

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİFRAKTİF LENSLERİN MİNİMUM VERİM LİMİTLERİNİ
BELİRLEYEN YAZILIMIN GELİŞTİRİLMESİ**

TANER KARATEKE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MURAT ÇALIŞKAN**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİFRAKTİF LENSLEİN MİNİMUM VERİM LİMİTLERİNİ
BELİRLEYEN YAZILIMIN GELİŞTİRİLMESİ

Taner KARATEKE tarafından hazırlanan tez çalışması 11.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Murat ÇALIŞKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Murat ÇALIŞKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Merih SERİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Saffettin YILDIRIM
İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışma ile bazı detektör ve sensör tiplerinde sensörün algılama fonksiyonunu gerçekleştiren difraktif lens elemanlarının maksimum ve minimum verim limitlerini belirleyen parametrelerin belirlenmesi ve buna bağlı olarak lens tasarımının yapılması hedeflenmiştir.

PIR (Piroelektrik Infrared) olarakta bilinen varlık algılama sensörü ve CO_2 algılama sensörü olarak bilinen infrared tipi sensörlerin algılama sistemlerinin optik kısımlarının, cismin radyasyon özellikleri ve cisim sensör arasındaki optiksel etkileşimi gelen ışının geometrik özelliklerine göre değerlendiren katı açı konusu ve sensöre gelen elektromanyetik dalganın herhangi bir dalgaboyundaki ışığın ölçülmesi için fotometre hakkında literatür olarak teoriksel bilgi derlenmiş ve sensör sisteminin optiksel yol tasarımını etkileyecek olan spektral parametreler hakkında da çalışmalar yapılmıştır. Burada özellikle PIR sensör de kullanılan ve bir çeşit DOE (Diffractive Optical Elementes) elemanı olan Fresnel lensler hakkında difraktif optik konusu altında detaylı bir şekilde teorik olarak literatür çalışması yapılmıştır. Elde edilen bilgi ve sonuçlar kapsamında tasarım için geliştirilen yazılım kullanılarak sensörün optik yolunun algılama verimini etkileyen parametreler optimizasyon amacıyla belirlenmiş ve kırınım verimini etkileyen minimum limitleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca her daim bana yol gösteren ve çalışmalarımda her daim yanımda olan ve yardımını esirgemeyen, değerli hocam Doç. Dr. Murat ÇALIŞKAN'a teşekkür ediyorum.

Bu zorlu eğitim hayatım boyunca bana her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her daim yanımda olan ve anlayışlarını eksiltmeyen değerli Babam, Annem, Ablam ve Kardeşime teşekkürlerimi sunarım...

Çalışmalarımda bana her daim ve her koşulda yardım eden, yanımda olan ve katkı sunan, değerli eşim Şebnem KARATEKE' ye minnettar olduğumu kendime bir borç bilirim.

Haziran, 2019

Taner KARATEKE

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT.....	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	
KAYNAĞIN RADYASYON ÖZELLİKLERİ	5
2.1 Cismin Radyasyon Özellikleri	5
2.1.1 Karacisim Işıması	5
2.1.2 Planck Yasası	7
2.2 Cismin Fotometrik ve Radyometrik Özellikleri	12
2.2.1 Radyometre	12
2.2.2 Işınır Enerji	12
2.2.3 Spektral Işınır Enerji	13
2.2.4 Işınır Akı (Işınır Güç)	13
2.2.5 Spektral Işınır Akı (Spektral Işınır Güç).....	13
2.2.6 Işınır Akı Yoğunluğu (Parlama Ve Işınır Yayılma)	14
2.2.7 Spektral Işınır Akı Yoğunluğu	15
2.2.8 Işıma.....	15

2.2.9	Spektral Işıma.....	16
2.2.10	Parlamanın Şiddeti.....	16
2.2.11	Fotometre.....	18
2.2.12	Aydınlık Şiddeti	19

BÖLÜM 3

CİSİM SENSÖR ARASI OPTİKSEL ETKİLEŞİM.....	20
--	----

3.1	Fotometrik Temeller	20
3.1.1	Katı Açı Tanımı	20
3.1.2	Katı Açı Hesaplama	21
3.1.2.1	Dik Dairesel Koni	21
3.1.2.2	Keyfi Alanlar	24
3.1.2.3	Uzakta Merkezi Dairesel Alan	26
3.1.2.4	Uzayda Keyfi Olarak Bulunan Üçgen Alan.....	28
3.1.2.5	Dikdörtgen Alan	29
3.2	Temel Fotometri Yasaları.....	29
3.2.1	Tanım	29
3.2.2	Hesaplama Yöntemi ve Yasalar.....	38
3.2.2.1	İzdüşürülmüş Katı Açı.....	38
3.2.2.2	Alan Elemanı Ve Disk.....	39
3.2.2.3	Vinyet Durumunda Cisim-Sensör Arasındaki Akının Hesaplanması.....	41
3.2.2.4	İki Paralel Vinyet.....	42
3.2.2.5	Alan Elemanı Ve Dikdörtgen Alan	43
3.2.3	İzdüşürülmüş Katı Açının Numerik Çözümü.....	45

BÖLÜM 4

SENSÖR OPTİĞİ	49
---------------------	----

4.1	Difraktif Optiğin Temeli	49
4.1.1	Dalga Yayılımı Olarak Işığın Davranışı	49
4.1.2	Kırılmadan Kırınıma Geçişin Tanımı	54
4.2	Difraktif optiksel elemanlar	57
4.2.1	Fresnel Lensler	57
4.2.2	Difraktif Optiksel Elemanların İçeriği ve Çeşitleri	59
4.2.2.1	Geniş Band Difraktif Optiksel Elemanlar	61
4.2.2.2	İnterferogram Tipi Difraktif Optiksel Elemanlar	61
4.2.3	Hibrit Lensler.....	62
4.2.4	Lens Dizaynının Temeli	63
4.2.4.1	Optiksel Sistemin Tasarımı.....	64
4.3	Klasik Lens Denklemleri	66
4.4	Abbe Sayısı Ve Renk Sapması	67
4.4.1	Renk Sapmasının Düzeltilmesi	70
4.5	Difraktif Lens Dizaynı	72
4.5.1	Faz Profili.....	72
4.5.2	Tek Optiksel Eleman Tasarımı Oluşturma.....	73

4.5.2.1	Kinoform Lensin Tasarımı.....	74
4.5.3	Difraktif Lenslerin Verimi	75
4.5.3.1	Çok Düzeyli Difraktif Lenslerin Verimi.....	76
4.5.3.2	Farklı Dalgaboylarında Difraktif Lenslerin Verimi	78
4.5.4	Hibrit Optiksel Elemanlar	80
4.5.4.1	Difraktif Yüzeyle Renk Sapmasını Düzeltme	82
4.5.5	Kuartz Camda Difraktif Yüzey	85
4.5.6	Refraktif Ve Difraktif Yüzeyleri Birleştirmek	88
4.6	Kırınım Izgarası.....	90
4.6.1	Temel Izgara Parametreleri	91
4.6.1.1	Açısal Kırınım Dispersiyonu	91
4.6.1.2	Lineer Izgara Dağılımı	92
4.6.1.3	Izgara Çözme Gücü.....	92
4.6.1.4	Serbest Spektral Aralık	92
4.6.2	İkili Izgaralar	93
4.6.2.1	İkili Genlik Izgara İçin Kırınım Verimliliğinin Hesaplanması	94
4.6.3	Çok Seviyeli Izgaralar	95
BÖLÜM 5		
VERİM LİMİTLERİNİ BELİRLEYEN OPTİK YAZILIMIN TASARIMI		97
5.1	Bir Difraktif Lens İçin Verimin Tek Boyutlu Optik Eksen Boyunca Verimin Maksimum ve Minimum Olduğu Uzaklıkları Belirleyen Program	97
5.1.1	Paket Program Tasarımın Temelini Oluşturan Teorik Model	97
5.1.2	Matematiksel Modele Dayalı Yazılan Paket Program ve Kod Satırlarının Açıklanması.....	102
5.2	Belirli Lens Malzeme İndisleri Kullanılarak Paket Yazılım ile Minimum Verim Limitlerini Belirleyen Uzaklıkların Elde Edilmesi ve Karşılaştırılması	105
5.3	Her Bir Lens Malzemesi İçin Dalgaboyu Değerleri İçin Geliştirilen Yazılım ile Minimum Verim Limitlerini Belirleyen Uzaklıkların Elde Edilmesi ve Karşılaştırılması.....	117
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		142
KAYNAKLAR		144
ÖZGEÇMİŞ		147

SİMGE LİSTESİ

A_{cc}	Dik Dairesel Koni Kürenin Alanı
A_s	Küre Yüzeyi
$\Delta A_{2,j}$	Alan Elemanı
C_1, C_2	Alan Sınır Eğrileri
E_v	Konum Fonksiyonu
E_λ	Spektral Işınım
E_λ	Spektral Parlaklık
I_0	Radyasyon Şiddeti
I_λ	Spektral Yoğunluk
I	Parlama Şiddeti
K_r	Radyasyon Parlama Tesiri
K_s	Aydınlatma Sisteminin Parlama Tesiri
$L_{bb\lambda}$	Spektral Parlaklık
L_λ	Lambert Yüzeyi
L_λ	Spektral Işıma
L_λ	Spektral Parlama
M_{BB}	Radyant Akı Yoğunluğu
M_{bb}	Radyant Akı
$M_{bb\lambda}$	Spektral Işınım Gücü
M_λ	Spektral Işınır Yayılma
P_e	Sisteme Giren Toplam Güç
Q_v	Fotometrik Miktar
Q_λ	Spektral Işınır Enerji
R_o	Yarıçap
R_v	Voltaj Duyarlılığı
dA_1	Diferansiyel Alan Elamanları
$e_{A,1i}$	Alan Elemanı Yüzey Normali
n_0	Hava Ortamının Kırılma İndisi
n_1	Filmin Kırılma İndisi
n_{sub}	Substrat İndisi
$^{\circ}C$	Celsius
c	Işık hızı
d	Kaynaktan Yüzey Elemanına Olan Uzaklık
dA	Diferansiyel Alan
dw	Diferansiyel Katı Açısı
$d\Omega$	Diferansiyel Katı Açısı

dI	Diferansiyel Şiddet
E	Işınır Akı yoğunluğu (Parlama)
F	Form Faktörü
h	Planck Sabiti
h	Yükseklik
k	Boltzmann Sabiti
K	Kelvin
L	Lambertian Yüzeyi
L	Parlaklık
M	Işınır Yayılma
η	Radyant Verim
n	Yüzey Normali
Q	Işınır Enerji
r	Yarıçap
σ	Stefan-Boltzmann Sabiti
T	Sıcaklık
t	Zaman
V_{out}	Sensör Çıkış Voltajı
W	İzdüşürülmüş Katı Açısı
λ	Dalga boyu
ϕ	Işınır Akı
ϕ	Radyant Akı
ϕ_v	Sistem Tarafından Üretilen toplam Parlama Akısı
ϕ_λ	Spektral Işınır Akı
ϕ_λ	Spektral Radyant Akı
Ω	Katı Açısı
Ω°	Sabit Sayı
Ω_{CC}	Dik Dairesel Koni için Katı Açısı
Ω_{DE}	Küresel Üçgen için Katı Açısı
Ω_{HS}	Yarım Küre için Katı Açısı
Ω_{RE}	Dikdörtgensel Alan için Katı Açısı

KISALTMA LİSTESİ

CAD	Computer Aided Design
CD	Compact Disc
CIE	Uluslararası Aydınlanma Komisyonu
DOE	Diffraction Optical Elements
DOE	Difraktif Optiksel Elemanlar
DVD	Digital Video Disk
EFL	Efektif Odak Uzunluğu
FOV	Field Of View
I-P	İnç-Pound
OPD	Optiksel Yol Farkı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Lambert Yüzeyi (n yüzey normali.) 7
Şekil 2.2	300 den 20,000K'ya olan sıcaklık değişimlerinde denklem 2.7 ile hesaplanmış, karacisimler için ışıınım gücü spektrumu..... 10
Şekil 2.3	6,000 K'de denklem 2.7 ile hesaplanmış bir karacismin ışıınım gücü spektrumu 10
Şekil 2.4	Dünyadışı güneş spektrumu ve 6,000K ölçeklenmiş karacisim spektrumu 11
Şekil 2.5	23.9 °C'de karacismin ışıma spektrumu 12
Şekil 2.6	a) Parlama b) Işınır Yayılma 14
Şekil 2.7	Bir yüzeyi kesen bir ışık ışıını 16
Şekil 2.8	a) Yüzey normaline θ açısında gelen ışık b) Yüzey normalinden θ açısıyla ayrılan ışık..... 16
Şekil 2.9	Nokta kaynak için ters kare yasası 17
Şekil 2.10	CIE fotometrik eğri..... 18
Şekil 3.1	Katı Açı Tanımı 20
Şekil 3.2	Dik Dairesel Koni 22
Şekil 3.3	Keyfi bir A alanına ait katı açısı..... 24
Şekil 3.4	Yarım küre için katı açısı ifadesi..... 25
Şekil 3.5	Herhangi koordinatlara sahip orijin için vektörler 25
Şekil 3.6	Uzaklık Vektörü İle Merkezi Dairesel Alan..... 26
Şekil 3.7	Birim küre uzayında bulunan keyfi bir üçgenin izdüşümü..... 28
Şekil 3.8	Dikdörtgensel Alanının Pozisyonu 29
Şekil 3.9	LAMBERT'in kosinüs yasası için geometrik düzenleme (a) İkincil-alıcı düzenleme (b) Birim küre üzerinde döndürülmüş ikincil alıcı düzenlemesi (c) İkincil yayıcı düzenleme..... 30
Şekil 3.10	β_1 açısı kadar döndürmeden dolayı şiddetteki değişim 32
Şekil 3.11	LAMBERTIAN yüzeyi üzerinde ideal dağıtıcı yansıma 32

Şekil 3.12	Geometrik değişkenlerin tanımı. $dA1$, $dA2$ alan elemanları; r alan elemanlar arasındaki uzaklık; $\beta1, \beta2$ alan elemanları ve uzaklık vektörü arasındaki açılar	33
Şekil 3.13	Siyah cisimdeki geometrik değişkenler	35
Şekil 3.14	Sensör elemanında geometrik değişkenler	37
Şekil 3.15	$dA1$ alan elemanı ve bir disk ile düzenleme.....	39
Şekil 3.16	Bir alan elemanının izdüşürülmüş katı açısı.....	40
Şekil 3.17	Belirli uzaklıklarda $dA1$ kaynak alanının $dA2$ nesne alanı üzerinden geçen akının hesaplanması	42
Şekil 3.18	Bir eksen üzerindeki iki paralel disk	42
Şekil 3.19	İzdüşürülmüş katı açısı.....	43
Şekil 3.20	Bir Alan Elemanı $dA1$ Ve Dikdörtgen Alanın Düzenlenmesi	44
Şekil 3.21	Bir dikdörtgen yada yuvarlak alana ait alan elemanının izdüşürülmüş katı açısı	45
Şekil 3.22	İzdüşürülmüş katı açının hesaplanmasının gösterimi	46
Şekil 4.1	Bir yarığa doğru dalga cephesi yayılımının Huygens Yapısı	50
Şekil 4.2	Fresnel Bölgeleri.....	51
Şekil 4.3	Fresnel Plakaları. (a) Fresnel Bölge Plakaları.(b) Üç tek sayılı bölgelerde fazör katkısı. (c) Fresnel faz plakası. (d) Fresnel faz plakasının merkezine doğru profil	52
Şekil 4.4	Çok seviyeli yapılar için geçişleri oluşturmak için profilin kırılma yapıları. İki seviyeli Fresnel faz plaka arasında değişen bir difraktif lens profili ve bir kinoform profilindeki dört-seviye ve sekiz-seviye yapılar.....	53
Şekil 4.5	Işığın ikili doğası	54
Şekil 4.6	Kırılımin Snell Yasası Ve Işığın Bükülmesine Sebep Olan Izgara Denklemi	55
Şekil 4.7	Parlatılmış ızgara ve mikro prizma dizi yapısı	56
Şekil 4.8	Yerel mikro prizmaların etkisi ve global ızgara etkisi	57
Şekil 4.9	Bir Lens ile görüntüleme ya ışın demetlerinin yönlendirmesi ya da bir nesne noktasından uzaklaşan küresel dalga cephesinin birleşmesi olarak temsil edilebilir.....	58
Şekil 4.10	Bir Plano-Konveks Lensten Fresnel Lens Üretimi.Lensin Yüzey Profili Lensin Hacmi Azalırken Korunur	58
Şekil 4.11	İlk küresel olmayan faz profilinden difraktif optiksel eleman saçakları ...	60
Şekil 4.12	Fresnel lens (Fresnel bölge plakası)	60
Şekil 4.13	Aynı faz profilinden üretilen dar bant ve geniş bant difraktif lensler	61
Şekil 4.14	Hibrit difraktif/refraktif singletlerle tekleştirme.....	63
Şekil 4.15	Lens dizayn süreci	64

Şekil 4.16	Bir optiksel sistemin tanımı onun çevresinden ve lens yönergesinden oluşur. Bir ışın iz programı bu tanımlamaya dayalı bir çözüm belirler	65
Şekil 4.17	Farklı f-sayıları ile lenslerin karşılaştırılması.....	65
Şekil 4.18	Kalın bir lensin parametreleri	66
Şekil 4.19	Bir cam için dispersiyon eğrisi. Dalga boyları dispersiyonun miktarını ölçülmesi için yararlı olan özel dalgaboyunu temsil eden eğri üzerinde F, d ve C olarak etiketlenir	68
Şekil 4.20	Tek bir lensin renk sapması	70
Şekil 4.21	Renk sapmasının düzeltilmesi	71
Şekil 4.22	Difraktif lens için geçiş yerini belirlemek için kullanılan geometri.....	73
Şekil 4.23	Difraktif Lensten Işığın Dağılımı.	76
Şekil 4.24	%100 Verimle Difraktif Lensin Düzgün Profili (kinoform) Dört-Seviye Yaklaşımı	76
Şekil 4.25	Çeşitli Difraksiyon Sıraları İçin 633 nm'nin Tasarım Dalgaboyunun Fonksiyonu Olarak Difraktif Lensin Verimliliği	78
Şekil 4.26	Hibrit Difraktif/Refraktif Tekli Lenslerle Akromatikleştirme.....	81
Şekil 4.27	Hibrit lensin renk düzeltilmesi.....	83
Şekil 4.28	Küresel sapma ve enine rengin büyük miktarını gösteren stok plano-konveks lensin sapma eğrileri	85
Şekil 4.29	Kuartz kristalin bir tarafındaki diffraktif yüzeyi ile lens	87
Şekil 4.30	Izgaranın açısal dispersiyonu.....	91
Şekil 4.31	İkili kırınım ızgaraları.....	93
Şekil 4.32	İkili, Çok Seviyeli Ve Testere Yüzey-Kabartma Faz Izgaraları.....	95
Şekil 5.1	$n=1.74$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	106
Şekil 5.2	$n=1.67$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	108
Şekil 5.3	$n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	110
Şekil 5.4	$n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	111
Şekil 5.5	$n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	113
Şekil 5.6	$n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	114
Şekil 5.7	$\lambda=400$ nm, $f=1$ mm için indis değerleri verilen lenslerin minimum verim limitlerini belirleyen uzaklık noktalar kümesinin fonksiyonu	116
Şekil 5.8	$\lambda_1 = 300$ nm için $n=1.70$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	117

Şekil 5.9	$\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.70$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	119
Şekil 5.10	$\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.70$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	120
Şekil 5.11	$\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	122
Şekil 5.12	$\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	123
Şekil 5.13	$\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	124
Şekil 5.14	$\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	126
Şekil 5.15	$\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	127
Şekil 5.16	$\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği.....	128
Şekil 5.17	$\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği	130
Şekil 5.18	$\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği	131
Şekil 5.19	$\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği	132
Şekil 5.20	$\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği	134
Şekil 5.21	$\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği	135
Şekil 5.22	$\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği	136
Şekil 5.23	Yüksek İndis Plastik1 ($n=1.74$) için ($300 - 500 - 700 nm$) dalgaboyu değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Fonksiyon Grafiği	138
Şekil 5.24	Yüksek İndis Plastik2 ($n=1.60$) için ($300 - 500 - 700 nm$) Dalgaboyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği	139
Şekil 5.25	Trivex ($n=1.54$) için ($300 - 500 - 700 nm$) Dalgaboyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği	139

Şekil 5.26	CR-39 Plastik ($n=1.498$) için ($300 - 500 - 700 \text{ nm}$) Dalgaboyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği	140
Şekil 5.27	Mercek Camı ($n=1.523$) için ($300 - 500 - 700 \text{ nm}$) Dalga boyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği	140

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Seviye Sayısının Fonksiyonu Olarak Difraktif Elemanların Verimliliği	77
Çizelge 4.2 Oyuk Derinliğindeki Kesirli Hata Olarak Difraktif Elemanın Verimliliği..	80
Çizelge 4.3 Kuartz Lens İçin Değerler	84
Çizelge 4.4 Üç ticari optiksel dizayn programı için saf bir difraktif lens için faz katsayısı	88
Çizelge 4.5 Kaynaşmış Silika için Değerler	89
Çizelge 4.6 Difraktif polinomun katsayıları	89
Çizelge 5.1 Piyasada mevcut lenslerde kullanılan malzemelerin türü,kırılma indisi ve özellikleri	105

ÖZET

DİFRAKTİF LENSLERİN MİNİMUM VERİM LİMİTLERİNİ BELİRLEYEN YAZILIMIN GELİŞTİRİLMESİ

Taner KARATEKE

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Murat ÇALIŞKAN

Bu tezde özellikle bazı sensör ve detektör sistemlerinin algılama kısmında kullanılan difraktif lens elemanlarının tasarım parametrelerine bağlı olarak, maksimum ve minimum verim limitlerini belirleyen bir paket yazılımı yapılmıştır. Bu optik tasarım programının kullanılması ile optiksel elemanın tasarım parametreleri belirlenip, ilgili parametrelere bağlı olarak verim limitleri elde edilmiştir.

Sensör sistemlerinde algılanacak ya da tespit edilecek olan ilgili nesnenin radyasyon özellikleri önemlidir. Cismin yaymış olduğu elektromanyetik spektrumun algılanması ya da tespit edilmesi ve gereken ışık bölgesinin fiziksel ölçümü için radyometre ve fotometre hakkında literatür çalışması yapılmış olup, tezde tasarımı planlanan optiksel sistemin parametreleri ile ilişkisi tanımlanmıştır. Tasarımı planlanan optiksel sistemin cismin radyasyonunun geometrik optik ve açısal dağılımlarının incelenmesi bakımından katı açı konusu üzerinde çalışma yapılmıştır. Burada katı açı konusu, algılaması yapılacak olan sensörün görüş alanı ve cisimden gelen ışığın açısal dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Piroelektrik hibrit sensörlerinden hareket algılama sensör çeşidinin optiksel yolunda difraktif lensler kullanılır. Difraktif optiğin tanımı ve teoriksel alt yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Bununla birlikte, bu alanda kullanımı yaygın olan lensler ve ızgaraların temel çalışma prensibi, tipleri ve kullanım alanlarına da değinilmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında öncelikle difraktif lensler hakkında teorik olarak literatür çalışması yapılmıştır. Elde edilen bilgi sonucunda bu tip lens ya da ızgaraların üretim teknikleri konusunda literatür bilgisi derlenmiştir. Algılama sistemlerinde kullanılması planlanan lenslerin ve bu tip lenslerin minimum verim limitlerini belirleyen parametrelerin analizi için bir paket yazılım tasarımı yapılmıştır.

İlgili paket yazılım lens tasarımı yapılan merceğe kaynak ya da cisimden gelen ışık ışınlarının verimini minimum yapacak uzaklık değler kümesinin belirlenmesi ve buna göre ilgili mercede verimi etkileyen parametreler üzerinde optimizasyon yapılmasını sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Difraktif Lens Elemanı, Verim Limitleri, Radyometre, Fotometre, Katı Aç, Görüş Alanı, Difraktif Lens, Paket Yazılım Tasarımı

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE DETERMINING THE MINIMUM EFFICIENCY LIMITS OF DIFFRACTIVE LENSES

Taner KARATEKE

Department of Physics

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Murat ÇALIŞKAN

In this thesis, especially according to the design parameters of the diffractive lens elements used in the sensing part of some sensor and detector systems, a software package software which determines the maximum and minimum efficiency limits has been made. By using this optical design program, design parameters of optical element will be determined and yield limits will be obtained depending on related parameters.

The radiation properties of the respective object to be detected or detected in sensor systems are important.

For the detection of the electromagnetic spectrum emitted by the object and for the physical measurement of the required light region, a literature study has been done about the radiometer and photometer. In order to investigate the geometric optical and angular distributions of the radiation of the object of the optic system which is planned to be designed, a study on the solid angle has been done. Here, the subject of solid angle gives information about the field of view of the sensor to be sensed and the angular distribution of the light coming from the object. Piroelectric hybrid sensors utilize diffractive lenses in the optical path of the motion detection sensor type. Information about the definition and theoretical background of diffractive optics is given. However, the basic operating principle, types and application areas of lenses and grids are also mentioned.

As a result, in this thesis, firstly theoretical literature study about diffractive lenses was made. As a result of the information obtained, literature information about the production techniques of such lenses or grids has been compiled.

The software package design has been designed for the analysis of the parameters which determine the minimum efficiency limits of the lenses and the lenses that are planned to be used in detection systems.

The related software package will enable the lens to be projected to determine the set of distance values that will minimize the efficiency of the light rays coming from the source or the object and accordingly to optimize the parameters affecting the efficiency of the respective lens.

Key Words : Diffractive Lens Element, Efficiency Limits, Radiometer, Photometer, Solid Angle, Field of View, Diffractive Lens, Software Design Package

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Her cisim belirli bir sıcaklıkta radyasyon ışıması yapar. Tüm nesneleri oluşturan atom ve moleküllerin sıcaklığa bağlı olan ortalama kinetik enerjilerinin meydana getirmiş olduğu titreşim hareketinden dolayı elektrik yüklerinin ivmelenmiş hareketi ile cisim belirli bir spektral aralıkta ışıma yapacaktır. Bir nesnenin yüzeyinden yayılan toplam radyant akı Stefan-Boltzmann yasası ile ifade edilebilir. Stefan Boltzmann yasasına göre ideal yayıcı bir karacisim olmak zorundadır. Bu ideal cismin tanımına göre tüm yönlerde ve dalgaboylarında soğurma derecesi ($A=1$) ve yansıtma derecesi sıfır ise ($R=0$), cisim mükemmel bir soğurucu olup karacisim olarak adlandırılır.

Planck ışıması, belli bir termal dengede bulunan bir karacismin ışıma yoluyla yaydığı elektromanyetik radyasyonu ifade eder. Işıyan karacisim belirli bir elektromanyetik spektrumda spektral parlaklık ile ifade edilir ve bu duruma Planck'ın kara cisim spektral radyasyon yasası denir. Burada karacismin spektral ışıma gücüne geçiş yapılır çünkü karacisim mükemmel bir yayıcıdır. Farklı sıcaklıklardaki spektral ışıma gücü ile verilen karacismin hangi sıcaklıkta ve hangi dalgaboyunda yaptığı ışıma gücü en fazladır sorusunun yanıtına grafiksel olarak cevap verilebilir.

Her nesne belirli bir sıcaklıkta belirli bir spektrum aralığında ışıma yapar. Bu yüzden sensörün cismi algılaması için bir yayıcı olarak cismin ne kadar miktarda ışıma enerjisi, gücü ve ışıma akı yoğunluğu (parlama ya da ışıma yayılma) ve bu parametrelerin

dalgaboyuna bağılı olarak spektral tanımlamaları yapılmış olup, buna göre nesnenin ışıının değışkenleri verilen bu parametrelere göre belirlenmiştir [1-19].

Sensör ve cisim arasındaki ışıının enerjisi, gücü ve akı yoğunluğunun geometrik optiksel olarak etkisini incelemek için katı açı konusu detaylı bir şekilde incelenmiş ve çeşitli alanlar üzerindeki değıerleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Burada katı açı direkt olarak sensörün görüş alanı (FOV) durumunu da etkilemektedir.

Burada katı açı formülleri kullanılarak temel fotometre yasaları olan Lambert Kosinüs teoremi çıkarılmıştır. Alıcı-verici sistemini en iyi açıklayan bu yasa ile sensör-cisim arası optik sistemi de modellenmeye çalışılmıştır [20-22].

Kırılma yasaları kullanılarak kırınım yasaları için bir formül elde edilmiştir. Burada Huygens prensibi kullanılarak kırınımın en temel halinin tanımı yapılmaya çalışılmıştır. Daha sonra kendi dalga boyundan çok küçük bir yarıktan geçerken kırınımına uğrayan bir ışıık ışıını belirli bir uzaklıkta ve geliş doğrultusuna dik olan bir ekran üzerine düşürölürse bu durumda ekran üzerinde yarık-ekran uzaklığının yarımdalgaboyu uzaklıklarında ve artan uzaklıkla şiddeti azalan bir dairesel alan serisi görölür. Bu alan bölgelerine Fresnel Bölge Plakası denir ve bölgelere göre dizayn edilen lens türü ise Fresnel lenslerdir. Bir çeşit difraktif optiksel eleman olan Fresnel lens (DOE), aslında gelen ışıının ancak yarısı kadar olan miktarını odakta toplar ve bu yüzden toplayıcı amacıyla çok verimli bir lens olarak ikili-yapı halinde kullanılmaz. Bunun yerine kinoform yapıda dört-seviyeli ve sekiz-seviyeli yapılar kullanılır.

Burada normal bir ince lenste kırınımına uğrayan ışıık ışıını ile parlak ızgara tarafından oluşturulan kırılım açısının parlak ızgarada bulunan mikro kırıcı prizmaların bazı değışkenlerine bağılı olarak aynı kırılma indisine sahip olmasına rağmen kırılan açının aynı olmaması dikkat çekicidir. Yapılan araştırma sonucunda parlak ızgara yı oluşturan mikro düzeydeki kırıcı prizmaların oluk yüksekliğı olarak adlandırılan yükseklikleri, mikro prizmalarının (ızgara periyodu) periyodu, oluk açısı ve kırılma indisi gibi parametrelerin düzenlenmesi ile istenilen özellikte ve uygulama alanına bağılı olarak difraktif optiksel elemanlar (DOE) tasarımı yapılabilir.

Bir fresnel lens ile plano-konveks lens temelde her ikisinde odakta ışık toplama özelliğine sahiptir fakat Fresnel lense göre daha kalın olan plano-konveks lensin, kalınlık durumundan dolayı kırılan ışında sapmalar gözlenir. Bu durumdan kaynaklı oluşabilecek hataları en aza indirmek için Fresnel lensler kullanılabilir.

Difraktik optiksel elemanlarının analitik olarak ifade edilen faz profilleri çeşitli CAD programları aracılığıyla istenen uygulamaya bağlı olarak dizayn edilebilir. CAD programlarında kullanılan temelde üç analitik prosedür vardır: geleneksel faz denklemi, döner simetrik elemanlar ve döner olmayan simetrik elemanlardır. Difraktif elemanlar hem odak düzleminde (renk sapmalarını) ve hem de verimlilik değişimleri dalgaboyuna göre duyarlılık gösterir. Geniş bant difraktif optiksel elemanlar genel olarak; geniş bir dalgaboyu bandı üzerinde ya da tek dalgaboyunun önceden tespit edilmiş bir dizisi üzerinde difraktif elemanları optimize etmek mümkündür. İnterferogram tipi difraktif optiksel elemanların fiziksel girişim deseni şiddet dağılımı olmasına rağmen, elde edilen DOE interferogram tipi faz elemanı ile farklı açılarda olan iki dalga cephesinin girişim ve kırınım özelliklerini bir arada bulunduran ve bu özelliği ile kompleks lensler olan toroidal, koniksel ya da helikoidal gibi eksen dışı yapılara sahip lenslerde kullanılır. Fakat bu yapıların sinüzoidal faz profilinden dolayı kırınım verimliliği azalır.

Difraktif optiksel elemanlar mevcut optiksel işlevselliği genişletmek yada ek işlevsellik kazandırmak için en iyi kullanılan optiksel elemanlardır. Bir plano-konveks lens, farklı dalgaboylarında farklı kırılma indisi değerine sahip olacağından bu lense gelen kromatik ışık ışınları dalgaboylarına bağlı olarak farklı noktalarda odaklanacaktır. Örneğin; bir plano-konveks lense gelen RGB (Red-Green-Blue) ışık ışınları mercekten geçtikten sonra kısa dalgaboyu olan mavi ışık merceğe en yakın uzun dalgaboyu olan kırmızı ışık merceğe en uzakta odaklanacak şekilde ayrılmaya uğrar. Fakat spektral dispersiyonu bir merceğe göre daha az olan bir difraktif optiksel eleman ise kısa dalgaboyunu optik elemandan daha uzağa, uzun dalgaboyunu ise difraktif optiksel elemana daha yakın olacak şekilde odaklama yapar. Bu iki elemanın bu özelliği sayesinde kombine edilmiş bir refraktif/difraktif optiksel eleman ile akromatikleştirme (yani farklı renkte olan ışık ışınlarının aynı noktada odaklama) özelliği kazandırılmış olunur [23-38].

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı akıllı binalar için tasarımı planlanan çoklu fonksiyon detektörlerindeki optik filtre ve yol tasarımı için sistemin cisim-sensör sistemi olarak ele alınması ve buna göre optiksel etkileşimleri göz önüne alarak olası optik yol ve filtre tasarımı yapılmaya çalışılmıştır. Gelen radyasyonu algılayan sensörün optiksel elemanının verimini etkileyen parametreler belirlenmiş ve daha sonra bu parametrelere bağlı olarak sensörün maksimum ve minimum limitleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Burada cismin radyasyon özellikleri ve buna bağlı olarak ışıdır enerji, gücü ve akı gibi kavramları genel hatlarıyla incelenmiş ve sistemdeki optiksel etkileşiminin yeri belirlenmiştir. Cisim-sensör arasındaki optiksel etkileşimin verilen radyometrik ve fotometrik özelliklerin geometrik optik olarak incelenmesi için katı açısı konusu ayrıntılı ele alınmış ve elde edilen bu bilgi ile difraktif optik konusundaki uygulamaları kullanılmış ve böylece bir sensör için tasarımı planlanan DOE elemanının sensörün algılama verimini etkileyen optiksel özellikler baz alınarak tasarım parametresi olarak alınmıştır. Böylece klasik lens tasarım prosedürü izlenerek difraktif lens tasarımın adımları belirlenmiş ve yukarıda belirtilen optiksel tasarım parametreleri ile dizaynı planlanan optik yol ve filtre için optimizasyon ve geliştirme işlemleri belirlenmeye çalışılmıştır.

1.3 Hipotez

Bazı özel tip sensörlerde algılanan elektromanyetik ışıdırma algılama verimini etkileyen parametrelerin optimizasyon yolları belirlenebilir. Bu optimizasyon yolları kullanılarak bu tip sensörlerin minimum limitlerine ulaşılabilir. Ulusal ve uluslararası düzeyde kullanılabilir bilgi birikimi ve ürüne dönüştürülebilecek bir durumda eser elde edilebilir.

BÖLÜM 2

KAYNAĞIN RADYASYON ÖZELLİKLERİ

2.1 Cismin Radyasyon Özellikleri

2.1.1 Karacisim Işıması

Mutlak sıfır sıcaklığın üzerindeki tüm cisimler ışıma yayarlar. Normalden fazla sıcak olan cisimler çok daha fazla ışıma yaparlar. Tüm nesneleri meydana getiren atomlar ve moleküller elektrik yüklerinin hızlandırılmış hareketini içerir. Maxwell denklemlerinde şekillendirilmiş olan magnetizma ve elektriğin temel yasaları gereği hızlandırılmış yüklerin hareketi ışıma meydana getirecektir. Mutlak sıfır sıcaklığı üzerinde malzemede sürekli dürtülen atom ve moleküller, büyük dalgaboyu ve frekansın geniş bir aralığında elektromanyetik ışıma üretirler. Bir nesnenin yüzeyinden direkt olarak yayılan toplam radyant akı, Stefan-Boltzmann yasası ile tanımlanan T sıcaklığı ile açıklanır.

$$M_{bb} = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Günümüzde hala kullanılan Stefan-Boltzmann sabitinin değeri:

$5.67032 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$ 'dür. M_{bb} 'nin birimi ise $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 'dir.

Denklem (2.1) mükemmel bir yayıcı karacisim olarak adlandırılır. İdeal cisim olarak adlandırılan bir karacisim sıfır yansımayla gelen tüm ışımalara izin verir ve sıfır iletimle ışımaları içinde absorbe eder. Bu durum tüm geliş açıları ve dalga boyları için

geçerlidir. Karacismin bir tanımına göre tüm yönlerde ve dalga boylarında soğurma derecesi 1.0 ise cisim mükemmel bir soğurucudur. Enerji korunum yasasından dolayı, opak yüzeyin yansıtma derecesi (R) ve soğurma derecesi (A) nın toplamı $A + R = 1$ olur. Böylece karacismin soğurma oranı 1 ise yansıtma oranı sıfır olmak zorundadır. Bu sebeple, oda sıcaklığında mükemmel bir karacisim göze siyah görünecektir ve adının kökeni de buradan gelmektedir.

Sadece bazı yüzeylerde, mesela siyah karbon ve karbon silisyum karışımı bir yüzey gibi, optik özellikler bakımından karacisme benzerdir. Pek çok yüzey mükemmel bir şekilde soğuramaz ve farklı dalga boyları için farklı şiddette yansımalar meydana getirir. Bu yüzden onlar ışın dağılımına göre (spektral olarak) seçici yüzeyler olarak adlandırılır. Çünkü onların optik özellikleri spektrumun başka kısımları için farklı olmaktadır.

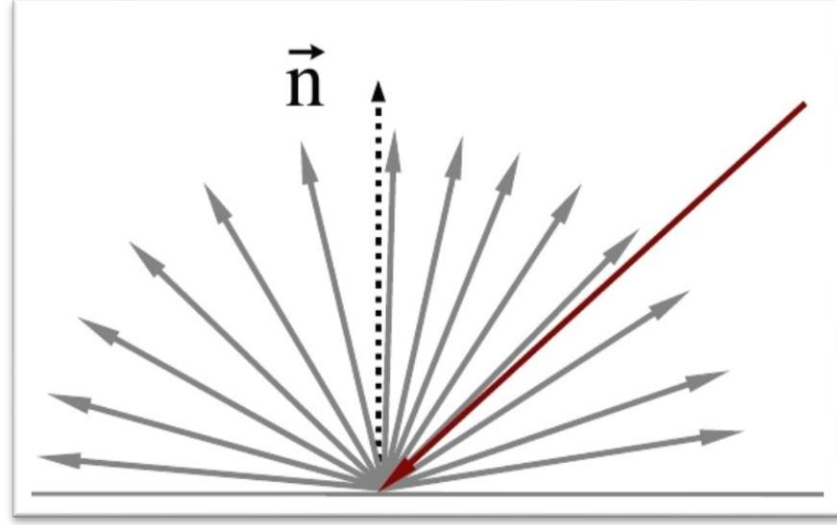
Salınan radyasyon bir dalga boyu aralığında ve dolu bir yarımkürenin belirli bir açı aralığında yüzey tarafından yayılır. Karacisimde ışınımın açısal dağılımı sabittir ve yönden bağımsızdır. Bu tür yüzeye Lambert yüzeyi denir.

$$L_{\lambda}(\theta, \phi) = L_{\lambda}(0,0) = L_{\lambda} \quad (2.2)$$

Bu yüzden karacismin spektral parlaklık $L_{bb\lambda}$ ve spektral ışınım gücü $M_{bb\lambda}$ arasındaki ilişki,

$$M_{bb\lambda} = \pi L_{bb\lambda} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir [1], [2].



Şekil 2.1 Lambert Yüzeyi ($\vec{n}$ yüzey normali.)[2]

2.1.2 Planck Yasası

Planck yasası, belirli bir sıcaklıkta termal denge durumunda bulunan bir karacisim ışımasının yaydığı elektromanyetik radyasyonu ifade eder. 1901 yılında Max Planck köklü bir varsayım ortaya atmıştır. Işıyan enerjinin kuantize olduğu ve termal dengede bir boşluk içerisinde ışıyan spektral enerji yoğunluğunun betimlenmesinde bu varsayım kullanılmıştır. Bu karacismin iyi bir teorik yaklaşımıdır. Karacisim sayesinde yeni ortaya çıkan radyasyon salınımının spektral dağılımı için bir denklem elde edilebilir. Bu denklem, herhangi bir sıcaklıkta bir vakum içerisinde karacismin spektral parlaklığını büyük bir oranla tahmin eder ve bu Planck'in kara cisim spektral radyasyon yasası olarak adlandırılır. Birimi $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$ olur.

$$L_{bb\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^2 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (2.3)$$

$$h = 6.626176 \times 10^{-34} J \cdot s$$

$$c = 2.9979246 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

$$k = 1.380662 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$$

T sıcaklığında bir karacismin spektral ışıyım gücü $M_{bb\lambda}$ denklem (2.3) için $L_{bb\lambda}$ yerine yazılıp π ile çarpıldığında,

$$M_{bb\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (2.4)$$

Birimlerin farklı kombinasyonları için sınıflandırılmış C_1 ve C_2 sabitler ile denklem (2.5) in en genel formu,

$$M_{bb\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.5)$$

haline gelir.

Genel metrik birimler kullanılarak sabitlerin değerleri şu şekilde elde edilir:

$$C_1 = 2\pi hc^2 = 3.741832 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 \cdot m^{-2}$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = 14387.86 \mu m \cdot K$$

Denklem (2.6) daki C_1 ve C_2 değerleri yerine konulup dalgaboyu μm ve sıcaklık Kelvin derecesinde yeniden düzenlendiğinde,

$$M_{bb\lambda} = \frac{3.741 \times 10^8}{\lambda^5 [\exp((14388)/(\lambda T)) - 1]} \quad (2.6)$$

şeklini alır.

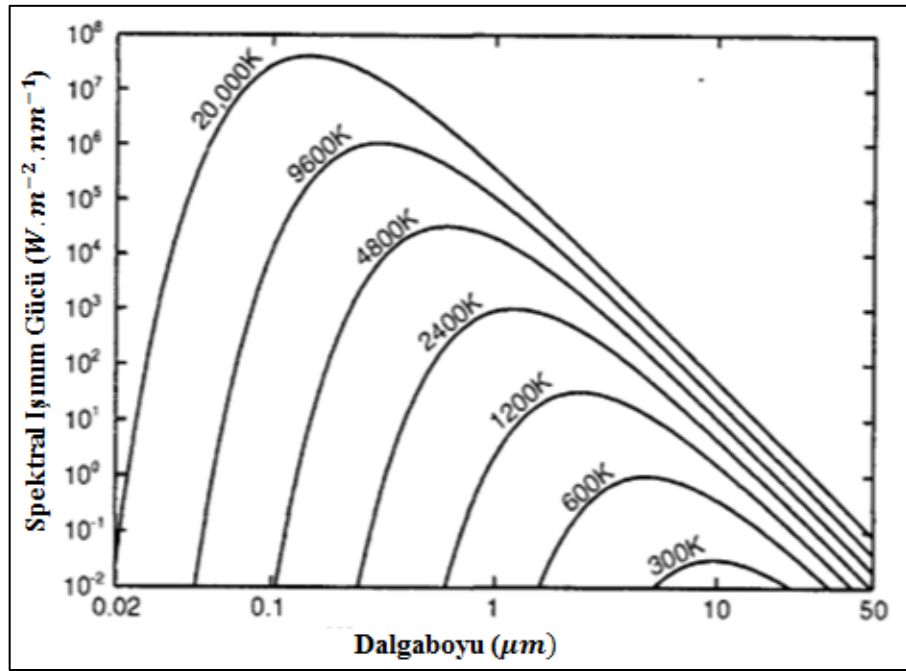
Denklem (2.7) den siyah cisim ışıının gücünü, dalgaboyu ve sıcaklık değerlerini yerine koyarak belirlemek ve sonra belirtilen işlemleri gerçekleştirmek çok kolay olur. Bilimsel hesap makinesi veya bir bilgisayar ile kolaylıkla yapılabilir. Spektral parlaklığı ($L_{bb\lambda}$) elde etmek için sadece denklem (2.7) deki ifadeyi π ye bölmek yeterli olacaktır.

Işıma hakkındaki birçok kaynak, özellikle kızılötesi ışıma, farklı sıcaklıklarda karacisimlerin spektral ışıının gücü değerlerinin tablosunu içerir. Çünkü denklem (2.7) de paydada λT 'nin varlığı nedeniyle, λT nin çeşitli değerleri için $M_{bb\lambda}/T^5$ hesaplanır. Tablodaki değerler ile çarpılan herhangi bir T sıcaklığı için kolayca düzeltilebilen orijinal fonksiyonun her biri λ yı kurtarmak için T ile çarpılan λT , T^5 'i bölerek bulunur. (Bir T sıcaklığında orijinal fonksiyon kolaylıkla düzenlenebilir).

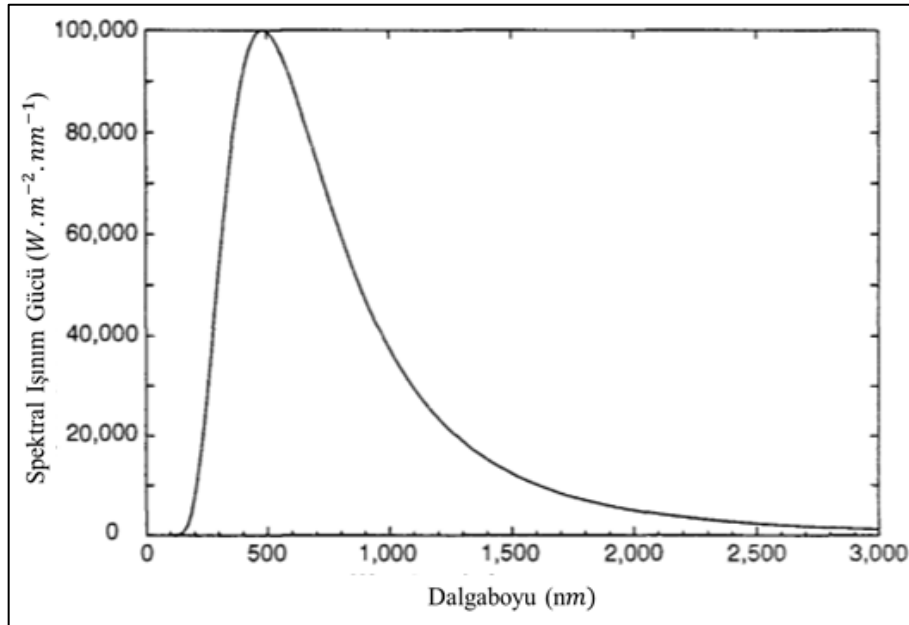
Şekil 2'de farklı sıcaklar için denklem (2.7) ile hesaplanmış karacisim ışıma spektrumunun bir ailesi gösterilmektedir.

Bir logaritma skalası denklem (2.7) ile meydana getirilen değerleri kapsayacak şekilde oluşturulur. Şekil 3'te 6,000 Kelvin de karacisim spektrum şeklinin doğrusal ölçeğinin çizimi gösterilmektedir.

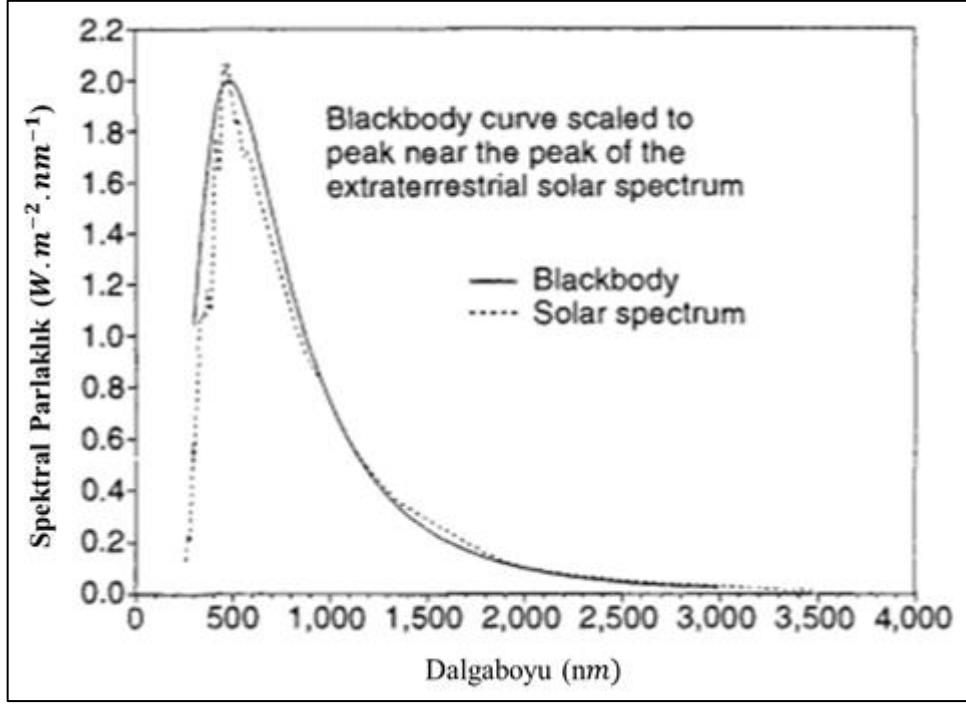
Şekil 4'te ise 6,000 Kelvin'de dünya dışı güneş spektrumu ile karacisim eğrisi karşılaştırılır, güneş spektrumunun yüksekliğine yakın pikte dikey olarak karacisim eğrisi ölçeklendirilmiştir. Güneş doğru bir karacisim radyatörü değildir, bu yüzden eğriler şekilde tam olarak eşleşmez. Bir nedeni, güneş geniş bir gaz tabakasıyla veya atom ve molekülleri güneşin yüzeyinden daha soğuk olan atmosferle çevrelenmiştir ve bu atom ve moleküller farklı dalga boyu tabakalarında ışımayı seçici olarak soğurur.



Şekil 2.2 300 den 20,000K'ya olan sıcaklık değişimlerinde denklem 2.7 ile hesaplanmış, karacisimler için ışıınım gücü spektrumu.[3]

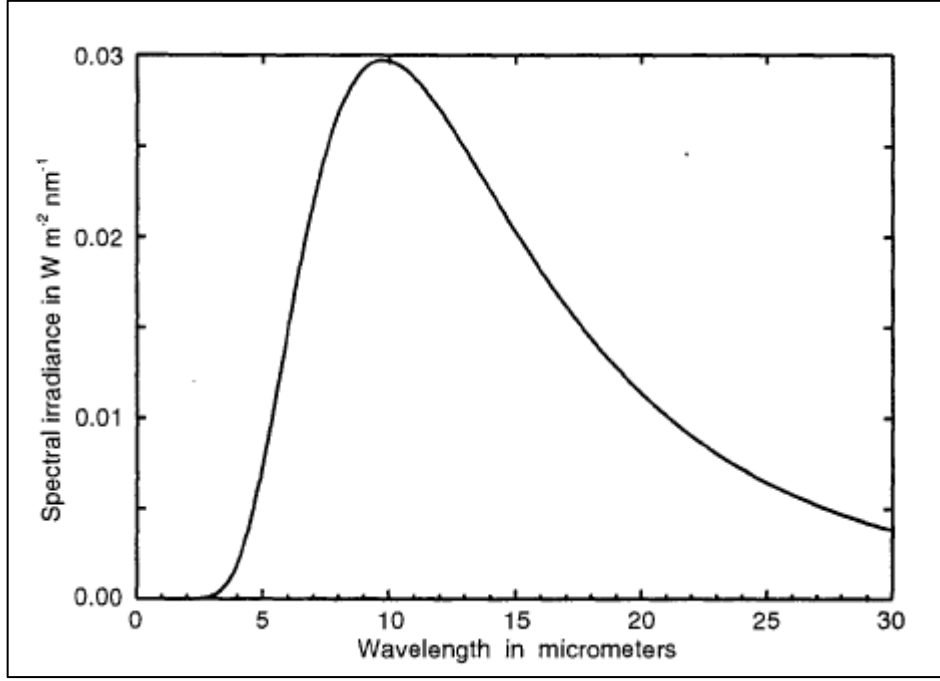


Şekil 2.3 6,000 K'de denklem 2.7 ile hesaplanmış bir karacismin ışıınım gücü spektrumu.[3]



Şekil 2.4 Dünyadışı güneş spektrumu ve 6,000K ölçeklenmiş karacisim spektrumu.[3]

Nesneler güneş kadar sıcak radyasyon yayarlar ve biz gözlerimizle onların spektrumunun görünür kısmını görebilir ve kendi tenimizde ısıma sıcaklığını hissedebiliriz. Şekil 2.5'te sadece 23.9 °C veya 297 K (75°F) de bir karacismin ısıma spektrumu gösterilir. En yüksek dalgaboyuna doğru spektrumun oldukça değiştiğini görebiliriz. Orada üretilen görünür radyasyon yoktur. Aynı zamanda ısımanın toplam büyüklüğü çok daha düşüktür ve tenimizde hissetmek kolay değildir [3], [4], [5], [6].



Şekil 2.5 23.9 °C’de karacismin ışıma spektrumu.[3]

2.2 Cismin Fotometrik ve Radyometrik Özellikleri

2.2.1 Radyometre

Radyometre elektromanyetik spektrumun herhangi bir kısmındaki ışığın ölçülmesi bilimidir. Pratikte, bu terim optiksel enstrümanlar kullanılarak infrared, görünür ve ultraviolet ışığın ölçülmesi ile sınırlandırılmıştır.

Radyometrenin iki yönü vardır: teorik ve pratik. Pratik ısı çiftleri, bolometreler, fotodiyotlar, fotoduyar boyalar ve emülsiyonlar, vakum fototüpler, yük-çifti cihazları içeren ışığın ölçülmesinde kullanılan bilimsel enstrümanlar ve materyelleri içerir.

2.2.2 Işınır Enerji

Işık, ışıdır enerjidir. Elektromanyetik radyasyon uzaya doğru enerjisini taşır. Işık fiziksel obje tarafından soğurulduğunda, enerjisi diğer bazı formlara çevrilir. Bir mikrodalga fırın, örneğin, mikrodalga radyasyon su molekülleri tarafından

soğurulduğunda suyun sıcaklığı artar. Mikrodalga'nın ısıtıcı enerjisi termal enerjiye çevrilir. Benzer olarak, görünür ışık ısıtıcı enerjisini kinetik enerji olarak elektronlara transfer ettiğinde fotoğrafik ışık içinde akması için bir elektrik akımına çevirir. ısıtıcı enerji Q ile gösterilir ve joule ile ölçülür.

2.2.3 Spektral ısıtıcı Enerji

Güneş gibi geniş bant kaynak, radyo dalgasından gamma ışınına kadar geniş spektrum aralığında (tüm spektral bölgede) elektromanyetik radyasyon yayar. Ama, ısıtıcı enerjisinin çoğu spektrumun görünür kısmında yoğunlaşır.

Bundan, λ dalga boyundaki birim dalga boyu aralığı başına ısıtıcı enerjinin miktarını ifade eden spektral ısıtıcı enerjiyi tanımlayabiliriz. Bu ifade;

$$Q_\lambda = dQ/d\lambda \quad (2.7)$$

şeklindedir. Spektral ısıtıcı enerji nanometre başına joule olarak ölçülür.

2.2.4 ısıtıcı Akı (ısıtıcı Güç)

Birim zamandaki enerji, güçtür. Bir lazer ışınının ısıtıcı gücü miliwatt ya da watt birimine sahiptir. Işık uzaya doğru akar ve bu yüzden ısıtıcı güç “ısıtıcı enerji akışının zamana oranı” ya da ısıtıcı akı olarak daha genel bir şekilde ifade edilir.

Bu ifade:

$$\Phi = dQ/dt \quad (2.8)$$

2.2.5 Spektral ısıtıcı Akı (Spektral ısıtıcı Güç)

Spektral ısıtıcı akı λ dalga boyunda birim dalga boyu aralığı başına ısıtıcı akıdır. Bu ifade;

$$\Phi_\lambda = d\Phi/d\lambda \quad (2.9)$$

şeklinde verilir ve birim nanometre başına watt olarak ölçülür.

2.2.6 Işınır Akı Yoğunluğu (Parlama Ve Işınır Yayılma)

Işınır akı yoğunluğu, yüzey üzerindeki bir noktada birim alan başına ışınır akıdır. Burada yüzey gerçek ya da imajiner olabilir. İki olası durum vardır. Birincisi akı Şekil 2.6(a)'daki yüzeye varmış olabilir. Işınır akı yoğunluğundan parlama olarak bahsedilir. Akı ışınlar tarafından ifade edilen yüzeye herhangi bir yönden varabilir. Parlama;

$$E = d\Phi/dA \quad (2.10)$$

Burada Φ noktaya gelen ışınır akıdır ve dA nokta üzerinde ifade edilen diferansiyel alandır. İkincisi akı yayılma yada yansımadan dolayı yüzeyden ayrılmış olabilir. (Şekil 2.6(b)). Işınır akı yoğunluğu ışınır yayılma olarak da ifade edilebilir. Parlama olarak, akı yüzey üzerindeki herhangi bir yönde ayrılabilir.

Işınır yayılmanın tanımı:

$$M = d\Phi/dA \quad (2.11)$$

Burada Φ noktadan ayrılan ışınır akıdır ve dA noktadaki diferansiyel alandır.



Şekil 2.6 a) Parlama b) Işınır Yayılma[3]

Işınır akı yoğunluğu herhangi bir üç-boyutlu uzayda ölçülebilir. Bu yüzey (örneğin; hava yada boşluk) su ve bardak gibi iç saydam ortam arasındaki uzayda fiziksel nesnenin yüzeyini içerir.

Işınır akı yoğunluğu metrekare başına watt biriminde ölçülür.

2.2.7 Spektral Işınır Akı Yoğunluğu

Spektral ışınır akı yoğunluğu, λ civarında birim dalgaboyu aralığı başına ışınır akıdır. Işınır akı yüzeye vardığında ,spektral parlaklık olarak bilinir ve,

$$E_{\lambda} = dE/d\lambda \quad (2.12)$$

olarak tanımlanır. Işınır akı yüzeyden ayrılırken, spektral ışınır yayılma olarak bilinir ve,

$$M_{\lambda} = dM/d\lambda \quad (2.13)$$

olarak tanımlanır. Spektral ışınır akı yoğunluğu nanometre başına metrekare başına wattla ölçülür.

2.2.8 Işıma

Verilen bir yönde bir yüzey üzerindeki bir noktada ayrılan yada gelen ışık ışınını düşünelim. Işıma bu ışında içerilen ışınır akının sonsuz küçük miktarıdır.

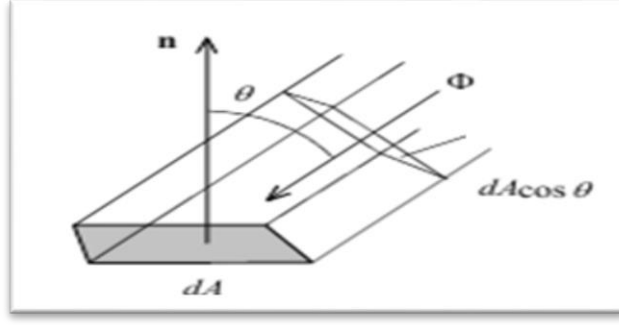
Işımanın daha formal tanımı reel yada imajiner yüzey üzerinde bir noktada açılı tepesi olacak şekilde sonsuz küçük dar koni ile düşünmemizi gerektirir. Bu koni steradyan olarak ölçülen $d\omega$ differansiyel katı açılıya sahiptir.

Eğer yüzey ile arakesitin alanı diferansiyel tesir-kesit alanına dA sahipse, ışının tesir kesit alanı $dA \cos \theta$ dir. θ Şekil (7) de gösterildiği gibi, yüzey normali ile ışın arasındaki açıdır. (Işın tesir-kesit alanı $dA \cos \theta$ ışın-yüzey tesirkesit alanı dA nın izdüşürülmüş alanı olarak bilinir.)

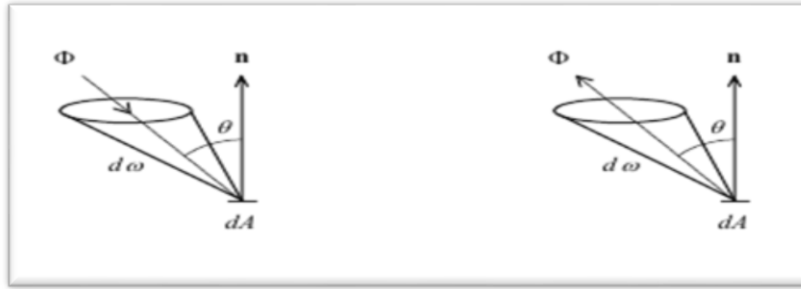
Bir yüzeye varan ya da ayrılan ışığın ışınını içeren elemental koni $d\omega$ hayal edebiliriz. Parlaklığın tanımı o zaman,

$$L = d^2\Phi/[dA(d\omega \cos \theta)] \quad (2.14)$$

şeklinde olacaktır.



Şekil 2.7 Bir yüzeyi kesen bir ışık ışını[3]



Şekil 2.8 a) Yüzey normaline θ açısında gelen ışık b) Yüzey normalinden θ açısıyla ayrılan ışık[3]

2.2.9 Spektral Işıma

Spektral ışıma λ dalgaboyu civarındaki birim dalgaboyu başına ışımadır. Spektral ışıma,

$$L_{\lambda} = d^3\Phi/[dA(d\omega \cos \theta)d\lambda] \quad (2.15)$$

ile ifade edilir ve nanometre başına steradyan başına metrekare başına watt ile ölçülür.

2.2.10 Parlamanın Şiddeti

Her yönde parlak akının yayıldığı ışığı sonsuz küçük nokta kaynak olarak hayal edebiliriz. Verilen bir yönde yayılan parlak akının miktarı temel koni içinde olan ışığın ışını tarafından temsil edilebilir. Bu parlama şiddetinin tanımını verir.

$$I = d\Phi/d\omega \quad (2.16)$$

Burada $d\omega$, verilen yönü içeren temel koninin diferansiyel katı açısıdır. Diferansiyel katı açının tanımından ($d\omega = dA/r^2$) aşağıdaki denklemi,

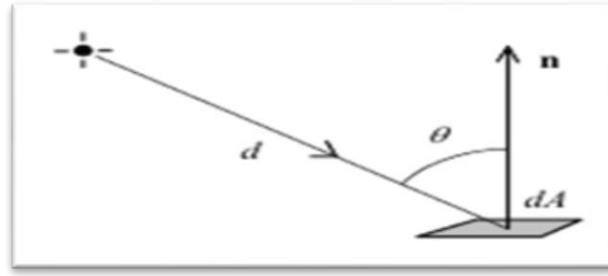
$$E = d\Phi/dA = d\Phi/r^2 d\omega = I/r^2 \quad (2.17)$$

elde ederiz. Burada diferansiyel yüzey alanı dA kaynaktan r uzaklığında kürenin yüzeyidir.

Daha genel olarak, parlak akı θ açısında dA ile kesişir (Şekil 2.9). Bu nokta kaynak için ters kare yasasını verir.

$$E = I \cos \theta / d^2 \quad (2.18)$$

Burada I verilen yöndeki kaynağın şiddetidir ve d kaynaktan yüzey elemanı dA ya olan uzaklıktır.



Şekil 2.9 Nokta kaynak için ters kare yasası[6]

Nokta kaynakların sürekliliği, reel yada imajiner yüzey olarak ele alınabilir, burada her kaynak dA differansiyel alanını doldurur (Şekil 2.9). n yüzey normalinden θ açısına bakıldığında, $dA \cos \theta$ izdüşürülmüş alandır. Parlaklığın tanımını (Denklem 2.15) ve ışınır şiddetini (Denklem 2.17) birleştirerek parlaklığın alternatif tanımına ulaşabiliriz.

$$L = dI/(dA \cos \theta) \quad (2.19)$$

Burada dI verilen yöndeki nokta kaynağın diferansiyel şiddetidir [7], [8], [9], [10],[11].

2.2.11 Fotometre

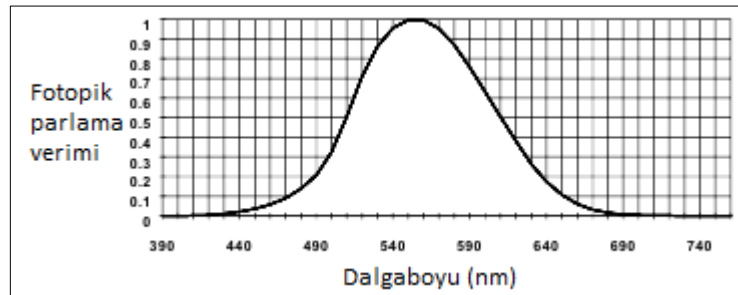
Fotometre insan gözünün duyarlılığına göre görünür ışığın ölçülmesi bilimidir. Yani, insanın görünür ışığa tepkisinin istatistiksel model üzerinde temellendirilen nicel bir bilimdir.

İnsanın görme sistemi 380 nm ile 770 nm aralığındaki dalga boyları ile mükemmel kompleks ve yüksek derecede elektromanyetik radyasyonun lineer olmayan detektörüdür.

İnsan gözünün ışığa duyarlılığı dalga boyu ile değişir. Yeşil ışığın watt/m^2 -steradyanın parlaklığındaki ışık kaynağı kırmızı ya da mavi ışığın watt/m^2 -steradyanın parlaklığına sahip aynı kaynak daha fazla aydınlığa sahiptir. Fotometrede, ışın yayılan enerjinin gücü ölçülmez.

Bu görev ışığa gözün lineer olmayan tepkisi tarafından son derece güçleştirilir. Bu sadece dalga boyu ile değil aynı zamanda parlak akının miktarı, ışığın sabit ya da titreyip titremeyeceği, iris ve retinanın adaptasyonu, gözlemcinin psikolojisi ve psikolojik durumu, diğer değişkenlerin yanıtı ile de aynı zamanda değişir.

Yine de, görmenin öznel etkisi görüş koşullarının normali için ölçülebilir. 1924'te (Uluslararası Aydınlanma Komisyonu) farklı dalga boyları ile kontrol edilen koşullar altındaki monokromatik ışık kaynağının "parlaklığını" gözle görülür eşleştirme ile 1000 üzerindeki gözlemciye sormuştur. Şekil 2.10 da gösterilen CIE fotometrik eğrisi olarak bilinen istatistiksel sonuç, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak insan görme sisteminin fotopik aydınlık verimini gösteren sonuçtur.



Şekil 2.10 CIE fotometrik eğri[8]

Fotometrik teori bize renkleri nasıl algılayabileceğimizi hitap etmez. Ölçülen ışık dalgaboyunun sürekli yada kombinasyonu yada monokromatik olabilir; gözün tepkisi CIE ağırlık fonksiyonu tarafından belirtilir. Bu ifade çok önemli bir noktanın altını çizer ve bu da, radyometrik ve fotometrik teori arasındaki farklılık ölçümün birimi üzerinedir.

2.2.12 Aydınlık Şiddeti

Fotometrenin temeli Pierre Bouguer tarafından 1729'da ortaya konuldu. Bouguer zamanındaki uygun ışık kaynağının terimindeki fotometrik prensibi ele almıştır: wax candela. Bu ifade fotometrik teorideki nokta kaynak konseptinin temeli haline gelmiştir.

Wax Candles 18. ve 19.yüzyıllarda ulusal ışık kaynağı standardı olarak kullanılmıştır. Burada 1909 yılında karbon telli vakum lambasının grubu üzerinde baz alınan uluslararası standart ve tekrar 1948 yılında sıvı platinyumun donma noktasındaki potansiyel yer değiştirir. Bugün uluslararası standart bir kandelanın aydınlık şiddetine sahip teoriksel nokta kaynağıdır. Bu nokta kaynağı 540×10^{12} Hertz frekansı ile monokromatik radyasyon yayar (yada maksimum fotopik aydınlık verimliliğindeki dalgaboyuna yakın 555 nm) steradyan başına 1/683 wattının parlak yoğunluğuna sahiptir.

CIE fotometrik eğrisi ile beraber, kandela radyometrik ve fotometrik ölçümler arasında dönüşüme ihtiyaç duyulan ağırlık faktörünü sağlar. Örneğin; 510 nanometre dalgaboylu ile monokromatik nokta kaynağı ve steradyan başına 1/683 wattın parlak yoğunluğunu düşünelim. Fotopik aydınlık verimliliği 510 nanometrede 0.503 tür [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19].

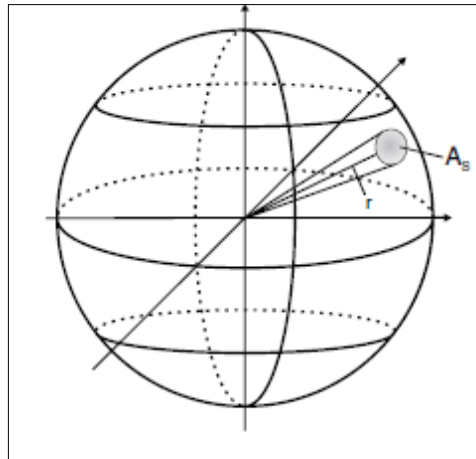
CİSİM SENSÖR ARASI OPTİKSEL ETKİLEŞİM

3.1 Fotometrik Temeller

Radyasyona duyarlı bir sensöre gelen sinyal bir cisimden yayılan ışımadır. Sensör alıcısına gelen radyasyon gücü geometrik-optik görüntü ilişkisine bağlıdır.

3.1.1 Katı Açı Tanımı

Katı açı bir nokta kaynağı tanımlamak için kullanılır ve bu yüzden radyasyon yayılımı belirlemede uygundur. Katı açı, noktasal bir kaynağın yayılım uzayını sınırlayan küre yüzeyi A_s 'nin ilişkisi olarak tanımlanır. (Şekil 3.1)



Şekil 3.1 Katı Açı Tanımı[19]

$$\Omega = \frac{A_s}{r^2} \Omega_0 \quad (3.1)$$

Katı açının birimi steradyandır ve şu şekilde ifade edilir;

$$\Omega_0 = 1 \text{ sr} = \frac{1m^2}{1m^2} \quad (3.2)$$

Bir steradyan birim kürenin 1 m^2 'lik alanını keser. Yüzeyin şekli keyfi olabilir. Farklı formlardaki eş yüzey alanı her zaman aynı katı açıya sahiptir. Katı açının birimi 1'dir ve azaltılabilir. Bütün küre için maksimum katı açısı ifadesi,

$$A_{\text{tüm küre}} = 4\pi r^2 \quad (3.3)$$

ise

$$\Omega_{\max} = \frac{A_{\text{tüm küre}}}{r^2} \Omega_0 = \frac{4\pi r^2}{r^2} \Omega_0 = 4\pi \Omega_0 \quad (3.4)$$

şeklinde bulunabilir.

Yarım küre hacmi için katı açısı ifadesi,

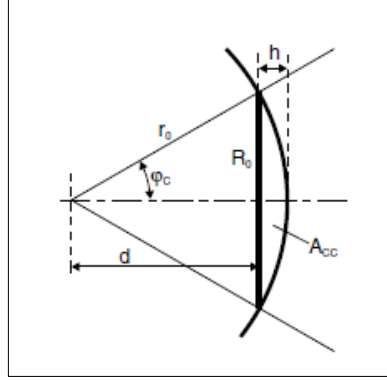
$$\Omega_{HS} = 2\pi \Omega_0 \quad (3.5)$$

olarak ifade edilebilir.

3.1.2 Katı Açısı Hesaplama

3.1.2.1 Dik Dairesel Koni

Bir dik daireSEL koni kürenin A_{cc} alanı ve küre yüzeyinden h yüksekliği ile küresel kabı keser. Dik daireSEL koninin katı açısı Ω_{cc} ise,



Şekil 3.2 Dik Dairesel Koni[19]

$$A_{cc} = 2\pi r_0 h \quad (3.6)$$

$$h = r_0(1 - \cos \varphi_C) \quad (3.7)$$

ifadeleri için (3.7) ifadesi (3.6) ifadesinde yerine konursa,

$$A_{cc} = 2\pi r_0 h = 2\pi r_0^2 (1 - \cos \varphi_C) \quad (3.8)$$

Steradyanın tanımından dolayı $\Omega_0 = r_0^2$ olacaktır. Bu durumda dik dairesel koninin katı açısı,

$$\Omega_{cc} = 2\pi(1 - \cos \varphi_C)\Omega_0 \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan $1 - \cos \varphi_C = 2\sin^2 \frac{\varphi_C}{2}$ trigonometrik eşitliğini kullanarak Ω_{cc} ifadesi,

$$\Omega_{cc} = 4\pi \sin^2 \frac{\varphi_C}{2} \Omega_0 \quad (3.10)$$

şeklinde olacaktır.

Ω_{cc} katı açısının için 120° lik görüş alanı için,

$$\Omega_{120^\circ} = \pi \Omega_0 \quad (3.11)$$

olacaktır.

Daha küçük açılar için, $\sin \varphi_C \approx \varphi_C$ yaklaşıklığı kullanılırsa,

$$\Omega_{CC} \approx \pi \varphi_C^2 \Omega_0 \quad (3.12)$$

İfade elde edilir.

$$\cos \varphi_C = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_C} \quad (3.13)$$

Ve

$$\sin \varphi_C = \frac{R_0}{r_0} \quad (3.14)$$

İfadelerini yerine koyarak dik dairesel koninin katı açısı;

$$\Omega_{CC} = 2\pi(1 - \sin^2 \varphi_C) \quad (3.15)$$

$$= 2\pi(1 - \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{r_0^2}}) \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilebilir.

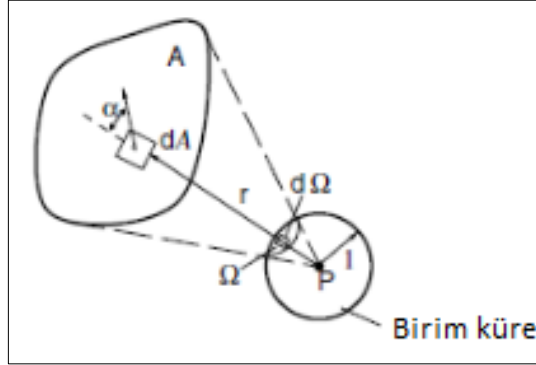
Diffaransiyel katı açısı;

$$d\Omega_{CC} = 2\pi \sin \varphi_C d\varphi_C \Omega_0 \quad (3.17)$$

şeklinde elde edilebilir.

3.1.2.2 Keyfi Alanlar

Uzayda bulunan herhangi bir A alanının Ω katı açısı birim kürenin A'nın merkez izdüşümünden kaynaklanan alanın birim yarıçapa bölünmesinden elde edilir.



Şekil 3.3 Keyfi bir A alanına ait katı açı[20]

Bu durumda verilen keyfi bir A alanına ait katı açı ise;

$$\frac{dA \cos \alpha}{d\Omega} = \frac{r^2}{1^2} \quad (3.18)$$

Yada

$$d\Omega = \frac{dA \cos \alpha}{r^2} \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Yukarıda herhangi bir alan için elde edilen Ω katı açısı için;

1) Küresel koordinatlar için

$$\Omega = \int \frac{\cos \alpha}{r^2} dA \quad (3.20)$$

2) Kartezyen koordinat sistemi için

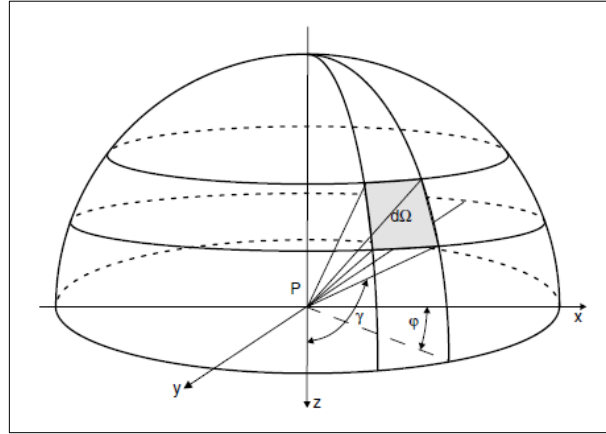
$$\Omega = \iint \frac{\cos \alpha}{r^2(x, y)} dx dy \quad (3.21)$$

3) Polar koordinatlar için

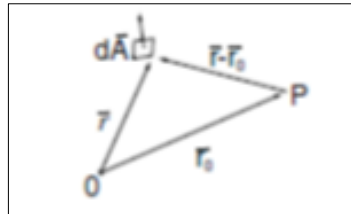
$$\Omega = \int \sin \gamma d\gamma d\varphi \quad (3.22)$$

ifadeleri elde edilir.

Burada γ açısı pozitif z eksenine göre alan elemanın açısıdır ve φ açısı pozitif x eksenine göre alan elemanın açısıdır.



Şekil 3.4 Yarım küre için katı açı ifadesi[20]



Şekil 3.5 Herhangi koordinatlara sahip orijin için vektörler[20]

Vektör olarak katı açının durumu avantajlıdır. Bu nedenden dolayı, Denklem (3.20) içine r kullanırız.

$$\Omega = \int_A \frac{r \cos \alpha dA}{r^3} \quad (3.23)$$

Payda, $\vec{r}$ ve $d\vec{A}$ vektörlerinin skaler çarpımı buluruz.

$$\Omega = \int_A \frac{\vec{r} d\vec{A}}{r^3} \quad (3.24)$$

Ya da

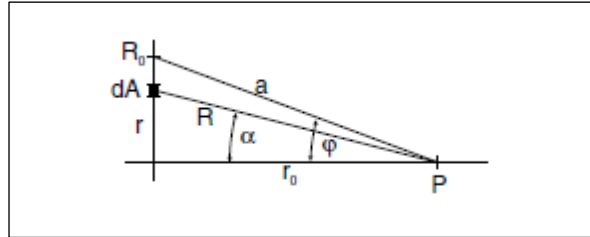
$$\Omega = \int_A \frac{\vec{e}_N d\vec{A}}{r^2} \quad (3.25)$$

Bu ifade

$$\Omega = \int_A \frac{(\vec{r} - \vec{r}_0) dA}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^3} \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3.1.2.3 Uzakta Merkezi Dairesel Alan



Şekil 3.6 Uzaklık Vektörü İle Merkezi Dairesel Alan[21]

Dairesel alan uzaydaki P noktasına r_0 uzaklığına ve R_0 yarıçapına sahiptir. Bu nedenle aşağıda belirtildiği gibi katı açısı için;

$$\Omega = \int \frac{\cos \alpha}{R^2} dA \quad (3.27)$$

ile

$$\cos \alpha = \frac{r_0}{R} \quad (3.28)$$

$$\cos \varphi = \frac{r_0}{a} \quad (3.29)$$

$$r^2 = R_0^2 + r_0^2 \quad (3.30)$$

ve $dA = 2\pi r dr$ ile $0 \leq r \leq R_0$ ifadelerini kullanarak katı açısı ifadesi yeniden yazılırsa aşağıdaki gibi bir ifade elde edilir.

$$\Omega = \int \frac{\cos \alpha}{R^2} dA \quad (3.31)$$

$$\Omega = \int \frac{r_0}{R^2} 2\pi r dr \quad (3.32)$$

$$\Omega = \int \frac{r_0}{R^3} r dr \quad (3.33)$$

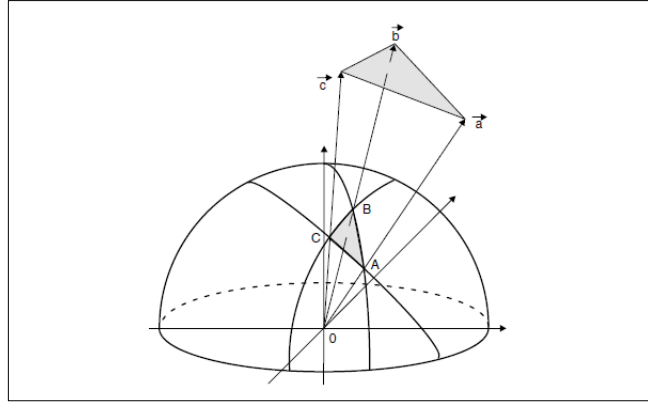
$$\Omega = 2\pi r_0 \int_0^{R_0} \frac{r}{(r^2 + r_0^2)^{\frac{3}{2}}} dr = 2\pi \left(1 - \frac{r_0}{(R_0^2 + r_0^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (3.34)$$

$$= 2\pi \left(1 - \frac{r_0}{a} \right) = 2\pi(1 - \cos \varphi) \quad (3.35)$$

Sonuç dairesel koni için elde edilen katı açı ifadesi ile aynıdır. Bunu bir küreye yansıttıktan sonra, kabul edilen dairesel alanın küre kabı olduğu hesaplanmıştır.

3.1.2.4 Uzayda Keyfi Olarak Bulunan Üçgen Alan

Birim küre uzayında bulunan keyfi bir üçgenin izdüşümü, küresel bir yüzey üzerinde bir küresel üçgen olarak ele alınabilir.



Şekil 3.7 Birim küre uzayında bulunan keyfi bir üçgenin izdüşümü[21]

Bir yarıçaplı küre için, küresel üçgenin alanı;

$$\Omega_{DE} = \alpha + \beta + \gamma - \pi \quad (3.36)$$

Gördüğümüz gibi katı açılara eşittir. Burada α , β ve γ açıları ile küresel üçgenin A, B ve C noktalarındaki açılar ifade edilir [19].

Buradaki açılar üçgen formundan $\vec{a}$, $\vec{b}$ ve $\vec{c}$ vektörleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu üçgen katı açı Ω_{DE} için aşağıdaki basit ilişki yazılabilir:

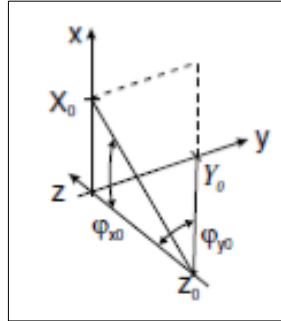
$$\Omega_{DE} = 2 \tan^{-1} \frac{|\vec{a} \vec{b} \vec{c}|}{abc + (\vec{a} \vec{b})c + (\vec{a} \vec{c})b + (\vec{b} \vec{c})a} \quad (3.37)$$

3.1.2.5 Dikdörtgen Alan

Dikdörtgen alan A xy -düzlemi içinde bulunur. Dikdörtgen X_0 ve Y_0 uzunluklarına sahiptir. P noktası z -ekseni üzerinde bulunur. φ_{X0} ve φ_{Y0} açıları X_0 ve Y_0 ilişkisindeki P noktasının açılarını tanımlar.

Katı açı,

$$\Omega_{RE} = \arcsin \frac{X_0 Y_0}{A_X A_Y} \quad (3.38)$$



Şekil 3.8 Dikdörtgensel Alanının Pozisyonu[21]

ve

$$A_Y^2 = z_0^2 + Y_0^2 \quad (3.39)$$

Ya da

$$\Omega_{RE} = \arcsin[\sin(\varphi_{X0}) \sin(\varphi_{Y0})] \quad (3.40)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3.2 Temel Fotometri Yasaları

3.2.1 Tanım

dA_1 ve dA_2 birbiri ile zıt yönde bulunan iki tane alan elemanıdır.(Şekil 3.9 a) dA_2 alan elemanından yayılan ve dA_1 (alıcı) alan elemanından geçen Φ_{21} radyant akı $d\Omega_2$ diffaransiyel katı açısı ile orantılıdır:

$$d^2\Phi_{21} = L_2 dA_2 d\Omega_2 \quad (3.41)$$

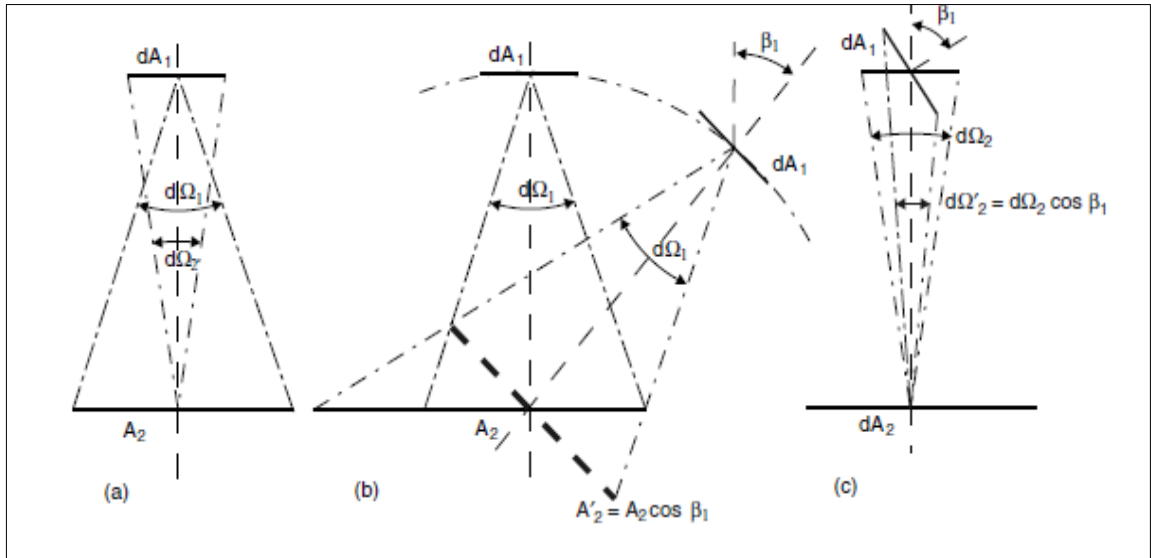
Eğer bu iki alan elemanı birbirine paralel bulunuyorsa, diferansiyel katı açısı Denklem 3.21'e göre yazılabilir:

$$d^2\Phi_{21} = 2\pi\Omega_0 L_2 dA_2 \sin \varphi d\varphi \quad (3.42)$$

β_1 açısı kadar dA_1 alan elemanı sabit katı açısı $d\Omega_1$ 'le beraber döndürülürse, bir ikincil yayıcı ve bir ikincil alıcı durumunu elde ederiz.(Şekil 3.9b ve c) Bir yayıcıdan alıcı olan dA_1 'e bakıldığında, algılanan alan A_2 artan β_1 açısı ile daha büyük olur. Aynı mesafedeki dA_1 paralel algılanan alan A'_2 elemanı için :

$$A'_2 = A_2 \cos \beta_1 \quad (3.43)$$

ifadesi uygulanır.



Şekil 3.9 LAMBERT'in kosinüs yasası için geometrik düzenleme. (a) İkincil-alıcı düzenleme.(b) Birim küre üzerinde döndürülmüş ikincil alıcı düzenlemesi.(c) İkincil yayıcı düzenleme.[22]

Denklem (3.41) in içine yukarıdaki bulunan ifade konursa, sonuç,

$$d^2\Phi_{21} = L_2 dA_2 \cos \beta_1 d\Omega_2 \quad (3.44)$$

Olacaktır. dA_1 'in dönüşü için, bir yayıcı alıcı için daha küçük katı açı Ω_2 'nin sonucu olan küçük ve daha küçük alıcı alanını algılar.(Şekil 3.9c):

$$\Omega'_2 = \Omega_2 \cos \beta_1 \quad (3.45)$$

I şiddeti için,

$$I = \frac{d\Phi_{21}}{d\Omega_2} = L_2 dA_2 \cos \beta_1 \quad (3.46)$$

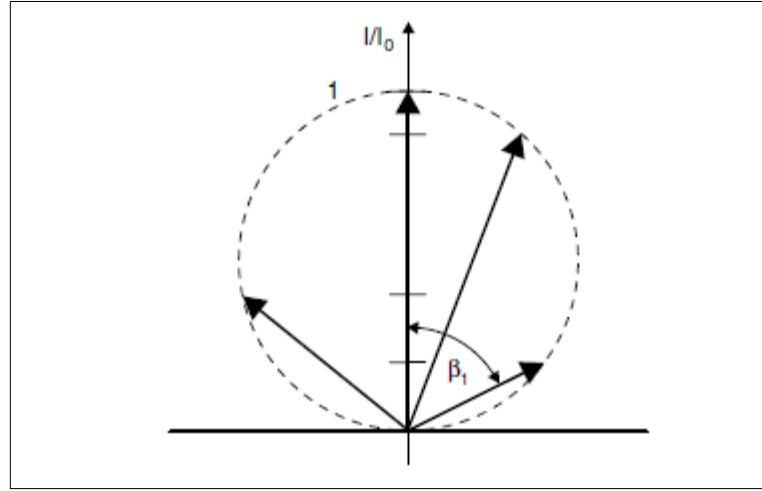
ifadesi elde edilir. Lambert'in kosinüs yasası sabit bir ışımanın bütün açılardan aynı parlaklıktaymış gibi görüldüğünü ifade eder.

Örnek: Kızılötesi sensörlerin duyarlılığını ölçmek için, bir siyah cismin önüne koyulur. Eğer yayıcı sıcaklığı ve sensörün algılayıcı alanı ve yayıcı arasındaki uzaklığı biliyorsak, radyasyonun şiddetini belirleyebiliriz.

Bir kızılötesi sensör tasarımından belirlenen bir görüş alanı (FOV) sahiptir. Eğer sensör ve yayıcı yüzey birbirlerine göre paralel konumlanmışsa, aşağıdaki voltaj duyarlılığı R_V :

$$R_V = \frac{V_{out}}{I_0 \Omega_{FOV}} \quad (3.47)$$

Burada V_{out} sensör çıkış voltajı ve I_0 radyasyonun şiddetidir. Eğer biz β_1 açısı kadar sensörü kaydırırsak, radyasyonun şiddeti değişir ve bu nedenle duyarlılığı ölçülebilir. Değişen şiddet I_0 a göre normalize edilirse,



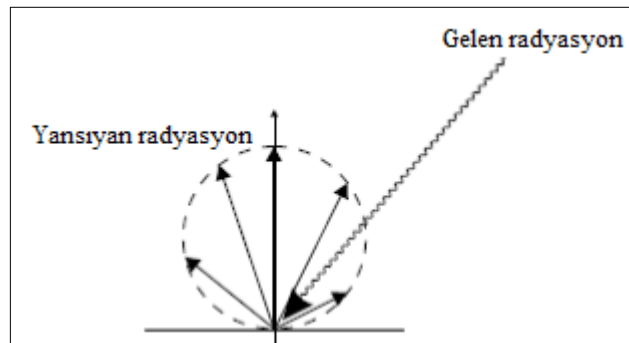
Şekil 3.10 β_1 açısı kadar döndürmeden dolayı şiddetteki değişim[22]

$$\frac{I}{I_0} = \cos \beta_1 \quad (3.48)$$

Ölçülen duyarlılık artan β_1 açısı ile azalır.

Örnek: İdeal Dağıntık Yansıtma

Başka bir örnek ideal bir yansımanın olduğu LAMBERTIAN yüzeyidir. Yansıtılan radyasyonun maksimumu gelen radyasyonun açısından bağımsız olarak yüzey normaline doğru her zaman bulunabilir demektir. Yansıyan radyasyonun şiddeti yüzey normali ile ilişkili olan kosinüsün açısına bağlıdır.



Şekil 3.11 LAMBERTIAN yüzeyi üzerinde ideal dağıntıcı yansıtma[22]

Alan elemanı dA_2 'nin döndüğü kabul edilirse,

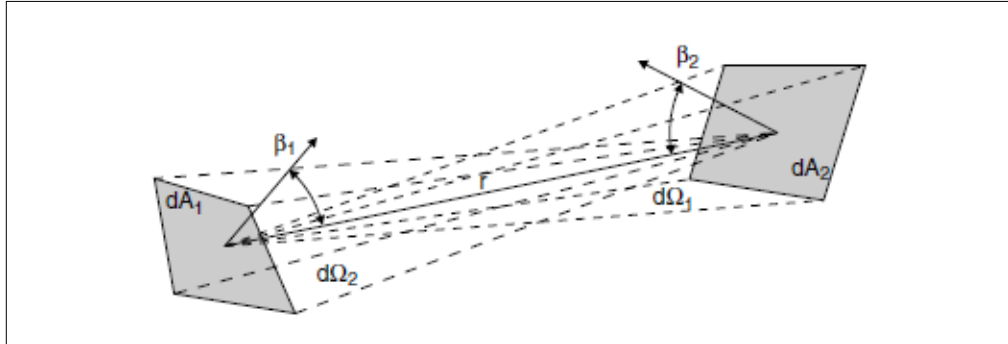
$$d^2\Phi_{12} = \frac{L_1 dA_1 \cos \beta_1 dA_2 \cos \beta_2}{r^2} \quad (3.49)$$

Ya da

$$d^2\Phi_{21} = L_2 \frac{dA_1 \cos \beta_1 dA_2 \cos \beta_2}{r^2} \quad (3.50)$$

şeklinde ifade edilir. Burada r iki alan elemanı arasındaki en kısa uzaklıktır. (Şekil 3.12) Fotometrenin temel yasası alan elemanı dA_1 'den alan elemanı dA_2 yada diferansiyel radyant akı $d\Phi_{21}$ 'e gelen diferansiyel radyant akı $d\Phi_{12}$ 'yi tanımlar. Alanlar arasındaki radyant akı değiş tokuşu;

$$d^2\Phi_1 = d^2\Phi_{12} - d^2\Phi_{21} = \frac{dA_1 \cos \beta_1 dA_2 \cos \beta_2}{r^2} (L_1 - L_2) \quad (3.51)$$



Şekil 3.12 Geometrik değişkenlerin tanımı. dA_1 , dA_2 alan elemanları; r alan elemanlar arasındaki uzaklık; β_1, β_2 alan elemanları ve uzaklık vektörü arasındaki açılar[22]

Diferansiyel katı açılarını uygulayarak, Denklem (3.49) ve (3.50) aşağıdaki gibi açıklanabilir:

$$d^2\Phi_{12} = L_1 dA_1 \cos \beta_1 d\Omega_1 \quad (3.52)$$

İle

$$d\Omega_1 = \frac{\cos \beta_1}{r^2} dA_2 \quad (3.53)$$

Ve

$$d^2\Phi_{21} = L_2 dA_2 \cos \beta_2 d\Omega_2 \quad (3.54)$$

İle

$$d\Omega_2 = \frac{\cos \beta_1}{r^2} dA_2 \quad (3.55)$$

Olur.

Fotometrenin temel yasası için denklem aşağıdaki basit yapıya sahiptir:

$$d^2\Phi_{12} = L_1 dA_1 d\omega_1 \quad (3.56)$$

Burada efektif yada ağırlık katı açısı olarak bilinen ω_1 izdüşürülmüş katı açıdır.

$$\omega_1 = \int \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dA_1 \quad (3.57)$$

Ya da sırasıyla,

$$\omega_{12} = \frac{1}{A_1} \iint \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dA_2 dA_1 \quad (3.58)$$

Ya da

$$\omega_1 = \int \cos \beta_1 d\Omega_1 \quad (3.59)$$

Ya da sırasıyla

$$\omega_{12} = \frac{1}{A_1} \iint \cos \beta_1 d\Omega_1 dA_1 \quad (3.60)$$

Şeklinde ifade edilebilir.

ω_{12} ve ω_{21} izdüşürülmüş katı açılar birbirlerine kolayca dönüştürülebilir:

$$\omega_{12} A_1 = \omega_{21} A_2 \quad (3.61)$$

Böylece değiştirilmiş radyant akı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Phi_1 = \Phi_{12} - \Phi_{21} = (L_1 - L_2) \omega_{12} A_1 = (L_1 - L_2) \omega_{21} A_2 \quad (3.62)$$

Burada ω_{12} alanla ilişkili A_2 alanının izdüşürülmüş katı açısı olarak alınabilir. Bu ifade de form faktörünü belirtmek yaygın bir durumdur [20].

$$F_{12} = \frac{\omega_{12}}{\pi} \quad (3.63)$$

Form faktörü açı ya da değiştirme faktörü de denir. Bir yüzeyin parlaklığı yerine sıcaklığını incelemek istersek bu ifade kullanışlıdır. Bu yüzden parlaklık ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi belirten aşağıdaki denklem (3.62) Denklem (3.63) içine yerleştirilirse,

$$L = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (3.64)$$

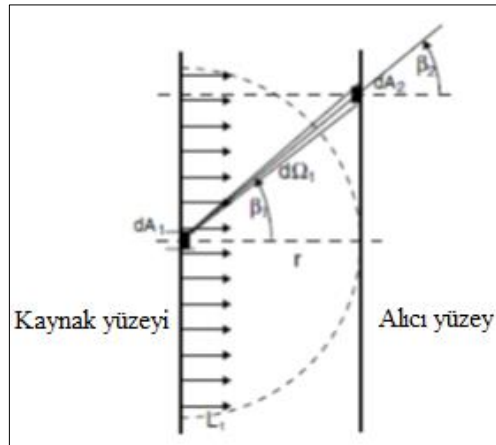
$$d\Phi_{12} = L_1 \omega_{12} dA_1 \quad (3.65)$$

$$d\Phi_{21} = L_2 \omega_{21} dA_2 = L_2 \omega_{12} dA_1 \quad (3.66)$$

$$d\Phi_1 = d\Phi_{12} - d\Phi_{21} = L_1 \omega_{12} dA_1 - L_2 \omega_{12} dA_1 \quad (3.67)$$

$$d\Phi_1 = \frac{\sigma}{\pi} T_1^4 \omega_{12} dA_1 - \frac{\sigma}{\pi} T_2^4 \omega_{12} dA_1 = \sigma (T_1^4 - T_2^4) F_{21} dA_2 \quad (3.68)$$

Örnek: Karacisim Parlaklığı



Şekil 3.13 Siyah cisimdeki geometrik değişkenler[21][22]

M_{BB} radyant akı yoğunluğu :

$$d^2\Phi_{12} = L_1 dA_1 d\omega_1 \quad (3.69)$$

$$d\left(\frac{d\Phi_{12}}{dA_1}\right) = \frac{L_1 dA_1 d\omega_1}{dA_1} \quad (3.70)$$

$$\int d\left(\frac{d\Phi_{12}}{dA_1}\right) = \int L_1 d\omega_1 \quad (3.71)$$

$$\frac{d\Phi_{12}}{dA_1} = L_1 \int d\omega_1 = L_1 \omega_1 = L_1 \int \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dA_2 \quad (3.72)$$

$$M_{BB} = \frac{d\Phi_{12}}{dA_1} = L_1 \int \cos \beta_1 d\Omega_2 \quad (3.73)$$

olarak tanımlanır.

Verici ve alıcı yüzeyleri birbirine paralel iken, β_1 ve β_2 açıları aynıdır:

$$\beta = \beta_1 = \beta_2$$

Diferansiyel radyal açı ifadesi için denklem,

$$M_{BB} = L_1 \int \cos \beta_1 d\Omega_1 \quad (3.74)$$

$d\Omega_1 = 2\pi \sin \beta_1 d\varphi_1 \Omega_0$ ifadesi Denklem (3.74) de yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} M_{BB} &= L_1 \int_0^\phi \cos \beta_1 2\pi \sin \beta_1 d\beta \Omega_0 \\ &= 2\pi L_1 \Omega_0 \int_0^\phi \cos \beta \sin \beta d\beta \end{aligned} \quad (3.75)$$

ifadesi elde edilir.

İntegralin çözümü ile ekzitans,

$$M_{BB} = \pi L_1 \Omega_0 \sin^2 \phi \quad (3.76)$$

ifadesi elde edilir. Siyah cisim tüm yarı uzaya radyasyon yayar. Bu durumda $\phi = \frac{\pi}{2}$ alınır. Böylece ekzitans,

$$M_{BB} = \pi L_1 \Omega_0 \quad (3.77)$$

olarak hesaplanabilir.

STEFAN-BOLTZMANN yasası uygulanırsa,

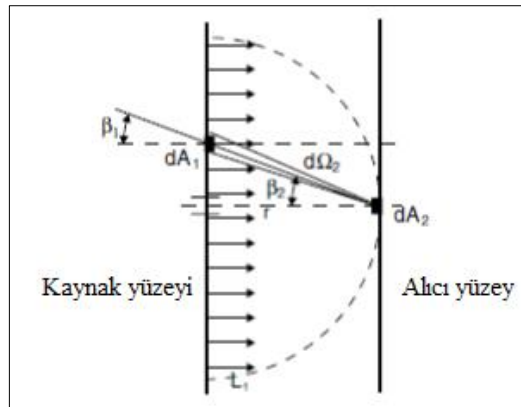
$$M_{BB} = \sigma T^4 \quad (3.78)$$

$$M_{BB} = \pi L_1 \Omega_0 \quad (3.79)$$

$\pi L_1 \Omega_0 = \sigma T^4$ ifadesi elde edilir. Bir siyah cismin ışıması sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanabilir:

$$L_1 = \frac{\sigma}{\pi \Omega_0} T^4 \quad (3.80)$$

Örnek: Bir Sensör Elemanının Işınımı



Şekil 3.14 Sensör elemanında geometrik değişkenler[22]

dA_2 alanının ışıması (Şekil 3.14),

$$E = 2\pi L_1 \Omega_0 \int_0^\phi \cos \beta \sin \beta d\beta \quad (3.81)$$

olarak belirlenir. Verici ve alıcı yüzeyi birbirine paralel iken, β_1 ve β_2 açıları aynıdır:

$$\beta = \beta_1 = \beta_2$$

Denklem (3.81) tarafından diferansiyel katı açısı :

$$E = 2\pi L_1 \Omega_0 \int_0^\phi \cos \beta \sin \beta d\beta \quad (3.82)$$

Olarak ifade edilir. Ve bu verilen integralin çözümü:

$$E = \pi L_1 \Omega_0 \sin^2 \varphi \quad (3.83)$$

Ya da ekzitan ile yukarıda elde edilen denklem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$E = M_S \sin^2 \varphi = \sigma T^4 \sin^2 \varphi \quad (3.84)$$

3.2.2 Hesaplama Yöntemi ve Yasalar

3.2.2.1 İzdüşürülmüş Katı Açı

İzdüşürülmüş katı açının hesaplanması ek trigonometrik fonksiyonu içeren katı açı hesaplanmasında kullanılan denklemden daha karmaşıktır. Denklem (3.49) ya da (3.50)'nin direkt çözümüne ek olarak, Denklem (3.49) daki yüzey integralini çizgi integraline dönüştürmek için STOKES' integral teoremini kullanırız [21]:

$$\omega_{12} = \frac{1}{2A_1} \oint (\ln r dx_1 dx_2 + \ln r dy_1 dy_2 + \ln r dz_1 dz_2) \quad (3.85)$$

Burada C_1 , C_2 sırasıyla 1 ve 2 alanlarının sınır eğrileridir ve r sınır eğrilerinin uzaklığıdır.[3.3] farklı nümerik prosedürler tanımlar.

Karmaşık olan alanlar birbirinden ayrık alanlar olarak çakışmayacak şekilde toplanabilir:

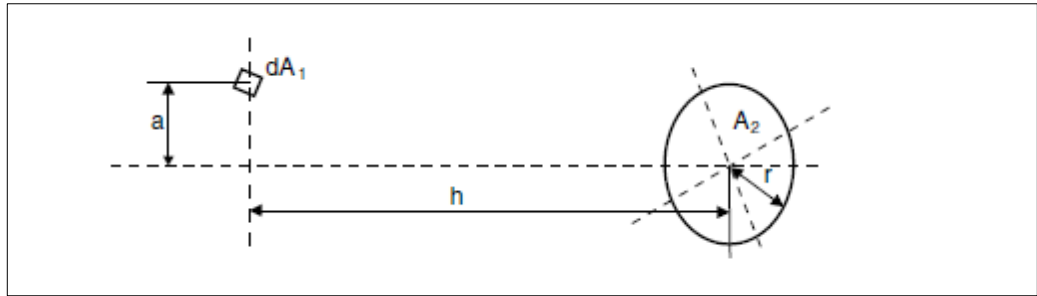
$$\omega_{12} = \sum_n \omega_{12,n} \quad (3.86)$$

Burada $\omega_{12,n}$ kısmi alan n'nin izdüşürülmüş katı açısıdır.

Aşağıda, sensör teknolojisi için önemli olan bazı izdüşürülmüş katı açılara daha yakından bakacağız.

3.2.2.2 Alan Elemanı Ve Disk

Gürültü eşdeğer sıcaklık farkı için yapılan hesaplama gibi sensör teknolojisindeki çoğu hesaplama Şekil 3.15'de sunulan basit bir modele dayanmaktadır. Bu model bir siyah yüzey tarafından aydınlatılan bir küçük sensör elemanı dA_1 'i temsil eder.



Şekil 3.15 dA_1 alan elemanı ve bir disk ile düzenleme[22]

Bu durumda [20]' ye göre izdüşürülmüş katı açısı:

$$\omega_1 = \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{a^2 + h^2 - r^2}{\sqrt{(a^2 + h^2 + r^2)^2 - 4r^2a^2}} \right] \quad (3.87)$$

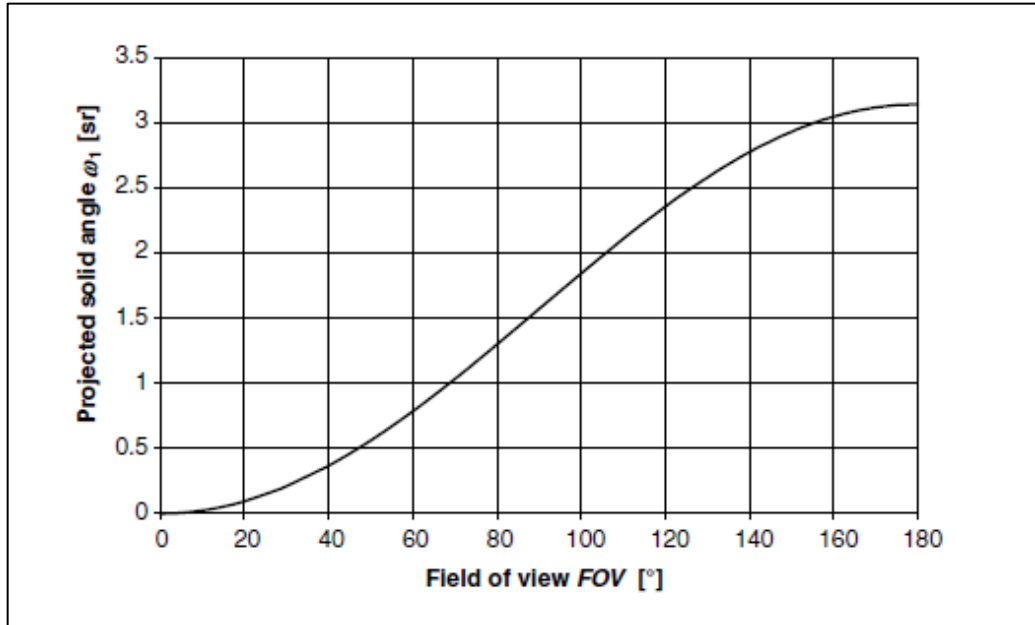
Sensör elemanının diskin merkezinde olma durumu gözönüne alınırsa ($a=0$) alınarak aşağıdaki denklem elde edilmiş olunur:

$$\omega_1 = \pi \frac{r^2}{h^2 + r^2} = \pi \sin^2 \varphi \quad (3.88)$$

Bu önemli ilişki Bölüm 3.2.3’de zaten hesaplanmıştır. Bu durum Şekil 3.15 de gösterilmiştir. Eğer alan elemanı tüm yarı uzayını ($\varphi = 90^\circ$) görürse, izdüşüm katı açısı $\omega_1 = \pi$ olacaktır. Lens gibi gerçek düzenlem için genellikle f- sayısı,

$$F = \frac{h}{2r} \quad (3.89)$$

olarak verilir.



Şekil 3.16 Bir alan elemanının izdüşürülmüş katı açısı[22]

Böylece denklem 3.89:

$F = \frac{h}{2r}$ ifadesinin her iki tarafının karesi alınırsa:

$$F^2 = \frac{h^2}{4r^2} \quad (3.90)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu durumda,

$$\omega_1 = \pi \frac{r^2}{h^2 + r^2} = \pi \frac{1}{\frac{h^2}{r^2} + 1} = \pi \frac{1}{4F^2 + 1} \quad (3.91)$$

olacaktır.

3.2.2.3 Vinyet Durumunda Cisim-Sensör Arasındaki Akının Hesaplanması

Optikte, doğal vinyet görüntü kenarlarında ışınımın azaltılması anlamına gelir. Fotometride, bu ifade $\cos^4$ yasası ile tanımlanır. Şekil 3.16 hesaplanacak düzenlemeyi gösterir. Alan elemanı dA_2 dA_1 ilişkisinde r_0 uzaklığında yer almaktadır. β_1 ve β_2 açıları aynıdır. Fotometrenin temel yasası,

$$d^2\Phi_{12} = L_1 \frac{dA_1 dA_2 \cos^2 \beta}{r'^2} \quad (3.92)$$

olarak elde edilir. Elde edilen bu denklemde $r = \frac{r'}{\cos \beta}$ ifadesi yazılırsa;

$$d^2\Phi_{12} = L_1 \frac{dA_1 dA_2 \cos^4 \beta}{r^2} \quad (3.93)$$

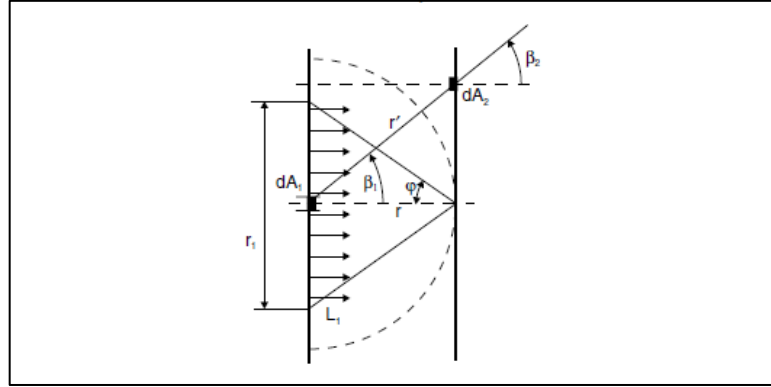
olur.

Işınım E ifadesi:

$$\int d \left(\frac{d\Phi_{12}}{dA_2} \right) = L_1 \frac{dA_1 dA_2 \cos^4 \beta}{dA_2 r^2} = \int L_1 \frac{dA_1 \cos^4 \beta}{r^2} \quad (3.94)$$

$$\frac{d\Phi_{12}}{dA_2} = L_1 \int \frac{dA_1 \cos^4 \beta}{r^2} = L_1 \int \frac{\cos^4 \beta}{r^2} dA_1 \quad (3.95)$$

olarak hesaplanabilir.



Şekil 3.17 Belirli uzaklıklarda dA_1 kaynak alanının dA_2 nesne alanı üzerinden geçen akının hesaplanması[22]

Birkaç yaklaşımda $\cos^4$ olarak bilinen yasaya varmak için kullanılır. A_2 alanı β açısından bağımsız ve r_1 dairesel olduğu varsayılır:

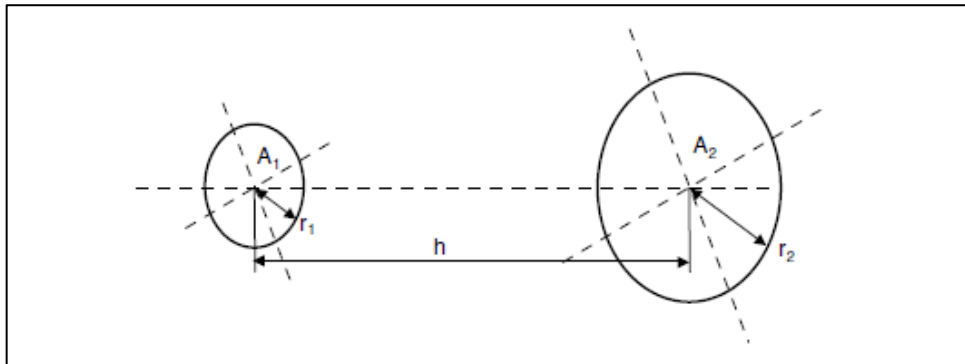
$$A_1 = \pi r_1^2 \quad (3.96)$$

İfadesi ile E parlaklık aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$E = \pi L_1 \Omega_0 \frac{r_1^2}{r^2} \cos^4 \beta \approx \pi L_1 \Omega_0 \sin^2 \varphi \cos^4 \beta \quad (3.97)$$

3.2.2.4 İki Paralel Vinyet

Şekil (3.17) de bir eksen üzerinde merkezleri bulunan iki paralel diskin düzenlemesini gösterir.



Şekil 3.18 Bir eksen üzerindeki iki paralel disk[22]

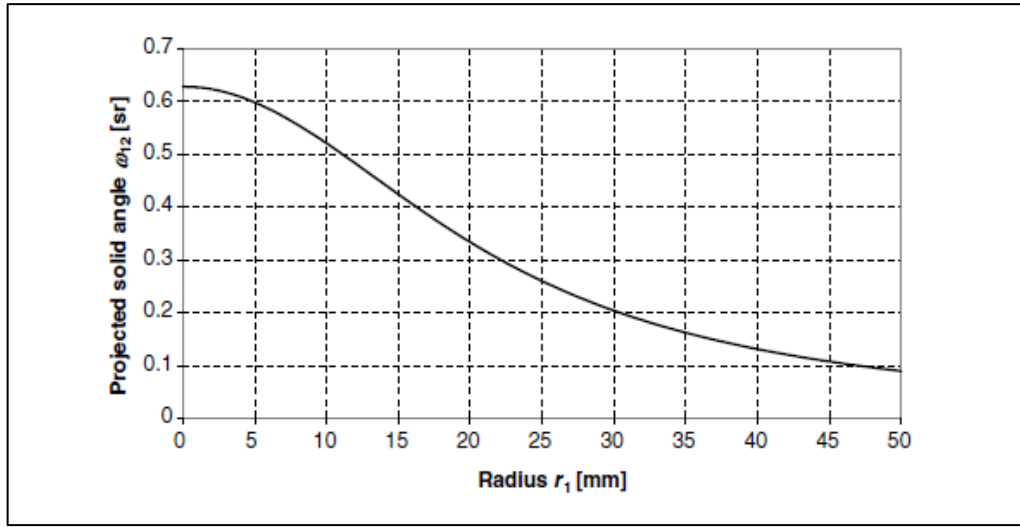
İzdüşürülmüş katı açısı:

$$\omega_{12} = \frac{\pi}{2} \left[X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2} \right] \quad (3.98)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$X = 1 + \frac{h^2 + r_2^2}{r_1^2} \quad (3.99)$$

ifade eder.



Şekil 3.19 İzdüşürülmüş katı açısı[22]

Şekil (3.18) bir örneği ifade eder.

3.2.2.5 Alan Elemanı Ve Dikdörtgen Alan

Şekil 3.19 dikdörtgensel alan ve alan elemanı dA_1 'in düzenlemesini gösterir. Dikdörtgen bir alanın bir köşesi dA_1 alan elemanı ile aynı hat üzerinde yer almaktadır. [22]'e göre izdüşürülmüş katı açısı:

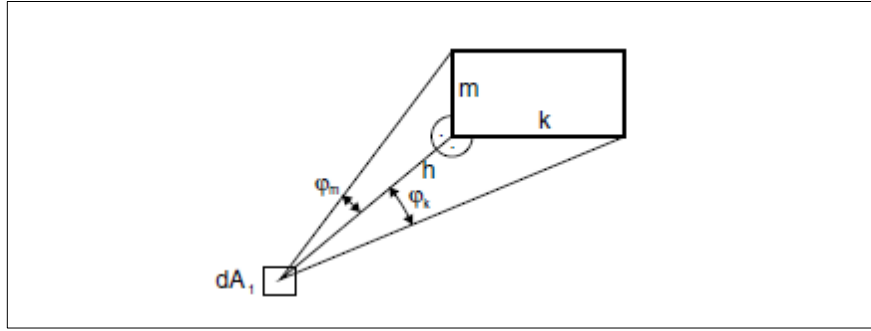
$$\omega_1 = \frac{1}{2} \left[\sin \varphi_k \cdot \tan^{-1} \left(\frac{m}{k} \sin \varphi_k \right) + \sin \varphi_m \cdot \tan^{-1} \left(\frac{k}{m} \sin \varphi_m \right) \right] \quad (3.100)$$

Burada $\sin \varphi_k = \frac{k}{\sqrt{k^2+h^2}}$ ve $\sin \varphi_m = \frac{m}{\sqrt{m^2+h^2}}$ şeklinde ifade edilebilir.

Örnek: Bir Kare Ve Dairesel Delik Engelinin İzdüşürülmüş Katı Açısı

Aynı alan ile bir dairesel açıklık ve bir dikdörtgenin izdüşürülmüş katı açısı arasındaki farkı inceleyeceğiz.

Yuvarlak deliğin izdüşürülmüş katı açısı Denklem (3.100) ile verilir. Optik eksenindeki alan elemanı dA_1 ile bir kare açıklık için izdüşürülmüş katı açısı Şekil (3.19) a göre dört özdeş kareden oluşmalıdır.



Şekil 3.20 Bir Alan Elemanı dA_1 Ve Dikdörtgen Alanın Düzenlenmesi[22]

$$a = m = k$$

Ve

$$\sin \varphi_a = \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \quad (3.101)$$

ifadeleri elde edilir.

Denklem (3.100),

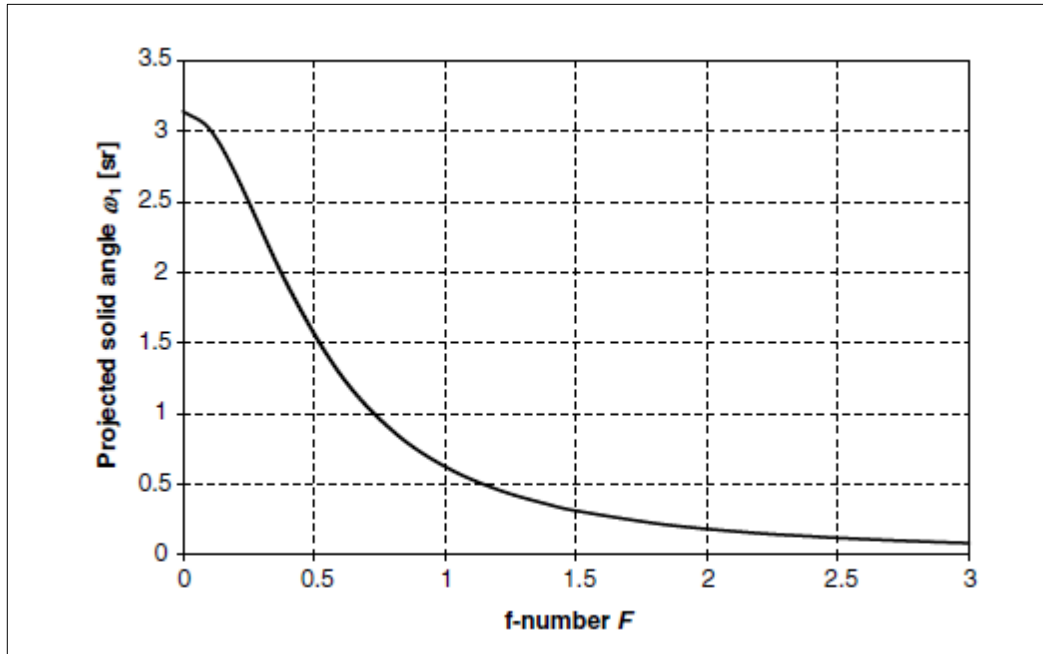
$$\omega_{1,quad} = 4 \sin \varphi_a \tan^{-1}(\sin \varphi_a) \quad (3.102)$$

şeklinde ifade edilir.

Dikdörtgen ve dairesel alan aynı büyüklükte olmalıdır: $\pi r^2 = 4a^2$

$$\sin \varphi_a = \frac{1}{\sqrt{\frac{16}{\pi} F^2 + 1}} \quad (3.103)$$

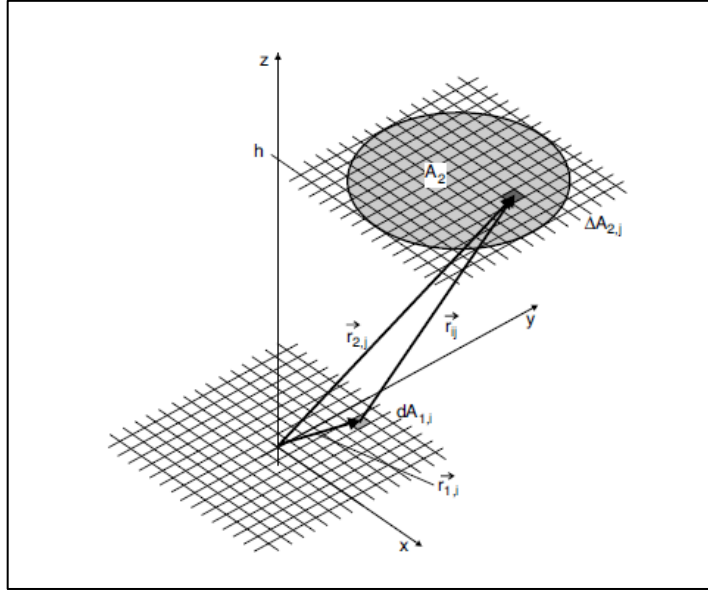
Şekil (3.20) izdüşürülmüş katı açının her ikisini de verir. İzdüşürülmüş katı açısı, alanının formuna bağlı değildir fakat sadece başka alandan ya da başka alan elemanından algılanabilen yüzey alanıdır.



Şekil 3.21 Bir dikdörtgen yada yuvarlak alana ait alan elemanının izdüşürülmüş katı açısı[22]

3.2.3 İzdüşürülmüş Katı Açının Numerik Çözümü

Bir yerinden dikdörtgen alana ilişkin olarak bir dikdörtgen gibi basit bir düzenlemenin izdüşürülmüş katı açısının hesaplanması analitik methodlar kullanılarak çözülemez. Optiksel cihazın giriş kısmı veya yayıcı alan ve sensörün tanımlanmış dairesel yada dikdörtgensel düzenlemesi hesaplanmalıdır. Bunlar birbirine dokunmazlar ve kesmezler. Sonlu alan elemanı prensibi böyle bir düzenleme için basit numerik çözüm olarak kullanılabilir.



Şekil 3.22 İzdüşürülmüş katı açının hesaplanmasının gösterimi[22]

Öncelikle n tane sonlu alan elemanına ayrılabilen $\Delta A_{2,j}$ bağlı olan A_2 alanı, diferansiyel alan elemanı $dA_{1,i}$ 'nin izdüşürülmüş katı açısına bakacağız (Şekil 3.21):

$$\omega_{1,i} = \sum_{j=1}^n V_j \frac{\cos \beta_{1,ij} \cos \beta_{2,ij}}{r_{ij}^2} \Delta A_{2,j} \quad (3.104)$$

V_j faktörü $\Delta A_{2,j}$ alan elemanı A_2 alanına ($V_j = 1$) yada ($V_j \neq 0$) ait olup olmadığını belirtir. A_2 alanı herhangi bir biçimde olabilir ve sonlu kare alan elemanına ayrılmış olabilir.

i = sütun sayısı, j = satır sayısı; $n = i.j$ ve

$$\Delta A_{2,j} = \frac{A_2}{n'} \quad (3.105)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada n' $V_j = 1$ için, bütün alan elemanın sayısıdır.

Vektörler β_1 ve β_2 açıları gibi r_{ij} uzaklığını hesaplamak için kullanılır:

$$\vec{r}_{ij} = \vec{r}_{2,j} - \vec{r}_{1,i} \quad (3.106)$$

Burada $\vec{r}_{1,i}$ ve $\vec{r}_{2,j}$ $dA_{1,i}$ ve $dA_{2,j}$ alan elemanlarının uzaklık vektörleridir. Ayrıca;

$$\cos \beta_{1,ij} = \frac{\vec{r}_{ij} \cdot \vec{e}_{A,1i}}{r_{ij}} \quad (3.107)$$

Ve

$$\cos \beta_{2,ij} = \frac{-\vec{r}_{ij} \cdot \vec{e}_{A,2i}}{r_{ij}} \quad (3.108)$$

ifadeleri yazılır.

Burada $\vec{e}_{A,1i}$ ve $\vec{e}_{A,2j}$ her iki alan elemanı yüzey normali olarak alınabilir.

Eğer $dA_{1,i}$ ve A_2 alanları xy-düzleminde alınırsa hesaplamalar daha kolay olur.
($z = 0$ için $dA_{1,i}$ ve $z = h$ A_2 olur.)

$$\vec{r}_{1,i} = \begin{pmatrix} x_{1,i} \\ y_{1,i} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.109)$$

$$\vec{r}_{2,j} = \begin{pmatrix} x_{2,j} \\ y_{2,j} \\ h \end{pmatrix} \quad (3.110)$$

$$\vec{e}_{A,1i} = \vec{e}_z \quad (3.111)$$

$$\vec{e}_{A,2j} = -\vec{e}_z \quad (3.112)$$

Aynı zamanda $\beta_{1i,k}$ ve $\beta_{2j,k}$ açıları aynı değere sahiptir ve bu durumda Denklem (3.103) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\omega_{1,i} = \frac{A_2}{n'} \sum_{j=1}^n V_j \frac{h^2}{[(x_{2,j} - x_{1,i}) + (y_{2,j} - y_{1,i}) + h^2]^2} \quad (3.113)$$

ya da

$$\omega_{1,i} = \frac{A_2}{h^2} \frac{1}{n'} \sum_{j=1}^n V_j \frac{1}{\left(\frac{r_{ij}^2}{h^2} + 1\right)^2} \quad (3.114)$$

olur.

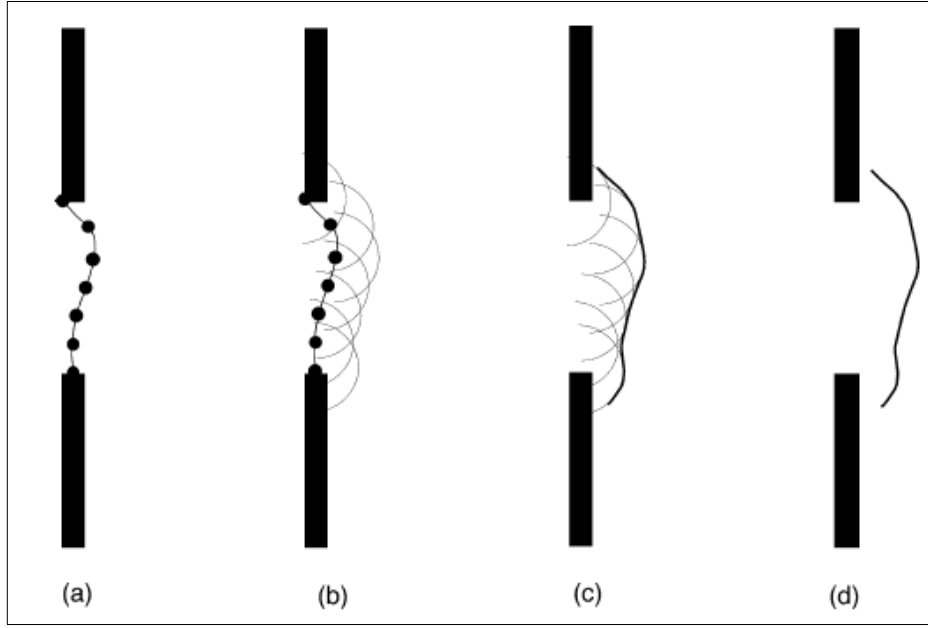
4.1 Difraktif Optiğin Temeli

4.1.1 Dalga Yayılımı Olarak Işığın Davranışı

Işık dar bir yarık içinden geçtiğinde, davranışı ışın yasaları kullanılarak anlatılamaz. Onun yerine, ışık bir yarıktan geçerken dalga cephesinin nasıl yayılacağını belirlemek gereklidir. Hollandalı bilim adamı Christean Huygens basit bir grafiksel yapıyı kullanarak dalga yayılımını göstermiştir. Tekniğinin temeli olarak nokta kaynağını kullandı. Nokta kaynak bütün yönlerde radyasyon yayan küçük bir kaynağın idealleşmiş halidir. Çıkışı ise nokta kaynak etrafında merkezlenmiş küresel dalga cephelerinin yayılımının serisi olarak ele alınabilir. Bu dalga cepheleri sürekli büyüyen ve ışık hızında yayılan küresel kabuklar olarak ele alınabilir.

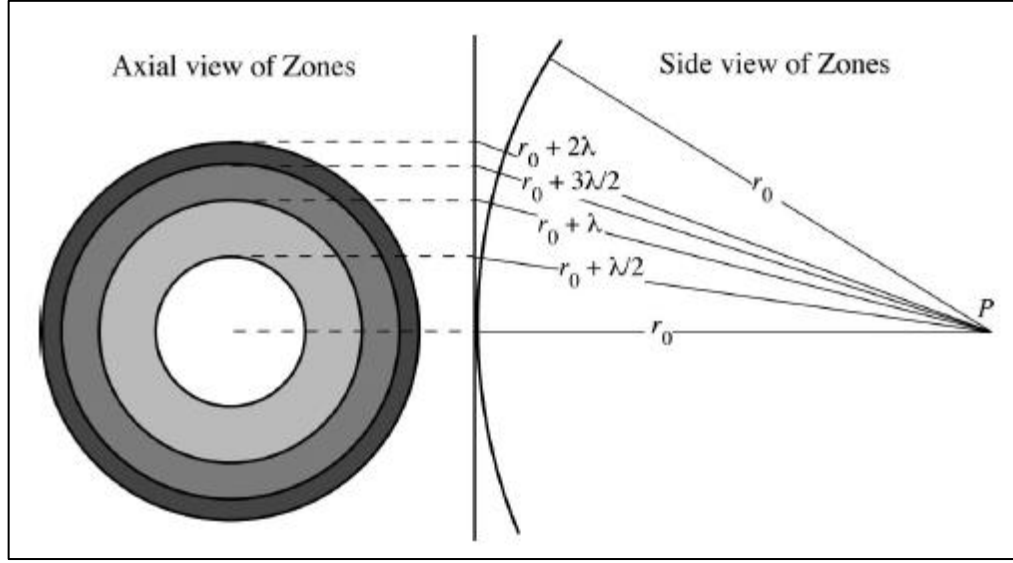
Huygens' ın yapısı uzayda yayılırken dalga cephesinin yapısını belirleyen üç aşamalı prosedürdür. Bu yapı Şekil 4.1'de de gösterilmiştir.

1. Orijinal dalga cephesi nokta kaynakların bir dizisi tarafından eşit bir şekilde yerleştirilir.(Şekil 4.1(a)).
2. Noktasal kaynaklar tüm fazdan bir diğerine küresel dalga cephesi yayımlar (Şekil 4.1(b)).
3. Bir t zamanından sonra dalga cephesinin kılıfı aynı zaman sonra yayılan dalga cephesinin şeklini verir (Şekil 4.1(c) ve Şekil 4.1(d)).



Şekil 4.1 Bir yarığa doğru dalga cephesi yayılımının Huygens Yapısı.[23]

Şekil 4.1(d)'de görüldüğü gibi, Huygens yapısının sonuçlarından birisi yayılan dalganın açıklığın genişliğinin ötesine uzanmadır. Gösterildiği gibi, dairenin çapı açıklık arkasındaki ışığın dağılımını ve gücünü etkileyebilir. Ekran dairesel açıklığın arkasında r_0 mesafesinde P noktasında bulunuyorsa ve merkezine doğru dikey bir çizgi üzerinde ise (Şekil 4.2), açıklıktan P noktası arasındaki mesafe r_0 'dan tamsayı yarım-dalga boyu kadar uzaklıkta olacak şekilde açıklıkta dairesel seriler oluşur.



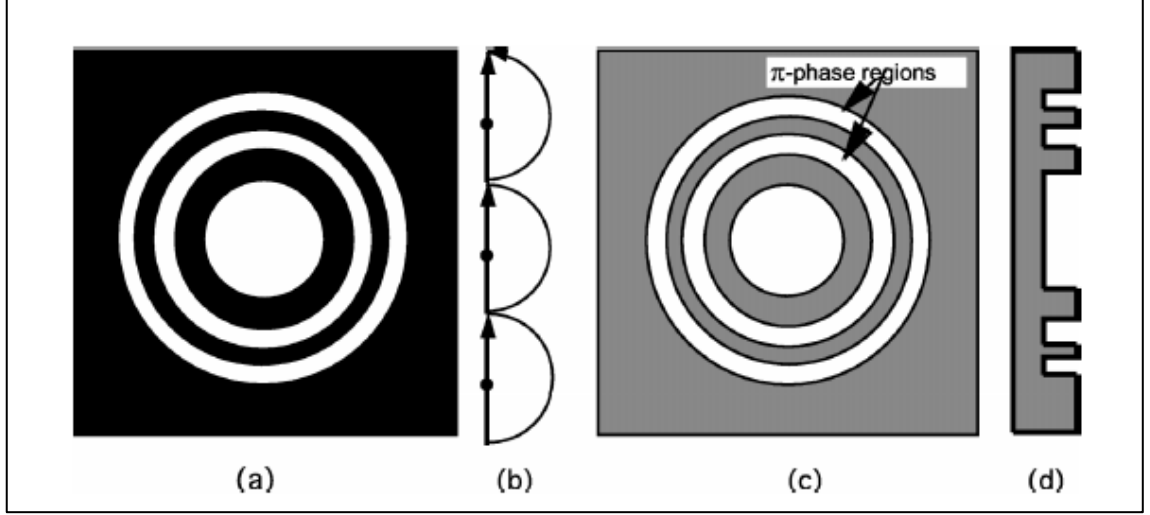
Şekil 4.2 Fresnel Bölgeleri.[23]

Merkezi daire ve bu çevredeki halkasal bölge Fresnel bölgesi olarak adlandırılan alanlar dizisinden oluşur. Bu bölgelerin her biri tam olarak aynı alanı içerdiği gösterilebilir, bu yüzden bu alanlar P de ekran üzerinde düşen ışığın miktarına eşit olarak katkıda bulunur. r_0 'da eksen üstündeki ekranda düşen ışık miktarı üzerinde bölgelerinin her birinin etkisi "fazör" olarak kullanılan başka bir grafiksel teknikte de gösterilebilir. Bu yarım dalgaboyu bölgesinin her biri eşit alanlı alt bölgelerinin bir serisine bölünebilir. Bizim gösterimimizde, bir bölge alt bölgeye bölünebilir. Her bir alt bölgenin ortalama yol uzunluğu aynı faz açısı ($\pi/6$) kadar farklı olduğundan dolayı, alt bölgelerin birleşik etkisi iki komşu alt bölge arasındaki faz açısı ile eşit uzunluktaki vektörlerin bir dizisi olarak çizilebilir. Alt bölgelerin ilk setlerinin vektörel toplamı birinci bölgenin katkısı kadar ekler. İkinci bölge birinci bölgedeki şekilde gösterildiği gibi aynı katkıyı üretir.

Bununla birlikte, birinci bölgedeki her bir alt bölge ikinci bölgedeki alt bölgelerle eş özelliklere sahiptir bu yüzden eğer açıklık bu iki bölgeden oluşuyorsa, bunlar birbirlerini yok edecektir.

Daha fazla bölge eklendikçe, ekranda eksen elektrik alanının genliği sıfıra yakın minimumu ve eğer ekran ve kaynak arasında bir açıklık yoksa ekran üzerine düşen elektrik alanının değerinin yaklaşık olarak iki katı arasında salınacaktır.

Ama diğer her bir bölge bloke edildiğinde, böylece iptal edilen katkılar ihmal edilir mi? Bu durum Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Işık birinci (merkez), üçüncü ve beşinci bölgelere doğru geçirilir fakat ikinci, dördüncü, ve diğer yüksek-sıra bölgelerde bloke edilir [Şekil 4.3(a)]. Bu yüzden bu üç bölgeden gelen katkılar faza ilave edilir [Şekil 4.3(b)].



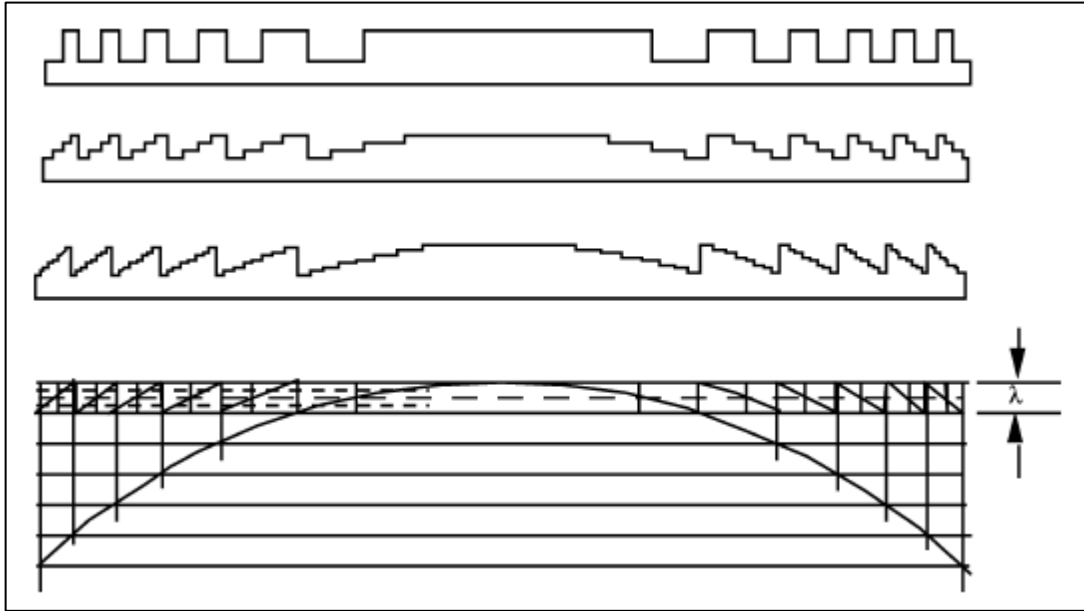
Şekil 4.3 Fresnel Plakaları. (a) Fresnel Bölge Plakaları. (b) Üç tek sayılı bölgelerde fazör katkısı. (c) Fresnel faz plakası. (d) Fresnel faz plakasının merkezine doğru profil.[23]

Işık şiddetinin artışına neden olan bu desenler Fresnel bölge plakası denir ve bu bölge bir difraktif lens olarak davranır.

Bunun yerine alternatif bölgelere engelleme olursa, bu bölgelerin fazı (π) derece kadar kaydırılır. O zaman bu bölgeler tarafından bloke edilmiş ışık tek-sayıllı bölgelerden katkıları eklenir. Bu yöntem P ye yönlendirme olması için eleman üzerine gelen enerjinin daha fazlasına izin verir. Üç tek-sayıllı bölgeden ve üç kaydırılmış bölgeden gelen katkılar faza katılır, böylece P'de eksen-üzeri ışınım engelsiz alan için 144 katıdır. Bu cihaz Fresnel faz levhası olarak bilinir. Burada π -faz kaymasını içeren π -faz bölgesi $\lambda/2(n - 1)$ derinliğini gösterir.

Fresnel faz levhası ışığı odaklayan difraktif optiksel elemandır fakat çok etkin değildir. Daha sonrada göstereceğimiz gibi, geçen ışığın yalnızca %41'i 'lens' ekseninde odaklanmış olacaktır. Bu lens negatif lens olarak davranır, bu yüzden ışığın başka % 59'u elemandan ıraksar.

Ek faz seviyeleri bu iki-seviye yapısına ilave edilirken, geçen enerjinin çoğu P üzerinde odaklanır. Düzgün bir profil sınırlayıcı durumda, kinoform ile birlikte bu difraktif lens için çoklu lensler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

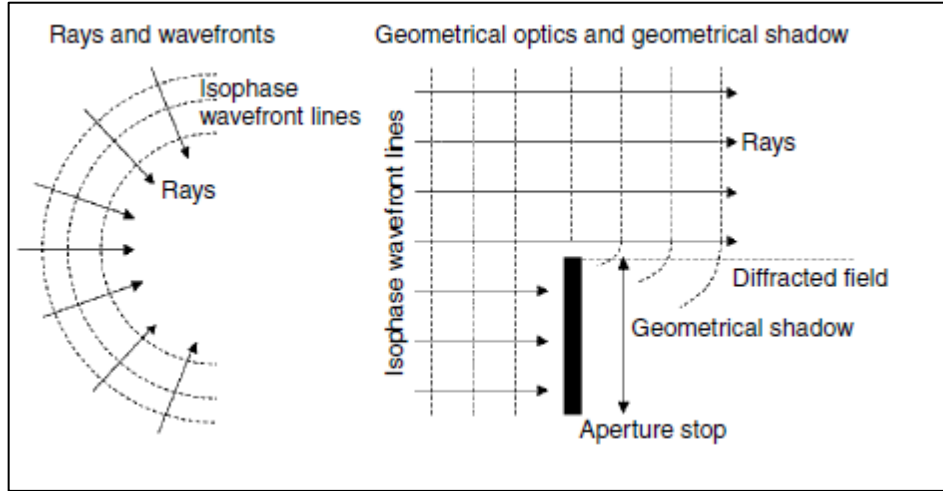


Şekil 4.4 Çok seviyeli yapılar için geçişleri oluşturmak için profilin kırılma yapıları. İki seviyeli Fresnel faz plaka arasında değişen bir difraktif lens profili ve bir kinoform profilindeki dört-seviye ve sekiz-seviye yapılar.[23]

Bir klasik optiksel dizayn programı ile difraktif optikteki ışığın ikili doğasını anlamak mümkündür. Işık bu anlamda ya parçacık doğasına göre yani foton olarak, (lens ve aynaların klasik optiksel dizaynı), yada onun elektromanyetik dalga (fiziksel optiğin temeli olan difraktif optik ve entegre dalga kılavuzları ve hatta fotonik kristal gibi diğer mikro yada nano optiksel elemanların modellenmesinde kullanılır) [23].

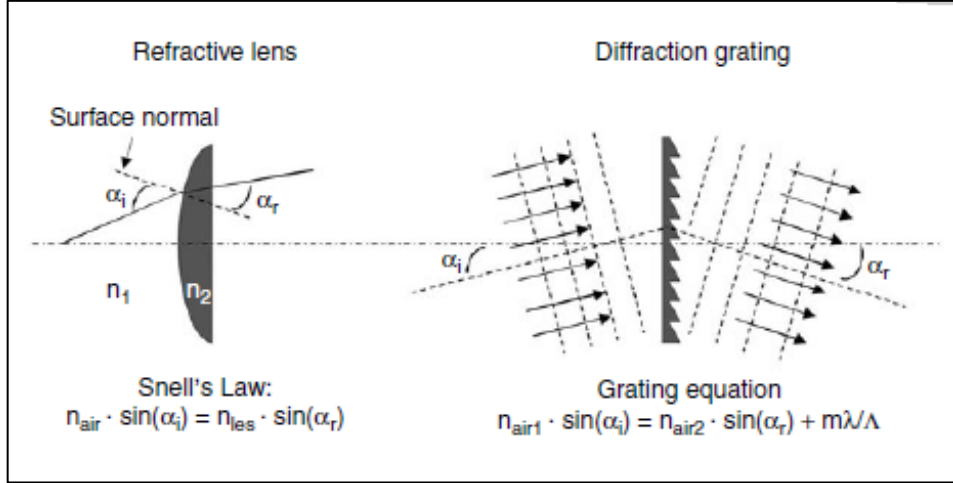
4.1.2 Kırılmadan Kırınım Geçişin Tanımı

Birçok difraktif optiksel elemanın klasik anlamda kendi aralarında benzerlikleri vardır fakat çeşitli yapılan işlemlerden dolayı davranışlarından farklılık olabildiğinden bu benzerlik durumu sadece yüzeyseldir.



Şekil 4.5 Işığın ikili doğası.[23]

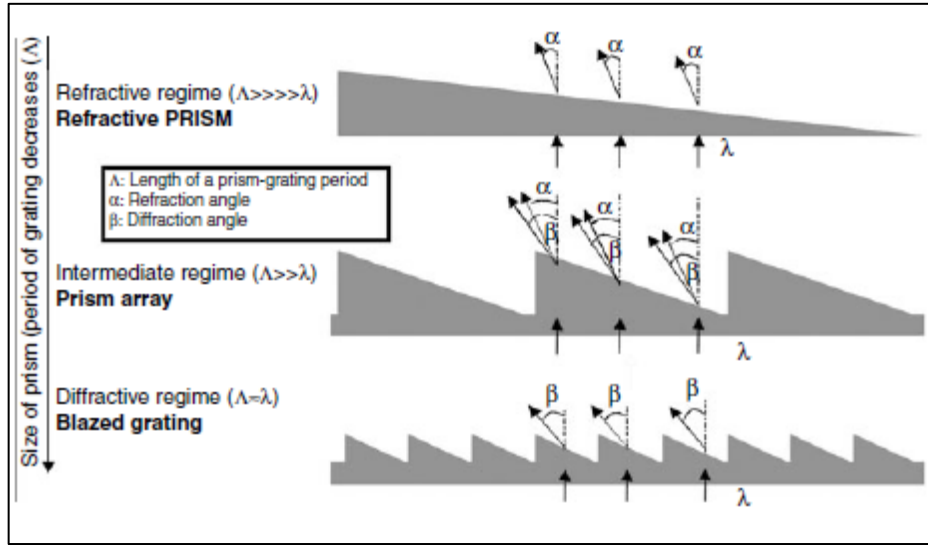
Belirli bir dalgaboyu ve spesifik açı için aynı özel bir yöne gelen ışık ışınının kırılabildiği prizma kırılım parçası ve lineer parlatılmış kırınım ızgarası düşünelim. Kırınım ve kırılım davranışları biri kesin yapılandırmadan uzak bir sapma gösterirse hızlıca farklı olur. Bu yapıların odaklama gücü ve faz profilleri kesin olarak aynı olmasına rağmen, aynı şey difraktif Fresnel lens ve kırılım lensi için de doğrudur. Şekil 4.6'da küçük bir prizma ve bir lineer parlak ızgara için, ışığın kırınım miktarını hesaplayan ızgara denklemi (fiziksel optik) ve Snell denklemi (ışın izleme) gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.6 Kırılmanın Snell Yasası Ve Işığın Bükülmesine Sebep Olan Izgara Denklemi[23]

Bunlardan birisine birçok tek refraktif mikro prizmalar olarak bu ızgaranın çeşitli periyotları düşünülebilir ve bu yüzden tüm parlak ızgaraya ızgara denklemi uygulanamaz (mikro prizmalarının dizisi) fakat Şekil 4.7’te gösterildiği gibi her bir tek mikro prizmaya kırılmanın Snell yasası uygulanabilir.

Yerel mikro prizma yapıları tarafından oluşturulan bükülme açısı ve parlak ızgara tarafından oluşturulan kırınım ile oluşturulan bükülme açısının aynı olmaması ilginç bir durumdur.



Şekil 4.7 Parlatılmış ızgara ve mikro prizma dizi yapısı[24]

Mikro prizma için Şekil 13.4’de gösterildiği gibi (yükseklik, uzunluk ve kırılma indisi) dikkatlice seçilir. Maksimum kırınım verimi parlak ızgara için araştırılır.

Snell yasası verilen bir optiksel arayüzey de kırınımın miktarı tahmin edilebilir ve mikro prizmaya doğru kırılan ışın açısının tanımlamasını verir (Denklem 4.1).

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2) \leftrightarrow \sin(\alpha + \gamma) = n_1 \sin \alpha \quad (4.1)$$

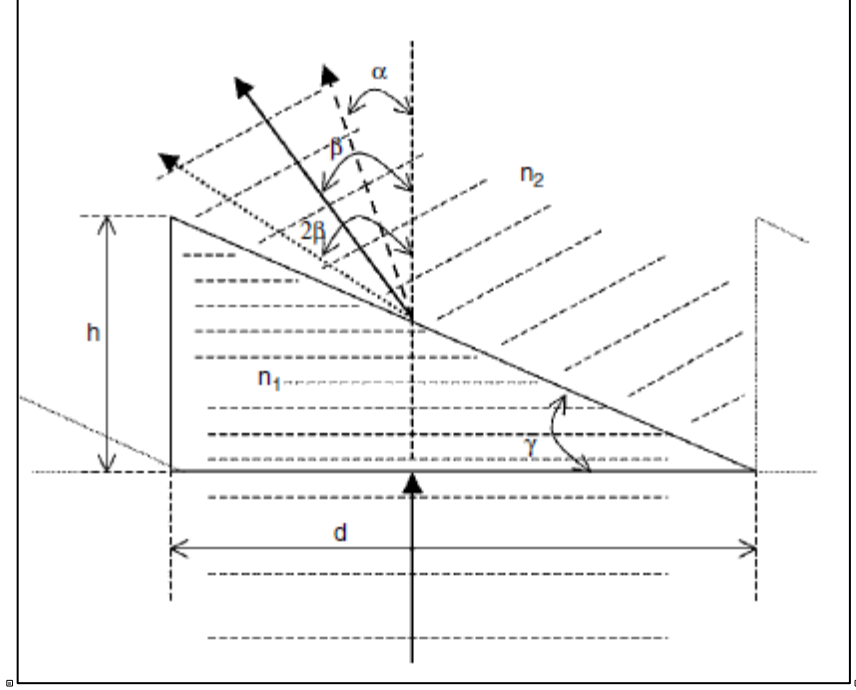
Fiziksel optik, ya da ızgara denklemi, Denklem (4.2) deki mikroprizmanın giriş dizisine doğru kırılan açının tanımını verir:

$$\sin(\beta) = m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (4.2)$$

Sezgisel olarak, $\alpha = \beta$ iken maksimum verimlilik oluşacaktır. (Denklem 4.3):

$$\alpha = \beta \rightarrow h = \frac{\lambda}{n_1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda}{\Lambda}}} \rightarrow h = \frac{\lambda}{n_1 - 1} \quad (4.3)$$

Böylece ışık bükülme verimliliğini arttırmak için aynı kavramı kullanarak ve genel ızgara geometrisini şekillendirerek (ızgara periyodu, oluk yüksekliği, oluk açısı, ve kırılma indisi), her birini özel uygulamalar için herhangi difraktif lens ya da difraktif ızgaranın tipi düzenlenebilir (küresel olmayan lensler, dairesel ızgara vb. sıralanabilir).

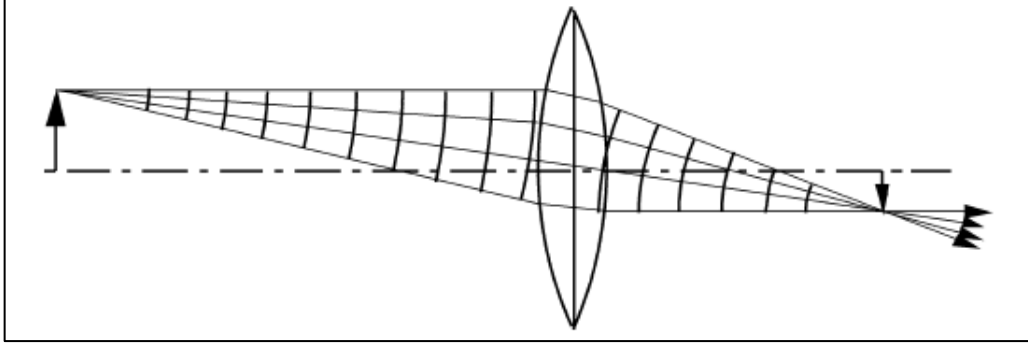


Şekil 4.8 Yerel mikro prizmaların etkisi ve global ızgara etkisi.[24]

4.2 Difraktif optiksel elemanlar

4.2.1 Fresnel Lensler

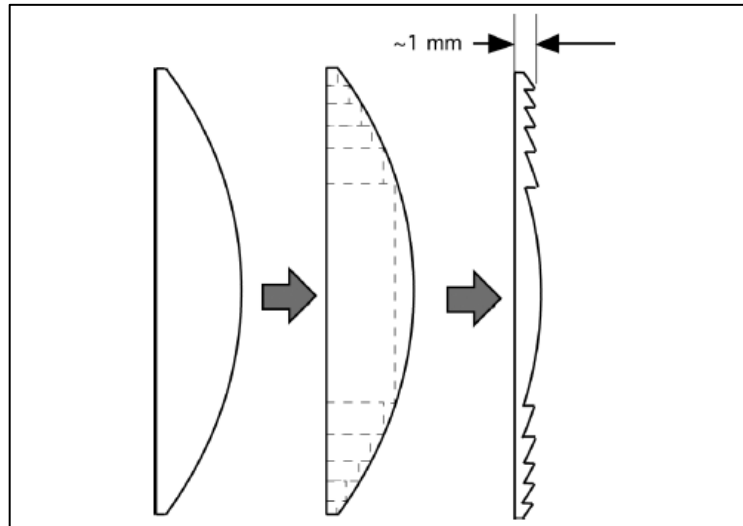
Bir cisim üzerindeki herhangi bir noktanın görüntülenmesi ya Şekil 4.9’da gösterildiği gibi cisim noktasından uzaklaşan dalga cephelerinin tekrar birleşmesinden ya da görüntü üzerindeki noktadan uzaklaşan ışınların tekrar odaklanması şeklinde temsil edilebilir.



Şekil 4.9 Bir Lens ile görüntüleme ya ışın demetlerinin yönlendirmesi ya da bir nesne noktasından uzaklaşan küresel dalga cephesinin birleşmesi olarak temsil edilebilir.[23]

Klasik optiksel elemanlar ve difraktif optiksel elemanlar arasındaki farklılığı anlamamanın bir yolu olarak, Fresnel lensinin işlevi difraktif lens ile karşılaştırılır.

Bir plano-convex lens ve onun Fresnel lens karşılığı Şekil 4.10'da gösterilir. Bir lens üzerine gelen paralel ışınların demeti plano-convex lensin odak noktasında toplanacaktır. Fresnel lenste aynı şeyi yapacaktır. Sonuç olarak, Fresnel lens bir odak noktasına ışık ışınlarının bükmeye katkısı olmayan camın kalın tabakasının çıkararak oluşturulmuş olarak kabul edilebilir. Elemanın optiksel gücünden sorumlu lensin yüzey profili korunur fakat lensin ağırlığı ve hacmi azalır [24], [25], [26], [27].



Şekil 4.10 Bir Plano-Konveks Lensten Fresnel Lens Üretimi. Lensin Yüzey Profili Lensin Hacmi Azalırken Korunur.[23]

Her bir yüzeyde kırılmanın yasasının uygulaması ile iki yüzeye doğru ışın izinin seti olarak süreci anlamak mümkündür.

4.2.2 Difraktif Optiksel Elemanların İçeriği ve Çeşitleri

DOE'ler-analitik tip elemanlar bugünlerde kullanılan en popüler difraktif elemanlardır. Bu elemanlar genellikle optiksel güce sahiptirler. Fresnel lens DOE'nin en basit örneğidir. DOE'ler genellikle analitik yoldan hesaplanır ve birçok durumda düzlem veya eğri olan küresel olmayan faz profilini optimize etmek için ışın takibine dayalı klasik optiksel CAD araçları kullanılır.

Faz profili difraktif elemanı tasarlamak ve dizayn etmek için optiksel yazılıma bağlı olarak birçok formda alabilecek şekilde tanımlamak için kullanılır. Difraktif faz profillerini tanımlamak için bugünün CAD araçlarında kullanılan temelde üç farklı analitik açıklama vardır:

1. Geleneksel faz denklemi:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Cr^2}{1 + \sqrt{1 - (A + 1)r^2C^2}} \right) + \sum_{i=1}^n C_i r^{2i} \quad (4.4)$$

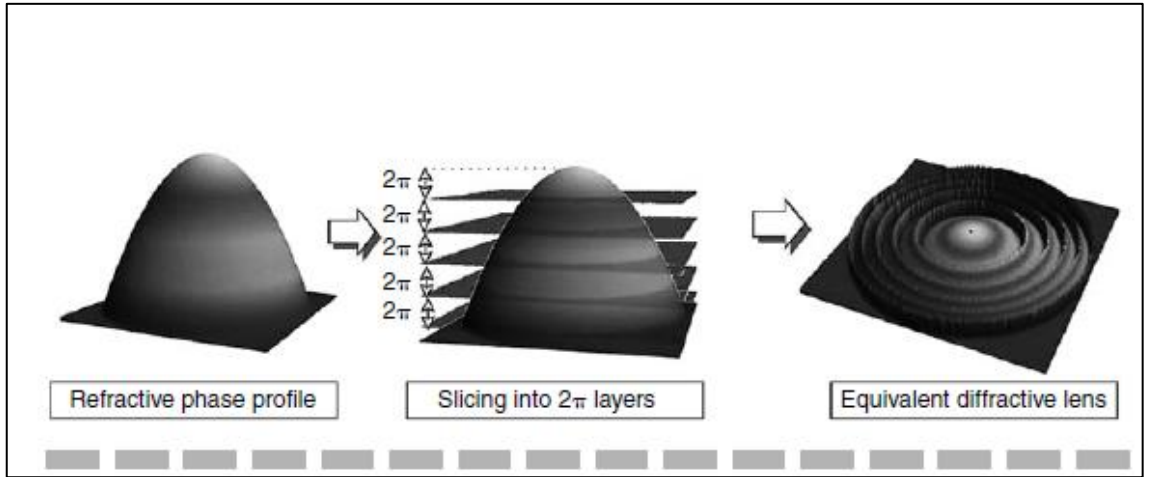
2. Döner simetrik elemanlar:

$$\theta = \sum_{i=2}^n C_i r^i \quad (4.5)$$

3. Döner olmayan simetrik elemanlar:

$$\theta = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n C_i x^i \cdot C_j y^j \quad (4.6)$$

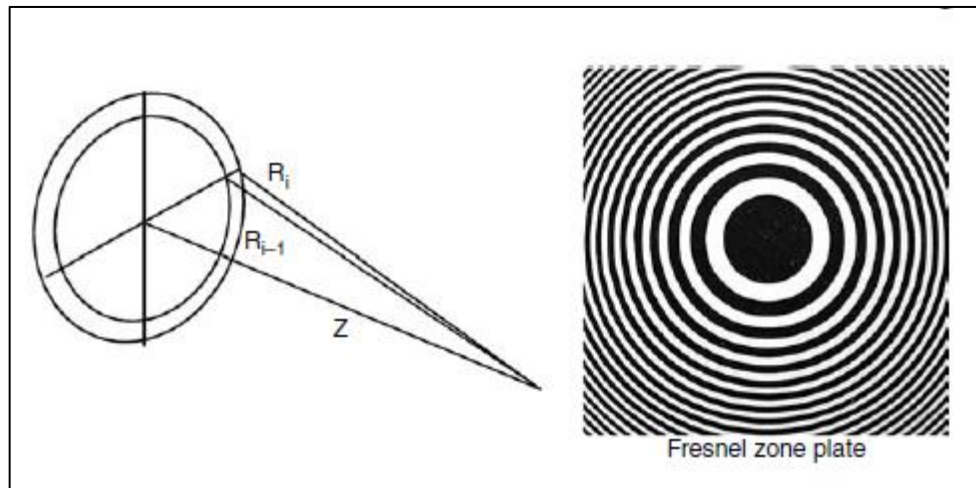
Bir kere küresel olmayan faz profili bu sonsuz ince yüzeyden tanımlanırsa, faz profili Şekil 4.11'de gösterilen süreçte, temel pozitif sıradaki maksimum kırınım verimliliği ile düşünülen dalgaboyu için iki faz yer değiştirme payında dilimlenmiştir.



Şekil 4.11 İlk küresel olmayan faz profilinden difraktif optiksel eleman saçakları.[37]

Küresel Fresnel lensin bölgelerinin pozisyon ve genişliklerinin hesaplamasının basit ve alternatif bir yolu DOE düzleminde hedeflenen ve istenen odak noktasından giden dalgaların direkt olarak tamsayılarını hesaplamaktır (Denklem 4.7 ve Şekil 4.12'e bakınız).

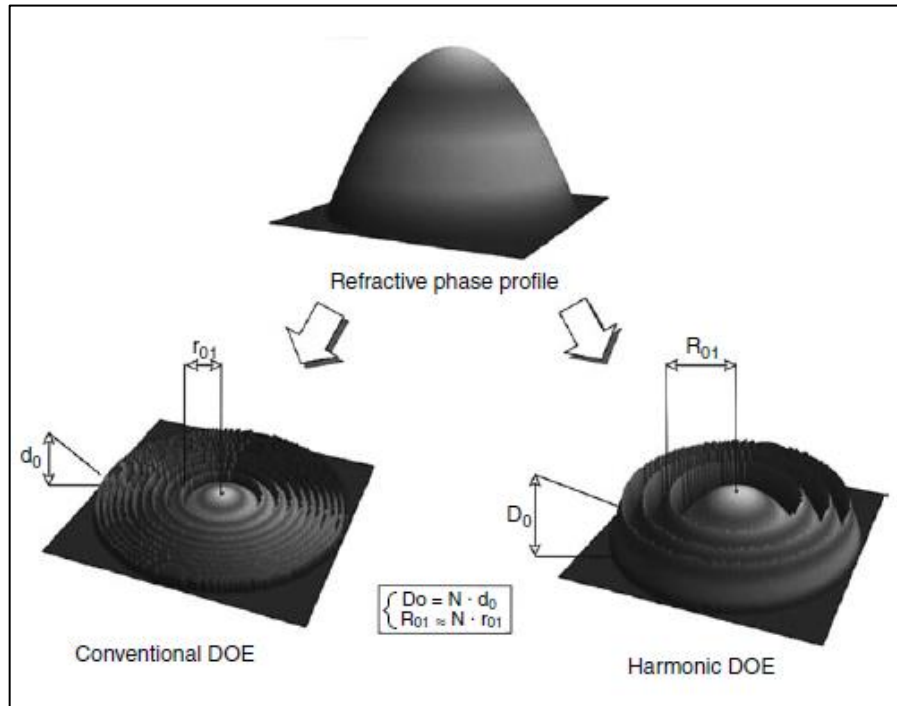
$$R_n = z + i \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (4.7)$$



Şekil 4.12 Fresnel lens (Fresnel bölge plakası)[37]

4.2.2.1 Geniş Band Difraktif Optiksel Elemanlar

Difraktif elemanlar hem odak düzleminde (renk sapmalarını) ve hemde verimlilik değişimleri dalga boyuna göre çok duyarlıdır. Bununla birlikte, dalga boyunun geniş bir aralığı üzerinde işlemek ya da tek dalga boyunun önceden tespit edilmiş bir dizisi üzerinden difraktifleri optimize etmek mümkündür. Bu lensler yaygın olarak çoklu sıra ya da harmonik difraktif lensler olarak adlandırılır. Bu tür lenslerin aşındırma derinliği optimize edilir onun için onun faz farkı her bir dalga boyu için 2 faz yer değiştirmesinin tamsayısını sağlamalıdır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Aynı faz profilinden üretilen dar bant ve geniş bant difraktif lensler.[37]

Bu durum saçak genişliği genişletmesinin avantajına sahiptir ancak derinleşmenin zorluğu oluk derinliğidir.

4.2.2.2 İnterferogram Tipi Difraktif Optiksel Elemanlar

Literatürde kullanılan analitik elemanın bir başka tipi verilen nesne dalgasının ve referans dalgasının girişim deseni olarak hesaplayan faz fonksiyonu interferogram tipi DOE'dir.

Örnek olarak, DOE düzlemi ile α açısı yapan ve normal düzlem dalga cephesi ile girişim yapan bir eğik düzlem referans dalga cephesi düşünelim:

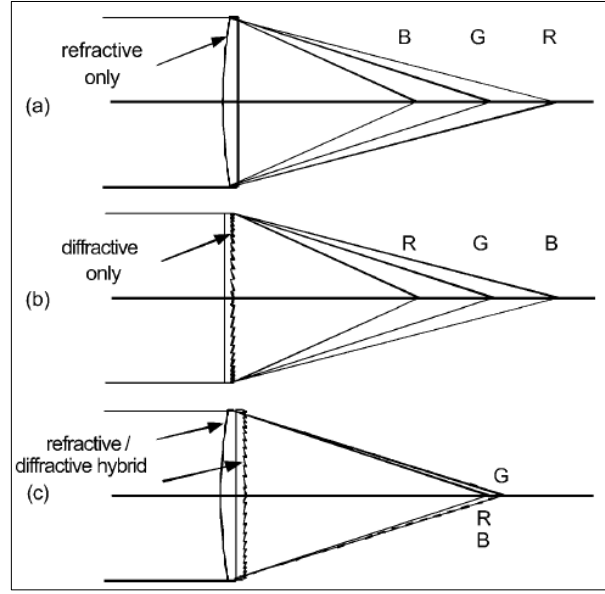
$$t(x, y) = c + 2A_0(x, y) \cdot \cos \left[\varphi_0(x, y) + 2\pi \frac{\sin(\alpha)}{\lambda} x \right] \quad (4.8)$$

Fiziksel girişim deseni şiddet dağılımı olmasına rağmen, elde edilen DOE interferogram saf faz elemanı (faz ya da yüzey kabartma modülasyonu) yada genlik elemanı olarak kaydedilebilir. Bir yüzey kabartma elemanı olarak verimliliğini arttırmak için, bu yapıların her biri sinüzoidal yapılar yerine parlak yapılar olarak saçaklardan hesaplanır.

4.2.3 Hibrit Lensler

Difraktif optiksel elemanlar mevcut optiksel işlevselliği genişletmek ya da ek işlevsellik yerine eklemek için geleneksel optiksel elemanlarla kombinasyonunda kullanılan en iyi elemanlardır. Difraktiflerin spektral dispersiyonu kırılma için çok daha güçlü olmasına rağmen, bir akromatik tekli tipik olarak difraktif güçten daha güçlü kırılma gücüne sahiptir (Şekil 4.14'e bakınız).

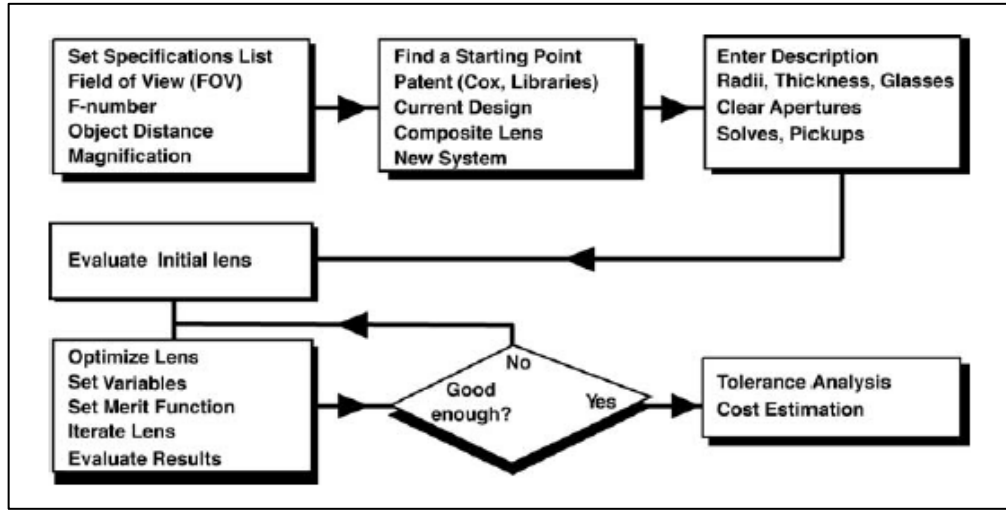
Hibrit refraktif/difraktif optiğin bir başka yeni uygulaması bugün piyasada kullanılan mevcut CD/DVD'lerin çift odak toplayıcı (OPU) lensidir. Bu tip bir lens difraktif profil içeren konveks/konveks kırıcıya sahiptir. Difraktif profil kasıtlı olarak eski ayarına döndürülür öyleki bu profil sadece temel pozitif sırada %50 verimlilik üretir. Bu yüzden bu tür bir lens refraktif profil tarafından işlenerek oluşturulan iki dalga cephesi oluşturur. Çeşitli profiller dikkatli bir şekilde optimize edildiği zaman öyleki refraktif profiller ile birleşik sıfırıncı-sıra bir CD diske doğru 780 nm'de dalgaboyunda küresel sapmalar için ve aynı kırılma profili ile birleşik kırınan temel sıra DVD kaplamaya doğru 650 nm dalgaboyunda küresel sapmalar için karşılaştırılabilir[28],[29].



Şekil 4.14 Hibrit difraktif/refraktif singletlerle tekleştirme.[29]

4.2.4 Lens Dizaynının Temeli

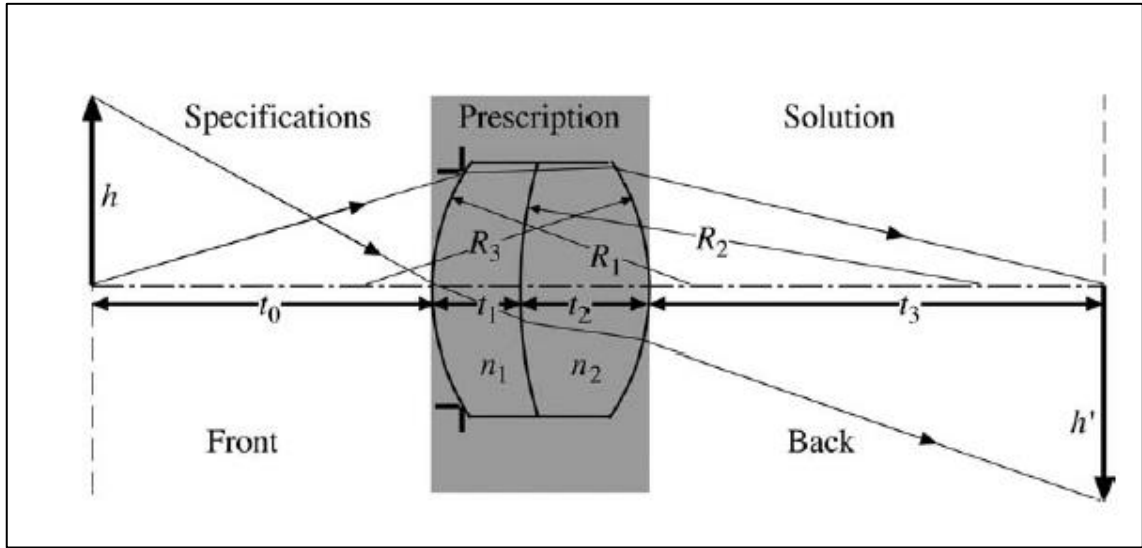
Lens dizaynı Şekil 4.15’de verilir. Optiksel sistemin özelliklerini belirledikten sonra, başlangıç lens dizaynı bir lens dizayn programında tanımlamasına girerek değerlendirilir. Ağırlıklı hedef değerlerinin doğrusal dizi olarak bileşeninin performans özellikleri değer fonksiyonu olarak ayarlanır. Sonra optiksel sistemin parametrelerinin bazıları çeşitlidir ve değer fonksiyonu değerlendirilir. Gerçek parametrelerin istenen değerlerine yaklaştıkça, değer fonksiyonu sıfıra yaklaşır. Yineleme sayısından sonra, tasarım başlangıç noktası ile karşılaştırılarak (optimize edilmiş) geliştirilmiştir.



Şekil 4.15 Lens dizayn süreci.[23]

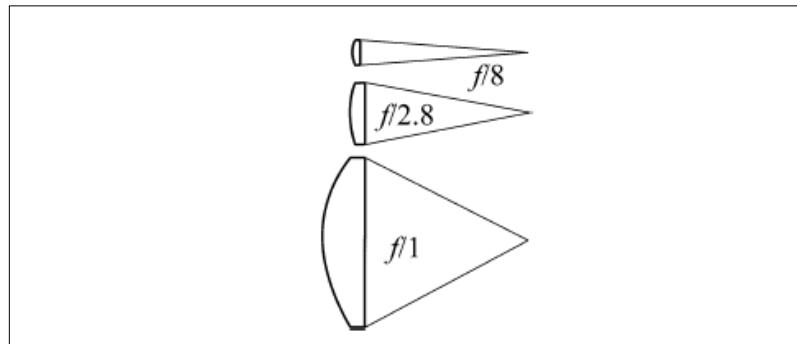
4.2.4.1 Optiksel Sistemin Tasarımı

Herhangi bir lens için iki veri setine ihtiyaç vardır: yönerge olarak bilinen lens dataları ve bu lensin çevresinin özellikleridir (Şekil 4.16). Yönerge herhangi ek yüzey tanımlamalarına ek olarak her bir yüzeyin eğriliğinin yarıçapı, sonraki yüzey ortamının kalınlığı, ortamın kırılma indisi ve yüzeyin açık diyaframının yarıçapını içerir. Tanımlamalar nesnenin yerini, nesnenin çeşitli noktalardaki yüksekliğini (alan noktaları olarak da bilinir), sisteme ışık demetlerinin büyüklüğünü sınırlayan açıklığın konumu (diyafram durağı olarakta bilinir) nesneden görüldüğü gibi diyaframın açıklık engelinin görüntüsü (sistemin giriş gözbebeği olarak adlandırılan) ve sistemde kullanılan dalga boyundan oluşur. Bir kere data bilgisayara girildikten sonra, bir optik tasarım programı tasarlanacak lense doğru belirlenen noktalardan ışınları izler ve görüntünün büyüklüğünü ve yerini oluşturan ve ek alan noktalarının her birinde mükemmellik (sapmalar) dan görüntünün kaymasının çözümü belirlenir.



Şekil 4.16 Bir optiksel sistemin tanımı onun çevresinden ve lens yönergesinden oluşur. Bir ışın iz programı bu tanımlamaya dayalı bir çözüm belirler.[23]

Bir optiksel sistemin özellikleri onun uygulamasından elde edilebilir. Daha önce tarif edilen parametrelere ek olarak, bunların özellikleri genellikle lensin çözünürlüğünün bazı ölçüleri (spot büyüklüğü yada modülasyon transfer fonksiyonu), görüşün açısal alanı yada nesnenin büyüklüğü, ve lensin fiziksel büyüklüğüdür. Bir lensin en önemli özelliklerinden bir tanesi giriş uzayından görüldüğü gibi lensin belirgin açık diyaframı olan giriş gözbebeğinin çapının lensin efektif odak uzaklığına bölünmesi tanımlanan f -sayısı elde edilir. f -sayısı lensin ışığı toplama kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Sapmanın yok olduğu durumda, bu katsayı lensin nihai çözünürlüğünü belirler. Aynı odak uzaklığına ve farklı f -sayılarına sahip bazı lensler Şekil 4.17’te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.17 Farklı f -sayıları ile lenslerin karşılaştırılması[23]

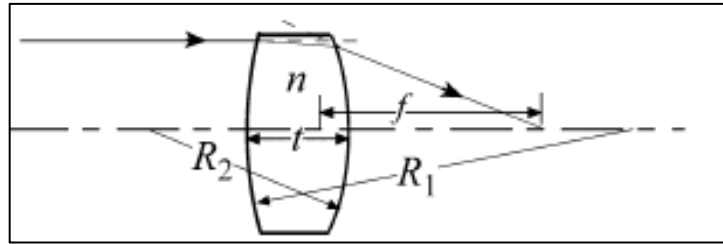
Güncel optiksel tasarım programları sadece tasarım analizi yapmaz, fakat aynı zamanda istenen performansın ölçülerini sağlayan dizaynı optimize eder. Lens sonra eldeki ışın en iyi performansı sağlamak amacıyla program tarafından ‘‘düzeltilmiş’’dir. Bu durum odak uzaklığı ve f-sayısı gibi bazı kesin özellikleri sağlarken lens parametrelerinin bazılarını değiştirmeye izin verir.

4.3 Klasik Lens Denklemleri

Basit kırıcı lens elemanının geometrisi Şekil 4.18’te gösterildiği gibidir. R_1 ve R_2 eğrilik yarıçapına, n kırılma indisi, merkezi kalınlığı t ile tek bir lensin odak uzaklığı:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{t(n - 1)}{nR_1R_2} \right] \quad (4.9)$$

olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.18 Kalın bir lensin parametreleri.[23]

Eğer lens kalınlığı onun odak uzaklığı ile karşılaştırıldığında çok küçük ise ($t \ll f$), bu lens tipi kalınlığın hesaplanmasına gerek olmayan ince bir lens olarak yaklaşımda bulunabilir. Bu durumda Denklem 4.9’deki üçüncü terim çıkarılır ve ifade lens üretici formülüne indirgenir.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.10)$$

Lens üreticisinin formülü iki ek tanımlama yapılarak yazılmış olabilir. Odak uzaklığının tersi, $\phi = 1/f$, lensin optiksel gücünü ifade eder ve eğrilik yarıçapının tersi, $c = 1/R$, yüzeyin eğriliğidir. Bu kısaltmalar ile güç ifadesi;

$$\phi = (n - 1)(c_1 - c_2) = (n - 1)c \quad (4.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $c = (c_1 - c_2)$ lensin net eğriliğidir.

n, c_1 ve c_2 nin bazı kombinasyonları diğerlerinden daha iyi olmasından dolayı, lens dizaynında eğriliğin sistematik araştırması lensin optimize edilmesini sağlar. Bu araştırma lens eğilmesi olarak adlandırılan ve lensin şeklinin değişimine eşdeğerdir. Bu optimizasyonun hepsi bilgisayar ya da kağıt parçası üzerinde ucuz bir şekilde yapılabilir.

Plano-konveks lens (dışbükey mercek) durumunda ($c_2 = 0$; $R_2 = \infty$), güç ve odak uzaklığı;

$$\begin{aligned} \phi &= (n - 1)(c_1 - c_2) = (n - 1)c_1 \\ &= R_1/(n - 1) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Bu basit denklem bir optiksel sistemdeki renk sapmasını düzeltmek için ve geleneksel optiksel elemanlar ile onların difraktif benzerleri ile karşılaştırmak için uygundur.

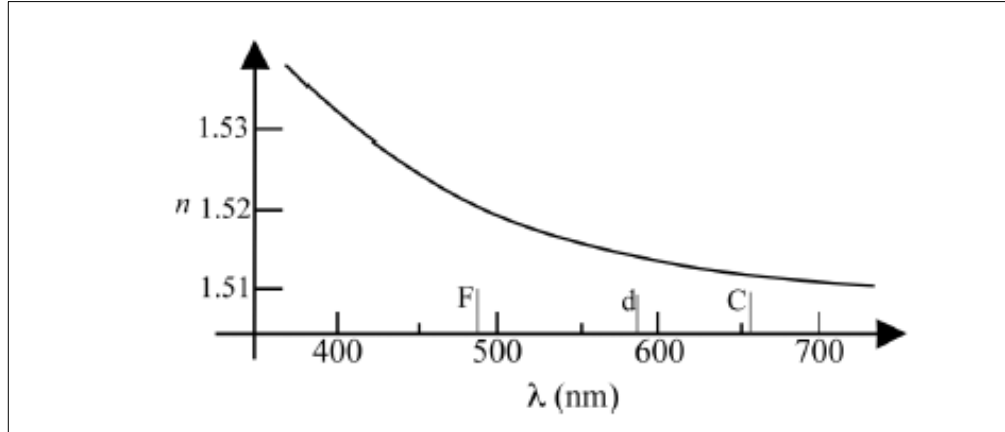
4.4 Abbe Sayısı Ve Renk Sapması

Lens için bir kere yönerge odak uzaklığı, giriş açıklığı için girilir ve f –sayısı belirlenir. Eldeki iş için uygun olup olmadığını görmek için lensin performansı değerlendirilmelidir. Birinci-derece hata dalgaboyu ile odak uzaklığının değişimini tanımlayan renk sapmasıdır. Şimdi lens sisteminde bu etkiyi azaltmak için verilen metotları izleyerek renk sapmasının nedenini ele alacağız.

Yüzeyin eğriliği ile birlikte, camın kırılma indisi lensteki ışık ışınının eğrilmesinden sorumludur. Denklem (4.11)'te belirgin olarak, bir lensin gücü kırılma indisine lineer bağlıdır:

$$\phi = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.13)$$

Fakat kırılma indisi Şekil 4.19’da görüldüğü gibi camın bir özelliğidir ve aynı zamanda camdan geçen ışığın dalga boyunun fonksiyonudur. Dalgaboyu ile kırılma indisinin bu varyasyonu camın dispersiyonu olarak bilinir.



Şekil 4.19 Bir cam için dispersiyon eğrisi. Dalga boyları dispersiyonun miktarını ölçülmesi için yararlı olan özel dalgaboyunu temsil eden eğri üzerinde F, d ve C olarak etiketlenir.[23]

Bir malzemenin dispersiyonunun miktarı yollarının sayısı ile karakterize edilebilir, ilgili bölge genelinde üç dalgaboyunda refraktif indislere dayalı bir tanımı olan Abbe V-sayısı en genel tanımıdır:

$$V = \frac{n_d - 1}{n_C - n_F} \quad (4.14)$$

Merkez, uzun ve kısa dalga boylarında spektrumun görünür bölge;

$\lambda_d = 589.67 \text{ nm}$, helyumun yeşil çizgisi,

$\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$, hidrojenin kırmızı çizgisi,

$\lambda_F = 485.1 \text{ nm}$, hidrojenin mavi çizgisidir.

V sayısı küçük olan camlar daha çok dağıtıcı özelliğe sahiptir çünkü Denklem (4.14)'deki bölen sayısı daha büyük olacaktır. Bu kavramın elektromanyetik spektrumun herhangi bir bölgesinde uygulanabilir olmasına rağmen, burada verilen örneklerin hepsinde görünür dalga boyu (C, d, F) bölgelerinde uygulanacaktır.

Buradaki dalga boyunun her birinde bir lensin gücünü ifade etmek için lens üretici formülün Denklem (4.11)'i kompakt formunu kullanabiliriz:

$$\phi_d = (n_d - 1)(c_1 - c_2) = (n_d - 1)c \quad (4.15)$$

$$\phi_C = (n_C - 1)(c_1 - c_2) = (n_C - 1)c \quad (4.16)$$

$$\phi_F = (n_F - 1)(c_1 - c_2) = (n_F - 1)c \quad (4.17)$$

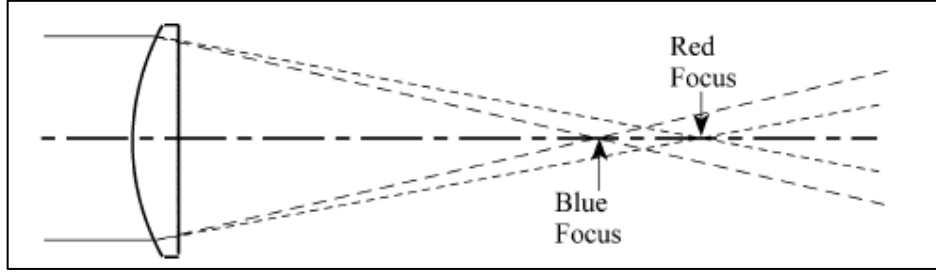
Renk sapmasının ölçüsü uzun ve kısa dalgalı boyları arasındaki güç farkı:

$$\Delta\phi = \phi_C - \phi_F = (n_C - n_F) \quad (4.18)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu renk sapması merkez dalgalı boyunun gücüne bölünürse aşağıdaki gibi bir sonuç elde edilir:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi_d} = \frac{(n_C - n_F)c}{(n_d - 1)c} = \frac{n_C - n_F}{n_d - 1} = \frac{1}{V_d} \quad (4.19)$$

Refraktif indisi daha kısa dalgalı boylarında daha büyük olduğundan, lensin gücü daha fazladır ve odak uzaklığı daha uzun dalgalı boylarında daha kısa olur. Bunun anlamı, örneğin, Şekil 4.20'de de gösterildiği gibi mavi ışık kırmızı ışığa göre lense daha yakından odaklanır. Bu durumun difraktif yüzeyin eklenerek ya da farklı dispersiyonlara sahip lenslerin kombinasyonunu kullanarak nasıl düzeltilebileceğini göreceğiz.



Şekil 4.20 Tek bir lensin renk sapması.[23]

4.4.1 Renk Sapmasının Düzeltilmesi

Renk sapmaları toplam gücün gerekli güce eşit olduğu lenslerin birleşiminden fakat toplam dağılmanın sıfır olduğu durum için düzeltilebilir. Örneğin, Şekil 4.21’de kontakt da verilen iki lensin ϕ_a ve ϕ_b optiksel güçleri, ve ϕ son lensin toplam gücü olmak üzere:

$$\phi = \phi_a + \phi_b = (n_a - 1)c_1 + (n_b - 1)c_2 \quad (4.20)$$

şeklinde ifade edilir. Burada n_a ve n_b iki lens için ($n_a = n_{da}$; $n_b = n_{db}$) λ_d merkez dalgaboyunda kırılma indisidir ve c_1 ve c_2 herbir lensin eğriliklerinin toplamını ifade eder, $c_a = (c_1 - c_2)_a$ ve $c_b = (c_1 - c_2)_b$. Tek lenslerin gücü ve kırılma indisleri seçilir böylece lenslerin tek renk sapmalarının toplamı çıkarılır:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_a - \Delta\phi_b = 0 \quad (4.21)$$

Burada tek renk sapmasının çıkarma işlemi;

$$\Delta\phi_a = \phi_{c_a} - \phi_{F_a} = (n_c - n_F)_a c_a \quad (4.22)$$

$$\Delta\phi_b = \phi_{c_b} - \phi_{F_b} = (n_c - n_F)_b c_b \quad (4.23)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $c_a = f_a/(n_a - 1)$ ve $c_b = f_b/(n_b - 1)$ ’dir. O halde;

$$c_a = 1/(n_a - 1) \phi_a \quad (4.24)$$

$$c_b = 1/(n_b - 1) \phi_b \quad (4.25)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (4.22) içerisine bu lens eğrilikleri koyulursa;

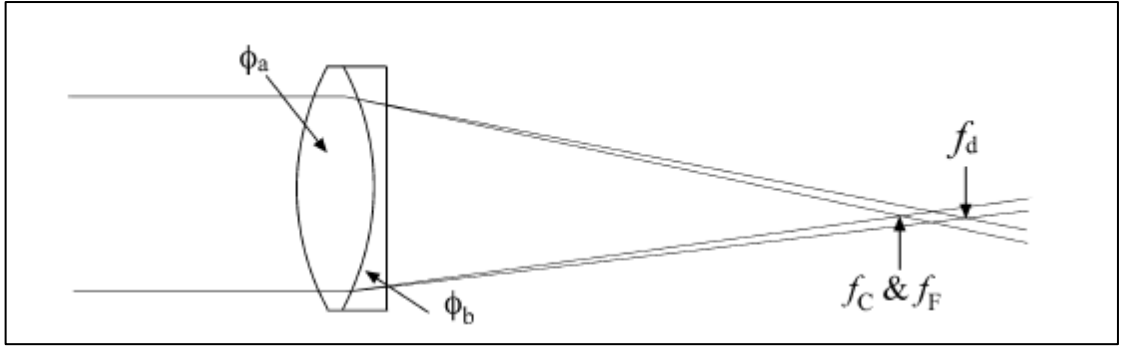
$$\Delta\phi = (n_F - n_C)_a c_a + (n_F - n_C)_b c_b = 0$$

$$(n_F - n_C)_a c_a = -(n_F - n_C)_b c_b$$

$$\frac{(n_F - n_C)_a}{(n_a - 1)\phi_a} = -\frac{(n_F - n_C)_b}{(n_b - 1)\phi_b}$$

$$\frac{1}{V_{d_a}\phi_a} = -\frac{1}{V_{d_b}\phi_b} \quad (4.26)$$

ifadesi elde edilir.



Şekil 4.21 Renk sapmasının düzeltilmesi.[23]

Bütün camların V-sayısı pozitif iken, lenslerin gücü zıt işaretli olmalıdır. Bu yüzden akromatik çiftler biri pozitif ve biride negatif lensden oluşur.

Uzun ve kısa dalgalıların da çiftin gücü (ve odak uzaklıkları f_C ve f_F) aynı olmasına rağmen, her ikisi de Şekil 4.21’de de görüldüğü gibi merkez dalgalıboyunun (ve odak uzaklığı) gücünden farklıdır. Renk sapmasının bu tipi ikincil renk olarak bilinir [30].

4.5 Difraktif Lens Dizaynı

Esas olarak, difraktif lens temeli Fresnel faz plakadır. Bu bölümde tek-yüzey difraktif lens tasarımı ve onun sınırlamaları yaklaşımı tasvir edilecektir.

Bir mühendis ya da bilim adamı difraktif optiksel lens tasarımına başlarken, aklında bazı özel hedefleri vardır. Gerekli performansı kurmak için bazı durumlar şu şekilde sıralanabilir:

1. İkili, çok seviyeli, sürekli (kinoform) üretilebilen profilin türüne göre verimlilik belirlenir.
2. Renk sapması ve termal duyarlılık verimliliğini arttırmak ve/veya sapmaları azaltmak için gerekli dalga boyu cephesinin optimizasyonu.
3. Sınırlamalara ve toleransa mevcut yeterliliğin üretimi.

4.5.1. Faz Profili

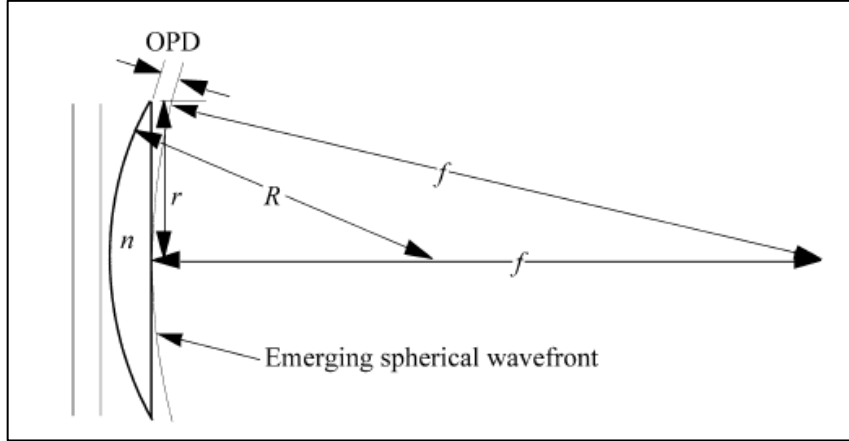
Mercek tarafından oluşturulan faz farkı her bir noktada düzlem dalga arasındaki farklılıktır ve bu faz farkı lens aracılığıyla ilerlerken gecikmeden dolayı oluşur. Lensin optiksel ekseninden herhangi bir uzaklığı, t eksenel kalınlıktaki bir lensi kateden faz farkı;

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nt}{\lambda} - \frac{2\pi t}{\lambda} = 2\pi(n - 1)t/\lambda \quad (4.27)$$

şeklinde ifade edilir. Eksenden herhangi bir r uzaklığında Şekil 4.22'deki lensin kalınlığı;

$$t = r^2/2R \quad (4.28)$$

şeklinde olan sapma denklemi tarafından ifade edilir.



Şekil 4.22 Difraktif lens için geçiş yerini belirlemek için kullanılan geometri[30]

Bu yüzden lens tarafından oluşturulan faz profili;

$$\Delta\phi(r) = 2\pi(n - 1)r^2/2R\lambda \quad (4.29)$$

şeklindedir.

Bu durum difraktif optikte bizi ilgilendiren bir durumdur. Optiksel yol farkı (OPD) dalga cephesi üzerindeki çeşitli noktalarda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$OPD = \frac{\Delta\phi(r)\lambda}{2\pi} = (n - 1)r^2/2R \quad (4.30)$$

Lensin odak uzaklığı Pisagor teoremi kullanılarak Şekil 4.22'den hesaplanabilir.

$$(OPD + f)^2 = r^2 + f^2 \rightarrow OPD = r^2/2f \quad (4.31)$$

4.5.2 Tek Optiksel Eleman Tasarımı Oluşturma

Bir lensin faz profilindeki geçişlerin yerlerini hesaplamak için kullanılabilecek bir dizi araç vardır. Bazıları ikili maskeler üretebilir. Bu işlemlerin çoğu kullanıcı tarafından oluşturulan bir program ile yapılabilmesine rağmen, bu tür çabaların oluşturacağı zorlukları giderebilecek programlarda vardır.

CODE V, OSLO ve ZEMAX gibi lens dizayn programları belirli hedef değerleri için keyfi faz profilinin katsayılarını hesaplayacaktır. Programların bazıları simetrik faz profili kullanır. Bütün programlar sapmaları en aza indirerek geleneksel lens üzerinde

difraktif yüzeyin bir arada birleştirmek ya da difraktif lensi optimize etmeye çalışır. Bazı durumlarda, program faz profilini kıracak ve üretim için veri maskelerini sağlayacaktır. Mathematica gibi hesaplamalı programlar basit tek elemanlar için maske oluşturabilir ve faz geçişlerini hesaplayabilir. Işın bölücü, deflektör ve genel dönüşümler gibi geleneksel olmayan optiksel elemanlar farklı hesaplamalar gerektirir.

4.5.2.1 Kinoform Lensin Tasarımı

Herhangi bir zayıflama veya yansımanın olmadığı bir optik eleman bir giriş dalga cephesini alan ve dalga cephesinin faz profilini değiştirerek istenen çıktıya dönüştüren genel bir dalga cephesi dönüştürücüsü olarak düşünülebilir.

Faz-optiksel elemanın transmisyon fonksiyonu bileşenin merkezine r radyal mesafe r ise $t(r) = e^{i\phi(r)}$ olarak yazılabilir. Lens halinde, faz fonksiyonu:

$$\phi(r) = (2\pi/\lambda_0)(n_0 - 1)r^2/2R \quad (4.32)$$

yaklaşık olarak verilebilir. Aynı zamanda bu ifade optiksel yol farkı (OPD) olarak ifade edilirse;

$$OPD = (n_0 - 1)r^2/2R \quad (4.33)$$

olarak yazılabilir.

Elemanın her biri belirtildikten sonra faz profilinin belirtilmesi gerekmektedir. Daha öncede belirttiğimiz gibi, difraktif optiğin performansı ve fonksiyonunu analiz ederken bilinen son derece yararlı bir basitleştirme vardır. Her biri iki bağımsız değişkenden

oluşmuş profil $\phi(r)$ gibi düşünülebilir. Bunlar oyuk derinliği ve geçiş noktalarının oluşturulmasıdır.

Oyuk derinliği elemanın çalışma dalgaboyunu belirler. Bu derinlik;

$$d = (2^N - 1)\lambda/[2^N(n - 1)] \quad (4.34)$$

eşittir. Burada N maskeleme sayısıdır ve n profili imal edilen alt tabakanın kırılma indisidir. Her bir maske profilden ek $\lambda/[2^N(n - 1)]$ ile oyulur.

Kinoform limitinde, N maskelerinin sayısı sonsuza gider ve oyuğun genel derinliği;

$$d = (2^N - 1)\lambda / [2^N(n - 1)] \quad (4.35)$$

$$d = \frac{2^N \lambda}{2^N(n - 1)} - \frac{\lambda}{2^N(n - 1)} \rightarrow \lambda / (n - 1)$$

yaklaşımı uygulanabilir.

Profilin diğer kısmı kesir veya 2π tarafından faz profilinin her bir değişimi için geçiş noktalarının yerlerini oluşturmaktadır.

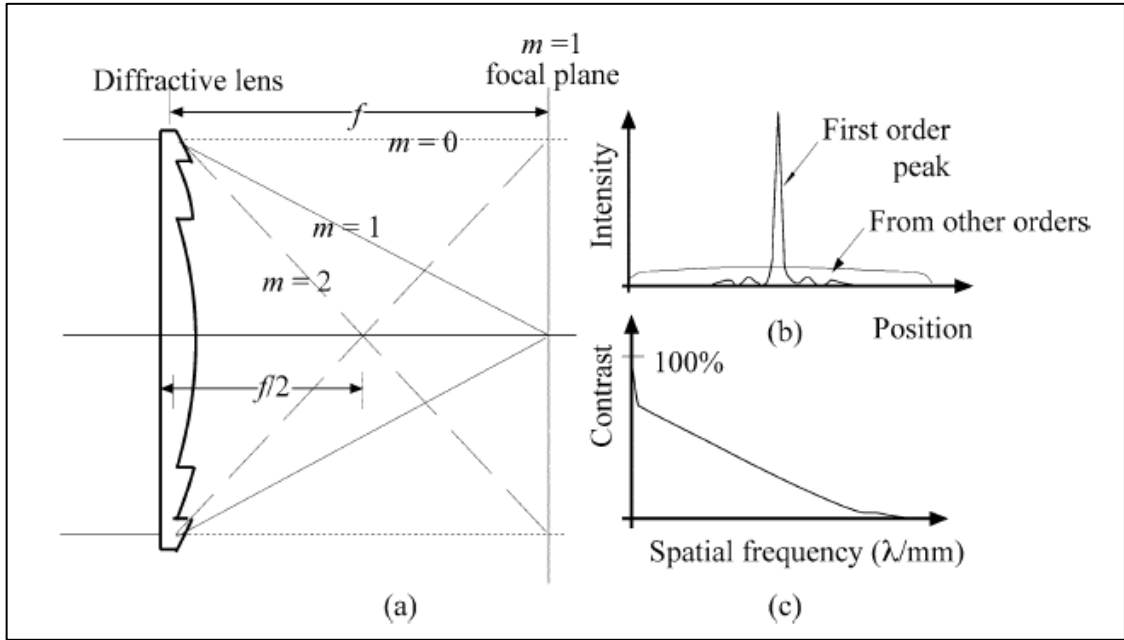
Geçiş noktalarının geometrisi ve konumu lens, ızgara ya da genel dalga cephesi dönüştürücü olan difraktif elemanın fonksiyonunu belirler.

4.5.3 Difraktif Lenslerin Verimi

Analizin bir yolu olarak ızgara, difraktif lens gibi davranmaktır. Eğer lens mükemmel olarak oluşmuşsa yani ızgara dalgaboyu için doğru şekilde parlamışsa, ışığın tümü birinci sırada kırınıma uğramış olmalıdır.

Bir difraktif lense gelen ışığın birleştirilmiş ışın etkisi Şekil 4.23 (a)'da gösterilmektedir. Lensin üç düşük sırası için ışık alanının kenarları şekilde de gösterilir. Birinci sıradaki ışık odak noktasına yönelirken, ikinci-sıra katkı odak uzaklığının yarısında odaklanır ve daha sonra odak düzlemini aydınlatmak için ıraksar. Kırınıma uğramayan (sıfırıncı-sıra) ışık burada bir lens olmadığı sürece devam eder. Difraktif lensin odak düzleminde, ışığın hemen hemen tümü birinci-sıra pikte bulunur.

Şekil 4.23 (b), fakat sıfırıncı sıra ve daha yüksek-ışın katkıları zayıf, geniş bir arka planda kendini gösterir. Bunun görüntü kalitesi üzerinde az bir etkisi vardır, fakat görüntü kontrastı üzerine etki yapar. Bu durumda modülasyon transfer fonksiyonu Şekil 4.23 (c) için sıfır-uzaysal frekansların aksine dik düşüş olarak kendini gösterir. Bu yöntem lensin performansının karakterize edilmesinin standart yöntemidir.

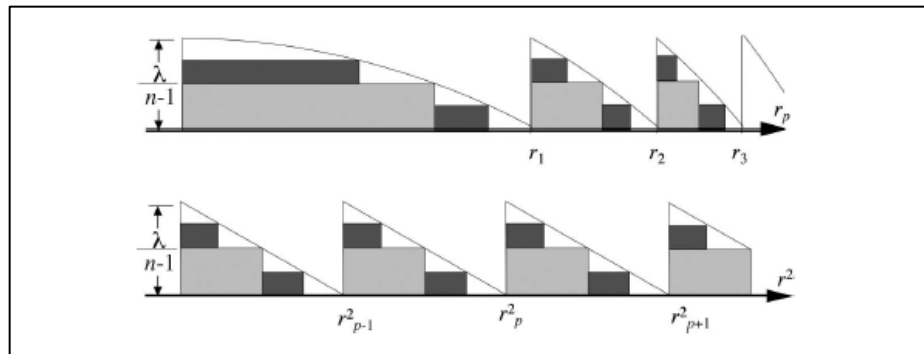


Şekil 4.23 Difraktif Lensten Işığın Dağılımı.

(a) Üç En Büyük Sıradan Işığın Yayılımı.(b) Lensin Odak Düzlemindeki Şiddeti.
(c) Lensin Modülasyon Transfer Fonksiyonu[23]

4.5.3.1 Çok Düzeyli Difraktif Lenslerin Verimi

Görünür ışık ile çalışması istenen bileşenler için pürüzsüz profiller imal etmek zordur. Çok seviyeli yaklaşımları ideal profile yaklaştırmak için ikili maske uygulaması doğrudan üretilebilir. Örneğin Şekil 4.24'deki difraktif lensin bir dört-seviye (iki-maske) yaklaşımı gösterilir.



Şekil 4.24 %100 Verimle Difraktif Lensin Düzgün Profili (kinoform) Dört-Seviye Yaklaşımı[24]

Eğer lens radyal mesafe r 'nin karesinin fonksiyonu olarak çizilirse profil parlak ızgaraya benzer. Bu lens modeli daha öncede belirtilen başlangıcı 0 ve π -faz bölgeleri için ilave alt bölüm ile Fresnel faz lensidir. Ek bölgeler $\pi/4$ ve $3\pi/4$ faz geçiş noktalarıdır. 0 ve π faz bölgeleri arasındaki geçişlerinin konumu:

$$r_p^2 = p\lambda_0 f \quad (4.36)$$

olarak yazılabilir. N seviye maske için yarıçap $r_p^2 = 2p\lambda_0 f / 2N$ olacaktır.

Seviye sayısı artarken lenslerin verimliliği de artar ve çok seviye profil kinoforma daha iyi bir yaklaşım olur. Bu profiller Şekil 4.24'de parlak ızgaranın durumu için gösterilmiştir ve diğer bileşenler için bu tür lensler gibi doğrusal olmayan bir şekilde artarak optik verimi artar. Denklem (4.36)'yı kullanarak, Tablo 4.1 ile seviyelerinin fonksiyonu olarak verimi ifade eder. Profilin "lineer" yaklaşımı ikili maske profillerinin segmenti gibi adımının yerini her bir 0 ve 2π - faz seviyeleri arasında lineer segmentlerden oluşur.

Çizelge 4.1 Seviye Sayısının Fonksiyonu Olarak Difraktif Elemanların Verimliliği

Seviyeler	Verim (%)
2	40
4	81
8	95
16	99
Doğrusal	99
Polinom	100

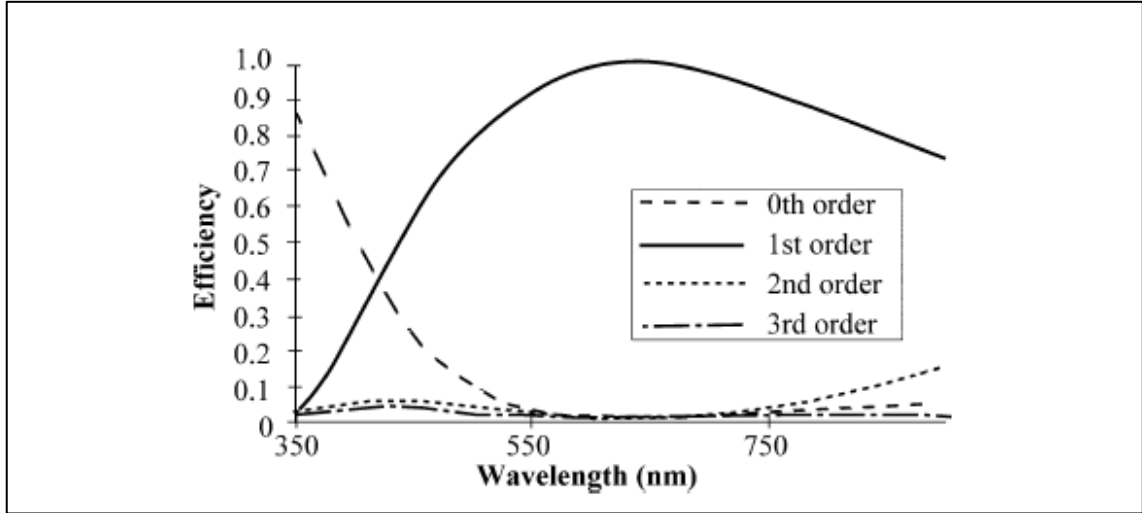
4.5.3.2 Farklı Dalgaboylarında Difraktif Lenslerin Verimi

Difraktif lensler belirli bir dalgaboyunda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Lens başka bir dalgaboyunda kullanıldığında, odak uzunluğu değişecek ve verimliliği düşecektir.

Tasarımdaki uyumsuzluğun ölçüsü dalgaboyu detuning parametresi α olarak;

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \quad (4.37)$$

olarak verilir. Burada α detuning parametresi ve m difraksiyon kırınım sırasıdır. Birkaç sıra için dalgaboyunun fonksiyonu olarak kinoform lensin grafikleri Şekil (4.25)'te verilir. Işığın tüm tasarım dalga boyu birinci sırada kırınımına uğrar ve lens tasarım dalga boyunun geniş bir aralığında verimliliğini korumaktadır.



Şekil 4.25 Çeşitli Difraksiyon Sıraları İçin 633 nm'nin Tasarım Dalgaboyunun Fonksiyonu Olarak Difraktif Lensin Verimliliği[23]

Dalga boyu ile verimliliğinin bu çeşitliliği oyuk derinliğinde bir hata olarak ya da bir dalga boyu hatası olarak yorumlanabilir. Bir aşındırma derinliği d' Denklem (4.35) olarak verilen model dalga boyunun $\lambda' = d'(n - 1)$ olduğu bir eleman olarak d 'nin doğru değerinden farklı olur. Bu yüzden, oyuk derinliğindeki hatalar model dalgaboyundan gidiş olarak hesaplanabilir;

N tane maskelemenin sonsuza kadar gittiği durum için oyuk derinliği;

$$d = \frac{\lambda_0}{n-1} \quad (4.38)$$

olarak ifade edilir.

Buradan hatanın olduğu dalgaboyu değerinde oyuk derinliği;

$$d' = \frac{\lambda}{n-1} \quad (4.39)$$

şeklinde olup bu iki ifade Denklem (4.37) de yerine yazılıp α parametresinin yeni ifadesi elde edilir.

$$d = \frac{\lambda_0}{n-1} \quad n-1 = \frac{\lambda_0}{d} \rightarrow n(\lambda_0) = \frac{\lambda_0}{d} + 1$$

$$d' = \frac{\lambda}{n-1} \quad n-1 = \frac{\lambda}{d'} \rightarrow n(\lambda) = \frac{\lambda}{d'} + 1$$

(4.40)

$$\alpha = \frac{\lambda_0 n(\lambda) - 1}{\lambda n(\lambda_0) - 1} = \frac{\lambda_0 \frac{\lambda}{d'} + 1 - 1}{\lambda \frac{\lambda_0}{d} + 1 - 1} = \frac{\lambda_0 \lambda d}{\lambda \lambda_0 d'}$$

$$\alpha = \frac{d}{d'}$$

ifadesi elde edilir.

Eğer d_0 model derinliğinden sapma εd_0 ise, bu durumda küçük ε $d = d_0 \mp \varepsilon d_0$ ve $\alpha = d_0 / (d_0 \mp \varepsilon d_0)$ yada $\alpha = 1 / (1 \mp \varepsilon)$ olur. Verimlilik için α denkleme eklenirken ve p birinci sıra için birine eşit ayarlanır, verimlilik yaklaşık olarak,

$$\eta \approx \sin^2(\pi \varepsilon) / (\pi \varepsilon)^2 \quad (4.41)$$

eşittir.

Tablo 4.2’den de görebileceğimiz gibi, derinlikteki hata difraktif elemanın verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadan önce %5ten daha fazla olmalıdır. Bununla birlikte, daha sonrada gösterilebileceği gibi, geçişlerin konumlarındaki küçük hatalar bileşenin etkinliğinde şiddetli bir azalmaya sebep olabilir.

Çizelge 4.2 Oyuk Derinliğindeki Kesirli Hata Olarak Difraktif Elemanın Verimliliği

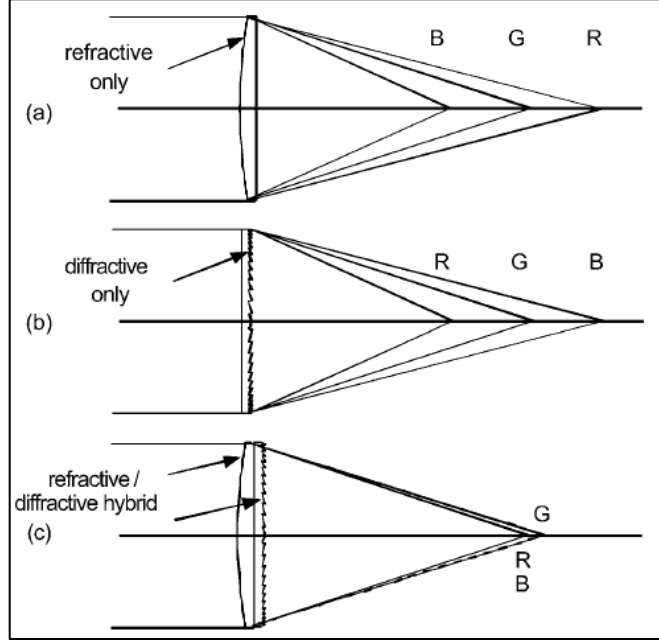
Hata	Verim(%)
0	100.0
0.01	100.0
0.02	99.9
0.05	99.2
0.1	96.8
0.2	87.5

4.5.4 Hibrit Optiksel Elemanlar

Difraktif optiksel elemanlar mevcut optiksel işlevselliği genişletmek ya da ek işlevsellik yerine eklemek için geleneksel optiksel elemanlarla kombinasyonunda kullanılan en iyi elemanlardır. Difraktiflerin spektral dispersiyonu kırılma için çok daha güçlü olmasına rağmen, bir akromatik tekli tipik olarak difraktif güçten daha güçlü kırılma gücüne sahiptir.

Hibrit refraktif/difraktif optiğin bir başka yeni uygulaması bugün piyasada kullanılan mevcut CD/DVD’lerin çift odak toplayıcı (OPU) lensidir. Bu tip bir lens difraktif profil içeren konveks/konveks kırıcıya sahiptir. Difraktif profil kasıtlı olarak eski ayarına döndürülür öyle ki bu profil sadece temel pozitif sırada %50 verimlilik üretir. Bu yüzden bu tür bir lens refraktif profil tarafından işlenerek oluşturulan iki dalga cephesi oluşturur. Çeşitli profiller dikkatli bir şekilde optimize edildiği zaman öyleki refraktif profiller ile birleşik sıfırıncı-sıra bir CD diske doğru 780 nm’de dalgaboyunda küresel

sapmalar için karşılaştırılabilir ve aynı kırılma profili ile birleşik kırınan temel sıra DVD kaplamaya doğru 650 nm dalgaboyunda küresel sapmalar için karşılaştırılabilir.



Şekil 4.26 Hibrit Difraktif/Refraktif Tekli Lenslerle Akromatikleştirme[29]

Bu bölüm lens dizaynında difraktif optiğin kullanımı tanımlanır. Bazı uygulamalarda bir optiksel bileşen klasik lens elemanı ile difraktif yüzeyin birleşimini gerektirebilir.

Diğer durumlarda oluşan gereksinimler difraktif optiksel elemanlar ile bu yapının her ikisi de burada tanımlanır ve analiz edilir.

Bir klasik lense tasarlamak için gerekli kavram ve yaklaşım tanımları kullanıldıktan sonra, tek bir difraktif lense nasıl uygulanabileceğini gösterilecektir.

Kromatik lens sapmalarını düzeltmek için hibrit lenslerdeki difraktif yüzeyin kullanımı da tanımlanacaktır.

4.5.4.1 Difraktif Yüzeyli Renk Sapmasını Düzeltme

Difraktif optiğin yüzey dağılımı en güçlü çakmaktaşı camı ile karşılaştırıldığında bile çok büyüktür. Difraktif lensin sadece küçük miktarı kromatik lensi düzeltmek için gereklidir.

Yerel ızgara periyodu için Denklem (4.16)'yı kullanarak $\Lambda(r) = f\lambda/r = \lambda/\phi r$ ve lensin gücü için çözülürse;

$$\phi_c = \lambda_c/r\Lambda(r) \quad (4.42)$$

olur. Ürün $\Lambda(r)r$ profili temsil etmektedir ve bu yüzden lens sabitidir. Dalgaboyu ile lineer olarak lensin gücünün değiştiğini göreceğiz.

Bu yüzden Denklem (4.41)'de verildiği gibi λ_c olarak bilinen belirli bir dalgaboyu için lens tasarlanırsa o zaman başka bir dalgaboyundaki güç $r\Lambda(r) = \lambda_c/\phi_c$ yapı teriminin ilave edilmesiyle $\phi(\lambda) = \lambda/r\Lambda(r)$ olarak belirlenebilir.

$$\phi(\lambda) = \lambda/r\Lambda(r) = \frac{\lambda}{\lambda_c} \phi_c \quad (4.43)$$

olarak bulunur. Merkez, uzun ve kısa dalgaboylarında lensin gücünü düşünelim:

$$\phi_c = \lambda_c/r\Lambda(r); \phi_l = \lambda_l/r\Lambda(r); \phi_s = \lambda_s/r\Lambda(r) \quad (4.44)$$

ve renk sapmasının miktarı;

$$\Delta\phi = \phi_s - \phi_l = (\lambda_s/\lambda_l)/\Lambda(r)r \quad (4.45)$$

olarak bilinir.

Bu yüzden, bir difraktif lens için eşdeğer N-sayısı dalgaboyunun oranıdır:

$$V = \phi/\Delta\phi = \frac{\frac{\lambda_c}{r\Lambda(r)}}{\frac{(\lambda_s - \lambda_l)}{r\Lambda(r)}} = \frac{\lambda_c}{(\lambda_s - \lambda_l)} \quad (4.46)$$

Bu ifade her zaman negatiftir. Sadece difraktif yüzey dağılımı negatif olmadığından bu durum son derece güçlüdür.

Örneğin görünür bölgede;

$$V = \frac{587.6}{486.1 - 656.3} = \frac{-587.6}{170.2} = -3.45 \quad (4.47)$$

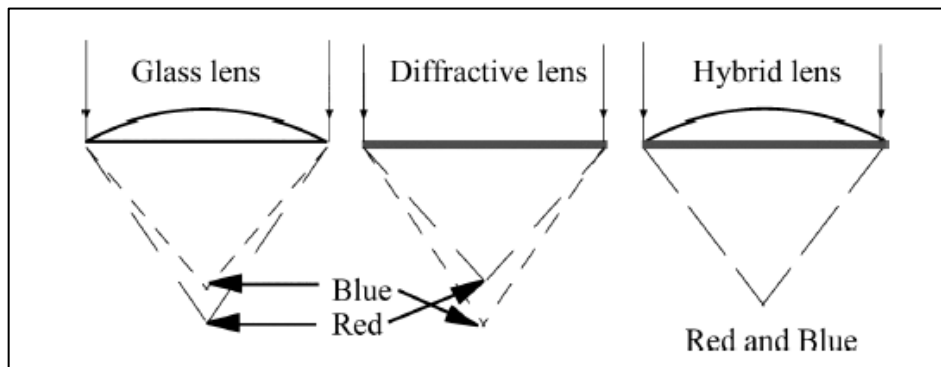
V-sayısının 20'den 50'ye arasında olan çakmaktaşı camla bu değer karşılaştırılırsa, bu sayının refraktif lense düzeltmek için difraktif gücün küçük bir kısmı olabileceğini göreceksiniz (Şekil 4.27). Difraktif yüzey için V-sayısının onun şekli ile ilgisi yoktur.

100-mm efektif odak uzunluğuna (EFL) sahip BK7 standart mercek camıdır. BK7 nin V-sayısı 64.2'dir ve lensin gücü $1/100 \text{ mm}$ ve 0.01 mm^{-1} dir.

$$\phi_a/V_a = -\phi_b/V_b \quad (4.48)$$

Difraktif yüzey için V_b , ve cam lens için V_a ve ϕ_a için gerekli değerler eklenerek, difraktif lensin ϕ_b 'nin optiksel gücü

$$\phi_b = -0.01 \text{ mm}^{-1} * -\frac{3.45}{64.2} = 5.374 * 10^{-4} \text{ mm}^{-1} \quad (4.49)$$



Şekil 4.27 Hibrit lensin renk düzeltmesi[23]

(Solda) Pozitif dağılımı ile bir cam lens kırmızı ışığı odakladığı yerin içine mavi ışığı odaklar, oysa güç diffraktif lensi (ortada) negatif bir dağılıma sahiptir. Hibrit lens ile birleştirildiğinde, iki dağılım ortadan kalkarken akromatik lens ortaya çıkmış olur.

Belirli bir sayıdaki analitik teknikler ve araçları kullanarak klasik tasarıma diffraktif yüzeyi eklemenin etkisini hesaplamak mümkün olmasına rağmen, oluşan bu etkinin en kolay analiz yöntemi optik tasarım programlarından birisini kullanmaktır. Öncelikle plano-konveks lens için gereken datanın tipinin ve üretilen çıktının tipi gösterilir. Aynı durum diffraktif lens içinde yapılır ve sonuç olarak bir hibrit lens olarak onları birleştiririz.

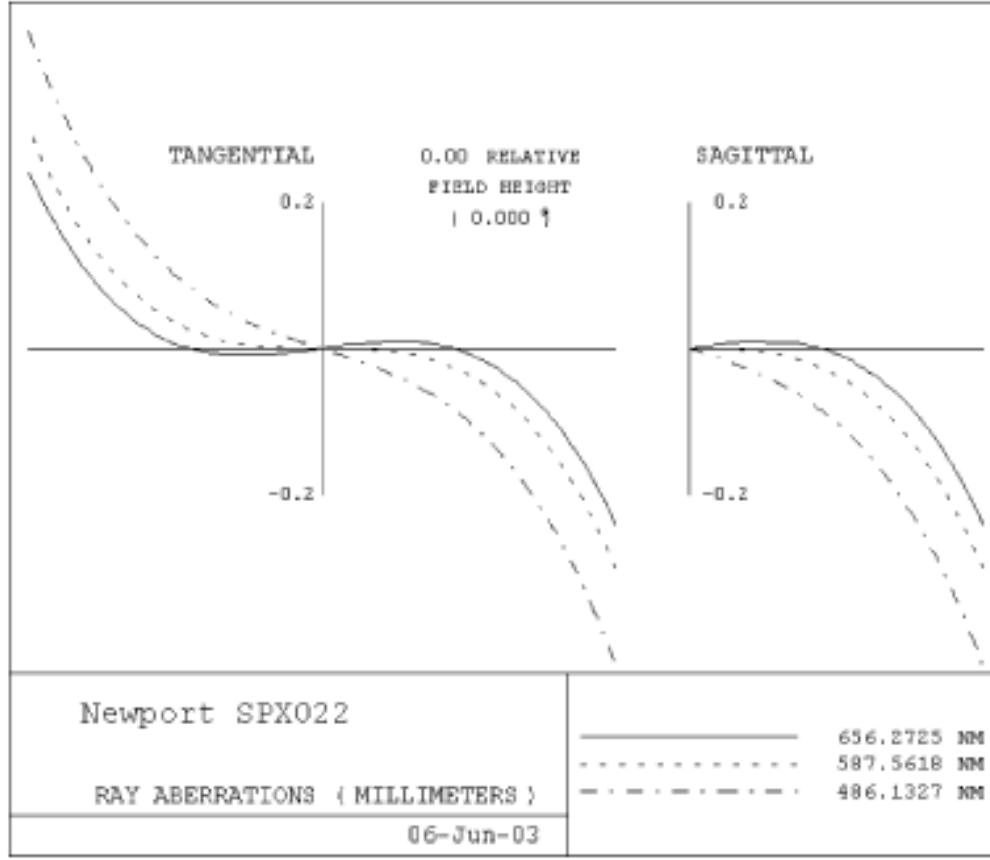
Örneğin, Newport kataloğunun (SPX022) kodlu plano-konveks lens kullanıldı. Bu lens 100-mm EFL, $f/5$ (20-mm çap) kuartz lensidir. Yönergemiz ise;

Çizelge 4.3 Kuartz Lens İçin Değerler

Yarıçap (mm)	Kalınlık (mm)	Açıklık (yarıçap,mm)	Madde (indeks)
45.702	4.79	12.7	Kuartz ($n=1.458464$)
0 (sabit)*	BFL	12.7	Hava (1.0)

Özellikler nesne mesafesi, sonsuzluk, alan açısı 0 derece, dalgaboyu 656.3, 589.7 ve 485.1 nm'dir.

Sadece bir alan noktasını değerlendirirken (optiksel eksen üzerinde) böylece ışınlar normalden biraz daha basit bir teknik özelliğın verilmesiyle eksene paraleldir. Bu lensin performansı Şekil 4.28'de ışının kesişme eğrisi ile gösterilir. Sistem için belirli sapmalar küresel sapmalar ve kromatik sapmalardır. Daha öncede gösterdiğimiz gibi, S biçimli eğri küresel sapmayı gösterir ve y koordinatı miktarı verir. Çeşitli dalga boyları için eğriler arasındaki ayrılmalar lensin kromatik sapmasını gösterir.



Şekil 4.28 Küresel sapma ve enine rengin büyük miktarını gösteren stok plano-konveks lensin sapma eğrileri[23]

4.5.5 Kuartz Camda Difraktif Yüzey

Optik tasarım programları geometrik optiğin yasasına göre optiksel sistemlere ışın izleme üzerinde temellenir. Optiksel dizayn programları ışına dayandırıldığından beri difraktif optik yüzeyini hesaplayamayabilecek programlar gibi görünüyor, oysaki difraktif yüzeyler dalga tabanlı varlıklardır. Lens tasarımcıları geleneksel optiksel dizayn programı ile difraktif yüzeyleri simüle etmek için standart ışın-takibi rutinlerini adapte etmenin yollarını buldular.

Basit bir örnek olarak, bir kuartz cam (iki paralel düz yüzey) ile başlayacağız ve yüzeylerden birine bir difraktif profil ekleriz.

Örneğin; Etkin odak uzunluğu $f/5$ 100-mm olan plano-konveks lens, lensin ϕ 'nin gücü:

$$\phi = 0.01 \text{ mm}^{-1} = (n - 1)(0 - 1/R) \quad (4.50)$$

olarak verilir. $OPD = (n - 1)r^2/2R$ şeklinde de ifade edilebilir. $R = -(n - 1)/\phi$ ilave edilerek, bu lens için OPD profili

$$\frac{(n - 1)r^2}{2R} = \frac{(n - 1)r^2}{-2(n - 1)\phi} = \frac{\phi - r^2}{2} \quad (4.51)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Herhangi bir difraktif lens Optiksel Yol Farkına ek terim eklenerek optimize edilebilir.

$$OPD_{\text{def}} = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 \quad (4.52)$$

Faz sabitleri A_1 'den A_4 'e doğru optimizasyon sırasında değişmesine izin verildiğinde, en uygun yüzey oluşturulur. O zaman kinoform için geçiş noktalarını bulmak için tek parça dalgaboyu bu fonksiyon ile ayrılır. Optiksel Yol Farkı (OPD) ve faz fonksiyonu

$$\phi(r) = 2\pi/\lambda \text{ OPD} = 2\pi/\lambda (A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8) \quad (4.53)$$

ile ilişkilidir.

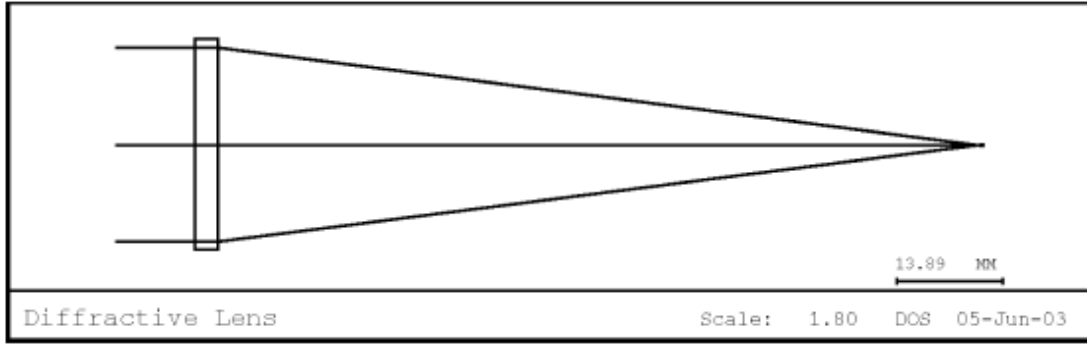
Bu fonksiyon bir faz maskesi oluşturmak için ayrılmış olabilir. Ancak bütün dizayn programları difraktif yüzeyi tanımlamak için aynı faz fonksiyonunu kullanmaz.

Örneğin, Optik Araştırma Topluluğunun bir ürünü olan CODEV'in kullanma kılavuzunda polinomun değerlemesi yapı dalgaboyunda mercek biriminde OPD Optiksel Yol Farkını verir. Karşılaştırma olarak, Lamda Araştırmadan program OSLO

Prodan faz fonksiyonu olarak ;

$$\phi(r) = \frac{2\pi dor}{dwr(df1r^2 + df2r^4 + df3r^6 + df4r^8 + \dots)} \quad (4.54)$$

Burada dor kırınım sırasıdır, dwr yapı dalgaboyudur ve $df1 \dots df4$ faz katsayısıdır. Kırınım dalgaboyu programda mikron olarak girilir fakat faz faktörü lens birimlerinde dalgaboyu kullanılarak değerlendirilir. Bu durum herhangi OSLO belgelerinde bulunmayan bir ayrımdır. ZEMAX (Focus Software) ışınlarının x ve y-kesişim koordinatlarının ölçeklendirmek için yarıçapı normalleştirir fakat faz fonksiyonunu kullanır. Bu programda da yapılır böylece bütün polinomun katsayıları radyanın birimlerine sahiptir. Çeşitli programların herhangi biri gerçekleştirirken, Şekil 4.29'da gösterilmiş olarak, bileşenler lenslerin alışılmış çizgisinden oldukça farklı görünüyor.



Şekil 4.29 Kuartz kristalin bir tarafındaki diffraktif yüzeyi ile lens

Bu odaklama elemanının ürettiği faz yüzeyinin katsayıları metinde verilmiştir.[23]

Optiksel Yol Farkının en düşük yaklaşımı (OPD), $OPD = A_1 r^2$ olup optiksel yol farkı;

$$OPD = -r^2 \phi / 2$$

$$A_1 r^2 = -r^2 \phi / 2$$

$$A_1 = -\phi / 2 \quad (4.55)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bizim örneğimiz için $A_1 = -0.005$ 'dir. $A_1 \cdot 2\pi/\lambda$ çarpılırsa ve λ 633 nm olarak alınırsa, faz fonksiyonundaki birinci terim $\pi/\lambda f = -0.004963$ şeklindedir.

Fonksiyonlar gücün polinomu olarak ifade edilirse, serbestliğin ek derecesi küresel sapmalar azaltılarak faz fonksiyonunu optimize etmek için programa izin verir. Örnekteki karakteristikler ile lens üretmek için yüzeyin ilk dört katsayısının programdaki optimize değerler Çizelge 4.4'te verilir.

Çizelge 4.4 Üç ticari optiksel dizayn programı için saf bir difraktif lens için faz katsayısı

Program	Fonksiyon	A1	A2	A3	A4
CODEV	OPD	-5.00×10^{-3}	-5.7512×10^{-28}	-4.0541×10^{-30}	-3.7945×10^{-32}
ZEMAX	Faz	-4.963×10^{-3}	$+1.223 \times 10^{-7}$	$+2.44 \times 10^{-11}$	-1.496×10^{-13}
OSLO pro	Faz	-4.963×10^{-3}	-2.864×10^{-23}	$+6.414 \times 10^{-10}$	4.379×10^{-30}

4.5.6 Refraktif Ve Difraktif Yüzeyleri Birleştirmek

Burada verilen örnek düz kuartz cam üzerinde difraktif yüzeyi oluşturken hibrit lensler çok değildir. Diğer bir durum ise bir lensin bir tarafında eğimli bir kırılım yüzeyi ve ‘‘plano’’ yüzey üzerinde difraktif yüzey ile plano-konveks lensten oluşur. Bunlardan biri küresel sapma için düzeltilebilir.

Lensin plano yüzeyine difraktif yüzeyi eklersek, ya Optiksel Yol Farkı (OPD) ya da daha öncede bahsedildiği gibi faz fonksiyonu kullanarak faz değişimi tarafından belirtilen yüzeyi temsil etmesi gerekmektedir.

Lensi optimize etmek ve sapmaları azaltmak için, difraktif yüzeyin katsayıları (A_1 , A_2 , A_3 ve A_4) ile birlikte değiştiği birim yüzeyin eğrilik yarıçapına izin verir. Refraktif lensin son değerleri önceki örneklere benzerdir.

Çizelge 4.5 Kaynaşmış Silika için Değerler

Yarıçap (mm)	Kalınlık (mm)	Açıklık (yarıçap,mm)	Madde (indeks)
48.80292	4.79	12.7	Kaynaşmış Silika (n=1.458)
0 (sabit)*	BFL	10	Hava (1.0)

*Lens performansını optimize etmek için sözkonusu kullanılan programların farklı değer fonksiyonlarından dolayı iki faz fonksiyonu için farklı sabitler olmaktadır.

CODEV’de hesaplanan ikinci yüzeyde difraktif polinomun katsayıları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.6 Difraktif polinomun katsayıları

A_1	A_2	A_3	A_4
-3.1365×10^{-4}	$+3.5180 \times 10^{-7}$	-2.4772×10^{-11}	$+4.4228 \times 10^{-14}$

Performans Şekil 4.29’da gösterilen ışın kesişim eğrilerinde verilir. Lens difraktif olmayan benzeri ile karşılaştırıldığında iyi bir şekilde düzeltilmiştir[31],[32],[33].

4.6 Kırınım Izgarası

En basit analitik elemanlar bir boyutlu ızgaralardır. Yapı geometrisi kolaylıkla ızgara denklemi kullanılarak verilen kırınım açısı için hesaplanabilir:

$$m\lambda = \Lambda(n_1 \sin \alpha + n_2 \sin \beta) \quad (4.56)$$

Burada m kırınım sırası, λ yeniden yapılanma dalgaboyu, Λ ızgara periyodu, n_1 ve α sırasıyla kırılma indisi ve geliş açısı, n_2 ve β , sırasıyla, ızgara malzemesindeki kırınan açı ve kırılma indisidir.

Havadaki kırılma indisi durumunda, n_1 ve n_2 , ve bu yüzden biz denklemin aşağıdaki gibi basitleştirilmiş biçimini elde ederiz:

$$m\lambda = \Lambda(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (4.57)$$

Çeşitli metaryellerde (genlik, faz veya birlikte) bir ızgara uygulamak için (ikili, çok seviyeli, sürekli profili vb.) birçok yol mevcuttur. İki- boyutlu ızgaralar çoğunlukla analitik eleman olarak davranan 2D Damman ızgarasının tanımı ile numerik elemanlar (CGHs)dir. Sanayide kullanılan çeşitli ızgaraların tanımlamaları yapıldıktan sonra, (değişen periyotlarla dairesel ızgaralar) dairesel ızgaranın ekstrapolasyonu olan DOE'ler daha sonra düşünülecektir.

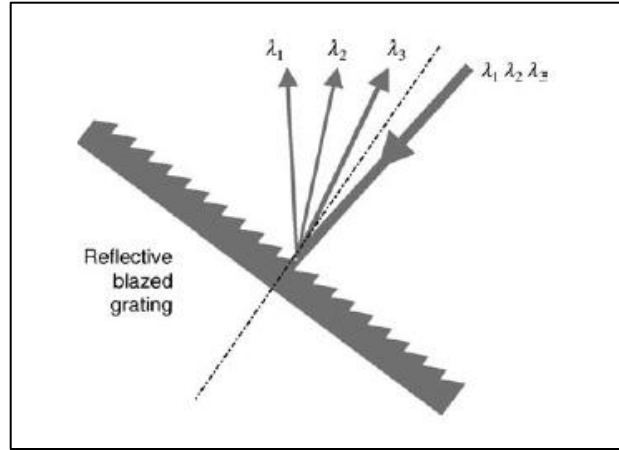
Tarihsel olarak, lineer kırınım ızgaraları endüstriyel uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılan, üretilen, çalışılan kırınım elemanlarının birinci tipidir. Lineer kırınım ızgaraları halen bugün endüstriyel uygulamalarda kullanılan kırınım elemanların çoğunu içerir (spektroskopi, optiksel güvenlik cihazları, optiksel data depolama, optiksel sensörler vs.)

Bugün endüstride kullanılan lineer kırınım ızgaralarının çoğu akılda kırınım ızgaraları ile tasarlanır ve bu yüzden analitik-tip elemanlardır.

Oldukça basit geometrilerinden dolayı, bu tür elemanları tasarlamak için özel bir CAD aracına gerek yoktur. Lineer kırınım ızgaraları elmas yönteminden holografik maruz kalma ve mikrolitografiye kadar birçok çeşit teknik ve teknolojiye göre üretilmektedir.

4.6.1 Temel Izgara Parametreleri

Tarihsel olarak, ızgaranın birincil amacı spektrumdaki uzamsal olarak ışık çizgilerini dağıtmaktır (Şekil 4.30). Iızgaranın dispersiyonu gelen ışını oluşturan farklı dalgaboyları arasındaki açısal ayrılmanın ölçüsüdür.



Şekil 4.30 Iızgaranın açısal dispersiyonu.[34]

4.6.1.1 Açısal Kırınım Dispersiyonu

Açısal dağılım birim açı başına spektral aralığı ifade eder. Lineer çözünürlük birim uzunluk başına spektral aralığı tanımlar. Bir yansıtıcı ızgara için ızgara denklemini farklılaştırarak (Denklem (4.57)), açısal dağılım D aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$D = \frac{\delta\beta}{\delta\lambda} = \frac{m}{\Lambda \cos \beta} = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\lambda \cos \beta} \quad (4.58)$$

Burada Λ ızgaranın periyodudur, λ gelen dalgaboyudur, α geliş açısı, β kırınım açısı, ve m uygulamada düşünülen hedef kırınım derecesidir.

4.6.1.2 Lineer Izgara Dağılımı

Izgaranın lineer dağılımı D açısal dağılım ve sistemin etkin odak uzaklığı f ile çarpılarak bulunur:

$$f \cdot D = \frac{mf}{\Lambda \cos \beta} = \frac{Gmf}{\cos \beta} \quad (4.59)$$

$$P = \frac{1}{f \cdot D} = \frac{\Lambda \cos \beta}{mf} \quad (4.60)$$

Burada ızgaranın frekansını $G = 1/\Lambda$ olarak ele alacağız.

4.6.1.3 Izgara Çözme Gücü

Son olarak, böyle bir ızgaranın çözme gücü R

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN = \frac{N_0\Lambda(\sin \alpha + \sin \beta)}{\lambda} \quad (4.61)$$

Burada $\delta\lambda$ sistemin çözünürlüğünün limiti olarak bilinir ve N_0 ışının gelen ışını tarafından aydınlatılan ızgara oluklarının sayısıdır.

Eğer W ızgaranın genişliği ve ulaşılabilir maksimum açı $|\sin \alpha + \sin \beta| < 2$ ise, maksimum çözünürlük gücü R_{max} aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$R_{max} = \frac{2W}{\lambda} \quad (4.62)$$

4.6.1.4 Serbest Spektral Aralık

Izgara denklemi her biri integral kırınım derecesi m için farklı dalgaboyu için yerine getirirken, farklı dalga boylarındaki ışık uzayda aynı yön boyunca kırınıma uğrayabilir:

m derecedeki λ dalgaboyundaki ışık $2m$ derecedeki $\lambda/2$ dalgaboylu ışık olarak aynı yön boyunca kırınıma uğrayabilir ve böylece devam eder. Derecelerden ışığın süper pozisyonu için verilen spektral derecesinde dalga boyunun aralığı F_λ serbest spektral aralık olarak bilindiği şekilde ortaya çıkmaz ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

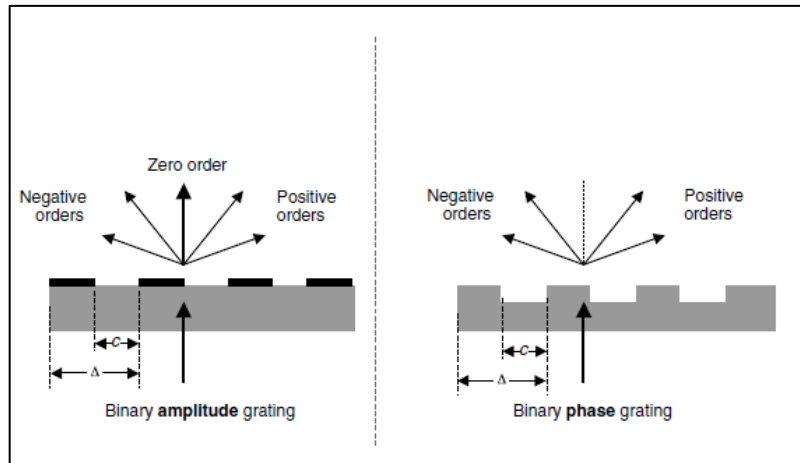
$$F_\lambda = \Delta\lambda = \frac{\lambda_1}{m} \quad (4.63)$$

$$\lambda_1 + \Delta\lambda = \frac{m+1}{m} \lambda_1 \quad (4.64)$$

Serbest spektral aralık kavramı bir dereceden daha fazla kırınabilen herhangi bir ızgaraya uygulanabilir, fakat en iyisi testere dişli ızgaralardır.

4.6.2 İkili Iızgaralar

Bir ızgaranın en basit örneği ızgara periyodundan oluşan alternatif opak ve şeffaf lineer bölgelerden oluşan ikili genlik ızgarasıdır (Şekil 4.31). Böyle ızgaralar çok düşük kırınım verimliliğine sahiptir.



Şekil 4.31 İkili kırınım ızgaraları[34]

Eğer oluk derinliği π faz kaymasına sahipse bir ikili-faz ızgarası daha yüksek verimliliğe sahiptir. Temel derecedeki ızgaranın maksimum verimliliği aynı verimliliğe sahip eşlenik temel sıra ile %40.5 dir ve gerisi yüksek derece üzerinde ayrışır

(sıfır derece derinlik kesin olarak π faz kaymasını verirken bir şiddete sahip değildir). İkili ızgaranın simetrik geometrisi (genlik yada faz) gelen ışığın kırınım yönünü söylemez bu yüzden ışık yayılan kırınım dereceleri için simetrik bir yönde kırınım uğrar. Bu yüzden, normal bir oranda ikili ızgara gerçekte benzer enerjilere ve sahiptir ve aynı zamanda dereceleri birleşir. Simetriyi kırarak, gerçekte enerji balansı ve eşlenik sıraları da bozulur[34],[35],[36],[37].

4.6.2.1 İkili Genlik Izgara İçin Kırınım Verimliliğinin Hesaplanması

Kırınımın skaler teorisi ikili genliğin kırınım verimliliğini ya da teoremin geçerliliğinin alanında çok seviyeli faz ızgarası ve fazı tahmin etmek için etkin bir şekilde kullanılabilir. Difraktif elemandan çok uzakta kırınan alanın Fraunhofer's formülasyonuna dayalı olarak, kırınım verimlilik formülasyonu genlik ızgarası için tanımlanabilir (Şekil 4.31).

Izgara fonksiyonunun genliği Fourier açılımı olarak tanımlanabilir:

$$a(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } m\Lambda \leq x \leq c + m\Lambda \\ 0 & \text{Herhangibi bir değer için} \end{cases} \Rightarrow$$

$$a(x, y) = \frac{c}{\Lambda} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{-i\pi\left(\frac{mc}{\Lambda}\right)} \frac{\sin\left(m\pi\frac{c}{\Lambda}\right)}{m\pi\frac{c}{\Lambda}} e^{2i\pi\frac{x}{\Lambda}} \quad (4.65)$$

Burada her eksponansiyel terim bir düzlem dalgayı temsil eder ve m farklı kırınım derecelerinin indisidir.

m'inci kırınım derecesinin büyüklüğü aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\eta_m = \left| \frac{\sin\left(m\pi\frac{c}{\Lambda}\right)}{m\pi\frac{c}{\Lambda}} \right|^2 \quad (4.66)$$

Düzensiz aralıklı opak/şeffaf hatlar için (örneğin %50 hizmet döngüsü ile ızgara), m'inci sıradaki kırınım verimliliği,

$$\eta_m = \left| \frac{\sin\left(\frac{m\pi}{2}\right)}{m\pi} \right|^2 \quad (4.67)$$

şeklinde yazılabilir.

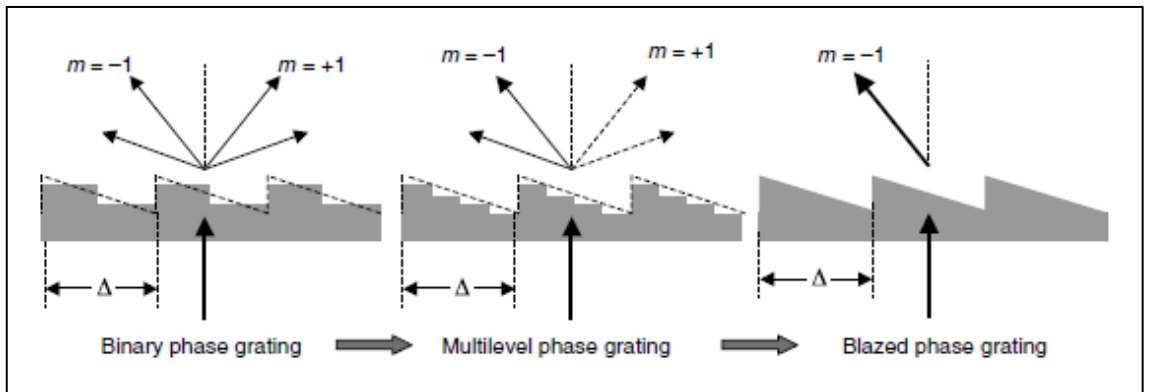
4.6.3 Çok Seviyeli Izgaralar

Eğer son uygulama her iki kırınan derecelerde kullanılırsa, etkin verim %81'e kadar artar. Bu tür ikili-faz ızgaralarının verimi duvarlar ve yüzey pürüzlüğünün kalitesini yanı sıra oyuk derinliğine de büyük ölçüde bağlıdır.

Çok seviyeli ızgaralar (Şekil 5.10'a bakınız.) analog yüzey-kabartma ızgara geometrisine ulaşmaya çalışmak ve ikili-faz ızgaralardan daha yüksek verim sağlar[38].

4.6.3.1 Çok seviyeli Faz Izgara Verim Hesaplaması

Çok seviyeli faz-kabartma ızgaraları için kırınım verimi genlik ızgaralarına benzer yoldan elde edilebilir. Örneğin; Şekil 4.32'de kuadratik ızgara (dört faz seviyesi) gösterilmiştir.



Şekil 4.32 İkili, Çok Seviyeli Ve Testere Yüzey-Kabartma Faz Izgaraları[34][31]

Izgara oyulurken öyleki maksimum optiksel yol farkı $2\pi(N-1)/N$ şeklinde sağlanırsa, N faz seviyesi için m.inci sıradaki kırınım verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\eta_m^N = \left| \frac{\sin\left(\frac{m\pi}{N}\right)}{\frac{m\pi}{N}} \right|^2 \quad (4.68)$$

Yapıların derinliği uygun olmadığında, verim κ dalga sayısının fonksiyonu olarak tanımlanabilir ($\kappa=1$ için dalga sayısı mükemmel oyuk derinlik doğruluğu sağlar, örneğin N seviyesi için $2\pi(N-1)/N$ olacaktır.):

$$\eta_m^N = \left[\frac{\sin(\pi(m-\kappa))}{\sin\left(\frac{\pi(m-\kappa)}{N}\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi m}{N}\right)}{\pi m} \right] \quad (4.69)$$

BÖLÜM 5

VERİM LİMİTLERİNİ BELİRLEYEN OPTİK PROGRAMIN TASARIMI

5.1 Bir Diffraktif Lens İçin Tek Boyutlu Optik Eksen Boyunca Verimin Minimum Olduğu Uzaklıkları Belirleyen Program

5.1.1 Paket Program Tasarımın Temelini Oluşturan Teorik Model

Diffraktif lenslerin özel bir tipi olan Fresnel Lensler için genel olarak lens tasarımında hedeflenen tasarım dalgaboyu (λ_0) ve tasarım odak uzaklığı (f_0) ile lens yarıçapı arasında aşağıda ifade edildiği gibi bir bağıntı söz konusudur:

$$r_j^2 = 2j\lambda_0 f_0 + (j\lambda_0)^2 \quad (5.1)$$

Burada ;

r_j : Lens merkezinden dışarıya doğru j.ninci Fresnel Bölgesi

λ_0 : Tasarımı planlanan dalgaboyu (input olarak)

f_0 : Tasarımı planlanan odak uzaklığı değeri

Burada Fresnel Merceğinin yarıçapını ise normal klasik mercek denkleminde elde edilecektir. Fresnel merceğinin bir yüzü düzlem bir yüzü küresel olduğu için klasik mercek modeli olarak

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_j}\right) \quad (5.2)$$

formülü kullanılır.

Burada tasarımı planlanan dalgaboyuna bağlı olarak f_0 değeri de rastgele alınacak ve input değeri olarak alınacaktır. (5.2) denklemini bize tam olarak tasarım sonucunda belirlenecek olan odak uzaklığını ifade eder. Input değerleri:

λ_0 : Tasarımı planlanan dalgaboyu (input olarak) (mikrometre boyutunda)

f_0 : Tasarımı planlanan odak uzaklığı değeri (input olarak) (mm boyutunda)

n : Kırılma indisi (input)

f : Odak uzaklığı (Output)=Belirlenen matematiksel modele uygun olarak programın çizeceği grafikte aslında gerçek odak uzaklığı aynı zamanda programda kaynak ya da nesnenin lense olan uzaklığıdır.

Program (5.1) formülünü merceğe yaklaşırken kullanmalıdır. Eğer gerçek odak noktasından uzaklaştırılırsa (+x yönü için) o zaman (5.1) nolu formül paraksiyal bölgede olur (bu bölgede merceğe gelen ışık ışınının optik eksene çok yakın olur) (paraksiyal bölgede $(j\lambda/4f_0) \ll 1$ olduğu için (5.1) formülü;

$$r_j = 2j\lambda_0 f_0 \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada program çalıştığında ilgili program satırları için eğer kaynak ya da cisim merceğe doğru optik eksen boyunca yaklaştırılırsa (5.1) nolu formül merceğe optik eksen boyunca uzaklaştırılırsa (5.3) nolu formül kullanılır.

Burada temel kriter nesneden gelen ışık ışınların merceğe çok uzağa gitmesi durumu için verim-uzaklık fonksiyonunun çizilmesi ve buna göre verimin minimum ve maksimum olduğu uzaklıklar yaklaşık olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada Fresnel Mercek için optik verim geometrik optikten çok ışık ışınlarının enerji yoğunluğu açısından tasarımı yapılan program vasıtasıyla analiz edilmeye çalışacaktır. Burada programın çalışma süreci kısaca şu şekilde ifade edilebilir:

Program input verilerine bağılı olarak önce tasarımı planlanan lensin odak uzaklığını hesaplayacaktır. Elde edilen odak uzaklığı, verim fonksiyonu hesaplanacak kaynak yada cismin eksenel olarak lensin başlangıç konumu olacak şekilde bulunacaktır.

Bu noktada bulunan bir cisim ya da kaynak tarafından yayılan enerji ya da şiddet verimi de maksimum olur.

Program çalıştırıldığında optik eksen üzerinde bulunan kaynak ya da cisim belirli aralıklarla mercekten eksenel olarak ulaşmaya başlayacak ve merceğe gelen ışık ışınlarının veriminin uzaklığın fonksiyonu olarak değişimi belirlenmeye çalışılacaktır.

Matematiksel modelleme sonucunda fiziksel olarak cismin ya da kaynağın ışık ışınlarının mercek üzerine düşen verimin elektrik alan fonksiyonu olarak sönümlü harmonik bir fonksiyon gibi davranması söz konusudur.

Verim fonksiyonunun uzaklığa bağılı olarak bu şekilde bir durumun oluşması ışık ışınlarının veriminin belirli bir uzaklık değerinden sonra azaldığının göstergesidir. Işık ışınlarının tam olarak hangi uzaklık değerler kümesinde veriminin azaldığını bulmak için Fresnel Lens için paraksiyal bölgede olduğu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Program çalıştığında ışık ışınlarının paraksiyal bölgede olması sonucunda cisim yada kaynaktan gelen ışık ışınları optik eksene çok yakın olacaktır. Bu durumun geometrik optikte olma koşulu kaynak yada cismin optik eksen üzerinden merceğe çok uzak olması durumunda gerçekleşir. Fresnel Merceğinin çapının (5.1) denklemi paraksiyal bölgede (ışık ışınlarının eksene çok yakın olması) ile bu bölgede $(j\lambda/4f_0) \ll 1$ olacağından;

$$r_j = 2j\lambda_0 f_0 \quad (5.4)$$

j inci Fresnel bölgesinin yarıçap formülü elde edilmiş olunur. Cismin ya da kaynağın paraksiyal bölgede olup olmadığı ise belirli bir eşik değeri ile belirlenir ve programda şartlanır. Bu eşik değeri için;

$$Değer = \frac{r = \sqrt{2j\lambda_0 f_0 + (j\lambda_0)^2}}{\left(\frac{j\lambda}{4f_0}\right)=0.001} \approx 1000 * r \quad (5.5)$$

ifadesi elde edilir. Bu değer ifadesi ile limit uzaklık durumlarında verimin en iyi olduğu mercek çapıda belirlenmiş olacaktır.

İlgili eşik değerine bağlı olarak kaynak ya da nesnenin çok uzakta olma koşulunu ifade eden kod bloğu kısaca aşağıda verildiği gibidir.

if Değer >1000*r:

$$r_j = 2j\lambda_0 f_0 \quad (5.6)$$

Else

$$r_j^2 = 2j\lambda_0 f_0 + (j\lambda_0)^2 \quad (5.7)$$

Burada r_j ifadesi tamamı ile Fresnel Bölgesinin yarıçapı ile alakalıdır. Program çalıştığında ilgili nesne yada kaynak mercekten optik eksen boyunca uzaklaşırken Fresnel Bölgesinin yarıçapı değişecektir. Bu merceğin yarıçapının değişmesi klasik mercek denkleminde göre odak uzaklığında değişmesine sebep olacaktır. Programın burada tasarımı planlanan mercek için en uygun yarıçapın belirlenmesinde öncülük edecektir. Ayrıca lens veriminin optik eksen boyunca merceğe olan uzaklığına bağlı olarak verim değişimine bağlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Burada ışık ışınlarının şiddeti en temel ve klasik durumuyla direkt olarak ortama bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$I = I_0 e^{-\tau x} \quad (5.8)$$

Bu denklemin ışık ışınlarının ışığın dalga fonksiyonu ile bağlantısı belirlenebilir. Buna göre Poynting vektörünün ortalama değeri aynı zamanda şiddete eşittir. Işık şiddeti ışığın genliği ile orantılıdır. Bu tanıma göre şiddet ifadesi,

$$I = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c} \quad (5.9)$$

elde edilir. (5.8) ve (5.9) denklemi ile $E_{\max}$ ifadesi aşağıda verildiği gibidir.

$$E_{\max} = \sqrt{2I_0 \mu_0 c} e^{-\tau x/2} \quad (5.10)$$

Genel klasik ışık dalga fonksiyonu;

$$E = E_{\max} \cos(kx) \quad (5.11)$$

Böylece ışık dalga fonksiyonunun genliğine bağlı olarak belirli bir uzaklık değerinden sonra sönümlü ve harmonik bir tepki vermektedir. Bu ışık dalga fonksiyonunun optik eksen boyunca denklemi aşağıda verildiği gibidir.

$$E(x) = \sqrt{2I_0\mu_0c}e^{-\tau x/2} \cos(kx) \quad (5.12)$$

Burada $I_0 = 1$ olarak alınabilir çünkü program başlangıçta nesne yada kaynak noktası odak noktasında olacak şekilde seçildiğinden bu noktada da verim maksimum yani 1 değeri alır. $A=\sqrt{2I_0\mu_0c}$ olup aşağıda verildiği gibi sabit bir sayı değerine eşittir.

$$A=\sqrt{2I_0\mu_0c} = \sqrt{2 * 1 * 4 * 3,14 * 10^{-7} * 3 * 10^8}=24,45 \quad (5.13)$$

şeklinde ifade edilir.

O halde (5.12) denklemi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$E(x) = 24,45 * e^{-\tau x/2} * \cos(kx) \quad (5.14)$$

İlgili paket program çalıştırıldığında tek boyutta elektrik alanın şiddete bağlı denkleminin uzaklığın fonksiyonu olacak şekilde grafiksel ve verileri elde edilecektir. Elektrik alanın fonksiyonu olan bu ifade matematiksel olarak sönümlü harmonik bir yapıya sahiptir. Uzaklık değeri arttıkça dalga fonksiyonu sönümlenecek ve belli bir eşik şiddet değerinden sonra sabit bir davranış gösterecektir.

Sistemin verim fonksiyonunun uzaklığa bağlı olarak azalma gösterdiği gözönünde bulundurulursa verimin belli bir uzaklık değerinden sonra yaklaşık sabit olduğu bir eşik değeri alınabilir. Bu eşik değerinin altına düşen şiddet değerlerinin aslında sistemin aynı zamanda veriminin minimum olduğu noktalar kümesi olarak alınabilir.

Matematiksel basit bir yaklaşımla şiddetin yaklaşık sabit olduğu eşik değeri

$E_{eşik} = \frac{I_0}{10^{-5}}$ olarak alınabilir. Program çalıştığında sistemin $E(x) \approx E_{eşik}$ olduğu anda eşik değerindeki uzaklık yada uzaklık değerlerine eşit bir şiddet değeri elde edilir. Program bu değer altındaki uzaklık değerler kümesini bu şekilde diffraktif verimin minimum olduğu noktalar kümesi olarak belirleyecek ve bu noktalar kümesinin sonuçlarını verecektir.

5.1.2 Matematiksel Modele Dayalı Yazılan Paket Program ve Kod Satırlarının Açıklanması

İlgili paket program kodu aşağıda verildiği gibidir.

1.

```
#Fresnel bölgesi yarıçapı hesabı

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

DalgaBoyu=float(input("Tasarım Dalga boyu değerini giriniz:"))
OdakUzaklık=float(input("Tasarım odak uzaklık değerini giriniz:"))
indis=float(input("Ortamın indis değerini giriniz ?"))
    FresnelYaricap=float(input("Fresnel Bölge Yarıcap değerini
giriniz:"))

#Fresnel bölgesi yarıçapı hesabı
Burada programın yani lens tasarımının temelini oluşturan temel
input parametreleri girilir.

#yarıçap hesaplanması ve değer koşulu

r=(2*FresnelYaricap*DalgaBoyu*OdakUzaklık *10**(-
12)+(FresnelYaricap *DalgaBoyu)**2*10**(-18))**0.5

deger=(FresnelYaricap*DalgaBoyu/OdakUzaklık) *0.025*10**(-0.5)

print("yarıçap değeri" ,r)

#gerçek odak uzaklık değeri

f=float(r/(indis-1))

print("gerçek odak uzaklık:",f)
#yarıçap hesaplanması ve değer koşulu, #gerçek odak uzaklık
değeri, #değer koşulu
Programın bu satır ise Fresnel Merceğinin tasarım sonucunda
gerçek odak uzaklığını bulmaya yarar. Fresnel bölgesinin tasarım
dalga boyu ve odak uzaklık değerine bağlı olarak merceğin
yarıçapı hesaplanacak ve mercek indis değerine bağlı olarak
gerçekten tasarlanan Fresnel Merceğinin odak uzaklık değeri
bulunacaktır. Ayrıca eşik değer belirlenmesini sağlayan değer
koşulunda yarıçap bulunduğundan sonra hesaplanacak.
```

2.

#koşul sağlandığında 3 nolu formül diğer durumda 2 çalışacak

```
if deger>1000*r:
    r=2*DalgaBoyu*OdakUzaklık
#ktek boyutlu şiddetin fonksiyonu olan dalga fonksiyonu
denklemleri,enerji tanımlaması
```

```
def graph(formula, x_range):
    x = np.array(x_range)
    y = eval(formula)
    plt.xlabel('uzaklık')
    plt.ylabel('enerji')
    plt.plot(x, y)
    plt.show()
```

#koşul sağlandığında 3 nolu formül diğer durumda 2 çalışacak,
#ktek boyutlu şiddetin fonksiyonu olan dalga fonksiyonu
denklemleri,enerji tanımlaması

Hesaplanan değer programımızın eşik şiddette olduğu uzaklık değerlerini verecek fonksiyonun kendisidir. Bu değer denklemleri ile hayali kaynak yada cismin paraksiyal bölge de yani merceğe çok uzak olduğu durum için merceğin yarıçap değerini belirleyecek ve eşik değer şiddet koşulunda sağlanmış olacaktır. Burada kaynak yada cismin minimum verim koşulunun eşik değer koşulu belirlenmiş olunur. Bu değere bağlı olarak enerji ve uzaklık değerinin tek boyutlu fonksiyon tanımlaması yapılmıştır.

3.

fonksiyonu ilgili denklem ile çağırılalım

```
graph('24.45*np.exp(-x/2)*abs(np.cos(2*np.pi*x/DalgaBoyu))',
range(0, 30))
# fonksiyonu ilgili denklem ile çağırılalımİlgili fonksiyon
elektrik alan dalga fonksiyonun şiddete eşdeğer ifadesi olup
uzaklığa bağlı olarak değişimi ifade eder.
```

#fonksiyonu değerler isimli dosyaya yazdırıp en küçük değerini karşılığındaki uzaklığı bulalım.

```
y=[]
for i in range(0,30):
    y.append(i)
    y[i]=float(24.45*np.exp(-i/2)*abs(np.cos(2*np.pi*i/0.8)))
    if y[i]<24*10**(-18):
        print("min uzaklık değeri:",i, "buna karşılık gelen
enerji: ",y[i])
    # print(y[i])
    with open("degerler.txt",'a') as deger:
        deger.write(str(y[i])+"\n")
```

```
# function that returns f
#def model(indis):
#    indis = 0.8
#    f = (indis - 1) / r
#    return f
#fonksyonu değerler isimli dosyaya yazdırıp en küçük değerin
#karşılığındaki uzaklığı bulalım.
```

Burada program çalıştırıldığında nesne yada kaynak gerçek odak uzaklığında bulunur ve bu nokta verim maksimum yani 1 değerini alır.Hayali nesne yada kaynak mercekten tek boyutlu optik eksen üzerinde uzaklaştıkça uzaklığa bağlı olarak şiddete bağlı elektrik alan fonksiyonu azalacak ve paraksiyal bölge koşulu sağlandığında sistemde nesne yada kaynak çok uzakta olduğu eşik şiddet değerinde olmuş olur.Bu eşik değerden sonraki noktalar kümesi verimin minimum değerini veren uzaklık değerleridir.Program çıktı olarak diffraktif verimin minimum olduğu noktalar kümesinin değerlerini çıktı ve grafik olarak verir.

5.2 Belirli Lens Malzeme İndisleri Kullanılarak Paket Yazılım ile Minimum Verim Limitlerini Belirleyen Uzaklıkların Elde Edilmesi ve Karşılaştırılması

Çizelge 5.1 piyasada mevcut lenslerde kullanılan malzemelerin türü,kırılma indisi ve özellikleri

Lens Malzemesi	Kırılma İndisi	Önemli Özellikleri
Yüksek İndis Plastikler1	1.70-174	100 UV dalgaboyunu bloke eder.
Yüksek İndis Plastikler2	1.60-1.67	1-İnce ve Hafif 2-Yüzde yüz UV'yi engeller. 3-1.70-174'ten daha yüksek maliyetli lenslere göre daha ucuzdur.
Tribrid	1.60	1-İnce ve Hafif 2-CR-39 plastik ve yüksek indisli plastik lenslerden belirgin derecede daha fazla darbeye dayanıklıdır. Dezavantajı: Çok çeşitli lens tasarımlarında henüz mevcut değil
Trivex	1.54	1-Üstün darbe dayanımı 2-Yüzde 100 UV'yi engeller 3-Mevcut en hafif lens malzemesi
CR-39 Plastik	1.498	1-Mükemmel Optikler 2-Düşük Maliyet 3-Dezavantaj: Kalınlık
Mercek Camı	1.523	1-Mükemmel Optikler 2-Düşük Maliyet 3-Dezavantaj: Ağır, Kırılabilir

Yukarıda verilen çizelgede mevcut piyasada mevcut lenslerde kullanılan malzemelerin türü, kırılma indisi ve temel bazı avantaj ve dezavantaj özellikleri verilmiştir. Bu malzemelerin kırılma indisi program için ayırt edici özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Her bir lens malzemesinin karşılaştırılması yapılarak maksimum uzaklıkta en etkin verime sahip lens malzemesi tespit edilmeye çalışılacaktır.

Öncelikle tasarımı planlanan sistem için (örneğin bir sensörün algılama elemanı olarak lens odak uzaklığının algılayıcı malzemeye olan uzaklığı) için tek eksen uzaklığı yaklaşık olarak $x = 1mm$ olarak alınabilir.

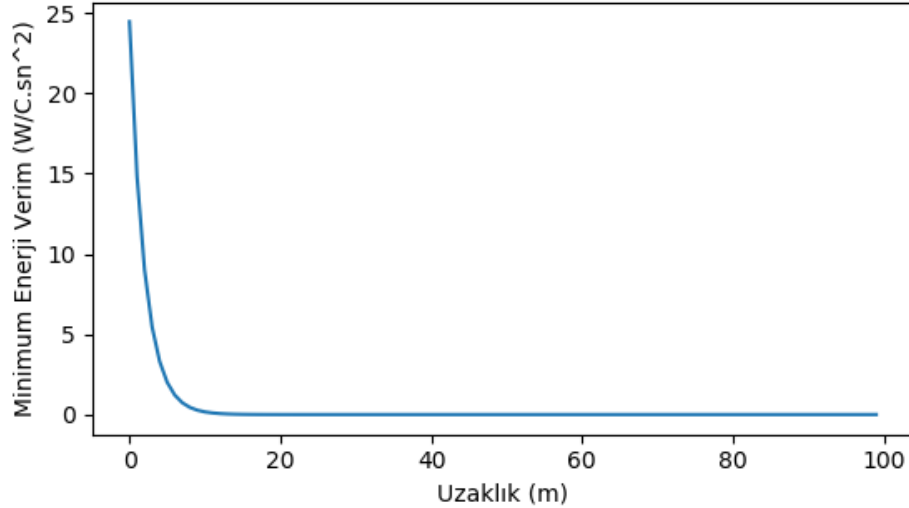
Böylece ilgili sensörde kullanılması planlanan lensin odak uzaklığı yukarıda indis değerleri verilen her malzeme için minimum verimin elde edildiği uzaklık değerleri ayrı ayrı elde edilecek ve her bir lens malzemesi için elde edilecek olan minimum verimi sağlayan uzaklık değerler kümesi aynı grafik içerisinde karşılaştırılabilecektir.

Öncelikle hazırlanan yazılım ile yukarıdaki tabloda verilen mevcut lenslerde kullanılan malzemelerin indis değerleri, odak uzaklık değeri (yaklaşık olarak $x = 1mm$), görünür bölge dalga boyu aralığı için ($\lambda = 400 nm$) giriş değerleri ile aşağıdaki Verim-Uzaklık grafikleri elde edilecektir.

5.2.1 Yüksek İndisli Plastikler1

Yüksek İndis Plastikler	1.70-174	100 UV dalgaboyunu bloke eder.
-------------------------	----------	--------------------------------

İndis değeri $n=1.74$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 5.1 $n=1.74$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- a. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 400

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz: 1.74

- b. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 2.83

gerçek odak uzaklık: 3.82

- c. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 17 buna karşılık gelen enerji: 1.71e-17

min uzaklık değeri: 21 buna karşılık gelen enerji: 1.65e-18

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 5.70e-18

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 1.83e-18

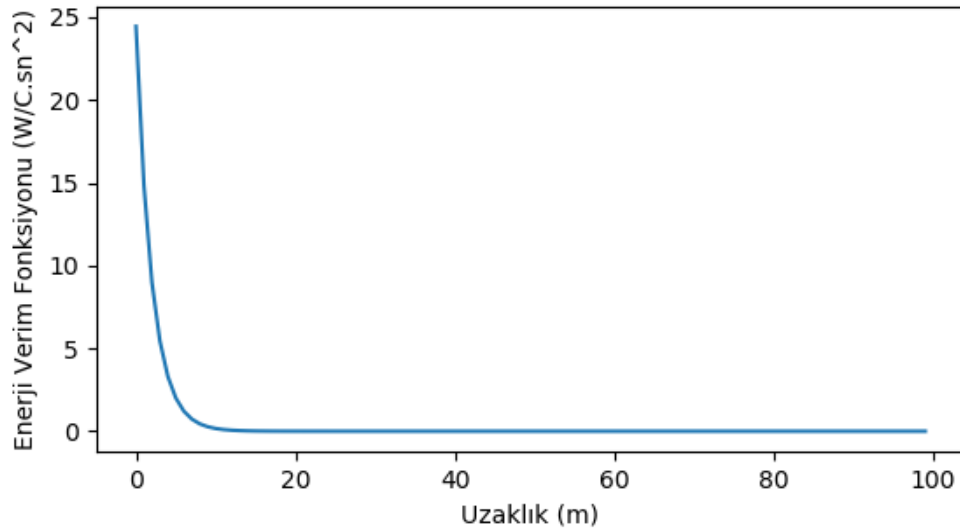
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 5.74e-19

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.75e-19

5.2.2 Yüksek İndisli Plastikler2

Yüksek İndis Plastikler2	1.60-1.67	1-İnce ve Hafif 2-Yüzde yüz UV'yi engeller. 3-1.70-174'ten daha yüksek maliyetli lenlere göre daha ucuzdur.
--------------------------	-----------	---

İndis değeri $n=1.67$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 5.2 $n=1.67$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- d. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1'de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 400

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz: 1.67

- e. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 2.83

gerçek odak uzaklık: 4.71

- f. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 17 buna karşılık gelen enerji: 1.71e-17

min uzaklık değeri: 21 buna karşılık gelen enerji: 1.65e-18

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 5.70e-18

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 1.83e-18

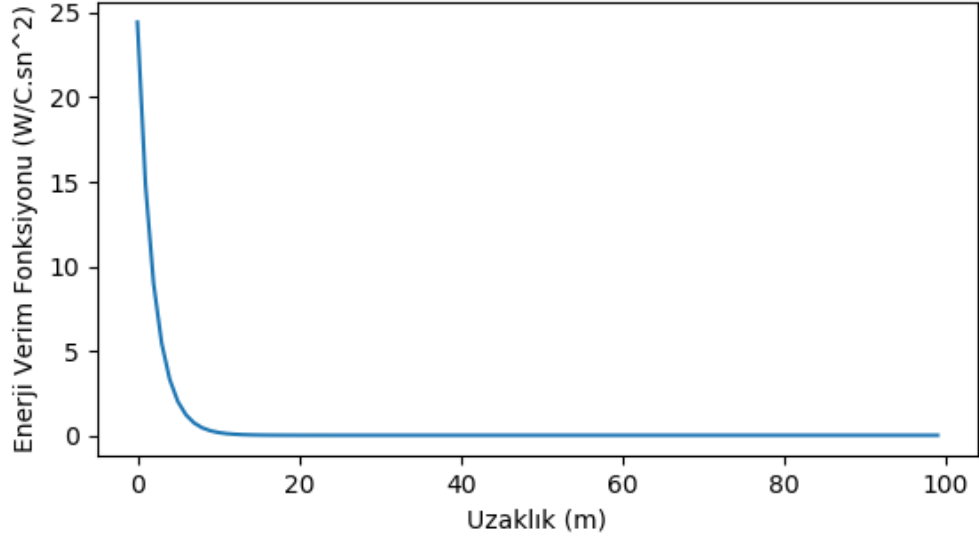
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 5.75e-19

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.75e-19

5.2.3 Tribid

Tribid	1.60	1-İnce ve Hafif 2-CR-39 plastik ve yüksek indisli plastik lenslerden belirgin derecede daha fazla darbeye dayanıklıdır. Dezavantajı: Çok çeşitli lens tasarımlarında henüz mevcut değil
--------	------	--

İndis değeri $n=1.60$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 5.3 $n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- g. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-3'de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 400

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz: 1.60

- h. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 2.83

gerçek odak uzaklık: 4.71

- i. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değer: 17 buna karşılık gelen enerji: $1.71e-17$

min uzaklık değer: 21 buna karşılık gelen enerji: $1.65e-18$

min uzaklık değer: 23 buna karşılık gelen enerji: $5.70e-18$

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 1.83e-18

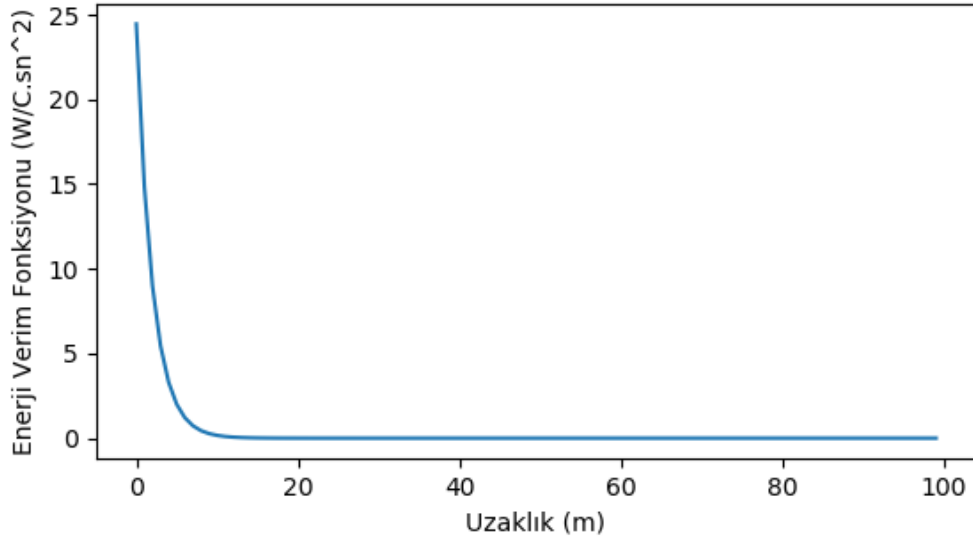
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 5.75e-19

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.75e-19

5.2.4 Trivex

Trivex	1.54	1-Üstün darbe dayanımı 2-Yüzde 100 UV'yi engeller 3-Mevcut en hafif lens malzemesi
--------	------	--

İndis değeri $n=1.54$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 5.4 $n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 400

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz: 1.54

- j. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 2.83e-05

gerçek odak uzaklık: 5.24e-05

- k. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 17 buna karşılık gelen enerji: 1.71e-17

min uzaklık değeri: 21 buna karşılık gelen enerji: 1.65e-18

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 5.70e-18

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 1.83e-18

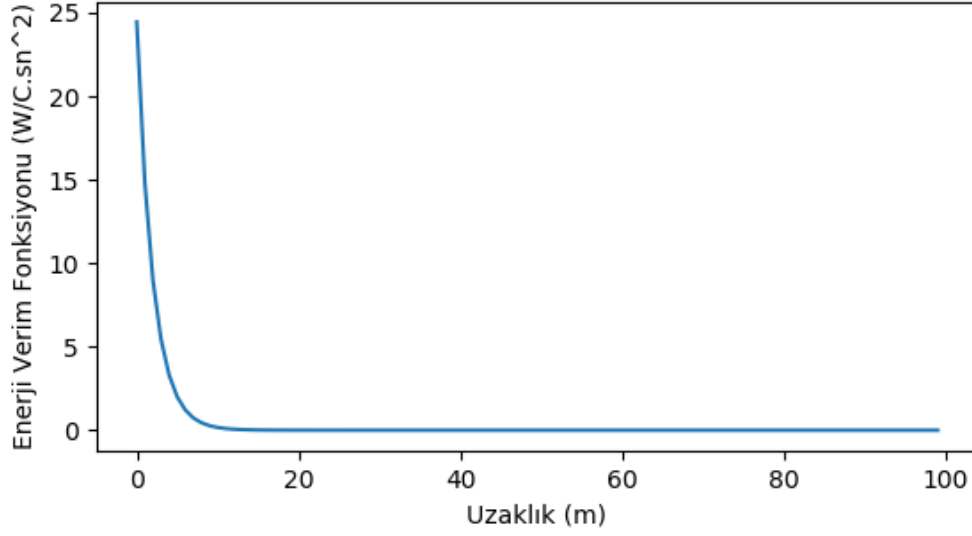
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 5.75e-19

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.75e-19

5.2.5 CR-39 Plastik

CR-39 Plastik	1.498	1-Mükemmel Optikler 2-Düşük Maliyet 3-Dezavantaj: Kalınlık
---------------	-------	--

İndis değeri $n=1.498$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 5.5 $n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- l. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-5’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 400

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz: 1.498

- m. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 2.83e-05

gerçek odak uzaklık: 5.24e-05

- n. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 17 buna karşılık gelen enerji: 1.71e-17

min uzaklık değeri: 21 buna karşılık gelen enerji: 1.65e-18

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 5.70×10^{-18}

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 1.83×10^{-18}

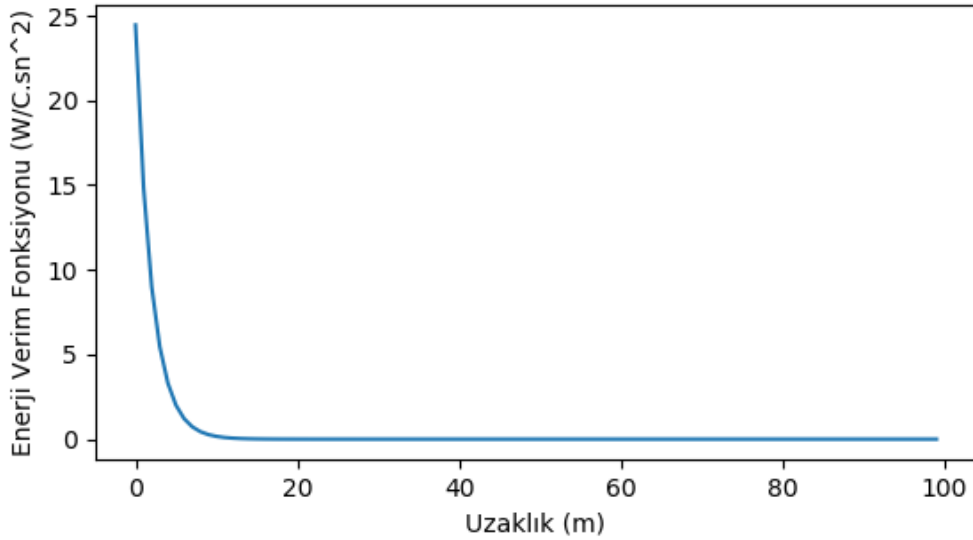
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 5.75×10^{-19}

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.75×10^{-19}

5.2.6 Mercek Camı

Mercek Camı	1.523	1-Mükemmel Optikler 2-Düşük Maliyet 3-Dezavantaj: Ağır, Kırılabilir
-------------	-------	---

İndis değeri $n=1.523$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 5.6 $n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- o. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-5’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 400

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz: 1.523

- p. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 2.83e-05

gerçek odak uzaklık: 4.71e-05

- q. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 17 buna karşılık gelen enerji: 1.71e-17

min uzaklık değeri: 21 buna karşılık gelen enerji: 1.65e-18

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 5.70e-18

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 1.83e-18

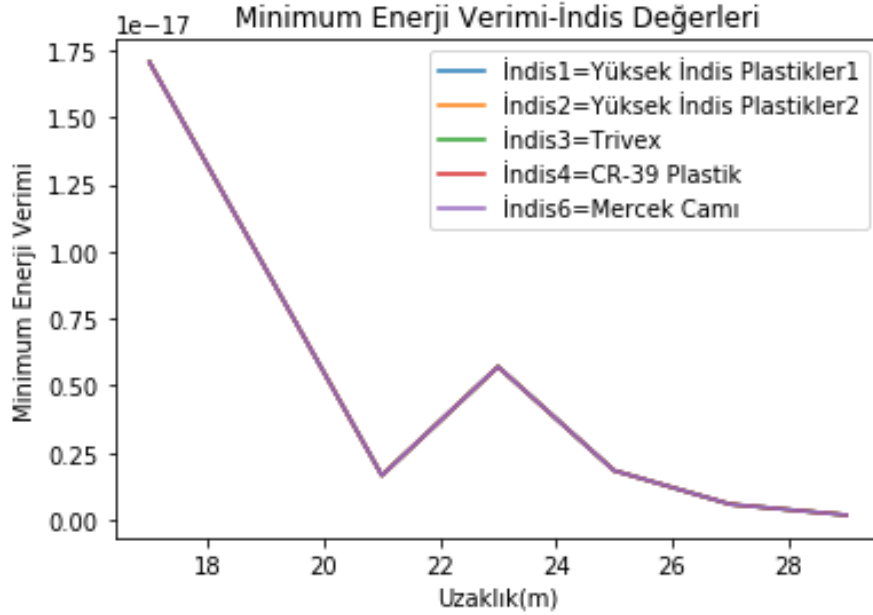
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 5.75e-19

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.75e-19

İndis değişken verilerinin karşılığı aşağıda verildiği gibidir:

1. İndis1=Yüksek İndis Plastikler1
2. İndis2=Yüksek İndis Plastikler2
3. İndis3=Tribrid
4. İndis4=Trivex
5. İndis5=CR-39 Plastik
6. İndis6=Mercek Camı

İndis değerleri verilen malzemelerin her biri için $\lambda = 400 \text{ nm}$, $f = 1 \text{ mm}$ için tasarlanan lenslerin minimum verim limitlerini belirleyen uzaklık noktalar kümesinin alabileceği değerler aşağıda grafikte gösterildiği gibidir.



Şekil 5.7 $\lambda=400 \text{ nm}$, $f=1 \text{ mm}$ için indis değerleri verilen lenslerin minimum verim limitlerini belirleyen uzaklık noktalar kümesinin fonksiyonu

Kırılma indis değerleri 1.74-1.523 aralığında olan lens malzemelerinin yazılım vasıtasıyla elde edilen minimum verim limitlerini belirleyen noktalar kümesi grafikleri Şekil 5.7’de verildiği gibidir.

Elde edilen bu analiz sonuçlarına göre kullanılan malzemenin indis değerlerinin bu minimum verim limitlerini belirleyen noktalar kümesi değerlerinden bağımsız olduğunu göstermektedir. Buna göre indis değişkeni minimum verim limit fonksiyonundan bağımsızdır. Kullanılan modelde indis değişkeni yalnızca optik elemanın tasarımında belirleyici parametredir.

5.3 Her Bir Lens Malzemesi İçin (300 – 500 – 700 nm) Dalgaboyu Değerleri İçin Geliştirilen Yazılım ile Minimum Verim Limitlerini Belirleyen Uzaklıkların Elde Edilmesi ve Karşılaştırılması

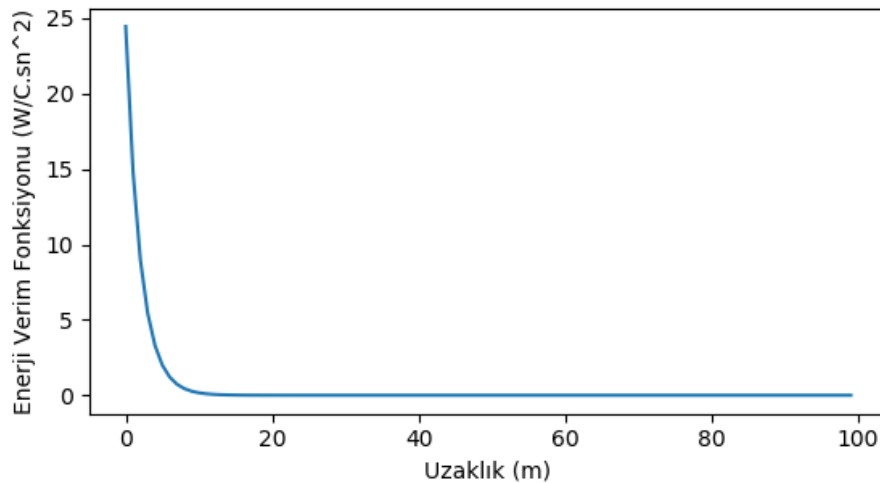
Hazırlanan yazılım ile yukarıdaki tabloda verilen mevcut lenslerde kullanılan malzemelerin indis değerleri, odak uzaklık değeri her biri için (yaklaşık olarak $x = 1mm$), görünür bölge dalga boyu aralığı için her lens malzemesinde (300 – 500 – 700 nm) dalgaboyu değerleri kullanılarak aşağıdaki Verim Fonksiyonu-Uzaklık grafikleri elde edilecektir.

5.3.1 Yüksek İndisli Plastikler1

Yüksek İndisli Plastikler	1.70-174	100 UV dalgaboyunu bloke eder.
---------------------------	----------	--------------------------------

İndis değeri $n=1.70$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.

$\lambda_1 = 300nm$ değeri için:



Şekil 5.8 $\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.70$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- r. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:
Dalga boyu değerini giriniz: 300

İstenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.70

- s. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri : 0.024

gerçek odak uzaklık: 3.50e-05

- t. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00021

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00013

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 7.89e-05

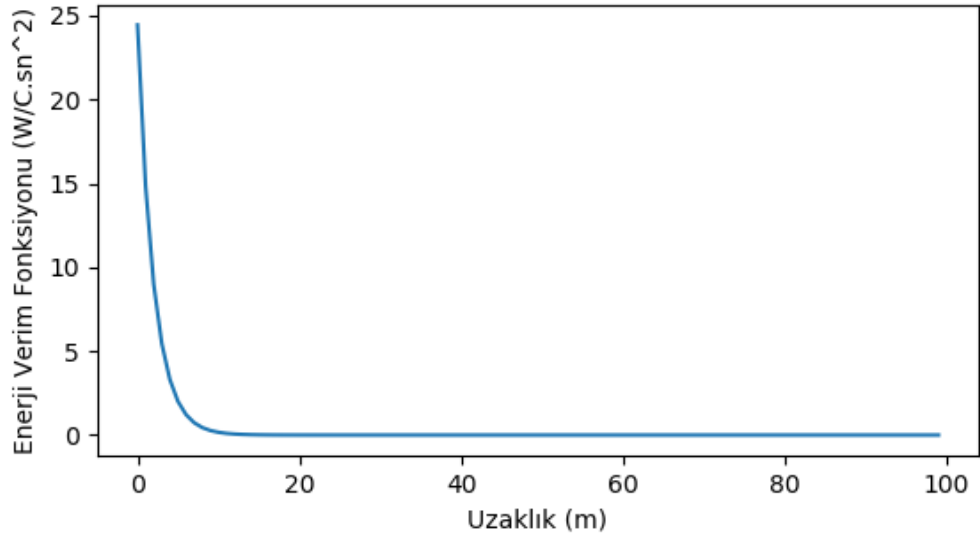
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 4.73e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 2.83e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.69e-05

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.01e-05

$\lambda_2 = 500nm$ değeri için:



Şekil 5.9 $\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.70$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- u. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değeri giriniz: 500

istenilen odak uzaklık değeri giriniz: 1

ortamın indis değeri giriniz : 1.70

- v. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

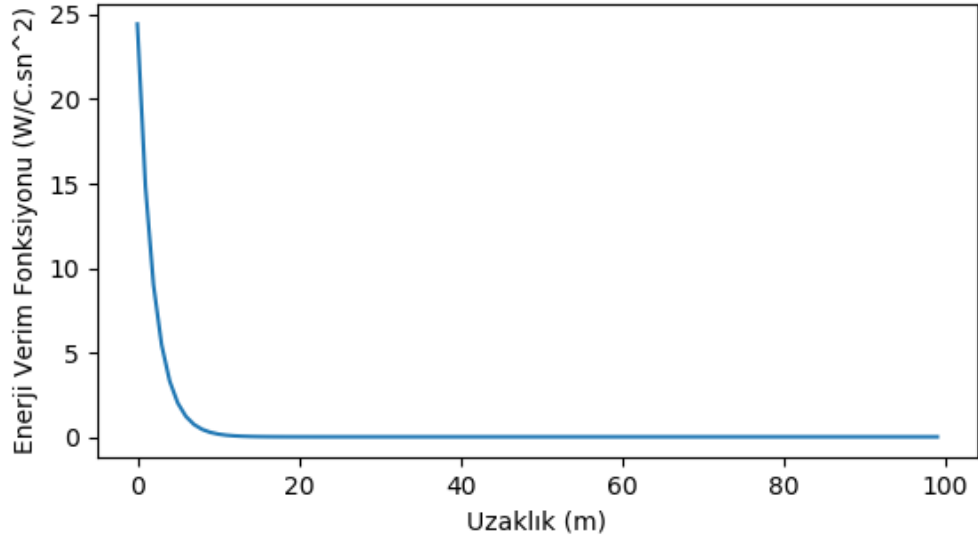
yarıçap değeri: 0.032

gerçek odak uzaklık: 4.52e-05

- w. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00024
min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00014
min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.67e-05
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.23e-05
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.16e-05
min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.91e-05
min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.15e-05

$\lambda_3 = 700nm$ değeri için:



Şekil 5.10 $\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.70$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

- x. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 700

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.70

- y. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.037

gerçek odak uzaklık: 5.35e-05

- z. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00015

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.88e-05

min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.38e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.25e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.97e-05

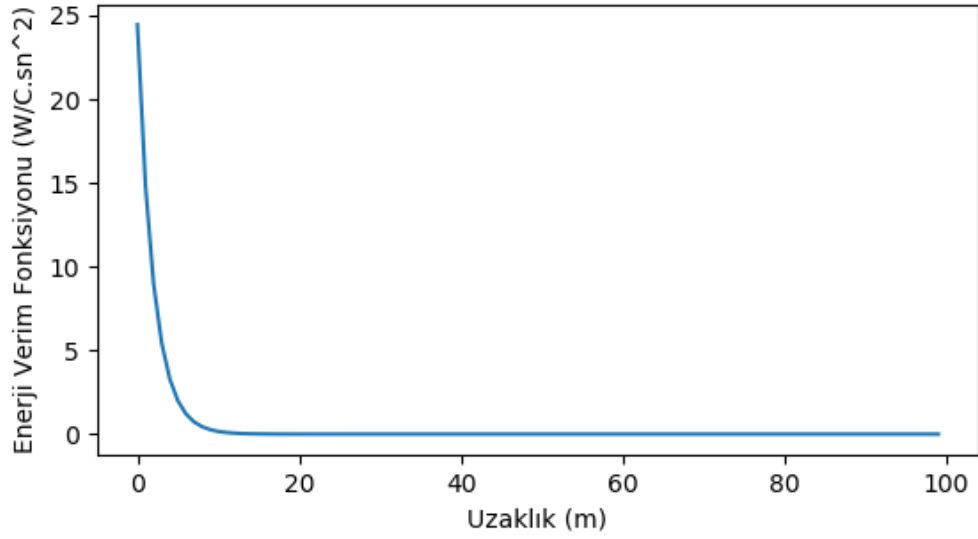
min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.19e-05

5.3.2 Yüksek İndisli Plastikler²

Yüksek İndis Plastikler ²	1.60-1.67	1- İnce ve Hafif 2- Yüzde yüz UV'yi engeller. 3- 1.70-174'ten daha yüksek maliyetli lenslere göre daha ucuzdur.
--------------------------------------	-----------	--

İndis değeri $n=1.60$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.

$\lambda_1 = 300nm$ değeri için:



Şekil 5.11 $\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

aa. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 300

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.60

bb. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.024

gerçek odak uzaklık: 4.08e-05

cc. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00022

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00013

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 7.90e-05

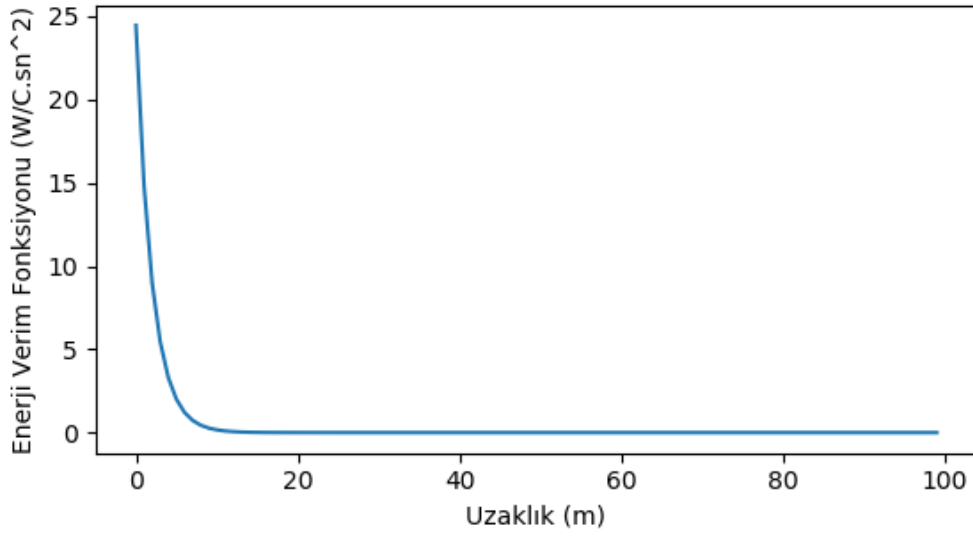
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 4.73e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 2.83e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.69e-05

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.01e-05

$\lambda_2 = 500nm$ değeri için:



Şekil 5.12 $\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

dd. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 500

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.60

ee. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.032

gerçek odak uzaklık: 5.27e-05

ff. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00024

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00014

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.67e-05

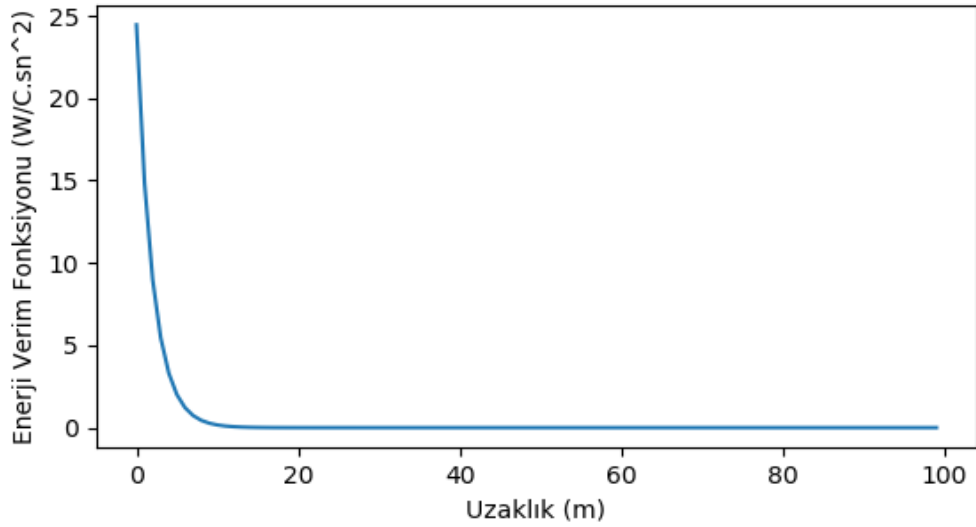
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.23e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.16e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.91e-05

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.15e-05

$\lambda_3 = 700nm$ değeri için:



Şekil 5.13 $\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.60$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

gg. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 700

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.60

hh. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.037

gerçek odak uzaklık: 6.24e-05

ii. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00015

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.88e-05

min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.38e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.25e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.97e-05

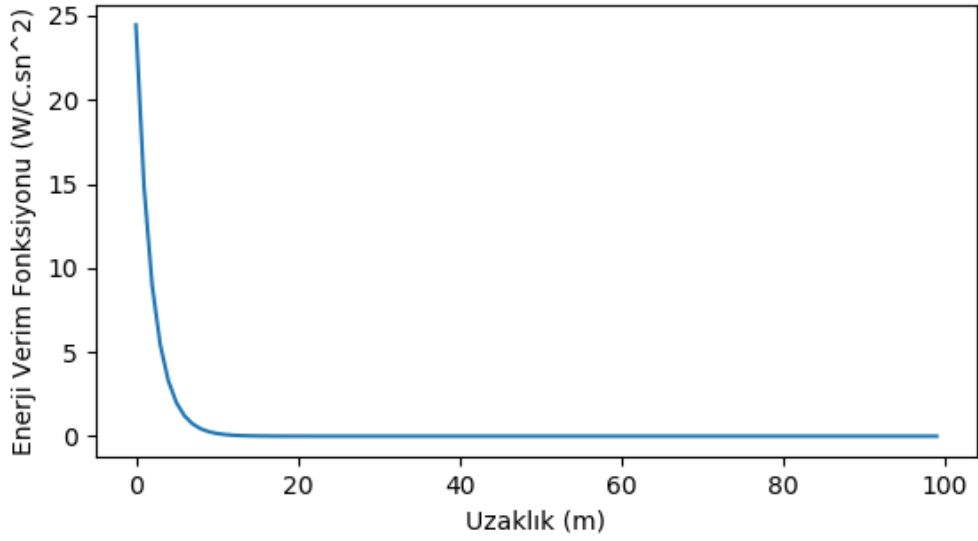
min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.19e-05

5.3.3 Trivex

Trivex	1.54	1-Üstün darbe dayanımı 2-Yüzde 100 UV'yi engeller 3-Mevcut en hafif lens malzemesi
--------	------	--

İndis değeri $n=1.54$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.

$\lambda_1 = 300nm$ değeri için:



Şekil 5.14 $\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

jj. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değeri giriniz: 300

istenilen odak uzaklık değeri giriniz: 1

ortamın indis değeri giriniz : 1.54

kk. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.024

gerçek odak uzaklık: 4.54e-05

ll. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değer: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00022

min uzaklık değer: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00013

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 7.90e-05

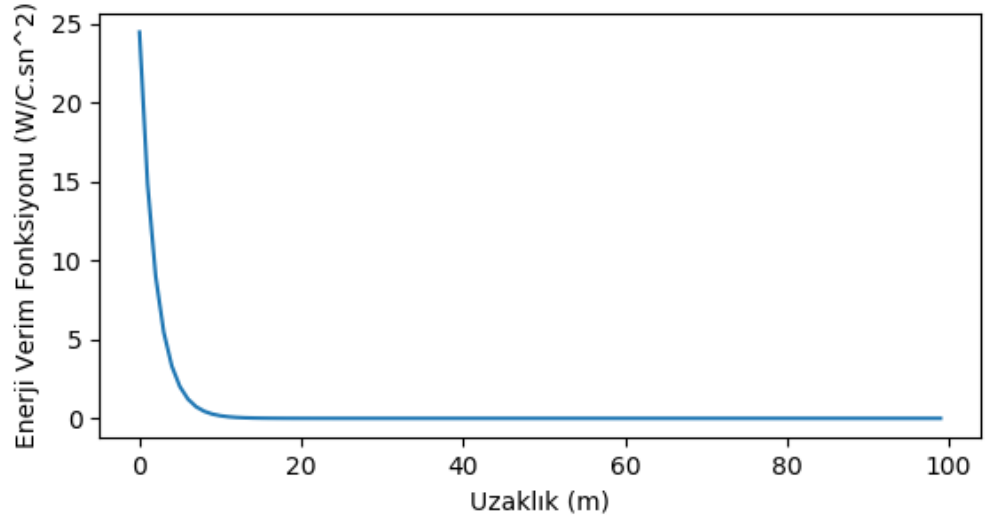
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 4.73e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 2.83e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.69e-05

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.01e-05

$\lambda_2 = 500nm$ değeri için:



Şekil 5.15 $\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

mm. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değeri giriniz: 500

istenilen odak uzaklık değeri giriniz: 1

ortamın indis değeri giriniz : 1.54

nn. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.032

gerçek odak uzaklık: 5.86e-05

oo. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değer: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00024

min uzaklık değer: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00014

min uzaklık değer: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.67e-05

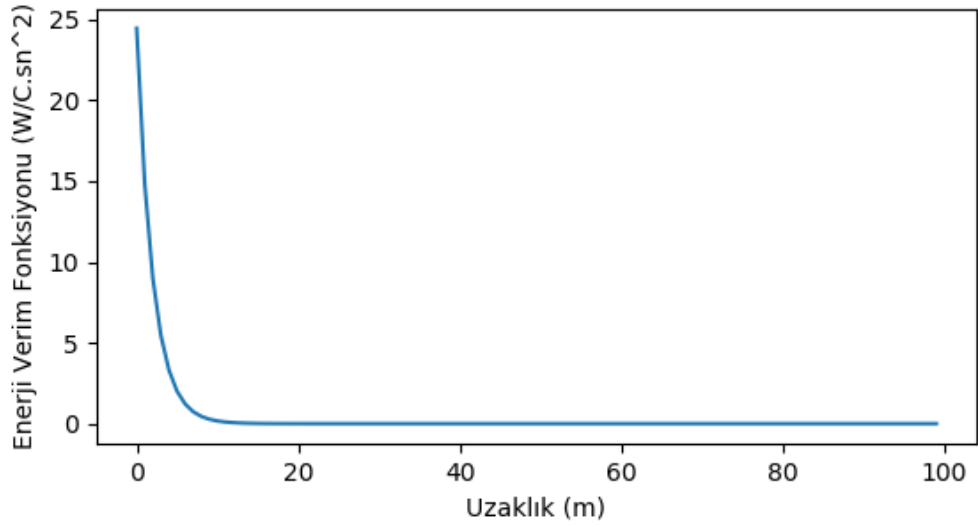
min uzaklık değer: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.23e-05

min uzaklık değer: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.16e-05

min uzaklık değer: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.91e-05

min uzaklık değer: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.15e-05

$\lambda_3 = 700nm$ değeri için:



Şekil 5.16 $\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.54$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

pp. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 700

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.54

qq. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.037

gerçek odak uzaklık: 6.93e-05

rr. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00015

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.88e-05

min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.38e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.25e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.97e-05

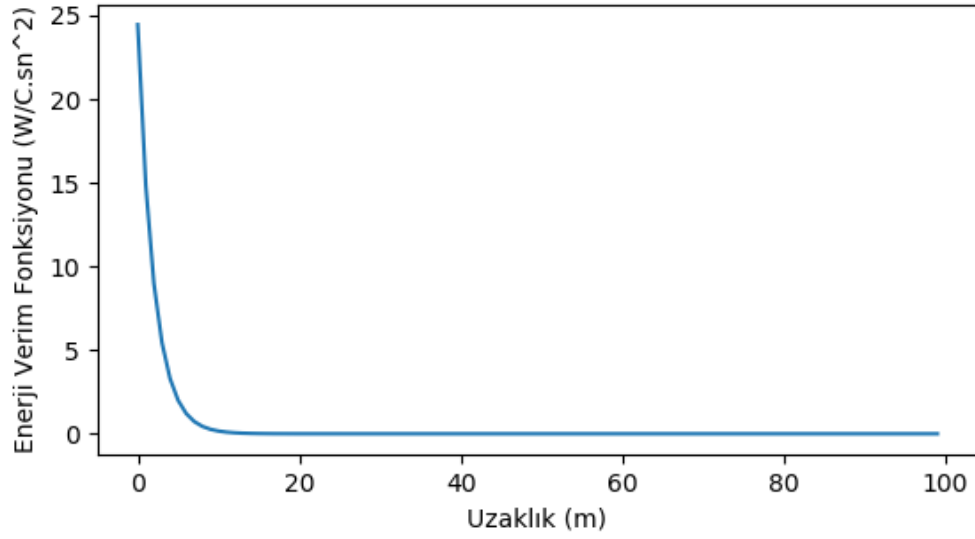
min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.19e-05

5.3.4 CR-39 Plastik

CR-39 Plastik	1.498	1-Mükemmel Optikler 2-Düşük Maliyet 3-Dezavantaj: Kalınlık
---------------	-------	--

İndis değeri $n=1.498$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.

$\lambda_1 = 300nm$ değeri için:



Şekil 5.17 $\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

ss. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 300

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.498

tt. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.037

gerçek odak uzaklık: 6.93e-05

uu. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değer: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00022

min uzaklık değer: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00013

min uzaklık değer: 25 buna karşılık gelen enerji: 7.89e-05

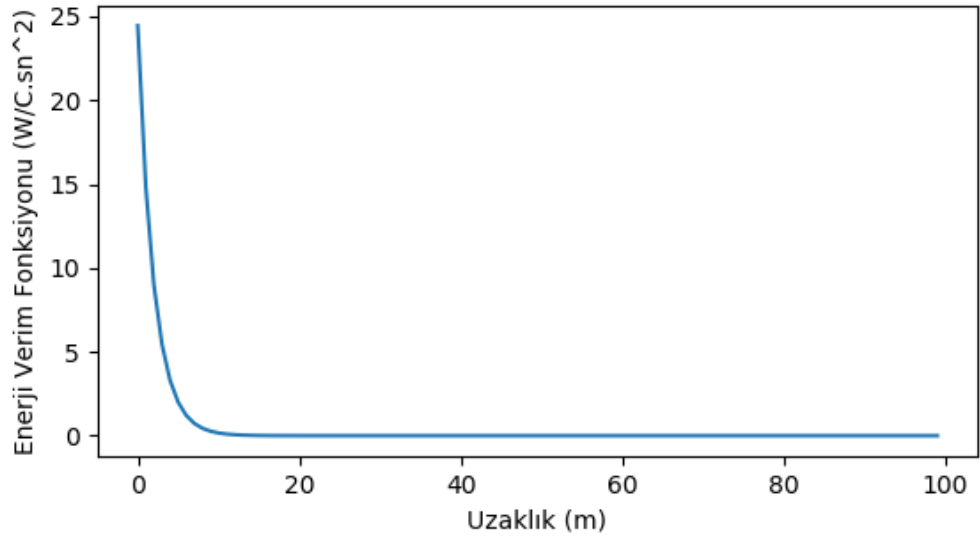
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 4.73e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 2.83e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.69e-05

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.01e-05

$\lambda_2 = 500nm$ değeri için:



Şekil 5.18 $\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

vv. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 500

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.498

ww. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.032

gerçek odak uzaklık: 6.35e-05

xx. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00024

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00014

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.67e-05

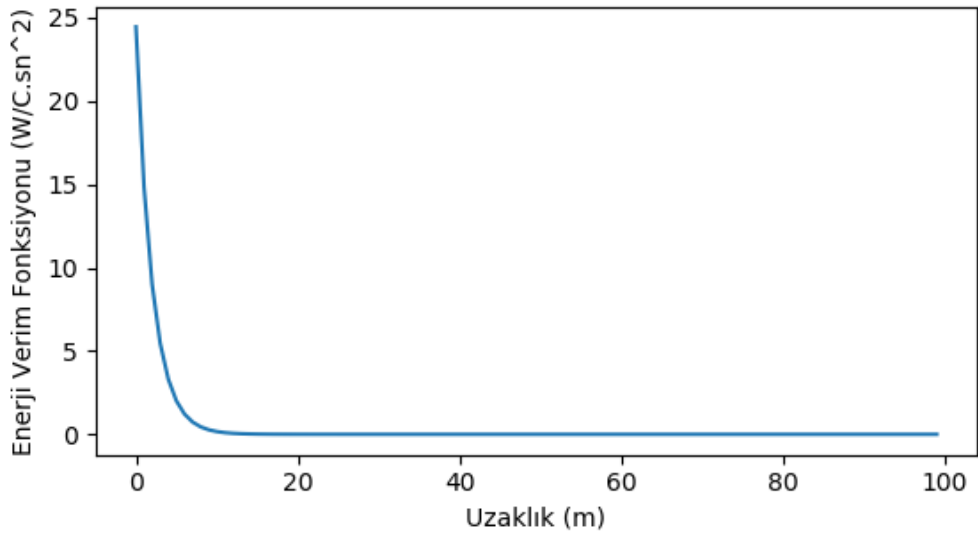
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.23e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.16e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.91e-05

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.15e-05

$\lambda_3 = 700nm$ değeri için:



Şekil 5.19 $\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.498$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

yy. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1'de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 700

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.498

zz. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.037

gerçek odak uzaklık: 7.51e-05

aaa. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00015

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.88e-05

min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.38e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.25e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.97e-05

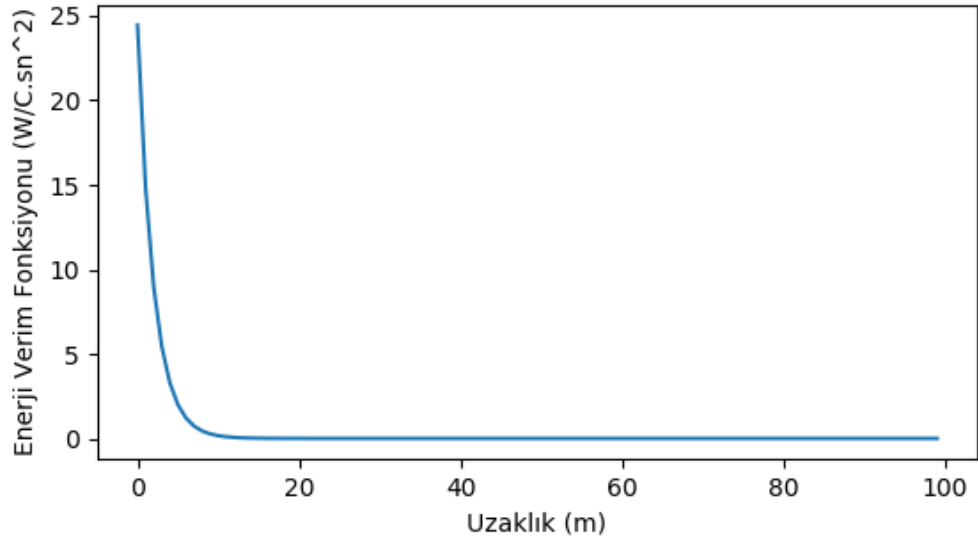
min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.19e-05

5.3.5 Mercek Camı

Mercek Camı	1.523	1-Mükemmel Optikler 2-Düşük Maliyet 3-Dezavantaj: Ağır, Kırılabilir
-------------	-------	---

İndis değeri $n=1.523$ için giriş değerlerine göre tasarlanan lensin tek eksen üzerindeki kaynak yada nesnenin Verim-Uzaklık Değeri değişim grafiği ve lens tasarım giriş değerleri, tasarımı planlan lensin gerçek odak uzaklık değeri ve yarıçap değeri aşağıda verildiği gibidir.

$\lambda_1 = 300nm$ değeri için:



Şekil 5.20 $\lambda_1 = 300nm$ için $n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

bbb. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 300

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.523

ccc. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.024

gerçek odak uzaklık: 4.68e-05

ddd. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00022

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00013

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 7.89e-05

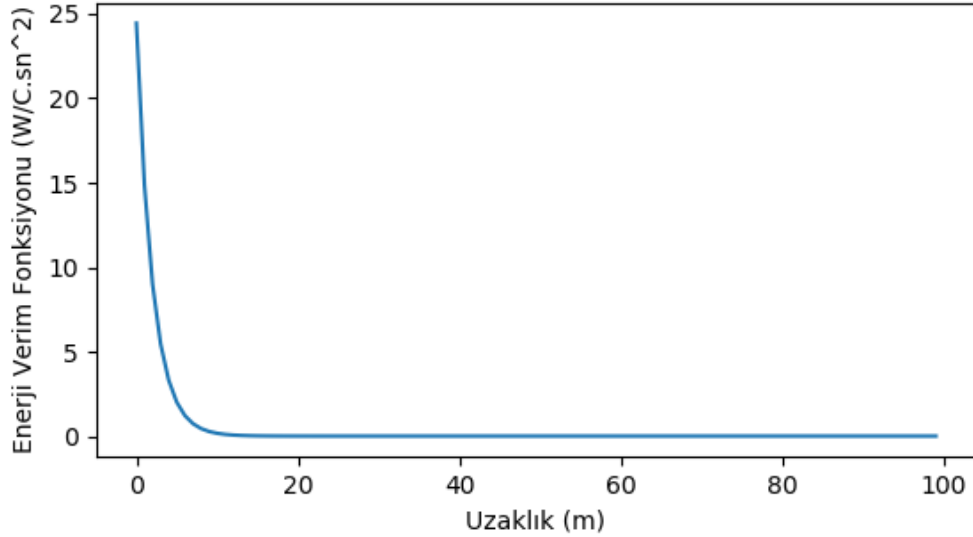
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 4.73e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 2.83e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.69e-05

min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.01e-05

$\lambda_2 = 500nm$ değeri için:



Şekil 5.21 $\lambda_2 = 500nm$ için $n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

eee. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 500

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.523

fff. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

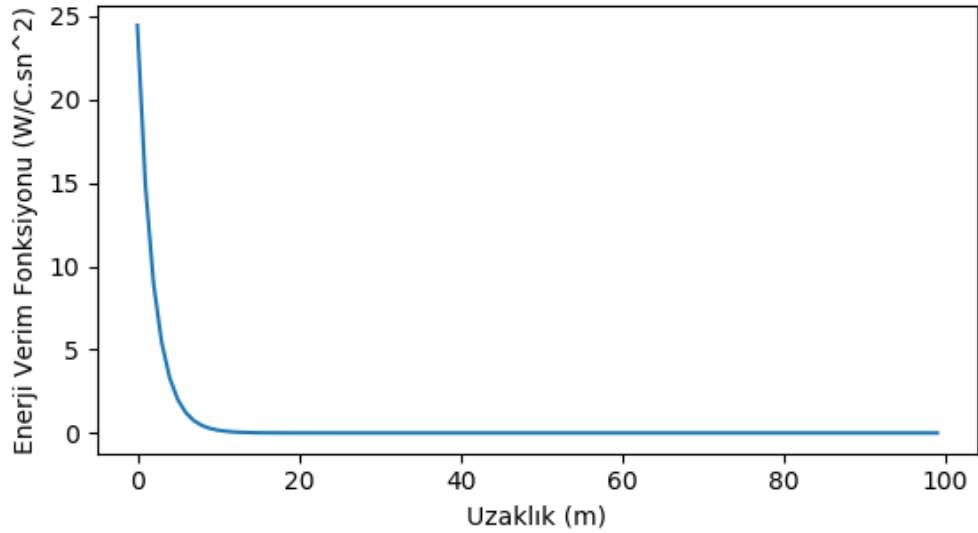
yarıçap değeri: 0.032

gerçek odak uzaklık: 6.05e-05

ggg. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 23 buna karşılık gelen enerji: 0.00024
min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00014
min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.67e-05
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.23e-05
min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.16e-05
min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.91e-05
min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.15e-05

$\lambda_3 = 700nm$ değeri için:



Şekil 5.22 $\lambda_3 = 700nm$ için $n=1.523$ Kırılma İndisli Malzeme ile Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Değerlerini Veren Verim-Uzaklık Grafiği

hhh. İlgili malzeme kullanılarak tasarımı planlanan lensin Verim-Uzaklık değişim grafiği Şekil-1’de gösterildiği gibidir. Tasarımı planlanan lensin giriş değerleri:

Dalga boyu değerini giriniz: 700

istenilen odak uzaklık değerini giriniz: 1

ortamın indis değerini giriniz : 1.523

iii. Yazılımın çalıştırılması sonucunda elde edilen lensin yarıçap ve gerçek odak uzaklık değeri aşağıda verildiği gibidir:

yarıçap değeri: 0.037

gerçek odak uzaklık: 7.16e-05

jjj. Yazılım ortamında tasarlanan lensin tek eksen üzerinde kaynağın lense göre belirli skala değerlerinde uzaklaştırılması sonucunda kaynaktan gelen enerjinin minimum olduğu uzaklık nokta aralığı aşağıda verildiği gibidir.

min uzaklık değeri: 24 buna karşılık gelen enerji: 0.00015

min uzaklık değeri: 25 buna karşılık gelen enerji: 8.88e-05

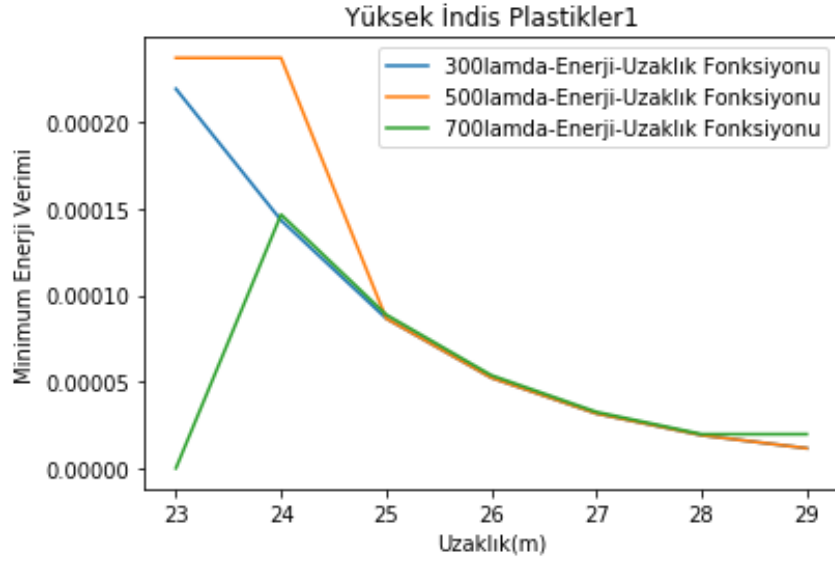
min uzaklık değeri: 26 buna karşılık gelen enerji: 5.38e-05

min uzaklık değeri: 27 buna karşılık gelen enerji: 3.25e-05

min uzaklık değeri: 28 buna karşılık gelen enerji: 1.97e-05

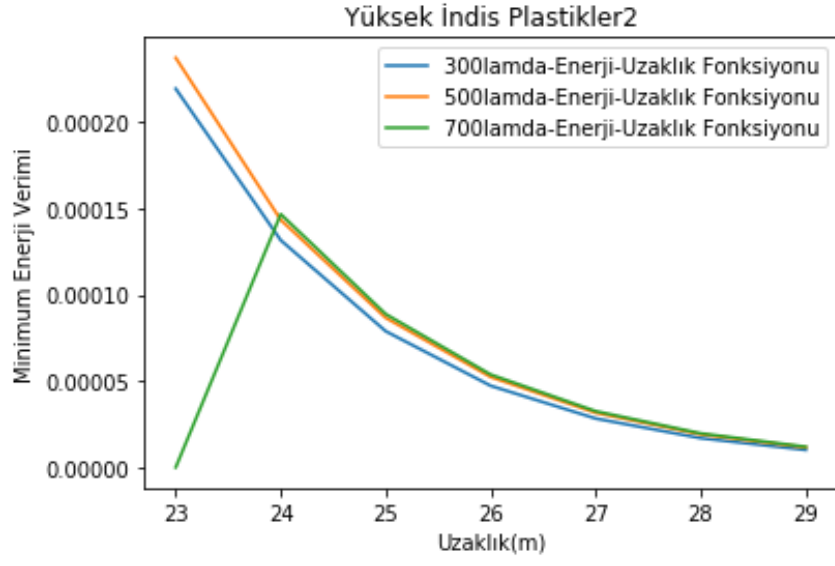
min uzaklık değeri: 29 buna karşılık gelen enerji: 1.19e-05

Bu bölümde Çizelge 5.1’de belirtilen lens malzemelerinin her biri için Verim-Uzaklık Fonksiyonu grafiklerinden elde edilen uzaklığa bağlı minimum verim değerleri her bir dalgaboyu değeri (300 – 500 – 700 nm) için yapılmış olup, elde edilen değerler karşılaştırma yapılması açısından tek bir grafikte gösterilmiştir.

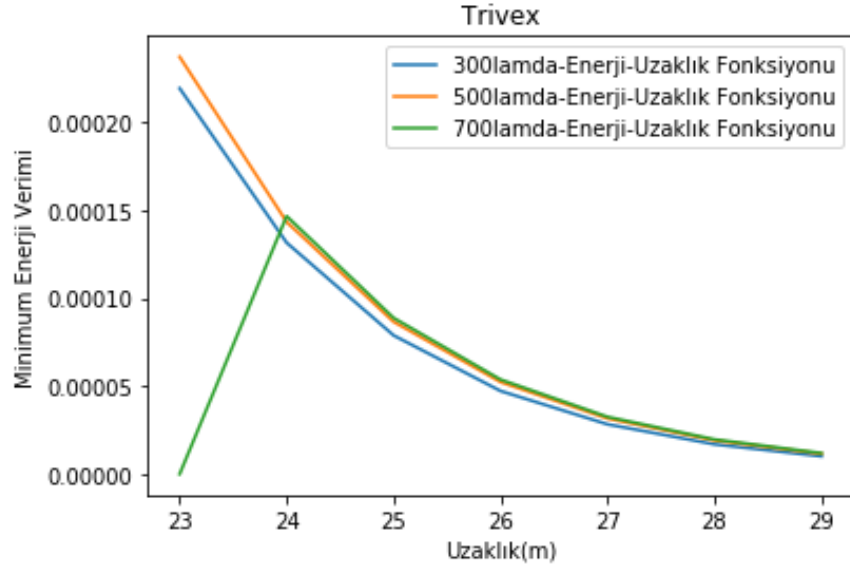


Şekil 5.23 Yüksek İndis Plastik1 ($n=1.74$) için (300 – 500 – 700 nm) dalgaboyu değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Fonksiyon Grafiği

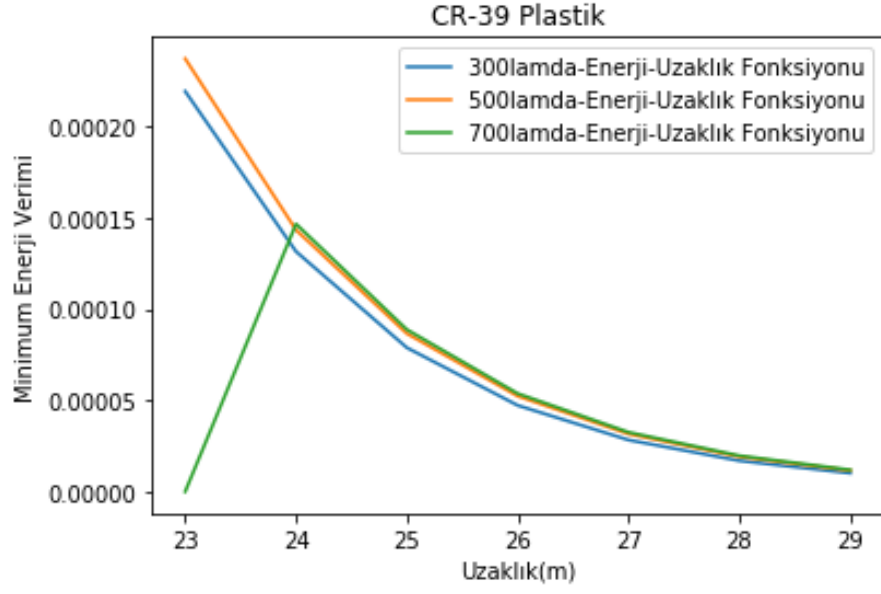
Yüksek İndis Plastik1 (1.74) için Minimum Verim Limit-Uzaklık fonksiyonu grafiği Şekil 5.23’de verildiği gibidir. 25-28 m uzaklıklarında Minimum Verimi Fonksiyonu her üç dalgaboyu için aynıdır. Denklemin tolerans aralığında minimum verim limit fonksiyonunu sağladığı uzaklık noktalar kümesi aralığı 28-29 m olarak elde edilmektedir. Dalgaboyu 700 nm olan ışık ışını bu noktalar kümesi aralığında sabit bir fonksiyon davranışında olup verim limiti diğer dalgaboylarına göre daha büyüktür.



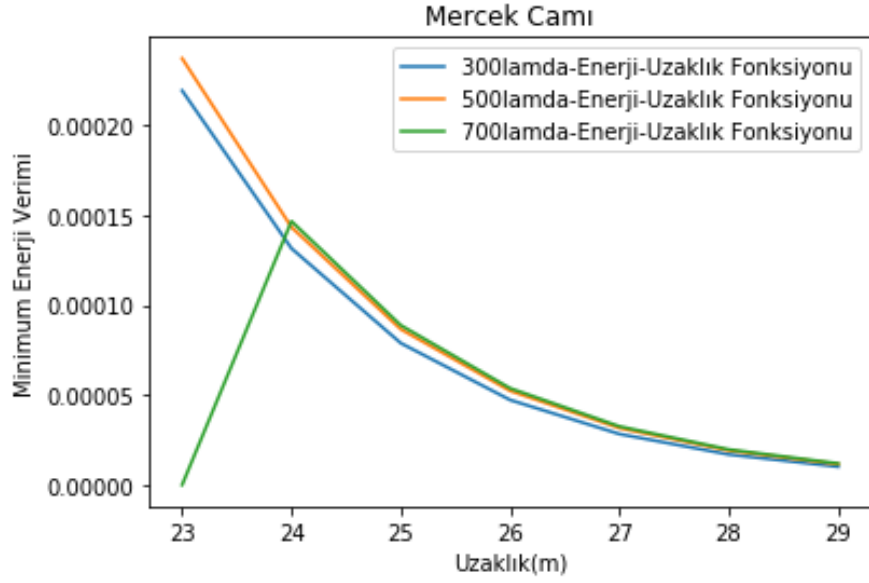
Şekil 5.24 Yüksek İndis Plastik2 ($n=1.60$) için (300 – 500 – 700 nm) Dalgaboyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği



Şekil 5.25 Trivex ($n=1.54$) için (300 – 500 – 700 nm) Dalgaboyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği



Şekil 5.26 CR-39 Plastik ($n=1.498$) için (300 – 500 – 700 nm) Dalgaboyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği



Şekil 5.27 Mercek Camı ($n=1.523$) için (300 – 500 – 700 nm) Dalga boyu Değerlerinde Tasarımı Planlanan Lensin Minimum Verim Limit-Uzaklık Grafiği

Herbiri farklı indis değerlerine sahip lens malzemelerinin Verim-Uzaklık Fonksiyonu grafiklerinden elde edilen uzaklığa bağlı minimum verim değerleri herbir dalga boyu değerleri (300 – 500 – 700 *nm*) için yukarıdaki Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27 grafiklerinde verildiği gibidir.

İlgili tasarım yazılımında kullanılan ana denklemin hassasiyet ve tolerans aralığına göre Minimum Enerji Verim Limitlerine bağlı uzaklık değerleri farklı dört indis malzemesi için aynı olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Geliştirilen yazılım ile herhangi bir difraktif lens elemanı için indis değerleri girişi ile lens elemanının temel tasarımını oluşturur. Ayrıca istenilen tasarım dalgaboyu yada odak uzaklık değeri için Fresnel Lensin yarıçapı ve dolayısıyla odak uzaklığında belirlendi. Programın asıl amacı belirli bir odak uzaklığı ve yarıçapa ait lens tasarımının minimum verime sahip olduğu noktaların temel optik denklemler kullanılarak önceden belirlendi. Eşik değere göre minimum difraktif verimin ortaya çıktığı uzaklık değerlerini belirler. Bu uzaklık değerlerine bağlı olarak tasarımda en iyi minimum verim limitlerini veren optimizasyon programı yazıldı.

Bölüm 5.2 de diğer lens tasarım parametrelerinin sabit olduğu farklı indis değerlerinde elde edilen uzaklığa bağlı minimum enerji verim grafikleri Çizelge 5.1’de belirtilen her lens malzemesi için aynı fonksiyon ve aynı noktalar kümesini vermektedir. Bu sonuç beklenen bir durumdur çünkü lens indis değerleri minimum enerji verim limitlerini belirleyen fonksiyon ve paraksiyal bölgeyi belirleyen eşik değeri ile bir bağlantısı yoktur. Bu parametre sadece lensin belirli bir dalgaboyunda odak uzaklığını belirler.

Bölüm 5.3’de her bir lens malzemesi için (300 – 500 – 700 nm) dalgaboylarında minimum verim limit-uzaklık fonksiyonlarının grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlara göre yüksek kırılma indis değerlerinde ($n \geq 1.70$) ve görünür dalga boyu spektrumunun yüksek dalgaboyu değerleri için minimum verim limiti daha uzak mesafelerde etkin olmaktadır. (Bkz. Şekil 1)

Dalgaboyu parametresi eşik değeri ve minimum verim limit fonksiyonuna bağlı bir parametredir. Dalgaboyunun artışı eşik değeri ifade eden programdaki Değer fonksiyonunu lens yarıçap formülüne göre daha hızlı arttırdığı için paraksiyal bölge uzaklığı da artış gösterecektir. Bu bölgenin uzaklığının artması minimum enerji verim limit uzaklığında artış göstermesi anlamına gelir. Böylece daha uzak nokta yada noktalar kümesinde verim limiti artar.

Bu çalışma kapsamında yapılan yazılım geliştirilmeye açıktır ve geometrik optik yaklaşımlar kullanılarak sistemin verimin düşüren optiksel sapmalara (aberrations) ve diğer geleneksel verim ölçüm parametreleri (MTF, OTF...) ile entegre çalışan ışık ışınlarının optik ve enerji anlamında analizini yapan paket program geliştirilebilir. Ayrıca ilgili programda eşik değer belirlenmesinde matematiksel yada sayısal bir yöntemin (genetik algoritma...) alt programı eklenerek program ile alakalı iyileştirme optimizasyon işlemi yapılabilir ve daha az hatalı ve duyarlılığı arttırılmış bir paket program tasarlanabilir.

Bu yazılım bilimsel ve ticari amaçlı olarak, başta diffraktif lens çeşidi olan Fresnel Lensler olmak üzere farklı tip optiksel elemanların tasarım sürecinde de özellikle verimin belirlenmesi için bir paket program haline getirilebilir.

Bu amaçla, bu tez çalışmasında elde edilen tasarım yazılımının eser ve patent niteliğine bağlı olarak gerekli başvuru çalışmaları da başlatılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] CIE Proceedings, (1924). Cambridge University Press, Cambridge, 1926.
- [2] Kaufman, J.E.,ed. (1984). "IES Lighting Handbook-Reference Volume", Illuminating Engineering Society of North America: New York, NY
- [3] CIE, (1983). "The Basis of Physical Photometry." Central Bureau of the CIE, Austria.
- [4] Wyszecki, G., and W. S. Stiles. (1982), Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed., John Wiley & Sons: New York, NY.
- [5] CIE, (1987). "International Lighting Vocabulary," Central Bureau of the CIE, Kegelgasse 27, Austria.
- [6] CIE, (1970). "Principles of Light Measurements," 1st ed.
- [7] CIPM, (1972). Proces-Verbaux 40, 145.
- [8] Berman, S. (1992). "Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitivity," J.IES.
- [9] IES color Committee, (1990). "Color and Illumination," IES DG-1-1990, Illuminating Engineering Society of North America, New York, NY 10017.
- [10] Judd, D. B. (1951). "Report of U. S. Secretariat Committee on Colorimetry Artificial Daylight," CIE Proceedings, Stockholm, Bureau Central de la CIE.
- [11] Kaiser, P. K. (1981). "Photopic and Mesopic Photometry: Yesterday, Today, and Tomorrow," in Golden Jubilee of Colour in the CIE 1931-1981, Bradford..
- [12] CIE, (1990). "CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic vision," CIE Central Bureau, Austria.
- [13] International Lighting Commission, (1970). "International Lighting Vocabulary."

- [14] Hunt, R.W.G. (1991). *Measuring Colour*, 2nd ed., Ellis Horwood, Chichester, Sussex, UK.
- [15] Shapely, Robert, (1991). "Retinal Regulation of Visual Contrast Sensitivity," *Optics and Photonics News*, Aug.
- [16] Heinemann, E.G. (1955). "Simultaneous Brightness Induction as a Function of Inducing and Test Field Luminances."
- [17] Heinemann E. G, (1972). "Simultaneous Brightness Induction," in *Handbook of Sensory Physiology*, New York, NY.
- [18] R. Shapely and C. Entroth-Cugell, (1984). "Visual Adaptation and Retinal Gain Controls," in *Progress in Retinal Research*, Pergamon.
- [19] Van Oosterom, A. and Strackee, J. (1983) The solid angle of a plane triangle. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-30(2), 125–126.
- [20] Siegel, R., Howell, J.R. and Lohrengel, J. (1991). *Heat Transfer by Radiation: Radiation Exchange between Surfaces and in Covers*, Springer-Verlag, Berlin.
- [21] Cohen, M.F. and Wallace, J.R. (1993) *Radiosity and Realistic Image Synthesis*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, California.
- [22] Vincent, J.D. (1989) *Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing*, JohnWiley&Sons Ltd, Chichester.
- [23] O'Shea D.C., Suleski T.J., Kathman A.D., Prather D.W., *Diffraction Optics Design, Fabrication and Test*, A Publication of SPIE, Bellingham, Washington, USA, 2004.
- [24] W. Goltsos and M. Holz, (1990). "Agile beam steering using binary optics microlens arrays," *Opt. Eng.* 29, pp. 1392–1397.
- [25] M.E. Motamedi, A.P. Andrews, W.J. Gunning, and M. Khoshnevisan, (1994). "Miniaturized micro-optical scanners," *Opt. Eng.* 33, pp. 3616–3623.
- [26] F. Nickolajeff, S. Hård, and B. Curtis, (1997). "Diffraction microlenses replicated in fused silica for excimer laser-beam homogenization," *Appl. Opt.* 36, pp. 8481–8488.
- [27] J.R. Leger, (1997). "Laser beam shaping," in "Micro-optics: Elements, Systems, and Applications", H.P. Herzig, Ed. Taylor and Francis, London, pp. 223–257.
- [28] J.B. Hammond, E.G. Johnson, C. Koehler, J. Stack et al. (1999). "Diffraction optics for laser welding and bonding," in *Diffraction and Holographic Technologies, Systems, and Spatial Light Modulators VI*, I. Cindrich, S.H. Lee, and R.L. Sutherland, Eds., *Proc. SPIE* 3633, pp.206–213.
- [29] J.R. Leger, D. Chen, and G. Mowry, (1995). "Design and performance of diffraction optics custom laser resonators," *Appl. Opt.* 34, pp. 2498–2509.

- [30] G.N. Laurence, , (1993) “Using rules of thumb in the design of physical optics systems”, Optical Society of America Technical Digest, 9, 12–13.
- [31] H. Dammann, (1970). “Blazed synthetic phase-only holograms”, Optik, 31 , 95–104.
- [32] H. Dammann and K. G€ortler, (1971). “High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms”, Optics Communications, 3, 312–315.
- [33] X.-Y. Da, (1992). “Talbot effect and the array illuminators that are based on it” Applied Optics, 31(16), 2983–2986.
- [34] M.C. Hutley, (1982). ‘Diffraction Gratings’, Academic Press, London.
- [35] R. Petit, (1980). “Electromagnetic Theory of Gratings”, Springer-Verlag, Berlin.
- [36] M. Goel and D.L. Naylor, (1996). “Analysis of Design Strategies for Dammann Gratings”, Proc. SPIE 1689, 35–45.
- [37] D. Leseberg, (1987). “Computer generated holograms: cylindrical, conical and helical waves”, Applied Optics, 26(20), 4385–4390.
- [38] M. Duparr_e, M.A. Golub, B. L€udge et al, (1995). ‘Investigations of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO2 laser beams’, Applied Optics, 34(14), 2489–2497.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Taner KARATEKE
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.02.1987 / Tunceli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : taner.karateke1987@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Fizik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Kartal Yakacık Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2018	ELAA TECHNOLOGY	Yazılım Mühendisi/Optik Mühendisi
2017	Beykoz Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2016	Mir-ArGe	Ar-Ge Mühendisi

2014	NEROINDUSTRY	Ar-Ge Mühendisi
2011	Yıldız İşçimenler İlk Öğretim Okulu	Ücretli Fen ve Tek. Öğr.

YAYINLARI

Bildiri

1. T. KARATEKE, Piroelektrik Sensörlere Gelen Elektromanyetik Dalgadan Maksimum Oranda Infrared Spektrumun Elde Edilmesine Yönelik Filtre Tasarımının Yapılması, Poster Bildirimi, Fotonik 2016 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, 23 Eylül 2016,13 Eylül 2016
2. T. KARATEKE, Optiksel İnterferometrik Sensörler İle Optimize Edilmiş İnsansız Hava Aracı Sistemleri, Poster Bildirimi, 1st. International Conference On Sustainable Science And Technology,12 Ekim 2018 -16 Ekim 2018
3. T. KARATEKE, Optiksel Lens Elemanlarının Maksimum ve Minimum Verim Limitlerini Belirleyen Paket Program Tasarımı, Poster Bildirimi, Poster Bildirimi, Fotonik 2018 Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, 14 Eylül 2018

Proje

1. TÜBİTAK, AR-GE MÜHENDİSİ, Akıllı Bina Sistemleri için Hibrit Piroelektrik Sensör Sistemlerinin Geliştirilmesi ve Tasarlanması.Yürütülen Kuruluş: NEROINDUSTRY SAVUNMA SAN. A.Ş.(Ulusal), Şubat 2014-Haziran 2018
2. TÜBİTAK (TEYDEB), AR-GE MÜHENDİSİ, EDTA ile Titrasyon Yöntemi ile Görüntü İşleme Yöntemi Yoluyla Ca ve Mg Besin Elementlerinin Tayinine Yönelik Cihaz Geliştirilmesi. Yürütülen Kuruluş: MİR AR-GE. (Ulusal), Mart 2015-2017
3. TÜBİTAK, AR-GE MÜHENDİSİ, Akış Enjeksiyon Analiz Yöntemi ile Topraksız Tarım Sistemlerinde Nitrat ve Fosfor gibi Besin Elemanlarının Miktarını ve Türünü Ölçen Gerçek Zamanlı Otomasyon Sistemin Geliştirilmesi. Yürütülen Kuruluş: MİR AR-GE. (Ulusal), NİSAN 2015-2018
4. TÜBİTAK, ARAŞTIRMACI, Dolaşımdaki Kanser Hücrelerinin (Ctcs) Mekanik Sertlik (Cell Stiffness) Yapısındaki Değişimi Ölçen Tek Hücre Görüntüleme Tekniği” Yürütülen Kuruluş: YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ-MARMARA ÜNİVERSİTESİ(Ulusal), MART 2015-(devam ediyor)
5. TÜBİTAK BİGG , PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ, “Akusto-Optik Entegre Kanser Hücresi Görüntüleme ve Teşhis Cihazı” Yürütülen Kuruluş: İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ÇEKİRDEK (Ulusal), 2019-(devam ediyor)

