



**GÖRÜNÜR VE KIZILÖTESİ UYGULAMALAR İÇİN MERCEK
GRUBUNUN OPTİK TASARIMI**

Aytaç Eren ŞAHİN

**YÜKSEK LİSAN TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2020

Aytaç Eren ŞAHİN tarafından hazırlanan “GÖRÜNÜR VE KIZILÖTESİ UYGULAMALAR İÇİN MERCEK GRUBUNUN OPTİK TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Gökay UĞUR

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Hüseyin ÜNVER

Fizik Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Selim ACAR

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 06/07/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Aytaç Eren ŞAHİN

06/07/2020

GÖRÜNÜR VE KIZILÖTESİ UYGULAMALAR İÇİN MERCEK GRUBUNUN OPTİK TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Aytaç Eren ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasında görünür bölge ve yakın kızıl ötesi olarak bilinen bölgeye dahil olan 0,4-1,1 μm dalga boyları arasında çalışabilecek ve düşük ışıklı ortamlarda etkili olarak kullanılacak bir optik tasarım çalışması yapılmıştır. Optik tasarım çalışmalarına başlamadan önce tasarımı yapılacak sistemin gereksinimleri yapılan araştırmalara ve güncel koşullara uygun olarak belirlenmiş ve bu bilgiler ışığında sistemin temelini oluşturacak parametreler; odak uzaklığı 57,5 mm; görüş alanı $7,8^\circ$; f sayısı 2,3 olarak hesaplanmıştır. Hesaplamaların ardından sistemin çalışacağı dalga boyu aralığına ve gereksinimlerine uygun olarak kullanılacak optik malzeme kataloğu belirlenmiştir. Daha sonra bir optik tasarımda izlenebilecek yollar aktarılmış ve bir ön tasarım oluşturulmuştur. Ön tasarım değerlendirildikten sonra uygun kısıtlamalar ve işlemciler belirlenerek tasarımı iyileştirme çalışmaları başlatılmış ve tasarım performansı üst seviyelere çıkana kadar bu süreç devam etmiştir. Analiz çıktıları değerlendirildikten sonra sistemin performansı yorumlanarak tasarım sonlandırılmıştır. Sistem performansını değerlendirmek adına; MTF (Modülasyon Transfer Fonksiyonu) ve Nokta Diyagram (Spot Diagram) grafikleri vs. gibi analiz çıktıları paylaşılmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optik Tasarım, Geometrik Optik, Elektromanyetik Spektrum, Multispektral, Aberasyon

Bilim Kodu : 20217

Anahtar Kelimeler : Optik Tasarım, Geometrik Optik, Elektromanyetik Spektrum, Multispektral, Aberasyon

Sayfa Adedi : 55

Danışman : Prof. Dr. Gökay UĞUR

OPTICAL DESIGN OF THE LENS GROUP FOR VISIBLE AND INFRARED
APPLICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Aytaç Eren ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2020

ABSTRACT

In this thesis, an optical design study has been conducted that can operate between the wavelengths of 0.4-1.1 μm , which is included in the region known as visible and near infrared, and can be used effectively in low-light environments. Before starting optical design studies, the requirements of the system to be designed are determined in accordance with the researches and current conditions and the parameters that will form the basis of the system in the light of this information; focal length was calculated as 57.5 mm; field of view was calculated as 7.8° ; the f number was calculated as 2.3. Following the calculations, the optical material catalog to be used in accordance with the wavelength range and requirements of the system will be determined. Later, the paths that can be followed in an optical design are transferred and a preliminary design is created. After evaluating the preliminary design, appropriate restrictions and processors were determined and studies for improving the design were initiated, and this process continued until the design performance reached higher levels. After the analysis outputs were evaluated, the design was terminated by interpreting the performance of the system. In order to evaluate system performance; MTF (Modulation Transfer Function) and Spot Diagram graphics etc. Analysis outputs such as shared and interpreted.

Key Words: Optical Design, Geometric Optic, Electromagnetic Spectrum, Multispectral, Aberation

Science Code : 20217

Key Words : Optical Design, Geometric Optic, Electormagnetic Spectrum, Multispectral, Aberation

Page Number : 55

Supervisor : Prof. Gökay UĞUR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimi ve tez çalışması süreçlerinde bilgi ve deneyimlerini paylaşarak çalışmalarımın gelişmesine katkıda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Gökay UĞUR' a "Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalı" ve çalışmalarımda laboratuvar, bilgisayar, yazılım programları gibi imkanlarını kullanmamı destekleyen, hali hazırda iş hayatımı sürdürdüğüm Transvaro A.Ő. firmasına teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. OPTİK VE OPTİK TASARIM TEMEL KAVRAMLARI.....	3
2.1. Siyah Cisim Işıması ve Elektromanyetik Spektrum.....	3
2.2. Geometrik Optik.....	6
2.2.1. Mercek prizma ve aynalar.....	6
2.2.2. Kırılma indisi.....	8
2.2.3. Kırılma.....	9
2.2.4. Geçirgenlik.....	9
2.2.5. Optik sistemlerde kullanılan önemli parametreler.....	10
2.3. Optik Kusurlar.....	11
2.3.1. Renk kusuru.....	11
2.3.2. Küresel sapınç.....	12
2.3.3. Koma.....	13
2.3.4. Astigmatizm.....	13
2.3.5. Alan eğriligi.....	14
2.3.6. Biçim bozukluğu.....	15

2.4. Optik Sistemin Analizi.....	15
2.4.1. Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF).....	15
2.4.2. Nokta diyagramı.....	16
2.4.3. Alan eğriliği ve biçim bozulması.....	17
2.4.4. Görüntü simülasyonu.....	18
2.4.5. Seidel diyagramı.....	19
3. YÖNTEM.....	21
3.1. Tasarımında Kullanılacak Bilgisayar Programının Tanıtılması.....	21
3.2. Tasarımda Kullanılabilecek Malzemelerin Seçimi ve Optik Camlar.....	24
3.3. Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi.....	25
4. TASARIM.....	33
4.1. Tasarım Parametrelerinin Programa Tanımlanması.....	33
4.2. Ön Tasarımın Oluşturulması.....	34
4.3. Tasarım İyileştirme Süreci ve Tasarımın Sonlandırılması.....	39
4.4. Tasarımın Analiz Sonuçları.....	40
4.4.1. Modülasyon transfer fonksiyon analizi.....	40
4.4.2. Nokta diyagram analizi.....	41
4.4.3. Seidel diyagramı analizi.....	43
5. SONUÇ VE YORUM.....	45
KAYNAKLAR.....	47
EKLER.....	49

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Johnson kriterleri.....	27
Çizelge 3.2. Odak uzaklığı hesabı için gerekli olan parametreler.....	28
Çizelge 3.3. Büyütme gücü hesabı için gerekli olan parametreler.....	29
Çizelge 3.5. Açısal görüş alanı hesabı için gerekli olan parametreler.....	30
Çizelge 3.6. f sayısı ($f/\#$) hesabı için gerekli olan parametreler.....	30
Çizelge 3.7. Hesaplanan sistem parametreleri.....	31
Çizelge 4.1. Tasarım dalga boyu aralıkları.....	33
Çizelge 4.2. Görüş alan noktaları.....	34
Çizelge 4.3. Paraksiyal tasarım sonucu belirlenen mercekler ve odak uzaklıkları.....	35

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1 Siyah cisim ışıması grafiği.....	4
Şekil 1.2. Elektromanyetik spektrum.....	5
Şekil 1.3. Kızılötesi dalga boyu gruplandırılması.....	6
Şekil 2.1. Mercek çeşitleri.....	7
Şekil 2.2. Prizma çeşitleri.....	7
Şekil 2.3. Cassegrain ayna yapısı.....	8
Şekil 2.4. Kırılma.....	9
Şekil 2.5. Optik sistemlerde kullanılan önemli parametreler.....	11
Şekil 2.6. Renk kusuru.....	12
Şekil 2.7. Küresel sapınç.....	12
Şekil 2.8. Koma.....	13
Şekil 2.9. Astigmatizm.....	14
Şekil 2.10. Alan eğriliği.....	14
Şekil 2.11. Biçim bozukluğu çeşitleri.....	15
Şekil 2.12. Örnek bir optik sistemin MTF grafiği.....	16
Şekil 2.13. Örnek bir optik sistemin nokta diyagramı.....	17
Şekil 2.14. Örnek bir optik sistemin alan eğriliği ve biçim bozulması.....	18
Şekil 2.15. Örnek bir optik sistemin görüntü simülasyonu karşılaştırması.....	18
Şekil 2.16. Örnek bir optik sistemin seidel diyagramı.....	19
Şekil 3.1. Örnek ışın yolu çıktıları.....	21
Şekil 3.2. Örnek mercek tablosu.....	22

Şekil	Sayfa
Şekil 3.3. Örnek sistem parametre penceresi.....	22
Şekil 3.4. Örnek değer fonksiyon tablosu.....	23
Şekil 3.5. Odak uzaklığı ve görüş alanı arasındaki ilişki.....	26
Şekil 3.6. HFOV dedektör boyutu çalışma mesafesi ve AFOV arasındaki ilişki.....	26
Şekil 4.1. Paraksiyal ön tasarım dizilimi.....	35
Şekil 4.2. Ön tasarım ilk aşama mercekler ve dizilimi.....	36
Şekil 4.3. Ön tasarım ilk aşama mercek eğrilik yarıçapları ve malzemeleri.....	37
Şekil 4.4. Ön tasarım son aşama mercek ve dizilimi.....	38
Şekil 4.5. Ön tasarım son aşama mercek eğrilik yarıçapları ve malzemeleri.....	38
Şekil 4.6. Sonlandırılmış tasarım mercek ve dizilimi.....	39
Şekil 4.7. Sonlandırılmış tasarım mercek eğrilik yarıçapları ve malzemeleri.....	40
Şekil 4.8 Sonlandırılmış tasarım MTF grafiği.....	41
Şekil 4.9. Sonlandırılmış tasarım nokta diyagram analizi.....	42
Şekil 4.10. Sonlandırılmış tasarım seidel diyagram analizi.....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Alan
b	Wien sabiti
c	Işık hızı
D	Giriş açıklığı
$f/\#$	f sayısı
h	Plank sabiti
I_λ	Dalga boyuna bağlı ışınma şiddeti
k_B	Boltzmann sabiti
n	Kırılma indisi
P	Işımanın gücü
R	Eğrilik yarıçapı
T	Kelvin cinsinde sıcaklık
T_c	Mercek kalınlığı
T_e	Mercek kenar kalınlığı
v	Işığın farklı malzemelerdeki hızı
λ	Dalga boyu
λ_p	Tepe noktasındaki dalga boyu
μm	Mikrometre
σ	Stefan-Boltzmann sabiti

Kısaltmalar**Açıklamalar****AFOV**

Açısal görüş alanı (Angular field of view)

BFL

Arka odak uzaklığı (Back focal length)

ÇUDKÖ

Çok uzak dalga kızılötesi

DD

Tespit mesafesi (Detection distance)

EFL

Etkin odak uzaklığı (Effective focal length)

FOV

Görüş alanı (Field of view)

HFOV

Yatay görüş alanı (Horizontal field of view)

KDKÖ

Kısa dalga kızılötesi

MTF

Modülasyon transfer fonksiyonu

ODKÖ

Orta dalga kızılötesi

UDKÖ

Uzak dalga kızılötesi

PMAG

Büyütme Gücü (Power of magnification)

WD

Çalışma mesafesi (Working distance)

YDKÖ

Yakın dalga kızılötesi

1. GİRİŞ

Optik bilimi ve teknolojisi üzerine yapılan çalışmaların kökeninin milattan önce 1200'li yıllara, yani antik zamanlara dayandığı o dönemlere ait ayna vs. gibi arkeolojik bulgular sayesinde bilinmektedir (Hecht, 2002, s. 1). Günümüzde ise optik teknolojisi oldukça gelişmiştir. Çok çeşitli alanlarda optik görüntüleme sistemleri aktif olarak kullanılmaktadır. Bu optik sistemler kullanım alanlarına göre çeşitli gruplara ayrılabilir. Basit olarak incelendiğinde direkt gözle bakılan optik sistemler ve bir algılayıcı sayesinde optik grubuna gelen ışınların elektrik sinyallerine dönüştürülmesiyle görüntünün oluşturulduğu optik sistemler mevcuttur. Direkt gözle bakılan sistemlerin iç yapısı genellikle iki bölümden oluşur. Bu bölümler objektif ve göz merceği kısımlarıdır. Objektif ışığı alarak göz merceğine aktarır, göz merceği ise ışığı göze uygun şekilde iletir. Bu tarz optik sistemlere dürbünler, teleskoplar ve mikroskoplar örnek olarak gösterilebilir. Eğer kullanılan optik sistemde değişken büyütme özelliği varsa objektif ve göz merceği bölümlerine bir de büyütme merceği eklemek gerekmektedir. Bir algılayıcı vasıtasıyla görüntüleme yapan optik sistemlerde algılayıcı olarak dedektörler kullanılmaktadır. Dedektörler optik sistemlerin kullanım alanlarına ve çalışma prensiplerine göre değişkenlik gösterebilir ve farklı teknolojilere sahip olabilirler. Bu sistemlere kızılötesi ve video kameralar örnek olarak gösterebilir.

Elektromanyetik spektrumun, görünür bölge olarak adlandırılan, 0,4-0,7 μm dalga boyu aralığında çalışabilen optik sistemler, genel olarak gündüz ışığının yeterli olduğu ortamlarda verimli olarak kullanılabilirler. Bu da karanlık ortamlarda bu sistemlerin yeteri kadar işlevli kullanılmayacağını işaret eder. Karanlık bir ortamda işlevsel bir optik sistem kullanılabilmesi için ya görünür bölge optik sistemleri için karanlık bölgeler aydınlatılmalı ya da karanlık bölgede çalışabilecek optik sistemler kullanılmalıdır. Bu durumda çalışmak için gündüz ışığına ihtiyaç duymayan kızılötesi optik sistemler kullanılabilirler. Kızılötesi sistemler cisimlerden yayılan ısısal ışınları geçiren bir merceğe grubu ve bu ışınları algılayabilen bir dedektör ile ışığa gerek duymadan cisimlerden yayılan ısı farklarını görüntüye dönüştürür. Elektromanyetik spektrumda kızılötesi olarak adlandırılan dalga boyu aralığı oldukça geniştir ve 0,75-100 μm aralığını kapsamaktadır.

Bu tez çalışmasında tasarlanacak olan merceğe sisteminin çalışacağı dalga boyu aralığı 0,4–1,1 μm olacaktır. Elektromanyetik spektruma göre dalga boyu aralığı olarak görünür

bölgenin tamamı ve kızılötesi bölgenin bir kısmı kullanılacaktır. Farklı bölgelerdeki dalga boylarını kapsayan bu tür geniş dalga boyu aralığında yapılan mercek sistem tasarımları oldukça zorlu olabilmektedir. Bunun başlıca sebeplerinden birisi; kullanılan merceklerin kırılma indislerinin farklı dalga boylarına göre değişmesi ve bundan kaynaklı olarak çok miktarda optik renk kusurlarının oluşmasıdır. Optik renk kusurlarını gidermek için çeşitli yöntemler vardır. Bunlardan birisi akromatik lens çifti kullanmaktır. Akromatik lens çifti 2 farklı mercek ve malzemedan oluşur ve amaçları her birinden kaynaklı renk kusurunu zıt yönlerde oluşturup bu lens çifti için toplam renk hatasını en az seviyeye çekmektir (Smith 2000). Akromatik lensler kullanmak sistemdeki mercek sayısını artıracaktır. Bu da bir tasarımda dikkat edilmesi gereken “ağırlığı ve boyutları optimum seviyede olmalı” ve “düşük maliyetli olmalı” maddelerini zora sokmaktadır.

Geniş dalga boyu aralığında kullanılacak optik sistemler görünür bölge görüntüleme veya kızılötesi görüntüleme sistemleri kadar yaygın olmamakla birlikte ürün olarak kullanılmaktadır. Bununla ilgili çalışmalar son yıllarda artmaya başlasa da hala yeteri kadar çalışma yoktur. Bu tür geniş bant sistemleri çeşitli alanlarda oldukça avantajlı olabilmektedir. Örneğin; Gözle görülemeyecek düşük ışıklı ortamlarda net bir görüş sağlamak, meyve sebzelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın kısımlarında gözün ayırt edemeyeceği bozulmaları görüntülemek, tarım alanında toprağın verimliliğini ve bitkinin ne kadar sağlıklı olduğunu analiz etmek, tıp alanında özellikle cerrahi amaçlı açılan vücut içi bölgede tümörlü dokuyla sağlıklı doku arasındaki sınırı görüntülemek amacıyla kullanılacak bir görüntüleme sistemidir.

Bu tez çalışmasında sunulan bilgiler ışığında gerekli temel kavramlar aktarıldıktan ve hesaplamalar yapıldıktan sonra tasarımın oluşturulma süreci, tasarımın iyileştirme aşamaları anlatılacak ve ardından tasarım çıktıları yorumlanacaktır.

2. OPTİK VE OPTİK TASARIM TEMEL KAVRAMLARI

Bu bölümde bir optik tasarım sürecinde bilinmesi gereken temel teoremler ve kavramlar aktarılmıştır. Öncelikle siyah cisim ışıması ve elektromanyetik spektrum ardından da geometrik optik ve optik tasarım içeriklerine yer verilecektir.

Optik tasarım yaparken ışığın doğasını ve ışığın kontrollü veya kontrolsüz ortamlarda/sistemlerde nasıl davranacağını bilmek gerekmektedir. Bu sebeple geometrik optik kavramları bu süreçte bilinmesi gerekenler arasındadır. Optik tasarımda kullanılabilecek çeşitli elemanlar vardır ve bu elemanların yapısını ve sahip olduğu özellikleri bilmek ışığın bu elemanlarla karşılaşması durumunda nasıl davranacağını tahmin edilmesine yardımcı olacaktır.

Bir optik sistem tasarımında bilinmesi gereken optik kusurlar ve optik tasarım esnasında sıkıntının nereden geldiğini anlayabilmemiz için optik sistem analiz yöntemleri aktarılacaktır.

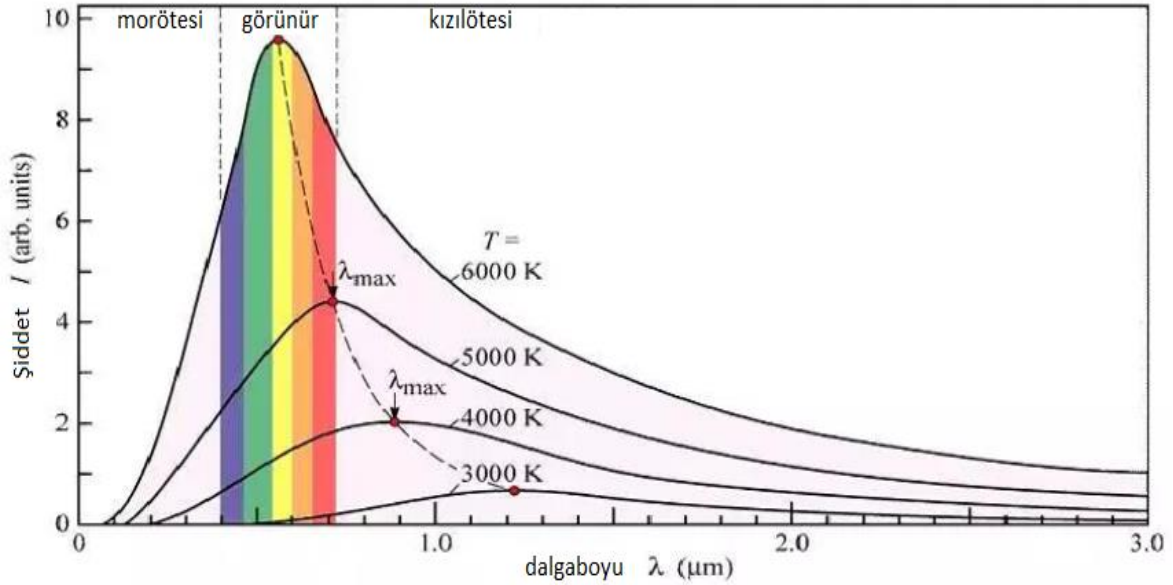
2.1. Siyah Cisim Işıması ve Elektromanyetik Spektrum

Sıcaklığı 0 K'nin üzerinde olan tüm cisimler belli bir radyasyon yayarlar ve bu ısısal ışımaya olarak adlandırılır. Düşük sıcaklığa sahip cisimlerin yaydığı ışımının dalga boyları genellikle elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesindedir. Cisim sıcaklığı arttıkça ışımının dalga boyu görünür bölgeye doğru kayar. Sıcaklığın daha da arttığı varsayılırsa ışımının dalga boyu, mor ötesi bölgeye kayacaktır. Bu kaymanın Wien yer değiştirme yasasıyla açıklandığı gözlenmiştir (Denklem 1.2). Planck'ın siyah cisim ışıması teoremine göre bu radyasyonun şiddeti dalga boyuna bağlı olarak denklem 1.1' deki gibi hesaplanır ve belli sıcaklıklar için grafiği şekil 1.1' de verilmiştir (Hecht, 2002, s. 585).

$$I_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\lambda k_B T} - 1} \quad (1.1)$$

Burada I_{λ} ışımının dalga boyuna bağlı şiddeti, h Planck sabitini, c ışık hızını, λ ışımının

dalga boyunu, k_B Boltzmann sabitini, T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade eder.



Şekil 1.1 Siyah cisim ışıması grafiği

Siyah cisim ışıması grafiği incelendiğinde de yukarıda belirtilen Wien yer değiştirme yasasıyla örtüştüğü açıkça anlaşılmaktadır. Wien yer değiştirme yasası denklem 1.2 de verilmiştir.

$$\lambda_p T = 2897,8 \mu\text{m K} \quad (1.2)$$

Burada λ_p eğrinin tepe noktasındaki dalga boyunu, T ışıma yapan cismin Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığını ifade eder ve $2897,8 \mu\text{m K}$ Wien sabitini verir. Wien sabiti b ile gösterilir (Riedl, 2009).

Siyah cisim ışımasındaki ikinci bir gözlem şiddetin sıcaklıkla beraber artıyor olmasıdır ve Stefan-Boltzmann yasasıyla açıklanabilir. Formülü denklem 1.3 ve 1.4' ten türetilerek denklem 1.5' te verilmiştir.

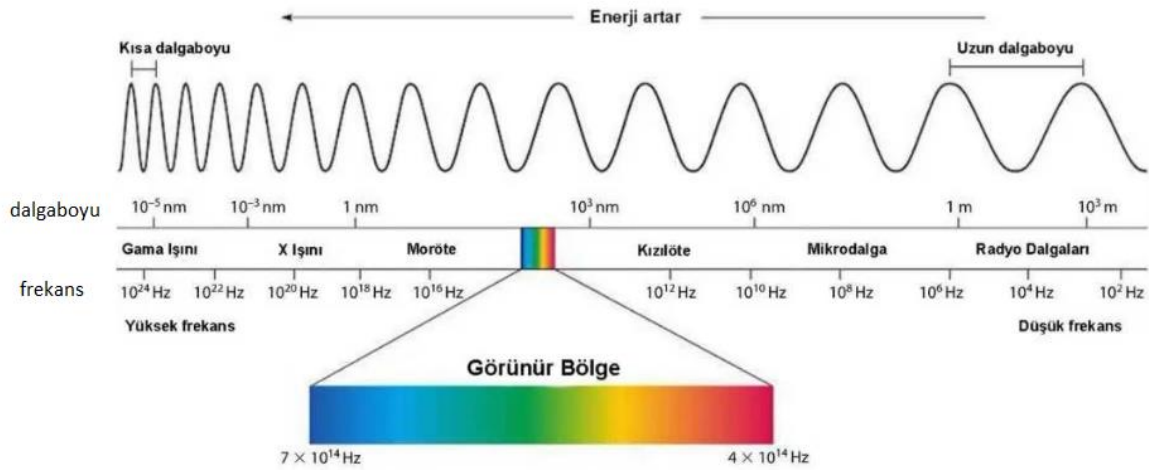
$$P = \sigma A e T^4 \quad (1.3)$$

Burada P ışımanın gücünü, A alanı, σ ($5,66961 \times 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) Stefan-Boltzmann sabitini, e cisimlerin renk ve yüzey yapısına bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişen ve siyah cisim için 1 olan katsayıyı ifade eder.

$$I = \frac{P}{A} \quad (1.4)$$

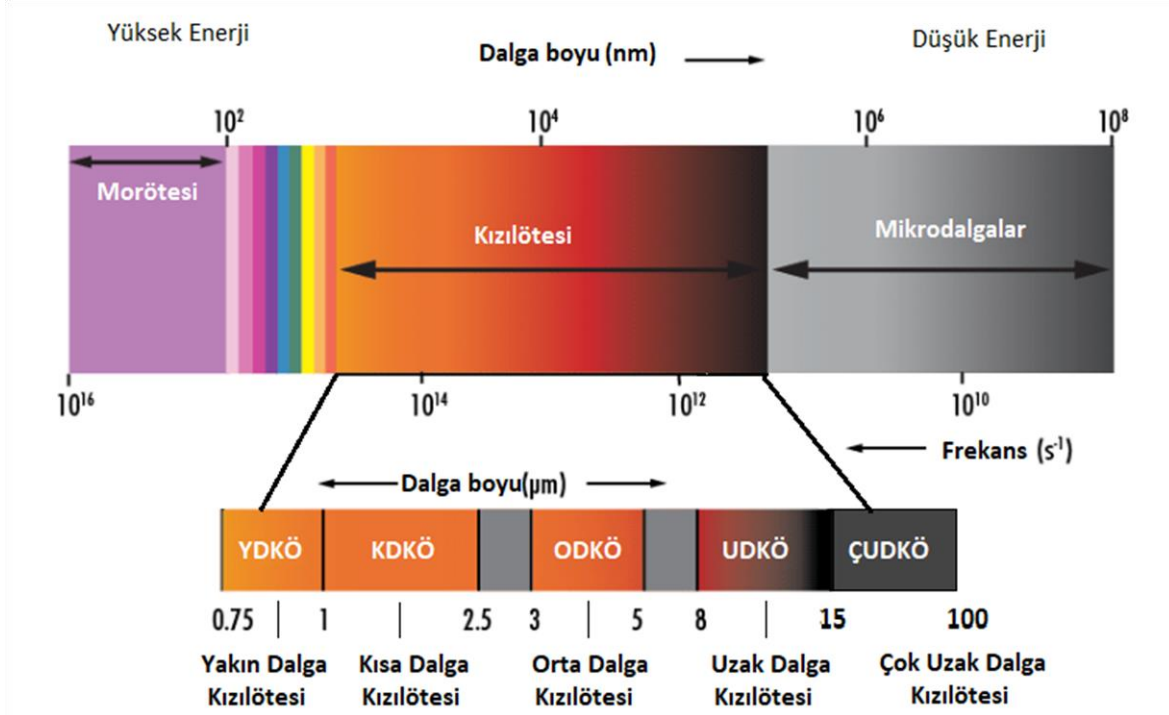
$$I = \sigma T^4 \quad (1.5)$$

Tüm bu bilgilerin ışığında bu tez çalışmasında çalışılacak olan görünür ve yakın kızılötesi dalga boyunu ifade edebilmek için elektromanyetik spektrum incelenmelidir.



Şekil 1.2. Elektromanyetik spektrum

Elektromanyetik spektrumda görüldüğü gibi ışınlar dalga boylarına göre gruplanmıştır. Kızılötesi dalga boyu bölgesi de kendi içerisinde dalga boylarına göre gruplara ayrılmıştır. Bu şekilde gruplara ayrılmasının sebeplerinden birisi atmosferik geçirgenliktir ve tamamen hangi dalga boyunun atmosferde ne kadar soğurulduğıyla alakalıdır. Şekil 1.3' de kızılötesi dalga boyu ayrımı görülebilir.



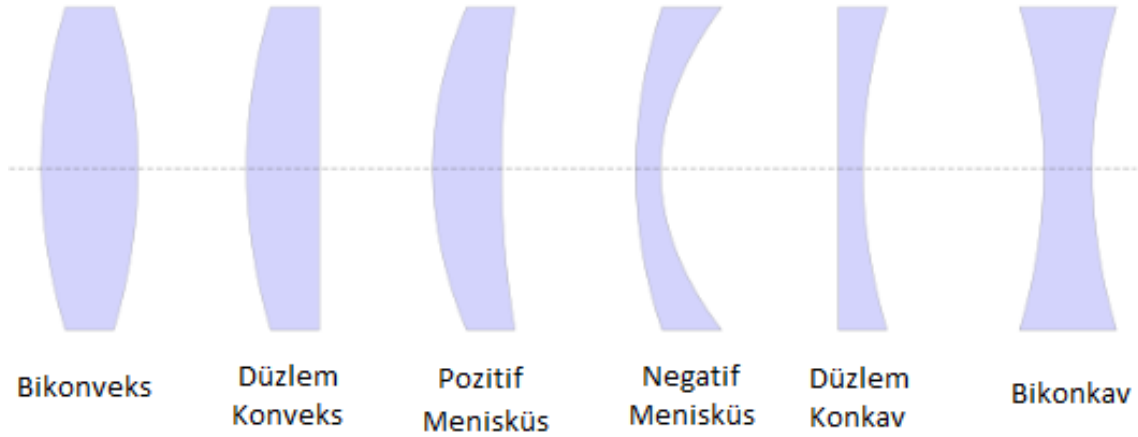
Şekil 1.3. Kızılötesi dalga boyu gruplandırılması

Kızılötesi dalga boyunun kendi içerisinde ayrıldığı gruplar ve dalga boyları az da olsa bazı çalışmalarda farklı tanımlanabilmektedir ancak genel olarak kullanılan gruplandırma şekli Şekil 1.3' deki gibidir.

2.2. Geometrik Optik

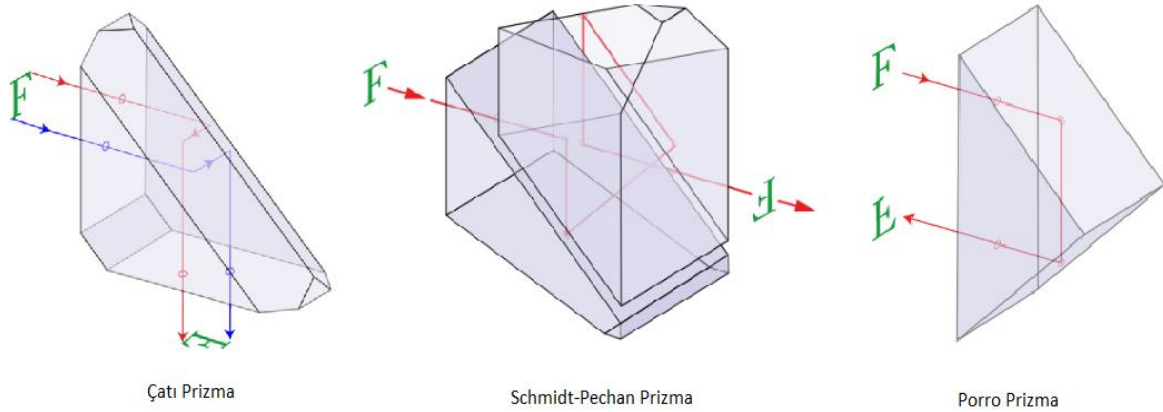
2.2.1. Mercek prizma ve aynalar

Mercekler: Optik sistem tasarımında farklı çeşitlerde birçok optik eleman kullanılabilir. Bunların en başında Mercekler gelir. Mercekler yüzey yarıçapları kalınlıkları ve malzemeleri gibi çeşitli değişkenlerle geniş bir optik eleman yelpazesi oluşturmaktadır (Pedrotti, 1993). Bu sebeple bir optik sistem tasarımının en önemli elemanı olmaları kaçınılmazdır. Şekil 2.1.'de bazı mercek çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Mercek çeşitleri

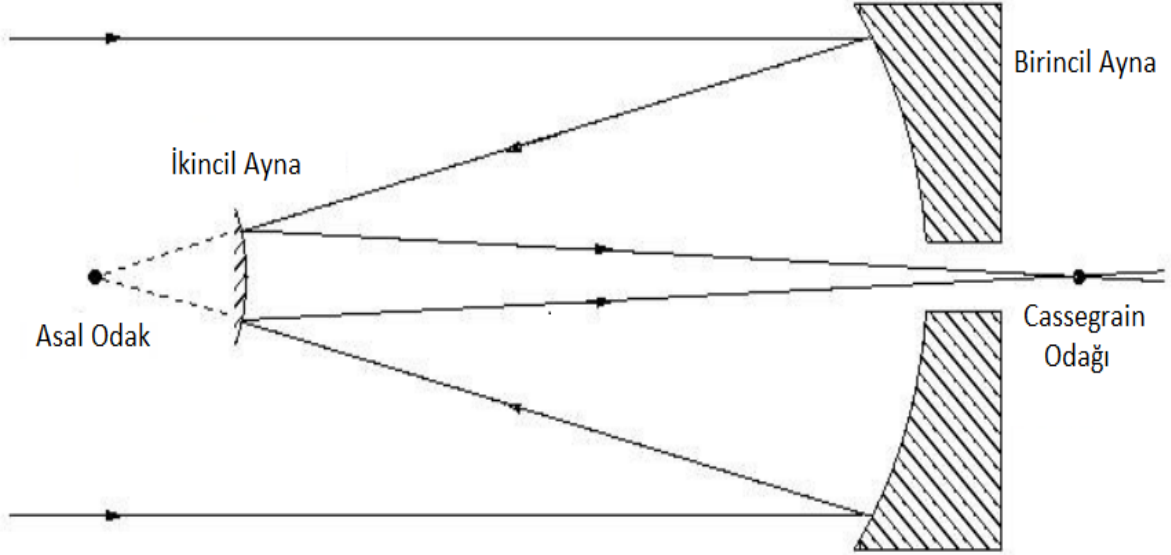
Prizmalar: Prizmalar çeşitli geometrik yapıya sahip, genel olarak ışın yolunu kısaltmak ve görüntüyü döndürmek için oldukça sık kullanılan optik elemanlardır. Özellikle odak uzaklıkları yüksek olan el tipi dürbünlerin ışın yollarını yani sistem uzunluğunu kısaltarak elde taşınabilir hale gelmesini ve sistem içerisindeki odak yüzünden oluşan ters görüntüyü düzeltmek için kullanılır (Yoder, 2008). Şekil 2.2.'de bazı prizma çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Prizma çeşitleri

Aynalar: Aynalar yüzey işlemi olarak yapılan hassas parlatma ve uygulanan nano kaplamalar sayesinde istenilen dalga boyları aralığından yüksek yüzdelerde yansıtma yapabilirler. Uygulama amacına göre düz yüzeyli, çukur ve tümsek yüzeyli gibi farklı geometrik şekillerde olabilirler. Ayrıca kullanım alanlarına göre cam, metal, SiC (Silikon Karbür) gibi farklı materyallerden aynalar kullanılabilir. Aynalar pürüzsüz yüzey elde edilebilecek her malzemeden yapılabilir (Kingslake ve Johnson 2010, s. 439). Genellikle

ışın yolunun yönünü değiştirmek için kullanılırlar. Örnek bir ayna sistemi olarak Cassegrain Teleskoplarında kullanılan Cassegrain aynalar gösterilebilir. Şekil 2.3.'de Cassegrain ayna yapısı verilmiştir.



Şekil 2.3. Cassegrain ayna yapısı

2.2.2. Kırılma indisi

Kırılma indisi, ışığın herhangi bir madde içinde boşlukta ilerleyen ışığa göre ne kadar yavaş yol aldığını ifade eden bir katsayıdır ve genellikle “ n ” sembolüyle gösterilir (Mahajan, 2014, s. 11). Kırılma indisi tamamen malzemenin cinsiyile alakalıdır ve Denklem 2.1’de gösterildiği gibi hesaplanır.

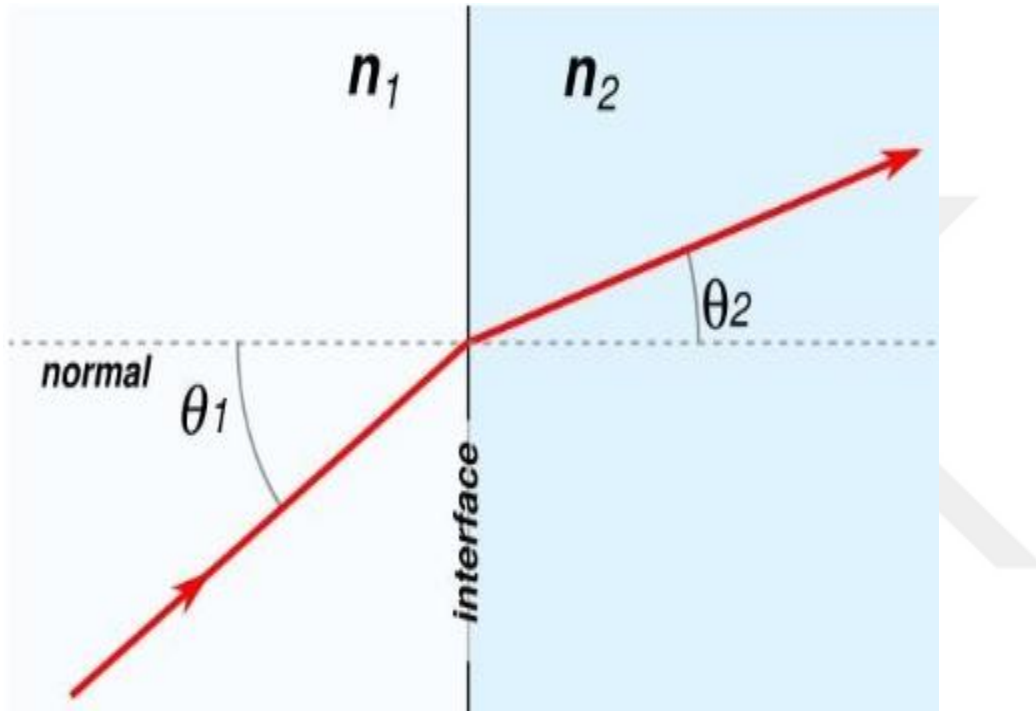
$$(n = \frac{c}{v}) \quad (2.1)$$

Burada n kırılma indisi, c ışığın boşluktaki hızı, v ışığın malzemedeki hızıdır.

Kırılma indisi ilk olarak Snell yasasında ifade edilmiştir. Snell yasası Denklem 2.2’de gösterilmiştir.

2.2.3. Kırılma

Işık bir ortamdan başka bir ortama geçerken geliş açısı ve malzemelerin cinslerine göre farklı açılarda yön değiştirmesi kırılma olarak ifade edilebilir. Şekil 2.4'te kırılmanın gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Kırılma

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

Burada n ortamların kırılma indisi θ ise ışının normale yaptığı açıları ifade eder (Kingslake ve Johnson 2010, s. 26).

2.2.4. Geçirgenlik

Işınlar maddelere çarptığında malzeme türüne göre bir kısmı malzeme içinden geçer bir kısmı yansır bir kısmı ise malzeme tarafından soğurulur (Nakajima, 2015). Optik sistem tasarımlarında malzemelerin geçirgenlikleri oldukça önemlidir. Geçirgenlikler malzeme

türlerine göre değişkenlik gösterebilir. Malzeme yüzeylerine uygulanan nano kaplamalar sayesinde ışınların geçme miktarı artırılabilir.

2.2.5. Optik sistemlerde kullanılan önemli parametreler

Etkin odak uzaklığı (EFL): Sisteme giren ışınların odaklandığı noktanın asal eksene olan uzaklığıdır (Şekil 2.5).

Arka odak uzaklığı (BFL): Sistemde kullanılan son merceğın yüzeyinin merkezinden odak uzaklığına olan mesafedir (Şekil 2.5).

Eğrilik yarı çapı (R): Sistemi oluşturan merceklerin yüzeylerinden merkezleri baz alındığında oluşan dairenin yarıçap değeridir (Şekil 2.5).

Merceğın kalınlığı (Tc): Merceğın sağ ve sol yüzeylerinin merkezleri arası mesafedir (Şekil 2.5).

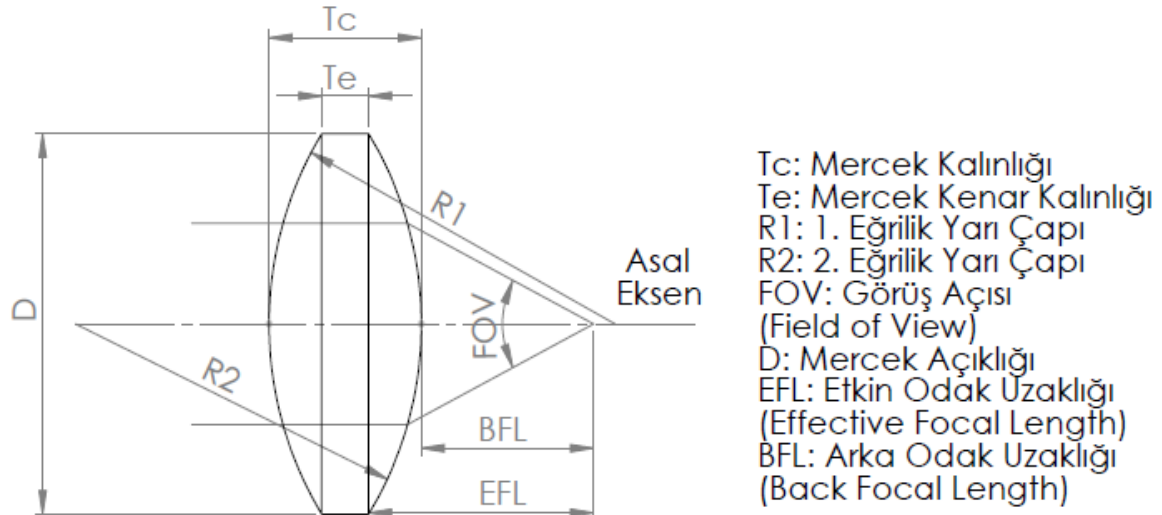
Merceğın kenar kalınlığı (Te): Merceklerin sağ ve sol eğrilik yarıçaplarının sonlandığı merkez noktalar arası mesafedir (Şekil 2.5).

Giriş açıklığı (D): Merceğın çevresini oluşturan dairenin çap değeri merceğın çapını oluşturur ve genel olarak sisteme giren ışınların giriş açıklığını belirler. Giriş açıklığı kabaca merceğın çapına denk gelir (Şekil 2.5).

f sayısı: f sayısı bir optik sisteme girebilecek ışın miktarını belirten bir değerdir. $f/\#$ şeklinde gösterilir ve sistemin odak uzaklığını sistemin giriş açıklığına oranıyla ifade edilir (Denklem 2.3). Görüntüdeki aydınlık f sayısının karesiyle ters bir orantıya sahiptir.

$$f/\# = \frac{EFL}{D} \quad (2.3)$$

Görüş alanı (FOV): Bir optik sistemin görüntüleyebileceği alanın derece cinsinden ifadesidir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Optik sistemlerde kullanılan önemli parametreler

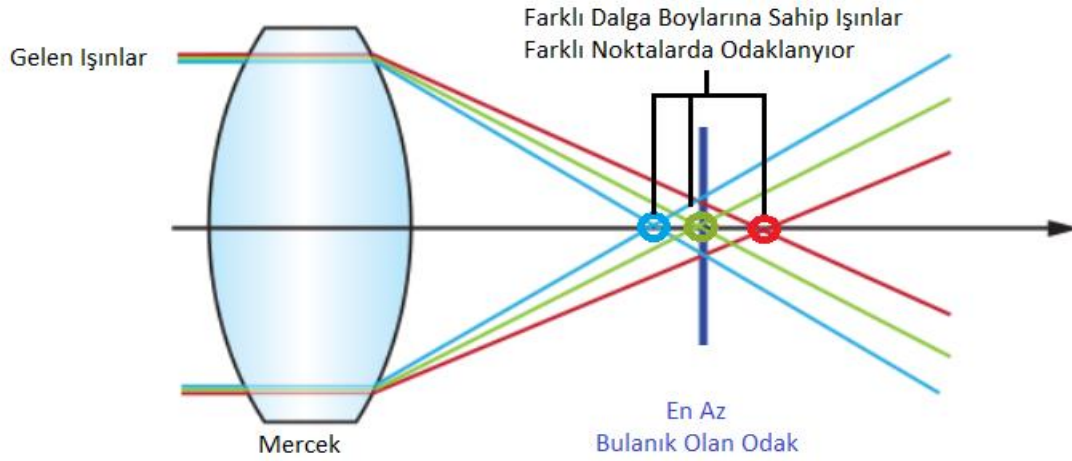
2.3. Optik Kusurlar

Odaklı optik sistemlerde ışınlar genellikle en son tek bir noktada odaklanmalıdır. Ancak çeşitli sebeplerden dolayı ışınlar odak noktasında kusursuz bir şekilde toplanamaz ve bu sebeple optik kusurlar ortaya çıkar. Optik kusurlar görüntünün gerçeğinden daha farklı görünmesine sebep olur. Optik kusurlar genel anlamda ikiye ayrılır. Bunlar tek renk kusurlar ve renk kusurlarıdır. Önemli olarak görülen belli başlı optik kusurlar alt başlıklar halinde anlatılmıştır.

2.3.1. Renk kusuru

Optik sistemler genelde elektromanyetik spektrumun belli bir dalga boyu aralığında çalışacak şekilde tasarlanır. Bir optik malzemenin kırılma indisi dalga boyuna göre değişkenlik gösterir. Bu sebeplerden dolayı bir merceğe gelen belli bir dalga boyu

aralığındaki ışınlar aynı noktaya odaklanamaz ve renk kusuru olarak adlandırılır (Sasian, 2013, s. 80) (Şekil 2.6).

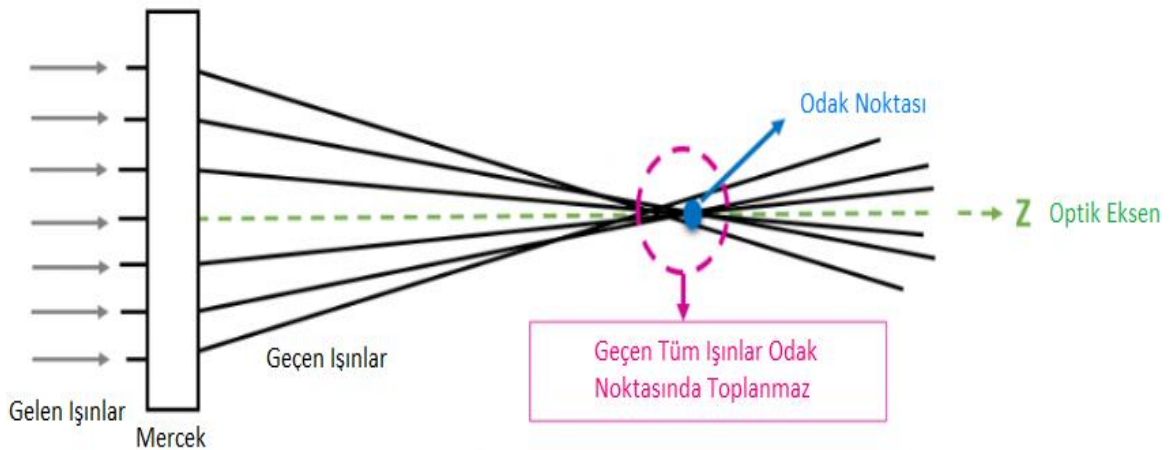


Şekil 2.6. Renk kusuru

2.3.2. Küresel sapınç

Küresel sapınç, odak noktasının optik açıklığa göre değişmesi olarak ifade edilebilir (Smith, 2000).

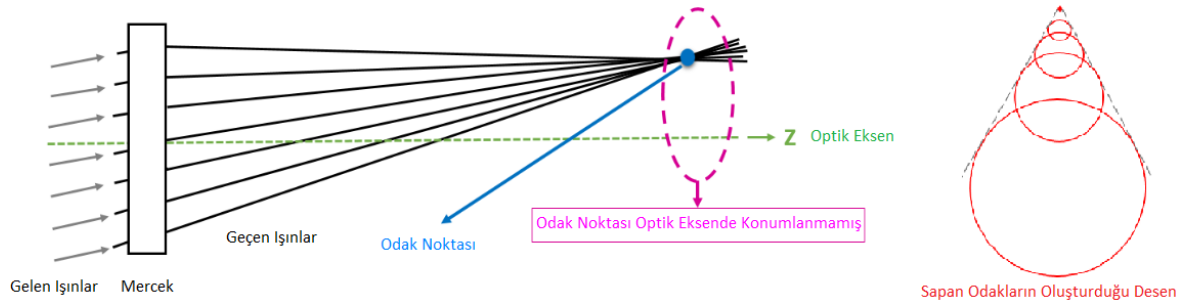
Yakınsak optik sistemlerde ana odak noktasından daha kısa başka odak noktalarının da oluşmasına sebep olur. İraksak sistemlerde ise tam tersi olarak ana odak noktasından daha uzun başka odak noktaları oluşur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Küresel sapınç

2.3.3. Koma

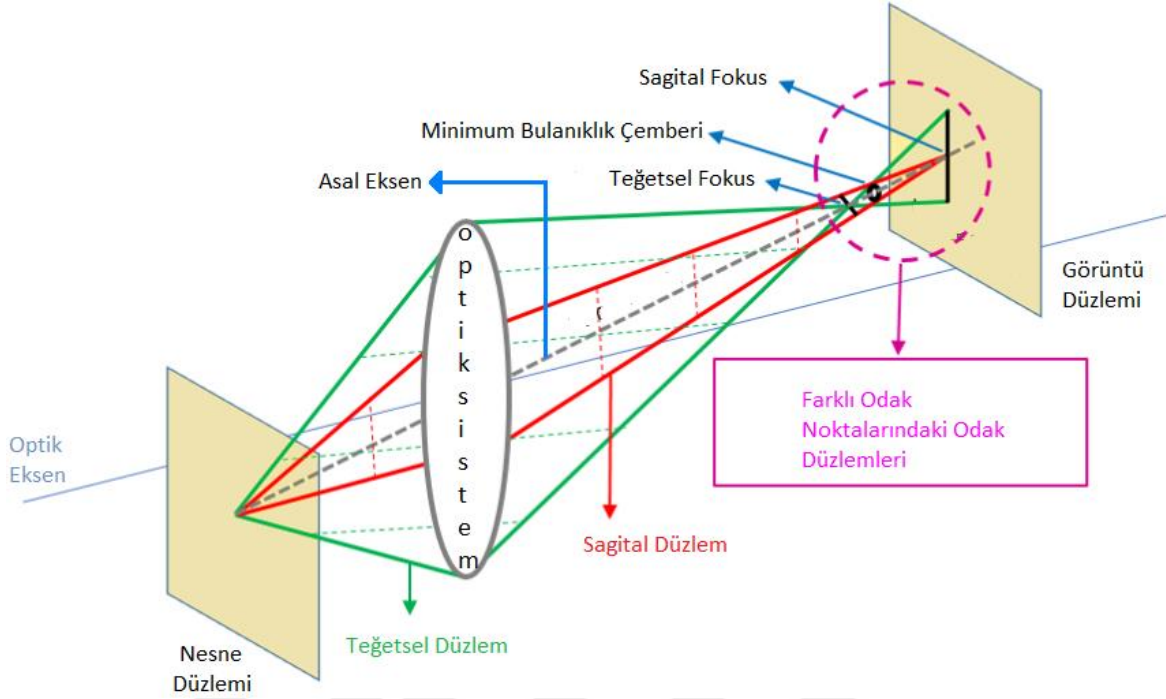
Asal eksene yakın olmayan noktalardan gelen ışınların, odaklanması gereken yerden ayrı olarak kuyruklu yıldız şeklinde farklı noktalarda odaklanmasına koma denir. Bu oluşan odak şekli komaya da benzemektedir (Nakajima, 2015, s. 17) (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Koma

2.3.4. Astigmatizm

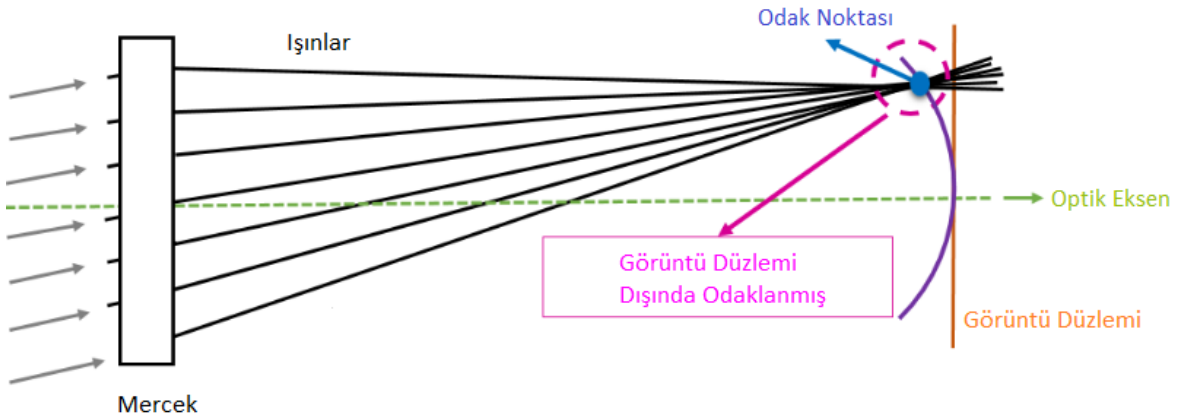
Asal eksen dışında farklı noktalardan gelen açılı ışınlar mercek yüzeyinde eliptik bir iz düşüm oluşturur. Bu sebeple mercekte geçen teğetsel ve sagittal ışınlar farklı noktalarda odaklanacaktır. Bu odak bozukluğu astigmatizm olarak adlandırılır (O'Shea, 1985, s. 194) (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Astigmatizm

2.3.5. Alan eğriliği

Genelde optik sistemlerde ışınların düz bir görüntü düzleminde odaklanması istenir. Çünkü görüntüyü dönüştürecek olan dedektörler düz yüzeylere sahiptirler. Ancak her zaman düz bir yüzeyde odaklar oluşturulamaz. Odak noktaları birleştirildiği zaman bir kavis yaptığı gözlenir ve bu kusur alan eğriliği olarak adlandırılır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Alan eğriliği

2.3.6. Biçim bozukluğu

Eksen dışı bir noktadan gelen ışının olması gerekenden daha uzakta veya daha yakında odaklanması görüntünün bazı kısımlarının daha büyük veya daha küçük gözükmesine neden olur. Bu da fiçı şeklinde veya yastık şeklinde bir görüntü ortaya çıkarır (Smith, 2000) (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Biçim bozukluğu çeşitleri

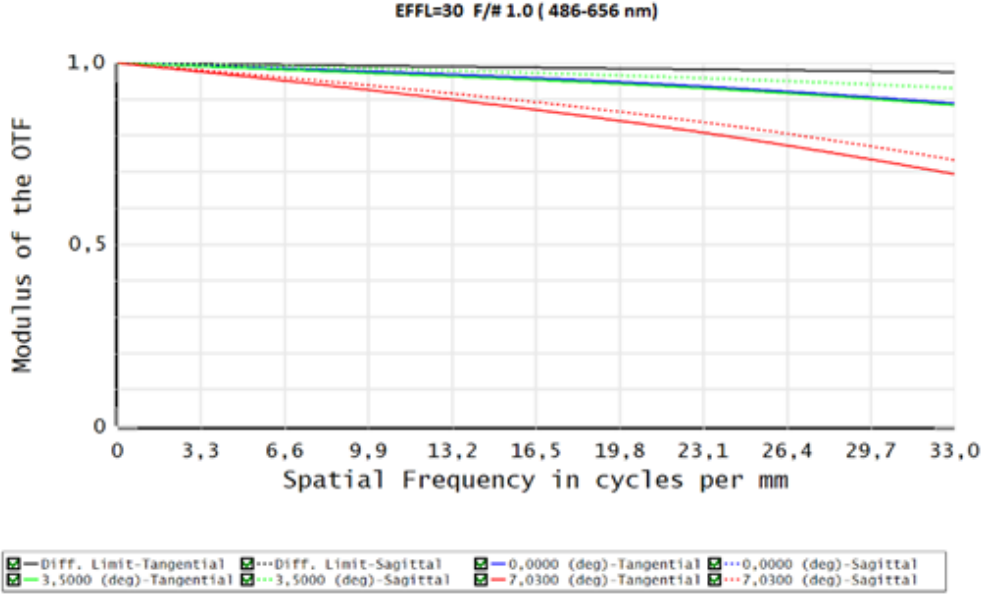
2.4. Optik Sistemin Analizi

Optik sistemler tasarlanırken kullanılan bilgisayar destekli yazılımlar tasarımın performansının değerlendirilebilmesi için bir dizi çıktılar verir. Bu çıktılar grafik, şekil veya simülasyon şeklinde olabilir. Bu çıktılardan bazıları optik kusurların sistemde yol açtığı kayıpları ele alırken bazıları bu hatalarla beraber sistemin genel performansının yorumlanabilmesine olanak tanır. Bu bölümde tasarım performansının yorumlanabilmesi için kullanılan başlıca analiz çıktılarından bir kısmı aktarılmıştır.

2.4.1. Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF)

MTF basitçe yan yana duran birer siyah ve beyaz çizginin ayırt edilebilme gücü olarak ifade edilebilir. Bir optik sistemin gereksinimlerine göre yorumlanabilmesine olanak tanıyıp sistemin çözünürlük ve kontrast ölçütünü ifade eder. Teknik olarak görüntü kalitesinin

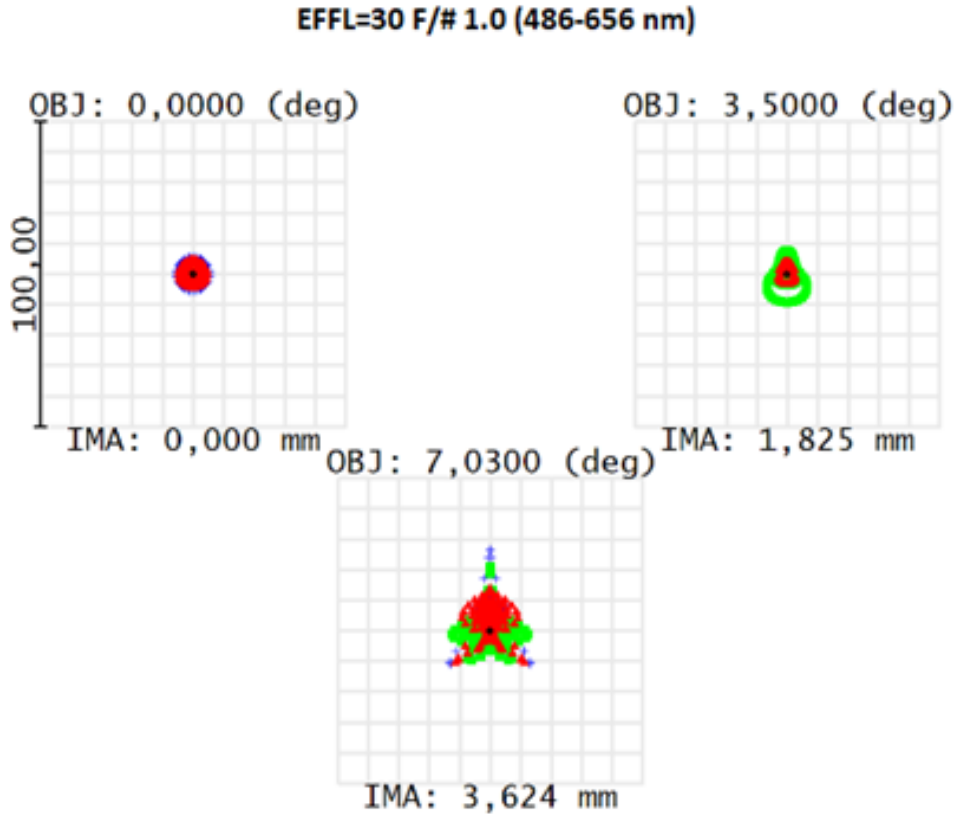
uzamsal frekansa göre kontrast ölçütüdür (Riedl, 2009 s. 147). Bu sebeple sistemin genel performansının yorumlanabilmesine olanak tanıyan önemli bir analizdir ve grafik olarak verilir. Örnek bir optik sistemin MTF grafiği şekil 2.12' de verilmiştir.



Şekil 2.12. Örnek bir optik sistemin MTF grafiği

2.4.2. Nokta diyagramı

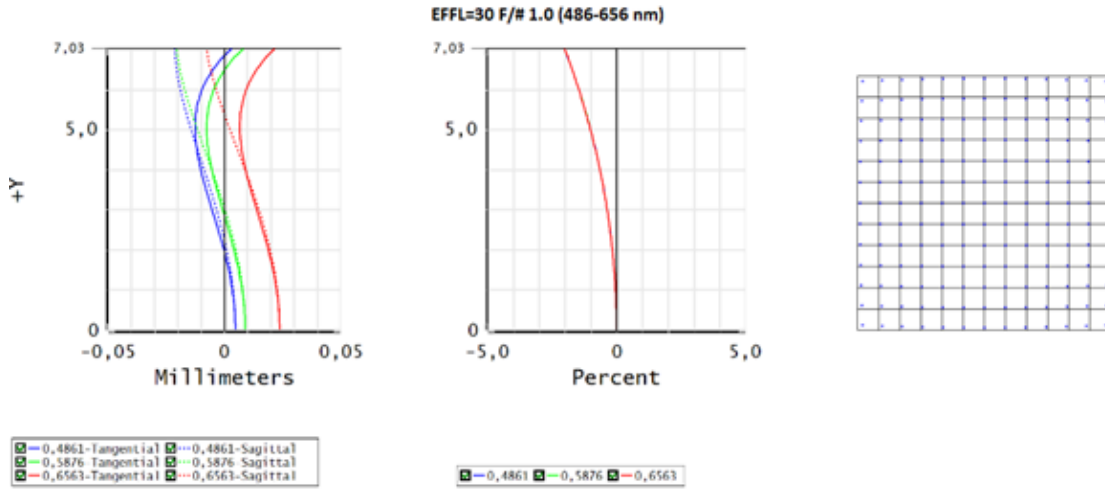
Sistemden geçen ışınların çeşitli etkenlerden dolayı farklı noktalarda odaklanması kaçınılmazdır. Nokta diyagramı analiz çıktısı, odak düzleminde ışınların odaklandığı noktaları haritalandırır. Bunun sonucunda ortaya çıkan iki boyutlu şekiller tasarımcıya tasarım hakkında çeşitli bilgiler sunar. Optik sistem performansının yorumlanabilmesi için sıklıkla kullanılan önemli bir analiz çıktısıdır. Örnek bir nokta diyagramı şekil 2.13' te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Örnek bir optik sistemin nokta diyagramı

2.4.3. Alan eğriliği ve biçim bozulması

Bölüm 2.3.5 ve 2.3.6' da alan eğriliği ve biçim bozulması kusurları anlatılmıştır. Bu analiz yöntemi anlatılan optik kusurların rakamsal ifadelerinin grafik olarak yorumlanabilmesine olanak sağlar. Ayrıca biçim bozulması şematik olarak çıktı alınabildiği için görüntü kalitesi hakkında daha rahat yorum yapabilme seçeneği sunar. Şekil 2.14' de örnek şekiller gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Örnek bir optik sistemin alan eğriliği ve biçim bozulması

2.4.4. Görüntü simülasyonu

Görüntü simülasyonu orijinal herhangi bir görüntünün tasarlamış olan optik sistem ile nasıl görüntüleneceğini bir görüntü simülasyonu olarak verir. Bu görüntüden yola çıkarak görüş açısı kayıpları, biçimsel bozulmalar, çözünürlük ve kontrast gibi sistem kalitesini ilgilendiren parametreler yorumlanabilir. Görüntü simülasyonunda tercihe bağlı olarak ızgara desen görünümü, renk halkaları gibi farklı görüntü çıktılarıyla da kıyaslama yapmak mümkündür. Örnek bir görüntü simülasyonu şekil 2.15' te verilmiştir.



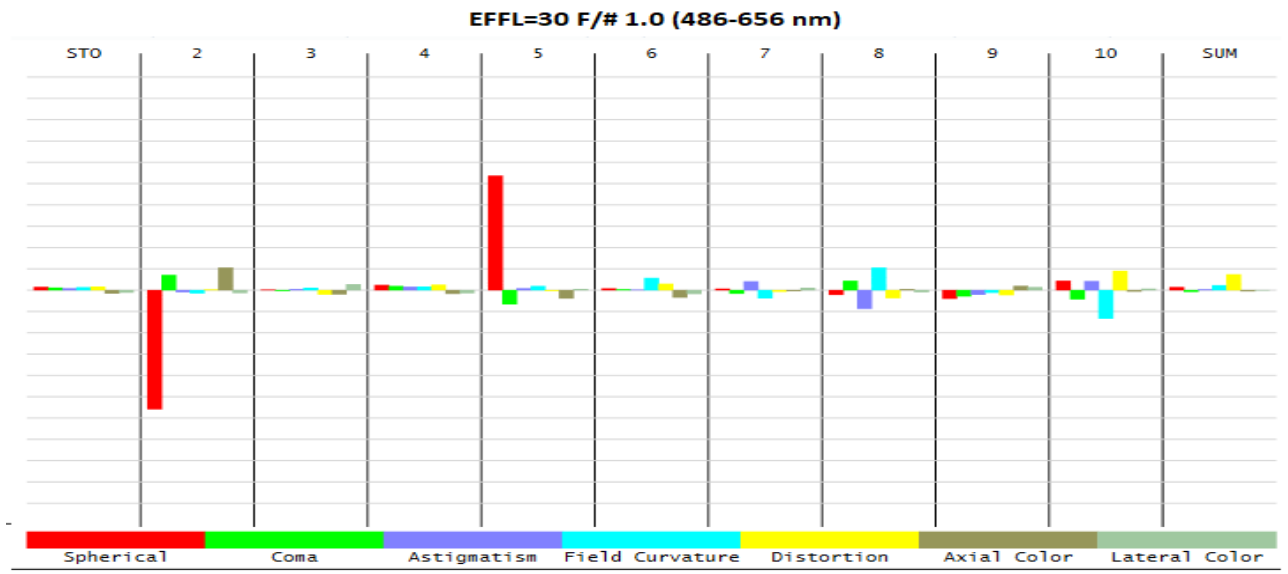
(a)Orijinal görüntü

(b)Örnek tasarımın görüntü simülasyonu

Şekil 2.15. Örnek bir optik sistemin görüntü simülasyonu karşılaştırması

2.4.5. Seidel diyagramı

Seidel Diyagramı bölüm 2.3' de anlatılan bütün optik kusurların her mercek yüzeyi için artı ve eksi yönlerdeki değerlerini bir grafik çıktısı olarak verir ve sistemdeki bütün optik kusurların bir arada incelenip yorumlanabilmesine olanak tanır. Şekil 2.16' da örnek bir Seidel diyagramı verilmiştir.

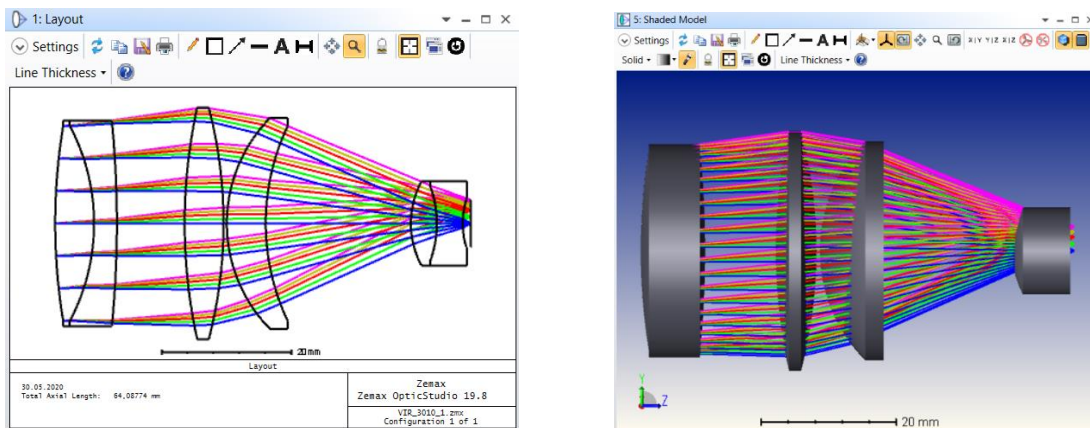


Şekil 2.16. Örnek bir optik sistemin seidel diyagramı

3. YÖNTEM

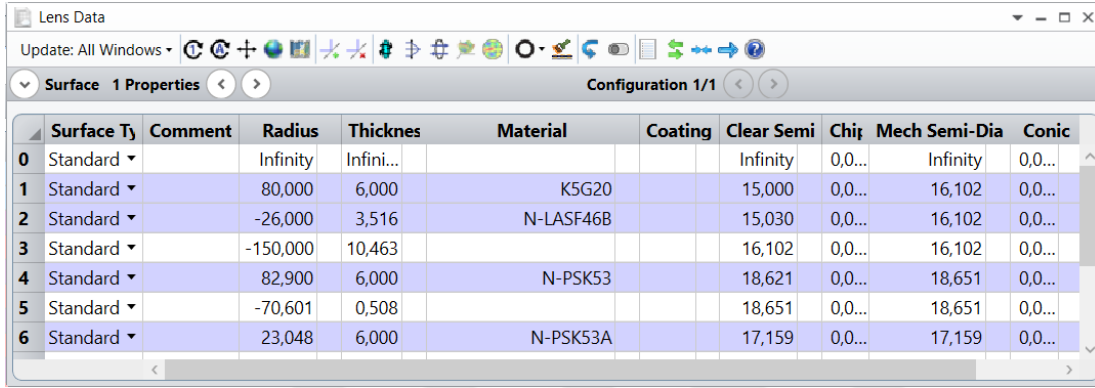
3.1. Tasarımında Kullanılacak Bilgisayar Programının Tanıtılması

Tasarım süresince optik tasarımcıların sıkça kullandığı bilgisayar destekli bir yazılım olan 'Zemax Optic Studio' kullanılacaktır. Zemax mercek, prizma ve aynaların modellenebileceği bir yazılımdır. Belirlenen ve yazılıma girilen parametrelere göre sisteme gelen ışının modellenen optik elemanlarla karşılaştığında nasıl bir yol izlediğini belli başlı çıktılarla kullanıcıya sunarak oldukça fazla kolaylık sağlar. Yazılımda 2 tip kullanım seçeneği mevcuttur. Bunlardan birisi ardışık optik eleman yapısının kullanılabileceği ardışık düzen seçeneği diğeri ise prizmalar gibi çok yüzeyle optik elemanların kullanılabileceği ışınların yön değiştirdiği ardışık olmayan düzen seçeneğidir. Bu tez çalışmasında optik eleman olarak mercekler kullanılacağından Zemax yazılımının ardışık düzen seçeneği kullanılacaktır. Zemax optik elemanların bulunduğu ışın yolunu 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak kullanıcıya görsel olarak sunabilir (Şekil 3.1). Bu sayede ışın yolunun yapısına göre tasarımda ne gibi iyileştirmeler yapabileceği hakkında birtakım bilgiler sunar. Zemax' ın veri tabanında bulundurduğu optik malzeme katalogları mevcuttur. Bu kataloglar güncel optik cam üreticilerinin ürün kataloglarına uyumlu olarak kullanıcıya sunulmaktadır. Yoğunluk, kırılma indisi, geçirgen olduğu dalga boyu aralığı, ısı iletkenlik katsayısı vs. gibi teknik verileri yazılım veri tabanına işler ve ışınların malzeme ve mercek verilerine göre nasıl kırılacağını arka planda hesaplayarak kullanıcıya görsel bir şekilde sunar.



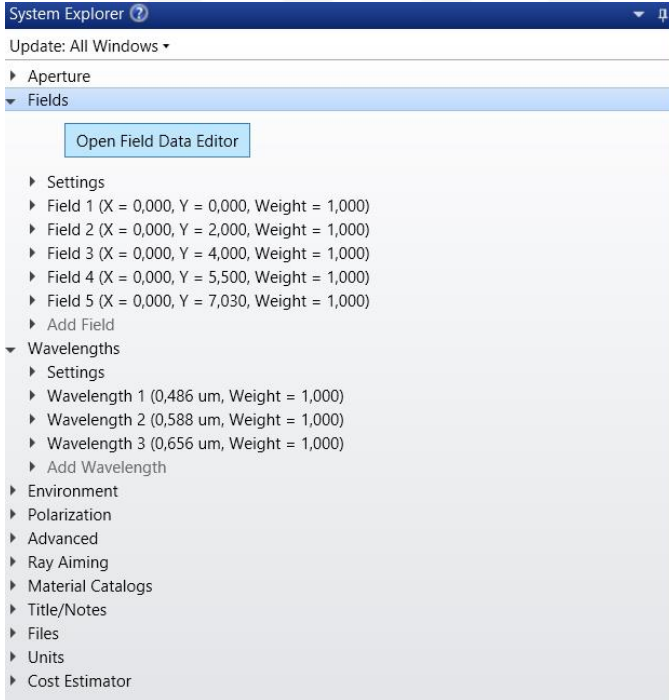
Şekil 3.1. Örnek ışın yolu çıktıları

Yazılımda, ana ekranda merceklerin eğrilik yarıçaplarının, malzeme cinslerinin, merkez kalınlıklarının, birbirlerine olan merkez uzaklıklarının, mekanik yarı çap boyutlarının, varsa koniklik sabiti değerlerinin ve merceğe uygulanacak nano kaplama bilgilerinin olduğu bir tablo mevcuttur (Şekil 3.2). Bunun yanı sıra tasarıma başlarken belirlenen görüş açısı, dalga boyu, optik açıklık, $f/\#$ değeri gibi sistem parametrelerini ve malzeme kataloğu gibi seçeneklerinin sisteme tanımlanabilmesi için yardımcı pencereler vardır (Şekil 3.3).



Surface	Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi	Chirp	Mech Semi-Dia	Conic
0	Standard		Infinity	Infini...			Infinity	0,0...	Infinity	0,0...
1	Standard		80,000	6,000	K5G20		15,000	0,0...	16,102	0,0...
2	Standard		-26,000	3,516	N-LASF46B		15,030	0,0...	16,102	0,0...
3	Standard		-150,000	10,463			16,102	0,0...	16,102	0,0...
4	Standard		82,900	6,000	N-PSK53		18,621	0,0...	18,651	0,0...
5	Standard		-70,601	0,508			18,651	0,0...	18,651	0,0...
6	Standard		23,048	6,000	N-PSK53A		17,159	0,0...	17,159	0,0...

Şekil 3.2. Örnek mercek tablosu



Şekil 3.3. Örnek sistem parametre penceresi

Zemax tasarımıyla ilgili yukarıda belirtilen mercek bilgilerinin elle manuel olarak girilmesine izin verirken bir yandan tasarım üzerinden oluşturulan kısıtlamalar sayesinde otomatik olarak iyileştirme çalışmalarının da yapılabilmesine olanak tanır. Zemax bu otomatik iyileştirme sürecinin Değer Fonksiyonu (Merit Function) olarak adlandırılan bir pencereden kontrol edilebilmesine olanak tanır (Şekil 3.4). Bu pencerede oluşturulan işlemcilerle sistemde istenilen parametrelerin iyileştirme sürecine girmesi kontrol edilebilir. Zemax iyileştirme çalışmasını arka planda sonlu elemanlar vs. gibi hesaplama yöntemleriyle kontrol ederek en iyi sonuca gitmeye çalışır. Ancak iyileştirme çalışmalarından iyi sonuçlar elde edebilmek için tanımlanan işlemciler ve sınır değerleri sistemin fiziksel yapısına aykırı olmamalıdır. Aksi takdirde iyileştirme başarısız olacaktır. Örneğin 3 mercekli bir sistemde 1. ve 2. mercek özelliklerinin değişmemesi isteniyorsa; sadece 3. merceğin eğrilik yarıçaplarına ve kalınlığına değişkenlik komutu tanımlanır. Ardından değer fonksiyonunda 3. merceğin kalınlık parametresine minimum ve maksimum değerler girilerek sınırlama yapılır. Böylece oluşturulan iyileştirme çalışmasında, Zemax ilk 2 mercek parametrelerini sabit tutar ve 3. Merceğin değişken olarak tanımlanan kısımlarını değiştirerek farklı çıktılar verir. Bu çıktıları bakılarak iyileştirme çalışmalarının sonucu değerlendirilebilir.

Type	Order	Value	Weight
1 EFFL	2	30,000	1,000
2 MNCG 4	4	2,000	1,000
3 MXCG 4	4	6,000	1,000
4 BLNK			
5 MNCT 3	3	0,500	1,000
6 MXCT 3	3	30,000	1,000

Şekil 3.4. Örnek değer fonksiyon tablosu

Zemax, tasarımın istenen analizlerini yaparak tasarımcıya farklı pencerelerden bu çıktıları sunar. Bu analizlerin önemli bir kısmı bölüm 2.4' de anlatılmıştır. Analiz sonuçlarını tasarımda yapılan herhangi bir değişiklikte güncelleyerek tasarımın iyileştirme çalışmalarında analiz çıktılarının güncel olarak yorumlanabilmesine olanak tanır. Bu sayede

tasarımda gelinen aşama değerlendirilerek performansı daha iyi bir tasarım oluşturulmasına yardım eder.

3.2. Tasarımda Kullanılabilecek Malzemelerin Seçimi ve Optik Camlar

Mercekler kullanılacağı dalga boyu aralığına göre çok çeşitli malzemelerden üretilebilmektedir. Bu merceklerin büyük bir bölümü cam malzemelerdir ve genellikle cam malzemeler görünür bölgedeki uygulamalarda kullanılırlar. Görünür bölge aralığında kullanılan camların bir kısmının geçirgen olduğu dalga boyu aralığı diğerlerine göre daha geniştir ve yakın dalga kızilötesi ve kısa dalga kızilötesi bölgelerinde de kullanılabilirler. Orta dalga kızilötesi ve uzak dalga kızilötesi bölgelerinde Germanyum gibi daha özel malzemeler kullanılmaktadır. Bu sebeple orta ve yakın kızilötesi bölgelerinde kullanılabilecek malzemeler daha sınırlıdır.

Optik cam seçimlerinde uygulama alanına göre yoğunluğu, maliyeti, ısıl iletkenliği, elastikiyet modülü vs. gibi mekanik, ısıl ve optik özellikleri etken olarak gösterilebilir. Çünkü cam seçimleri, kullanılacağı mekanik koşullar, fiziki ve coğrafik durumlar veya maliyet göz önünde bulundurularak yapılabilir. Bir camın en önemli optik özelliklerinin başında kırılma indisi ve Abbe değeri gelir. Abbe değeri ismini Ernst Abbe' den (1840-1905) almıştır. E. Abbe cam malzemelerin çeşitlendirilerek farklı özelliklerde üretilebilmesi için çalışmış Alman bir bilim adamıdır. Abbe değerinin diğer bir gösterimi " v_d " şeklindedir. Bir camın Abbe değeri o camın geçirgen olduğu dalga boyuna göre kırılma indisin dağılımı hakkında bilgi veren bir değerdir. Abbe değeri büyükse kırılma indisi dağılımı düşük, Abbe değeri küçükse kırılma indisi dağılımı yüksektir (Wikipedia, 2020). Ayrıca optik camların geçirgen oldukları dalga boyu aralığı malzeme seçiminde kritik noktalardan birisidir. Optik camların kullanılacak dalga boyu aralığında ne kadar geçirgen olduğuna da dikkat edilmelidir. Bu tez çalışmasında geniş bir dalga boyu aralığında çalışılacağı için özellikle malzemelerin dalga boyu aralığı ve Abbe değerlerine dikkat edilecektir. Geniş dalga boyu aralığından kaynaklanacak olan renk hatalarının genellikle yüksek Abbe değerli camlar seçilerek malzemedeki kaynaklı ek olarak artmasının önüne geçilmesi planlanmaktadır.

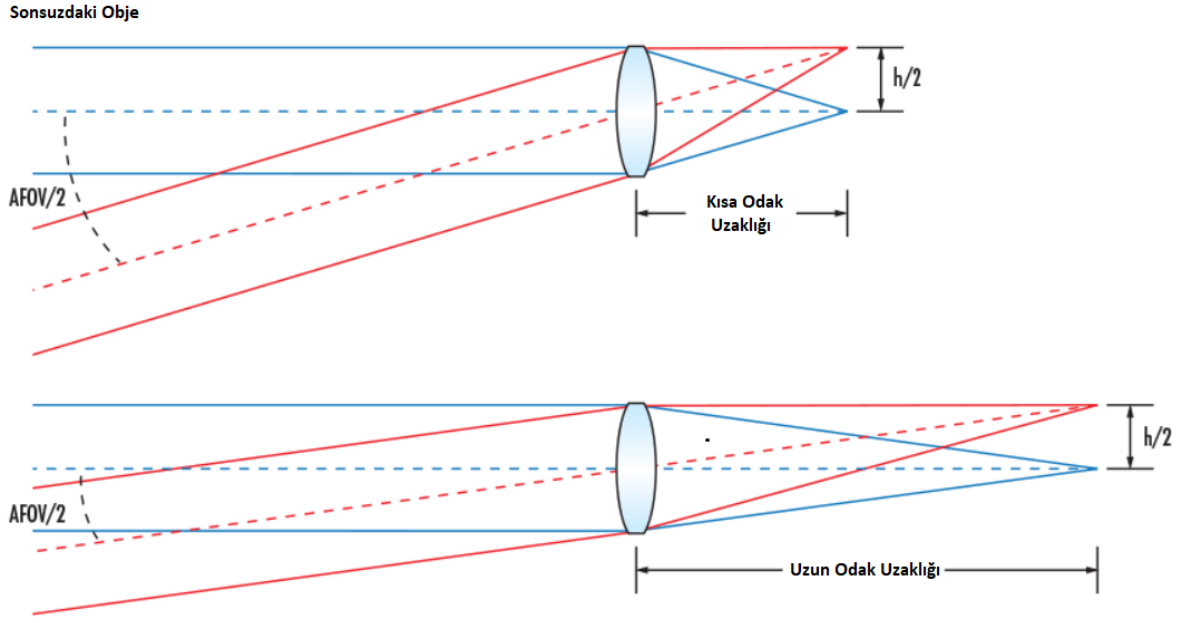
Optik malzemeler farklı özel cam üretici firmalar tarafından kataloglar haline getirilmiştir

ve bu kataloglar üreticileri tarafından sürekli güncel tutulmaktadır. Kullanıcılar güncel kataloglara üretici firmaların web sitelerinden kolaylıkla ulaşabilmektedir. Optik cam üreticilerine örnek olarak Schott (Almanya), Ohara (Japonya), Corning (ABD), CDGM (Çin) gösterilebilir. Bu özel üreticilerin çeşitli özelliklerde optik cam katalogları tüm özellikleri tanımlı olarak Zemax tasarım programının kütüphanesine bilgisayar programına uyumlu olarak kaydedilebilmektedir. Bu sayede bu kütüphaneden tasarıma uygun camlar seçilebilmektedir (Kingslake ve Johnson, 2010). Bu tez çalışmasında cam kataloğu olarak Schott firmasına ait güncel “SchottZemax-20180601” cam kataloğu kullanılmıştır.

3.3. Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

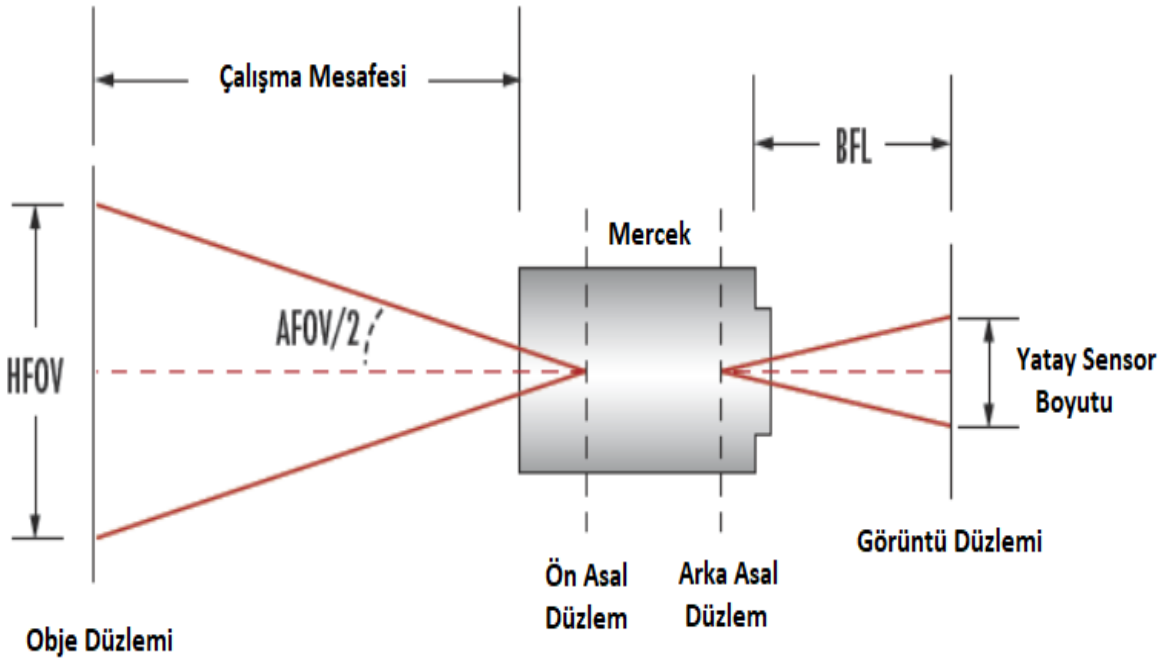
Bir optik sistem tasarımına başlayabilmek için kullanılacağı amaca göre şekillenmesi gereken belli parametreler vardır ve tasarım bu parametreler temelinde oluşturulmalıdır. Bu tez çalışmasında genelde el tipi taşınabilir gözetleme sistemlerinde kullanılan ve piyasada benzer boyutlu ürünlerin rahat bulunabileceği 1280x1024 çözünürlüğünde 4,8x4,8 μm piksel boyutuna sahip bir dedektör seçilmiştir. Sistemin, bir aracı 9000 metreden tespit edebilme kabiliyetinin olması ön görülmüştür. Ayrıca el tipi bir gözetleme sisteminin boyutu göz önünde bulundurularak optik açıklık (D) 25 mm seçilmiştir. Sistemin temel taşı olacak sistem parametreleri; odak uzaklığı (EFL), görüş alanı (FOV), f sayısı ($f/\#$) ve çalışma dalga boyu aralığıdır. Bu parametreler yukarıda belirtilen gereksinimler ışığında hesaplanacaktır.

Odak uzaklığı, görüş alanı ve dedektör boyutları arasında matematiksel bir ilişki vardır. Şekil 3.5 ve 3.6' ya bakıldığında bu ilişki basit bir geometrik yaklaşımla anlaşılabilir.



Şekil 3.5. Odak uzaklığı ve görüş alanı arasındaki ilişki

Burada kısa odak uzaklığının daha geniş bir görüş alanı, uzun odak uzaklığının ise daha dar bir görüş alanı doğurduğu net olarak görülmektedir.



Şekil 3.6. HFOV dedektör boyutu çalışma mesafesi ve AFOV arasındaki ilişki

Burada HFOV (Horizontal Field of View) yatay görüş alanını, AFOV (Angular Field of View) açısal görüş alanını ifade etmektedir.

Odak uzaklığı mesafesi, başta belirtilen 9000 metredeki 2,3 m x 2,3 m boyutlarında olan bir hedef için görüntüleme sistemlerinin mesafe tayini hesaplamalarında sık kullanılan Johnson Kriteri ile hesaplanabilir. Hedef mesafesi belirlemenin kökeni 1950’li yılların sonuna doğru John Johnson’ ın çalışmalarına kadar uzanmaktadır. Johnson, görüntülenen bir nesnenin etkin çözünürlüğünü baz alarak bir nesnenin tespit olasılığını karakterize etmiştir. Hedefleri ayırt edebilmek için Çizelge 3.1’ de verilen tablodaki 4 maddeyi oluşturmuştur ve bu maddeler Johnson Kriterleri olarak adlandırılmaktadır (Sjaardema, Smith ve Birch, 2015). Johnson kriterlerine dayanarak tespit mesafesi için basitleştirilmiş bir hesap yöntemi denklem 3.1 ve 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Johnson kriterleri

Ayrım Derecesi	Hedefe Düşen Çizgi Çifti	Tanım
Tespit	1.0±0.25	Öneme sahip bir nesne olduğunu belirtir
Konumlandırma	1.4±0.35	Nesnenin yönünü belirtir
Tanıma	4.0±0.8	Nesnenin sınıfını söyler (cip, binek araç vs.)
Kimliklendirme	6.4±1.5	Nesnenin sınıfındaki türünü söyler (Toyota, Mercedes vs.)

Johnson Kriterinde belirtilen 1 mm’de ayırt edilebilen siyah ve beyaz çizgi çifti sayısı, CRT (Cathode Ray Tube) monitörlerinde görüntülenen çizgileri ifade eder. Ancak LCD (Liquid Crystal Display) monitörlerde görüntülenen her bir çizgi çifti 2 piksele denk gelmektedir (Wikipedia, 2020). Bu hesaplamada denklem 3.1’ de hedef tespiti için gerekli olan 2 piksel değeri tespit yüzdesini artırmak için 3 piksel alınacaktır.

Şekil 3.5 ve 3.6’ dan yola çıkarak basit bir geometrik yaklaşım yapılacak olursa; denklem 3.1 yazılabilir.

$$DD(mm) = \frac{HFOV(mm) \times EFL(mm)}{pikselboyutu(mm) \times 3} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1 denklem, denklem 3.6 ve 3.7 birbirine eşitlenerek oluşturulabilir.

Odak uzaklığı hesaplanmak istenirse denklem 3.2' den hesaplama yapılabilir.

$$EFL(mm) = \frac{DD(mm) \times pikselboyutu(mm) \times 3}{HFOV(mm)} \quad (3.2)$$

Burada DD tespit mesafesi, HFOV hedefin yatay boyu, EFL odak uzaklığını ifade eder. Çizelge 3.2' deki veriler denklem 3.2' de yerine konulduğunda odak uzaklığı yaklaşık 56,35 mm olarak hesaplanmıştır. Odak değeri toleranslar göz önünde bulundurularak 57,5 mm olarak alınacaktır.

Çizelge 3.2. Odak uzaklığı hesabı için gerekli olan parametreler

HFOV (mm)	2300
DD (mm)	9000000
Piksel boyutu (mm)	0,0048

Şekil 3.5 ve 3.6' dan yola çıkarak çalışma mesafesi ve görüş alanı hesaplamaları için aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$AFOV(^{\circ}) = 2 \times \arctan\left(\frac{HFOV(mm)}{2 \times WD(mm)}\right) \quad (3.3)$$

veya

$$HFOV(mm) = 2 \times WD \times \tan\left(\frac{AFOV(^{\circ})}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$HFOV(mm) = \frac{\text{yatay dedektör boyutu}(mm)}{PMAG} \quad (3.5)$$

veya

$$PMAG = \frac{\text{yatay dedektör boyutu}(mm)}{HFOV(mm)} \quad (3.6)$$

$$PMAG = \frac{EFL(mm)}{WD(mm)} \quad (3.7)$$

Burada PMAG; optik büyütme gücünü, yatay dedektör boyutu; yataydaki piksel sayısının piksel boyutuyla çarpımını, WD; çalışma mesafesini ifade eder.

Yukarıda verilen denklemlerden yola çıkılarak hesap yapılmak istenirse öncelikle çalışma mesafesinin hesaplanması mantıklı olacaktır. Çalışma mesafesini hesaplanabilmesi için de büyütme gücü çizelge 3.3' deki değerler denklem 3.6' da yerine konularak hesaplanabilir.

Çizelge 3.3. Büyütme gücü hesabı için gerekli olan parametreler

Yatay Dedektör Boyutu (mm)	1280x0,0048=6,144
HFOV (mm)	2300

Büyütme gücü hesaplandığında değeri yaklaşık olarak 0,00267 bulunur ve böylece çalışma mesafesi hesaplanabilir. Çizelge 3.4' deki değerler denklem 3.7' de yerine konularak çalışma mesafesinin değeri bulunur.

Çizelge 3.4. Çalışma mesafesi hesabı için gerekli olan parametreler

PMAG	0,00267
EFL (mm)	57,5

Çalışma mesafesi hesaplandığında yaklaşık 21535 mm yani basitçe 21,5 metre olduğu söylenebilir.

Bu hesaplamaların ardından son olarak görüş alanı hesabının yapılması gerekmektedir.

Şekil 3.6' dan da çıkarım yapılabileceği üzere görüş alanı hesabı çizelge 3.5' deki değerler denklem 3.3' de yerine konularak açısal olarak hesaplanabilir.

Çizelge 3.5. Açısal görüş alanı hesabı için gerekli olan parametreler

HFOV (mm)	2300
WD (mm)	21535

Görüş alanı hesaplandığında yaklaşık olarak $6,1^\circ$ bulunur. Bu hesaplamaların tümü yatay eksen de yapıldığı için yatay görüş alanını ifade etmektedir. Aynı hesaplar dikey eksen için de uygulanabilir. Dikey eksen için yapılan hesaplamalara göre dikey görüş açısı yaklaşık olarak $4,9^\circ$ bulunur. Görüş alanı $6,1^\circ \times 4,9^\circ$ şeklinde ifade edilebilir. Diyagonal görüş açısı ise basit bir Pisagor hesabıyla yaklaşık $7,8^\circ$ hesaplanır.

Parametrelerden bir diğeri önceden de belirlendiği üzere tez konusu olan çalışma dalga boyu aralığı $0,4-1,1 \mu\text{m}$ ' dir.

Son olarak $f/\#$ değeri de hesaplanırsa sistem tasarımının temelini oluşturacak olan parametrelerin tümü belirlenmiş olur. Çizelge 3.6'daki değerler bölüm 2.2.5' de verilen denklem 2.3' de yerine konularak hesaplanabilir.

Çizelge 3.6. f sayısı ($f/\#$) hesabı için gerekli olan parametreler

EFL (mm)	57,5
D (mm)	25

$f/\#$ değeri hesaplandığında 2,3 olarak bulunur.

Tüm bu hesaplamalara göre sistem tasarımının temelini oluşturacak olan parametreler belirlenen gereksinimlere göre hesaplanmış ve tamamı Çizelge 3.7' de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Hesaplanan sistem parametreleri

EFL (mm)	57,5
HFOV (°)	6,1
F/#	2,3
Dalga Boyu Aralığı (μm)	0,4-1,1



4. TASARIM

Sistem tasarımına başlanabilmesi için önceki bölümlerde belirlenen parametreler tasarım programına işlenmiştir ve bu bilgiler ışığında belli adımlarla gidilerek bir ön tasarım oluşturulmuştur. Ön tasarım, bu tez çalışmasındaki sistem tasarımının önemli bir aşaması olarak düşünülebilir. Ön tasarım performans olarak kullanılabilir bir tasarım değildir. Ancak uygun iyileştirme çalışmalarıyla sistem performansı artırılmış ve kullanılabilir bir tasarım haline getirilmiştir. Tasarımın son hali, analiz sonuçları paylaşılarak sonlandırılmıştır. Bu bölümde ilgili tasarım aşamalarının tümü aktarılmıştır.

4.1. Tasarım Parametrelerinin Programa Tanımlanması

Yukarıdaki bölümlerde kullanım alanına uygun şekilde belirtilen gereksinimler ve bu gereksinimlere göre hesaplanan parametrelerin tasarım programına uygun olarak girilmesi gerekmektedir. Öncelikle dalga boyu aralığı tanımlanmıştır. Sistemin çalışma dalga boyu aralığı 0,4-1,1 μm olarak belirlenmiştir. Bu parametre Çizelge 4.1’ de görüldüğü gibi tasarım programına 2 ayrı dalga boyu aralığı olarak tanımlanmış ve 3 ayrı dalga boyu sisteme girilmiştir. Merkez dalga boyu 0,750 μm olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.1. Tasarım dalga boyu aralıkları

Sıra Numarası	Dalga boyu (μm)	Açıklama
1	0,4	Yaklaşık görünür bölge alt limit
2	0,75	Yaklaşık görünür bölge üst limit ve YDKÖ alt limit
3	1,1	Yaklaşık KDKÖ alt limit

İkinci olarak optik açıklık bilgisi tasarım programına sistem parametreleri penceresinden 25 mm olarak tanımlanmıştır.

Üçüncü olarak görüş alanı noktaları belirlenmeli ve programa tanımlanmalıdır. $7,8^\circ$ olan diyagonal görüş alanı baz alınarak uç noktalar $\pm 3,9^\circ$ olacak şekilde belirlenmiştir. Sistem simetrik olacağından $3,9^\circ$ üzerinden artı veya eksi yönlerinden herhangi birinde çalışılabilir. Bu tasarım için $+3,9^\circ$ baz alınacaktır. Bu değer üzerinden 4 görüş alanı noktası belirlenmiş bu noktaların olması gereken değerleri denklem 4.1' e göre hesaplanmıştır (Zemax, 2020). Hesaplanan alan noktalarının yaklaşık değerleri Çizelge 4.2' de paylaşılmıştır.

$$n. \text{ görüş alanı ara noktası}(\circ) = \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{k}} \times FOV(\circ) \quad (4.1)$$

Burada $n= 1, 2, 3, 4$ k ise en büyük ve en küçük n değeri arasındaki farktır.

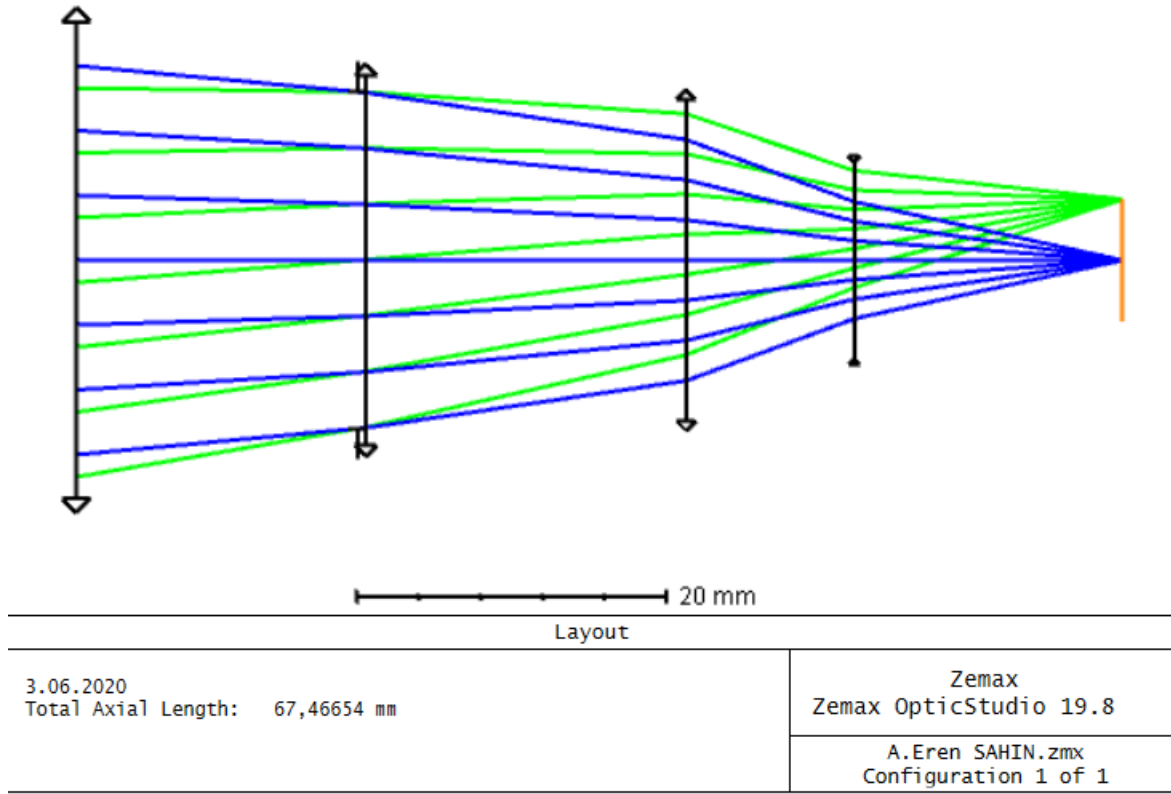
Çizelge 4.2. Görüş alan noktaları

Görüş Alan Noktası	Görüş Alanı ($^\circ$)
1	0
2	2,25
3	3,2
4	3,9

Son olarak yukarıdaki bölümlerde hesaplanmış olan odak mesafesi değeri tasarımın ilerleyen aşamalarında kullanılacaktır.

4.2. Ön Tasarımın Oluşturulması

Ön tasarım çalışması için ilk aşamada Paraksiyal bir tasarım yapılmıştır. Paraksiyal tasarımla kullanılacak mercek sayısı ve merceklerin odak uzaklıkları yaklaşık olarak belirlenmiştir. Paraksiyal ön tasarım görseli Şekil 4.1' de paylaşılmıştır.



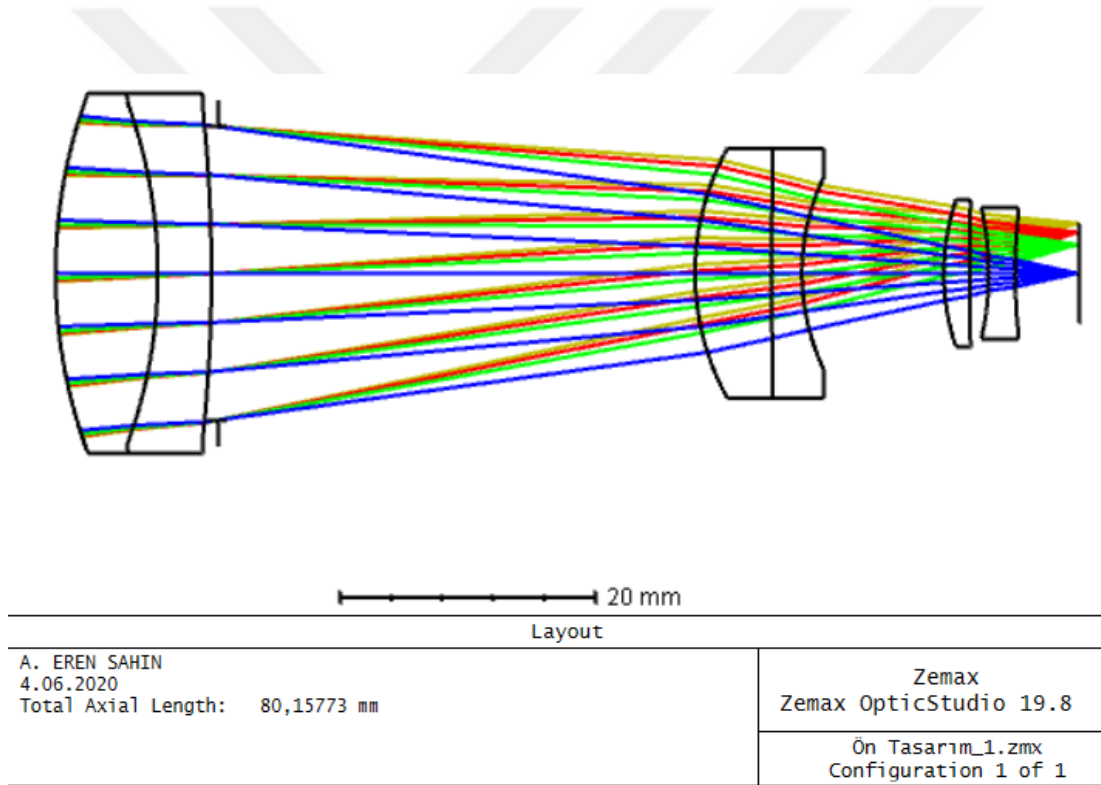
Şekil 4.1. Paraksiyal ön tasarım dizilimi

Bu çalışmanın asıl amacı sistemi oluşturacak olan mercek sayısını belirlemek ve ışın yolunu oluşturabilmektir. Yapılan bu çalışmanın amacı yüksek performanslı bir tasarım oluşturmak değil, tasarımın temelini oturtup ardından yapılacak olan iyileştirme çalışmalarısıyla performansı artırmaktır. Paraksiyal tasarım sonucunda ortaya çıkan mercek sayıları ve bunların odak uzaklık değerleri çizelge 4.3' de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.3. Paraksiyal tasarım sonucu belirlenen mercekler ve odak uzaklıkları

Mercek	EFL (mm)
1	135
2	200
3	35
4	-25

İkinci aşamada paraksiyal tasarımla belirlenen mercek sayısı sonucunda her mercek tek tek odak uzaklıklarına göre tasarlanmıştır. Tasarımda önceki bölümlerde bahsi geçen renk kusurlarının önüne geçilebilmesi amacıyla 1. ve 2. mercek akromatik mercek çifti olarak 3. ve 4. mercekler ise tekli mercekler olarak tasarlanmıştır. 1. ve 2. Mercek kendi içerisinde, 3. ve 4. mercek tasarımları kendi içerisinde renk kusurları birbirlerini mümkün olduğunca azaltabilmesi için çalışılmıştır. Tasarlanan mercekler birleştirilmiş ve aralarındaki mesafeler uygun olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece ön tasarımın ilk aşaması oluşturulmuş ve görseli soldan sağa doğru 1. Akromatik mercek çifti 2. Akromatik mercek çifti 3. Tekli mercek ve 4. Tekli mercek olarak Şekil 4.2’ de, yüzey eğrilik yarıçap bilgileri ve malzemeleri Şekil 4.3’ de, MTF analiz çıktısı EK 1’ de paylaşılmıştır.

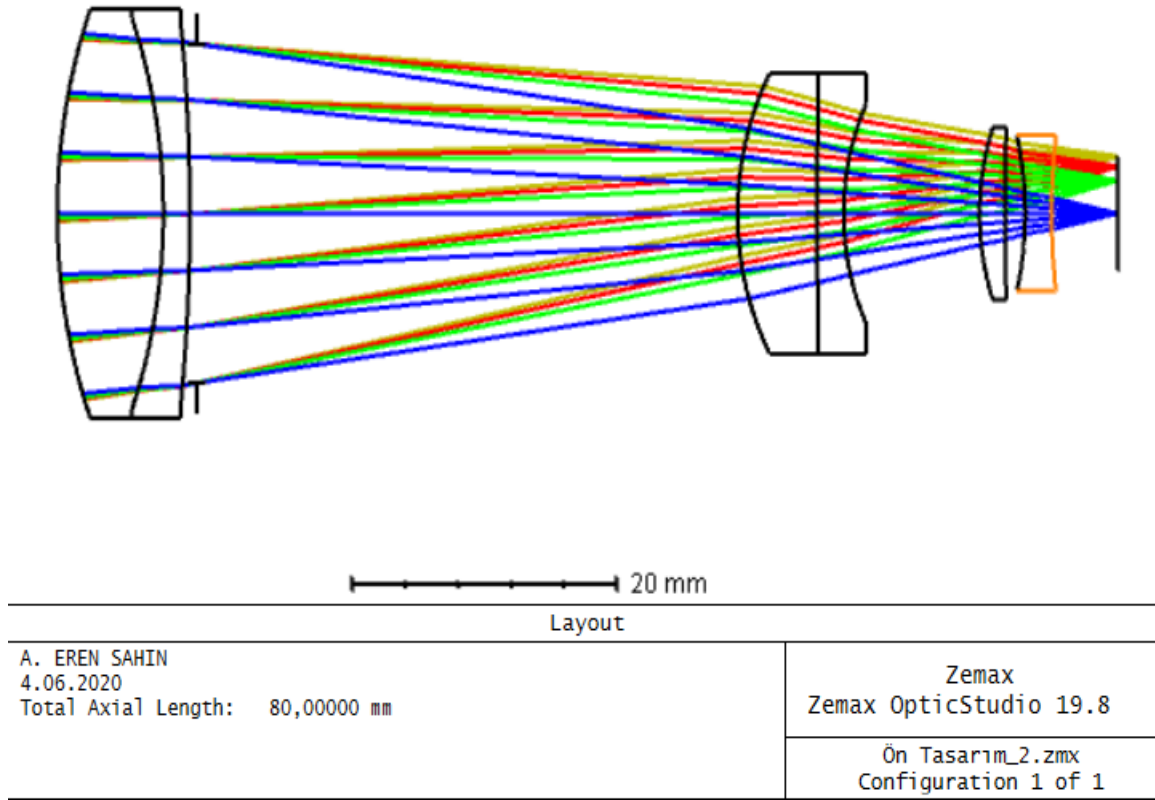


Şekil 4.2. Ön tasarım ilk aşama mercekler ve dizilimi

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material
0	OBJECT Standard ▾		Infinity	Infinity	
1	Standard ▾			8,000	
2	Standard ▾		-38,797	4,200	N-BAF52
3	Standard ▾			0,503	
4	STOP Standard ▾		Infinity		
5	Standard ▾		20,107	6,000	
6	Standard ▾			2,370	
7	Standard ▾				
8	Standard ▾		17,842	2,012	N-BAK4
9	Standard ▾				
10	Standard ▾		-23,157	2,067	N-BAF10
11	Standard ▾				
12	IMAGE Standard ▾		Infinity	-	

Şekil 4.3. Ön tasarım ilk aşama mercek eğrilik yarıçapları ve malzemeleri

Ön tasarımın son aşamasında merceklerin kalınlıkları, mercekler arası mesafe ve çeşitli malzemeler güncellenerek tasarım temeli oluşturulmuş ve iyileştirme çalışmaları için uygun bir hale getirilmiştir. Ön tasarımın son aşamasının görseli Şekil 4.4' de, eğrilik yarıçapı ve malzeme bilgileri Şekil 4.5' de verilmiştir. MTF analiz çıktısı EK 1' de paylaşılmıştır.



Şekil 4.4. Ön tasarım son aşama mercek ve dizilimi

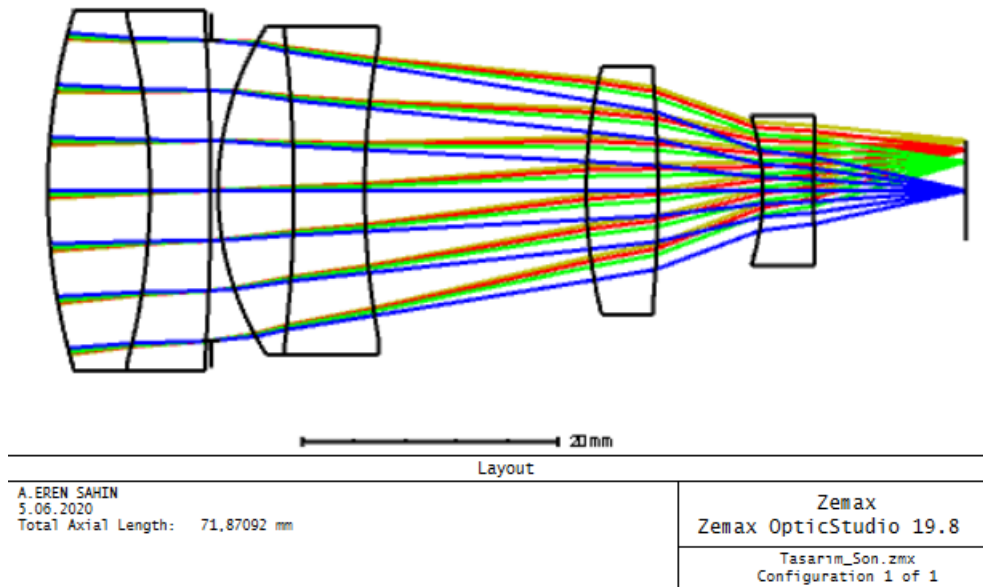
Surface	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material
0	OBJECT Standard ▾		Infinity	Infinity	
1	Standard ▾			8,000	
2	Standard ▾		-38,797	2,000	N-BAF52
3	Standard ▾			0,500	
4	STOP Standard ▾		Infinity		
5	Standard ▾		20,107	6,000	
6	Standard ▾			2,000	
7	Standard ▾				
8	Standard ▾		17,842	1,929	N-BK10
9	Standard ▾				
10	Standard ▾		-23,157	2,000	AF32ECO
11	Standard ▾				
12	IMAGE Standard ▾		Infinity	-	

Şekil 4.5. Ön tasarım son aşama mercek eğrilik yarıçapları ve malzemeleri

4.3. Tasarım İyileştirme Süreci ve Tasarımın Sonlandırılması

Ön tasarımın tamamlanmasının ardından tasarımın performansını artıracak iyileştirme çalışmaları için uygun değişkenler belirlenmiştir. Bu değişkenler merceklerin eğrilik yarıçapları, mercek kalınlıkları, mercekler arası mesafeler ve cam malzemeleridir. İyileştirme için daha önce hesaplanan 57,5 mm odak uzaklığı da bu süreçte hedef sabiti olarak kullanılmıştır. Belirlenen tüm bu değişkenler için kullanılacak olan işlemciler yardımıyla bir değer fonksiyon matrisi oluşturulmuştur ve EK 2’ de paylaşılmıştır. İyileştirme sürecindeki tüm hesaplamalar oluşturulan değer fonksiyon matrisi ile ‘Zemax Optic Studio’ tasarım programı üzerinden yapılmıştır.

Tasarımın, iyileştirmeler sonrası son değerlendirmeler ve çeşitli düzeltmelerle birlikte sonlandırılmış ve görseli Şekil 4.6’ da, eğrilik yarıçapı ve malzeme bilgileri ise Şekil 4.7’de verilmiştir. Ayrıca tasarımın genel özelliklerini tanımlayan rapor çıktısı EK 3’ de paylaşılmıştır.



Şekil 4.6. Sonlandırılmış tasarım mercek ve dizilimi

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material
0	OBJECT Standard ▾		Infinity	Infinity	
1	Standard ▾			8,000	
2	Standard ▾		-51,494		P-LAK35
3	Standard ▾				
4	STOP Standard ▾		Infinity	0,500	
5	Standard ▾		23,644		
6	Standard ▾			5,549	
7	Standard ▾		62,312		
8	Standard ▾			5,605	N-LASF45
9	Standard ▾		-104,201		
10	Standard ▾			4,000	
11	Standard ▾		2193,951		
12	IMAGE Standard ▾		Infinity	-	

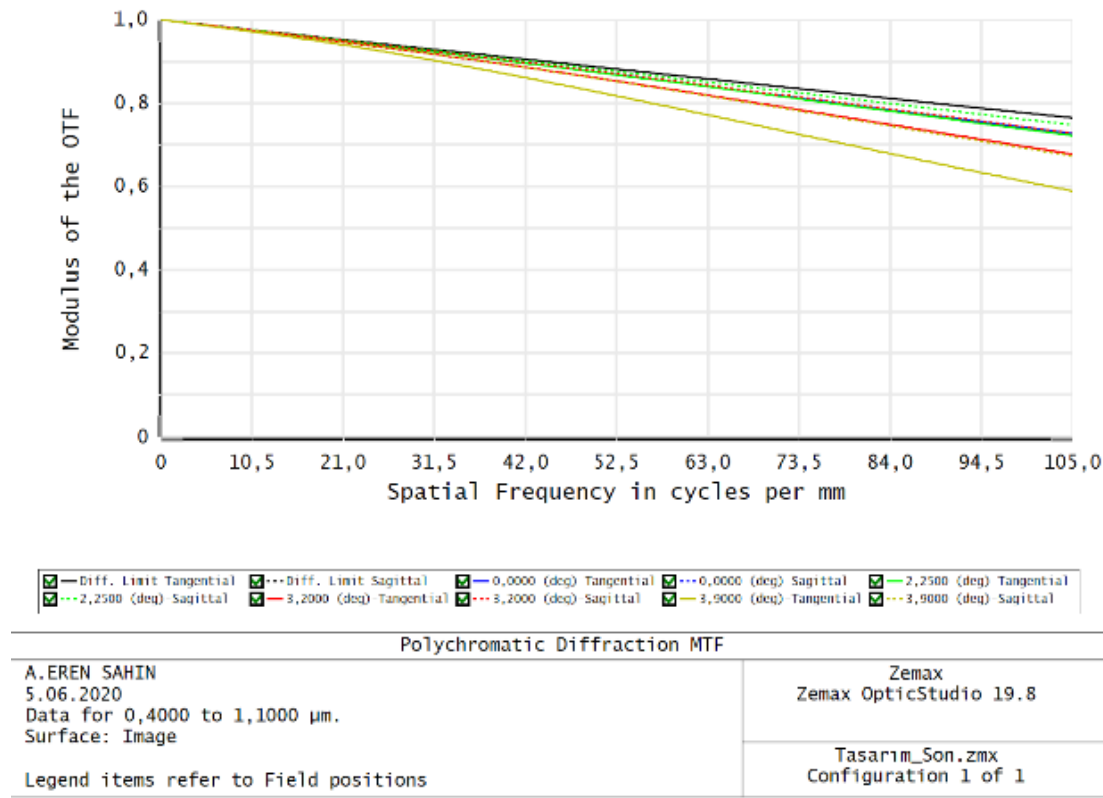
Şekil 4.7. Sonlandırılmış tasarım mercek eğrilik yarıçapları ve malzemeleri

4.4. Tasarımın Analiz Sonuçları

Tamamlanan tasarımın analiz çıktı görselleriyle beraber, ilgili bilgiler paylaşılarak tasarımın performansı değerlendirilecektir. Optik tasarımın performansının değerlendirilmesinde kullanılmış ancak bu konu başlığında yer verilmemiş olan, alan eğriliği ve biçim bozukluğu analiz çıktıları EK 1’ de verilmiştir.

4.4.1. Modülasyon transfer fonksiyon analizi

Bir optik tasarımın optik bileşenler bazında performansını değerlendirebilmek için kullanılabilecek en önemli analiz çıktılarından birisi, MTF grafiğidir. MTF sistemdeki optik kusurlar, tolerans aralıkları gibi birçok değişkenin toplamı üzerinden bir grafik çıktısı verir (Smith 2004). Şekil 4.8’ de (ayrıca EK 1) sonlandırılmış tasarımın MTF grafiği paylaşmıştır.

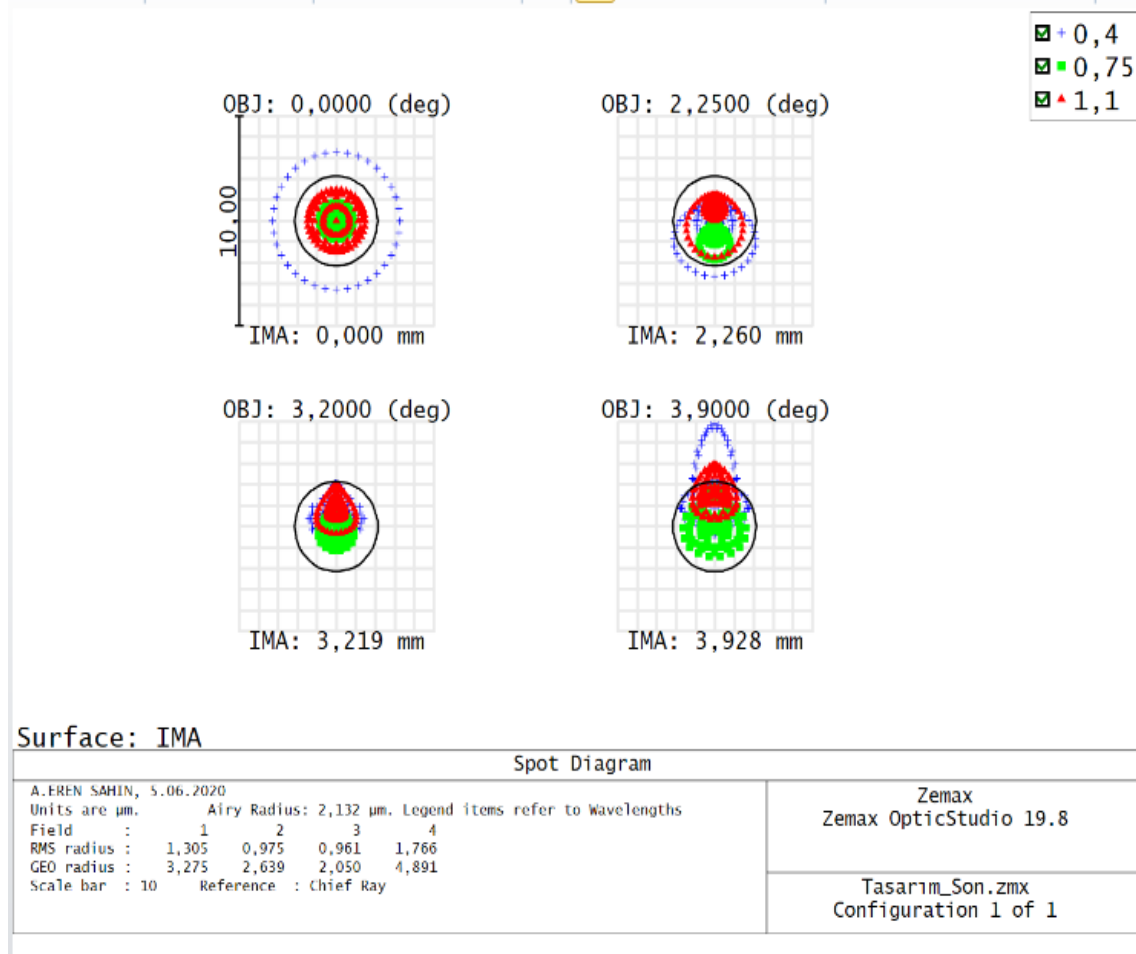


Şekil 4.8 Sonlandırılmış tasarım MTF grafiği

Şekil 4.8’ de verilen grafikte dikey eksen bu mercek tasarımının iletebileceği ışık miktarını gösterir. Yatay eksen ise dedektörün merkezinden köşelere olan mesafesini belirtir. Grafikteki eğriler açıklanacak olursa; siyah devamlı olan eğri tasarımda belirlenen parametreler doğrultusunda oluşturulabilecek en iyi MTF değerini temsil eder. Bu eğri kırınım eğrisi olarak adlandırılır. Mavi, yeşil, kırmızı ve sarı devamlı eğriler ise sırasıyla Çizelge 4.2’ deki 1, 2, 3 ve 4. görüş alan noktaları için hesaplanmış olan teğetsel, kesikli eğriler ise sagittal MTF değerlerini verir. Basit bir şekilde düşünüldüğünde tüm görüş alan noktaları için MTF eğrileri kırınım eğrisine ne kadar yakınsa o kadar iyi bir performans elde edileceği çıkarımı yapılabilir. Bu tasarımın MTF grafiğine göre 105 çizgi çifti için görüş alanlarının MTF değerleri, yaklaşık olarak %80 ile %60 arasında değişmektedir.

4.4.2. Nokta diyagram analizi

Nokta diyagram analizi, tasarımın odaklanma başarımının yorumlanabilmesi için önemli analiz çıktılarından birisidir. Şekil 4.9’ da (ayrıca EK 1) sonlandırılmış tasarımın nokta diyagram analiz çıktısı paylaşılmıştır.



Şekil 4.9. Sonlandırılmış tasarım nokta diyagram analizi

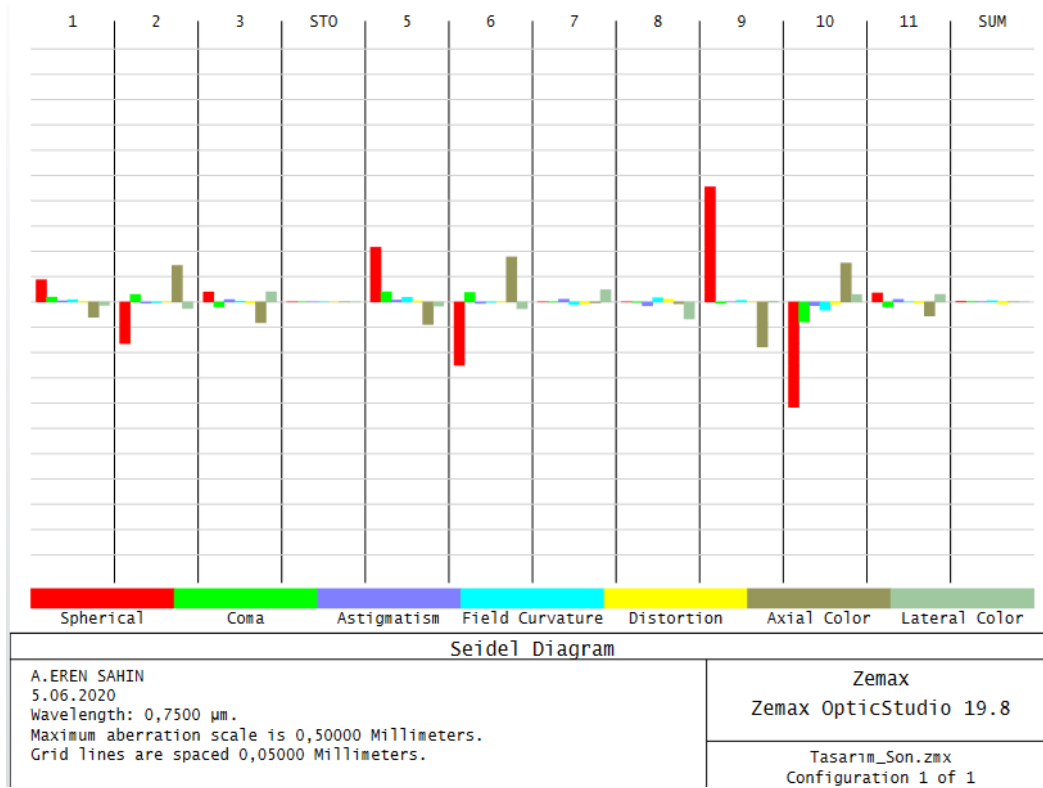
Şekil 4.9 incelendiğinde, görülen 4 farklı spot diyagramı Çizelge 4.2’ deki görüş alan noktalarına göre oluşturulmuş analiz sonuçlarıdır. Diyagramda görülen siyah halka Airy disk halkasıdır. Airy disk, tasarımda belirlenen parametreler sonucunda mümkün olabilecek en iyi odakların içinde toplanabileceği en küçük daire olarak tanımlanabilir. Ayrıca piksel boyutu Airy diskten daha küçük olan dedektörlerin kullanışsız olacağı söylenebilir. (Gross, 2008). Airy Disk değeri Denklem 4.2’ ye göre hesaplanabilir.

$$\text{Airy Disk Yarıçapı } (\mu\text{m}) = 1,22 \times \lambda(\mu\text{m}) \times f/\# \quad (4.2)$$

Burada 1,22 değeri, kırınım halkalarının seri yöntemiyle hesaplanması sonucu bir sabit olarak kabul edilir ve λ merkez dalga boyunu (Çizelge 4.1) ifade eder. $f/\#$ değeri ise Çizelge 3.7’ de verilmiştir. Hesaplamaya göre Airy diskin yarıçapı 2,1 μm olarak hesaplanmıştır. Analiz çıktısında ise bu değer 2,132 μm ’dir.

4.4.3. Seidel diyagramı analizi

Seidel diyagramı tasarımdaki optik kusurları genel olarak inceler ve bu kusurların hangi mercek yüzeylerinde daha yoğun olduğunu tespit etme kolaylığını sağlar. Böylece optik kusuru artıran mercek yüzeylerinde eğer gerekliyse iyileştirme çalışmaları yapılabilmektedir. Sonlandırılmış tasarımın Seidel diyagram analiz çıktısı Şekil 4.10' da (ayrıca EK 1) verilmiştir.



Şekil 4.10. Sonlandırılmış tasarım seidel diyagram analizi



5. SONUÇ VE YORUM

Bu tez çalışmasında, literatürde multispektral bant olarak da bilinen aralığa dahil 0,4-1,1 μm dalga boyu aralığında çalışabilen bir mercek grubunun optik tasarımı yapılmıştır. Tasarımın başında el tipi bir gözetleme cihazına kolaylıkla uyum sağlayabilecek ve kullanım alanına uygun gereksinimleri karşılayabilecek bir tasarım amaçlanmıştır. Gereksinimlere göre tüm optik parametreler hesaplanmış, güncel ve kolay ulaşılabilecek bir malzeme kataloğu kullanılmıştır. Geniş dalga boyu aralığı sebebiyle ek olarak oluşabilecek renk kusurları ise akromatik mercek çiftleri, uygun cam malzemeler ve uygun mercek geometrileriyle mümkün olan en alt seviyelere çekilmiştir. Tasarıma başlarken öncelikle paraksial bir şablon oluşturulmuş ve bu şablon üzerinden bir ön tasarım yapılmıştır. Ön tasarımın şekillenmesinin ardından tasarımda, bilgisayar programıyla iyileştirme çalışmaları yapılarak tasarım sonlandırılmıştır.

Sonlandırılmış tasarımın analiz sonuçlarından biri olan Seidel diyagramı (Şekil 4.10) incelendiğinde sistemdeki bütün mercek yüzeylerinden kaynaklı ve sistemdeki toplam optik kusurlar bir arada görülebilmektedir. Diyagramda genel olarak küresel ve renk hatalarının daha yoğun olduğu görülmektedir. Ancak bu yoğun hatalar farklı mercek yüzeylerinde oluşturulan zıt yönlü optik hatalar sayesinde, toplam sistem bazında, en alt seviyelere çekilmiştir. Seidel diyagramındaki son sütun (SUM) sistemdeki tüm yüzeylerden kaynaklı toplam optik hataları göstermektedir. Son sütuna bakıldığında optik kusurlar yok denecek kadar azdır. Seidel diyagramında kırmızı renk küresel hatayı, yeşil komayı, mor astigmatizmi, turkuaz alan eğriliğini, sarı biçim bozulmasını, haki ve su yeşili ise renk hatalarını belirtmektedir. Analiz sonuçlarında ikinci çıktı olan Nokta diyagramı (Şekil 4.9) incelendiğinde sistemin odak performansı hakkında yorum yapılabilir. Denklem 4.2 ile hesaplanan Airy disk yarı çapı ile nokta diyagramı analizinde verilen “Airy Radius” değeri birbiriyle uyum sağlamaktadır. Bu sebeple kullanılan dedektörün tasarıma uygun olduğu çıkarımı yapılır. Nokta diyagramında ışınların dalga boyuna göre odaklandığı yerler görülmektedir. Airy Disk bu sistem için kusursuz odak çemberini ifade eder. Genel olarak bakıldığında nokta diyagramında da başarı sağlandığı gözükmektedir. En geniş görüş alanı değeri olan $3,9^\circ$ de en fazla odak sapması gözlenmektedir. Ancak diğer görüş alanlarında odakların başarımları oldukça iyidir. Odak bozuklukları kaçınılmazdır ancak bunu en az seviyede tutmak oldukça önemlidir. Son olarak MTF analiz sonucuna (Şekil 4.8) göre; kırınım

eğrisine oldukça yakın MTF eğrileri görülmektedir. Görüş alanı noktalarına göre MTF eğrileri incelendiğinde, ilk 3 noktada MTF başarımı oldukça yüksektir. MTF değerinin en düşük olduğu nokta en geniş görüş alanı değeri olan $3,9^\circ$ lik alan noktası için verilen eğride gözlenmektedir. Ancak MTF analizi genel olarak değerlendirildiğinde ve kırınım eğrisi için en düşük MTF değerleri kıyaslandığında, kırınım eğrisi için en düşük değer %80 olduğu görülmektedir, tasarımın MTF eğrilerinin en düşük değeri ise %60 ile %80 arasında değişmektedir. Buradan toplam MTF başarımının oldukça iyi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

0,4-1,1 μm dalga boyu aralığında oluşturulan bu tez çalışmasında tasarımın tüm analiz çıktıları değerlendirildiğinde oldukça başarılı bir tasarım oluşturulmuştur. Belirtilen dalga boyunda kullanılan sistemlerin, kullanım alanlarına göre diğer alternatiflerine bakıldığında avantajlı yönleri vardır. Görünür dalga boyunda çalışan görüntüleme sistemleri akşam karanlığında işlevsiz hale gelirler. Aynı şekilde yakın ve kısa kızılötesi dalga boyunda çalışan görüntüleme sistemleri kullanım alanına göre görüntülenen alanda gerekli olan görüntü ayırım gücüne ulaşamayabilir. Basitçe düşünüldüğünde bu tez çalışmasında yapılan tasarım görünür bölgenin ayırım gücünü, kızılötesi bölgenin de ışığa gerek duymadan elde ettiği görüntünün avantajını kullanarak multispektral bir görüntüleme sunar. Multispektral görüntüleme sistemleri taşınabilir gözetleme sistemlerinde kullanılabileceği gibi, karanlıkta fark edilmemek için far yakmadan ilerlemek isteyen araçlara rehberlik yapması amacıyla da kullanılabilir. Genel olarak karanlık ortamlarda gündüz görüntüsüne yakın bir görüntüleme sunacağı için kullanım alanları, avantajlarına göre genişletilebilir. Sonuç olarak oluşturulan bu tasarımın başarılı olduğu ve verilen örnek kullanım alanlarında rahatlıkla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

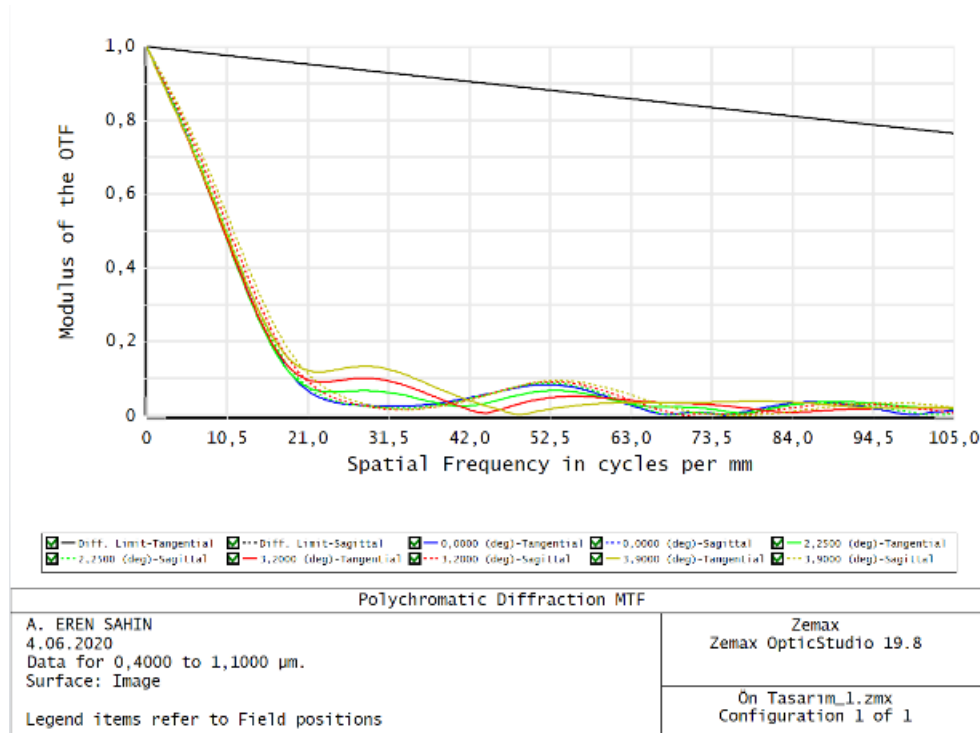
1. Gross, H. (2008). *Handbook of Optical Systems: Vol 4 Survey of Optical Instruments*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 403-404.
2. Hecht, E. (2002). *Optics Fourth Edition*. San Francisco: Pearson Education Inc., 1-586.
3. Kingslake, R. ve Johnson, R. B. (2010). *Lens Design Fundamentals Second Edition*. Washington: Co-published by SPIE, 26-440.
4. Mahajan, V. N. (2014). *Fundamentals of Geometrical Optics First Edition*. Washington: Published by SPIE, 11-12.
5. Nakajima, H. (2015). *Optical Design Using Excel: Practical Calculations for Laser Optical Systems First Edition*. Singapore: Wiley & Sons, Inc., 17-18.
6. O'Shea, D. C. (1985). *Elements of Modern Optical Design First Edition*. Singapore: Wiley & Sons, Inc., 194-195.
7. Pedrotti, F. L. ve Pedrotti, L. S. (1993). *Introduction to Optics Second Edition*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
8. Riedl, M. J. (2009). *Optical Design Applying the Fundamentals First Edition*. Washington: Published by SPIE, 147-148.
9. Sasasian, J. (2013). *Introduction to Aberrations in Optical Imaging Systems First Edition*. New York: Cambridge University, 80-81.
10. Sjaardema, T. A. Smith, J. S. ve Birch, G. C. (2015). *Sandia Report: History and Evolution of the Johnson Criteria* California: Sandia Naitonals Laboratories, 9-10.
11. Smith, W. J. (2000). *Modern Optical Engineering Third Edition*. New York: R. R. Donnelley & Sons Company.
12. Smith, W. J. (2004). *Modern Lens Design Second Edition*. New York: McGraw-Hill Education.
13. Yoder, P. J. Jr. (2008). *Mounting Optics in Optical Instruments Second Edition*. Washington: Published by SPIE.
14. İnternet: *Abbe Number*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Abbe_number, Son Erişim Tarihi: 25.05.2020.
15. İnternet: *Johnson Criteria*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%27s_criteria, Son Erişim Tarihi: 30.05.2020.
16. İnternet: *How to Specify Intermediate Field Points*. URL: <https://customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-specify-intermediate-field-points>, Son Erişim Tarihi: 01.06.2020.



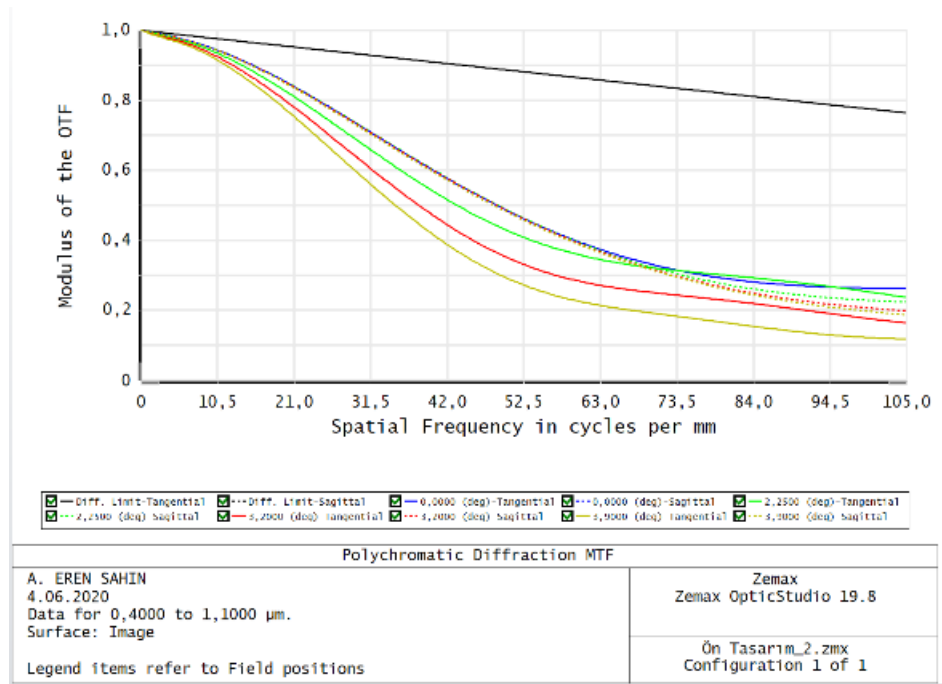


EKLER

EK-1. Tasarım Süreci MTF Analiz Çıktıları ve Sonlandırılmış Tasarım Analiz Çıktıları

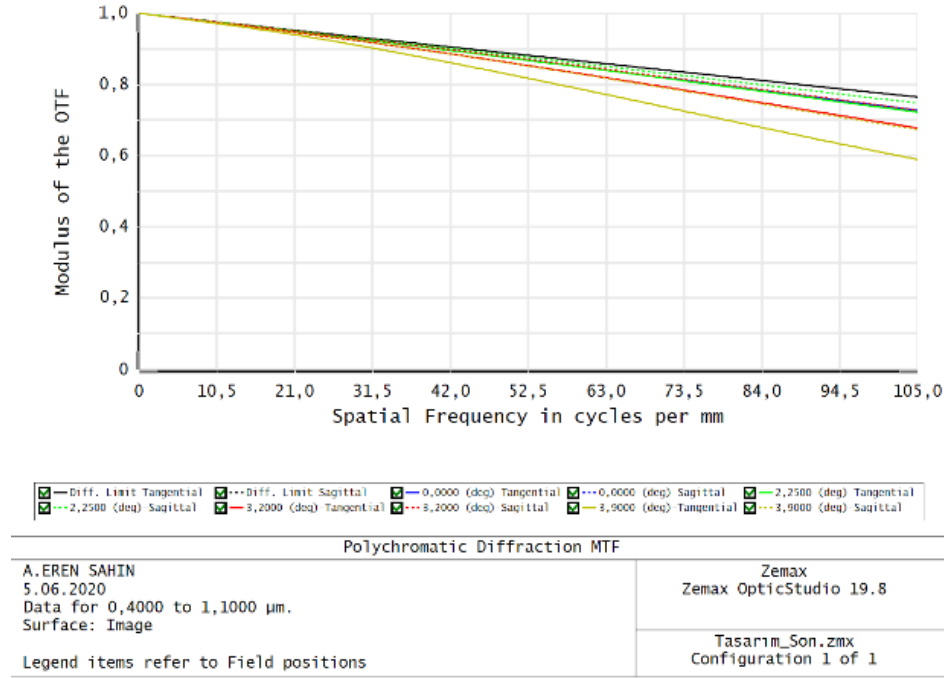


Şekil 1.1 Ön tasarım ilk aşama MTF analiz çıktısı

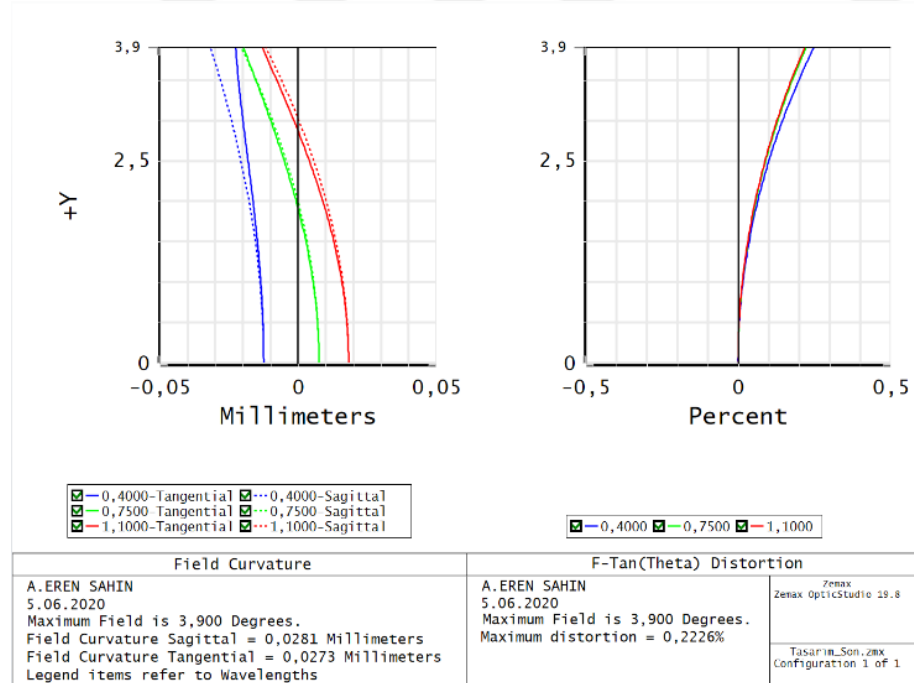


Şekil 1.2. Ön tasarım son aşama MTF analiz çıktısı

EK-1. (Devam) Tasarım Süreci MTF Analiz Çıktıları ve Sonlandırılmış Tasarım Analiz Çıktıları



Şekil 1.3. Sonlandırılmış tasarım MTF analiz çıktısı



Şekil 1.4. Sonlandırılmış tasarım alan eğriliği ve biçim bozulması grafikleri

EK-2. Tasarım İyileştirme Süreci Değer Fonksiyon Matrisi

#	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Ex	Ey	Target	Weight	Value	Contrib
1	EFFL	0	2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,75E+01	1,00E+00	5,75E+01	3,01E-11
2	MNCG	1	1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+00	1,00E+00	2,00E+00	0,00E+00
3	MXCG	1	1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+00	1,00E+00	8,00E+00	0,00E+00
4	MNCG	2	2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+00	1,00E+00	2,00E+00	0,00E+00
5	MXCG	2	2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+00	1,00E+00	6,00E+00	0,00E+00
6	MNCG	5	5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+00	1,00E+00	2,00E+00	0,00E+00
7	MXCG	5	5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+00	1,00E+00	6,00E+00	0,00E+00
8	MNCG	6	6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+00	1,00E+00	2,00E+00	0,00E+00
9	MXCG	6	6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+00	1,00E+00	6,00E+00	0,00E+00
10	MNCG	8	8	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+00	1,00E+00	2,00E+00	0,00E+00
11	MXCG	8	8	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+00	1,00E+00	6,00E+00	0,00E+00
12	MNCG	10	10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+00	1,00E+00	2,00E+00	0,00E+00
13	MXCG	10	10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	1,00E+00	4,00E+00	3,31E-07
14	MNCT	3	3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
15	MNCT	4	4	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-01	1,00E+00	5,00E-01	0,00E+00
16	MNCT	7	7	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-01	1,00E+00	5,00E-01	0,00E+00
17	MNCT	9	9	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-01	1,00E+00	5,00E-01	0,00E+00
18	MNCT	11	11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E+00	1,00E+00	5,00E+00	0,00E+00
19	MNEG	1	1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
20	MXEG	1	1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+00	1,00E+00	8,00E+00	0,00E+00
21	MNEG	2	2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
22	MXEG	2	2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+00	1,00E+00	8,00E+00	0,00E+00
23	MNEG	5	5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
24	MXEG	5	5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+00	1,00E+00	8,00E+00	0,00E+00
25	MNEG	6	6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
26	MXEG	6	6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+00	1,00E+00	8,00E+00	0,00E+00
27	MNEG	8	8	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
28	MXEG	8	8	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+00	1,00E+00	8,00E+00	0,00E+00
29	MNEG	10	10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
30	MXEG	10	10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+00	1,00E+00	8,00E+00	0,00E+00

Çizelge 2.1. Değer fonksiyon matrisi

EK-3. Sonlandırılmış Tasarım Rapor Çıktısı

System/Prescription Data

File : C:\Users\eren.sahin\Desktop\Eren\Optik_Dosyalar\Eren_Çalışma
Dosyaları\Eren_Tez_Optik_Tasarım\Tasarım_Son.zmx

Title: A.EREN SAHIN

Date : 6.06.2020

GENERAL LENS DATA:

Surfaces : 12

Stop : 4

System Aperture : Entrance Pupil Diameter = 25

Clear Semi Diameter Margin % : 10

Fast Semi-Diameters : On

Field Unpolarized : On

Convert thin film phase to ray equivalent : On

J/E Conversion Method : X Axis Reference

Glass Catalogs : SCHOTTZEMAX-20180601

Ray Aiming : Paraxial Reference, Cache On

Automatically Calculate Pupil Shifts : On

X Pupil Shift : 0

Y Pupil Shift : 0

Z Pupil Shift : -0,00508716

X Pupil Compress : 0

Y Pupil Compress : 0

Apodization : Uniform, factor = 0,00000E+00

Reference OPD : Exit Pupil

Paraxial Rays Setting : Ignore Coordinate Breaks

Method to Compute F/# : Tracing Rays

Method to Compute Huygens Integral : Auto

Print Coordinate Breaks : On

Multi-Threading : On

OPD Modulo 2 Pi : Off

Temperature (C) : 2,00000E+01

Pressure (ATM) : 1,00000E+00

Adjust Index Data To Environment : Off

Effective Focal Length : 57,5 (in air at system temperature and pressure)

Effective Focal Length : 57,5 (in image space)

Back Focal Length : 11,90125

Total Track : 71,87092

Image Space F/# : 2,3

Paraxial Working F/# : 2,3

Working F/# : 2,329645

Image Space NA : 0,2124296

Object Space NA : 1,25e-09

Stop Radius : 11,73228

Paraxial Image Height : 3,919957

Paraxial Magnification : 0

Entrance Pupil Diameter : 25

Entrance Pupil Position : 9,122975

EK-3. (Devam) Sonlandırılmış Tasarım Rapor Çıktısı

Exit Pupil Diameter : 14,76359
Exit Pupil Position : -33,94855
Field Type : Angle in degrees
Maximum Radial Field : 3,9
Primary Wavelength [μm] : 0,75
Angular Magnification : 1,693355
Lens Units : Millimeters

Source Units : Watts
Analysis Units : Watts/cm²
Afocal Mode Units : milliradians
MTF Units : cycles/millimeter
Include Calculated Data in Session File : On
Include Calculated Data in Session File : On

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad : ŞAHİN, Aytaç Eren
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03.03.1990, Amasya
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (530) 695 16 90
 e-mail : a.eren.sahin.9@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birim	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü	2020
Lisans	Ankara Üniversitesi / Fizik Mühendisliği	2015
Lise	Manavgat Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Transvaro A.Ş.	Optik Tasarım Mühendisi
2015-2019	Digitest Savunma ve Havacılık	Optik Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

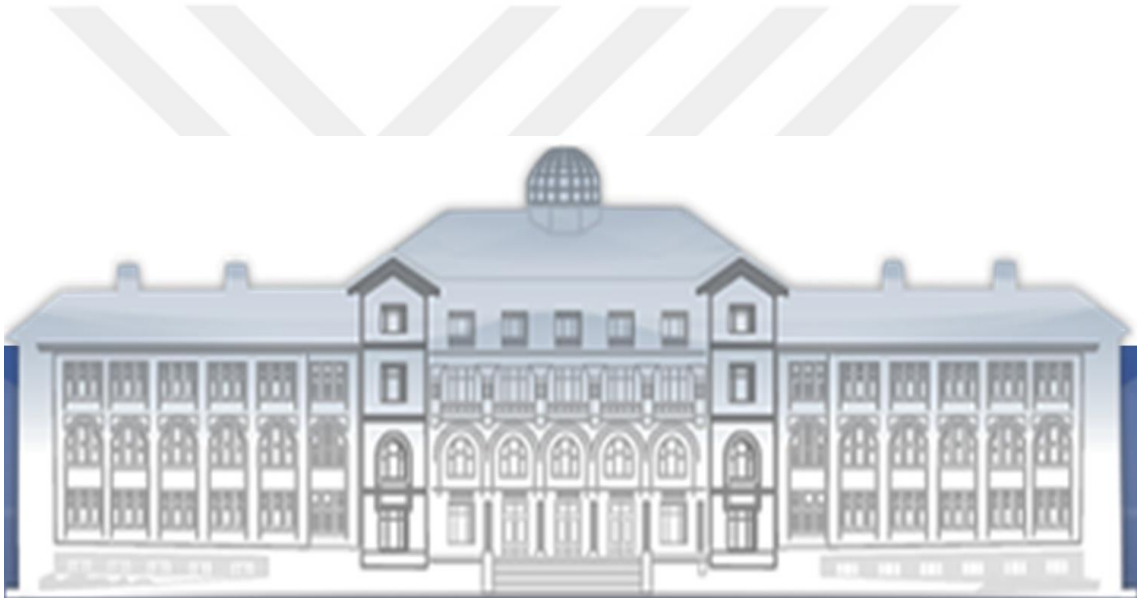
İngilizce

Yayımlar

Şahin, A. E. And Uğur, G. (2019, 13-14 November). *Optical Design of the Lens Group for Infrared Applications*, WITAM2019, Algeria

Hobiler

Futbol, Voleybol, Basketbol, SnowBoard, Su Kayağı, Gitar, Seyahat



GAZİ GELECEKTİR..