



T.C
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK ÜRETİM SÜREÇLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSLAM ÇAĞRI ÖZDEMİR

OPTİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fatih UNGAN

SİVAS

2022



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© İslam Çağrı ÖZDEMİR, 2022

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

24.01.2022

İslam Çağrı ÖZDEMİR

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın başından sonuna kadar beni destekleyen, çalışmalarımı yönlendiren ve deneyimlerini benimle paylaşan çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Fatih UNGAN'a, birçok konuda fedakârlık göstererek daima beni destekleyen annem Aydan ÖZDEMİR'e ve babam Metin ÖZDEMİR'e en içten duygularla teşekkür ederim. Aynı zamanda desteğini ve yardımını benden esirgemeyen değerli arkadaşım Alper DEMİREL'e en içten duygularla teşekkür ederim.



ÖZET

OPTİK ÜRETİM SÜREÇLERİ

İslam Çağrı ÖZDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

Optik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih UNGAN

2022, 57+ xv sayfa

Bu çalışmada, tasarımı tamamlanan görünür dalga boyu optiğinin ham malzemeden başlayıp optik taşlama, optik parlatma, optik merkezleme, optik ince film kaplama ve optik ölçüm metodolojisi anlatılmıştır. Yüksek hassasiyet ve üretim hızı için tüm üretim zincirinin dikkate alınması gerekmektedir. Optik endüstrisi muazzam bir uygulama yelpazesini kapsar ve birçok üretim teknolojisini kullanır. İstenilen optik performans değerlerini sağlamak için optik üretim yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Optik Üretim, Optik Taşlama, Optik Parlatma, Optik Merkezleme, Optik İnce Film Kaplama ve Optik Ölçüm

ABSTRACT

OPTICAL MANUFACTURING PROCESSES

İslam Çağrı ÖZDEMİR

Master of Science Thesis

Department of Optics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih UNGAN

2022, 57+ xv sayfa

In this study, starting from the raw material, optical grinding, optical polishing, optical centering, optical thin film coating and optical measurement methodology of the completed visible wavelength optics are explained. For high precision and production speed, the entire production chain needs to be considered. The optical industry covers an enormous range of applications and uses many manufacturing technologies. Optical fabrication was produced and the results were evaluated to provide the desired optical performance values.

Keywords: Optical Manufacturing, Optical Grinding, Optical Polishing, Optical Centering, Optical Thin Film Coating and Optical Measurement

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİL DİZİNİ.....	xii
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Optik.....	2
1.1.1 Geometrik Optik.....	2
1.1.2. Fiziksel Optik	3
1.1.3. Kuantum Optiği	4
1.2 Elektromanyetik Spektrum.....	4
1.3 Işığın Özellikleri.....	5
1.3.1 Geçirgenlik	6
1.3.2 Yansıtma.....	6
1.3.3 Soğurma.....	7
2. OPTİK KAVRAMLAR.....	8
2.1 Kırılma	8
2.2 Kırınım	9
2.3 Kırılma İndisi	10
2.4 Saçılma.....	10
2.5 Girişim.....	10
2.6 Difraksiyon.....	11
2.7 Odak Noktası.....	12
2.8 Efektif Odak Uzaklığı (Effective Focal Length).....	12

2.9 Arka Odak Uzaklığı (Back Focal Length)	13
2.10 Optik Açıklık (Clear Aperture)	14
2.11 F Numarası (F Number)	14
2.12 Görüş Alanı (Field of View)	15
2.13 Abbe Numarası.....	16
3. MERCEK	18
3.1 Mercek Tipleri.....	18
3.1.1 Dışbükey Mercek (Konvex)	18
3.1.2 İçbükey Mercek (Konkav).....	18
3.1.3 Düz Mercek (Plano)	19
3.2 Mercek Geometrisi.....	19
3.3 Mercek Yüzey Tipleri	20
3.3.1 Küresel Yüzeyler (Spherical)	20
3.3.2 Aküresel Yüzeyler (Aspherical)	21
3.3.3 Holografik Yüzeyler (Diffractive).....	21
3.4 Mercek Malzemeleri	22
4. MERCEK YÜZEY KUSURLARI	23
4.1 Küresel Sapma	23
4.2 Renksel Sapma	24
4.3 Koma	25
4.4 Petzval Eğriliği (Petzval Curvature)	25
4.5 Astigmatizm	26
4.6 Biçim Bozukluğu (Distortion).....	27
5. OPTİK TASARIM.....	28
6. OPTİK ÜRETİM SÜREÇLERİ.....	30
6.1 Ham Malzeme Hazırlama	30
6.2 Optik Taşlama	31

6.3 Optik Parlatma	32
6.4 Optik Merkezleme.....	33
6.5 Optik İnce Film Kaplama.....	34
6.5.1 Optik İnce Film Kaplama Yöntemleri	36
6.5.1.1 Fiziksel Yöntemle Buhar Biriktirme (PVD).....	36
6.5.1.1.1 Isıl Buharlaştırma	37
6.5.1.1.2 Sputtering	37
6.5.1.2 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	38
7. OPTİK KALİTE KONTROL.....	40
7.1 Lazer İnterferometre.....	40
7.2 Profilometre.....	41
7.3 Sferometre	42
7.3 NC Optik Komparator.....	43
7.4 Spektrofotometre.....	43
8. OPTİK YÜZEY KALİTESİ DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ	45
8.1 P.V. (Peak to Valley)	45
8.2 Irregularity.....	45
8.3 Power.....	46
8.4 RMS (Root Mean Square).....	46
8.5 Astigmat	47
9. DENEYSEL ÇALIŞMA	48
10. TARTIŞMA VE SONUÇ	53
11. KAYNAKLAR	54
12. ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1 Işık Işınlарının Kırılması ve Yansıması.....	2
Şekil 1.2 Işık Dalgalarında Kırınım ve Girişim [3]	3
Şekil 1.3 Işık Dalgalarında Kutuplanma [4]	3
Şekil 1.4 Compton Saçılması [5]	4
Şekil 1.5 Dalga Boyu.....	4
Şekil 1.6 Elektromanyetik Spektrum [6]	5
Şekil 1.7 Geçirgenlik	6
Şekil 1.8 Yansıtma.....	6
Şekil 1.9 Soğurma.....	7
Şekil 2.1 Işığın Ortam Değıştirirken Kırılması	8
Şekil 2.2 Snell's Law Yasası [7]	9
Şekil 2.3 Işığın Madde ile Etkileşerek Kırınımına Uğraması.....	9
Şekil 2.4 Işığın Saçılması [8].....	10
Şekil 2.5 Girişim.....	11
Şekil 2.6 Fringe.....	11
Şekil 2.7 Odak Noktası [9]	12
Şekil 2.8 Odak Noktalarının Gösterimi	13
Şekil 2.9 Mercek Parametreleri	13
Şekil 2.10 Giriş Açıklığı.....	15
Şekil 2.11 F Numarası [11].....	15
Şekil 2.12 Görüş Alanı	16
Şekil 2.13 Görüş Açısı.....	16
Şekil 3.1 Dışbükey Mercek	18
Şekil 3.2 İçbükey Mercek.....	19
Şekil 3.3 Düz mercek.....	19
Şekil 3.4 Mercek Ölçüleri.....	20
Şekil 3.5 Küresel Yüzey [12]	20
Şekil 3.6 Küresel ve Aküresel Lensler [13].....	21
Şekil 3.7 Holografik Mercek	21
Şekil 3.8 Freeform Yüzey.....	22
Şekil 4.1 Küresel Sapma [14]	23

Şekil 4.2 Küresel Sapmanın Hesaplanması	23
Şekil 4.3 Boyuna ve Enine Renksel Sapma [15]	24
Şekil 4.4 Koma [16].....	25
Şekil 4.5 Koma Kusurunun Görüntüye Etkisi [17]	25
Şekil 4.6 Petzval Görüntü Yüzeyi [18].....	26
Şekil 4.7 Astigmatizm [18].....	26
Şekil 4.8 Astigmatizmin Görüntüye Etkisi [17]	27
Şekil 4.9 Biçim Bozukluğu [19]	27
Şekil 5.1 Örnek Objektif Optiklerinin Tasarımı	29
Şekil 5.2 Örnek Objektif Optiklerinin Şeması.....	29
Şekil 5.3 Örnek Objektif Optiklerinin Analiz Sonuçları	29
Şekil 6.1 Optik Kütük [20]	30
Şekil 6.2 Blank [21].....	30
Şekil 6.3 Optik Taşlama İşlemi [22].....	31
Şekil 6.4 Optik Parlatma İşlemi [23]	32
Şekil 6.5 Mekanik Merkezleme	33
Şekil 6.6 Optik Merkezleme İşlemi [24]	34
Şekil 6.7 Optik İnce Film Kaplama İşlemi [25]	35
Şekil 6.8 Kaplamalı ve Kaplamasız Yüzeyin Geçirgenlik Grafiği.....	35
Şekil 6.9 Optik İnce Film Kaplama Prosesi	36
Şekil 6.10 Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemiyle Kaplama	39
Şekil 7.1 İnterferometre Ölçümü	40
Şekil 7.2 İnterferometre Ölçüm Yöntemi	40
Şekil 7.3 Örnek İnterferometre Ölçümü	41
Şekil 7.4 Profilometre Ölçümü [27]	41
Şekil 7.5 Örnek Profilometre Ölçümü	42
Şekil 7.6 Sferometre Ölçümü [28].....	42
Şekil 7.7 NC Optik Komparatör [29]	43
Şekil 8.1 Peak to Valley	45
Şekil 8.2 Irregularity Kontrolü [31].....	45
Şekil 8.3 Yüzey Profilineki Pürüzlülük	46
Şekil 8.4 İki Boyutlu Yüzey Pürüzlülüğü Gösterimi.....	47
Şekil 9.1 İnterferometre Ölçüm Sonucu	48
Şekil 9.2 Merkez Kaçıklık Ölçüm Sonucu	49

Şekil 9.3 Cauchy Yöntemi Matematiksel Gösterimi	50
Şekil 9.4 175nm TiO ₂ 'in 300-1100 nm Kaplandığında Işığa Olan Tepkisi	50
Şekil 9.5 SiO ₂ 'in 345 nm Kaplandığında Işığa Olan Tepkisi	51
Şekil 9.6 Optik İnce Film Kaplama Teorik Fiziksel Kalınlık Tablosu.....	51
Şekil 9.7 Spektrofotometre Tek Yüzey Yansıma Ölçüm Sonucu	52



SİMGELER DİZİNİ

n	Kırılma indisi
c	Işık hızı, m/s
V	Hız, m/s
f	Odak noktası
t	Kalınlık
R	Eğrilik yarıçapı
d	Merkez kalınlık
F/#	F Numarası
H	Görüş alanı
nf	Mavi ışık için kırıcılık indeksi
nd	Sarı ışık için kırıcılık indeksi
nc	Kırmızı ışık için kırıcılık indeksi
Vd	Abbe numarası
H	Görüntü yüksekliği
λ	Dalga boyu

KISALTMALAR DİZİNİ

CNC Computer Numerical Control

EMS Elektromanyetik spektrum

EFL Effective Focal Length

BFL Back Focal Length

FOV Field of view

PV Peak to Valley

PVD Physical Vapor Deposition

CVD Chemical Vapor Deposition

NC Numerical Control

RMS Root Mean Square

1. GİRİŞ

Günümüzde tüm silah üstü dürbünlerde, sivil alana yönelik gözetleme ve keşif kameralarında optik bulunmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile farklı optik üretim ve optik ölçüm metotları gelişmiştir. Optik endüstrisi, muazzam bir uygulama yelpazesini kapsar ve birçok üretim teknolojisini kullanır.

Optik endüstrinin aradığı yüksek hassasiyet ve üretim hızı, CNC tezgahlarına özel gereksinimler gerektirir. CNC tezgahları kullanırken optik üretimini hızlandırmak için her üretim adımını geliştirmek, tüm üretim zincirini optimize etmek ve optiklerin tasarım isterlerini sağladığını doğrulamak gerekir.

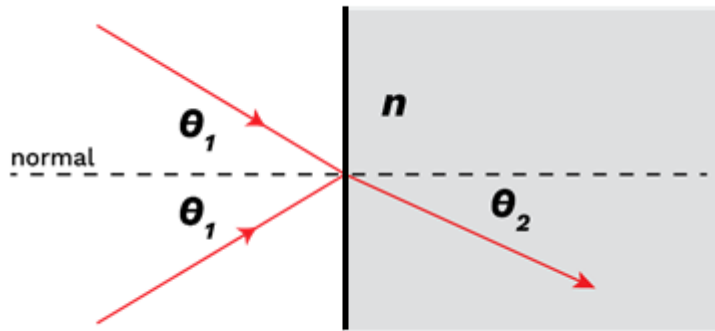
Üretim için CNC tezgah seçimi, CNC tezgah setupların kurulması, işlenecek optik için takım tasarımı, optiğin tezgaha bağlama yöntemi, optik işlenirken kullanılacak soğutma sıvısı, ince film kaplama için tasarımın yapılması, ince film kaplama için optiğin tezgaha bağlama yöntemi ve her üretim adımı sonrasında kalite kontrol adımların belirlenmesi optiğin doğru üretilmesi için çok önemlidir.

1.1 Optik

Optik, ışık hareketlerini, özelliklerini, ışığın diğer maddelerle etkileşimini inceleyen; fiziğin ışığın ölçümünü ve sınıflandırması ile uğraşan bir alt dalıdır. Optik, genellikle gözle görülebilen ışık dalgalarının ve gözle görülemeyen morötesi ve kızılötesi ışık dalgalarının hareketini inceler. Çünkü ışık bir elektromanyetik dalgadır ve diğer elektromanyetik dalga türleri (X-ray, mikrodalga, radyo dalgaları gibi) ile benzer özellikler gösterir. Optik, ışıkla ilgili olayları üç değişik modelde inceler. Buna göre optik; Geometrik Optik, Fiziksel Optik (Dalga Optiği) ve Kuantum Optiği olmak üzere üç kısma ayrılır. [1]

1.1.1 Geometrik Optik

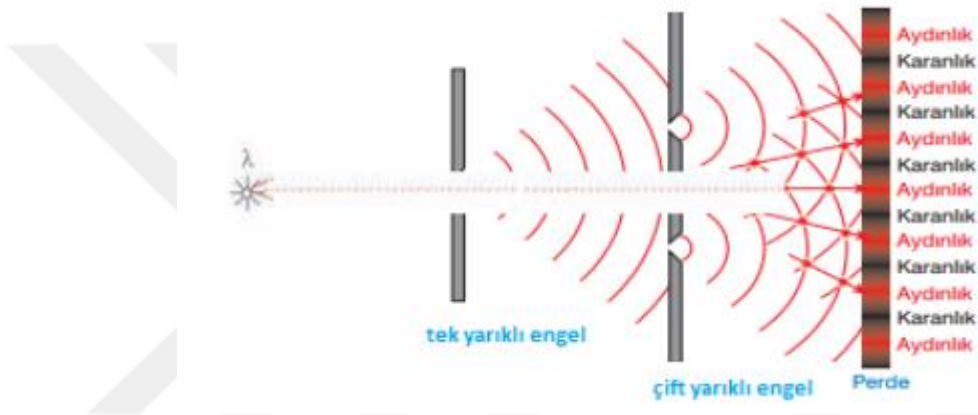
Işığın izotrop (her tarafının fiziksel özelliği aynı) ortamda doğrusal yayılmasını temel kabul etmektedir. Yansıma, aydınlanma ve kırılmama olaylarını inceleyen optik kısmıdır. Newton, çalışmalarında ışığı kaynaktan yayılan tanecikler gibi olduğunu düşünmekteydi, böylece geometrik optik gelişmiştir. Işık olaylarını izah etmede yeterli zannedilmiştir. Halbuki Newton'un düşünceleriyle gelişen geometrik optikle ancak yansıma, aydınlanma ve kırılma olayları izah edilebilmiştir. Aynalar, mercekler, ışık prizmaları, optik âletler, geometrik optikle incelenebilir. [2]



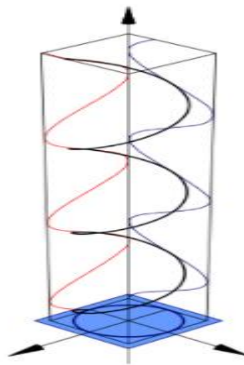
Şekil 1.1 Işık Işınlarnının Kırılması ve Yansıması

1.1.2. Fiziksel Optik

Işığın dalga yapısında olduğunu temel kabul ederek; girişim, kırınım ve kutuplanma olaylarını inceleyen optik kısmıdır. Newton'la aynı çağda yaşayan Huygens, Newton'un yanıldığını ve ışığın dalga şeklinde düşünülmesi gerektiğini ortaya atmıştır. Dalga modeli, geometrik optikle açıklanamayan girişim, kırınım, ve kutuplanma olaylarını açıklayabilmektedir. [2]



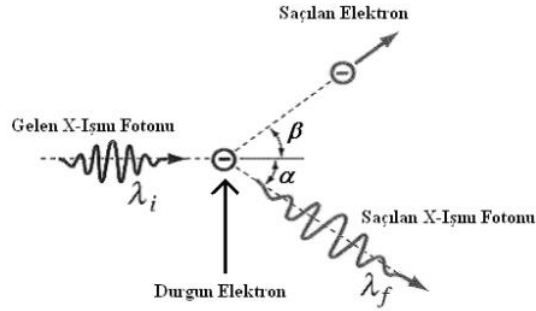
Şekil 1.2 Işık Dalgalarında Kırınım ve Girişim [3]



Şekil 1.3 Işık Dalgalarında Kutuplanma [4]

1.1.3. Kuantum Optiği

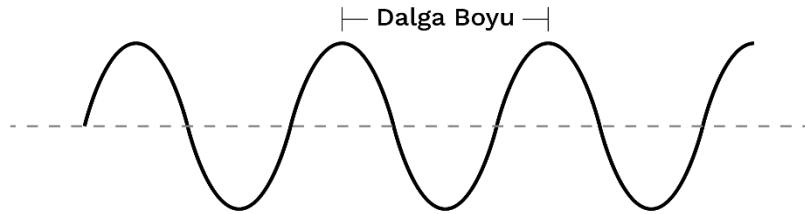
Max Planck'ın ışık dalgalarının enerjilerinin kuantumlu oluşunu keşfetmesiyle ortaya çıkmıştır. Buna göre ışık, atomdan yayılan enerji paketleri (dalga katarları) şeklindedir. Her bir pakete "foton" denir. Kuantum optiği ile ışık madde etkileşimi, fotoelektrik olay, "Compton" olayı ile incelenebilir. [2]



Şekil 1.4 Compton Saılması [5]

1.2 Elektromanyetik Spektrum

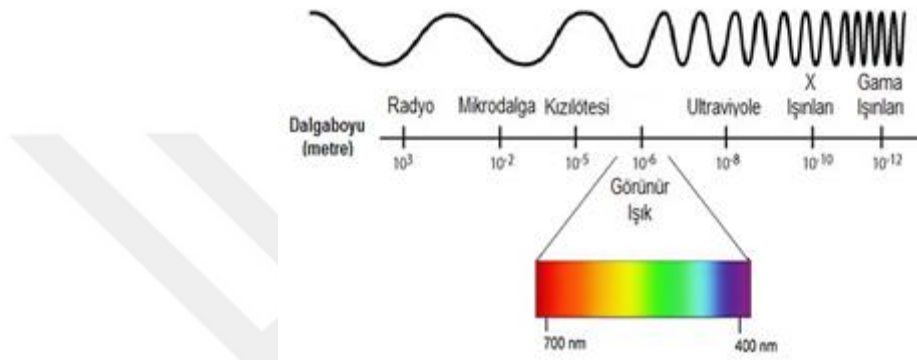
Işık dalgalar halinde yayılan tanecik yapılı bir enerji topluluğudur. Bir dalganın ardışık iki tepe noktası arasındaki mesafeye şekil 1.5’de gösterildiği gibi dalga boyu denir.



Şekil 1.5 Dalga Boyu

Elektromanyetik tayf veya elektromanyetik spektrum (EMS), ışık ışınlarının dalga boyları veya frekanslarına göre sıralanması ile edilen bir kavramdır. Şekil 1.5’de

bu sıralama gösterilmiştir. Bir cismin elektromanyetik tayfı veya spektrumu, o cisim tarafından çevresine yayılan elektromanyetik radyasyonu ifade etmektedir. Görünür ışığın dalga boyu 400 ile 800 nm arasındadır. Bu aralığın en altında dalga boyu yaklaşık 800 nm olan kırmızı ışık kısmına kızılötesi denmektedir. Kızılötesi bandındaki ışınların dalga boyu uzun olduğu için enerjileri daha azdır. Mikrodalgalar ise kızılötesi ışıktan uzun dalga boylarına sahiptir. Bu ışınlar, kızılötesi ışığın altında yer almaktadır.



Şekil 1.6 Elektromanyetik Spektrum [6]

1.3 Işığın Özellikleri

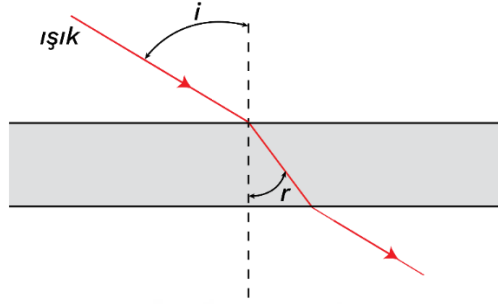
Bir cisim, üzerine düşen ışığa dört farklı tepki verebilir. Cisim ışığı yansıtır, soğurur, iletir ve saçar. Bu dört farklı tepkiyi aynı anda fakat farklı oranlarda gerçekleştirir. Burada önemli nokta gelen ışığın yoğunluğunun (Intensity) yansıyan (R), soğrulan (A), iletilen (T) ve saçılan (S) ışığın yoğunlukları toplamına eşit olmasıdır.

$$I = R + A + T + S \text{ (Enerji Korunumu)}$$

Cismin ışık ile etkileşimi cismin karakteristik özelliklerine, yüzey yapısına ve kalınlığına bağlıdır.

1.3.1 Geçirgenlik

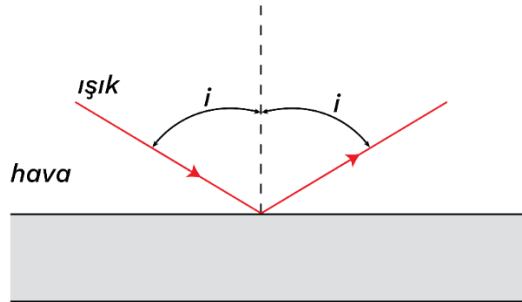
Şekil 1.7’de gösterildiği gibi cam malzemeler ışığın bir kısmını geçirmektedir.



Şekil 1.7 Geçirgenlik

1.3.2 Yansıtma

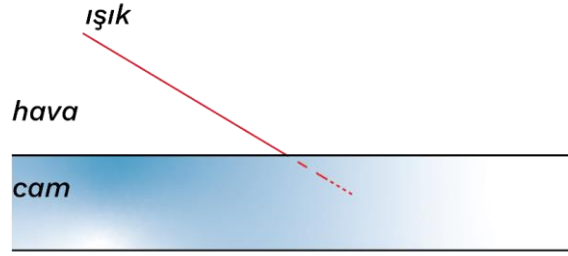
Şekil 1.8’de gösterildiği gibi havadan cam yüzeye gelen ışığın bir kısmı yüzeyden yansımaktadır.



Şekil 1.8 Yansıtma

1.3.3 Soğurma

Şekil 1.9’da gösterildiği gibi havadan cam malzemeye geçen ışığın belirli bir kısmı cam tarafından soğurulmaktadır.



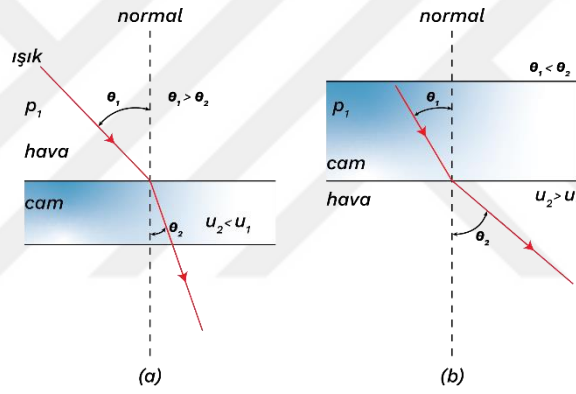
Şekil 1.9 Soğurma

2. OPTİK KAVRAMLAR

Bu bölümde optik sistemlerde kullanılan optik terimler ve optik elemanlar açıklanacaktır.

2.1 Kırılma

Işık ışınının bir mercek yüzeyine geldiğinde oluşan bir olaydır. İlerleyen dalgaların ilerledikleri ortamdan başka bir ortama geçmeleri sırasında ortamla etkileşerek yolunu değiştirmesi veya kırılması olayıdır.

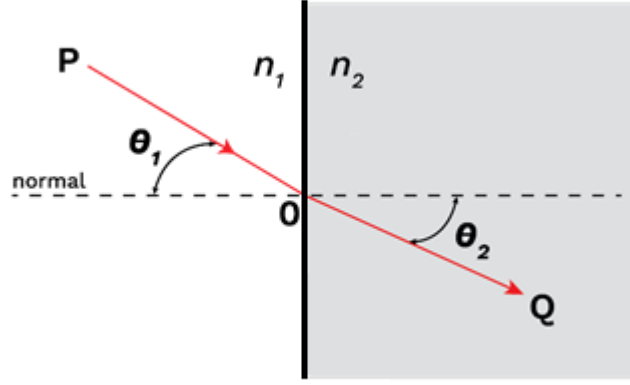


Şekil 2.1 Işığın Ortam Değiştirirken Kırılması

Işığın dağılımı Snell's law yasası ile denklem [2.1] ile ifade edilir.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

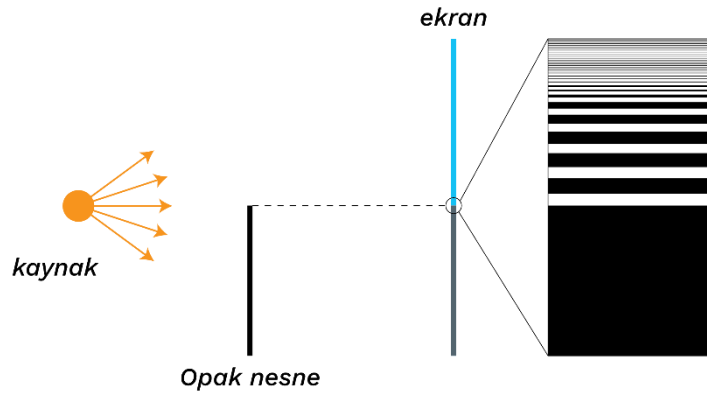
[2.1]



Şekil 2.2 Snell's Law Yasası [7]

2.2 Kırınım

Işık dalgaları geçirgen olmayan bariyerlerden oluşan dar bir aralıktan geçerken aralık sanki nokta ışık kaynağı gibi davranmaktadır. Perdede aydınlık ve karanlık bölgeler oluşmaktadır. Bu olay kırınım olarak tanımlanır ve ancak ışığın dalga modeliyle açıklanabilmektedir.



Şekil 2.3 Işığın Madde ile Etkileşerek Kırınıma Uğraması

2.3 Kırılma İndisi

Kırılma indisi, bir madde içinde yol alan ışığın, boşlukta (vakum altında) yol alan ışığa göre ne kadar yavaş ilerlediğini gösteren bir katsayıdır. Genellikle “n” sembolü ile gösterilmektedir. Kırılma indisi denklem [2.2] ile hesaplanmaktadır. Işık cisim etkileşiminde en belirleyici faktör kırılma indisidir. Kırılma indisi malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Işığın bir ortamdaki hızını belirler. Bir cismin kırılma indisi, ışığın o cisimdeki yayılma hızını belirlemek suretiyle ışığın cisim tarafından yansıtılma, soğurma veya iletilme miktarını belirlemektedir.

$$n = \frac{c}{v} \quad [2.2]$$

2.4 Saçılma

Şekil 2.4’de prizmaya gönderilen beyaz ışık demeti, prizmadan çıktıktan sonra renklere ayrılmaktadır. Bu renkler perde üzerine düşürüldüğünde perdede oluşan renk demetine beyaz ışığın spektrumu (tayf) denmektedir. Kırılma indisinin, dalga boylarına bağlı olarak değişmesiyle oluşmaktadır. Dalga boyu arttıkça kırılma indisi azalmaktadır. [8]

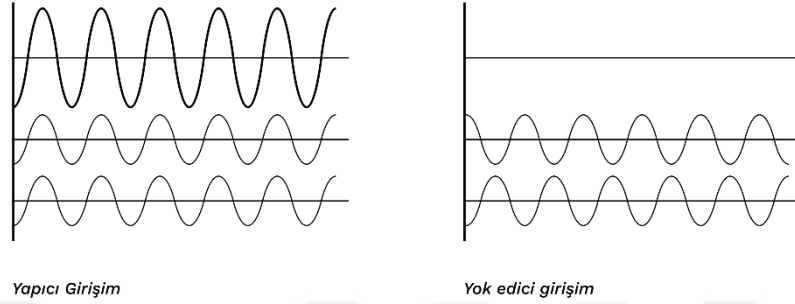


Şekil 2.4 Işığın Saçılması [8]

2.5 Girişim

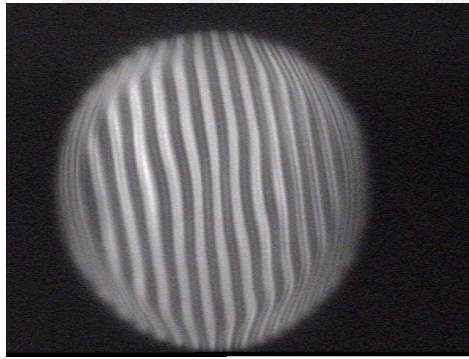
Dalgalar halinde yayılan ışık üst üste bindiğinde aradaki faza göre ya güçlenmekte ya da zayıflamaktadır. Aynı dalga boylarındaki ışık ışınları üst üste binip dalga

tepelerini yükseltip, çukurları ise daha da düşürebilmekte veya tepeleri ve çukurları yok edebilmektedir. Girişim iki şekilde oluşmaktadır. Güçlenen bölgeler aydınlık, zayıflayan bölgeler karanlık şekilde oluşmaktadır. Üst üste binen ışık girişim deseni oluşturur.



Şekil 2.5 Girişim

Her karanlık halka 1 fringe olarak adlandırılır. 1 fringe, matematiksel olarak ölçüm yapılan dalga boyunun yarısı olarak ifade edilir.



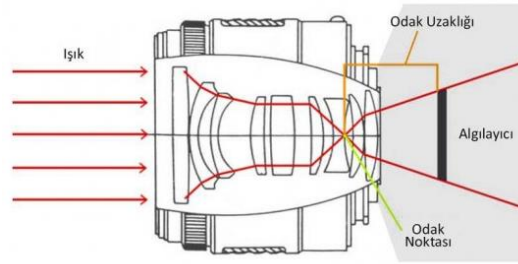
Şekil 2.6 Fringe

2.6 Difraksiyon

Girişim kullanarak saçılmayı önleme olarak ifade edilir. Bu özelliğe sahip yüzeylere holografik yüzeyler denir.

2.7 Odak Noktası

Dışarıdan aydınlatılan veya bir noktasal cismin olduğu varsayılan bir sistemde optik araçlar yardımı ile küresel dalgaların bir kısmının ıraksandığı veya yakınsandığı noktaya ışınlar demetinin odak noktası denir ve “f” ile gösterilir.

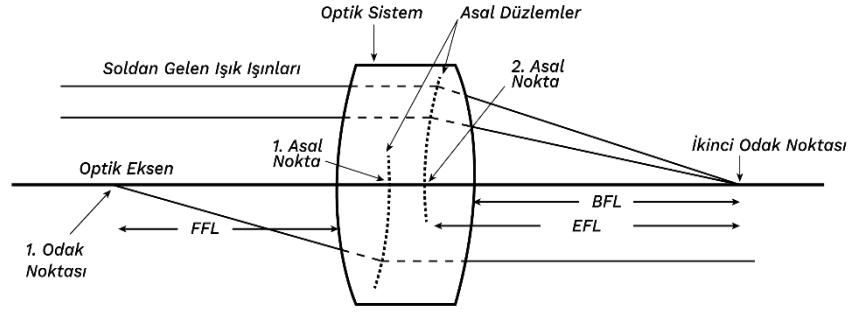


Şekil 2.7 Odak Noktası [9]

2.8 Efektif Odak Uzaklığı (Effective Focal Length)

Odak noktası ile asal eksen üzerindeki ana nokta arasında kalan mesafedir. Kalınlığı “t”, kırılma indisi “n”, ilk yüzeyin eğrilik yarıçapı “R1”, ikinci yüzeyin eğrilik yarıçapı “R2” ve merkez kalınlığı “d” olan bir mercek için odak uzaklığı şekil 2.8’de gösterilmiştir. Efektif odak uzaklığı denklem [2.3] ile hesaplanır.

$$EFL = \frac{1}{f} = (n - 1) + \frac{1}{R1} - \frac{1}{R2} + \frac{(n-1) d}{n (R1 \times R2)} \quad [2.3]$$

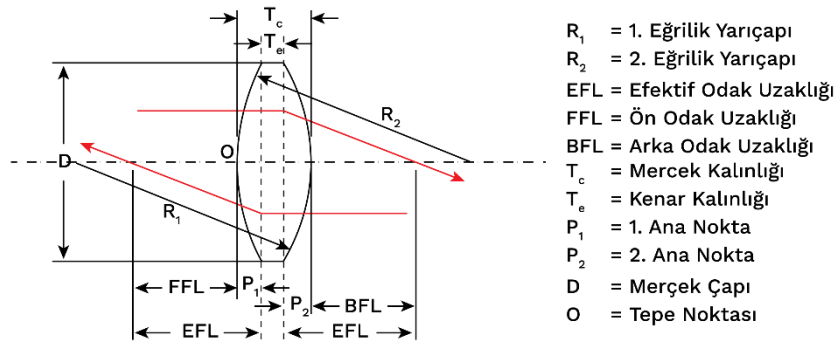


Şekil 2.8 Odak Noktalarının Gösterimi

2.9 Arka Odak Uzaklığı (Back Focal Length)

Sistemde kullanılan son optik yüzeyin tepe noktasından odak noktasına kadar olan uzaklıktır. Arka odak uzaklığı denklem [2.4] ile hesaplanır.

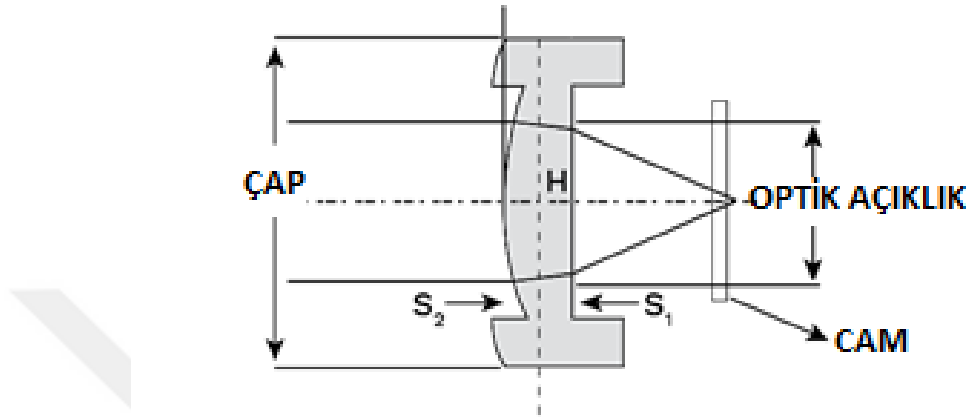
$$BFL = f \left(1 - \frac{(n-1)d}{n(R_1)} \right) \quad [2.4]$$



Şekil 2.9 Mercek Parametreleri

2.10 Optik Açıklık (Clear Aperture)

Işınları geçiren yüzeyin çapıdır. Bağlantı arabirimlerinin sisteme girmesine izin verdiği ışık konisinin en geniş olduğu noktadaki çaptır.

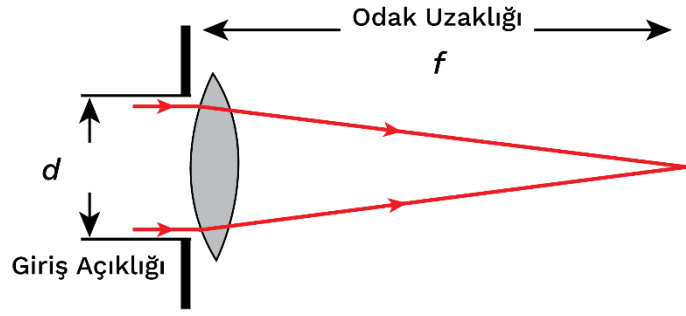


Şekil 2.10 Optik Açıklığın Gösterimi [10]

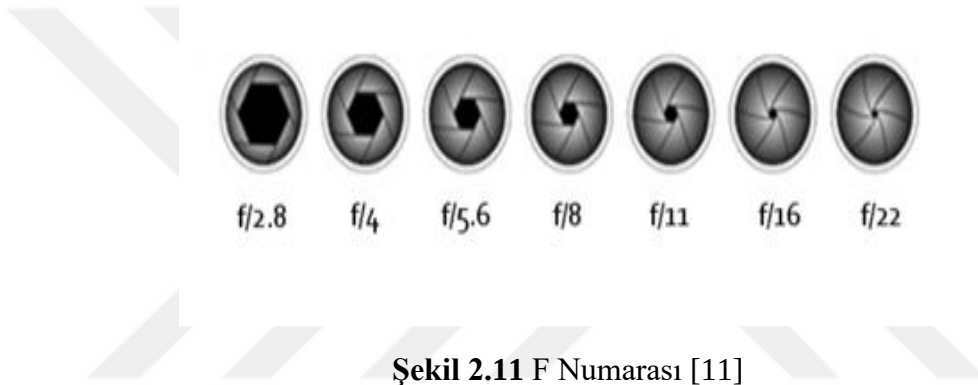
2.11 F Numarası (F Number)

F numarası odak uzaklığının, mercek giriş açıklığına oranıdır. Bu oran detektöre düşen ışık miktarını belirlemektedir. Optik bir sistemin ışık alma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Objektifin F numarası ne kadar küçük ise detektöre düşen ışık miktarı o kadar fazladır. F-numarası basitçe denklem [2.5] ile hesaplanır [4].

$$F / \# = \frac{\text{Odak Uzaklığı}}{\text{Giriş Açıklığı Çapı}} \quad [2.5]$$



Şekil 2.10 Giriş Açıklığı



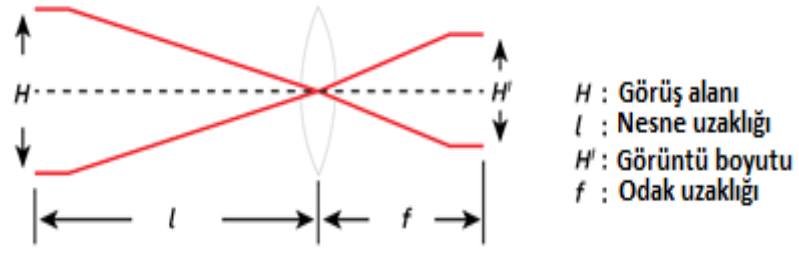
Şekil 2.11 F Numarası [11]

2.12 Görüş Alanı (Field of View)

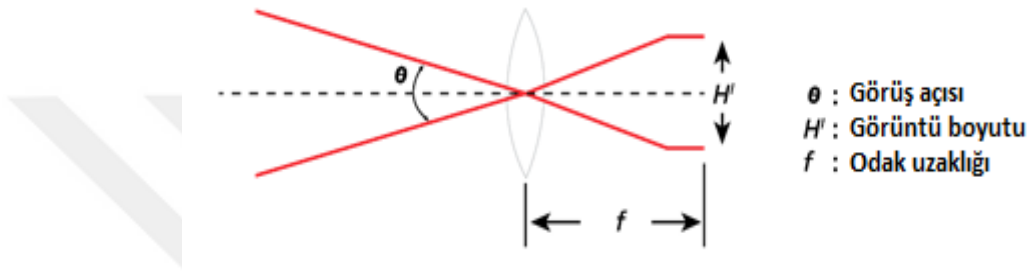
Bir optik sistemde herhangi bir anda sistemi hareket ettirmeden görülebilen alanın açı cinsinden ölçüsüdür. Optik sistemde görülen en geniş alana görüş açısı denir. Görüş alanı denklem [2.6] ile görüş açısı ise [2.7] ile hesaplanır.

$$H = H' \frac{l}{f} \quad [2.6]$$

$$\emptyset = 2 \tan^{-1} \frac{H'}{2f} \quad [2.7]$$



Şekil 2.12 Görüş Alanı



Şekil 2.13 Görüş Açısı

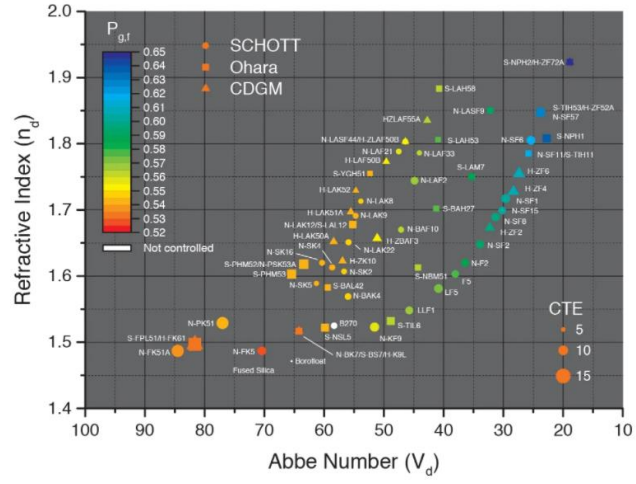
2.13 Abbe Numarası

Beyaz ışığın renklere ayrılma gücüdür. Abbe değerinin yüksek olması camın renk kalitesini artırır. Abbe değeri azaldıkça camın kırılma indisi artar. Abbe değerinin yüksek olması bakılan cismin daha net görülmesidir. [11]

Merceğin imal edilen hammadde yoğunluğu dolayısıyla kırılma indisi arttıkça abbe değeri ve ışık geçirgenliği azalır. Görme kalitesi düşer. Mavi ışık için kırıcılık indeksi "nf", sarı ışık için kırıcılık indeksi "nd" ve kırmızı ışık için kırıcılık indeksi "nc" olan bir mercek için abbe numarası "Vd" denklem [2.8] ile hesaplanır.

$$V_D = \frac{nd-1}{nf-nc} \quad [2.8]$$

Abbe numarası ne kadar büyük olursa o kadar çok renge saçılır.



Şekil 2.15 Farklı Camlar için Abbe Diyagramı [12]

3. MERCEK

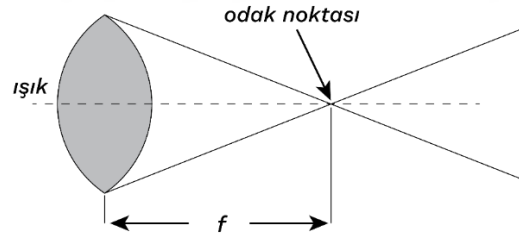
Mercek, ışık ışınlarını odaklamaya ya da ışınların dağılıma uğramasını sağlayan optik araçlardır.

3.1 Mercek Tipleri

Optik tasarımda isterlere göre farklı türde mercekler kullanılır. Yüzey şekillerine göre dışbükey, içbükey ve düz mercek olarak adlandırılmaktadır.

3.1.1 Dışbükey Mercek (Konvex)

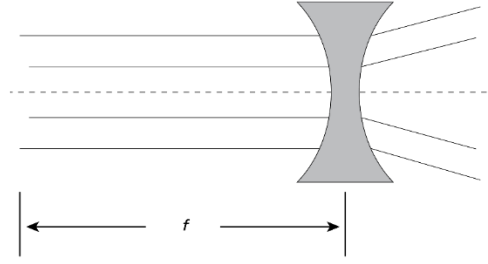
Dış bükey mercek ışığı toplamaktadır.



Şekil 3.1 Dışbükey Mercek

3.1.2 İçbükey Mercek (Konkav)

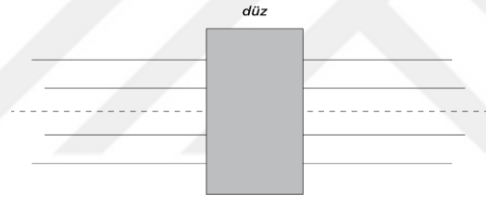
İçbükey mercek ışığı dağıtmaktadır. İçe doğru çukur şekildedir.



Şekil 3.2 İçbükey Mercek

3.1.3 Düz Mercek (Plano)

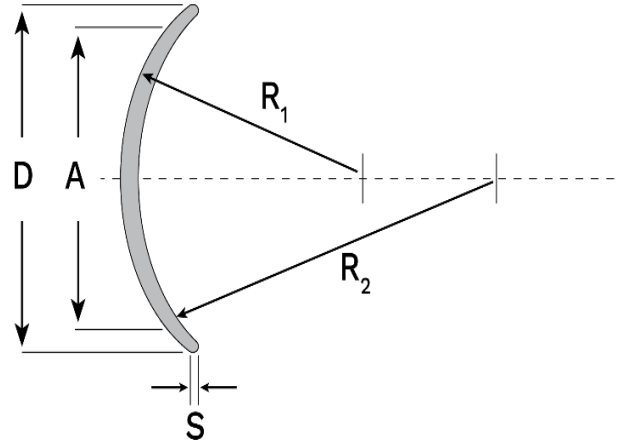
Düz mercekler ışığı geldiği gibi geçiren, ışığın paralel gelip paralel çıkmasını sağlamaktadır. Odaklama yapmamaktadır.



Şekil 3.3 Düz mercek

3.2 Mercek Geometrisi

Dış çap (Out Diameter) merceğin en dıştan en dışa olan çapıdır. ‘‘D’’ ile gösterilir. Merkez kalınlığı (Center Thickness) merceğin bir yüzeyinin orta noktasının, diğer yüzeyinin orta noktasının arasındaki mesafedir. ‘‘T’’ ile gösterilir Eğrilik Yarıçapı (Radius of Curvature) mercek yüzeyinin içbükey ya da dışbükey olmasını sağlayan kürenin eğrilik yarıçapıdır. Derinlik (Sag) mercek yüzeyinin en alt noktası ile en üst noktası arasındaki farktır. Genelde içbükey (konkav) yüzeyler için kullanılır. ‘‘S’’ ile gösterilir. Kullanılan yüzey açıklığı (Clear Aperture) mercek yüzeyinin optik olarak kullanılan çapıdır. Her mercek için bu ölçü farklıdır. ‘‘A’’ ile gösterilir.



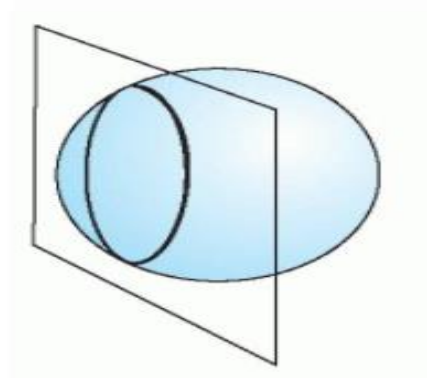
Şekil 3.4 Mercek Ölçüleri

3.3 Mercek Yüzey Tipleri

Mercek yüzeyleri farklı optik performanslar için farklı yüzey biçiminde işlenirler.

3.3.1 Küresel Yüzeyler (Spherical)

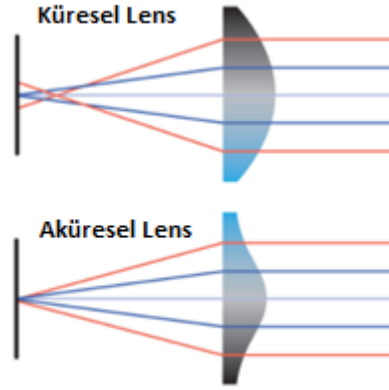
Kesik kürenin yüzeyinden oluşur. Işığı bir noktada odaklama özelliği fazla iyi değildir. Küresel yüzeyin her noktasında eğrilik yarıçapı aynıdır.



Şekil 3.5 Küresel Yüzey [12]

3.3.2 Aküresel Yüzeyler (Aspherical)

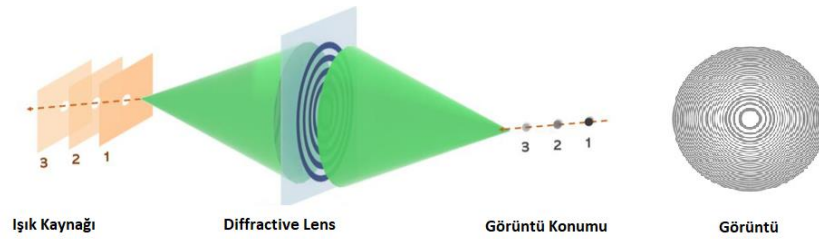
Küre olmayan yüzeylerdir. Küresel yüzeyler ışığı bir noktada toparlayamazlar bundan ötürü aküresel yüzey tasarlanarak ışığı tek noktada odaklanması sağlanır. Aküresel yüzeyin tek noktasında eğrilik yarıçapı aynı değildir. Gerekli mercek sayısını azaltarak, tasarımı kolaylaştırır.



Şekil 3.6 Küresel ve Aküresel Lensler [13]

3.3.3 Holografik Yüzeyler (Diffractive)

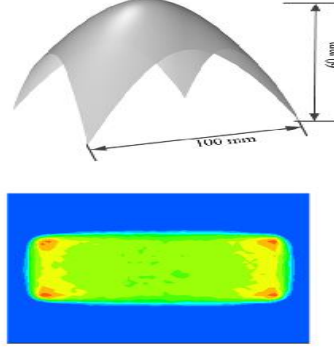
Mikron boyutlarında derinliğe ve genişliğe sahip halkalardan oluşur. Saçılmayı önler. Her halkada farklı eğrilik yarıçapına denk geldiği için tek noktada ışığı odaklar. Gerekli mercek sayısını azaltarak maliyet ve ağırlık problemlerini çözer. Ayrıca tasarım kolaylığı sağlar.



Şekil 3.7 Holografik Mercek

3.3.4 Freeform Yüzeyler

Belli bir formül hesabı ile hesaplanarak yüzeyi oluşturulan şekli cips yüzeyine benzeyen optik yüzeylerdir.



Şekil 3.8 Freeform Yüzey

3.4 Mercek Malzemeleri

Optik sistemlerde kullanılan merceklerin malzeme özellikleri tasarımcı tarafından belirlenirken tasarlanan sistemin özellikleri dikkate alınması gerekmektedir.

Kızılötesi dalga boyunda, mercek (lens) ve pencere (window) üretiminde kullanılan geçirgen malzemeler; Germanyum (Ge), Çinko Selenid (ZnSe), Çinko sülfid (ZnS), Silikon, Gallum Arsenit (GaAs), Gasır, Safir vb. malzemeler kullanılmaktadır.

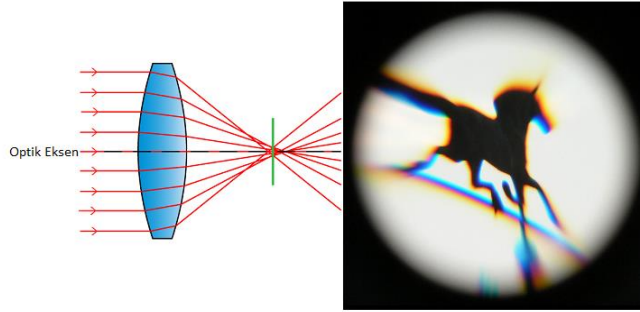
Görünür dalga boyunda, optik eleman (mercek, pencere, prizma, vb.) üretiminde kullanılan geçirgen malzemeler; Quartz Cam, Plastik ve Silikon vb. malzemeler kullanılmaktadır.

4. MERCEK YÜZEY KUSURLARI

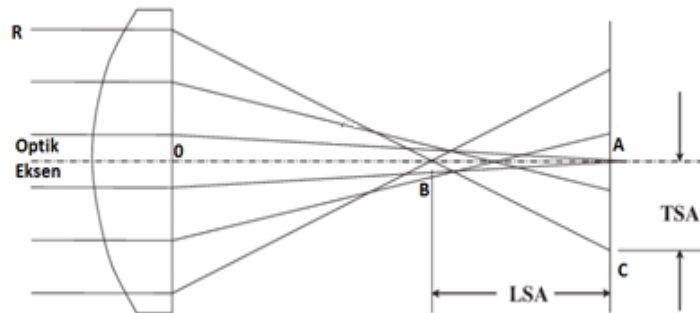
Hedefte gelen tüm ışınlar odakta aynı noktada ideal olarak odaklamaz. Bu görüntü bozukluklarına sebep olur. Optik eksene simetrik olan sistemlerde aberasyonlar matematik denklemler ile tanımlanabilir.

4.1 Küresel Sapma

Objektiften gelen ışınların çapa bağlı olarak optik ekseni aynı noktada kesmemesidir. Küresel sapma Şekil 4.1’de gösterilmiştir ve Şekil 4.2’deki gibi denklem [4.1]’deki gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 4.1 Küresel Sapma [14]



Şekil 4.2 Küresel Sapmanın Hesaplanması

$$TSA = -LSA \tan U'R$$

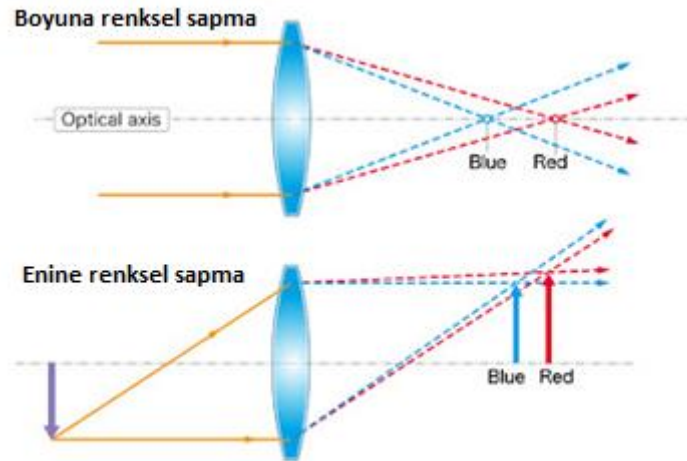
[4.1]

$$TSA = -(L' - l') \tan U'R$$

4.2 Renksel Sapma

Renksel sapma, merceğin ışığın farklı dalga boylarını aynı odak düzleminde odaklayamaması sonucu oluşur. Renksel sapma odak uzaklığı ve malzemenin cinsine göre değişir.

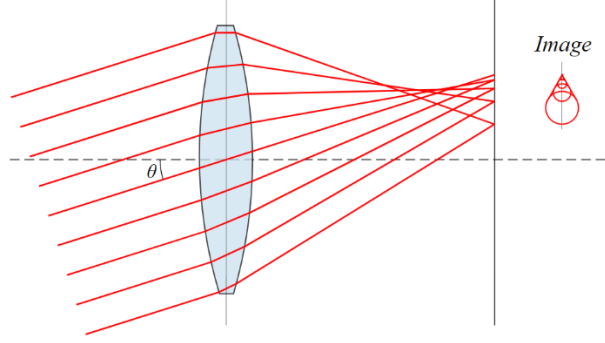
Renksel sapma, enine ve boyuna olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Boyuna renksel sapma şekil 4.3’de gösterildiği gibi beyaz ışığın mercekten geçtikten sonra farklı dalga boylarının, merceğe gelen ışığın kırınım göstererek optik ekseninde yatay doğrultuda farklı noktalara odaklanmasıdır. Enine sapma şekil 4.3 de gösterildiği gibi dalga boyuna göre görüntü boyunun değişim göstermesidir.



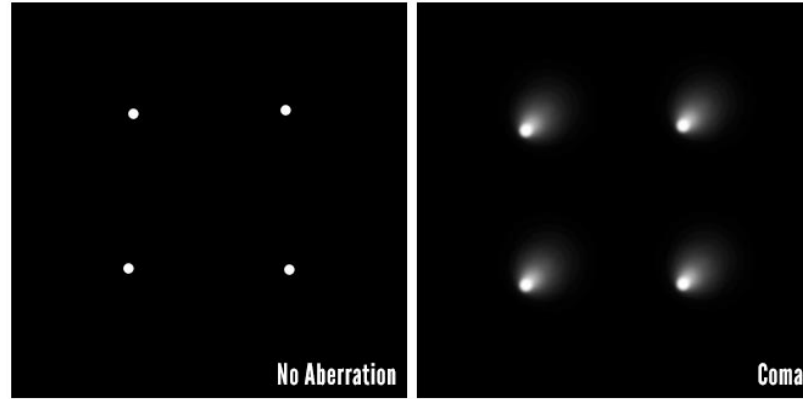
Şekil 4.3 Boyuna ve Enine Renksel Sapma [15]

4.3 Koma

Kenarsal (marginal) ışınların, ana ışını (chief ray) odakta kesmemesidir. Çap ölçüsü kaynaklı olarak farklı büyütmeden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.4’de koma kusuru ve şekil 4.5’de koma kusurunun görüntüye etkisi gösterilmiştir.



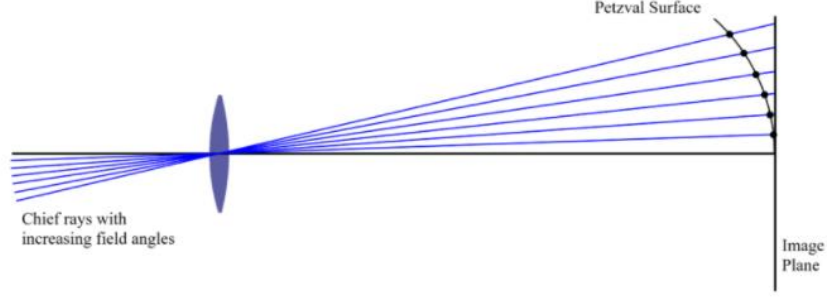
Şekil 4.4 Koma [16]



Şekil 4.5 Koma Kusurunun Görüntüye Etkisi [17]

4.4 Petzval Eğriliği (Petzval Curvature)

Işınlardan düzlem odak eksenini oluşturması isenirken eğri odak eksenini oluşturmasıdır. Eksenden uzaklaştıkça görüntü bir düzlem değil küre yüzeyi şeklinde olacaktır. Petzval eğriliği, görüntüyü petzval görüntü yüzeyinde bulanıklaştırmasada, düzlem görüntü yüzeyinde bulanıklığa neden olacaktır.



Şekil 4.6 Petzval Görüntü Yüzeyi [18]

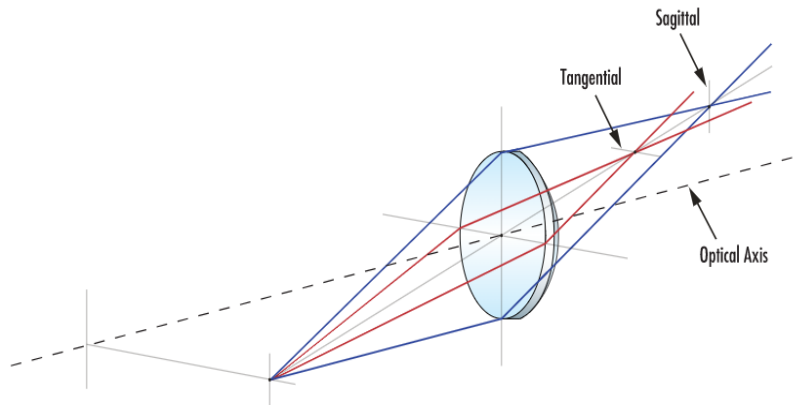
4.5 Astigmatizm

Orta ışınlar ve teğetsel ışınların farklı petzval eğrileri oluşturmalarına denir. Şekil 4.7’de gösterilen astigmatizm denklem [4.2] ile hesaplanmaktadır.

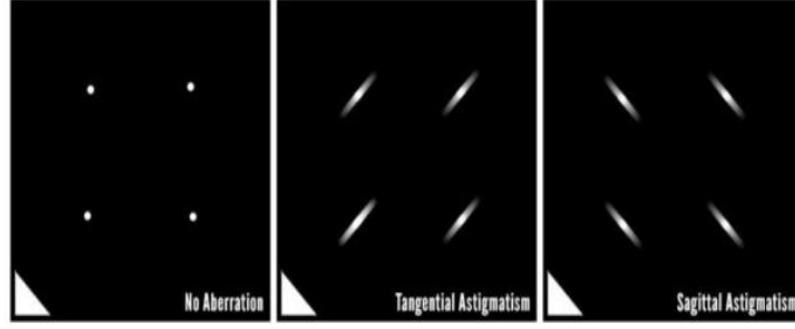
Astigmatizm : $-h^2 / f$
[4.2]

h : Görüntünün yüksekliği

f : Etkili odak uzaklığı



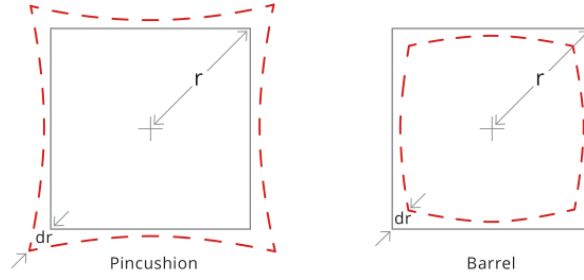
Şekil 4.7 Astigmatizm [18]



Şekil 4.8 Astigmatizmin Görüntüye Etkisi [17]

4.6 Biçim Bozukluğu (Distortion)

Görüntünün kenarlarında merkez noktadan farklı büyütme olmasıdır. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi görüntüdeki noktaların merkeze olması gerektiğinden daha uzak ya da daha yakın olmasıdır. Biçim bozukluğu kusuru görüntüyü bulanıklaştırmaz, görüntünün kenarlarını sıkıştırarak ya da genişleterek görüntü bozukluğu oluşturur.



Şekil 4.9 Biçim Bozukluğu [19]

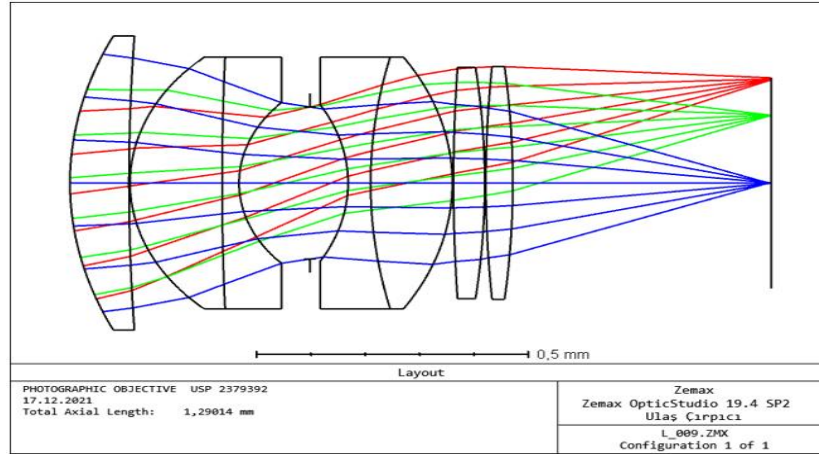
5. OPTİK TASARIM

Optik tasarım çalışmaları geometrik optik prensipleri çerçevesinde yapılmaktadır. Optik tasarımcı geometrik optik kurallarına bağlı kalarak ışığı kullanım amacına göre yönlendirebilecek hesaplamaları yapmaktadır. Bu hesaplamaları yaparken göz önünde bulundurulması gereken ilk unsur, ürüne dair istenen büyütme, görüş açısı, f numarası, odak uzaklığı, ağırlık ve boyut gibi temel teknik özellikleri sağlayacak şekilde bir optik tasarım yapılması gerekliliğidir. Bu temel teknik özellikler sağlandıktan sonra optik tasarımcı istenen görüntü kalitesinin yakalanması amacıyla optik görüntü kusurlarını (aberrasyonlar) minimuma indirecek şekilde hesaplamalar yapması gerekmektedir.

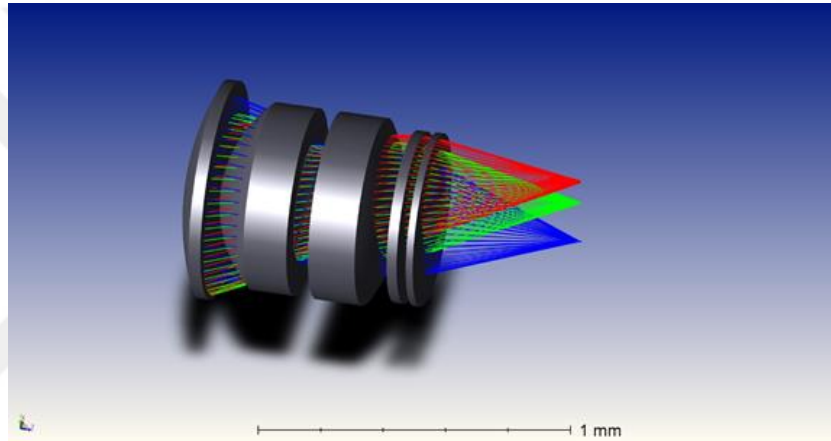
Temel teknik özellikleri ve uygun aberrasyon değerlerini sağlayabilmek için optik sistemde bulunan merceklerin her birinin eğrilik yarıçapları, geometrik özellikleri (merkez kalınlık, çap vb.), kırılma indisi (malzeme tipi), her bir merceğin arasında bulunması gereken mesafe gibi parametrelerin değişken olarak atanıp, geometrik optik kuralları gereğince tüm bu parametrelerin hesaplanması gerekmektedir.

Günümüzde bu hesaplama işlemi optik tasarım yazılımları ve yüksek işlemci gücüne sahip bilgisayarlar ile yapılmaktadır. Optik tasarımcıların kullandıkları yazılımlara örnek olarak ZEMAX, CODE V, OSLO vb. paket programlar örnek verilebilir.

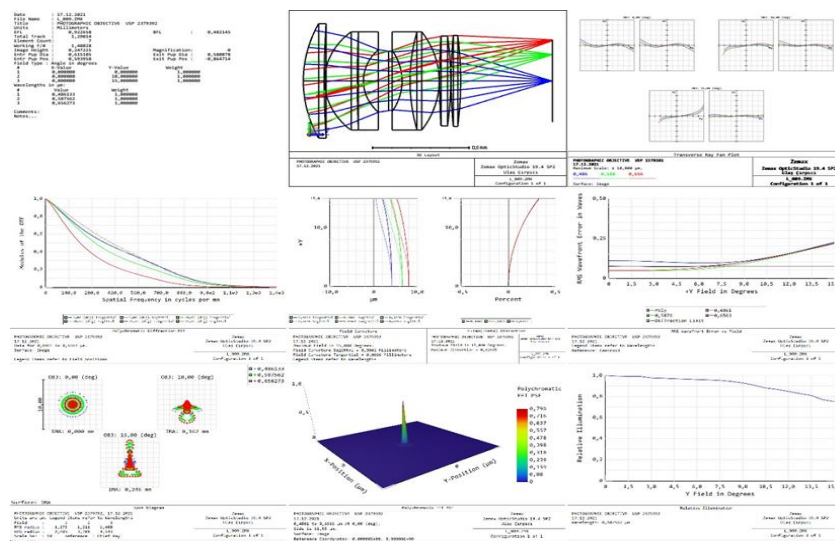
Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de ZEMAX optik tasarım programı üzerinde teorik hesaplamaları ve tasarımı tamamlamış bir fotoğraf makinesi objektifinin analiz sonuçları ve optik şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Örnek Objektif Optiklerinin Tasarımı



Şekil 5.2 Örnek Objektif Optiklerinin Şeması



Şekil 5.3 Örnek Objektif Optiklerinin Analiz Sonuçları

6. OPTİK ÜRETİM SÜREÇLERİ

Optik üretim süreçleri ham malzeme hazırlama, optik taşlama, optik parlatma, optik merkezleme, optik ince film kaplama ve optik ölçümden oluşur.

6.1 Ham Malzeme Hazırlama

Ham malzeme temini kütük ve blank olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Kütük ile üretim optiğin çap ve merkez kalınlığı değerlerine kabaca yakın ölçülerdeki dairesel camların dikdörtgenler prizması şeklinde optik testere ile kesilmesi ile başlar. Kaba ölçülerdeki mercek üretim sürecinin başlangıç evresinde cam kütükten kesilen camların her iki yüzeyi de düzdür. Adetli olmayan işlerde tercih edilmektedir.



Şekil 6.1 Optik Kütük [20]

Blank ile üretim ise üretimi istenen merceğin çap, radius ve merkez kalınlığı değerlerine kabaca yakın ölçülerde üretilen dairesel camlardır. Adetli üretimlerde tercih edilmektedir.



Şekil 6.2 Blank [21]

Ham malzemelerin fiziksel kontrolleri yapıldıktan sonra üretime aktarılır.

6.2 Optik Taşlama

Taşlama cihazında kızıl ötesi ve görünür bantta üretim yapılır. Taşlama tezgahında; düz, küresel, aküresel yüzeyler, dış çap ve konik yüzeylerin üretimi gerçekleştirilir. Holografik yüzeyler üretilemez. Yüzeye temas ettiği için üretim hızı yüksektir. Taşlamada elmas taneciklerin sıkıştırarak yerleştirilmiş kesici cup ve disk takımlar kullanılır. Taşlamada üretilen yüzeyler mattır.

Lensler vakum (Vacum), yapıştırma (Cement) ve pens adaptörü (Collet Chuck) olmak üzere üç yöntemle tezgaha bağlanır.



Şekil 6.3 Optik Taşlama İşlemi [22]

Taşlama işleminde mercek ve taşlama fikstürü arasında bulunan su, mercek aşındırma ve yüzey kalitesinin bozulmasını engelleme görevi üstlenir. Lensin çapına uygun kaba taşlama takımı seçilerek, tezgaha tanıtılır. Seçilen takımlara göre tezgahın setupı kurulur. Tutucuya yerleştirilen merceğin üzerindeki taşlama fikstürünün harmonik hareketi ile mercek aşındırma işlemi gerçekleşir. Taşlama esnasında parlatma prosesine talaş payı bırakılır. Taşlama prosesinde lensin

yüzeyi işlendikten sonra lensin spherometre ile kalınlığı ölçülür ve lensler parlatma prosesine aktarılır.

6.3 Optik Parlatma

Taşlamadan sonra mat yüzeyler parlatılarak, optik yüzey kalitesinin yükseltilmesi ve saçılmayı önleyerek geçirgenliğin arttırmasına parlatma prosesi denir. Parlatma tezgahında; düz, küresel, aküresel yüzeyler ve konik yüzeylerin parlatması gerçekleştirilir. Holografik yüzeyler üretilemez. Parlatma prosesi için özel takım ve aşındırıcı tasarlanır. Tasarlanan aşındırıcı takıma yapıştırılır. Seçilen takımlara göre tezgahın setupı kurulur. Mercek alt spindle'a, takım üst spindle'a takılarak seryum oksit yardımıyla parlatma fikstürünün mercek üzerinde gezinmesi ile parlatma işlemi gerçekleşir. Parlatma prosesinde cam malzemeler için parlatma tozu olarak seryum oksit ve kızılötesi metal malzemelerde ise parlatma tozu olarak alüminyum oksit kullanılmaktadır.



Şekil 6.4 Optik Parlatma İşlemi [23]

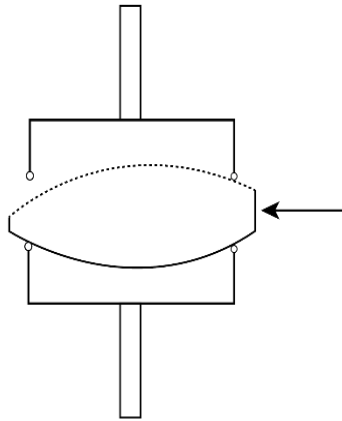
Parlatma prosesinde lensin yüzeyi işlendikten sonra lensin yüzeyinden ne kadar talaş aldığını kontrol etmek amacıyla spherometre yardımıyla merkez kalınlığı, interferometre yardımıyla radius, PV ve power değerleri ölçülür. Parlatılan lensin fiziksel ölçüleri ve yüzeyi doğrulandıktan sonra merkezleme prosesine aktarılır.

6.4 Optik Merkezleme

Parlatma prosesinden sonra mercek merkezleme öncesi kalite kontrolden geçer. Mercekler optik ve mekanik eksenlere sahiptirler. Optik eksen bir merceğin her bir yüzeyinin eğrilik merkezlerinden çizilen eksen olarak tanımlanır. Mekanik eksen ise merceğin dış kenarlarından alınarak merkezden çizilen eksenidir. Merkezleme işlemi optik ve mekanik eksenlerin çakıştırılması ile sağlanır.

Merkezleme cihazında parlatmadan sonra merceğin optik eksenini ile mekanik eksenin eş merkezde olması için dış çapı istenilen ölçülerde taşlar. Üretilen merceğin iki yüzeyinin eğrilik yarı çapı eş merkezli olması için merceğin dış çapı tezgahta ayarlanarak istenen ölçülerde taşlanır.

Merkezleme işlemi hem optik hem de mekanik olarak yapılabilir. Mekanik merkezleme işleminde mercek hassas fıkstüre yerleştirilir. Şekil 6.5’deki gibi üst fıkstür kapanırken mercek kendiliğinden sola kayarak mekanik olarak merkezlenmiş olur.



Şekil 6.5 Mekanik Merkezleme

Optik merkezleme işleminde mercek spindle’ya yerleştirilir. Merceğe paralel lazer gönderilir ve bu lazer mercekten geçerek sapma oranı kadar mercek döndürülür. Lazerdeki sapma sonlanana kadar mercek döndürme işlemi devam eder ve işlem sonunda mercek merkezlenmiş olur.



Şekil 6.6 Optik Merkezleme İşlemi [24]

Pah kırma işlemi de merkezleme tezgahlarında yapılır. Merkezleme tezgahında kesici takım olarak disk takımlar kullanılır.

6.5 Optik İnce Film Kaplama

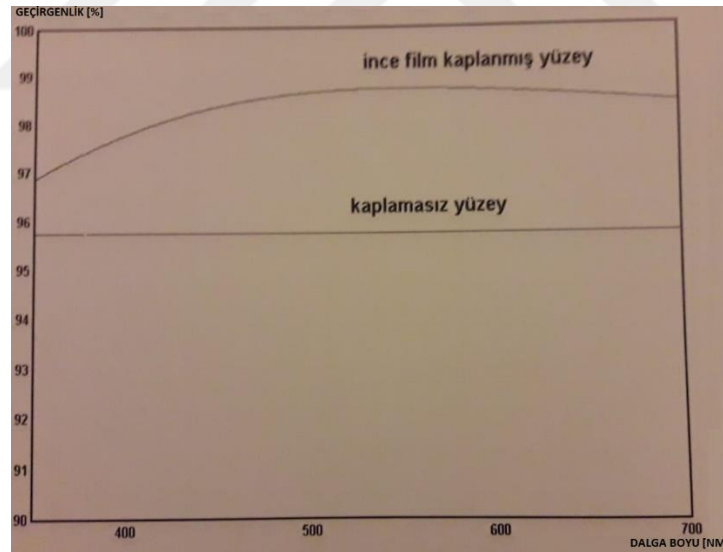
Mercek, ayna, prizma ve benzeri optik elemanların ışıkla etkileşimlerinin gereksinimler doğrultusunda değiştirebilirilmesi için söz konusu malzemelerin yüzeylerine uygulanan optik kalitedeki ince film katmanlarına optik kaplama denir. Optik kaplamaların temel işleyiş prensibi ışığın girişim özelliğine dayanır.

Merkezleme ve pah kırma prosesi tamamlanan mercek, üretimin son evresi olan kaplama prosesi başlatılmadan önce tasarım isterlerine göre kırık, çatlak, çizik ve oyuk kontrolleri yapılır. Ardından kimyasal ile herhangi bir iz, leke veya toz kalmayacak şekilde temizlenir. Temizleme işlemi tamamlanan mercekler geçirgenlik performansının daha iyi olması için yansıtma önleyici (Anti-Reflective) 400-700 nm dalga boyu arasında kaplanır. Kaplama prosesi, bir vakum haznesi içerisinde buharlaştırma yöntemi kullanılarak yapılır. Mercekler ve şahit numune vakum haznesinin üst tarafında konumlandırılacak şekilde bir tutucuya yerleştirilir.



Şekil 6.7 Optik İnce Film Kaplama İşlemi [25]

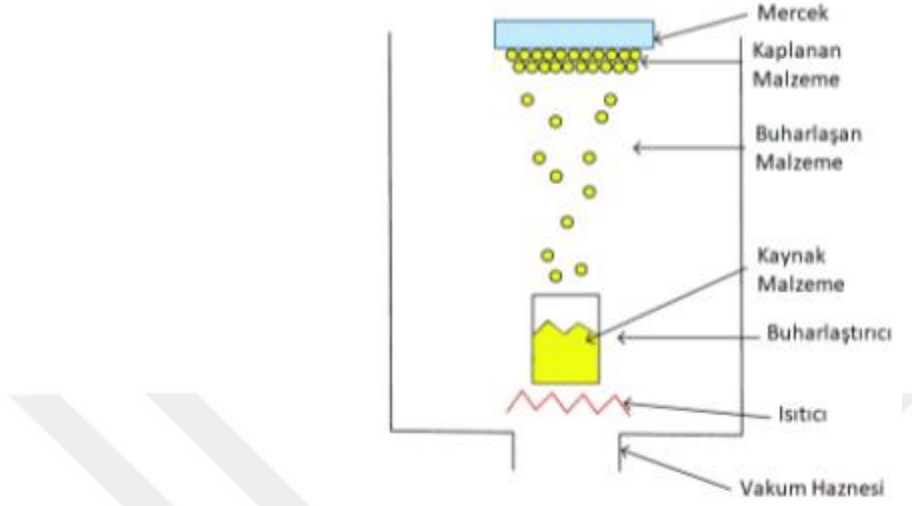
Yapılan kaplamanın tüm mercek yüzeyine eşit ve homojen dağılabilmesi için merceklerin yerleştirildiği tutucu da kaplama boyunca sürekli tam tur dönebilen mekanik parçaya Şekil 6.7’de gösterildiği gibi yerleştirilir.



Şekil 6.8 Kaplamalı ve Kaplamasız Yüzeyin Geçirgenlik Grafiği

Vakum haznesinin alt tarafına kaplanacak malzeme yerleştirilerek, kapak kapatılır. Kaplanacak malzeme ısıtılıp buharlaştırılarak mercek yüzeyi kaplanır. Mercek yüzeyine kaplanan malzemenin kalınlığı kaplama süresine bağlıdır. Kaplama süresi, malzeme çeşidine göre yansıtma ve geçirgenlik yüzdesine göre

değişkenlik gösterir. Fiziksel buharlaştırma yöntemi ile kaplama şekil 6.9’da gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Optik İnce Film Kaplama Prosesi

Kaplama prosesi tamamlandıktan sonra prosese şahitlik eden numune spektrometre cihazında geçirgenliği ölçülerek doğrulanır.

6.5.1 Optik İnce Film Kaplama Yöntemleri

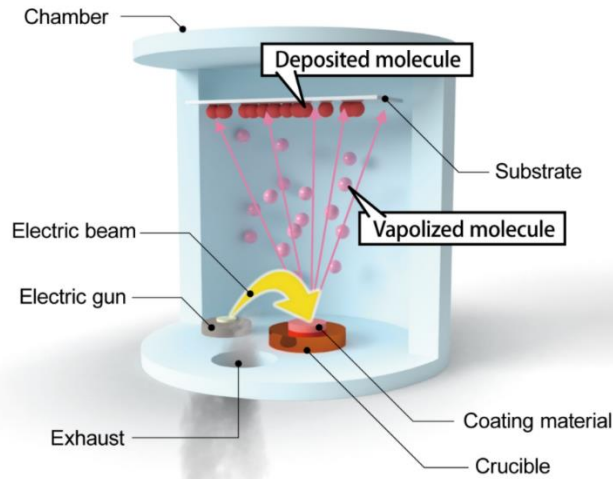
Optik ince film kaplama, fiziksel yöntemle buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleriyle yapılmaktadır.

6.5.1.1 Fiziksel Yöntemle Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel yöntemle buhar biriktirerek kaplama, ısı buharlaştırma ve sputtering yöntemleri ile yapılır.

6.5.1.1.1 Isıl Buharlaştırma

Vakum ortamında gerçekleştirilir. Kaplama uygulanacak taban malzeme yüzey temizliği gerçekleştirildikten sonra vakum odasındaki yerine yerleştirilir. Kaynak malzemesi ise buharlaştırılacağı potaya konulur. PVD kaplamanın avantajları, geniş alanda aynı özelliklere sahip kaplama üretimi ve diğer kaplama yöntemlerine göre film kontrolünün kolay olmasıdır. Dezavantajı ise PVD ile elde edilen ince filmin paketlenme yoğunluğu (packing density) ana malzemeye (bulk) göre daha düşüktür. Bunun sonucu olarak ince filmin kırılma indisi de daha düşüktür. Ayrıca aynı nedenle, bazı ince filmlerde su emilimi gözlenir.

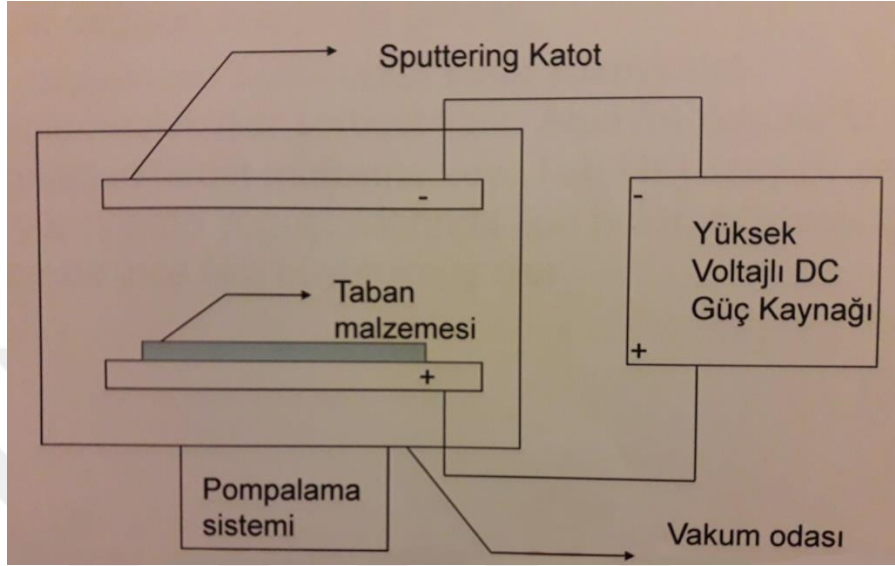


Şekil 6.10 Isıl Buharlaştırma Yöntemiyle İnce Film Kaplama [26]

6.5.1.1.2 Sputtering

En temel ‘‘sputtering’’ konfigürasyonu Neon (Ne) ışığına benzer ‘‘glow discharge’’ tüpüdür. Vakum ortamında, düşük basınçlı bir asal gaz varlığında gerçekleştirilen bu yöntemde iki elektrot arasında bir potansiyel farkı uygulanır. Uygun basınç ve potansiyel farka ulaşıldığında ortamda kararlı bir plazma oluşur. Plazmadaki artı yüklü iyonlar eksi yüklü katoda doğru ivmelenir ve katot yüzeyine birkaç eV’den birkaç yüz eV’ye kadar değişen enerjilerle çarpar. Bu çarpışmalar

sonucunda katot yüzeyindeki atomlar/moleküller serbest kalır. Atom/moleküllerin hareketleri hedef malzeme veya katı bir yüzey ile çarpışarak bu yüzeylerde yoğunlaştıklarında son bulur. Böylece istenilen yüzeyde ince film büyütülmüş olur.



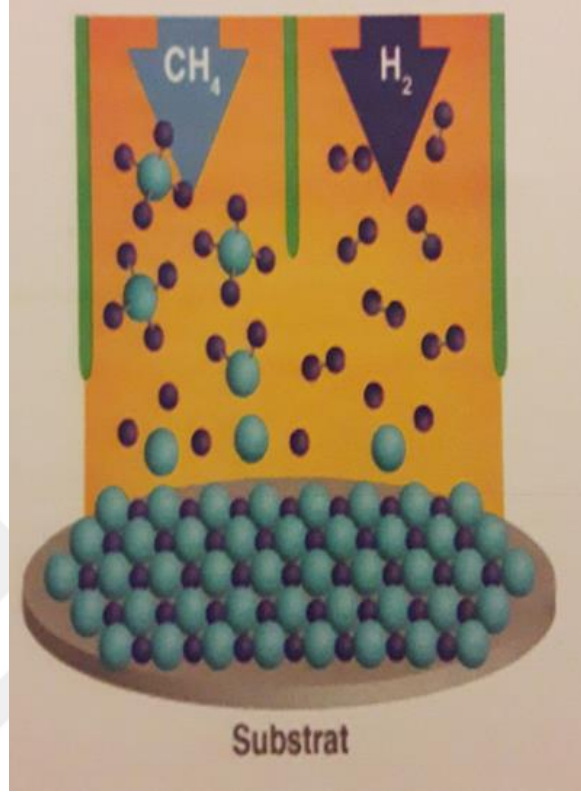
Şekil 6.11 Sputtering Yöntemiyle İnce Film Kaplama

Sputtering yöntemi ile kaplamanın avantajları, Sputter edilmiş atom/moleküller diğer yöntemlere nazaran daha yüksek enerjilere sahiptir. Bu nedenle hedef malzeme yüzeyinde uygun konumda yoğunlaşma olasılıkları daha fazladır. Ayrıca ‘‘glow discharge’’ süreci olduğu için kaplama başlamadan önce kaplanacak taban malzemenin yüzeyi temizlenir ve yüzey tutunma düzeyi artar. Dezavantajı ise sputtering esnasında kaynak malzeme (katot) üzerinde bir oksit tabakası oluşumu gözlenir. Bu oluşum sonucunda kaynak malzemenin sputtering özellikleri değişir.

6.5.1.2 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Vakum ortamında gerçekleştirilir. PVD’den farklı olarak buharlaştırılan gazların birbirleriyle tepkimeye girmesi sonucunda oluşan gazlar kaplamayı oluşturur. Optik kalitede yapılacak bir kaplamada süreç kontrolü daha iyi olduğu için plazma destekli CVD daha yaygındır. Plazma destekli CVD’de plazma tepkiyenlerin aktif

parçacıklara bölünmesini sağlar. Daha sonra bu aktif parçacıklar bir araya gelerek istenilen kaplamayı oluşturur.



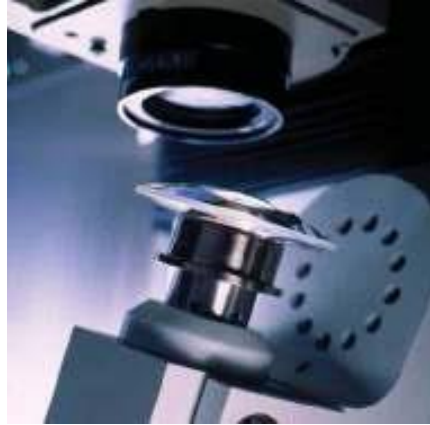
Şekil 6.10 Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemiyle Kaplama

7. OPTİK KALİTE KONTROL

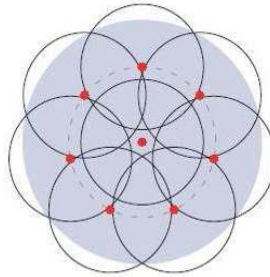
Tüm üretim aşamalarında optik kontrol adımı bulunmaktadır. Kontroller lazer interferometre, profilometre, sferometre, NC optik komparatör ve spektrofotometre ile yapılmaktadır.

7.1 Lazer İnterferometre

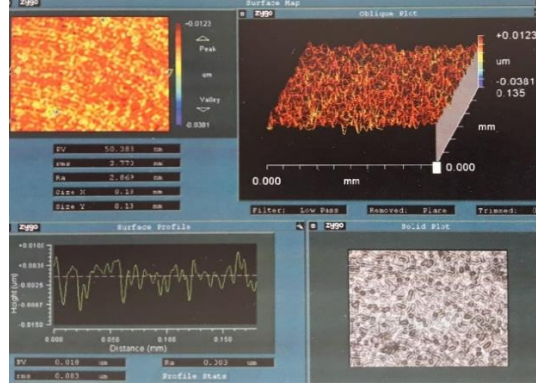
Girişimden yararlanılarak, lazer yardımıyla ölçüm yapan ölçü aletleridir. Çok küçük boyutların hassas ölçümlemlerini yapmak için kullanılır. Şekil 7.1’de gösterildiği gibi ölçüm alan ve Şekil 7.2’deki gibi yüzeyi küçük parçalar halinde ölçüp birleştiren ölçüm aletine interferometre denir. Ölçüm hızı düşüktür. Büyük yüzeyleri ölçebilir. Düz, küresel ve aküresel yüzeyleri ölçebilir. Holografik ölçüm yeteneği yoktur.



Şekil 7.1 İnterferometre Ölçümü



Şekil 7.2 İnterferometre Ölçüm Yöntemi



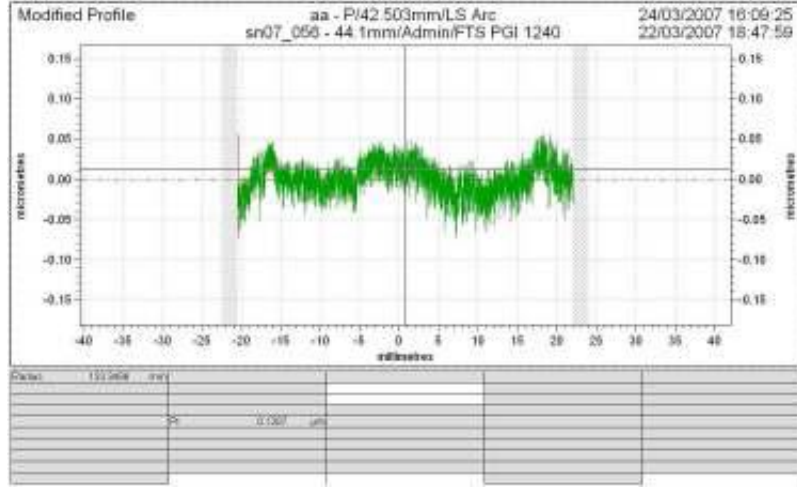
Şekil 7.3 Örnek İnterferometre Ölçümü

7.2 Profilometre

Profilometre yüzey profilini ve pürüzlülüğü ölçer. Yüzeye dokunarak tarama yapar. Çizgisel ölçüm yapar. Ölçüm hızı düşüktür. Küresel, aküresel yüzeyler ve holografik yüzey ölçümleri yapar. Düz yüzeyler ölçülemez.



Şekil 7.4 Profilometre Ölçümü [27]



Şekil 7.5 Örnek Profilometre Ölçümü

7.3 Sferometre

Küresel yüzeylerin eğrilik yarı çapını (radius) ölçmek için kullanılır.



Şekil 7.6 Sferometre Ölçümü [28]

7.3 NC Optik Komparator

İki yüzey arasındaki merkez kalınlığını ölçmek için kullanılır.



Şekil 7.7 NC Optik Komparator [29]

7.4 Spektrofotometre

Kaplamanın istenilen geçirgenlikte olup olmadığı spektrofotometre kullanımıyla kontrol edilmektedir. Spektrofotometre belli bir dalga boyu aralığında ışıma yapan ışık kaynağı ile aynı aralıktaki algılama yapan dedektör ve elde edilen sonuçların grafiklenerek yorumlanmasında kullanılan bir yazılımdan oluşmaktadır.

Ölçüm yapılacak malzeme ışık kaynağı ile dedektör arasına yerleştirilir. Malzeme tarafından iletilen ışık dedektör tarafından algılanır. Bu işlem sonucunda malzemenin geçirgenliği elde edilir. Uygulanan kaplamanın cisim yüzeyine yapışma miktarı, optik bir kaplama için önemli bir kriterdir. Uygulanan kaplamaların, belli koşullar altında dayanıklı olması istenmektedir. Bu alandaki testlerden en yaygın kaplama yüzeyine askeri standartlarda selobant yapıştırıp çekmektir. Bu kaplama tutunabilirliği hakkında önemli fikirler vermektedir.

İstenmesi durumunda kaplanan malzeme çeşitli çevre koşulları testlerine maruz bırakılarak belirli koşullardaki kaplama dayanımı gözlemlenmektedir.

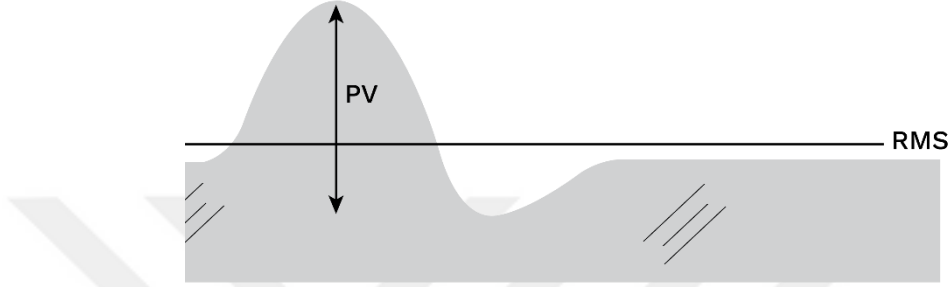


Şekil 7.8 Spektrofotometre [30]

8. OPTİK YÜZEY KALİTESİ DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

8.1 P.V. (Peak to Valley)

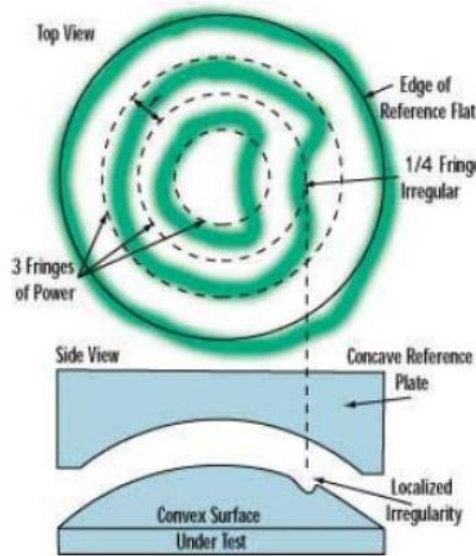
Yüzey profil ölçümünde, hata profilinde en yüksek nokta ile en düşük nokta arasındaki farktır.



Şekil 8.1 Peak to Valley

8.2 Irregularity

Yüzey bozukluğu anlamına gelir. Test edilen yüzeyin, bölgesel olarak küresellikten sapma miktarıdır.



Şekil 8.2 Irregularity Kontrolü [31]

8.3 Power

Power, eğrilik yarıçapının verilen değerden sapma miktarıdır. Test edilen yüzeyin tersi geometriye sahip hassas ve parlatılmış test plate, ölçülecek yüzeyle üst üste getirilir ve monokromatik ışık altında Newton halkaları incelenir. Halka sayısı yüzeylerin yarıçapları arasındaki farkı verir.

$$R = N\lambda(2R/d)^2 \quad [8.1]$$

R = Test plate yarıçapı

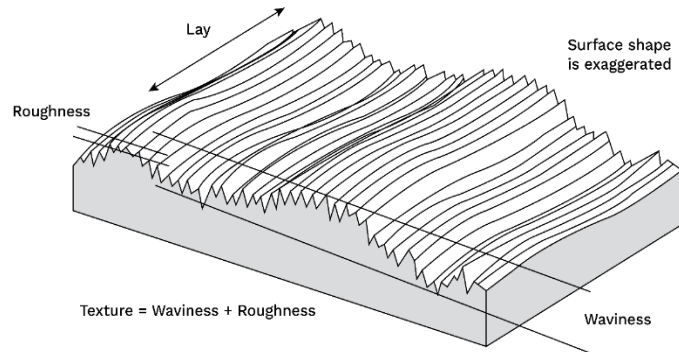
N = Fringe sayısı

λ = Monokromatik ışığın dalga boyu

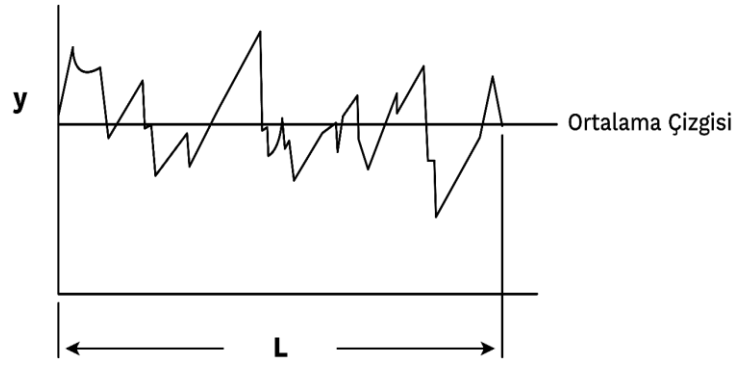
d = Ölçüm çapı

8.4 RMS (Root Mean Square)

Yüzey pürüzlülüğü, optik yüzey üstündeki yüksek frekans ve düşük dalga boyundaki bozukluklardır.



Şekil 8.3 Yüzey Profilindeki Pürüzlülük



Şekil 8.4 İki Boyutlu Yüzey Pürüzlülüğü Gösterimi

8.5 Astigmat

Yüzeyin x eksenine ile y eksenine arasındaki ölçüm farkına denir. Yüzeyin iki yandan sıkıştırılması halidir.

9. DENEYSEL ÇALIŞMA

Optik tasarım için optik isterler tanımlanır. Optik tasarımı tamamlanan merceğin blank ham malzemesi çizilir. Dış çap ölçüsü (1 mm), merkez kalınlık ölçüsü (2mm) ve radius ölçüleri talaş kaldıracak şekilde pay bırakılarak çizilir.

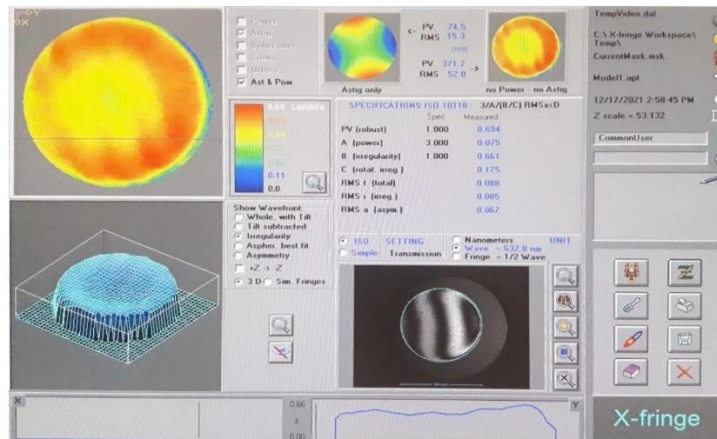
Tedarik edilen ham malzemenin kırılma indeksi ve abbe numarası abbe refraktometresi ile kontrol edilir.

İşlenecek merceğin yarıçapının 1,5 katı büyüklüğünde elmas takım seçilir. Teknik resmi incelenen merceğin en büyük yüzeyli radiusu işlenecek şekilde tezgaha bağlanır. Öncelikle kaba 0,8mm talaş kaldırılır. Ardından 0,2mm finish isleme yapılır. Lensin yüzeyi işlendikten sonra lensin spherometre ile radiusu ve NC optik komparatör cihazı ile merkez kalınlığı ölçülür.

Aynı proses diğer yüzeye de uygulanır. Her iki yüzeyi taşlanan merceğin yüzeyinde takım izi veya başka kusur var mı diye kontrol edilir. Ardından parlatma prosesine aktarılır.

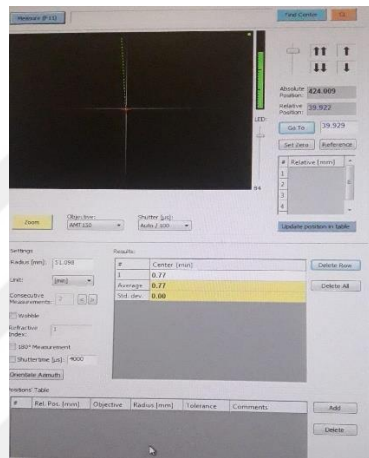
Lense zarar vermemesi ve lensi tutacak olan membrane, lens tutucu ve talaş kaldırıcı folyo tasarlanır. Parlatma tezgahına öncelikli olarak merceğin en büyük yüzeyli radius işlenecek şekilde tezgaha bağlanır.

Parlatma işlemi tek seferde yapılarak her yüzeyden 0,02mm kalınlığında talaş kaldırılarak homojen yüzey elde edilir. Daha sonra interferometre ölçüm cihazı ile yüzey kalitesi formu ve optik komparatör ile merkez kalınlığı ölçüsü ölçülür.



Şekil 9.1 İnterferometre Ölçüm Sonucu

Mercek tezgaha hassas taşlanmış tutucu çarklar yardımıyla bağlanır. Takım olarak elmas kesici takım kullanılır. Yüzeyden talaş alınmaz. Yanal yüzeylerden (kenarlardan) talaş kaldırılarak lens merkezlenir. Pah ve sag bölgeleri işlenir. İşleme sonrası opticentring cihazı ile merkez kaçıklığı değeri ölçülür. Ardından ince film kaplama prosesine aktarılır.



Şekil 9.2 Merkez Kaçıklık Ölçüm Sonucu

İnce film kaplama prosesi TiO_2 ve SiO_2 malzemeleri ile tasarlanacak olup bu malzemelerin refraktif indeksleri (n), yok olma katsayıları (k) ve fiziksel kalınlıkları (d) şekil 1’de gösterildiği gibi Cauchy yöntemi ile hesaplanarak başlanır.

Refractive Index : Cauchy

$$n(\lambda) = A_0 + \frac{A_1}{\lambda^2} + \frac{A_2}{\lambda^4}$$

Coefficients n		
	Start n	Result n
A0	0	2.000
A1	0	0.00E+00
A2	0	0.00E+00

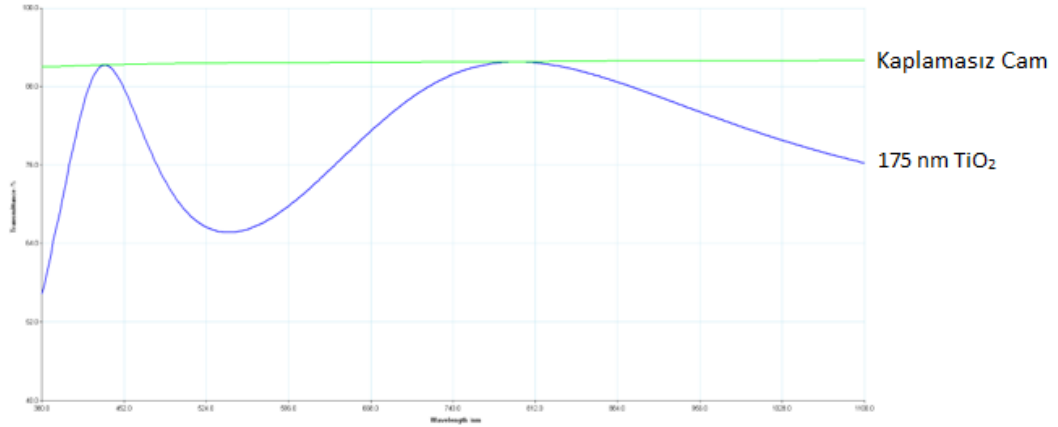
Extinction Coefficient : Exponential

$$k(\lambda) = B_1 \cdot \exp(B_2 \cdot \lambda^{-1})$$

Coefficients k		
	Start k	Result k
B1	0	0.00E+00
B2	0	7.000

Şekil 9.3 Cauchy Yöntemi Matematiksel Gösterimi

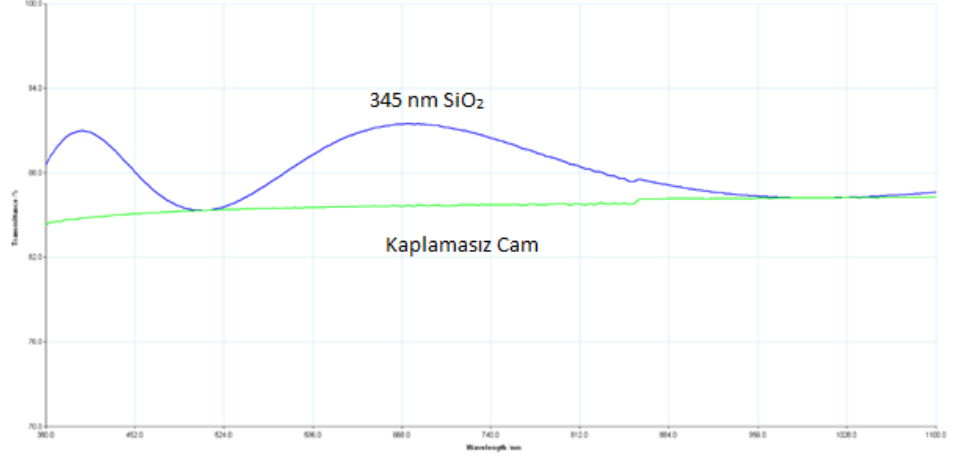
TiO₂ için 175 nm kalınlıkta single layer yapılmış olup yapılan kaplamada sırasıyla refraktif indeks (n), yok olma katsayısı (k) ve fiziksel kalınlık (d) parametreleri belirlenmiştir. Şekil 2’de TiO₂’in 175 nm kaplandığında ışığa olan tepkisi gözlemlenmiştir.



Şekil 9.4 175nm TiO₂’in 300-1100 nm Kaplandığında Işığa Olan Tepkisi

SiO₂ için 345 nm kalınlıkta single layer yapılmış olup yapılan kaplamada sırasıyla reaktif indeks (n), yok olma katsayısı (k) ve fiziksel kalınlık (d) parametreleri

belirlenmiştir. Şekil 2’de SiO₂’in 345 nm kaplandığında ışığa olan tepkisi gözlemlenmiştir.



Şekil 9.5 SiO₂’in 345 nm Kaplandığında Işığa Olan Tepkisi

Refraktif indeks (n), yok olma katsayısı (k) ve fiziksel kalınlık (d) parametreleri belirlendikten sonra Essential Macleod programına aktarılmıştır. Kaplama tasarımı referans dalga boyu 500 nm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu parametreler belirlendikten sonra 400 nm ile 700 nm dalga boyları arasında yansıma sıfır olacak şekilde hedef girilmiştir.

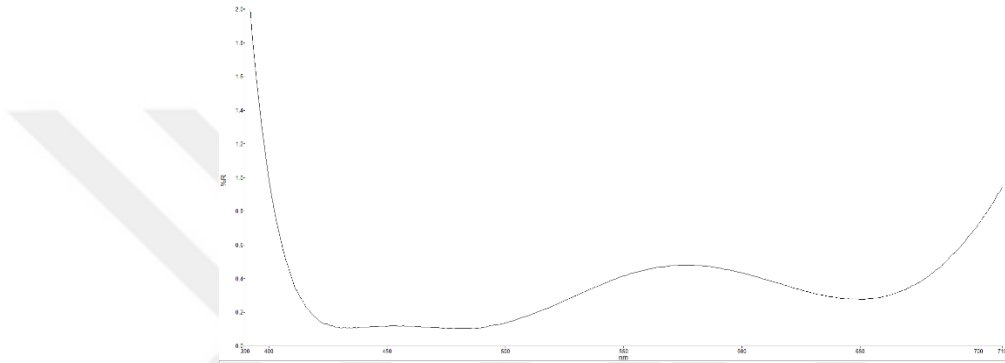
Gerekli parametreler sağlandıktan sonra iğne (simplex) yöntemi tekniği kullanılarak 5 katmanlı bir optic ince film kaplama tasarımı elde edilmiştir.

Incident Angle (deg)		0,00				
Reference Wavelength (nm)		500,00				
	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (QWOT)	Physical Thickness (nm)
▶	Medium	Glass	1,52141	0,00000		
	5	SiO ₂	1,46235	0,00000	1,31040411	112,01
	4	TiO ₂	2,35785	0,00045	0,18868484	10,00
	3	SiO ₂	1,46235	0,00000	0,45363845	38,78
	2	TiO ₂	2,35785	0,00045	2,06113921	109,27
	1	SiO ₂	1,46235	0,00000	1,01979131	87,17
	Substrate	Air	1,00000	0,00000		

Şekil 9.6 Optik İnce Film Kaplama Teorik Fiziksel Kalınlık Tablosu

Bu tasarımda 400 – 700 nm arasında şekil5’de gösterildiği gibi %0,22 (tek yüzey) yansıma öngörölmüştür. Belirlenen fiziksel kalınlıklar optik kaplama cihazına uygun bir şekilde aktarılmıştır.

Bu tasarım PVD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz parametreleri 7,9E-6 mbar basınçta 120°C sıcaklıkta 1500 saniye bekleme ve e-beam kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu prosesin tek yüzey ölçümleri spektrofotometre ile ölçölmüştür. Ölçüm sonuçları şekil 5’deki gibidir.



Şekil 9.7 Spektrofotometre Tek Yüzey Yansıma Ölçüm Sonucu

10. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında refraktif indeks değeri 1.57, abbe numarası 57.54 ve fiziksel ölçüleri isterlere göre N-BAK1 malzemesinden ZEMAX tasarım programında mercek tasarımı yapılmıştır.

Bu isterler doğrultusunda sırasıyla taşlama, parlatma, merkezleme ve ince film kaplama prosesleri uygulanmıştır. Her proses sonrasında merceğin geçirgenlik değeri artmıştır.

Merceğe 400 – 700 nm dalga boyları arasında geçirgenlik değeri %99'un üzerinde (iki yüzey), yansıma değeri %0.22'nin (tek yüzey) altında olacak şekilde ince film kaplama prosesi uygulanmıştır.

Üretimi MIL-G174 standartlarına göre yapılan merceğe MIL-C-48497A (4.5.3.1) standardına göre yapışma, MIL-F-48616 (4.6.9.1) standardına göre sıcaklık testi, MIL-C-48497A (4.5.3.2) standardına göre nem testi, MIL-F-48616 (4.6.10.4) standardına göre tuz testi ve MIL-C-675C testine göre bant ve silgi testi uygulanmıştır. Mercek testleri başarılı bir şekilde tamamlamıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada, modern optik üretim yöntemleri kullanılarak üretim yapılmıştır. Bu tez çalışmasında üretilen merceğin günümüz teknolojisine, standartlarına uygun ve yüksek performanslı olduğu görülmüştür. Seri üretim için alternatif ve kılavuz olacağı düşünülmektedir.

11. KAYNAKLAR

- [1] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Optik> (05/08/2021)
- [2] <https://www.dersimiz.com/bilgibankasi/optik-nedir-hakkinda-bilgi-878> (07/08/2021)
- [3] <https://www.canlidershane.net/isik-dalgalarinda-girisim-kirinin-47072?id=47072?id=47072> (03/08/2021)
- [4] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Polarizasyon> (09/08/2021)
- [5] https://www.gtu.edu.tr/Files/UserFiles/90/MF2-COMPTON_SACILMASI.pdf (11/08/2021)
- [6] <https://www.canlidershane.net/elektromanyetik-dalgalar-47071?xcat=3721&id=47071> (15/08/2021)
- [7] https://tr.wikipedia.org/wiki/Fermat_ilkesi (13/09/2021)
- [8] <https://www.msxlab.org/forum/fizik/49445-isigin-renklerine-ayrilmasi.html> (06/11/2021)
- [9] <https://hakkiceylan.com/odak-uzakligi-ne-demek-hangi-odak-uzakligini-tercih-etmeliyiz> (08/12/2021)
- [10] https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?Guide=10&Category_ID=141&ObjectGroup_ID=163 (07/11/2021)
- [11] <https://seanjconnollyphotography.co.uk/category/how-to-get-bokeh/> (19/10/2021)
- [12] <https://www.opticsforhire.com/blog/5-applications-of-cylindrical-lenses-design> (15/10/2021)
- [13] <https://www.resolveoptics.com/aspheric-or-spherical-lenses/> (03/11/2021)
- [14] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical-Aberration.png> (22/10/2021)

- [15] <https://satheeshnuketutorials.blogspot.com/2012/08/chromatic-aberration.html> (25/12/2021)
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Coma_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Coma_(optics)) (20/11/2021)
- [17] <https://www.lonelyspeck.com/a-practical-guide-to-lens-aberrations-and-the-lonely-speck-aberration-test/> (27/11/2021)
- [18] <https://www.eckop.com/resources/optics/aberrations/> (16/10/2021)
- [19] <https://www.opto-e.com/basics/aberrations> (28/11/2021)
- [20] <https://www.schott.com/en-gb/products/optical-glass-p1000267> (15/09/2021)
- [21] <https://ytopics.en.made-in-china.com/productimage/NsOmTvXlyqkh-2f1j00zQFRyokqgguh/China-High-Precision-Clear-Bk7-K9-Optical-Glass-Blanks.html> (13/11/2021)
- [22] <https://www.satisloh.com/precision-optics/grinding/spm-50> (18/08/2021)
- [23] <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Introduction-to-the-Optics-Manufacturing-Process-OptoMechanics/a19fa22f96dfe9f86c4c3f0b4ac4f1f0f3311079> (11/09/2021)
- [24] <https://www.satisloh.com/precision-optics/centering/c-300> (17/10/2021)
- [25] <https://www.zeiss.com/vision-care/int/better-vision/understanding-vision/how-are-spectacle-lenses-manufactured.html> (10/11/2021)
- [26] https://www.nidek-intl.com/product/coating_technical/coating_technique_1.html (08/09/2021)
- [27] https://promarchive.ru/en/catalog/detection_-_measurement/metrology_and_test_equipment/video_measuring_machines_profile_projectors_measuring_microscopes/profilometer_optical_industrial_-_pgi_1240 (04/11/2021)

[28] <https://trioptics.com/products/spherometer-tactile-radius-measurement/> (09/12/2021)

[29] <https://www.xonox-tec.com/ct-sag-aperture-height> (18/09/2021)

[30] <https://www.perkinelmer.com/product/lambda-850-uv-vis-spectrophotometer-l850> (25/10/2021)

[31] <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-reference-guide/understanding-optical-specifications.html> (23/12/2021)

