğin elektronik ve fotonik bağıllığı, elektriğin, optik sinyallere verimli bir şekilde geçişini sağlamalıdır. Grafen malzemesi, bu iş için en uygun elektronik ve fotonik özellikleri ve önemli geniş çalışma bant genişliği ile bağı sistemler için uygun bir malzemelerden biridir.

Kızılötesi dedektörler cisimlerden yayılan kızılötesi radyasyonu algılayan sensörlerdir. Kızılötesi görüntüleme yada algılama yapabilmek için atmosferin geçirgen olduğu bir dalga boyu aralığında soğurma yapmak önemlidir ve bu sensörler veya algılayıcılar uzun zamandır savunma sanayii sistemlerinde; hedef tespiti, gözetleme, atış kontrolü ve füze arayıcı başlığı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Kızılötesi dedektör özgün tasarımların gerçekleştirilmesi öngörülen bu tez kapsamında, doğadaki problem çözme yetenekleri taklit edilerek, zaman düzleminde sonlu farklar metodu ile iki ve üç boyutlu yapılarda elektromanyetik dalga yayılımının simülasyonu yapılacak ve bileşik göz yapısının, orta kızılötesi ve uzak kızılötesi bölgede, dalga yayılım analizleriyle optik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kızılötesi dedektör, Biyomimetik, Biyofotonik yapılar, Dalga analizi, Enerji soğurumu, Grafen.

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **THE WAVE ANALYSIS OF NATURE-INSPIRED EYE STRUCTURES FOR INFRARED DETECTORS**

Takiyettin Oytun KILINÇ

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

Supervisor: Prof. Dr. Hamza KURT

Date: April 2017

The dynamics of nature and the science of biomimicry can give humans insight for technologies to ease everyday life. The materials in nature have the desired properties such as durability, flexibility and lightness. Natural sight structures of small invertebrates, i.e. compound eyes of bees or flies, are perfectly designed to have enough visual information about their surroundings without overloading the brain with unnecessary image processing. Although these compound eyes are composed of small optical units, they can detect wide-angled electromagnetic waves, their reflection rate is lower and absorption rate is higher at the photoreceptor site. Mimicking such a natural imaging system in real word application will not be straightforward. Besides, high-resolution cases increase the overall cost of the detectors.

The interaction between the human eye or other eye structures in nature and light is generally determined by the ray analysis. Light's wave property is not taken into consideration in these kinds of analysis, and because of this, some properties such as the amount of energy at the focal point or at the photoreceptors, the losses caused by reflection at the interfaces, cross-talks between each ommatidium and absorption cannot be examined.

Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method is a popular computational method and preferred in electromagnetic problem solving. It is also a simple and widely used method for discretization of the differential form of Maxwell's equations. In this study, we incorporate FDTD method for the wave analysis of compound eye in order to see the feasibility of designing novel infrared detectors.

Electronic and photonic integration for future applications requires that the electricity be efficiently converted into an optical signal. Grafen material is one of the most suitable electronic and photonic properties for this work and suitable materials for connected systems with considerable wide working bandwidth.

Infrared detectors perceives the infrared radiation from objects and these detectors have been used in defense industry for a long time in applications like target acquisition, surveillance, fire control, and missile seeker. This thesis aims to design unique infrared detectors based on bio-inspired optics. By mimicking the problem solving talents available in nature and with the FDTD method, the simulation of electromagnetic wave propagation in two and three dimensional structures will be performed. Moreover, the effect of compound eye structure on optic properties in mid-infrared region and far infrared region will be examined by wave propagation analysis.

**Keywords:** Infrared detector, Biomimetic, Biophotonic structures, Wave analysis, Energy absorption, Graphene.

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Hamza KURT'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, araőtırmalarımda bana yardımcı olan Zeki HAYRAN'a ve tüm diğer TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Nanofotonik Araőtırma Grubu üyelerine, Roketsan A.Ő. çalışma arkadaşlarıma, yöneticilerime ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimin ve araőtırmalarım için bana gerekli zamanı tanıyan Roketsan A.Ő.'ye teőekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xiv
<b>KISALTMALAR</b> .....	xv
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xvi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Araştırmanın Amacı ve Önemi.....	1
1.2 Araştırmanın Kapsamı ve Anahtarları.....	2
<b>2. YAPAY BİLEŞİK GÖZLER</b> .....	<b>3</b>
2.1 Temel Bilgiler.....	3
2.2 Bileşik Gözün Özellikleri.....	3
2.3 Bazı Bileşik Gözlerin Matematiksel Analizi.....	6
2.4 Uçan Böceklerin Gözlerinde Görsel Bilgi İşleme.....	9
2.5 Böcek Bileşik Gözlerinin Anatomisi.....	10
2.6 Doğal Görme .....	12
2.6.1 Tek açıklık gözü .....	13
2.7 Apozisyon Bileşik Göz.....	13
2.7.1 İnterommatidial açı.....	14
2.7.2 Nyquist açısal frekansı.....	15
2.7.3 Açısal hassasiyet işlevi .....	15
2.7.4 Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) .....	16
2.7.5 Göz parametreleri .....	16
2.7.6 Duyarlılık.....	17
2.7.7 Doğal bileşik gözlerin ölçeklendirilmesi.....	18
2.7.8 Bileşik gözlerin özel özellikleri.....	18
2.8 Süperpozisyon Bileşik Göz .....	20
<b>3. KIZILÖTESİ ALGILAYICILAR</b> .....	<b>21</b>
3.1 Kızılötesi Işımanın Malzemelerden Yayılması .....	22
3.2 IR Dedektör Sınıflandırılması .....	24
3.3 Kızılötesi Görüntüleme Sistemlerinin Temel Alt Birimleri.....	26
<b>4. ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR METODU İLE TEK BOYUTLU YAPILARDA ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIMI</b> .....	<b>27</b>
4.1 İletim Modları.....	28
4.2 Mükemmel Uyumlu Katman (Perfectly Matched Layer (PML)) .....	28
<b>5. BAL ARISI BİLEŞİK GÖZÜNÜN OPTİK YAPISI</b> .....	<b>31</b>
5.1 Morfoloji .....	31
5.2 Ommatidyanın Kırılma İndisleri ve Yapısal Boyutlarının Belirlenmesi.....	32
5.3 Dalga Kılavuz Modlarını Gözleme Yöntemleri ve Odak Konumunun Konumu .....	33

5.4 Optik Sabitlerin Belirlenmesi .....	33
5.5 CL Eğrilikleri.....	37
5.6 Işık İzleme Teknikleriyle Optik Sistem Analizi .....	38
5.6.1 Gauss kalın mercek formülü analizi .....	39
5.6.2 Odak konumunun doğrulanması .....	41
5.6.3 Bir ommatidyum için optimum boyut .....	41
5.7 Dalga Kılavuzu Modları .....	43
5.8 Bal Arısı Bileşik Gözünün Elektromanyetik Dalga Analizi.....	45
5.8.1 3µm-12µm Elektromanyetik dalga analizi .....	46
5.8.2 3µm-12µm Uzatılmış yapının elektromanyetik dalga analizi .....	48
5.8.3 Çift ommatidyum yapısı .....	51
5.8.4 Üçlü dizilim ommatidyum yapısı .....	54
5.8.5 Yapı odaklanmalarından enerji iletimi .....	56
5.8.6 Tek ommatidyum rbdom grafen absorpsiyonu .....	60
5.8.7 Üçlü ommatidyum rbdom grafen absorpsiyonu.....	64
5.8.8 Grafenli ommatidyum'un yansıma geçirim ve soğurum değerleri.....	67
5.8.9 Ommatidyum içindeki granfen uzunluklarına göre soğurum .....	68
5.8.10 Diğer çalışmalar .....	68
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>79</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Bileşik göz tipi [15].	4
Şekil 2.2 : (a) Apozisyon bileşik gözü ve (b) süperpozisyon bileşik gözü temsil etmektedir. Eğrinin tam genişliğinin yarı maksimum noktası, $\theta_A$ kabul açısını gösterir. (c) Afokal apozisyon gözün ommatidyumunu temsil etmektedir [17].	5
Şekil 2.3 : İnsan, kırımınla sınırlı insan gözü ile aynı çözünürlüğe sahip, en küçük bileşik göz ile donatılmıştır [20].	7
Şekil 2.4 : Uçan böceklerdeki bileşik göz [24]	9
Şekil 2.5 : Sineğin görsel ve merkezi sinir sisteminin şematik bir gösterimi (sinek beynindeki kesit) [29,30].	11
Şekil 2.6 : Farklı tipteki doğal göz sensörleri (Üstte) ve teknik karşılıkları (alttaki) [36].	13
Şekil 2.7 : Doğal apozisyon bileşik göz. (a) Meyve sineği kafası "Drosophila melanogaster" [39]. (b) Doğal apozisyon bileşik gözün çalışma prensibi.	14
Şekil 2.8 : "Çoklu lens gözüyle aynı açısal çözünürlüğü elde etmek için bir erkeğin en az 1m çaplı bileşik bir göze ihtiyacı vardır" [52].	18
Şekil 2.9 : Doğal süperpozisyon bileşik göz. (a) Connecticut Üniversitesi biyobilimi elektron mikroskop laboratuvarından taramalı elektron mikroskopu yardımıyla bileşik göz yapısına sahip canlının kafa ve gözünden bir kesit. (b) Doğal süperpozisyon bileşik gözünden bir kesit.	20
Şekil 3.1 : Elektromanyetik spektrum ve kızılötesi bandının spektrumdaki yeri [63].	21
Şekil 3.2 : Kızılötesi dedektörlerin tarihsel gelişimi.	22
Şekil 3.3 : Bir termal görüntüleme sisteminde yer alan alt bölümler.	26
Şekil 4.1 : Maxwell Denklemleri [67].	27
Şekil 5.1 : Çeşitli yapısal elementler için kırılma indekslerini gösteren arının gözünden ommatidyumun diyagramatik temsili [4].	34
Şekil 5.2 : Kütikül merceğinden çapraz kesit, kırılma ölçme tekniğinin sonuçlarını göstermektedir.	35
Şekil 5.3 : Kütikül mercekten geçen boyuna kesitler, arka planın kırılmış yapılara geçişini göstermektedir [71].	35
Şekil 5.4 : Taramalı Elektron Mikroskopu (TEM) yardımıyla görüntülenen "cuticular lens" (cl), "primary pigment cells" (ppc) ve "crystalline cone" (cc) [72].	36
Şekil 5.5 : 0,5 $\mu$ m ölçekli rbdom kesitleri [71].	37
Şekil 5.6 : A, Işın izleme tekniği tarafından kullanılan optik sistem diyagramı. Sayılar kırılma yüzeyleri, çapraz kesit deliklerin yerlerini göstermektedir. B, A modelini kullanan ışın izleme tekniğinin sonuçlarıdır.	38

Şekil 5.7 : Kalın mercek formülünden elde edilen sonuçları gösteren diyagram. H ve H' ana düzlemlerdir. Tüm ölçümler mikron cinsindedir. Şekil 5.6 ile karşılaştır [4].....	40
Şekil 5.8 : Tek ommatidyum yapısının, kendi çalışacağı dalga boyuna göre tasarladığımız hali.....	43
Şekil 5.9 : Ommatidyum aydınlatılmış mod desenleri [78].....	44
Şekil 5.10 : Bal arısı bileşik gözünün ommatidyumun optik modeli ve bu optik modelde kullanılan geometrilerin kırıcılık indisleri.....	46
Şekil 5.11 : Gönderilen dalganın yapı içinde yayılması. (a) 3µm dalganın yayılımı, (b) 5µm dalganın yayılımı, (c) 7µm dalganın yayılımı, (d) 10µm dalganın yayılımı, (e) 12µm dalganın yayılımı. Gelen dalga kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor. Yapı olmazsa, gelen dalgalar dağılıp, saçılacaktır.....	47
Şekil 5.12 : Üstteki Şekil, orta kızılötesi bölgede yapıya gelen enerjinin yüzdeler olarak ne kadar geri geldiğini gösteriyor. Altta ise enerjinin ne kadarının geçtiğini görüyoruz.....	47
Şekil 5.13 : Üstteki Şekil, uzak kızılötesi bölgede yapıya gelen enerjinin yüzdeler olarak ne kadar geri geldiğini gösteriyor. Altta ise enerjinin ne kadarının geçtiğini görüyoruz.....	48
Şekil 5.14 : Rabdom yapısının uzatılmış hali ve yansıma/geçirgenlik ölçüm noktaları. T1,T2 ve T3, geçirgenlik ölçüm noktaları, R1 ise yansıma ölçüm noktasıdır.....	48
Şekil 5.15 : Orta kızılötesi dalga boylarında üstte R1, yansıyan enerjinin %10' u geçmediğini görünüyor. Altta ise mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjiler %90' dan fazladır.....	49
Şekil 5.16 : Uzak kızılötesi dalga boylarında üstte R1, yansıyan enerjinin %15' u geçmediğini görünüyor. Altta ise mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjileri %85' ten fazladır. Dalga boyu arttıkça salınımların arttığı aşikardır.....	49
Şekil 5.17 : Uzun rabdoma sahip yapılarda gönderilen dalganın, yapı içinde yayılması.(a) 3µm dalganın yayılımı, (b) 5µm dalganın yayılımı, (c) 8µm dalganın yayılımı, (d) 10µm dalganın yayılımı, (e) 12µm dalganın yayılımı. Gelen dalga kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor. Yönlendirilen bölgede, rabdom da dalga kılavuzlanarak ilerliyor.....	50
Şekil 5.18 : İkili ommatidyum yapısının tasarıma aktarılmış hali ve T1,T2 ve T3, geçirgenlik ölçüm noktaları, R1 ise yansıma ölçüm noktasıdır.....	51
Şekil 5.19 : Orta ve uzak kızılötesi dalga boylarında üstte R1, yansıyan enerjinin %10' u hala geçmediği görünüyor. Altta ise mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjiler %65-85 civarındadır.....	52
Şekil 5.20 : İkili ommatidyum yapısında uzun rabdoma sahip yapılarda gönderilen dalganın, yapı içinde yayılması.(a) 4,5µm dalganın yayılımı, (b) 5µm dalganın yayılımı, (c) 8µm dalganın yayılımı, (d) 10µm dalganın yayılımı, (e) 12µm dalganın yayılımı. Gelen dalga kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor. Yönlendirilen bölgede, rabdom da dalga kılavuzlanarak ilerliyor.....	53
Şekil 5.21 : Üçlü dizilim ommatidyum tasarımı.....	54

Şekil 5.22 : Üçlü dizilim ommatidyum yapılarda gönderilen dalganın, yapı içinde yayılması.(a) 3µm dalganın yayılımı, (b) 4,8µm dalganın yayılımı, (c) 8,4µm dalganın yayılımı, (d) 12µm dalganın yayılımı. Gelen dalga kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor.....	55
Şekil 5.23 : Orta ve uzak kızılötesi dalga boylarında mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjiler %70-85 civarındır.....	56
Şekil 5.24 : "Multibeam interference" ile rabdom odaklanmalarından enerjinin iletimi.....	57
Şekil 5.25 : Kristal konideki odaklanma noktasına yerleştirilmiş dar bir dalga kılavuzu.....	57
Şekil 5.26 : Kristal konideki odaklanma noktasına yerleştirilmiş dar bir dalga kılavuzu ile elde edilen yansıma ve geçirgenlik enerjilerimiz.....	58
Şekil 5.27 : Kristal konideki odaklanma noktasına yerleştirilmiş dar bir dalga kılavuzu ile elde edilen tasarım sonuçları.....	59
Şekil 5.28 : Dalga boyuna bağlı olarak kristal koni odağında konumun değişimi grafiği.....	60
Şekil 5.29 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş bir adet grafen malzeme.....	61
Şekil 5.30 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş bir adet grafen malzemenin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve ommatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.....	62
Şekil 5.31 : Tek ommatidyum rabdomuna yerleştirilmiş bir grafenin, 4.8µm dalga boylu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.....	62
Şekil 5.32 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş grafen malzemeler.....	63
Şekil 5.33 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş grafen malzemelerin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve ommatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.....	63
Şekil 5.34 : Tek ommatidyum rabdomuna yerleştirilmiş grafenlerin, 4.8µm dalga boylu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.....	64
Şekil 5.35 : Üçlü ommatidyum yapısı ve bu yapıların rabdomları boyunca yerleştirilmiş birer adet grafen malzemeler.....	64
Şekil 5.36 : Üçlü ommatidyum rabdomları boyunca yerleştirilmiş birer adet grafen malzemenin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve ommatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.....	65
Şekil 5.37 : Üçlü ommatidyum rabdomlarına yerleştirilmiş birer adet grafenlerin, 4.8µm dalga boylu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.....	65
Şekil 5.38 : Üçlü ommatidyum yapısı ve bu yapıların rabdomları boyunca yerleştirilmiş birden fazla grafen malzemeleri.....	66
Şekil 5.39 : Üçlü ommatidyum rabdomları boyunca yerleştirilmiş birden fazla grafen malzemelerinin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve ommatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.....	66
Şekil 5.40 : Üçlü ommatidyum rabdomlarına yerleştirilmiş grafenlerin, 4.8µm dalga boylu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.....	67
Şekil 5.41 : Tekli ommatidyum rabdomları boyunca yerleştirilmiş birden fazla grafen malzemenin dalga boyuna karşılık yansıma, geçirim ve soğurma yüzdeleri ve bu yüzdelerin toplamı.....	67
Şekil 5.42 : Dalgaboyu ve grafen uzunluğuna bağlı olarak tekli ommatidyum yapıda oluşan grafen soğurumu.....	68

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1 : Kızılötesi görüntülemenin uygulama alanları.....	22
Çizelge 3.2 : Atmosferik iletim ve dalgaboyu aralıkları.....	23
Çizelge 3.3 : IR dedektör karşılaştırması.....	25
Çizelge 5.1 : Kütikül merceğinin katmanlarının boyutları ve kırma indeksleri.....	34
Çizelge 5.2 : Retinula hücrelerinin kırılma indisleri.....	38

## KISALTMALAR

<b>FDTD</b>	: Zaman Düzleminde Sonlu Farklar (Finite-Difference Time-Domain)
<b>FOV</b>	: Görüş Alanı (Field of Viow)
<b>CL</b>	: Kornea Mercek (Corneal Lens)
<b>CP</b>	: Koni Hücre İşleme (Cone Cell Process)
<b>CC</b>	: Kristal Koni (Crystalline Cone)
<b>CS</b>	: Koni Sonu (Cone Stalk)
<b>RH</b>	: Rabdom (Rhabdom)
<b>Ph</b>	: Fotoreseptör (Photoreceptor)
<b>CZ</b>	: Temiz Bölge (Clear Zone)
<b>VGA</b>	: (Video Graphics Array)
<b>HDTV</b>	: (High Definition Television)
<b>HPF</b>	: Yüksek Geçiren Filtre (High Power Filter)
<b>LPTC</b>	: Lobular Plaka Teğetsel Hücreler
<b>EMD</b>	: Temel Hareket Dedektörü (Essensial Motion Detector)
<b>ASF</b>	: Açısal Hassasiyet Fonksiyonu (Angular Sensitivity Function)
<b>FWHM</b>	: Tam Genişlikte Yarı Maksimum
<b>MTF</b>	: Modülasyon Transfer Fonksiyonu
<b>MLA</b>	: Mikro Lens Dizilimi (Micro-Lens Array)
<b>IR</b>	: Kızılötesi (Infrared)
<b>NIR</b>	: Yakın Kızılötesi
<b>SWIR</b>	: Kısa Dalgaboyu Kızılötesi
<b>MWIR</b>	: Orta Dalgaboyu Kızılötesi
<b>LWIR</b>	: Uzun Dalgaboyu Kızılötesi
<b>VLWIR</b>	: Çok Uzun Dalgaboyu Kızılötesi
<b>TV</b>	: Televizyon
<b>FPA</b>	: Monolitik Odak Düzlemi Dizileri
<b>Ge</b>	: Germanyum
<b>ZnS</b>	: ÇinkoSülfür
<b>ZnSe</b>	: ÇinkoSelenür
<b>RAM</b>	: Bellek
<b>CPU</b>	: İşlemci
<b>TEM</b>	: Enine Elektrik ve Manyetik Dalgalar
<b>TE</b>	: Enine Elektrik Dalgaları
<b>TM</b>	: Enine Manyetik Dalgaları
<b>PPC</b>	: Pigment Hücreleri (Principal Pigment Cells)
<b>LPC</b>	: Uzun Pigment Hücreleri (Long Pigment Cells)
<b>RE</b>	: Retina Hücresi (Retinula Cell)
<b>ARC</b>	: Yansıtma Kaplama (Anti-Reflection Coating)

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$\theta_A$	Kabul açısı
$\theta$	Açısal çözünürlük limiti
$d$	Lens çapı
$\lambda$	Dalgaboyu
$f$	Odak uzunluğu
$R$	Kaynaktan göze uzaklık
$R_{EYE}$	Bileşik göz yarıçapı
$D$	Mikromercek çapı
$\Delta\phi$	İnteromatidyum Açısı
$\nu_s, \nu_{co}$	Nyquist açısal frekansı
$\emptyset$	Referans noktanın açısal mesafesi
$\Delta\phi$	Katı açısı
$\Delta\rho$	$\Delta\phi$ ' nin geometrik katkısı
$P$	Göz netlik parametresi
$K$	Reseptör emilimi
$F/\#$	Optik sistemin durdurma sayısı
$k, l$	Reseptör uzunlukları
$c$	Işık hızı
$h$	Planck sabiti
$W$	Enerji
$\Delta\phi$	Faz farkı
$n$	Kırılma indeksi
$r$	Lens yüzey eğrilik yarıçapı
$u_{nm}$	Kesme parametresi
$\epsilon(\omega)$	Dielektrik fonksiyonu
$\sigma$	Optik iletkenlik
$\omega$	Açısal frekans
$\mu$	Kimyasal potansiyel
$T$	Sıcaklık
$\Gamma$	Parçacık saçılma oranı
$\tau$	Gevşeme vakti



## 1. GİRİŞ

Kızılötesi spektrumda hassasiyeti artırmak zor bir iştir. Kızılötesi görüntüleme veya algılamada, geniş bant aralığı ve düşük güç tüketimi çok önemlidir. Yeni çözümler, doğadan esinlenilmiş birçok bireysel mercekle bileşik göz gibi biyolojik gözleri taklit ederek elde edilebilir. Doğa, çevredeki ortamı algılama ve tespit etme konusunda birçok zekice yaklaşımlar sunar. Bileşik bir göz küçük optik birimlerden oluşsa da, geniş açılı elektromanyetik dalgaları algılar ve yüksek iletim ve düşük yansımaya kaybına sahiptir. Böceklerin kompakt, sağlam, geniş alanı görme, ışık yoğunluğuna daha duyarlı ve ekonomik yapıları görme sistemleri açısından, insan gözlerinden (tek gözlü gözler) daha üstün gözleri vardır. İstenen bu özelliklerin hepsine önemli bir dezavantaj eşlik eder: daha düşük mekânsal çözünürlük. Foto-dedektörlerde biyo-esinlenen optiğin fizibilitesini araştırmanın ilk adımı, ışığı toplamak ve tespit etmek için optik sistem ile ışık etkileşimi yapmaktır [1-4]. Doğal görmede kullanılan en yaygın yöntem ışın analizidir. Bu tür analizlerde, odak noktası veya foto-reseptör bölgesindeki enerji miktarı, ara-yüzlerde yansımaya ve emilime nedeniyle oluşan kayıplar incelenemez. Işığın dalga özellikleri göz önüne alınmaz. Bu tez çalışmasında, ışığın kızılötesi algılanışının, biyolojik ilham dalga analizi sunulmaktadır. “Maxwell” denklemlerine dayanan dalga analizini [5], verimli ışık algılamaya göre sayısal olarak modelledik ve gözün birinci ara-yüzünü, foto-reseptör alanına doğru kestikten sonra elektromanyetik dalganın yapı içindeki yolculuğunu açığa vurduk ve uzun zamandır ihmal edilen makro yapıların dalga analizi sayesinde dedektör teknolojilerine uygulanabilirliğini göstermiş olduk.

### 1.1 Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmada, özellikle zaman domeninde sonlu farklar metodu “Finite-Difference Time-Domain” (FDTD) dalga analizleri yardımıyla bileşik göz yapı tasarımlarının optik özelliklerinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Oldukça geniş frekans aralığında çalışabilen bu tasarımlar yüksek verimli fotonik cihazlar için umut vadedecek sonuçlar içermektedir.

Simülasyon aşamasında yararlanılan elektromanyetik teorelinin temelini olan ‘‘Maxwell’’ denklemlerinin dalga analizi formuna uyarlanması sayesinde bileşik göz yapıları modellenenir. Daha önceleri optik ışın analizleriyle yapılan modellerdeki eksiklikler, dalga analiziyle orta ve uzak kızılötesi frekans bölgesinde tamamlanabilir.

Işığın enerjisinin, bileşik göz yapısının ommatidyumunda nasıl odaklandığı, sınır koşulları ve ara yüzlerle nasıl etkileşime gireceği ortaya çıkarılabilir. Yapının geometrisi değiştirildiğinde oluşacak etkinin analizi yapılabilir.

Gücün iletimini ve yansımasını, ışığın polarizasyonunu ve dalga boyunun yapı içindeki odaklanmaya bağlı olarak değişimini dalga analizleriyle inceleyebiliriz. Bu sayede uzun zamandır ihmal edilen makro yapıların algılama yapan cihazların teknolojisine uygulanabilirliği gösterilebilir.

## **1.2 Araştırmanın Kapsamı ve Anahtarları**

Hazırlanan bu çalışmada öncelikle literatür taraması yapılmış ve ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci bölümün bir kısmında detaylı bir şekilde aktarılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde yapay bileşik gözler hakkında temel bilgiler verilmiş, özelliklerinden bahsedilmiş ve anatomisine değinilmiştir. Bunlara ek olarak aposizyon özellikli gözün bazı önemli matematiksel formülleri ve metrikleri verilmiştir.

Üçüncü bölümde kızılötesi dedektörlerin kullanım alanları, temelleri, çeşitleri ve tarihteki yerinden bahsedilmiştir [6]. Ayrıca kızılötesi görüntüleme sistemlerinin temel alt birimlerinden kısaca bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde kullandığımız FDTD çözümlü ‘‘Lumerical’’ dalga analizi programından bahsedilerek, beşinci bölüme yani bal arılarının görme yapılarına girilmiştir. Bu bölümde bal arılarının görme yapılarının tek bir ommatidyumundan, yapının kırılma indislerinden, ışın analizlerinden ve bu yapının nasıl canlı olarak mikroskoplarla incelendiğinden bahsedilmektedir. Biz de bu bölümdeki bilgileri kullanarak, aynı bölümde bal arıları görme yapılarının, dördüncü bölümde bahsettiğimiz dalga analizi programına uyarlayarak ışın analizi eksikliklerini tamamladık ve grafen yapılarına göre enerji soğurumlarını inceledik. Altıncı bölümde ise bulgular ve çalışmalar bir sonuca bağlanarak kısa bir özet sunulmuştur.

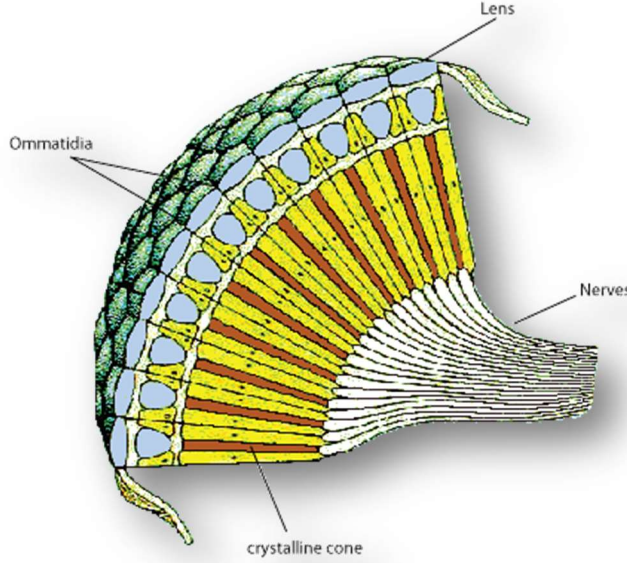
## 2. YAPAY BİLEŞİK GÖZLER

### 2.1 Temel Bilgiler

Doğal bileşik gözler, yüzyılı aşkın bir süredir bilimsel araştırmalara tabi tutuldu. Bu, çok miktarda yayımla sonuçlandı. Son yıllarda ise minyatür yapay bileşik gözlerin oluşturulması için araştırmalar yapılmaktadır. Biyolojik ilham veren cihazlar, geniş görüş alanı (FOV) ile çevreden değerli bilgiler sağlamak için uçan böcek görsel organlarını ve sinyal yollarını taklit ederler [7-9]. Neredeyse 360 derecesini kaplayan geniş FOV ve çok yönlü algılama, bu organların en ilginç özelliğidir. Buna ek olarak, toplanan görsel bilgi, ortamın optik akışını üretmek için işlenir. Ardından, böceklerin gözündeki sinirler, güvenli ve hızlı tarama ve önemli ip uçlar elde etmek için geniş FOV ile optik akışını ayrıştırırlar [10]. Daha fazla okumak için, referanslar [11] ve [12] özellikle önerilir.

### 2.2 Bileşik Gözün Özellikleri

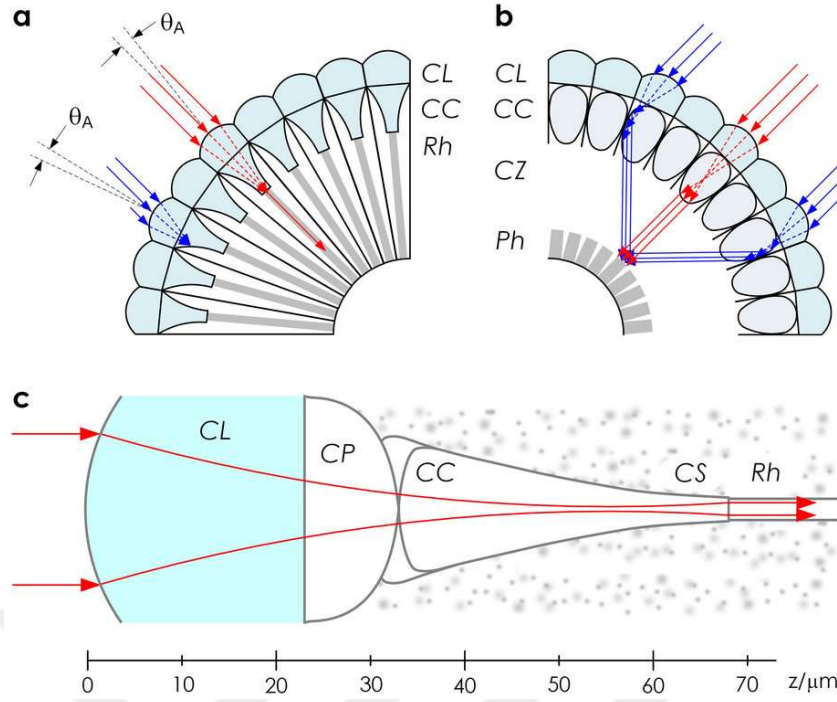
Bileşik gözlerin özellikleri, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ommatidyum olarak bilinen "küçük göz" dizisiyle karakterize edilir. Ommatidyum'un her biri esas itibarıyla bir lens, bir ışık yönlendirici yapı ve bir grup dedektör hücresinden oluşur. Esas yapı genellikle birkaç dedektör hücresi ile rabdom adı verilen bir yapıyla birleştirilir. Tipik bir rabdom, içinde rabdomeres adı verilen altı veya yedi foto-reseptör hücresi, basit bir değişken indis ile ışık kılavuzundan oluşur. Bileşik gözlerin çoğunun ortak olduğu bir özellik, değişken indisli lensleridir. 1891'de Sigmund Exner [13,14], bilim adamlarının bu gözlerde bulunan oldukça garip merceklerin işlevini anlamaları konusundaki zorluğa bir çözüm getiren bir monografi yayınladı. Mercek malzemesi ile hava arasında bulunan kırılma indisi farkı çok azdır. Böylece, kavisli bir lens-hava ara yüzünde ışığın kırılması, sıradan bir şekilde ışığı bir görüntüye odaklamak için düşük olacaktır. Sigmund Exner, objektifin bir "lens silindiri" gibi çalışması yerine, değişken indisli lens gibi çalışması gerektiğini önermişti.



Şekil 2.1 : Bileşik göz tipi [15].

Bir lens için bu kavram, günümüzde bile yeni yaygınlaştı, ancak çok yakın zamana kadar böyle lenslerin pratik bir biçimde üretilmesine yönelik yöntemler hemen hemen hiç mevcut değildi. Fiber optik iletişimle ilgili araştırmalar, değişken indisli lensleri üretmek için birkaç pratik yöntemle yol açmıştır [16].

Bileşik göz sadece belli bir göz yapısı değil, büyük ölçüde farklı özelliklere sahip göz yapıları sınıfıdır. Şekil 2.2’de farklı ommatidyum türleri gösterilmektedir. Şekil 2.2(a)'da "apozisyon" gözünden tipik bir ommatidyum görülürken, Şekil 2.2(b)'de “süperpozisyon” gözünden biri gösterilmektedir. Eğrinin tam genişliğinin yarı maksimum noktası,  $\theta_A$  kabul açısını gösterir. (CL: corneal lens, CP: cone cell process, CC: crystalline cone, CS: cone stalk, Rh: rabdome, Ph: photoreceptors, CZ: clear zone). Bu iki göz türünün görüntü oluşum mekanizması, her ikisi de sınıflandırılmış olsa bile çok farklı görünmektedir. Apozisyon gözünün fonksiyonu anlaşılabilir gibi görünür. Bu gözleri oluşturan ommatidyumlar, farklı bir yönden gelen ışığa yanıt verirler. Bir ommatidyum merceğinde toplanan ışık, komşularının foto-dedektörlerine ulaşamayacağı şekilde bağımsız olarak tepki veriyor gibi görünür. Süperpozisyon göz bu açıdan oldukça farklı davranıyor. Burada, tüm mercek dizisinden gelen ışık, foto-dedektör üzerine toplu bir şekilde düşecek gibi görünür. Dalga, altta yatan dokudan ayrıldığında, lens dizisinin, foto-dedektörlere yaklaşık konumunda, arkada bir düzlem üzerine dik bir görüntü oluşturulabilir.



Şekil 2.2 : (a) Apozisyon bileşik gözü ve (b) süperpozisyon bileşik gözü temsil etmektedir. (c) Afokal apozisyon gözün ommatidyumunu temsil etmektedir [17].

Bu denemeden beri, bu gözlerin çalışma şekli üzerinde önemli tartışmalar var. Bazı çalışmalar, lens dizisinin, fotoreseptör dizisi üzerinde görüntüyü oluşturmak için sıra sıra değişken indisli lensler gibi davrandıklarına inanıyorlar. Böyle bir göz, hassasiyet ve küçük detayların çözülmesi açısından apozisyona göre avantajlara sahiptir. Diğer çalışmalar, yüzeysel süperpozisyon olarak görünen bazı bileşik gözlerin, lens dizisi ile fotoreseptör dizisi arasındaki "net bölge" de, ışığı belli bir rabdoma yönlendiren dalga kılavuzları tarafından geçtiğini belirtti. Bu nedenle, böyle gözler için ommatidyum, bağımsız olarak, gözün aslında tek açıklık gözü gibi işleyeceği şekilde çalışır [18]. Günümüzde popüler bir bakış açısı, mercek dizisi ile rabdomlar arasındaki açık bölgelere sahip böcek gözlerinin, ışık yönlendiren liflerinin asgari düzeyde gece gerçek süperpozisyon gözleri olarak hareket ettikleri, ancak gün içinde apozisyon gözleri, net bölgeye, pigment hareketinin lifleri etkin ışık kılavuzları haline getirdiği görülür. (bkz. ref [13], s. 683). Geceleri, gözler, kuantum verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için hareket ederken, gün boyunca çözünürlüğü en üst düzeye çıkarırlar.

### 2.3 Bazı Bileşik Gözlerin Matematiksel Analizi

Bileşik gözlerde sistemlerin tasarımında kullanımları olan bazı özellikler, matematiksel önem taşımaktadır. Bu nedenle buradaki göz özelliklerini matematiksel analizler ile daha dikkatli incelemek yararlı olacaktır.

Bileşik gözün böcekler için en büyük avantajı boyut olarak görünüyor. Bileşik bir gözde, böcek-başının yüzeyinde, derinliği milimetre veya daha düşük olan ince bir tabaka yer alır. Aynı zamanda, bu göz başın önemli bir bölümünü kaplar. Böylece bileşik göz küçük boyutlu hayvanlara mükemmel bir şekilde yerleştirilmiştir. Apozisyon gözde küçük boyutlu dedektör üretimleri için hem çözünürlük hem de hassasiyet maliyetli olacaktır. Böcek gözünün tam işleyişi iyi anlaşılmamış gibi görünse de, aslında sözde "süperpozisyon" gözünün varlığı konusunda bir tartışma vardır. Bu tartışmalar yüzünden, bazı bilim insanları, "tek açıklık gözleri" yapısına sahip gözleri aramayı yeğlerler. Çoğu kişi bileşik gözün zayıf çözünürlük ve hassaslık nedeniyle görüntü oluşturma cihazı yerine hareket dedektörü olarak çalıştığını düşünüyor. "Süperpozisyon" gözünün kavramı, doğruysa, en azından bazı böcek gözlerinin düşünüldüğünden daha yüksek çözünürlük ve duyarlılığa sahip olabileceğini önerebilir. Bu fikirler bu bölümde daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Apozisyon bileşik gözünün başlıca sınırlaması, tek bir ommatidyum lensin açıklığı tarafından çözünürlüğe maruz kalan kırınım sınırıdır. Uyum gözündeki her ommatidyumdan gelen ışık, bağımsız olarak çalıştığı için, farklı ommatidyum açıklıklardan geçen ışık arasında bir girişim olmaz. Bu girişim eksikliği, sadece tipik bir lensin çapı  $d$  ile belirlenen, temel açısal çözünürlük sınırı  $\theta$  'nın (en küçük çözülebilir aralık), gözün diyafram açıklığının altına düştüğü açının yarısına neden olur ve dalga boyu bilinen denklem (2.1) ile açıklanır.

$$\theta = 1.22 \lambda / d \quad (2.1)$$

Bu kısıtlama ışığın dalga özelliğinin doğrudan bir sonucu değil, gözün kendisidir ve kuantum mekaniğinin belirsizlik ilkesinin bir tezahürüdür. Lens sapmaları, defokus, rabdom boyutu veya diğer göze bağlı özellikler çözünürlüğü düşürebilir, ancak asla artırmaz. Bazı böcek gözlerinin yüksek çözünürlüklü ommatidyumundan ve  $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$  (kırmızı ışık) denkleminde bulunan  $d = 28.5 \mu\text{m}$ ' lik tipik bir değer için, denklem (2.1) açısal çözünürlük limitini  $\theta = 25.6 \text{ mrad}$  verir. Bu insan gözü tarafından dayatılan çözünürlük sınırıyla karşılaştırılmalıdır. İnsan gözünün

diyaframı karanlık uyarılmanın derecesine göre değişir. Göz tamamen karanlık olduğunda, diyafram 5600 mikron büyük olabilir, ancak deneylerdeki çözünürlüğü, lens sapmalarının ve foto-reseptör yoğunluğunun bu koşullarda düşürdüğünü ileri sürmektedir. Deliller, diyafram açıklığı yaklaşık 2350 mikrona düştüğünde gözün kırınımıyla sınırlı olduğunu önermektedir (kırmızı ışık için bakınız, ref [19], s.175). Böylece Denk. (2.1)'de  $\theta = 0.32$  mrad'lık bir kırınım sınırı elde edilir.

Apozisyon gözü için çözünürlük sınırı, insan gözünden beklediğimiz çözünürlükten çok daha düşüktür. Bu gerçeğin zekice bir örneği Kirschfield tarafından yayınlanmıştır [20] ve Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Sinek gözündeki tek bir ommatidyum için çözünürlük sınırının doğrudan ölçümü,  $\theta = 17,5$  mrad verir ve yukarıda hesaplanan kırınım sınırıyla kabaca uyumludur [21]. Daha küçük deneysel değer, deneyde kullanılan ortalama dalga boyu için biraz daha büyük bir d değerinden veya daha küçük bir değerden kaynaklanmalıdır. Açıkça sineğin gözü kırınım sınırına yakındır.

Apozisyon gözünün ikinci önemli sınırlaması düşük duyarlılıktır. Gözü oluşturan ommatidyumlar farklı yönlere bakıyor. Her bir lensin ommatidyumu rabdomu üzerinde bir görüntü oluşturur, çünkü her bir rabdom sadece altı veya yedi foto-reseptörü içerir. Bu mercekler, yalnızca ommatidyum diyaframının üzerine düşen ışığı toplamak ve altta yatan yapılarla birlikte, algılama için foto-reseptörlere mümkün olduğunca çok ışık yoğunlaştırmak için bulunmaktadır.



Şekil 2.3 : İnsan, kırınımıyla sınırlı insan gözü ile aynı çözünürlüğe sahip, en küçük bileşik göz ile donatılmıştır [20].

Bununla birlikte, küçük boyutlu mercekler, insan gibi büyük bir hayvanın gözündeki kadar fazla ışık toplayamaz. Bunu anlamak için, çok küçük bir bileşik gözü aydınlatan ışık kaynağı, ışığı yalnızca bir ommatidyumdan verebilir. Aslında şu kanıt var: ışık ommatidyumların görüş alanlarına denk geliyor, ancak ilk başta ihmal edebiliriz. Sonra kaynaktan bölünerek gelen ışık, ommatidyum'un diyaframına denklem (2.2)'deki gibi girebilir.

$$f = (d / 4R)^2 \quad (2.2)$$

Burada R, kaynaktan göze olan uzaklıktır ve d' çaplı yuvarlak bir diyaframı olan bir insan gözü ya da herhangi bir optik sistem, aynı kaynaktan ve aynı uzaklığa R'den aydınlatılıyorsa, denklem (2.2) uygulanabilir. Böylece optik sistem tarafından alınan ışık enerjisinin bileşik göz tarafından alınana oranı denklem (2.3) gibi olacaktır.

$$r = (d / d')^2 \quad (2.3)$$

Bileşik gözün çapı, d, insan gözünün çapı, d' ile karşılaştırırken denklem (2.3)'e göre önemli bir hassasiyet kaybı; d = 50µm ve d' = 5600µm, r = 8 x 10<sup>-5</sup> bulunur. Bileşik gözü, 10 cm' lik bir açıklığı olan geniş arayıcıyla karşılaştırırken, r = 2,5 x 10<sup>-7</sup> olduğunu buluyoruz. Arka planlarından daha büyük olmayan büyüklükteki hedeflerle çalışan arayıcıların tasarımında bileşik gözlerin kullanılmasına karşı güçlü bir delil budur. Aynı durum, bir süperpozisyon gözü için geçerli değildir.

Süperpozisyon gözü, yüzeysel bir benzeşime rağmen, apozisyon gözünden tamamen farklı bir şekilde çalışır. Bir süperpozisyon gözündeki ommatidyum, bağımsız olarak çalışmaz. Lens dizisi, rbdom düzlemi üzerinde tek bir görüntü oluşturur. Farklı ommatidyum' dan gelen ışığın burada olduğu varsayılır ve tutarlı bir şekilde üst üste bindirilir. Ardından lens dizisi, çözünürlüğü belirleyen gerçek fiziksel açıklık ve etkili diyafram olması dışında, basit gözdeki tekli merceklerle çok benzer şekilde hareket eder.

Diyaframın düzgün, yuvarlak ve bir rbdom lensinin yaklaşık N katı kadar bir çapa sahip olabileceğini varsayarsak, denklem (2.1) açısal çözünürlüğün, benzer bir objektife göre 1/N kat daha fazla olduğunu görülür. Böylece efektif diyafram, denklem (2.1)  $\theta = 0.256$  mrad bulunur ki bu insan gözüne kabaca eşittir. Hassasiyetteki artışın, denklem (2.2), f'nin N kare çarpanı kadar arttığını görüyoruz. Böyle bir gözü insan gözü ile karşılaştırırken, denklem (2.3), enerji oranı r = 0.8, neredeyse eşdeğer bulunur. Süperpozisyon gözü, basit bir göz için

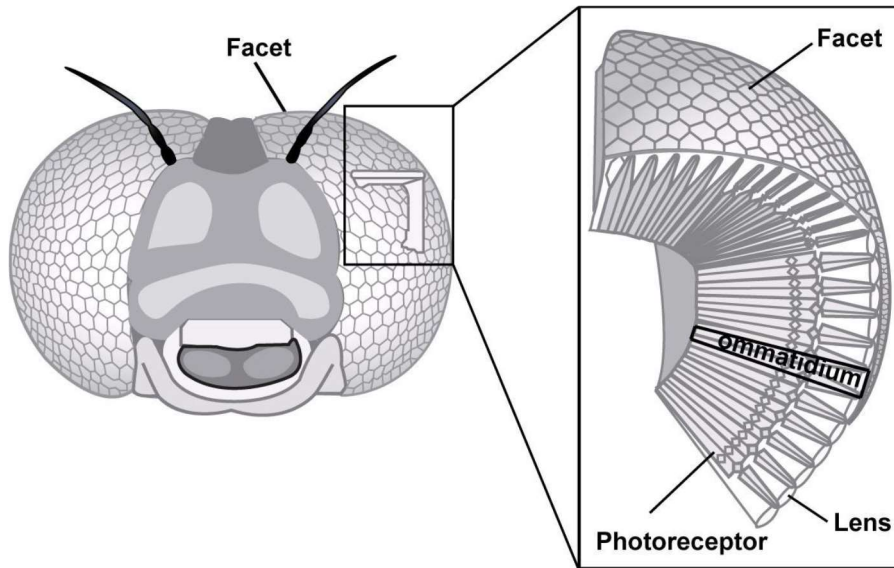


çözünürlük ve duyarlılıkta neredeyse eşdeğerse, boyut avantajından gelebilecek sonuçlara bakabiliriz.

Süperpozisyonlu bileşik gözün, konvansiyonel basit bir gözden daha derin bir şekilde kafanın içine yapılabilmesinin başlıca nedeni, değişken indisli lens elemanlarının kullanılmasıdır. Bazı değişken indisli lenslerin odak uzaklığının, aynı merkezi kırılma derecesine sahip basit bir lensinkinden en az  $\frac{3}{4}$  kat daha küçük yapılabileceği uzun süredir bilinmektedir [13]. Değişken indisli lenslerin tasarımı, üretim zorlukları ve teorik temeli ile gelişen, karmaşık olan yeni bir alandır. Bu teknolojinin arayıcı tasarımına uygulanması için dikkatli bir değerlendirme çok ilginç ve potansiyel olarak çok yararlı olacaktır, ancak bu çalışma mevcut kapsamının ötesinde bir şeydir.

#### 2.4 Uçan Böceklerin Gözlerinde Görsel Bilgi İşleme

Uçan böceklerin vücudunda gözler, başının çoğunu kaplar ve uçuş kontrolü için önemli görsel bilgi sağlar [22]. Şekil 2.4 'te gösterildiği gibi, iri gözler, ışığı bağımsız olarak algılamak için bir lens ve bir foto-reseptör içeren birçok küçük yinelenen birimden (ommatidyumlar) oluşur. Böylece, gözler bileşik gözler olarak adlandırılır. Her bir yarı küresel bileşik göz, yaklaşık 180 derecelik geniş bir görüş alanını (FOV) görebilir. Bu nedenle, iki bileşik göz, uçan böceklerin neredeyse 360 dereceyi görmesini ve böylelikle tam çevresinden görsel bilgiyi sürekli olarak çıkarmasını sağlayacağından bahsetmiştik [23].



Şekil 2.4 : Uçan böceklerdeki bileşik göz [24].

Sözü geçen geniş FOV 'u algılamının yanı sıra, böceklerin gözü de sabittir ve sabit odaklı optiklerden oluşur [25]. Bu iki özellik sayesinde, böcek gözü, insan gözleri gibi, steryo görme ve odak kontrolünden mesafe bilgisi çıkaramaz. Bunun yerine, bileşik göz, uzak bir nesneye göre daha hızlı harekete neden olduğu olayına dayanan hareket tahmin etme veya optik akışlar ile mesafeyi belirler.

Bileşik gözler, hareket bilgisini etkili bir şekilde algılaması gerektiği için yüksek bulanıklık frekansı 200-300 Hz arasında değişen çözünürlüğe sahiptir, insan gözünde bu frekans 20 Hz'dir [26]. Bununla birlikte, çevresel çözünürlüğü insan gözününkinden daha zayıftır. Özellikle, bileşik gözdeki toplam ommatidyum sayısı, meyve sineğinde 700, diptera üyesi olan sineklerde de 6.000'e kadar değişmektedir. Buna kıyasla, bu tespit ünitelerinin sayısı, insan retinasından (108 adet çubuk ve 106 adet koni) ve hatta piyasada bulunan yapay görüntü sensörlerinden (VGA çözünürlük için 3x105 ve HDTV çözünürlüğü için 2x106) daha küçüktür [27]. Bu farklılıklar, böceklerin görüş sisteminin, insanlığın sahip olduğu görme sisteminden çok daha farklı bir biçimde geliştiğini ve uçuş kontrolleri için ipuçlarını bulmak için görsel bilginin nasıl işlendiğini anlamak için gözden geçirilmesi gerektiğini ima eder.

Bundan sonraki başlık böceklerin bileşik gözlerinin temel anatomisini inceliyor, görme ve uçuş kontrolü mekanizmasını aydınlatmaya çalışıyor. Gözün anlaşılmasını kolaylaştırmak için optik akışları tahmin eden bir temel hareket dedektörü modeli tanımlanır. Bu model, komşu ommatidyum'un yerel hareket bilgilerini koordine etmeyi açıklamaktadır. Ayrıca, bir böceğin gözü, tüm yerel hareketleri kombine bir geniş alan hareketi görünümüne entegre ettiğinden, geniş alanlı bir optik akış analizi modeli sunuyor. Toplamda, bir böceğin optik akış alanındaki tüm ipuçlarını kullanarak uçuş sırasında kendini nasıl kontrol ettiği anlamaya çalışılıyor.

## **2.5 Böcek Bileşik Gözlerinin Anatomisi**

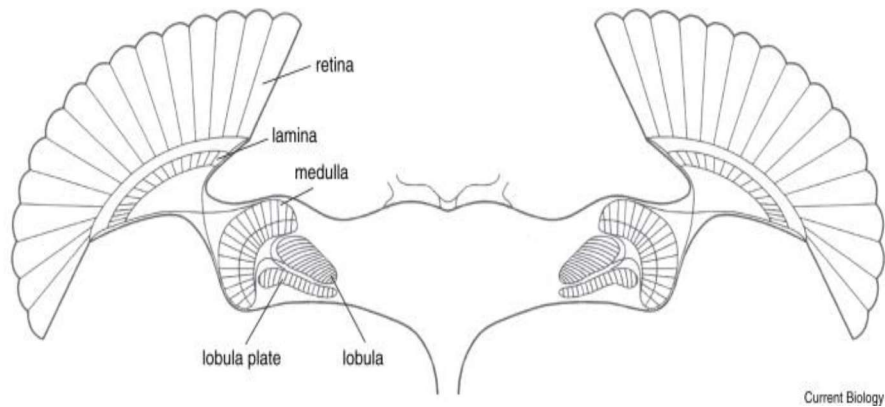
Uçan böceklerin navigasyonu ile ilgili bileşik gözlerinin anatomisi kısaca Zeffery [28] tarafından özetlenmiştir. Görsel bilgi işleme için anatomi çoğunlukla referanstan alınmıştır. Uçan böceklerin iki bileşik gözündeki görsel bilgi işleme için üç ana optik lob Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Fotoreseptör sinyallerinin zamana bağlı değişikliklerini vurgulayan lamina iletimi yapılıdır. Bir retinotopik düzen medulla tarafından sürdürülür. Lobula plakası, kontrol alan optik lob ve kanatları kontrol eden

torasik gangliyonlara bilgi gönderen geniş alanlı, hareket duyarlı teğetsel nöronlardan oluşur. Bu optik loblar, iç doku sinir liflerinin yoğun bir ağı, dalları ve sinapsları olan üç tip nöropil veya gangliondan oluşur: lamina, medulla ve lobula kompleksi. Bu nevpiller üç önemli görsel bilgi işleme zincirine karşılık gelir [28].

Lamina, gözün foto-reseptör tabakasının hemen altında yer alır ve foto-reseptörlerden doğrudan girdi alır. Bu gangliyondaki nöronlar, geçici kontrast değişimi veya değişiklikleri arttırarak geçici yüksek geçiren filtre (HPF) gibi davranırlar. Aynı zamanda kazanç kontrol işlevselliği sağlar; böylece, arka plan ışık şiddetindeki değişmelere hızlı bir adaptasyon sağlanır. Tabakadan gelen aksonlar, görüntüyü medullaya yansıtıırken öne ve arkaya dönüştürürler.

Medulla'daki hücreler son derece küçük ve kayıt yapmak zordur. Bununla birlikte, davranışsal deneyler, yerel optik akış algılamasının bu düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Retinotopik organizasyon bu ikinci gangliyonda halen mevcuttur ve ommatidyum başına yaklaşık 50 nöron vardır. Medulla daha sonra lobula kompleksine bilgi gönderir.

Üçüncü optik gangliyon, lobula kompleksi, geniş mekânsal yakınsamanın odağıdır. Daha önceki iki gangliyon tarafından önceden işlenmiş birkaç bin fotoreseptörden gelen bilgi lobül plakasında sadece 60 hücreye yakınsar. Teğetsel hücreler olarak adlandırılan bu hücreler (ya da Lobular Plaka Teğetsel Hücreler, LPTC), medulla'nın geniş bölgelerinden sinaptik girdiler alan geniş dendritik ağaçlara sahiptir ve bu da büyük görsel alıcı alanlar oluşturur.



Şekil 2.5 : Sineğin görsel ve merkezi sinir sisteminin şematik bir gösterimi (sinek beynindeki kesit) [29,30].

Lobula kompleksi, üst beyin merkezlerine ve göğüs kangalısındaki motor merkezlerine bilgi taşıyarak inen nöronlara aktarır.

Üç optik lobdaki bu görme, işleme mühendisleri tarafından tasarlanır ve tabaka ise geçici bir HPF olarak modellenir. Her bir ommatidyuma farklı bir aydınlık düzeyine sahip hareketli bir özellik gelirse, zamansal kontrast değişikliği nedeniyle tabakanın çıkışı yüksektir. Bu nedenle, bu HPF çıkışı, hareketli bir özelliğin varlığını temsil eder. Medullar, uzamsal olarak komşu hücreler arasında bir hareket dedektörü olarak modellenmiştir. İlk hareket dedektörü modeli, Hassenstein ve Reichardt [31] tarafından geliştirildi ve temel hareket dedektörü (Essensial Motion Detector) (EMD) olarak adlandırıldı. Bu EMD çıkışı, komşu hücreler çifti arasında 1D hareketin büyüklüğündedir. Son olarak, lobula kompleks, çıktılarını 2D matrislerin bir ürünü olan paralel eşlemeli filtreler olarak modellenmiştir. Bir matris çevreden gelen optik akışlardır, diğer matris ise kendi kendine hareket tahmini için tasarlanmış katsayılarıdır.

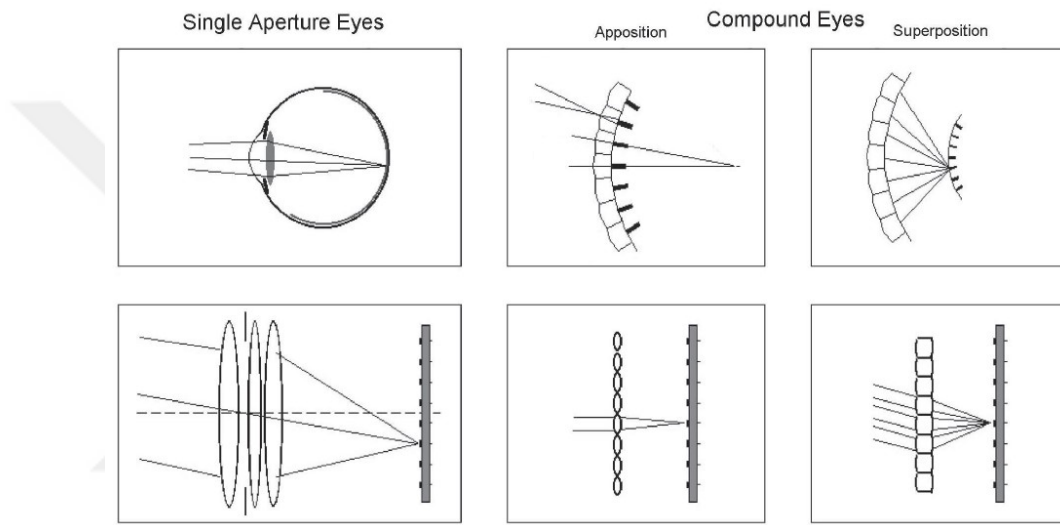
## 2.6 Doğal Görme

Bilinen iki hayvan gözü türü vardır [32]: Tek açıklık gözleri ve bileşik gözler. İkincisi ayrıca apozisyon bileşik gözleri ve süperpozisyon bileşik gözlerine bölünebilir (Şekil 2.6). Bu göz tiplerinin tümü kademeli kırma indisli optikleri dahil ederken görüntü oluşumu için refraktif mekanizmalar kullanabilir [14]. Tek gözlü gözlerde ve bileşik gözlerde, yansıtıcı mekanizmalar da bulunabilir [33, 34]. Harici bir iskelete sahip küçük omurgasız hayvanlar için sistem, ağırlık ve metabolik enerji tüketimi göz önüne alındığında çok pahalıdır. Bütçe sıkılaşırsa, doğa tek bir göz kullanarak yerine birkaç küçük göz algılayıcı matrisli görüntü yakalamayı tercih eder. Bileşik gözlerin çözünürlüğü, tek giriş aralıklı gözlerinki ile karşılaştırıldığında genellikle zayıftır [35]. Yüksek çözünürlüklü görüntülerin işlenmesi, küçük böceklerin beyinlerini zaten aşırı yükleyecektir. Doğada bu çözünürlük eksikliği genellikle geniş bir görüş alanı (FOV) ve kutuplaşma hassasiyeti veya hızlı hareket algılama gibi ek işlevsellik ile dengelenir. Kutuplaşma hassasiyeti ile güneş pozisyonu doğrudan görmeden algılanabilir. Hızlı hareket algılama, bitişik kanal reseptörlerinin çapraz bağlanması nedeniyle göze yakın sinyal işleme seviyesinde elde edilir. Küresel bir kabuk üzerindeki optik kanalların düzenlenmesi, toplam

hacmi küçük kalırken, bileşik gözlerin geniş bir FOV'ye sahip olmasını sağlar. Dolayısıyla başın hacmi beyin ve sinyal işleme yeteneklidir.

### 2.6.1 Tek açıklık gözü

Tek açıklık gözlerinin (Şekil 2.6, sol sütun, üst sıra) en önemli avantajları yüksek hassasiyet ve çözünürlüktür. FOV'u düşük olan tek gözlü gözlerin büyük hacmi dezavantajlar oluşturmaktadır. Dahası, tek diyafram gözleri yalnızca sınırlı bir FOV görüntüsünü keskin bir şekilde görüntüler. Buna ek olarak, çok sayıdaki görsel bilgiyi son derece kararlı bir şekilde işlemek büyük bir beyin gerektirir.



Şekil 2.6 : Farklı tipteki doğal göz sensörleri (üstte) ve teknik karşılıkları (alttaki) [36].

“Kendi gözlerimizdeki gibi birim alanlardaki bölme işlemi, merceğin ardından retina da gerçekleşir, bileşik gözlerde bu olay optikte, mercek gözlerinde ve alanlarda çakışmayan algılayıcılardadır. Böylece bileşik bir göz daha fazla ışığı yakalayabilir.” [37].

### 2.7 Apozisyon Bileşik Göz

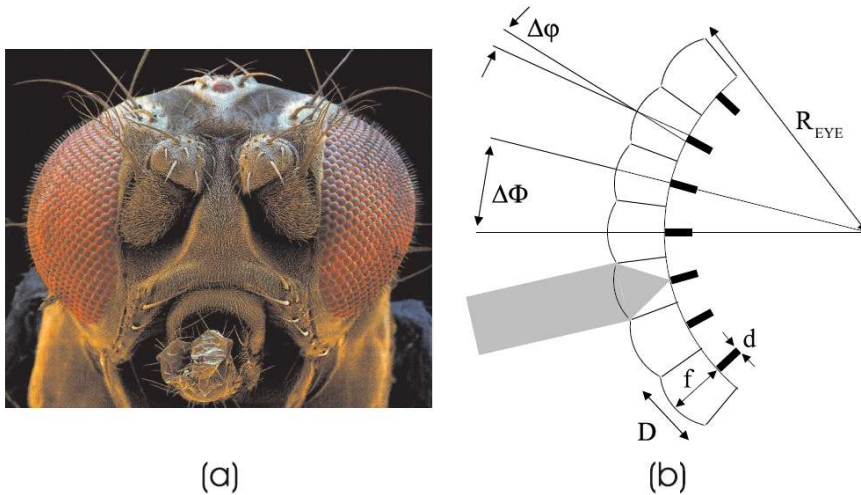
Doğal apozisyon bileşik bir göz, kavisli bir yüzey üzerinde bir dizi mikro mercekten oluşur. Her bir mikro-lens, odak düzleminde küçük bir grup foto-reseptörü ile ilişkilidir. Apozisyon bileşik gözler esas olarak sinek gibi hareketli böcekler ile gelişmiştir (Şekil 2.7 (a)) [38]. Yalnız tek bir mikro-lens reseptör birim, bir optik kanal oluşturur ve yaygın olarak ommatidyum olarak adlandırılır. Ommatidyum,

optik ekseninde kademeli değişken kırıcılık indise sahip olan ve kristal koni ile odaklama yapabilen bir birimdir. Sadece odaklanma kornea lense [13,14] tarafından sağlanır. Işığın büyük açılarda olması durumunda bitişik birimler tarafından yapılacak algılama, hayalet resimler ve kontrasta neden olur, bu ancak aralardaki opak duvarlar sayesinde düzeltilebilir.

Doğal apozisyon bileşik gözler birkaç yüzden binlere kadar düzgün olmayan altıgen paketlenmiş ommatidyumlar içerirler.

### 2.7.1 Interommatidial açı

Farklı bir yönlerde doğru bakan her bir ommatidyum, optik eksen noktalarını nesne alır (Şek. 2.7 (b)) ve kolaylık olması açısından, ommatidyumlar tek bir foto-reseptör birim olarak kabul edilir. Apozisyon bileşik gözler, yarıçap  $R_{EYE}$  olan kavisli bir yüzeye yerleştirilen ommatidyum olarak adlandırılan yüzlerce ila on binlerce mikrolens-reseptör biriminden oluşur. Çapı  $D$  ve odak uzaklığı  $f$  olan her mikro mercek, yalnızca nesne alanının küçük bir katı açısı  $\Delta\phi$ 'den foto-reseptörlerin küçük bir grubuna odaklanır. Ommatidyum, çaprazlama problemini önlemek için ara opak duvarlarla optik olarak izole edilmiştir. İnterommatidyum açısı  $\Delta\Phi$  şeklinde gösterilir ve bu açı ile  $D$  ve  $R_{EYE}$  hesapları yapılabilir. Ommatidyum'un küre şeklinde bir kabuk üstüne yerleştirilmesi, doğal apozisyon bileşik gözlerin çok büyük bir FOV'ye sahip olmasına ve toplam hacim tüketiminin küçük olmasına izin verir.



Şekil 2.7 : Doğal apozisyon bileşik göz. (a) Meyve sineği kafası “Drosophila melanogaster” [39]. (b) Doğal apozisyon bileşik gözün çalışma prensibi.

Böceğin çevreyi görme yeteneği, interommatidial açı ile örneklenir,

$$\Delta\phi = D / REYE \quad (2.4)$$

Nesne ommatidyum'un optik eksenine konumlanmış ise ilgili foto-reseptör buna duyarlı davranır. Ommatidyum sinyallerinin katkısı ile görüntü oluşumu gelişir.

### 2.7.2 Nyquist açısal frekansı

Uygun ommatidyum parlak ve koyu çizgileri var ise desen çözümlenebilir. Sonuçta çözülebilecek en uç desenin periyodu  $2\Delta\phi$  ile sonuçlanır ve doğal bir apozisyon kompleksinin Nyquist açısal frekansı [40] için kabul edilir. Ommatidyumda bir kare kafes söz konusu ise nyquist açısal frekansı;  $\nu_s=1/(2\Delta\phi)$ , altıgen kafes söz konusu ise nyquist açısal frekansı  $\nu_s=1/(\sqrt{3}\Delta\phi)$  geçerlidir [41].

### 2.7.3 Açısal hassasiyet işlevi

Ommatidyum optik ekseninden nesnenin referans noktasının açısal mesafesi  $\phi$ , ilgili ommatidyum tepkisinin miktarını belirler. Açısal hassasiyet fonksiyonu (Angular Sensitivity Function) (ASF) normalize gösterilir.

$$ASF(\phi) = \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\phi}{\Delta\phi} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

$\Delta\phi$ , %50 duyarlılıkta (tam genişlikte yarı maksimum-FWHM) fonksiyonun tam genişliğidir.  $ASF(\phi)$  bir ışıma yoğunluğudur. Ommatidyumun, FOV üzerinde  $ASF(\phi)$ ' nin açısal entegrasyonu reseptör ön yüzünden gücü ulaştırır. [42, 43].

Kabul açısının büyüklüğü  $\Delta\phi$  şeklinde gösterilir. Bu yaklaşım, iki nokta kaynağının minimum mesafesi optikle çözümlenir.  $\Delta\phi$ ' nin geometrik katkısı,  $\Delta\rho=d/f$  formülüyle reseptör çapı nesne alanına yansıtılarak belirlenir. Dalga boyuna  $\lambda$  bağlı katkıyla geliştirilen mikro-lens diyafram [44] aşağıdaki eşitlikle sonuçlanır.

$$\Delta\phi = \sqrt{\left(\frac{d}{f}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2} \quad (2.6)$$

Burada bir Gauss foto-reseptörü tepkisi varsayılır.  $\lambda/D$ , "Airy" fonksiyonu Gauss yaklaşımının FWHM'si difraksiyona maruz kalır [41]. Açısal alanda, ilk karanlık halkanın çapı  $2,44\lambda/D$  şeklinde verilir.

#### 2.7.4 Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF)

Retinula hücre seviyesindeki MTF [40], denklem (2.5) [45, 46], ASF'nin Fourier dönüşümünü sıfır açılı frekansa  $\nu$  normalize ederek elde edilir.

$$MTF_{ASF}(\nu) = \exp\left[-\frac{\pi^2}{4\ln 2}(\nu\Delta\phi)^2\right] \quad (2.7)$$

Son çözülebilir sinüsoidal desen, son ommatidyumun lensinin optik kesmesi  $MTF_{ASF}(\nu_{co}) = 0$ 'dır.  $MTF_{ASF}$ 'nin Gauss yaklaşımında  $\nu$ 'nin sonlu değeri yoktur. Açısal kesme frekansının yeterli yaklaşımı,  $MTF_{ASF}(\nu_{co}) = 0,028$ 'in yol açtığı,  $\nu_{co} = 1/\Delta\phi$  ile verilir. Kırınım sınırlaması söz konusu olduğunda,  $\nu_{co} = D/\lambda$  [37] sonucunu getirir. Ayrılmış küçük çaplar nedeniyle, bileşik gözler yüksek çözünürlüklü yapılar değildir [47].

$\Delta\phi$  ile ilişkili olan kabul açısının boyutu, gözün Nyquist frekansı  $\nu_s$ 'ye kadar modülasyonu belirler.  $\Delta\phi$ , ommatidyumun FOV'unun ayrımının çözümüdür. Kabaca, genel tasarımdaki gibi  $\nu_s$  ve  $\nu_{co}$  eşleşmesi bekleniyor. Ardından, reseptör mozaik yeterince yüksek mekansal örnekleme yetecek kadar frekansını sağlar.  $\nu_{co}$  tarafından oluşan reseptör mozaik daha inceyse, elde edilecek başka bilgi yoktur. Uygulamada,  $\nu_s$ ,  $\nu_{co}$ 'dan biraz daha küçüktür. Bunun sebebi optik kesmede görüntünün kontrastı kaybolur ancak foto-reseptörlerin çalışması için kontrast gereklidir.

#### 2.7.5 Göz parametreleri

Göz parametresi  $P = D\Delta\phi$  hayvan fizyolojisinde ortak bir kalite kriteridir.

Parametrenin alt limiti, denklem (2.6)'daki kırınım etkisi  $\lambda/D$  ise ve  $\Delta\rho = d/f$  geometrik katkısı çok daha büyük olduğu varsayılırsa:

$$\nu_{co} \geq \nu_s \text{ veya } 1/\Delta\phi \geq 1/(2\Delta\phi) \text{ veya } D/\lambda \geq 1/(2\Delta\phi) \text{ veya } P = D\Delta\phi \geq \lambda/2 \quad (2.8)$$

$D$  ve  $\Delta\phi$  parametreleri doğrudan hayvan fizyolojisi ile belirlenebilir.  $P$  büyüklüğü,  $\lambda/2$ 'ye göre bileşik göz mekanizmasının kırınım limitine nasıl yakın olduğunu gösterir. Denklem (2.6)'nın kullanımı,  $\Delta\rho$ 'nun büyüklüğü hakkında bilgiyi saptayabilir. Bu saptama, böceğin yararına olan hassaslığın artması için düşük



çözünürlüğü ortaya koyar. Bunun bir sonucu olarak, eklem bacaklıların aydınlanma ortamının belirlenmesine P izin verir. Parlak güneş ışığında çalışan böceklerin neredeyse kırınım sınırlı gözleri vardır. Örneğin Avustralya Kum Yaban Arısı "Bembix"  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 'de  $P = 0.32 \mu\text{m}$  değerine sahiptir [48]. Örneğin diğer taraftan Gece Hayvanları, Kral Yengeç "Limulus" ( $P = 31 \mu\text{m}$ ), yüksek ışık toplama gücüne doğru eğilim gösterir. Burada, kırınım sınırlı çözünürlük problem değildir. Gözün doğal yaşam alanındaki işlevselliği en büyük öneme sahiptir. Sadece yeterince foton göze girmezse bir çözünürlük garanti edilmez. İşlevsellik, çoğunlukla, ayırt etmek için yeterli miktarda gürültüye bağlı olarak foton yakalamak suretiyle belirlenir.

### 2.7.6 Duyarlılık

Geniş, standart bir elektromanyetik dalga kaynağında görüntüleme sisteminin hassasiyeti, lensin görüntü düzlemindeki yoğunluğu tarafından reseptör absorbe K'sı ve reseptör alanı ile çarpılarak bulunur.

$$S = \frac{\pi}{4(F/\#)^2} \frac{\pi}{4} d^2 K = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \left(\frac{D}{f}\right)^2 d^2 (1 - \exp^{-kl}) \quad (2.9)$$

Burada,  $k$ ,  $l$  uzunluğundaki bir reseptörde, foto-pigmentlerin doğal genişleme katsayısıdır.  $F/\#$ , bir optik sistemin durdurma sayısını gösterir ve  $D$  sistem diyafram çapında ve  $f$  odak uzaklığı tarafından tanımlanır. Reseptördeki belirgin dalga kılavuzu etkisi birinci incelemede ihmal edilebilir, uyumlu iletim varsayılabilir. Kabul açısının geometrik çözümü  $\Delta\rho = d/f$ , hassasiyet yerine çözünürlük veya çözünürlük yerine hassasiyet isterimizi belirgin hale getirir.

$$S = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 D^2 \Delta\rho^2 (1 - \exp^{-kl}) \quad (2.10)$$

Yeterli ışık gücü olmasıyla  $\Delta\rho$  ve  $P$ , küçük olabilir. Bu ışık miktarıyla, kırınım sınırına yakın bir çözünürlüğe izin verilir. Bununla birlikte, doğal yaşam alanının ışık seviyesi ne kadar düşükse veya böcek hızlı hareket edebiliyor ise,  $\Delta\rho$  ve  $P$  yüksektir. Ortam aydınlatması ve kısa sürede resmi yakalayabilmesi, daha yüksek hassasiyet sunar. Bileşik gözlerin sahip olduğu duyarlılık ve  $F/\#$  karşılaştırması, tek giriş aralıklı gözler ile benzer şekilde olduğu gibi hassasiyet sebebidir [49]. Süperpozisyon görme yeteneğine sahip eklem bacaklıların,  $F/\#$  değerleri biraz daha küçük olabilir. Yeterli

ışıklı ortamında çözünürlük ve hassasiyet arasındaki optimum uyum, reseptör çapına uyan “Airy” disk çapıdır [50].

### 2.7.7 Doğal bileşik gözlerin ölçeklendirilmesi

Bileşik gözün çözünürlüğünü arttırmak aşağıdaki denklemler kullanılabilir.

$\Delta\phi = D/R_{EYE}$  denkleminin sağ kısmında  $R_{EYE}$  denklem (2.8)' e göre,

$$R_{EYE}\Delta\phi \geq \lambda/2 \quad (2.11)$$

ve buna ek olarak  $v_s=1/(2\Delta\phi)$  eşitliği yerine koyularak,

$$R_{EYE} \geq 2\lambda v_s \quad (2.12)$$

Göz yarıçapı, gerekli çözünürlük karesi ile orantılıdır. Tam tersi, tek açıklık gözlerinde, bu ölçekleme doğrusaldır. Bileşik gözlerde ommatidyum, çözünürlüğü artırmak için hem sayı hem de büyüklükte artış gösterilmelidir [51]. Bu sebepten dolayı problem ortaya çıkar. Gözler aynı büyüklükte veya çok büyük ise tek açıklık gözlerinden çok daha düşük bir çözünürlük ortaya çıkıyor (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Çoklu lens gözüyle aynı açısal çözünürlüğü elde etmek için bir erkeğin en az 1m çaplı bileşik bir göze ihtiyacı vardır [52].

### 2.7.8 Bileşik gözlerin özel özellikleri

Birçok omurgasız hayvanın bölgesel olarak daha yüksek çözünürlüklü alanlara sahip bileşik gözlerinin olmasının sebebi "akut bölgeler" dir. Bu akut bölgeler, memelilerin gözünde en yüksek ilginin yönünü gösterir.

Uygulanan mikrodalgaların çok kısa bir odak uzaklığına sahip olması nedeniyle ommatidyum, inanılmaz büyük bir odak derinliği sağlar. Mikronlukların görüntü düzlemi her zaman kendi odak uzaklığından bağımsızdır. Bu nedenle, eğer ommatidyum'da kabul açısı, açısal örnekleme ile uyumluysa, açısal çözünürlük, nesne mesafesinin geniş bir aralığında sabittir. Konumsal çözünürlük, nesneyle doğrusal olarak ölçeklenir [53].

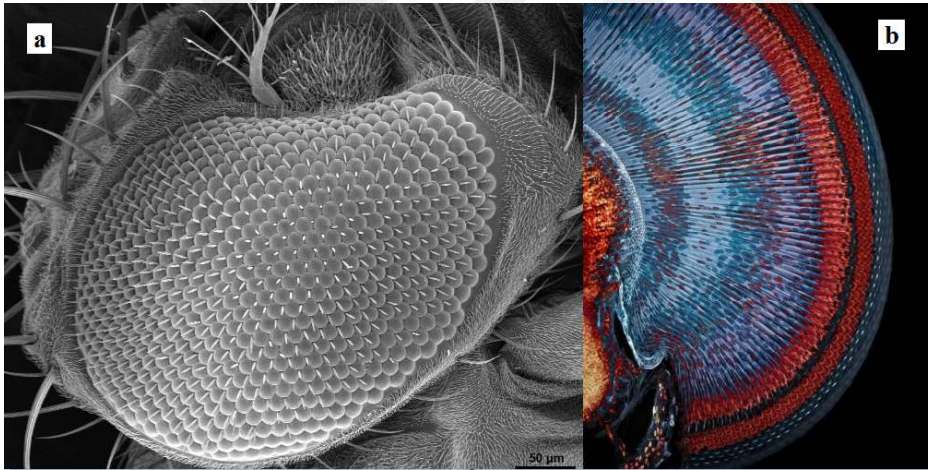
Her kanal, düzenlemenin daha da fazla bir parçası olarak kendi görüş yönü için ekseninde, küresel bir tabandaki ommatidyum ve ayrılmış görüntü noktası üretme üzerine çalışır. Bir kanala geleneksel tek açıklık gözünde olması gerektiği gibi büyük bir FOV aktarmak zorunda değildir. Bu bir taraftan artan görüntü yüksekliğiyle çözünürlüğün azalmasına sebep olan eksen dışı sapmalardan, öte yandan bileşik gözler, görüntü yüksekliğinin artmasıyla ilgili aydınlanmanın azalmasından sorumlu olan  $\cos^4$  yasası [54] probleminden müzdarip değildir. Bu nedenle bileşik gözler geniş FOV görme için optimum optik düzeneklerdir. Her bir bileşik gözün geniş FOV'u, ommatidyumun %70' inden fazlasına katkıda bulunan stereoskopik görüntü sağlayan büyük binoküler alan ile sonuçlanır [55].

Noktasal kaynaklar için, bir "hyperacuity" (kırınım sınırının ötesinde bir çözünürlük) doğal apozisyon bileşik gözlerle başarıldı [43,56]. Bitişik ommatidyumların duyarlılıklarının farklılıklarından noktasal kaynağın görelî konumunu belirlemede yararlanılır ve sinyallerdeki değişikliklerde çok doğru olarak değerlendirilebilir.

Apozisyon bileşik gözleri ayrıca komşu ommatidyumdan sinirsel havuzlama yoluyla süperpozisyon karakteri kazanabilir [57]. Bu, apozisyon ve süperpozisyon arasında bileşik göz olarak görülebilir. Bu ilke, çeşitli sineklerde gözlemlenebilir. Böyle bileşik gözler "sinirsel süperpozisyon gözleri" olarak adlandırılır ve farklı uygulamalara kapı açar. Karşılık gelen ommatidyumun, optik ekseninden farklı uzaklık miktarlarına sahip bitişik ommatidyumun alıcılarını bir araya getirerek, artan bir hassasiyet elde edilir. Ommatidyum etkili bir şekilde aynı yönde bakar. Duyarlılığın bu şekilde geliştirilmesi, reseptör boyutunun basit bir artışı ile ortaya çıkacak çözünürlük kaybı olmadan gerçekleştirilir. Dahası, sinekler çok hassas, keskin hareket algılaması için bu reseptör havuzunu kullanırlar. Genel olarak apozisyon bileşik gözler içerisindeki mikro-lensler ve alıcı katman arasındaki küçük aksenel mesafe, onları son derece ince dijital optik sensörler için mükemmel bir "archetype" yapar.

## 2.8 Süperpozisyon Bileşik Göz

Doğal süperpozisyon bileşik gözü öncelikle gece böcekleri ve derin deniz kabukluları içinde gelişmiştir (Şekil 2.9). Birden fazla yönden gelen ışık, fotoğrafın yüzeyinde birleşiyor ve reseptör katmanı ile nesnenin tek bir dikey görüntüsünü oluşturuyor [58]. Refraktif tip için, bu optik performans tek bir mikro-lens dizilim (Micro Lens Array) (MLA) tabakasının değil, bir dizi mikro teleskobun sonucudur [43,59]. Doğal duruş bileşik gözlerle karşılaştırıldığında, doğal üst üste binme gözleri çok daha hassas ve duyarlıdır. Küçük F/# gözlerinden, daha küçük gözlendi. Küresel sapmalara benzer aksamalar, ancak birçok yönden kombine edilmiş ışığın kombinasyonundan kaynaklanan sapmalar, kırınım sınırından çok uzak bir çözünürlüğe yol açar [59,60]. Bazı böcekler, her iki bileşik gözün bir kombinasyonunu kullanırlar. Değişken pigmentler, apozisyon (gün ışığı) ile süperpozisyon (gece) arasında geçiş yapar veya süperpozisyon görüntüsünü oluşturan karşılama lens sayısını değiştirir [61].

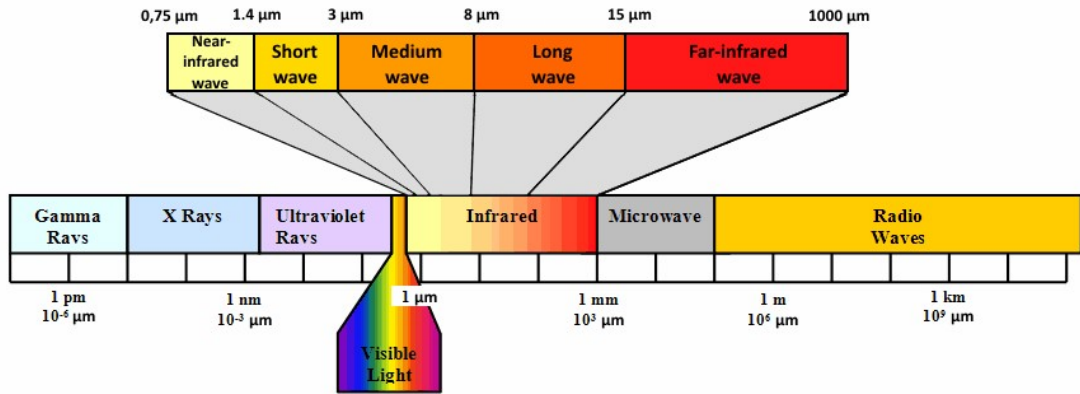


Şekil 2.9 : Doğal süperpozisyon bileşik göz. (a) Connecticut Üniversitesi biyobilimi elektron mikroskop laboratuvarından taramalı elektron mikroskopu yardımıyla bileşik göz yapısına sahip canlının kafa ve gözünden bir kesit. (b) Doğal süperpozisyon bileşik gözünden bir kesit.

DeneySEL olarak elde edilen çözünürlük verilerini üretmek için gerekli olan doğal bir süperpozisyon bileşik gözündeki sapmaların miktarını belirlemek için kırınım ve ışın izi modelleri kullanılır [61,62].

### 3. KIZILÖTESİ ALGILAYICILAR

“Mutlak sıfır” sıcaklığın üzerinde sıcaklığa sahip olan her malzeme, kendi sıcaklığına bağlı bir ışımaya (radyasyon) yayar. Oda sıcaklığına yakın malzemelerin yaydığı ışımaya elektromanyetik spektrumda 0,75-1000 $\mu\text{m}$  ile temsil edilen kızılötesi bölgeye düşmektedir ve bu da insan gözü tarafından algılanamaz. Elektromanyetik spektrum ve kızılötesi bandının spektrumdaki yeri Şekil 3.1’de görülmektedir. Geniş bir aralığa sahip kızılötesi bandında, cisimlerden yayılan ışınımın bir kısmı, geçirgenliği dalga boyuna bağlı olan atmosfer tarafından emilir. Bu nedenle, kızılötesi görüntüleme yapabilmek için atmosferin geçirgen olduğu bir dalga boyu aralığında soğurma yapmak önemlidir.

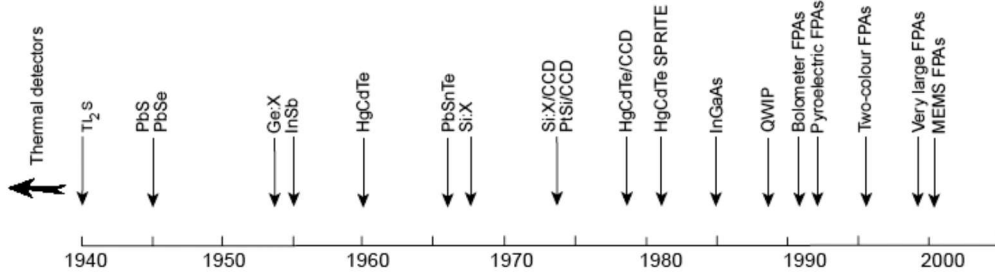


Şekil 3.1 : Elektromanyetik spektrum ve kızılötesi bandının spektrumdaki yeri [63].

Cisimlerden yayılan ışımaya atmosferin geçirgen olduğu dalga boyu aralıklarında algılayarak, görünür hale gelmesini sağlayan cihazlara termal kameralar denir ve ağırlıklı olarak gece koşullarında veya gündüz sis arkasında kalan durumlarda kameralar ile dedekte edilemeyen canlıların ve nesnelerin algılanmasında kullanılır.

Şekil 3.2’de kızılötesi sensörlerin algılayıcı malzemesi olarak kullanılan malzeme tiplerinin tarihsel kronolojik gösterimi yer almaktadır [64]. Özellikle II. Dünya

Savaşı döneminde bugünkü kızılötesi görüntüleme sistemlerinin temelini oluşturan önemli adımlar atılmıştır.



Şekil 3.2 : Kızılötesi dedektörlerin tarihsel gelişimi

Belirtilen özellikleri nedeniyle, günümüzde kızılötesi görüntüleme sistemleri Çizelge 3.1’de verilen birçok askeri ve sivil uygulamada kullanıma sahiptir.

Çizelge 3.1 : Kızılötesi görüntülemenin uygulama alanları

Askeri	Sivil
Hedef Tespit, Teşhis ve Tanıma	Güvenlik Kameraları
Termal Görüntüleme	Sürücü Görüş Sistemleri
Mayın Arama	Yangın Alarm Sistemleri
Atış Kontrolü	Tıbbi Görüntüleme
Arama ve Takip	Endüstriyel Uygulamalar
Lazer Tespit ve Karakterizasyonu	Çevresel Koruma ( Orman Yangını İzleme vb. )
Güdümlü ve Kontrol Sistemleri	Arama ve Kurtarma

### 3.1 Kızılötesi Işımanın Malzemelerden Yayılması

Uzak bir hedeften alınan görüntünün kalitesini belirleyen en temel parametre, termal görüntüleyicinin o hedeften aldığı ışınım miktarıdır. Bir malzemeden yayılan kızılötesi radyasyonun şiddeti, cismin sıcaklığı, uzaklığı ve onun emisyon özelliği gibi bazı parametrelere dayanır. Bu emisyon özelliği bir cismin kolay ışınım yaptığına göstergesidir. Bunlara ek olarak, görüntülenmek istenen hedef ile görüntüleyici arasındaki ortamdan kaynaklanan soğurma ve saçılma gibi sebeplerin görüntüleyicinin alacağı ışık miktarına bağlılığı vardır.

“Maxwell” yasalarına göre bir elektrik yükü ivmelendirilince ışınım yapar. Bir cisim ısıtıldığında, moleküllerinin titreşme enerjisi artar, yük taşıyıcılar ivme kazanır ve

böylece ışıma gerçekleşir. Denklem 3.1 yayılan bir ışımanın dalga boyu ile taşıdığı enerji miktarı arasındaki bağlantıyı göstermektedir:

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

$\lambda$  dalga boyunun,  $c$  ışık hızını ve  $h$  Planck sabitini göstermektedir.

Çizelge 3.2 : Atmosferik iletim ve dalgaboyu aralıkları

Kızılötesi Alt Bandı	Dalgaboyu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )
Yakın Kızılötesi (NIR)	0,78-1
Kısa Dalgaboyu IR (SWIR)	1-3
Orta Dalgaboyu IR (MWIR)	3-6
Uzun Dalgaboyu IR (LWIR)	6-15
Çok Uzun Dalgaboyu IR (VLWIR)	15-1000

Atmosferin geçirgen olduğu MWIR ve LWIR bant aralıkları kızılötesi görüntüleme için oldukça önemlidir. MWIR bandında, termal zıtlık LWIR bandına göre iki kat fazladır. Termal zıtlık, cismin sıcaklığındaki bir Kelvin (1K) değişimde yayılan akıdaki yüzde olarak değişim miktarıdır. Termal zıtlık yüksek olduğunda bir yüzeydeki sıcaklık değişimi daha net görülmektedir.

Spektral aralık seçimi hedef tipine, atmosferik geçirgenliğe ve dedektör tepkisine bağlıdır. Örneğin, nem miktarının fazla olduğu deniz uygulamalarında MWIR dalga boyları daha uygundur. Az nemli ve soğuk ortamlarda ise LWIR bant daha uyumludur. Termal görüntüleme sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı savaş ortamı koşullarında LWIR bandı genelde daha uygundur, çünkü uzun dalga boylarına sahip ışıma savaş ortamında havada oluşan parçacıkların içinden daha iyi yayılır [65].

Bunların yanında kızılötesi algılayıcılar önündeki optik diyaframdan kaynaklanan girişim miktarı dalga boyu ile paraleldir. Bu nedenle MWIR dalga boyunda girişim etkileri daha düşük. Sensörle birlikte kullanılan optiğin büyüklüğü optik açıklık ile orantılı olduğundan MWIR dalga boylarında çalışan kameralar daha küçük boyutlu olabilmektedir.

### 3.2 IR Dedektör Sınıflandırılması

IR dedektör teknolojisindeki ilerleme, çoğunlukla, foton dedektör sınıfına dahil olan yarı iletken IR dedektörlerine bağlanmaktadır. Bu dedektör sınıfında radyasyon, elektronlarla etkileşim yoluyla materyal içinde absorbe edilir. Gözlemlenen elektrik çıktı sinyali, elektrik enerjisinin dağılımındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Foton dedektörleri, birim ışınım gücü başına cevabın seçici bir dalga boyu bağımlılığını göstermektedir. Mükemmel sinyal-gürültü performansı ve çok hızlı bir yanıt sergiler. Fakat bunu başarmak için, foton dedektörleri kriyojenik soğutma gerektirir. Soğutma gereksinimleri, yarı iletken foto-detektörlere dayalı kızılötesi sistemlerin daha yaygın şekilde kullanılması için ana engel oluşturur; bunlar hantal, ağır, pahalıdır ve kullanımı zahmetli kılmaktadır. Etkileşimin doğasına bağlı olarak, foton dedektör sınıfı daha da farklı tiplere ayrılmıştır. Bunların en önemlileri şunlardır: özlü dedektörler, ekstraktif dedektörler, photo-yayınım (metal silicide Schottky bariyerler) dedektörleri ve kuantum kuyu dedektörleri. Çizelge 3.3 çeşitli IR dedektörlerinin karşılaştırmasını göstermektedir.

IR dedektörlerinin ikinci sınıfı termal dedektörlerden oluşur. Bir termal dedektörde, gelen ışığa, malzemenin sıcaklığını değiştirmek için emilir ve bazı fiziksel özelliklerde ortaya çıkan değişiklik bir elektrik çıkışı üretmek için kullanılır. Dedektör elemanı, ısı emicisine bağlı bacaklar üzerine asılır. Termal etkiler genellikle dalga boyundan bağımsızdır; Sinyal enerjiye (veya değişim hızına) bağlıdır, ancak spektral içeriği üzerine değil. Piroelektrik dedektörlerde dahili beklenmedik polarizasyonda bir değişiklik ölçülürken, bolometreler söz konusu olduğunda elektrik direncinde bir değişiklik ölçülür. Foton dedektörlerinin aksine, termal dedektörler tipik olarak oda sıcaklığında çalışır. Genellikle makul hassasiyet ve yavaş tepki ile karakterizedirler, ancak ucuzdurlar ve kullanımı kolaydır. IR teknolojisindeki en önemli yardımcı program, bolometre, piro-elektrik dedektörleri ve termopilleri buldu. Doksanlara kadar, termal dedektörler foton dedektörlerine kıyasla ticari ve askeri sistemlerde daha az kullanılmıştır. Bu farklılığın nedeni, termal dedektörlerin foton dedektörlerine kıyasla oldukça yavaş ve duyarsız olduğuna inanılmaktadır. Sonuç olarak, termal dedektörlerin geliştirilmesi için dünya çapındaki çabalar foton dedektörüne göre çok daha azdı.



Çizelge 3.3 : IR dedektör karşılaştırması

Sensör Tipi	Avantajları	Dezavantajları
Termal	Oda sıcaklığında hafif, sağlam, güvenilir, düşük maliyetli	Yüksek frekanslarda düşük algılama, yavaş cevap verme
<b>Foton intrinsik</b>		
IV-VI	Dar bantlı malzemelere uygun (İyi çalışılmış)	Kötü mekanik Di-elektrik sabiti yüksek
II-IV	Kolay bant aralığı uyarlama İyi gelişmiş teori Çok renkli dedektörler	Geniş alan üzerinde kötü bir tekdüzelik Geliştirme ve yöntemler maliyetli
III-V	İyi malzeme ve katkı maddeleri Monolitik entegrasyon Avantajlı teknoloji	Geniş örgü uyumsuzluğu
Ekstrinsik	Uzun dalgaboyunda çalışma Basit teknoloji	Çok düşük sıcaklıklarda çalışma
Serbest Taşıyıcılı	Düşük maliyet yüksek verim İrili ufaklı paketlenmiş iki boyutlu dizilim	Düşük kuantum verimliliği Düşük sıcaklıklarda çalışma
<b>Kuantum Kuyulu</b>		
Tip 1	Olgun malzeme geliştirme Geniş alan üzerinde tek düzelik Çok renkli dedektörler	Düşük kuantum verimliliği Karmaşık tasarım ve geliştirme
Tip 2	Düşük Auger rekombinasyon oranı Kolay dalgaboyu kontrolü	Karmaşık tasarım ve geliştirme

Bununla birlikte, son on yılda, TV kare hızlarında soğutulmayan büyük termal dedektör dizilerinden son derece iyi görüntü elde edilebileceği gösterildi. Termal dedektörlerin hızı, iki boyutlu (2D) dedektörlü taramasız görüntüleyiciler için oldukça uygundur. Termal dedektörlerin ılımlı duyarlılığı, 2D elektronik olarak taramalı dizilerdeki çok sayıda elemanla telafi edilebilir. Termal dedektörlerden imal edilen soğutulmamış, monolitik odak düzlemi dizileri (FPA'lar) termal görüntüleyicilerin gelişiminde devrim yaratabilir. Son zamanlarda, “mikromachined” silikon bolometre [64,66] ve piro-elektrik dedektör dizileri [65,66] ile çok cesaret verici sonuçlar elde edilmiştir.

### 3.3 Kızılötesi Görüntüleme Sistemlerinin Temel Alt Birimleri

Termal görüntülemenin kalitesi hedef işaretine, çevre koşullarına ve görüntüleyici oluşturan bölümlere bağlıdır. Bir termal kameranın temel bölümleri Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.3 : Bir termal görüntüleme sisteminde yer alan alt bölümler.

Dedektörde bir hedefin görüntüsünü elde etmek için geçirgen mercekler veya aynalar kullanılabilir. Lenslerin geçirgenliği olabildiğince yüksek olmalıdır ve kırılma indisinin dalga boyuna ve sıcaklığa bağımlılığı minimum olmalıdır. Lens malzemesinin ve anti-yansıma kaplamasının spektrumu merceğin geçirgen olduğu dalga boyunu belirler. Ge, ZnS ve ZnSe malzemeleri MWIR ve LWIR bantlarında en çok kullanılan lens malzemeleridir.

Optik sistemin merkez düzlemi üzerinde görüntü oluşturmanın bir başka yolu da ayna kullanmaktır. Merceklerden farklı olarak, aynalar akromatiktir ve bu özellik sayesinde tüm kızılötesi dalga boylarında çalışmasını sağlar. Aynalara kaplama yapılarak yansıma oranı artırılabilir.

#### 4. ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR METODU İLE TEK BOYUTLU YAPILARDA ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIMI

Elektromanyetik problemlerin çözümünde analitik ve sayısal yöntemler ile deney sonuçları kullanılır. Bütün mühendislik problemlerinde olduğu gibi elektromanyetik problemlerin çözümünde de analitik yöntemler ancak basitleştirilmiş ve idealleştirilmiş yapılar için elde edilmektedir. Elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan pek çok sayısal yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler problemi zaman domeninde veya frekans domeninde çözer. Her yöntem belirli koşullarda doğru sonuçlar verdiği için, elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılabilecek çok sayıda problem bulunmaktadır.

Sayısal yöntemlerin uygulanmasında en çok dikkat edilmesi gereken problemler, simülasyon süresi, bellek (RAM), işlemci (CPU) hızı yeterliliğidir. Bu nedenle kullanılan sayısal yöntemin ve problemin gerektirdiği tüm sistem ihtiyaçları için bir optimum çözüm üretilmelidir.

Zaman Domeninde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain) yöntemi, elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan yaygın sayısal yöntemlerden biridir.

İlk defa 1966'da Yee tarafından ortaya atılan FDTD metodu, Çizelge 4.1 Maxwell denklemlerinin [67] diferansiyel formunu ayrıklaştırmaya yarayan sade bir yöntemdir.

isim	İntegral (tümlev) denklemleri	Türev denklemleri
Gauss yasası	$\oint_{\partial\Omega} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \rho dV$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Manyetizma için Gauss yasası	$\oint_{\partial\Omega} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Maxwell-Faraday denklemleri	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
Ampère yasası (Maxwell denklemleri ile)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \iint_{\Sigma} \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$

Şekil 4.1 : Maxwell Denklemleri [67].

FDTD yöntemi, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin doğrudan zaman domeninde ayrışmasını sağlayarak çözmektir. İlk iki Maxwell denkleminde diferansiyel operatörler sayısallaştırılıp sonlu farklar denklileri ile değiştirilir. Böylece ele alınan yapıya ait sınır koşulları da sağlanarak elde edilen bölünmüş denklemler, ele alınan yapıya ait sınır koşulları da sağlanarak tekrarlamaya ile çözülür. 1966 yılında ortaya atılan bu yöntem, üç elektrik alan ve üç manyetik alan bileşeninin, uzayın seçilen ayrık noktalarında, ayrık zaman aralıklarında hesaplanmasına dayanır ve hızlı ve yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulmasının sebebi budur. Kaynak olarak dar bantlı ya da geniş bantlı kaynak seçebilme şansımız vardır. FDTD yönteminin uygulanmasında en önemli nokta, çözülmeye çalışılan problemlerin fiziğinin iyi anlaşılması ve bütün aşamalarda izlenmesidir.

#### **4.1 İletim Modları**

Dalga kılavuzu metoduyla elektromanyetik dalgaların yayılımını tartışırken, dalgalar hakkında dalga kılavuzu boyunca, yayılım yönüne göre ilerleyiş hareketlerinden yola çıkılır. Enine Elektrik ve Manyetik Dalgalar (TEM), Enine Elektrik Dalgaları (TE) ve Enine Manyetik Dalgalar (TM). Enine (Transverse), alanın hiçbir kısmı yayılım yönünde olmaması demektir.

#### **4.2 Mükemmel Uyumlu Katman (Perfectly Matched Layer (PML))**

Mükemmel uyumlu katman (MUK), özellikle FDTD yöntemlerinde, açık sınırlardaki problemleri simüle etmek için sayısal yöntemlerde hesaplama bölgelerini kesmek için yaygın olarak kullanılan, dalga denklemleri için yapay bir emici katmandır. Bir MUK'u, sıradan emici malzemeden ayıran en önemli özelliği, MUK'a gelen dalgaların, başka ortamdan gelen dalgaların arayüzde yansımamayacağı şekilde tasarlanmış olmasıdır. Bu özellik MUK'un, hesaplama bölgelerinin içerisine giren dalgaları, dışarıya geri yansıtmadan güçlü bir şekilde emmesine izin verir.

MUK, yaygın olarak kullanılan ve hesaplamalı elektromanyetik teorisinin çok tercih edilen emici sınır tekniği haline gelmiştir. Çoğu durumda iyi çalışsa da, kaçınılmaz yansımalarla hatta üstel büyümeden muzdarip parçaladığı birkaç önemli durum vardır. Bilgisayarda simülasyon için dalga denklemi ayrıldıktan sonra, bazı küçük

sayısal yansımalar görünür (çözünürlük arttıkça yok olur). Genel olarak, herhangi bir emici, MUK veya başka bir katman, dalganın yeterince yavaş ilerlediği (ve emici tabakada daha kalınlaştığı) sınırdaki dalgayı yansıtmaz, fakat ayrık bir sistemde MUK'un yararı, sonlu kalınlık dalga yansımalarını azaltmaktır. MUK'un bir diğer önemli kısıtlaması, karmaşık koordinatlarda çözümün analitik devamlılığını desteklemek için ortamın dikey yönde değişmez olmasını gerektirmesidir.





## 5. BAL ARISI BİLEŞİK GÖZÜNÜN OPTİK YAPISI

Çalışan bal-arısı optik sistemi, kapalı rabdom tipinde bir göz temsilcisi olarak araştırılmış ve fonksiyonu öğrenilmiştir. Optik sistem elemanlarının kırılma indislerinin ölçümleri bir girişim mikroskobu ile yapılır.

Son zamanlarda Varela ve Porter, işçi arısı (*Apis mellifera*)'nın ommatidyum'unun ince yapısını araştırdılar [68] ve verilerin yardımıyla bal arısı gözünün optiklerini kapalı rabdom tipinin temsilcisi olarak incelendi.

### 5.1 Morfoloji

Arı ommatidyumunun optik aparatı (Şekil 5.1), bir kütiküler lens, bir kristalin koni ve ana pigment hücrelerinden oluşur. Kütikül mercek, ana pigment hücreleri tarafından salınan, laminer, oyuklu, şeffaf bir yapıdır. Objektifin altında yaklaşık 100µm boyunca aşağı doğru uzanan kristalin koni yatıyor. Çapı, mercek yakınında yaklaşık 20µm'den, rabdomu karşılayan yerde de yaklaşık 4µm'ye düşer.

Kristal koni dört hücre tarafından salgılanır ve yetişkinlerde koninin dört kısmı elektron mikroskobu altında ayırt edilebilir. Koni oldukça jelatinimsi olup bir zar ile kaplıdır. Kristalin koninin etrafında sıkı bir zarf oluşturan iki ana pigment hücresi, kristalin koni çap olarak azaldığından sitoplazmik hacminde artış meydana getirir ve böylece tüm yapı kabaca silindirik kalır.

Alt üçte birincil pigment hücrelerinin sitoplazması, uzun pigment hücrelerinde bulunan pigment granüllerini ve pigmentli maddeleri içerir; bunlar, retina boyunca bireysel ommatidia'yı izole eder. Bazı gece güvercin gözlerin aksine, arı gözleri pigment göçü göstermez. Her retinula hücresi yaklaşık 350µm uzunluğundadır ve optik lob lamina gangliyonaralarını oluşturan ikinci dereceden nöronlarla sinapslanan distal kısmında bir akson oluşturur. Mikrovilli kitleleri, rabdomeres oluşturmak için retinula hücrelerinin iç duvarının uzunluğunun çoğunda ortaya çıkar. Sekiz retinül hücresi kendilerini çiftler halinde gruplar ve her bir çift içinde mikroviller hepsi birbirine paralel durur. Her retinula hücresi çifti neredeyse dairesel rabdomanın bir çeyreğinde bulunur ve bu nedenle komşu kadranların mikrovilleri birbirine diktir.

Mikrovillilerin bulunduğu bölgenin yakınında, endoplazmik retikulum boşlukları, iç bölgeyi oluşturan çeşitli boyutlarda cisternae (Bir vücut sıvısı için depo görevini gören kapılı boşluk) oluşturmak üzere büyütülür.

## 5.2 Ommatidyanın Kırılma İndisleri ve Yapısal Boyutlarının Belirlenmesi

Yapılan çalışma sadece yerel kolonilerde çalışan arılar tarafından kullanılır. Hayvanlar kesilir, baş parçası bölünür ve parçalar kuru buz ile bir damla dondurulur. Numuneler yaklaşık  $-25^{\circ}\text{C}$ 'de bir mikrotom-kriyostat (International Harris, Model CT) üzerinde  $10-15\ \mu\text{m}$ 'de kesilir. Dilimler gliserin veya böcek Ringer üzerine monte edilir ve çabuk erime önlenir. Tüm ölçümler montajdan hemen sonra alınır. Kırılma indislerinin ölçümü için, bir Senarmont kompensatörü ile donatılmış bir optik mikroskop kullanılır.

Bu alet, arka plan karanlığının analizörün dönüşü ile söz konusu yapıya aktararak bir yapının faz geciktirici özelliklerini ölçer. Dönme açısı daha sonra bir dönüştürme faktörü vasıtasıyla bir faz farkına dönüştürülür. Yapının kırılma indisi daha sonra formülden hesaplanabilir, burada  $d$  bölümün kalınlığıdır ve  $\Delta\varphi$  faz farkıdır.

$$n_{\text{yapı}} = \frac{\Delta\varphi}{d} + n_{\text{ortam}} \quad (5.1)$$

Kullanılan iki montaj malzemesi için kırılma indisleri;

$$n_{\text{gliserin}}^{546} = 1.4763, \quad n_{\text{su}}^{546} = 1.3347$$

Tüm ölçümler  $546\ \text{nm}$  ışık ile yapılır ve her yapı elemanı için en az 25 ölçüm alınır. Gliserin, sadece kornea elemanlarının kırılma indisinin ölçülmesinde montaj aracı olarak kullanılır. Başlar yaklaşık  $35^{\circ}\text{C}$ 'de agar içine gömülür ve agar sertleştikten sonra  $10-20\ \mu\text{m}$  kesitleri kesilir. Verim son derece düşüktür, ancak bazı ölçümler dondurucuda kırılma indislerinde olası etkileri kontrol etmek için yapılabilir. Dondurulmuş gözler üzerindeki gözlemler başka yerde tarif edilen bir teknik izlenerek elektron mikroskobu ile yapılır.

Lens yüzeylerinin eğrilik yarıçapları aşağıdaki formül kullanılarak ölçülür [68].

$$r = \frac{h^2 + d^2}{2h} \quad (5.2)$$



Burada,  $2d$ , eğrilik yarıçapı  $r$  olan büyük bir dairenin yayına olan herhangi bir akorun uzunluğudur ve  $h$ , akor ile açıortay yay ile temas noktası arasındaki ölçülen akorun dikey açıortayının yüksekliğidir. Kullanılan yarıçap ölçülen her ommatidyumdan elde edilen maksimum yarıçapın ortalamasıydı.

### **5.3 Dalga Kılavuz Modlarını Gözleme Yöntemleri ve Odak Konumunun Konumu**

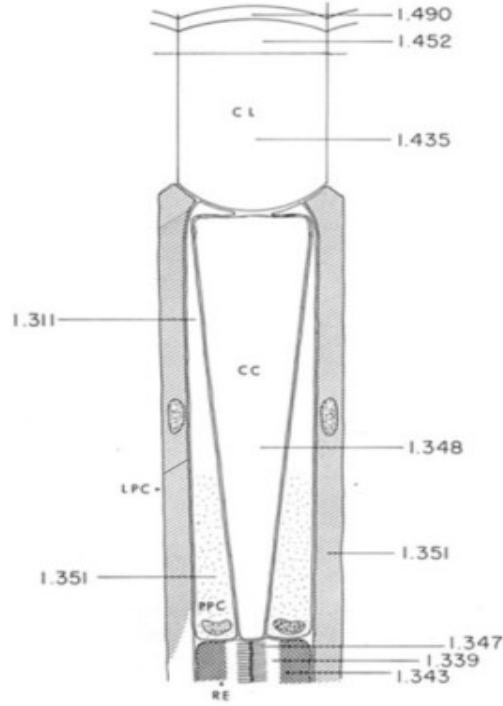
Birkaç gözün dilimleri keskin bir tıraş bıçağı ile yapılır ve kornea tarafı yoğunlaştırıcıya bakacak şekilde iki kapak kayışı arasındaki nemli bir odaya monte edilir. Odanın içindeki boşluk ommatidyum'un sıkıştırılmamasını sağlayan dilimin kalınlığı ile orantılıydı. Bütün bu işlemler, mikroskop kondenserinin üzerine, gözden yarım milimetre uzağa, özel olarak yapılmış bir  $1\mu\text{m}$  elektron mikroskop açıklığı (C.W. French & Co., Weston, MA) yerleştirilerek üretilen bir mikrodalga ile aydınlatılmış bir mikroskop altında gözlemlenir. Kullanılan aydınlatma  $546\text{ nm}$  ışıktır. Preparatı hareket ettirerek, bazı ommatidyumun optik eksenlerinin yönlendirmesinin giriş eksenini ile çakıştığı ve rabdomların tamamen aydınlatıldığı bir konum bulmak daima mümkün olur.

### **5.4 Optik Sabitlerin Belirlenmesi**

Şekil 5.1, üzerinde çeşitli kırılma indislerinin yerleştirildiği optik sistemin şematik bir temsildir. Elemanların her biri ayrı olarak ele alınacaktır.

CL, cuticular lens; CC, crystalline cone; PPC, principal pigment cells; LPC, long pigment cells; RE, retinula cells.

CL, kütikül lensin aksiyel bölümleri Şekil 5.2 ve 5.3'te gösterildiği gibi kırılma indisleri bakımından farklı üç tabakanın varlığını ortaya koymaktadır. Katmanlar koaksiyaldir ve boylamasına bölümlerde üç tane çakışan bölge olarak görülür; her birinin kendi eğriliği vardır.

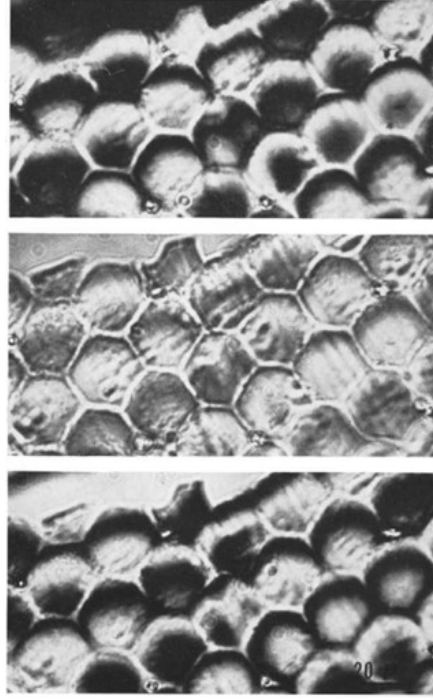


Şekil 5.1 : Çeşitli yapısal elementler için kırılma indislerini gösteren arının gözünden ommatidyumun diyagramatik temsili [4].

Uzunluklar ve kırılma indisleri Çizelge 5.1'de toplanmıştır. Bu tanımdan, arı kütikül merceğinin nitelikleri olmaksızın bileşik gözlere genellikle bazı yazarlar tarafından atfedilen bir "mercek silindiri" olmadığı açık, (Wigglesworth [14] , Imms [69] örneğin Exner'ın Lampyris [70] çalışmalarına dayanmaktadır).

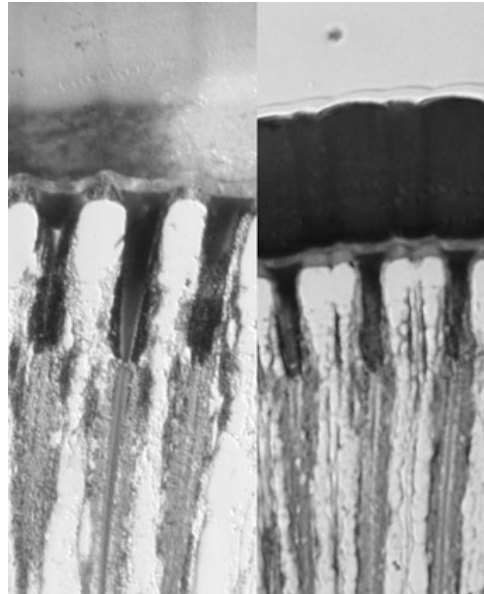
Çizelge 5.1 : Kütikül merceğinin katmanlarının boyutları ve kırılma indisleri

Bölge	Uzunluk ( $\mu\text{m}$ )	Kırıcılık İndisi ( $\pm\text{SD}$ )
1	8-10	1,4896 ( $\pm 0,0020$ )
2	10-12	1,4521 ( $\pm 0,0015$ )
3	28-30	1,4350 ( $\pm 0,0006$ )



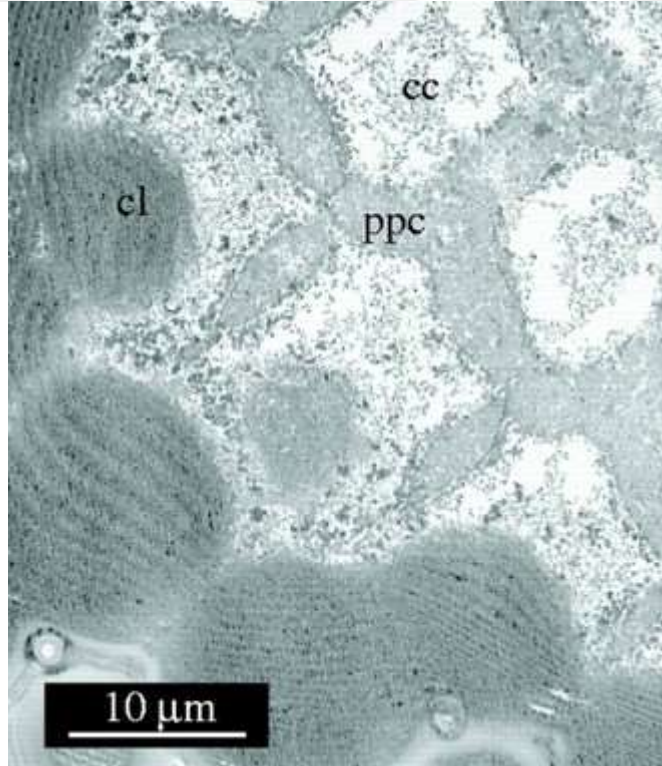
Şekil 5.2 : Kütikül merceğinden çapraz kesit, kırılma ölçme tekniğinin sonuçlarını göstermektedir.

Üstteki şekil, arka plan kompensatörün hareketi ile söndürüldü. Orta şekil, geçiş aşaması tipik bir girişim mikroskop görüntüsünü gösterir. Alttaki şekil, arka plan karanlığı merceklerle aktarılmıştır [4].



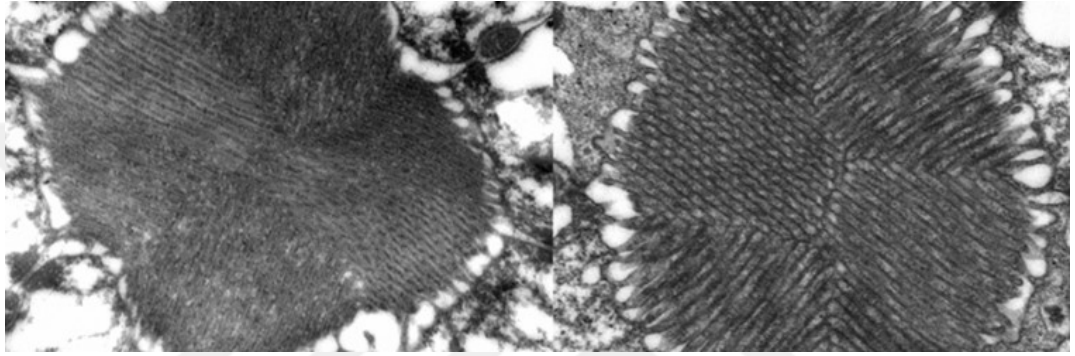
Şekil 5.3 : Kütikül mercekten geçen boyuna kesitler, arka planın kırılmış yapılara geçişini göstermektedir [71].

CC ve PPC, Şekil 5.4, kristalin koninin dört parçadan oluşmasına rağmen optik olarak homojen olduğunu göstermektedir. Mikrografda görülen düzensizlikler, koninin jelatinimsi niteliğinden dolayı, kesitlendirme sırasında bozulmalara neden olur. Kırıcılık indeksi  $1,3477 (\pm 0,0004 \text{ SD})$  'dir. Ana pigment hücrelerinin kristalin konininkinden farklı bir kırılma indeksi vardır. Ana pigment hücrelerinin üst kısmında sürekli bir farklılık vardır ve hücrelerin uçları hariç kesin seviyelere belirli değerler vermek zordur. Bu gradyanın bazı belirtileri verilebilir: üst orta kısımdaki kırılma indeksi  $1,3114 (\pm 0,0065)$  'dir ve hücrenin alt yarısı boyunca  $1,3514 (\pm 0,0005)$  'dir. Böylece, kristalin koninin alt kısmı, kendine ait olanlardan daha yüksek bir kırılma indeksine sahip bir ortam ile çevrilidir. Ana pigment hücrelerini çevreleyen uzun pigment hücreleri, ana pigment hücrelerinin alt bölümününki ile ayırt edilemeyen eşit bir kırılma indisi göstermektedir ( $1,3514$ ).



Şekil 5.4 : Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) yardımıyla görüntülenen “cuticular lens” (cl), “primary pigment cells” (ppc) ve “crystalline cone” (cc) [72].

RE, Reseptörlerin iç bölgesinin morfolojisi, endoplazmik retikulumun genişletilmiş cisternae 'si nedeniyle sitoplazmanın bu kısmının rabdoma göre daha düşük bir kırılma indisine sahip olabileceğini düşündürür. İnternal mikroskopi ile rabdom etrafında, iç bölge ile ilgili bir halka Şekil 5.5'de gösterildiği gibi gözlenmiştir. Retinula hücrelerinin kırılma indisleri (Çizelge 5.2) rabdomun deneysel olarak doğrulanmış olduğu gibi (aşağıda görüldüğü gibi) bir dalga kılavuzu görevi görebileceğini göstermektedir.



Şekil 5.5 : 0,5µm ölçekli rabdom kesitleri [71].

### 5.5 CL Eğrilikleri

Kütikül lensin birinci (dış) yüzeyinin (Şekil 5.6A'daki yüzey 1) eğrilik yarıçapı  $43 (\pm 3.2)$  µm'dur. Bu değer, modeldeki ikinci kırma yüzeyinin (Şekil 5.6 A'daki yüzey 2) eğrilik yarıçapı için de kullanılır. İç eğimli yüzey için eğrilik yarıçapı da  $22 (\pm 3.5)$  µm 'dur. (Şekil 5.6A'da yüzey 4).

Sonuçlar, birçok açıdan "blow-fly" 'da (*Calliphora erythrocephala*) Seitz'in [73] elde ettiği sonuçlara benzerdir.

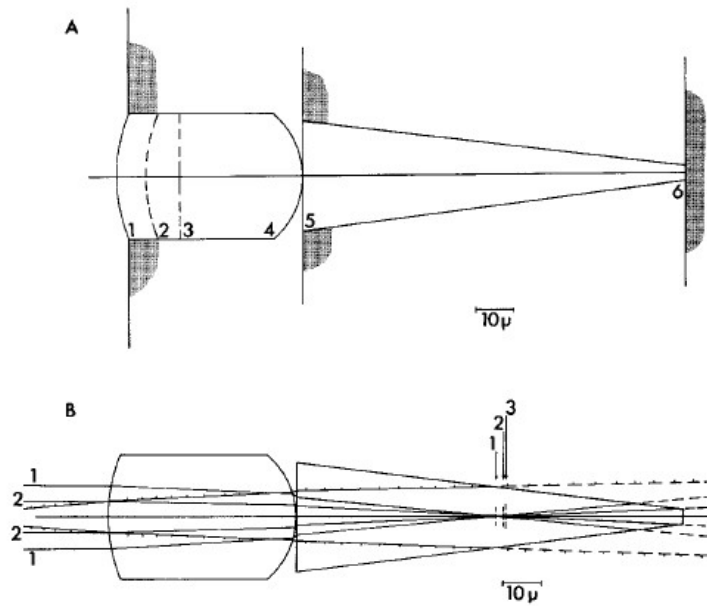
Dondurma işleminin kırılma indisi ölçümlerine bir miktar bozulma getirdiği öne sürülür. Dondurulmuş ve taze dokular arasındaki karşılaştırma, iki yöntemle ölçülen kırılma indislerindeki farklılıkların ölçüm hatasından (üçüncü ve dördüncü ondalık basamaklardan) ayırt edilemediğini göstermesi nedeniyle, bu durumun gerçek olduğu gözlemlenemez. Dahası, donmuş dokunun morfolojisi normal dokunun morfolojisinden sadece küçük çaplı distorsiyonlarla (rabdomun bazı asimetri ve mikrotübüllerin yokluğu) ayırt edilebilir.

Çizelge 5.2 : Retinula hücrelerinin kırılma indisleri

Yapı	Kırıcılık İndisi ( $\pm$ SD)
Rabdom	1.3468 ( $\pm$ 0.0011)
İç Bölge	1.3388( $\pm$ 0.0009)
Dış Bölge	1.3432( $\pm$ 0.0019)

## 5.6 Işık İzleme Teknikleriyle Optik Sistem Analizi

Şekil 5.6A, ışın izleme çalışmaları için kullanılan modeli ve Şekil 5.6B, optik sistem içindeki belirli ışınlar tarafından alınan yolları göstermektedir. 1 numaralı ışın  $8\mu\text{m}$  yukarıda ve optik eksene paraleldir. 1 noktasında kristalin koni içindeki ekseni keser. 2 numaralı ışın optik eksene daha yakındır ve 2. konumdaki koni içindeki ekseni kesmektedir. Bu ışın yollarından ışınlar optik eksene daha yakın ve daha yakınlaştıkça onunla kesişme noktaları, sistemin odak noktası olan 3 noktasına yaklaşacaktır.



Şekil 5.6 : A, Işın izleme tekniği tarafından kullanılan optik sistem diyagramı. Sayılar kırılma yüzeyleri, çapraz kesit deliklerin yerlerini göstermektedir. B, A modelini kullanan ışın izleme tekniğinin sonuçlarıdır.

1 no'lu ışın optik eksenden 8 µm yukarıda ve buna paralel. Bu ışın, 1 işaretli noktada kristalin koni içinde optik eksenini keser. Ray 2, optik eksene paralel olarak 4 µm mesafeden paralel olup, 2 noktasında kristalin koni içinde kesmektedir. Sistemin odak noktası, raddomun 34 µm kadar yukarıda işaretlenmiş olan noktadadır. Üzerinde noktalı çizgilerle gösterilen ışın ışını, ana pigment hücrelerine kırılır (gerçek kırılma gösterilmemektedir) [4].

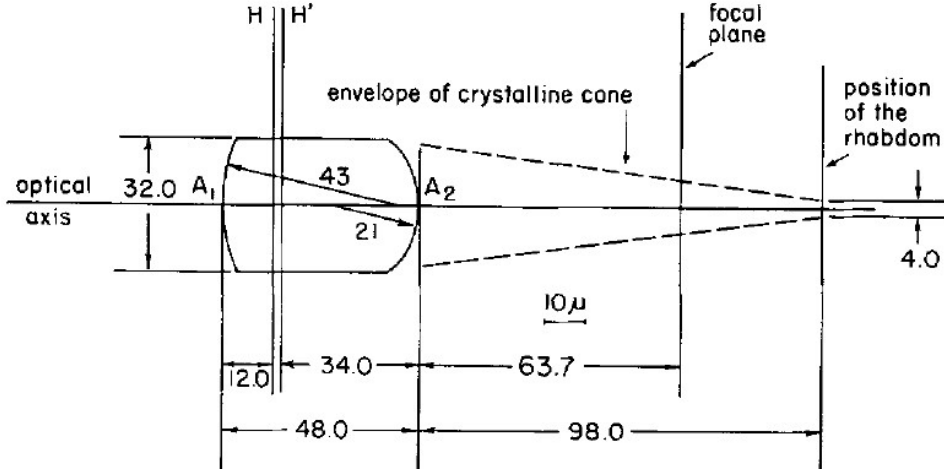
### 5.6.1 Gauss kalın mercek formülü analizi

Işın izleme çalışmaları ile biyolojik optik sistemlerin analizinde yaygın olan kullanımı nedeniyle Gauss kalın lens formülüyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması önemlidir. Kalın lens formülünü uygulamak için, kütükül merceği için ortalama bir kırılma indisi hesaplanır:

$$d = \sum_i d_i \text{ and } n = \frac{1}{d} \sum_i n_i d_i \quad (5.3)$$

Burda  $d_i$  bölge,  $i$ 'nin yaklaşık kalınlığıdır ve  $n_i$  bu bölgenin kırılma indisidir. Arı için  $n = 1.4530$  dur. Kalın lens formülünün uygulanmasının sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmektedir.

Ana düzlemler H ve H 'olarak etiketlenmiştir ve (ikincil) odak noktası bu şekilde etiketlenmiştir. İki yöntemle elde edilen sonuçlar arasında ufak bir fark var. Işın izleme, odak noktasını (paraksiyel ışınlar için ve trilaminer lensi kullanarak), kütükül merceğinin alt yüzeyinin 60 µm altına yerleştirilir. Öte yandan kalın lens formülü odak noktasını lensin alt yüzeyinin 63,7 µm altına koyuluyor. Odak noktasının konumunda olası bir hata kaynağı, optik sistemin çeşitli parçalarının kırılma indeks değerlerinde yatar. Bu nedenle, lensin kırılma indeksleri, lens ile kristalin koninin yüzü arasındaki hücre materyali ve kristalin koninin kendisinde değişen, bir dizi ray-izleme çalışması yapılır; toplam 64 farklı kombinasyon vardır. Her elemanın kırılma indisi, ölçülen değerlerin üstünde ve altında 0,1'lik (yaklaşık %100-500 gözlemsel hata eşdeğeri) adımlarla değiştirilir. Sonuçların yorumlanması zordur ancak odak noktasının konumuna getirilen hata yüzdesinin, modelinkiyle karşılaştırıldığında, adı verilen üç ögenin herhangi birindeki en büyük yüzde gözlemsel hatadan daha az olduğunu saptamıştık.



Şekil 5.7 : Kalın mercek formülünden elde edilen sonuçları gösteren diyagram. H ve H' ana düzlemlerdir. Tüm ölçümler mikron cinsindedir. Şekil 5.6 ile karşılaştır [4].

Kırıcılık indisi verilerimizde belirtilen küçük standart sapmalara dayanarak, %1 'den az gözlemsel bir hatanın makul olduğunu ve bu tür bir hatanın odak noktasının pozisyonu üzerindeki etkisinin önemsiz olduğuna inanılır.

İkinci önemli bir hata kaynağı, kesit kalınlığının hatalı tespitiyle kırılma indisi ölçümlerine dahil edilen varyasyonlarda yatar. Bu hata kaynağını değerlendirmek için, bilinen kırılma indeksine sahip bir plastik bloktan olan kesitler aynı mikrotomda kesilir, böylece bölümün kırılma indeksindeki herhangi bir değişiklik, yalnızca kesit kalınlığı değişikliklerine bağlanabilir. Bu şekilde, kalınlık varyasyonlarının % 5-8 aralığında olduğunu (ortalama olarak) tespit edilir. Bu aralıktaki varyasyonlar, yüzde bir fraksiyonun refraktif indeksinde bir hata getirir. Sonuç olarak, kesit kalınlığındaki değişiklikler, odak noktasının konumu üzerinde önemsiz bir etkiye sahiptir.

Son olarak, korneal lensin kırılan yüzeyleri için eğrilik yarıçaplarındaki değişiklikler, odak noktası konumundaki potansiyel hata kaynağı olarak düşünülür. Eğrilik yarıçaplarının değerlerinin ortalama değerlerden %4-10 oranında değiştirildiği bir dizi ışın izi çalışmaları yapılır. Arka yüzeyin (Şekil 5.6A'daki yüzey 4) eğrilik yarıçapında %10'luk bir değişiklik, (ortalama) odak noktasının konumuna yaklaşık %3/2 hata getirir. Ön yüzün daha hassas olduğu bulunur. Eğrilik yarıçapında %10 'luk bir değişim (Şekil 5.6A'daki yüzeyler 1 ve 2), odak noktasının konumuna %6,5 hata getirir.



### 5.6.2 Odak konumunun doğrulanması

Rabdom üzerindeki odak noktasının konumu deneysel olarak doğrulandıktan sonra yeni kesilmiş gözler, tıraş bıçağıyla ommatidyum eksene dik olarak kesilir. Göz yüzeyinin yakınında bir bölüm olarak, optik sistemin tüm elemanları dilimlerde mevcuttur (öğelerin her biri gözün eğriliğinden dolayı birkaç farklı seviyede kesilbilir). Kristal koninin çeşitli seviyeleri mikroskop objektifi altında hareket ettirildiğinde, kirişin çapının asgari seviyeye düştüğü ve daha sonra yeniden yükseldiği görülür ve bu da odak noktasının kristalin koni içerdiğini gösterir. Teknik zorluklar daha doğru ölçümlerin yapılmasını engellemekle birlikte kuşkusuz, odak noktasının rabdomun üzerinde olduğu ve muhtemelen kristalin koninin ortasına yakın olduğu söylenebilir.

### 5.6.3 Bir ommatidyum için optimum boyut

Çözünürlüğü artırmak için görüş alanını daraltmanın avantajlı olması durumunda, her ommatidyumun boyutunu küçültmek neden aynı etkiyi elde etmiyoruz? Böyle bir yaklaşımın kısıtlanması, boyut küçültmenin kırınım nedeniyle kayıp getirdiğidir. Bu gerçek ommatidyumun optimum boyutunun nasıl tahmin edilebileceğini sormakla ilgilidir [52,74]. Feynman'ın yaklaşımını takiben, [75] görüyoruz ki, göz yüzeyinde dağıtılan yüzlerin sayısı ne kadar fazla olursa, çözünürlük o kadar iyi olur. Ancak bizim askeri uygulamalarımızda çözünürlükten ziyade hızlı ve geniş tarama yapması daha önemli ve kullanacağımız dalga boyunun da 3-12µm olacağından, yapıyı aşağıdaki formüller yardımıyla büyültmeye karar verdik.  $\theta_p$  açisal boyutunun sayısını formülü;

$$\theta_p = \frac{d}{r} \quad (5.4)$$

Burada  $\theta_p$  radyan cinsinden, d giriş çapı ve r gözün yarıçapıdır. Giriş boyutu azaldığında, kırınım etkileri artar ve giriş boyutunu küçültmek suretiyle kazanılan netliği maskeler. Kırınım etkileri altında, kırınım nedeniyle oluşan çözünürlük kayıplarının belirgin bir formüle sahip olduğu bir  $\theta_d$  açısını tanımlar. Bölüm 2.3'te "Bazı Bileşik Gözlerin Matematiksel Analizi" başlığı altında bu konuya değinmiştik.

$$\theta_d = 1,2\lambda/d \quad (5.5)$$

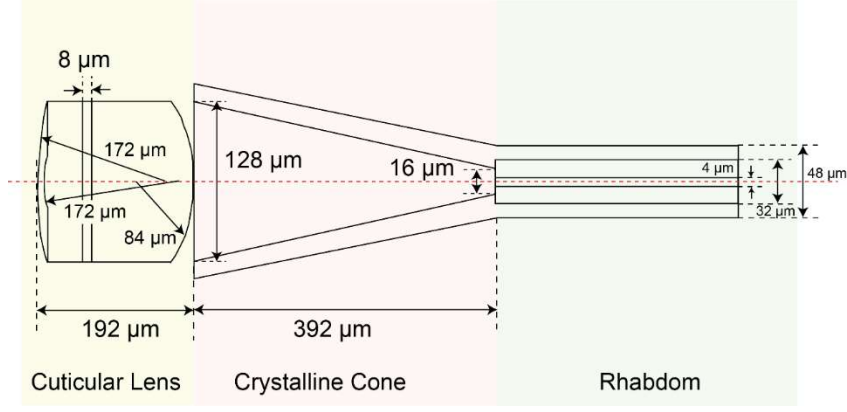
Burada  $d$  radyan cinsindedir ve  $\lambda$  da ışığın dalga boyudur. Bal arılarının ölçümünde  $r = 1.22$  mm bulundu. Elimizde bulunan optimum  $d$ 'yi bulmak için;

$$\frac{\partial}{\partial d} (\theta_d + \theta_p) = \frac{1}{r} - 1,2\lambda/d^2 = 0 \quad (5.6)$$

Çözüm,

$$d = (1,2r\lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

$\lambda$  ve  $r$  ( $\lambda = 0.546$   $\mu\text{m}$ ) değerlerini ekleyerek, gözlenen  $32\mu\text{m}$ 'lik değer ile iyi uyumu sağlayan  $d = 29\mu\text{m}$  olduğunu buluruz. Çalışılan dalga boyu  $10\mu\text{m}$  civarında getirildiğinde, denklem (5.7) 'den  $d = 121\mu\text{m}$  bulunur. Hesaplanan bu  $d$  değeri, bize yapının (Şekil 5.8) dört kat daha büyük ölçeklendirilmesi gerektiğini söylüyor. Gözün keskinlik ve kırınım kayıpları arasında bir denge oluşturduğu görülüyor. Kristal koni, rabdoma yaklaştığı ve dar olduğu için, kristalin koniyi çevreleyen pigment hücrelerinin oluşturduğu küçük diyaframın varlığına bağlı olarak Fraunhofer kırınım kayıpları önemli olabilir. Odak noktasındaki yoğunluk modelinin saptanması, Born ve Wolf [76] 'te bulunan zarif gelişme ile basitleştirilir. Formülleri  $u$  ve  $v$  için değerlendirilerek,  $u = 0.0$  ve  $v = 0.98$  olduğunu bulunur. Bu noktaları grafikte bularak, ikinci en yüksek yoğunluğun ana maksimum ve yarısının, odak noktasındaki kristalin koni içerisine dahil edildiğini bulabiliriz. Bu, bize kristalin koninin, yanlarının eğimi nedeniyle odak noktasına ulaşan ışık miktarını önemli ölçüde azaltmadığını garanti eder. Işın izleme prosedürü, her kırınan yüzeyi terk ederken iletilen ışınların yoğunluğunu da verir. Hesaplama, 36-45. sayfalarda bulunan Born and Wolf [76] formülü kullanılarak yapılır. Bu formülleri kullanarak analiz sonuçları, rabdoma iletilen ışınların yoğunluğunun tümünün ışınların yoğunluğunun %95'inde olduğunu göstermektedir. Bu iletimin doğruluğu sonraki bölümlerde ölçeklendirilmiş tasarım sonuçlarıyla da desteklenecektir.



Şekil 5.8 : Tek ommatidyum yapısının, kendi çalışacağımız dalga boyuna göre tasarladığımız hali.

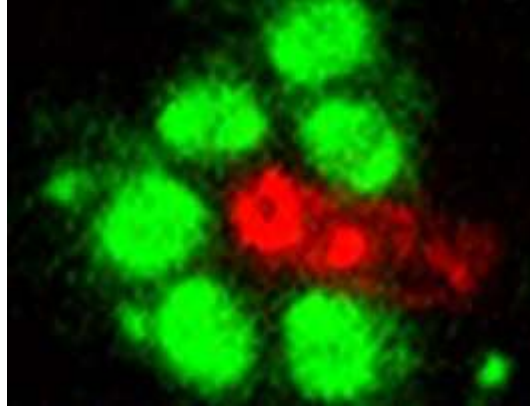
### 5.7 Dalga Kılavuzu Modları

Optimum aydınlatma ve yönlendirme koşullarında, tekli, ikili veya üçlü ommatidyum aydınlatılmış mod desenleri gösterilecek. En sık görülen tipler Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Diğer modlar da görülür ancak sınıflandırmaları belirsiz kalır. Her modun mevcudiyeti ve sınıflandırması, "kesme parametresi (cut-off)" olarak adlandırılan modun bir karakterizasyondan gelmektedir. Bu parametre ( $u_{nm}$ ) fiber optik üzerine yapılan araştırmalardan elde edilmiştir [77] ve eşitsizliği karşılamalıdır.

$$u_{nm} \leq 2\pi\left(\frac{r}{\lambda}\right)(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.8)$$

Burada  $\lambda$ , kullanılan ışığın serbest alan dalga boyu,  $r$ , rabdrom yarıçapı,  $n_1$ , rabdromanın refraktif indeksi ve  $n_2$ , çevreleyen maddenin (retinula hücre iç bölgesi) kırılma indisidir. Bu kesme parametresi, belirli bir dalga kılavuzunda yalnızca belirli modellerinin bulunduğunu gösterir. Arıların gözleri için  $\lambda$ ,  $r$ ,  $n_1$  ve  $n_2$  için sahip olduğumuz değerleri ekleyerek  $u_{nm} < 3.4$  olduğu bulunur. Buna göre, en yaygın olarak bulunan modlar düşük kesme değeri olan (0.0-3.4) modlardır.

Arılar ışık polarizasyonunu algılama yeteneğine sahip oldukları için kutuplanmış ışığın rabdromun dalga kılavuzu modları üzerindeki etkisini incelenirse ve polarize ışık ile elde edilen modlar ile polarize edilmemiş ışık ile elde edilen modlar arasında herhangi bir açı farkı, kutuplaşma gözlemlenmez.



Şekil 5.9 : Ommatidyum aydınlatılmış mod desenleri [78].

Rabdomun bir dalga kılavuzu gibi davranması, bir ommatidyumun reseptörlerinin, nasıl gelen bir ışığı aldığına dair anlayışımızı önemli ölçüde etkiler. Bir asimetric ışık dağılımının bir dalga kılavuzu içerisinde asimetric enerji dağılımları olan modları üretebileceği doğrudur. Rabdomda böyle bir dağılım, reseptör hücrelerinin asimetric uyarılmasına neden olabilir. Bununla birlikte, Snitzer ve Osterberg'in [79] fiber optik üzerindeki araştırmaları, birkaç modu destekleyecek kadar büyük elyafların aynı anda iki veya daha fazla modu destekleyeceği gerçeğine dikkat çekmektedir. Bu, tek bir modal paternin muhafaza edilmeyeceğini ima eder, ancak desenlerin üst üste binmesi, herhangi bir tek asimetric modun egemen olacağını imkansız hale getirir; böyle olası baskın modların, aynı enerji dağılımına sahip olmayacak olacağını belirtilir. Aynı yazarlar, bir dalga kılavuzu dairesel simetri'den saptığı için, mükemmel dairesel dalga kılavuzunda bulunanların doğrusal kombinasyonları olan yeni modlar elde edildiğini belirtmektedir. Dalga kılavuzunun geometrisi bozulduğunda asimetric modların görünme eğilimi çekirdek ve kaplamanın kırılma indeksleri arasındaki fark ile orantılıdır, yani fark küçükse mod değiştirme eğilimi büyüktür.

Loblu desenler ortaya çıktığında, Snitzer ve Osterberg [79], dalganın dalga kılavuzunun altına doğru ilerlerken desenlerin oryantasyonlarını aniden değiştireceğini gözlemledi. Bu, rabdomun üstündeki ışık dağılımının asimetric olmasına rağmen, istikrarlı loblu kalıpların rabdom uzunluğu boyunca devam etmesi pek olası olmadığını gösterir.

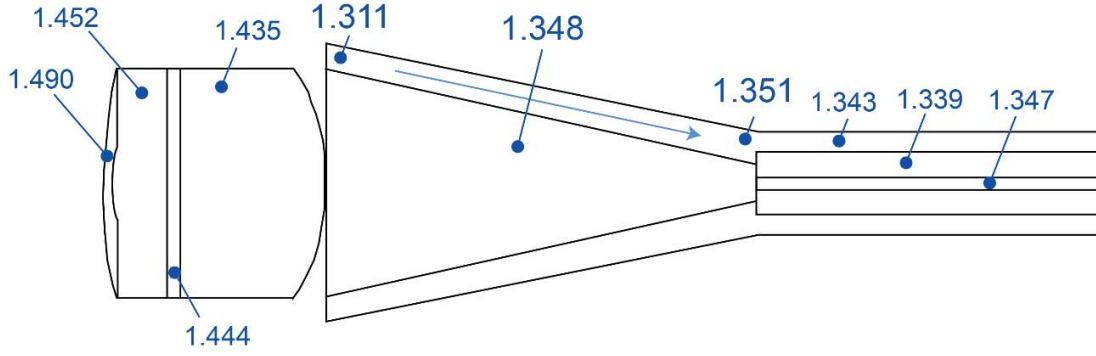
Uyarıcı ışığın dalga boyu değıştikçe, loblu desenler dalga kılavuzunun ekseni boyunca yine azimut yönelimlerini (boş çizginin dönüşümü) değıştirir. Fizyolojik koşullar altında, arı tarafından kullanılan ışık baskın olarak beyazdır ve bu, tek bir dalga kılavuzu modunun baskın olmayacağını iddia eder. Loblu desenler sadece deneysel olarak monokromatik ışıkla gözlemlenir ve arı gözü için loblu desenler en sık görülen desenler değildir.

Her ne kadar yukarıdaki nedenler kesin olmasa da, her ommatidyumun ışık alımında bir birim olarak hareket ettiği varsayımını destekleyen güçlü kanıtları bulunmaktadır; Yani, bir ommatidyumdaki tüm hücreler, gelen ışığın dağılımındaki herhangi bir asimetri ne olursa olsun karşılaştırılabilir seviyelerde heyecanlanacaktır. Bu nedenlerden dolayı, ommatidyumun görme alanının dairesel olarak simetrik olduğunu ve bir nesnenin göz yüzeyinden uzaklığı ile artan içsel bir belirsizliğe sahip olduğunu varsayacağız.

## **5.8 Bal Arısı Bileşik Gözünün Elektromanyetik Dalga Analizi**

4. bölümde bahsettiğimiz FDTD yöntemiyle, tekli, ikili ve üçlü ommatidyumları yan yana yerleştirerek diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin doğrudan zaman domeninde ayırıştırıp çözdük. Program çözünürlüğümüzü 200nm x 200nm olacak şekilde seçtik. Çalışma alanı, ilk önce 700µm (x) ve 150µm (y) olacak şekilde belirledik, ardından yapıyı uzatarak, 1341µm (x) ve 150µm (y) olmasına karar verdik.

Bal arısının kırıcılık indisleri belli olan tek ommatidyumu (Şekil 5.1) referans aldık ve FDTD (Lumerical Simülasyonu)'nin bizlere sunduğu geometrilerden faydalanarak Şekil 5.10'daki gibi bir optik model çıkardık. Bu optik modele, geniş bantlı, genlik profili gauss dağılımına sahip kaynaktan 3-12µm dalga boyu aralığında çeşitli elektromanyetik dalgalar gönderdik. Dalgalar, hem TM hem de TE modlarda gönderildi ve her iki durum içinde başarılı sonuçlar elde ettik.

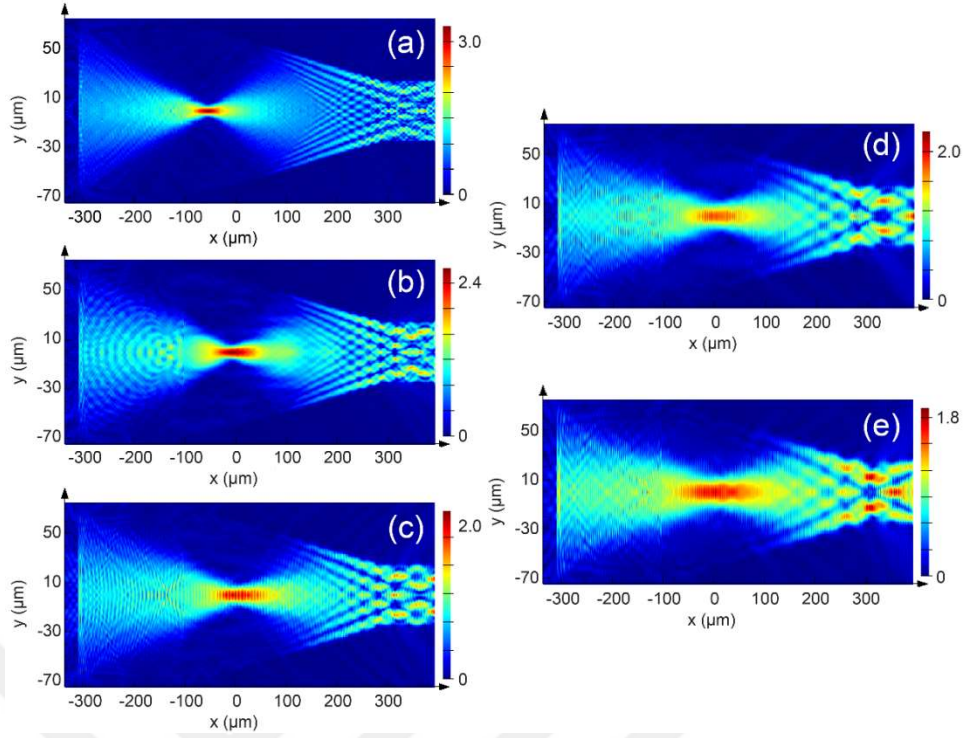


Şekil 5.10 : Bal arısı bileşik gözünün ommatidyumun optik modeli ve bu optik modelde kullanılan geometrilerin kırıcılık indisleri.

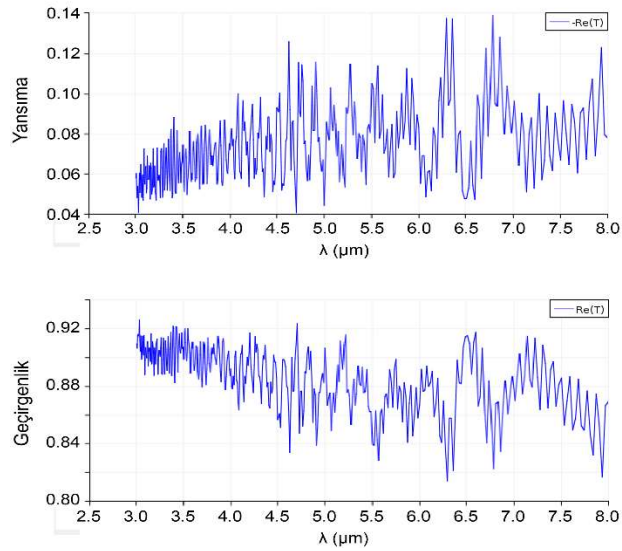
### 5.8.1 3µm-12µm Elektromanyetik dalga analizi

Çalışmalarımıza başlarken, optik modele (ommatidyum'a), geniş bantlı, genlik profili gauss dağılımına sahip kaynaktan, Şekil 5.11'deki gibi 3-12µm dalgalar gönderdik. Gönderilen dalganın, yapının içinde nasıl yayıldığını gözlemlediğimiz bu şekil bizlere, odaklanmanın kristal koninin içinde olduğunu gösterdi. Beklendik bu durum bizlere modellediğimiz yapının kuşkusuz doğru olduğunu gösterdi. Çalışılan orta ve uzak kızılötesi bölgede, spot büyüklüğü (spot size) dalga boyu ile doğru orantılı olduğundan, dalga boyu azaldıkça Şekil 5.11(a)'daki gibi odaklanmanın keskinleştiği saptandı. Dalga boyu arttıkça, Şekil 5.11(e)'deki gibi odakta genişleme kaymalarının olduğu gözlemlendi. Bu olay "abbe limit" ile açıklanır ancak odak noktasının sağa veya sola doğru kayması lensin kromatik aberasyona sahip olduğunu gösteriyor. Bu olay normalde optikte istenmeyen bir şey ancak gözler için istenen bir fiziksel olay olabilir. Gelecek çalışmalarımızda bu konuya ayrı ele alacağız. Yapılar üzerinde optik modellemeler yapıldıktan sonra yansıyan ve geri gelen gücün yüzdesi (Şekil 5.12) ve (Şekil 5.13) üzerine çalışıldı. FDTD yöntemini kullanmamızdaki en önemli noktalardan biri de bu göz yapısının enerjiyi ne kadar aktardığı merakıydı.

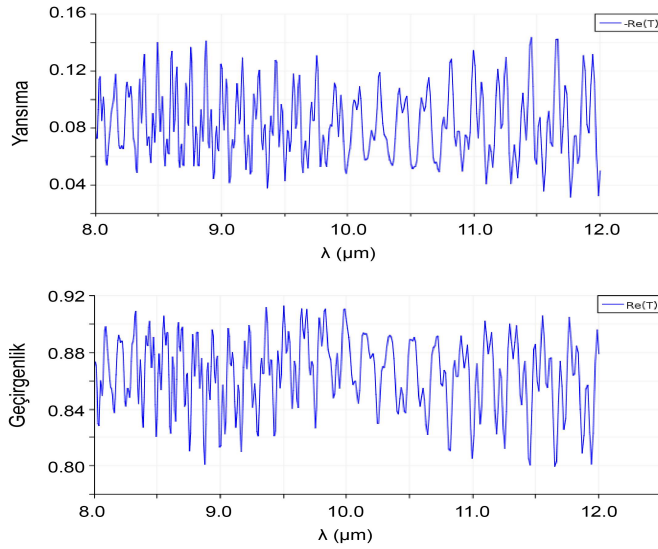
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 incelendiği zaman, çalışılan dalga boyu genişliğine oranla, enerjinin iletimi ve yansımaları geniş bantta harika durumdadır. Buna ek olarak, bu yapının giriş aralığında halen bir kaplama yok. Eğer bu yapının önüne herhangi bir yansımaya önleyici kaplama "ARC" (Anti-reflection Coating) yapıldığı zaman, kolime dalga enerjiyi mükemmel bir şekilde yapıda ilerletir.



Şekil 5.11 : Gönderilen dalganın yapı içinde yayılması. (a) 3 $\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (b) 5 $\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (c) 7 $\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (d) 10 $\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (e) 12 $\mu\text{m}$  dalganın yayılımı. Gelen dalgalar kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor. Yapı olmazsa, gelen dalgalar dağılıp, saçılacaktır.



Şekil 5.12 : Üstteki şekil, orta kızılötesi bölgede yapıya gelen enerjinin yüzdelik olarak ne kadar geri geldiğini gösteriyor. Altta ise enerjinin ne kadarının geçtiğini görüyoruz.

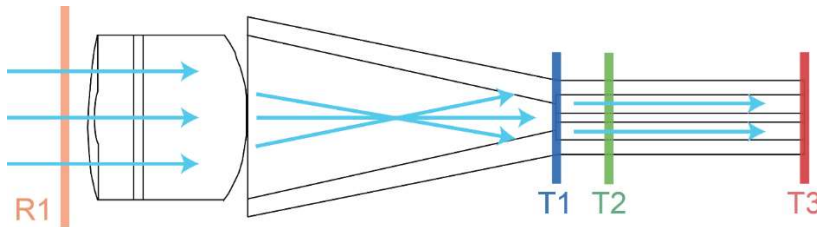


Şekil 5.13 : Üstteki şekil, uzak kızılötesi bölgede yapıya gelen enerjinin yüzdelik olarak ne kadar geri geldiğini gösteriyor. Altta ise enerjinin ne kadarının geçtiğini görüyoruz.

Şekil 5.11'deki yapıları incelerken, merak uyandıran rabdom yapısında oluşabilecek optik dalga deseni, incelenmek üzere diğer alt başlıklardaki çalışmalarda yer verildi.

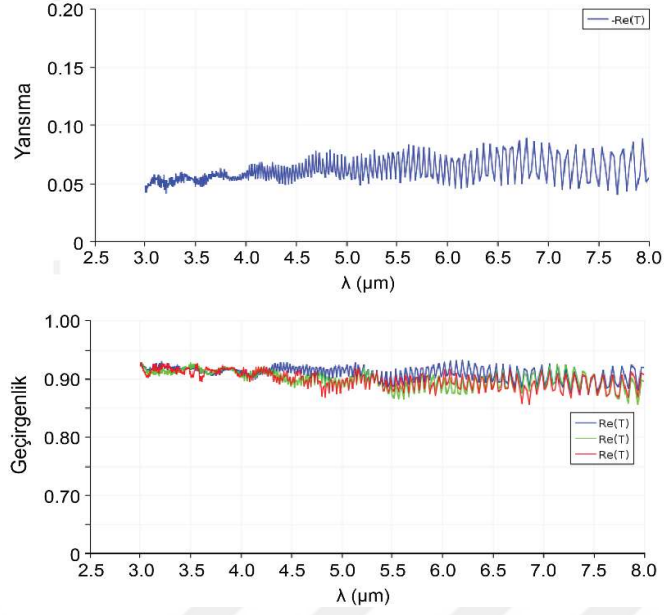
### 5.8.2 3μm-12μm Uzatılmış yapının elektromanyetik dalga analizi

Rabdom yapısında, merakla beklediğimiz dalganın yayılma deseni karşımıza bu alt başlıkta çıkıyor. Şekil 5.11'deki yapıyı göz önünde bulundurursak, bu desende oluşan odakların her birinin farklı görevlerinin olduğu anlaşılabilir. Şekil 5.14'te yerleştirilen hayali algılayıcılar (R1,T1,T2,T3) bize o noktadan yansıyan ve geçen enerjileri söylemektedir. O noktadaki enerji değerleri de Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilmektedir.



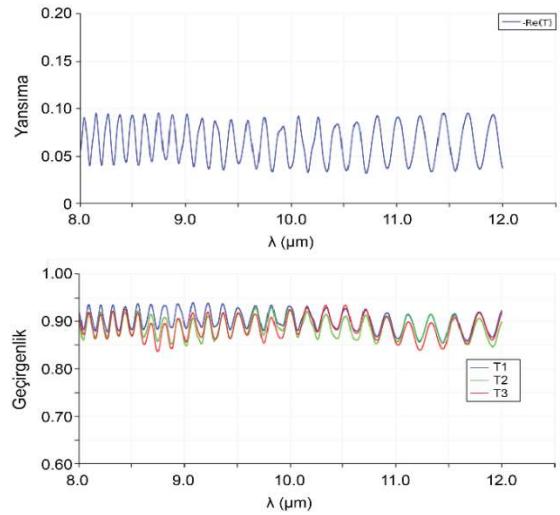
Şekil 5.14 : Rabdom yapısının uzatılmış hali ve yansıma/geçirgenlik ölçüm noktaları. T1,T2 ve T3, geçirgenlik ölçüm noktaları, R1 ise yansıma ölçüm noktasıdır.



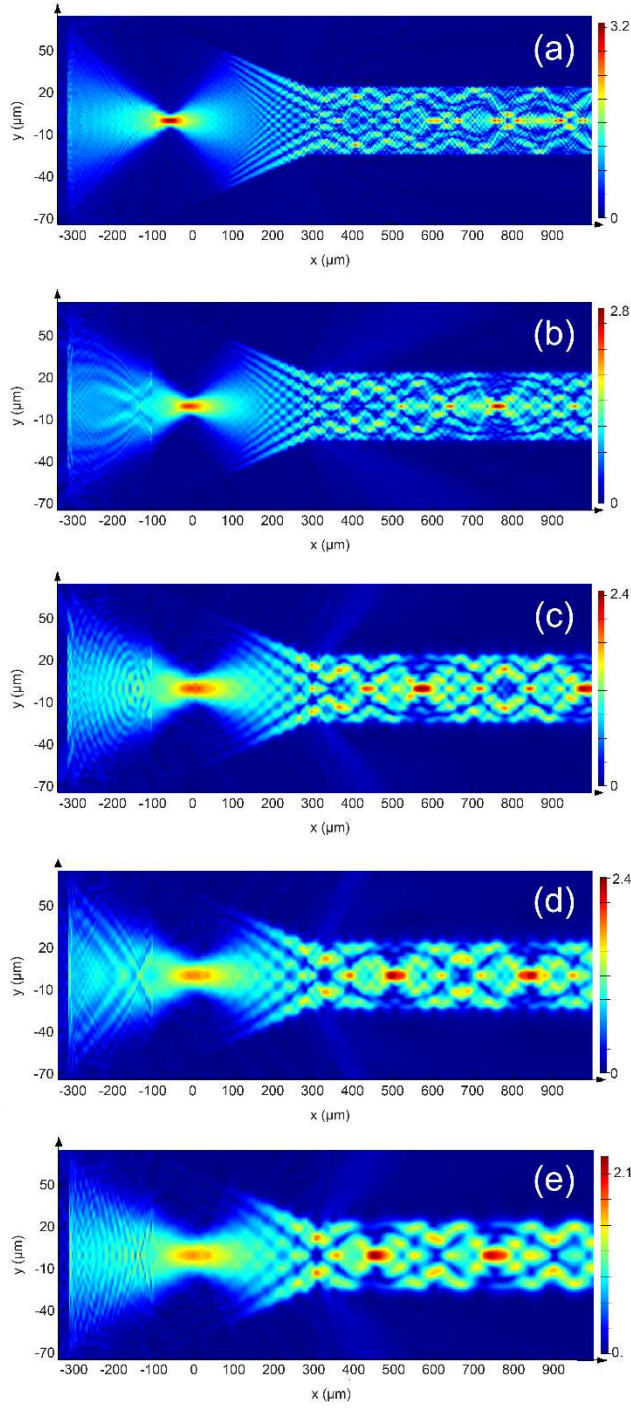


Şekil 5.15 : Orta kızılötesi dalga boylarında üstte R1, yansıyan enerjinin %10'u geçmediği görünüyor. Altta ise mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjiler %90'dan fazladır.

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 incelendiği zaman rabdom yapısının uzaması enerji kaybına sebep olmadı. Geniş bantta, enerji aktarımının yüksek oranda gerçekleştirildiğini FDTD dalga analiziyle gözlemledik.



Şekil 5.16 : Uzak kızılötesi dalga boylarında üstte R1, yansıyan enerjinin %15'u geçmediği görünüyor. Altta ise mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjileri %85'ten fazladır. Dalga boyu arttıkça salınımların arttığı aşıkardır.

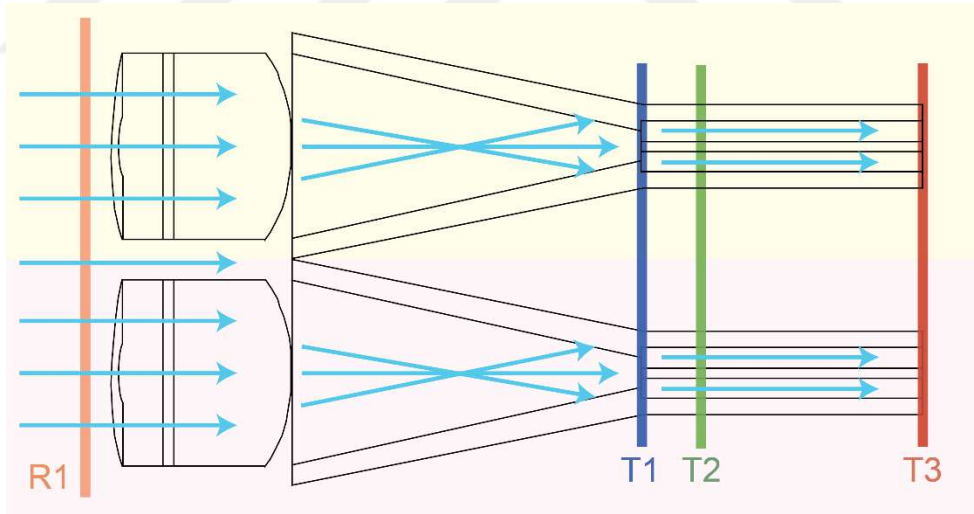


Şekil 5.17 : Uzun rbdoma sahip yapılar da gönderilen dalga nın, yapı içinde yayılması. (a) 3 $\mu$ m dalga nın yayılması, (b) 5 $\mu$ m dalga nın yayılması, (c) 8 $\mu$ m dalga nın yayılması, (d) 10 $\mu$ m dalga nın yayılması, (e) 12 $\mu$ m dalga nın yayılması. Gelen dalga kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor. Yönlendirilen bölgede, rbdomda dalga kılavuzlanarak ilerliyor.

Yayılan dalğanın enerjisi rabdomun sonuna kadar beklenen seviyelerde geçmektedir. Yansıma ve soğurulmaları gözlemledikten sonra bir de Şekil 5.17'deki gibi yayılan dalgaların odaklanmalarını inceledik. 3-12 $\mu$ m kolime dalgalarla bir ommatidyum içinde oluşan bu odaklanmalar ve dalğanın yayılması yeni fikirleri açığa çıkardı. Yapının rabdom bölümünde dalga, kılavuzlanmış biçimde yayılıyordu. Dalga kılavuzu gibi gözlemlediğimiz Rabdom bölgesinde oluşan farklı dalga boylarında ya da frekanslarda karşılık gelen odaklanmalar (lokalizasyon bölgeleri) her bir mesafede farklı frekansların algılanabileceğini göstermektedir. Bu fikirle farklı kızılötesi frekansları algılayabilen tek bir dedektör tipinin yapılabilmesi düşünülebilir. Tek ommatidyumda elektromanyetik dalğanın nasıl yayıldığını, gücün ne kadar aktarıldığını ve ne kadarının yansıdığını gözlemledik. Bu gözlemler sonucunda iki veya üç ommatidyum nasıl bir davranış sergiler?

### 5.8.3 Çift ommatidyum yapısı

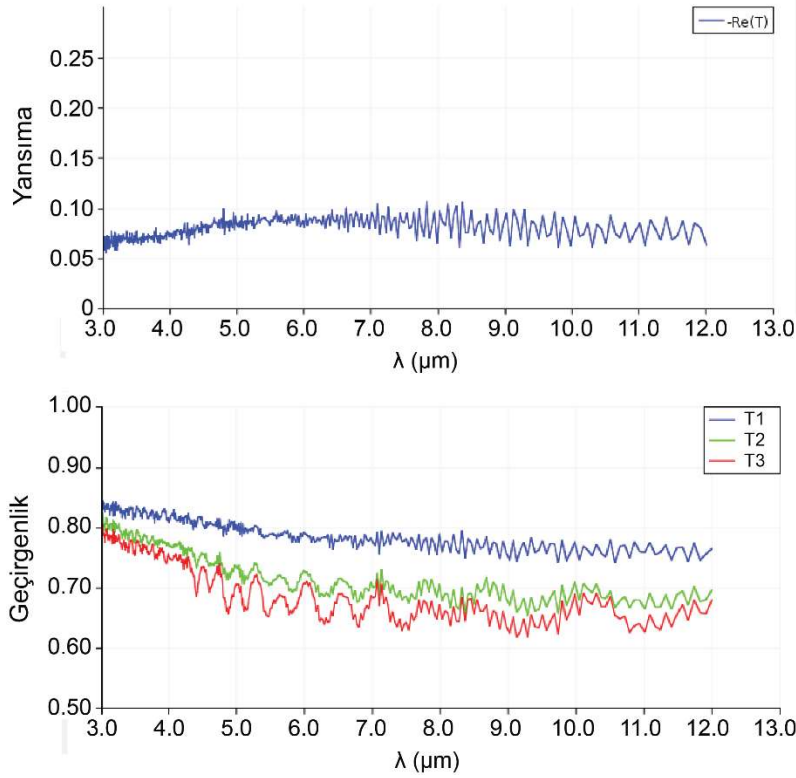
Dalga analizleri yaptığımız bu program sayesinde, daha önce kullandığımız tekli yapının aynısını adeta mikro-lens dizilim gibi alt alta koymak oldukça kolay. Şekil 5.18'de de görüleceği üzere ikili yapıyı geometrilerden faydalanarak oluşturduk.



Şekil 5.18 : İkili ommatidyum yapısının tasarıma aktarılmış hali ve T1,T2 ve T3, geçirgenlik ölçüm noktaları, R1 ise yansıma ölçüm noktasıdır.

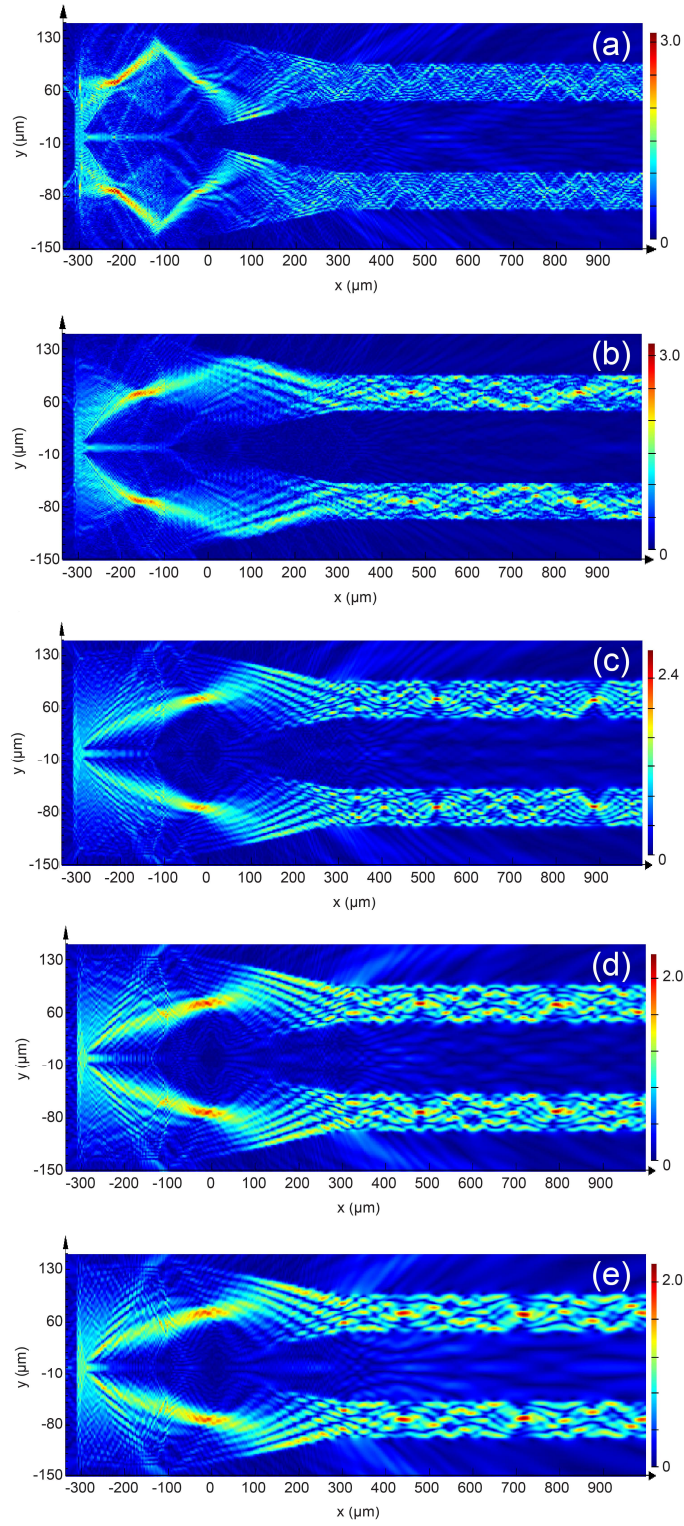
İkili ommatidyum yapısında enerji transferi Şekil 5.16 ve Şekil 5.19 karşılaştırıldığında, daha önceki yaptığımız tekli ommatidyum yapısına göre rabdoma aktarılan güçte düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşün sebebine odaklandığımızda; optik modele, geniş bantlı, genlik profili gauss dağılımına sahip

kaynaktan 3-12 $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında gönderilen elektromanyetik dalganın genişliğinden kaynaklandığını tespit ettik. Bu aşamadan sonra yapacağımız çalışmalarda, dalganın yapı içinde yayılımını daha net görmek için tasarım programında, yapıdaki ommatidyum sayısına paralel kaynağın genişliğinin artırılması gerektiğine karar verdik.



Şekil 5.19 : Orta ve uzak kızılötesi dalga boylarında üstte R1, yansıyan enerjinin %10'u hala geçmediği görünüyor. Altta ise mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjiler %65-85 civarındır.

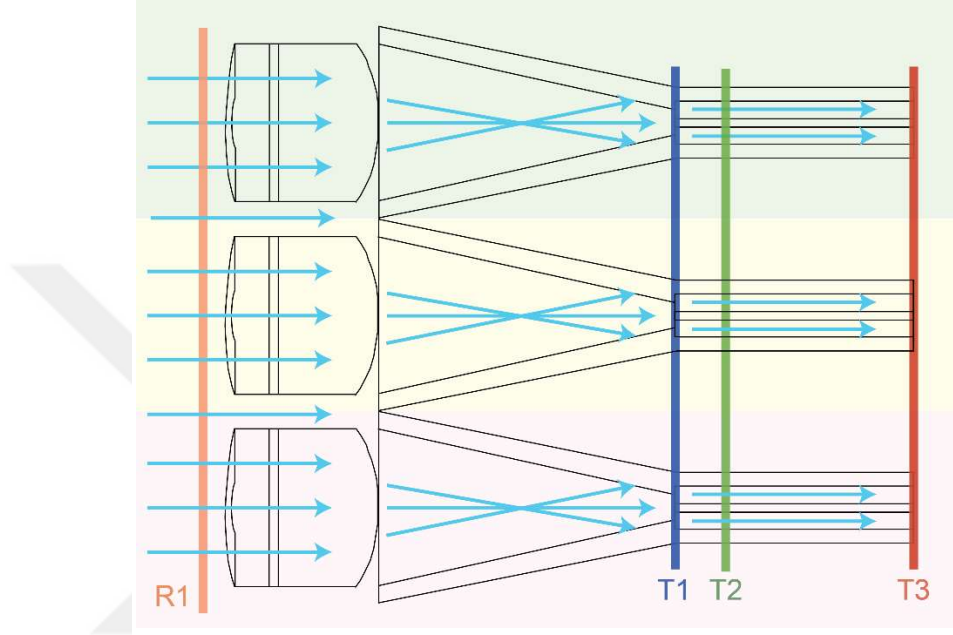
Yayılan dalganın enerjisi rabdomun sonuna kadar beklenen seviyelerde geçmektedir. Yansıma ve soğurulmaları gözlemledikten sonra bir de Şekil 5.17'deki gibi yayılan dalgaların odaklanmalarını inceledik. 3-12 $\mu\text{m}$  kolime dalgalarla bir ommatidyum içinde oluşan bu odaklanmalar ve dalganın yayılması yeni fikirleri açığa çıkardı. Yapının rabdom bölümünde dalga, kılavuzlanmış biçimde yayılıyordu.



Şekil 5.20 : İkili ommatidyum yapısında uzun rabdoma sahip yapılarda gönderilen dalganın, yapı içinde yayılması.(a)  $4,5\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (b)  $5\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (c)  $8\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (d)  $10\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (e)  $12\mu\text{m}$  dalganın yayılımı. Gelen dalga kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor. Yönlendirilen bölgede, rabdomda dalga kılavuzlanarak ilerliyor.

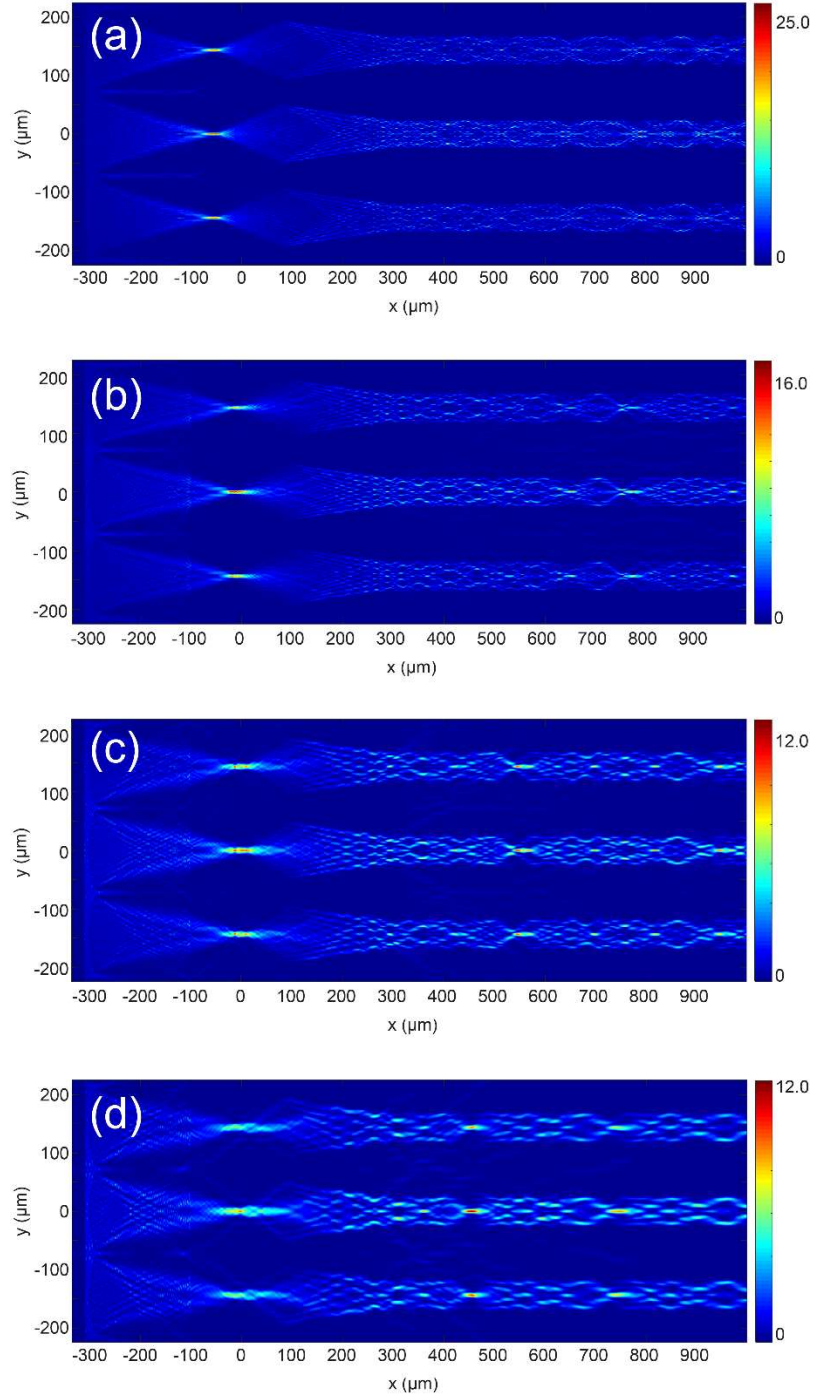
#### 5.8.4 Üçlü dizilim ommatidyum yapısı

İkili ommatidyum tasarım çalışmalarında yapıldığı gibi, üçlü dizilim yapısında da programın geometrilerinden faydalanarak Şekil 5.21'deki yapıyı oluşturduk. Daha önceki çalışmalarımızda gözlemlenen problemler ile beraber burada bütün iyileştirmelerimizi kullandık. Kaynaktan genişletildi, çözünürlük artırıldı.

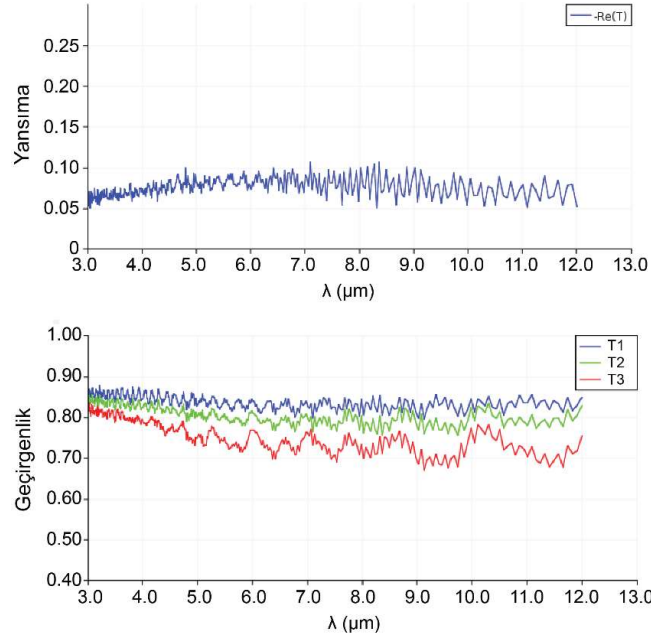


Şekil 5.21 : Üçlü dizilim ommatidyum tasarımı.

Çözünürlüğün artırılmasıyla 3-12 $\mu$ m dalga boyu aralığında, Şekil 5.22'deki gibi yapılarda daha net dalga yayılımları gözlemledik. Geniş bir kaynak kullanıldığı için iletilen enerjide düzelmeler meydana geldi. Şekil 5.23'deki gibi %85 civarlarında kadar iyileştirme yapıldı ve kaynak doğal ortamda her bir ommatidyuma geleceği için gözde iletilen güç %90 etrafında dolacaktır.



Şekil 5.22 : Üçlü dizilim ommatidyum yapılarda gönderilen dalganın, yapı içinde yayılması.(a)  $3\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (b)  $4,8\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (c)  $8,4\mu\text{m}$  dalganın yayılımı, (d)  $12\mu\text{m}$  dalganın yayılımı. Gelen dalga kolime oluyor ve belirli bir bölgeye yönlendiriliyor.



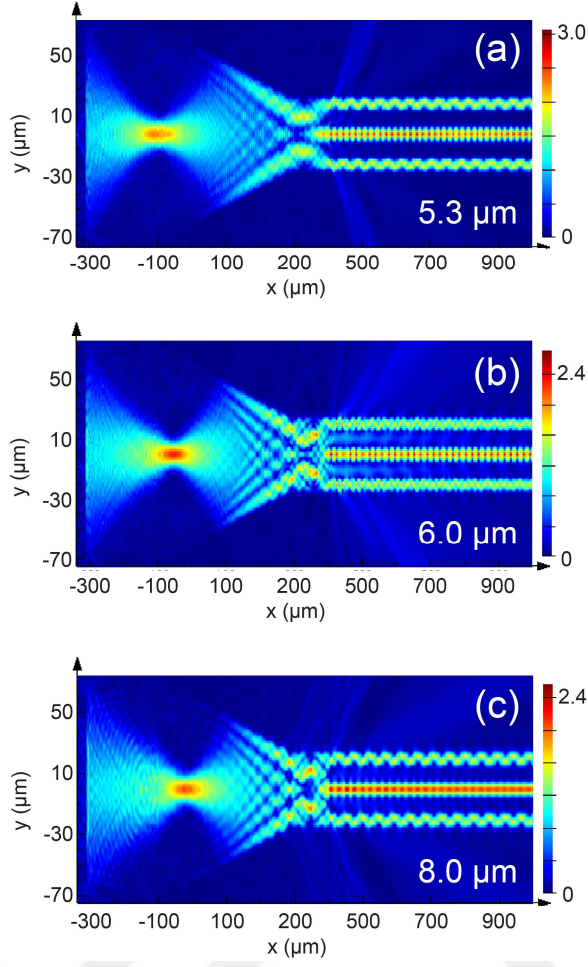
Şekil 5.23 : Orta ve uzak kızılötesi dalga boylarında mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla T1, T2 ve T3 geçen enerjiler %70-85 civarındır.

İkili ve üçlü ommatidyum yapı bir arada düşünüldüğü zaman geniş açılı bir algılayıcının yapılabilmesi de mümkündür. Ommatidyumları balık gözü gibi eğimli bir şekilde yerleştirdiğimizde farklı frekanslarda geniş açılı algılama yapabilir hale gelecektir.

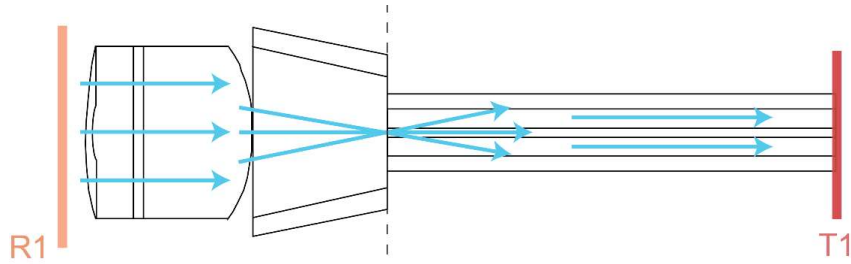
### 5.8.5 Yapı odaklanmalarından enerji iletimi

Çözünürlüğün değişmesiyle iletilen güçte belirgin bir fark olmadığı anlaşıldı. Öyleyse, enerji transferini iyileştirmek için ne yapmalıydık? (Multibeam interference) bunun cevabı olabilir. Şekil 5.24'te görüldüğü gibi enerjiyi bu yöntem ile aktarmamız problemi çözmemize yardımcı olacaktır. Rabdom bölgesindeki enerji yoğunluklarına dalga kılavuzları yerleştirdikten sonra (Şekil 5.24) aynı problem çözme yöntemiyle kristal koni içindeki ilk maksimum odaklanmaya (Şekil 5.25) dar bir dalga kılavuzu yerleştirirsek, Şekil 5.26'daki gibi orta ve uzun kızılötesi dalga boylarında %10' un altında bir yansıyan enerji ve %90' ın üzerine çıkabilen enerji iletimi ortaya çıkarıldı.

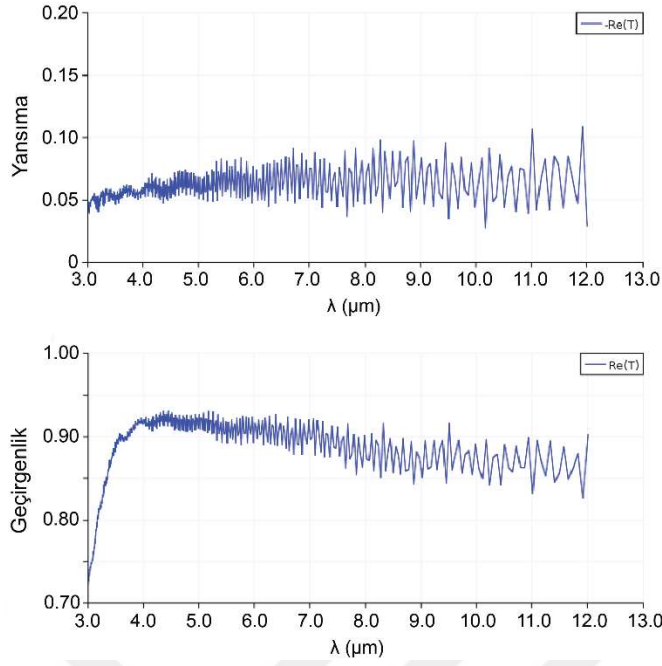




Şekil 5.24 : (Multibeam interference) ile rabdom odaklanmalarından enerjinin iletimi.



Şekil 5.25 : Kristal konideki odaklanma noktasına yerleştirilmiş dar bir dalga kılavuzu.

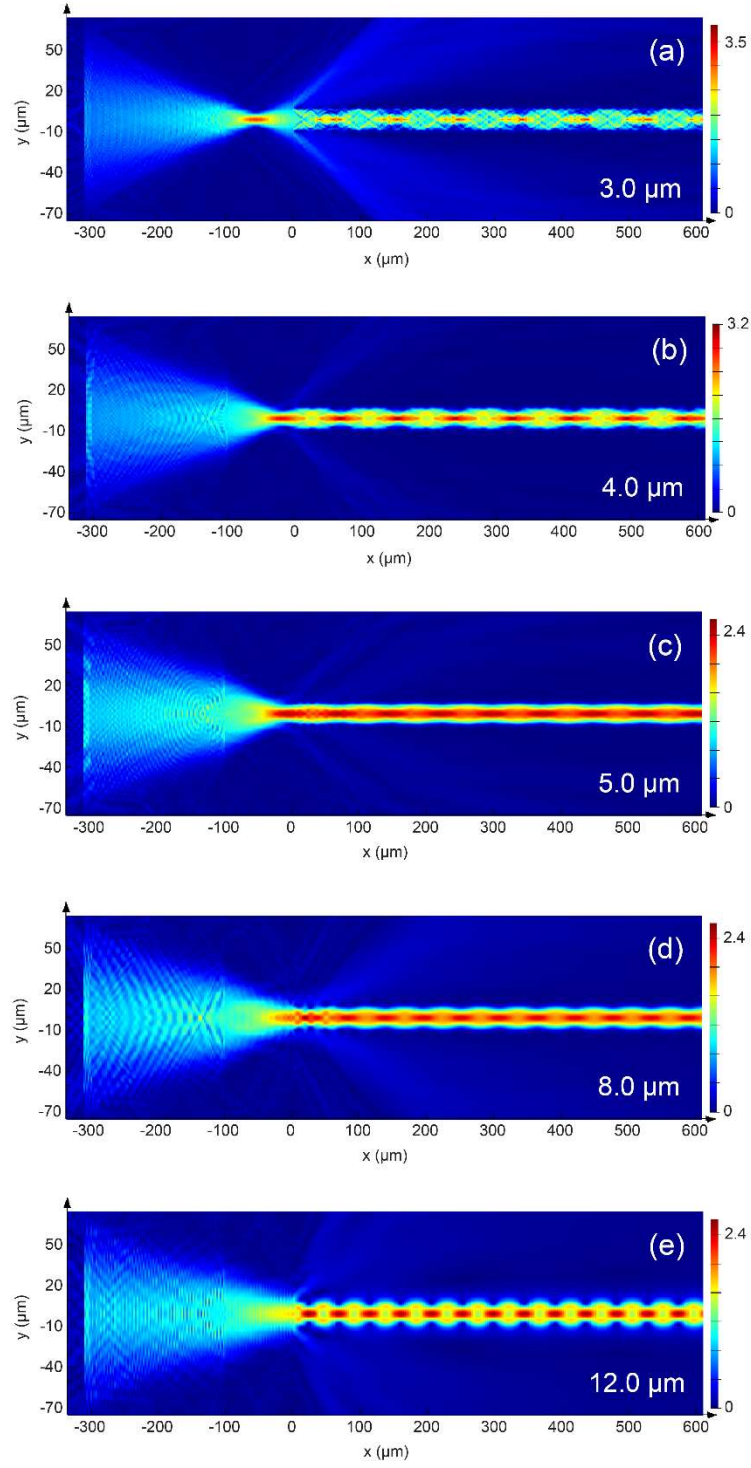


Şekil 5.26 : Kristal konideki odaklanma noktasına yerleştirilmiş dar bir dalga kılavuzu ile elde edilen yansıma ve geçirgenlik enerjilerimiz.

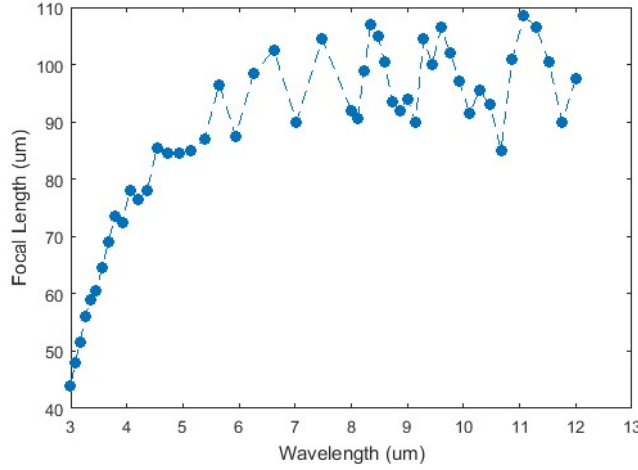
Dalga boyuna bağlı olarak, kristal koni içinde oluşan ilk odak noktası değişmektedir. Bunun üzerine dalga boyu – odak uzaklığı grafiği incelendi. Şekil 5.27 incelendiği zaman odak noktasının konumundaki değişiklik iletilen gücü etkileyeceği için kullanılacak dalga kılavuzunun yerini tayin etmemiz gerekiyor.

Çok daha dar bir dalga kılavuzu ile CC'deki maksimum lokalize olmuş enerjiyi yoğunlaştırarak iletebileceğimizi Şekil 5.27'de gözlemledik. Şekil 5.24'te rabdomda oluşan farklı frekanslı odaklanmaları dalga kılavuzu yardımıyla iletebileceğimizi ve bunları algılayabileceğimizi gözlemledik.

Dalga boyunun odağa bağlı konum değişikliğini incelediğimiz zaman yaklaşık 70μm'luk bir kayma söz konusudur. Bunlara ek olarak kaynaktan gelen elektromanyetik dalga boyu 5-6μm civarı ve üzerinde olduğu zaman sürekli şiddetlenen bir salınım söz konusudur. Frekansa bağlı olarak, farklı noktalara, elektromanyetik dalgayı algılayabilecek malzemeler yerleştirilebileceğimizden daha önce bahsetmiştik. Şekil 5.28 grafiğinde bu olayın nasıl olabileceğini göstermiş olduk.



Şekil 5.27 : Kristal konideki odaklanma noktasına yerleştirilmiş dar bir dalga kılavuzu ile elde edilen tasarım sonuçları.



Şekil 5.28 : Dalga boyuna bağlı olarak kristal koni odağında konumun değişimi grafiği.

### 5.8.6 Tek ommatidyum rabdom grafen absorpsiyonu

Gelecekteki uygulamalar için elektronik ve fotonik entegrasyonu, elektriğin, optik sinyale verimli bir şekilde dönüştürülmesini gerektirir. Grafen, mükemmel elektronik ve fotonik özellikleri ve son derece geniş operasyonel bant genişliği ile entegre sistemler için uygun bir malzemedir.

Dikkate alınmış yapının mod etkin indisi ve mod güç zayıflamasını değerlendirmek için, grafenin yapısına bağlı kompleks dielektrik sabiti hesaplanır. Kompleks dielektrik fonksiyonu  $\epsilon(\omega)$ , “interband” ve “intraband” katkılardan oluşan grafenin karmaşık optik iletkenliğinden elde edilir,

$$\sigma_{total} = \sigma_{intra} + \sigma'_{inter} + i\sigma''_{inter} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{intra} = \sigma_0 \frac{4\mu}{\pi} \frac{1}{\hbar(\tau_1 - i\omega)} \quad (5.10)$$

$$\sigma'_{inter} = \sigma_0 \left( 1 + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega - 2\mu}{\hbar\tau_2} - \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega + 2\mu}{\hbar\tau_2} \right) \quad (5.11)$$

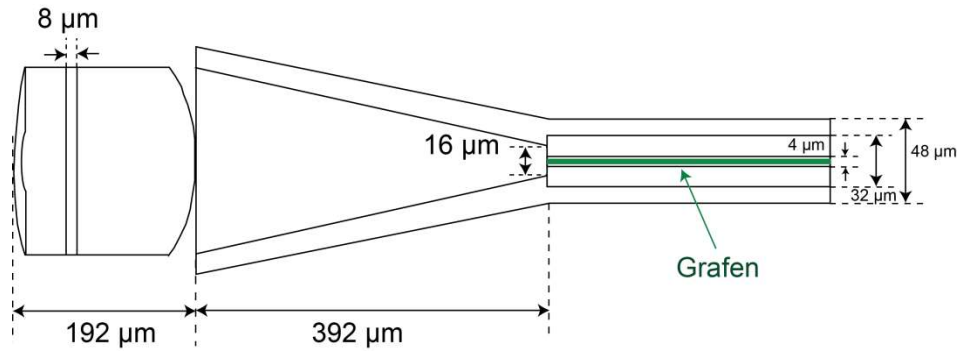
$$\sigma''_{inter} = -\sigma_0 \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(2\mu + \hbar\omega)^2 + \hbar^2\tau_2^2}{(2\mu - \hbar\omega)^2 + \hbar^2\tau_2^2} \quad (5.12)$$

$\sigma_0 = \frac{e^2}{4\hbar} = 60,8 \mu S$  eşitliği, evrensel optik iletkenliği ve  $\epsilon(\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\omega)}{\omega\epsilon_0 d_g}$  formülünde,  $d_g = 0,7 \text{ nm}$  grafen tabaka kalınlığıdır.

Karmaşık iletkenlik  $\sigma = (\omega, \mu, \Gamma, T)$ , açısal frekansa  $\omega$ , yüklü parçacık saçılma oranına  $\Gamma = 1/\tau$ , (gevşeme vakti  $\tau$ ), kimyasal potansiyele  $\mu$  ve sıcaklığa  $T$  bağlıdır. Grafen tabakanın dielektrik sabiti 1550nm dalga boyunda, interband iletkenliği için  $\tau_1=1,2$  ps, intraband iletkenliği için  $\tau_2= 10$ fs' de ve 296K oda sıcaklığında bulunur [80].

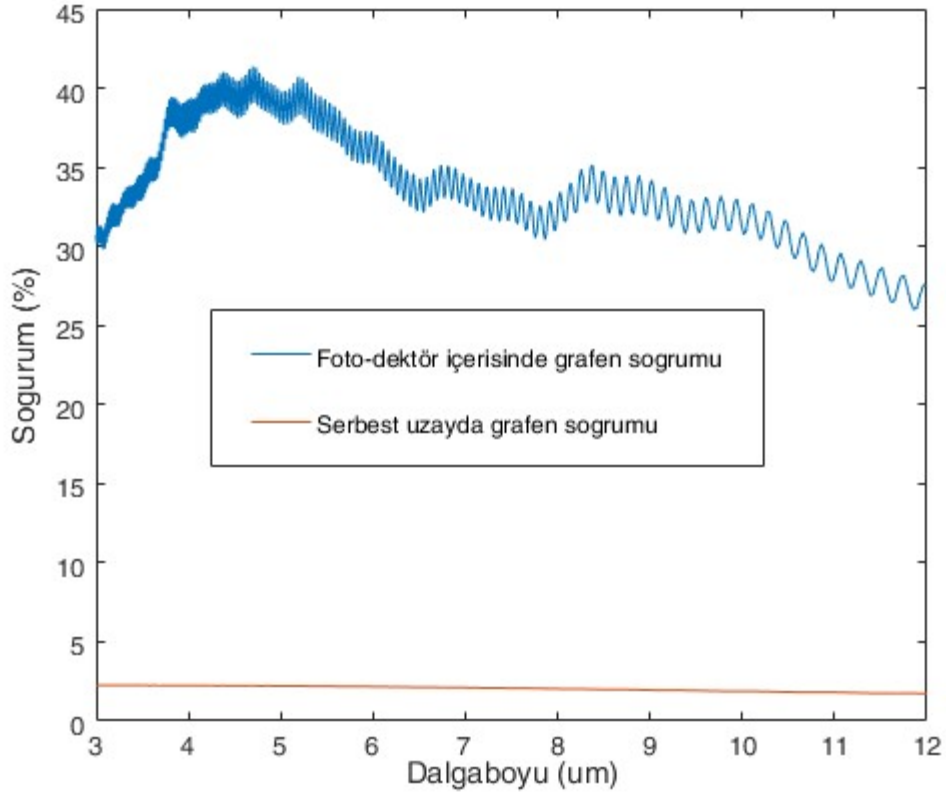
Şimdiye kadar yaptığımız çalışmalarda tekli, ikili ve üçlü yapı ommatidyumları inceledik. Geniş bantlı, genlik profili gauss dağılımına sahip kaynaktan, 3-12 $\mu$ m dalgalar gönderdik ve gönderilen dalğanın, yapının içinde nasıl yayıldığını gözlemlememiz bizlere, odaklanmanın kristal koninin içinde olduğunu göstermişti.

Rabdom yapısını uzatınca farklı odaklanmalarla dalga desenlerin oluştuğunu bulduk. Kristal konideki ilk odaklanma, tıpkı yapının içinde bir noktasal kaynak varmış gibi bir görev gördüğünü tespit ettik. Bu yapılarda enerjinin ne kadar iletildiğini ve ne kadarının yansıdığını yüzdelik olarak gösterdik. Şimdi, bir ommatidyumda kılavuzlanarak ilerleyen ve enerjiyi yüksek seviyelerde ileten dalgadan nasıl güç elde ederim sorusuna cevap arıyoruz. Şekil 5.29'da görüldüğü gibi daha önceden tasarladığımız yapının rabdomu boyunca bir adet grafen yerleştirildi. Yerleştirilen malzemenin  $\Gamma$  değeri 0,00051423 eV,  $\mu$  değeri 0 eV alındı ve sıcaklığımız  $T=300$ K olarak belirlendi.



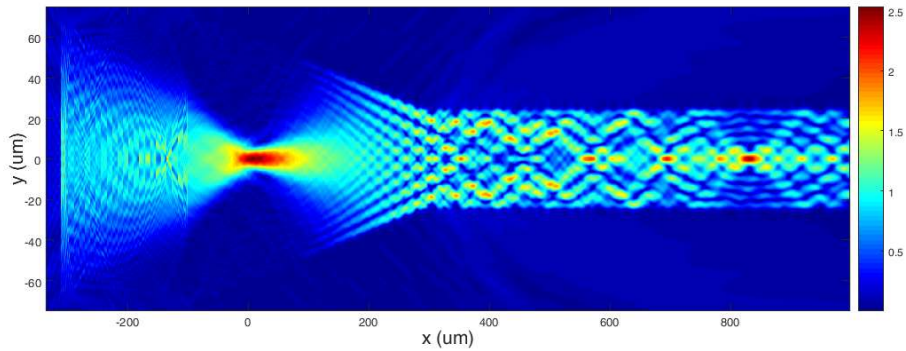
Şekil 5.29 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş bir adet grafen malzeme

Serbest uzaydaki ve ommatidyum içindeki grafen soğurumunu Şekil 5.30'daki gibi karşılaştırdığımız zaman, serbest uzayda %2,3 civarı soğuruma sahip grafenin, bir ommatidyum içinde %40 mertebelerine kadar ulaştığını görüyoruz.



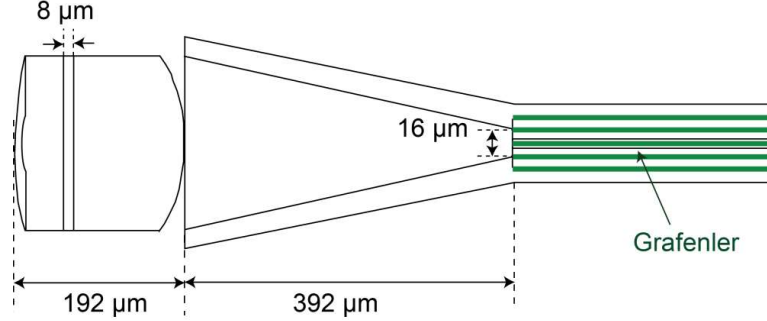
Şekil 5.30 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş bir adet grafen malzemenin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve ommatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.

Soğurulmayan %40 - %50'lik enerjinin dalga kılavuzu gibi devam ettiğini Şekil 5.31'de görebiliyoruz. Bu kaybettiğimiz enerjiyi kazanmak için Şekil 5.32'deki gibi grafen yapılarını arttırmaya karar verdik.



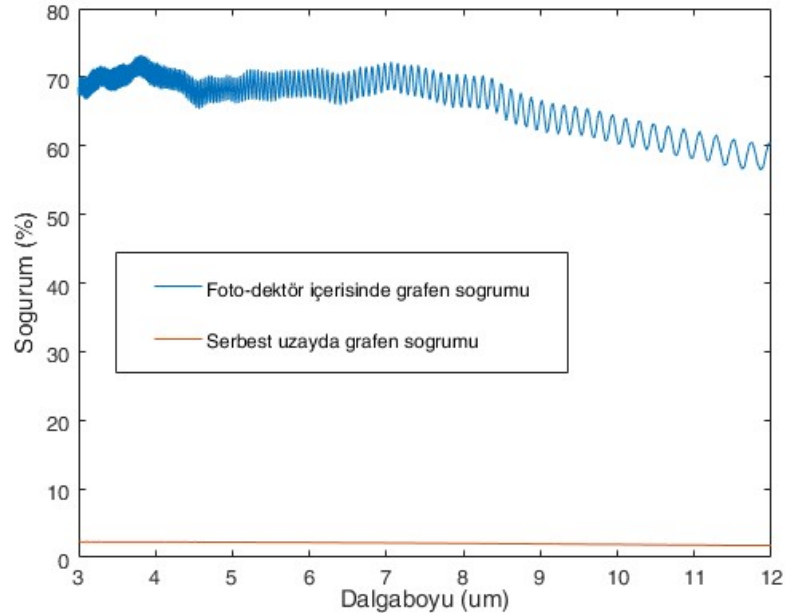
Şekil 5.31 : Tek ommatidyum rabdomuna yerleştirilmiş bir grafenin, 4.8µm dalga boylu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.

Arttırılan grafen yapıları belirli periyotlarla ve rabdomun yapısal özelliklerine göre düzgün simetride yerleştirildi. Bu yerleştirmenin sonucunda foto-dedektör içerisinde rabdomda soğurulan enerjiyi %70 değerine kadar grafen yapılarının soğurduğunu gözlemledik.

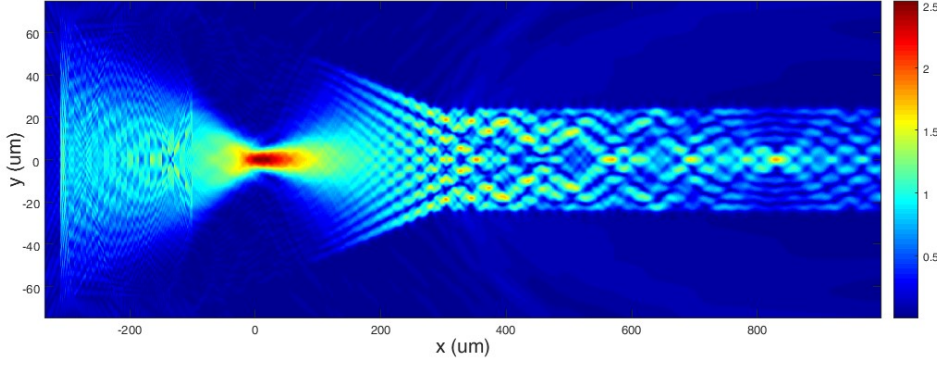


Şekil 5.32 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş grafen malzemeler.

Serbest uzaydaki grafen soğurumu %2.3 civarında olduğunu tek grafenli yapıda bahsetmiştik. Şimdi bu soğurumu, ommatidyum içinde ve daha fazla grafen yapıyla %70'e çıkardığımızı Şekil 5.33'de görüyoruz. Rabdom kısmında dalganın ilerleyişi incelendiğinde Şekil 5.34 tasarımımızda, Şekil 5.31'e göre daha düşük enerjili dalgaların kılavuzlanarak ilerlediğini görüyoruz. Anlaşılan %20 - %10 soğurulmayan dalganın enerjisinin kaldığını görüyoruz.



Şekil 5.33 : Ommatidyum rabdomu boyunca yerleştirilmiş grafen malzemelerin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve ommatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.

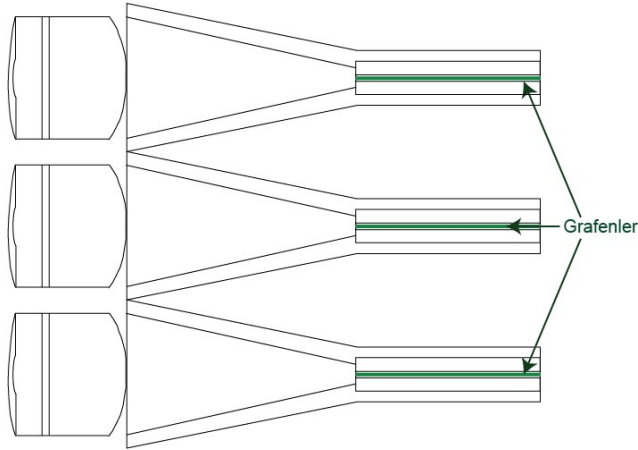


Şekil 5.34 : Tek ommatidyum rabdomuna yerleştirilmiş grafenlerin, 4.8µm dalga boyu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.

Tekli ommatidyum grafenli yapılarda verimliliğimiz oldukça başarılı ancak yapıyı üçlü ommatidyum grafenli yapılara dönüştürdüğümüzde nasıl sonuçlarla karşılaşacağımızı bir sonraki alt başlıkta inceleyeceğiz.

### 5.8.7 Üçlü Ommatidyum Rabdom Grafen Absorpsiyonu

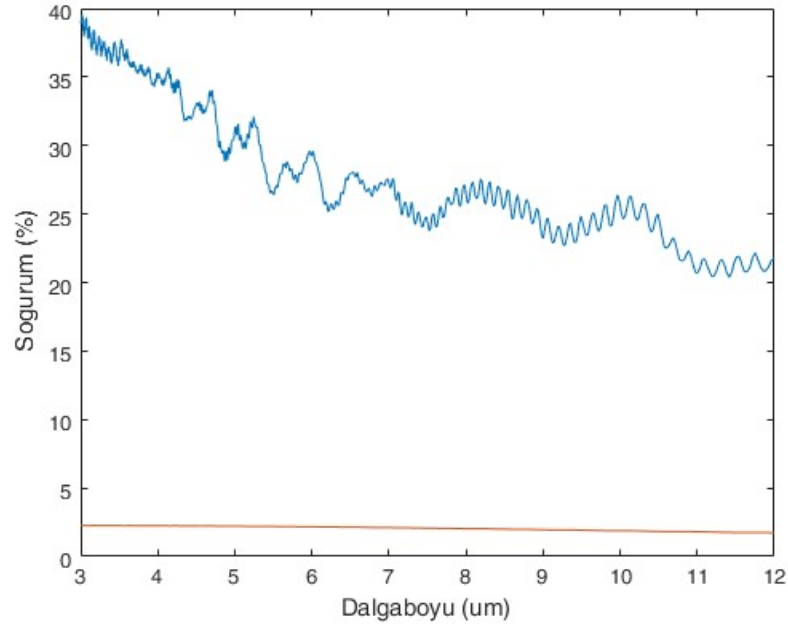
Genlik profili gauss dağılımına sahip ancak tekli çalışmalarımıza göre daha geniş bir kaynak ile bu çalışmayı yapıyoruz.



Şekil 5.35 : Üçlü ommatidyum yapısı ve bu yapıların rabdomları boyunca yerleştirilmiş birer adet grafen malzemeler.

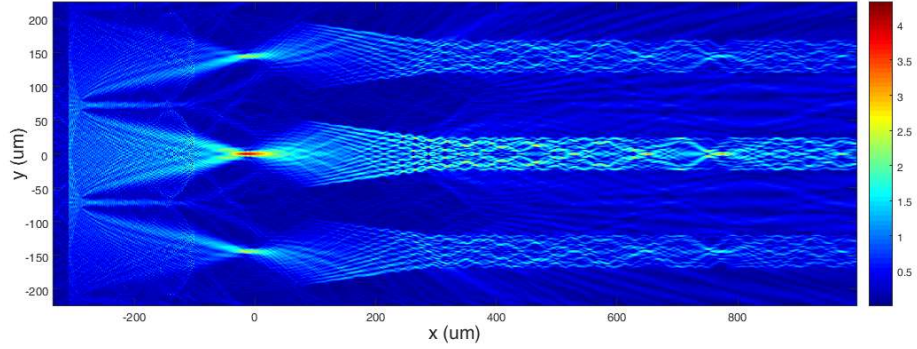
Tekli ommatidyum ve tek grafen ile yapılan çalışmada Şekil 5.30'daki gibi bir sonuç elde etmiştik. Üçlü yapıda da benzer sonuç çıkacağı şüphesiz ki Şekil 5.36'daki gibi %40 mertebelerine kadar çıkabilen enerji soğurumu gözlemledik.





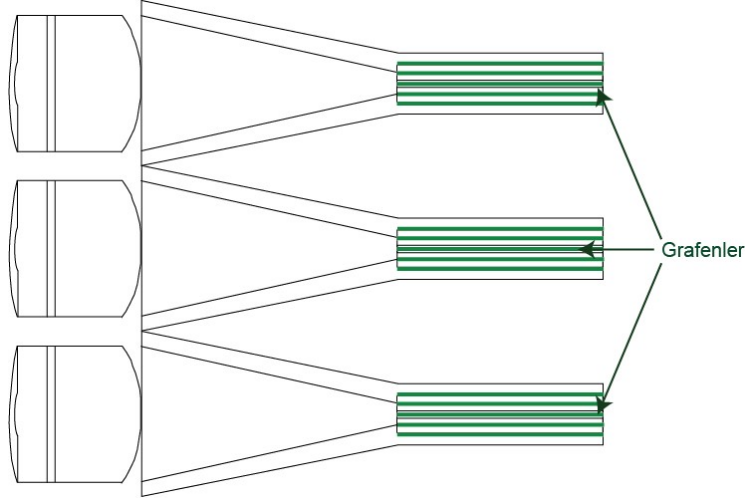
Şekil 5.36 : Üçlü ommatidyum rabdomları boyunca yerleştirilmiş birer adet grafen malzemenin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve ommatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.

Enerji soğurumunun düşük çıkması bizi şaşırtmadı, her bir rabdom yapısında grafen yapılarının daha fazla olmasının enerji soğurumu ile paralel olacağını biliyoruz.



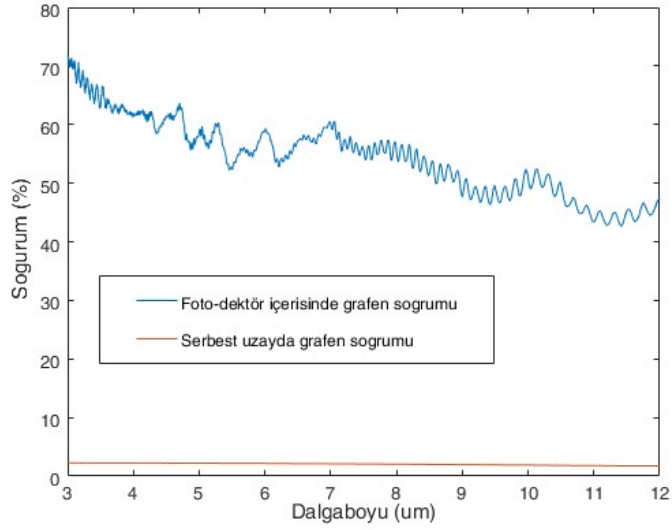
Şekil 5.37 : Üçlü ommatidyum rabdomlarına yerleştirilmiş birer adet grafenlerin, 4.8 $\mu$ m dalga boylu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.

Kaynak genişledikçe yapı üçlü ommatidyum veya daha fazla olsa bile her bir optik birim Şekil 5.37'deki ortadaki ommatidyumun desenine sahip olacaktır. Şekil 5.38'de görüldüğü üzere her bir rabdomdaki grafen dizilimini arttırdığımızda enerjinin bu sefer %70 civarında seyir etmesi beklenmektedir.

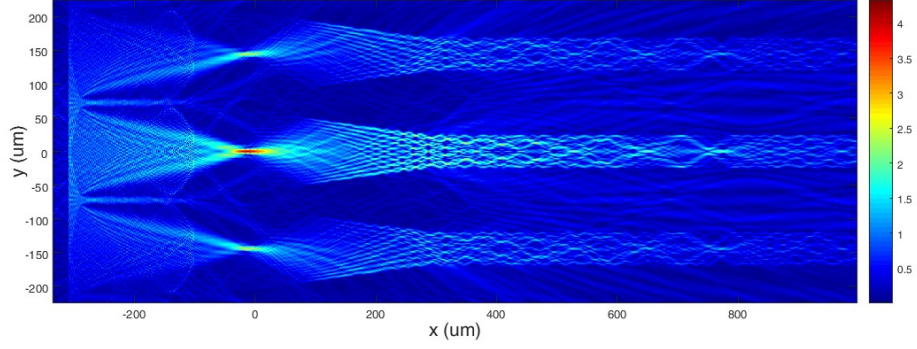


Şekil 5.38 : Üçlü omatidyum yapısı ve bu yapıların rabdomları boyunca yerleştirilmiş birden fazla grafen malzemeleri.

Tasarım sonuçlarımıza göre Şekil 5.39’da görüleceği gibi gücün soğurumu bekleneni karşılamaktadır.



Şekil 5.39 : Üçlü omatidyum rabdomları boyunca yerleştirilmiş birden fazla grafen malzemelerinin dalga boyuna karşılık soğurma yüzdesi ve omatidyum yapısı olmadan serbest uzayda grafen soğurumu.



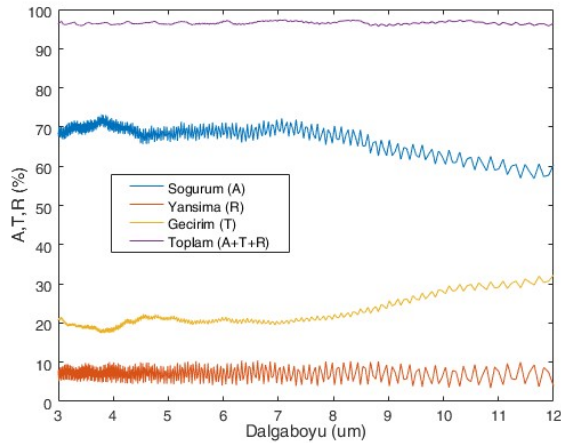
Şekil 5.40 : Üçlü ommatidyum rabdomlarına yerleştirilmiş grafenlerin,  $4.8\mu\text{m}$  dalga boylu kaynak ile dalga analizi tasarım sonuçları.

Kaynak genişledikçe yapı üçlü ommatidyum veya daha fazla olsa bile her bir optik birim Şekil 5.40'daki ortadaki ommatidyumun desenine sahip olacaktır.

Grafen yapılarının periyodunun azaltılması veya yapıların sıklaştırılması bizlere daha yüksek enerji verimlilikleri sunacaktır.

### 5.8.8 Grafenli ommatidyum'un yansımaya geçirim ve soğurum değerleri

Şekil 5.32 üzerine yansımaya, geçirim ve soğurum monitörleri yerleştirdik. Bu ölçümler sayesinde toplam değerimizin %100'e ne kadar yakın olduğunu görmek istedik. Aynı zamanda önceki alt başlıklarda bahsedilen, grafen malzememizin soğurum yüzdelerini de doğrulamış olduk. Şekil 5.41'i incelediğimiz zaman, yansımaya, geçirim ve soğurum değerlerimizin %100'e yakındır.

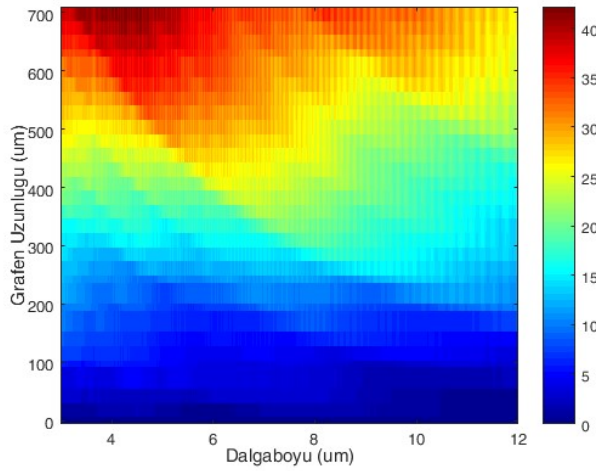


Şekil 5.41: Tekli ommatidyum rabdomları boyunca yerleştirilmiş birden fazla grafen malzemenin dalga boyuna karşılık yansımaya, geçirim ve soğurum yüzdeleri ve bu yüzdelerin toplamı.

Çıkan mor renkli toplam sonucun %100 çıkmamasının sebebi, 4. bölümün 2. alt başlığında bahsettiğim mükemmel uyumlu katman probleminden ve ommatidyum sınırlarından serbest uzaya çıkan küçük dalgalar yüzünden olabileceğini söyleyebiliriz.

### 5.8.9 Ommatidyum içindeki grafen uzunluklarına göre soğurum

Şekil 5.29'u ele alırsak ve grafen uzunluğunu bu yapı içinde değiştirirsek, soğurum hakkında nasıl sonuçlarla karşılaşacağımızı Şekil 5.42'de görebiliyoruz.



Şekil 5.42 : Dalgaboyu ve grafen uzunluğuna bağlı olarak tekli ommatidyum yapıda oluşan grafen soğurumu.

Şekil 5.42'nin sağ tarafında kullanılan bar bize soğurumun yüzdesini %0-%40 arasında vermektedir. Beklenildiği gibi grafen malzemesinin boyu 100 $\mu$ m'den 700 $\mu$ m'ye çıktıkça soğurum artmaktadır. Orta kızılötesi dalga boylarında daha etkili soğurumlar oluşmaktadır.

### 5.8.10 Diğer çalışmalar

Bu bölüme kadar bal arısının gözünün ommatidyumunda, orta ve uzak kızılötesi elektromanyetik dalga yayılımlarını, bu yayılımlarda gelen enerjinin ne kadarının yansıdığını, ne kadarının iletildiğini, gelen dalga boyuna bağlı olarak odak noktalarındaki konum farklılıklarını ve kullanılan programdaki işlemci hızının veya tasarımın çözünürlüğünün önemini inceledik. Bu incelemeler sayesinde, doğadan esinlenmiş göz yapıları kullanılarak özgün bir kızılötesi dedektör tasarlanabileceğine

karar verdik. Literatürde, bu tarz çalışmalar çoğunlukla ışın analizlerinde yer verilmektedir. Işın analizlerine yer verildiği için gücün transferi hakkında veya odak konum değişiklikleri hakkında gelen dalga boyuna göre yapı içinde oluşan aydınlık karanlık desenler ve dalganın ilerleyişi hakkında bilgi sahibi olunamamıştır.

Literatürde bileşik göz yapısına benzer mikro-lens dizilimine sahip pek çok çalışma vardır. Bu çalışmalarda bal arısından farklı canlıların görmesi incelenmiş ve ışın analizleriyle çözüme gidilmiştir. Yapay algılayıcılar ve kamera örnekleri üretilmiştir.

Benzer başka çalışmalarda, bileşik göz yapılarında çözünürlüğün (netliğin) daha önemli olduğu araştırmalara yer verilmiştir ancak bizim çalışmamızda netlikten ziyade orta veya uzak kızılötesi dalga boylarını hızlı bir şekilde algılama yapabilecek bir dedektör tasarımı yapılabilmesi önemlidir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, bal arılarının bileşik göz yapılarında, ommatidyumların içinde dalganın nasıl ilerlediğini göstermek, girişim desenlerinin nerelerde oluştuğunu belirlemek, enerjiyi ne kadar iletip yansıttığını bulmak, dalga analizi programlarıyla ve FDTD yöntemiyle tasarlamak, çözümlenmek olağan üstü fırsatlar sundu. Kızılötesi algılama askeri ve sivil uygulamalarda büyük önem arz etmektedir. Uzun zamandır ihmal edilen makro yapıların dalga analizi sayesinde dedektör teknolojisine uygulanabilirliğini göstermiş olduk. Dalga analiziyle ışığın enerjisinin yapı içinde nasıl odaklandığını, sınır koşulları ve ara yüzlerle nasıl etkileşime girdiğini ortaya çıkardık. Bir bölgenin geometrisi değiştiğinde olacak etkinin analizi yapılabildi. Dalga analizi bizlere özetle, ışığın yapıdaki (bal arısı bileşik gözü) iletimi, yansıması, enerji transferi ve değişimi hakkında bilgi verdi. Rabdom kısmına yerleştirilen grafen malzemeyle birlikte çıkan verimlilik, doğadaki makro göz yapılarının daha kompakt ve üretilebilir dedektör yapılarına dönüştürülmesi hakkındaki gelecek çalışmalarımıza ışık tuttu.





## KAYNAKLAR

- [1] **Karthus, O.**, (2012). *Biomimetics in photonics*, Taylor & Francis.
- [2] **Large, M. (Ed.)**, (2012). *Optical biomimetics: materials and applications*, Elsevier.
- [3] **Teichman, J., Holzer, J., Balko, B., Fisher, B., & Buckley, L.**, (2013). *Gradient index optics at DARPA* (No.IDA-D-5027), Institute For Defense Analyses Alexandria Va.
- [4] **Varela, F. G., & Wiitanen, W.**, (1970). The optics of the compound eye of the honeybee (Apismellifera), *The Journal of general physiology*, 55(3), 336-358.
- [5] **Taflove, A., & Hagness, S. C.**, (2000). Computational Electrodynamics: the FDTD method, *Artech House Boston, London*.
- [6] **Rogalski, A., & Chrzanowski, K.**, (2014). Infrared Devices and techniques (revision), *Metrology and Measurement Systems*, 21(4), 565-618.
- [7] **Floreano, D., Pericet-Camara, R., Violett, S., Ruffier, F., Brückner, A., Leitel, R., Dobrzynski, M. K.**, (2013). Miniature curved artificial compound eyes, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23), 9267-9272.
- [8] **Song, Y. M., Xie, Y., Malyarchuk, V., Xiao, J., Jung, I., Choi, K. J., Li, R.**, (2013). Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye, *Nature*, 497(7447), 95-99.
- [9] **Dobrzynski, M. K., Pericet-Camara, R., & Floreano, D.**, (2012). Vision Tape - A flexible compound vision sensor for motion detection and proximity estimation, *IEEE Sensors Journal*, 12(5), 1131-1139.
- [10] **Franz, M. O., & Krapp, H. G.**, (2000). Wide-field, motion-sensitive neurons and matched filters for optic flow fields, *Biological cybernetics*, 83(3), 185-197.
- [11] **Land, M. F., & Nilsson, D. E.**, (2002). Oxford Animal Biology Series, Animal eyes.
- [12] **Duparré, J. W., & Wippermann, F. C.**, (2006). Micro-optical artificial compound eyes, *Bioinspiration & biomimetics*, 1(1), R1

- [13] **Land, M. F.**, (1980). Compound eyes: old and new optical mechanisms.
- [14] **Exner, S.**, (1891). *Die Physiologie der facettirten Augen von Krebsen und Insecten: eine Studie*, Franz Deuticke.
- [15] (**Chippis-Walton, L.**, (2011). Horseshoe Crab - What I Learned Teaching with the Program Sea-to-See at FSU, <<http://thesymbiont.blogspot.com.tr/2011/04/horseshoe-crab-what-i-learned-teaching.html>> alındığı tarih 12.02.2017
- [16] **Merchand, E.**, (2012). *Gradient index optics*, Elsevier.
- [17] **Kim, J.**, (2014). Absorption-assisted mode transformation in butterfly compound eyes, *Scientific reports*, 4.
- [18] **Atkinson, R. J. A., & Naylor, E.**, (1976). An endogenous activity rhythm and the rhythmicity of catches of *Nephrops norvegicus* (L), *Journal of Experimental marine Biology and ecology*, 25(1), 95-108.
- [19] **Brindley, G. S.**, (1960). Physiology of the retina and the visual pathway.
- [20] **Kirschfeld, K.**, (1976). The resolution of lens and compound eyes, In *Neural principles in vision* (pp. 354-370), Springer Berlin Heidelberg.
- [21] **Carter, W. H.**, (1985). *Applications of Compound Eye Configurations to Smart Sensor Design* (No. NRL-MR-5480), NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC.
- [22] **Chapman, R. F.**, (1998). *The insects: structure and function*, Cambridge university press.
- [23] **Laughlin, S. B., Menzel, R., & Snyder, A. W.**, (1975). Membranes, dichroism and receptor sensitivity, In *photoreceptor optics* (pp. 237-259), Springer Berlin Heidelberg.
- [24] **Eyes, C.**, (2017). *Curved Artificial Compound Eyes* LIS. Lis.epfl.ch. <<http://lis.epfl.ch/curvace>> alındığı tarih 12.02.2017
- [25] **Srinivasan, M. V., Poteser, M., & Kral, K.**, (1999). Motion detection in insect orientation and navigation, *Vision research*, 39(16), 2749-2766. Ağustos 1999.
- [26] **Dudley, R.**, (2002). *The biomechanics of insect flight: form, function, evolution*, Princeton University Press.
- [27] **Harrison, R. R.**, (2000). *An analog VLSI motion sensor based on the fly visual system* (Doctoral dissertation, California Institute of Technology).
- [28] **Zufferey, J. C.**, (2008). *Bio-inspired flying robots: experimental synthesis of autonomous indoor flyers*, CRC Press.

- [29] **Zufferey, J. C., Klapotocz, A., Beyeler, A., Nicoud, J. D., & Floreano, D.,** (2007). A 10-gram vision-based flying robot, *Advanced Robotics*, 21(14), 1671-1684.
- [30] **Ruffier, F., & Franceschini, N.,** (2004, April). Visually guided micro-aerial vehicle: automatic take off, terrain following, landing and wind reaction, In *Robotics and Automation, 2004, Proceedings, ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on* (Vol. 3, pp. 2339-2346). IEEE.
- [31] **Hassenstein, B., & Reichardt, W.,** (1956). Systemtheoretische analyse der zeit, reihenfolgen- und vorzeichenbewertung bei der bewegungsperzeption des rüsselkäfers *chlorophanus*, *Zeitschrift für Naturforschung B*, 11(9-10), 513-524.
- [32] **Land, M. F.,** (1988). The optics of animal eyes, *Contemporary Physics*, 29(5), 435-455.
- [33] **Land, M. F.,** (1978). Animal eyes with mirror optics, *Scientific American*, 239, 126-134.
- [34] **Land, M. F.,** (2000). Eyes with mirror optics, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2(6), R44.
- [35] **Snyder, A. W., Stavenga, D. G., & Laughlin, S. B.,** (1977). Spatial information capacity of compound eyes, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 116(2), 183-207.
- [36] **Völkel, R., Eisner, M., & Weible, K. J.,** (2003). Miniaturized imaging systems, *Microelectronic Engineering*, 67, 461-472.
- [37] **Horridge, G. A.,** (1980). Review lecture: Apposition eyes of large diurnal insects as organs adapted to seeing, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 207(1168), 287-309.
- [38] **Götz, K. G.,** (1965). The optical transfer properties of the complex eyes of *Drosophila*, *Kybernetik*, 2(5), 215.
- [39] FocusAgency <<http://www.focus-fen.net>> alındığı tarih: 16.04.2017
- [40] **Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R., & Galeb, R.,** (2000). *Optical system design* (pp. 61-95), New York: McGraw Hill.
- [41] **Snyder, A. W.,** (1979). Physics of vision in compound eyes, In *Comparative Physiology and Evolution of Vision in Invertebrates* (pp. 225-313), Springer Berlin Heidelberg.

- [42] **Snyder, A. W.**,(1977). Acuity of compound eyes: physical limitations and design, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 116(2), 161-182.
- [43] **Horridge, G. A.**, (1975). Compound eye and vision of insects, In *International Congress of Entomology, Canberra, 1972.* Clarendon Press.
- [44] **Horridge, G. A.**, (1978). The separation of visual axes in apposition compound eyes, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 285(1003), 1-59.
- [45] **Goodman, J. W.**, (1968). Introduction to Fourier Optics.
- [46] **Duparré, J., Dannberg, P., Schreiber, P., Bräuer, A., & Tünnermann, A.**, (2005). Thin compound-eye camera, *Applied optics*, 44(15), 2949-2956.
- [47] **Land, M. F.**, (1989). Variations in the structure and design of compound eyes, In *Facets of vision* (pp. 90-111). Springer Berlin Heidelberg.
- [48] **Horridge, G. A.**, (1977). The compound eye of insects, *Scientific American*, 237, 108-120.
- [49] **Warrant, E. J., & McIntyre, P. D.**, (1991). Strategies for retinal design in arthropod eyes of low F-number, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 168(4), 499-512.
- [50] **Horridge, G. A., Mimura, K., & Hardie, R. C.**, (1976). Fly photoreceptors. III. Angular sensitivity as a function of wavelength and the limits of resolution. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 194(1115), 151-177.
- [51] **Barlow, H. B.**, (1952). The size of ommatidia in apposition eyes, *Journal of Experimental Biology*, 29(4), 667-674.
- [52] <<http://www.opthobook.com/photos/compound-eye-image>> alındığı tarih:12.02.2017
- [53] **Wehner, R.**, (1981). Spatial vision in arthropods, *Handbook of sensory physiology*.
- [54] **Naumann, H., & Schröder, G.**, (1983). Bauelemente der Optik, Taschenbuch fuer Konstrukteure. *Muenchen: Hanser, 1983, 4th ed.*

- [55] **Wehner, R., & Srinivasan, M. V.**, (1984). world as the insect sees it, In *Symposia of the Royal Entomological Society of London*.
- [56] **Halford, C. E.**, (1995). Design and analysis of apposition compound eye optical sensors, *Optical Engineering*, 34(1), 222-235.
- [57] **Kirschfeld, K.**, (1974). The absolute sensitivity of lens and compound eyes, *Zeitschrift für Naturforschung C*, 29(9-10), 592-596.
- [58] **McIntyre, P., & Caveney, S.**, (1985). Graded-index optics are matched to optical geometry in the superposition eyes of scarab beetles, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 311(1149), 237-269
- [59] **Land, M. F., Burton, F. A., & Meyer-Rochow, V. B.**, (1979). The optical geometry of euphausiid eyes, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 130(1), 49-62.
- [60] **Warrant, E. J., & McIntyre, P. D.**, (1990). Limitations to resolution in superposition eyes, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 167(6), 785-803.
- [61] **Navarro, R., & Franceschini, N.**, (1998). On image quality of microlens arrays in diurnal superposition eyes, *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 7(6), L69.
- [62] **Carricaburu, P.**, (1975). Examination of the classical optics of ideal apposition and superposition eyes, *The compound eye and vision of insects* (ed. GA Horridge), 236-254.
- [63] <http://www.opticsforhire.com/blog/2015/7/15/design-of-ir-lenses> alindig tarih:16.04.2017
- [64] **Rogalski, A.**, (2002). Infrared detectors: an overview, *Infrared Physics & Technology*, 43(3), 187-210.
- [65] **Rogalski, A.**, (2000). Infrared Detectors, *Electrocomponent Science Monographs*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- [66] **Wood, R. A.**, (2001). Uncooled microbolometer infrared sensor arrays, In *Infrared detectors and emitters: materials and devices* (pp. 149-175). Springer US.
- [67] **Stratton, J. A.**, (2007). *Electromagnetic theory*. John Wiley & Sons.

- [68] **Varela, F. G., & Porter, K. R.** (1969). Fine structure of the visual system of the honeybee (*Apis mellifera*): I. The retina, *Journal of ultrastructure research*, 29(3-4), 236-259.
- [69] **Imms, A. D.**, (1939). *The Principles of Insect Physiology*.
- [70] **Van de Hulst, H. C., & Twersky, V.**, (1957). Light scattering by small particles, *Physics Today*, 10(12), 28-30.
- [71] **Kelber, A., Jonsson, F., Wallén, R., Warrant, E., Kornfeldt, T., & Baird, E.**, (2011). Hornets can fly at night without obvious adaptations of eyes and ocelli, *PloS one*, 6(7), e21892.
- [72] **Tanaka, G., Parker, A. R., Siveter, D. J., Maeda, H., & Furutani, M.**, (2009). An exceptionally well-preserved Eocene dolichopodid fly eye: function and evolutionary significance, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 276(1659), 1015-1019.
- [73] **Seitz, G.**, (1968). Der Strahlengang im Appositionsauge von *Calliphora erythrocephala* (Meig.), *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 59(2), 205-231.
- [74] **Hecht, S., & Wolf, E.**, (1929). The visual acuity of the honey bee, *The Journal of general physiology*, 12(6), 727-760.
- [75] **Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M.**, (1963). *The Feynman Lecture on Physics*, Addison, Reading.
- [76] **Born, M., & Wolf, E.**, (1965). *Principles of optics*, Pergamon Press, New York.
- [77] **Snitzer, E.**, (1961). Cylindrical dielectric waveguide modes, *JOSA*, 51(5), 491-498.
- [78] **Rister, J., Desplan, C., & Vasilias, D.**, (2013). Establishing and maintaining gene expression patterns: insights from sensory receptor patterning, *development*, 140(3), 493-503.
- [79] **Snitzer, E., & Osterberg, H.**, (1961). Observed dielectric waveguide modes in the visible spectrum, *JOSA*, 51(5), 499-505.
- [80] **Gosciniak, J., & Tan, D. T.**, (2013). Theoretical investigation of graphene-based photonic modulators, *scientific reports*, 3, 1897.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Takiyettin Oytun KILINÇ  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 05.09.1987, Ankara  
**E-posta** : oytunkilinc@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Optik Fotonik

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2013	Roketsan A.Ş.	Mühendis
2012	Ankara Üniversitesi (Bölüm Birincilik Ödülü)	
2011	TAI	Stajyer
2011	STM A.Ş	Stajyer

**YABANCI DİL:** İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kilinc, T.O.,** Hayran, Z., Kurt, H., 2017. Wave study of compound eyes for efficient infrared detection, SPIE Optics and Photonics: Optical Engineering and Applications, August 6-10, San Diego, California, United States. (Accepted)

- **Kilinc, T.O.**, Hayran, Z., Kurt, H., 2017. Wave analysis of bio-inspired eye structures for infrared detection, 17th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), July 24-28, Copenhagen, Denmark. (Accepted)

#### **DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- Yilmaz, Y.A., Hayran, Z., Yildiz, F., **Kilinc, T.O.**, Karabacak, C., Bor, E., Kurt, H., 2017. Guided-mode resonance based multicolor germanium infrared photodetector, 17th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), July 24-28, Copenhagen, Denmark. (Accepted)

