

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK İRTİFA PLATFORMLARI İÇİN KIZILÖTESİ
GÖRÜNTÜLEYİCİ OPTİK TASARIMI**

ELİF KARA

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK İRTİFA PLATFORMLARI İÇİN KIZILÖTESİ
GÖRÜNTÜLEYİCİ OPTİK TASARIMI

ELİF KARA

Doç. Dr. Ersin KAYAHAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Özcan GÜNDOĞDU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet Yavuz ORAL
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.06.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez sürecinde tüm bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak yol gösteren, bunu yaparken de kendi yolumu bulmama fırsat veren, birlikte çalışmaktan gurur duyduğum hocam Doç. Dr. Ersin KAYAHAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Zemax Programı ve optik tasarım ile ilgili bilgi birikimlerini paylaşarak tezimin oluşmasında etkili olan saygıdeğer hocalarım Namık AÇAN ve Yrd. Doç. Dr. Erhan AKMAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Bana olan güvenini hiç yitirmeyerek yaşamın her alanında güçlüklerle göğüs germemi olanaklı kılan, aldığım kararlarda beni büyük özveriyle destekleyen, her zaman olumlu ve yapıcı olan annem Seyhan KADIOĞLU' na, babama, çalışkanlığı ve dostluğu ile beni besleyen kardeşim Ayşegül KARA' ya teşekkürlerimi sunarım.

Haziran - 2017

Elif KARA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. TEMEL KAVRAMLAR.....	3
1.1. Elektromanyetik Spektrum	3
1.1.1. Kızılötesi bölge	4
1.2. Atmosferin Optik Özellikleri	5
1.2.1. Albedo	7
1.3. Yüksek İrtifa Platformları	8
1.3.1. Havadan daha ağır (Heavier than air, HTA) platformlar	9
1.3.2. Havadan daha hafif (Lighter than air, LTA) platformlar	10
1.4. Optik Kusurlar.....	12
1.4.1. Küresel kusur (Spherical aberration).....	12
1.4.2. Koma (Coma).....	14
1.4.3. Astigmatizm (Astigmatism)	15
1.4.4. Alan eğriliği (Field curvature).....	16
1.4.5. Biçim bozulması (Distortion).....	16
1.5. Teleskop Türleri	18
1.5.1. Mercekli teleskoplar	18
1.5.2. Aynalı teleskoplar.....	19
1.5.3. Katadioptrik teleskoplar	21
1.6. Atermalizasyon	23
1.7. Optik Bileşenler	25
1.7.1. Aynalar	25
1.7.2. Mercekler.....	25
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	27
2.1. Detektör Seçimi	27
2.2. Kızılaltı Optik Malzemeler	28
2.3. Tasarım Hesaplamaları	31
2.3.1. Optik açıklık (Clear aperture)	31
2.3.2. Alan engeli (Field stop).....	31
2.3.3. Etkin odak uzaklığı (Efective focal length)	31
2.3.4. F sayısı (F number)	31
2.3.5. Albedo (Yansıtabilirlik)	32
2.3.6. Görüş alanı (Field of view)	32
2.4. Optik Sistemin Tasarlanması.....	36
3. OPTİK BAŞARIM VE ANALİZLER.....	43
3.1. Nokta Diyagramı Analizleri (Spot Diagram).....	43

3.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF).....	46
3.3. Biçim Bozulması	49
3.4. Geometrik Görüntü Analizi (Geometric Image Analysis)	49
3.5. Kapalı Enerji Analizi (Encircled Energy)	50
3.6. Seidel Katsayıları (Seidel Coefficient).....	52
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	55
EKLER.....	61
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	66
ÖZGEÇMİŞ	67



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Elektromanyetik spektrum	4
Şekil 1.2.	Elektromanyetik ışınımın atmosferden geçişi.....	6
Şekil 1.3.	Atmosfer yüksekliklerine göre rüzgar hızları	8
Şekil 1.4.	Yükseklığe bağlı olarak sıcaklık değişimi	9
Şekil 1.5.	HAPs sistemleri	11
Şekil 1.6.	Küresel kusur	13
Şekil 1.7.	Koma.....	14
Şekil 1.8.	Astigmatizm.....	15
Şekil 1.9.	Alan eğriliği	16
Şekil 1.10.	Biçim bozukluğu (pincushion distortion)	17
Şekil 1.11.	Biçim bozukluğu (barrel distortion).....	17
Şekil 1.12.	Hizalama Hataları	17
Şekil 1.13.	Merceklerden oluşan teleskop örnekleri	18
Şekil 1.14.	Nevtonian teleskop.....	19
Şekil 1.15.	Cassegrain teleskop.....	20
Şekil 1.16.	Gregorian teleskop	21
Şekil 1.17.	Schmidt-Cassegrain teleskop	22
Şekil 1.18.	Maksutov-Cassegrain teleskop	22
Şekil 1.19.	Küresel kırılma yüzeyinde tanımlanan parametreler	26
Şekil 2.1.	Optik malzemeler ve dalgaboyları	29
Şekil 2.2.	Açıklık, alan engeli ve odak noktası	32
Şekil 2.3.	Optik sistemin bileşenleri	33
Şekil 2.4.	Görüş alanı (Field of view, FOV) hesaplaması	34
Şekil 2.5.	Zemax başlangıç ekranı	37
Şekil 2.6.	Genel sistem bilgisi iletişim kutusu	38
Şekil 2.7.	Dalgaboyu bilgisi iletişim kutusu	38
Şekil 2.8.	Multi configuration editör.....	40
Şekil 2.9.	Auto thermal Setup	40
Şekil 2.10.	Multi configuration editör.....	41
Şekil 2.11.	Görüntüleyici tasarımının iki boyutlu gösterimi.....	41
Şekil 2.12.	Görüntüleyici tasarımının üç boyutlu gösterimi	42
Şekil 3.1.	-50 °C'lik sıcaklıktaki nokta diyagramı	44
Şekil 3.2.	0 °C' lik sıcaklıktaki nokta diyagramı	44
Şekil 3.3.	+30 °C' lik sıcaklıktaki nokta diyagramı	45
Şekil 3.4.	-50 °C' lik sıcaklık için odak boyunca nokta diyagramı	46
Şekil 3.5.	-50 °C' lik sıcaklıktaki MTF grafiği	47
Şekil 3.6.	0 °C' lik sıcaklıktaki MTF grafiği.....	47
Şekil 3.7.	+30 °C' lik sıcaklıktaki MTF grafiği	48
Şekil 3.8.	-55 °C' lik sıcaklıktaki biçim bozulması.....	49
Şekil 3.9.	-55 °C' lik sıcaklıktaki geometrik görüntü analizi	50
Şekil 3.10.	-50 °C' lik sıcaklıktaki kapalı enerji grafiği.....	50
Şekil 3.11.	+30 °C' lik sıcaklıktaki kapalı enerji grafiği.....	51
Şekil 3.12.	0 °C' lik sıcaklıktaki kapalı enerji grafiği	52

Şekil 3.13. Seidel katsayıları (Seidel coefficient) 5



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Kıızılötesi bandın alt bölümleri	5
Tablo 1.2. Bazı yüzeylerin albedo değerleri	7
Tablo 1.3. Orta kıızılötesi bölge için akromatik kombinasyonlar.....	25
Tablo 2.1. Kıızılötesi bölgede kullanılan bazı dedektör malzemeleri.....	28
Tablo 2.2. Orta kıızılötesi bandında geçirgen optik malzemeler ve özellikleri	29
Tablo 2.3. Ayna malzemeleri	30
Tablo 2.4. Tasarım parametreleri	34
Tablo 2.5. Sistem hesaplamaları	36
Tablo 2.6. Görüntüleyici tasarımının mercek girdileri.....	39
Tablo 2.7. Görüntüleyici tasarımının ayna girdileri.....	39
Tablo 3.1. Geometrik ve kırınım görüntü analiz ifadelerinin karşılaştırılması.....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	: Işığın boşluktaki hızı (m/s)
C1	: Birincil aynanın eğrilik yarıçapı
C2	: İkincil aynanın eğrilik yarıçapı
D	: Optik sistemin giriş açıklığı
E	: Enerji
f	: Odak uzunluğu
F#	: F numarası
Hz	: Hertz (s^{-1})
K	: Kelvin
km	: Kilometre
m	: Büyütme (magnification)
n	: Kırılma indisi
nm	: Nanometre
w	: Bir pikselin boyutu
λ	: Dalga boyu (m)
μm	: Mikrometre
ν	: Frekans

Kısaltmalar

EFL	: Effective Focal Length (Etkili Odak Uzaklığı)
FOV	: Field Of View (Detektörün Görüş Açısı)
HAPs	: High Altitude Platforms (Yüksek İrtifa Platformları)
HTA	: Heavier Than Air (Havadan Daha Ağır)
IFOV	: Instantaneous Field of View (Bir Pikselin Görüş Açısı)
IR	: Infrared (Kızılötesi)
LTA	: Lighter Than Air (Havadan Daha Hafif)
LWIR	: Long Wave Infrared Region (Uzun Dalga Boyu Kızılötesi)
MTF	: Modülasyon Transfer Fonksiyonu
MWIR	: Mid-Wave Infrared Region (Orta Dalga Boyu Kızılötesi)
NIR	: Near Infrared Region (Yakın Dalga Boyu Kızılötesi)
SWIR	: Short Wave Infrared Region (Kısa Dalga Boyu Kızılötesi)

YÜKSEK İRTİFA PLATFORMLARI İÇİN KIZILÖTESİ GÖRÜNTÜLEYİCİ OPTİK TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, yüksek (17-22 km) irtifada konumlanan, havadan hafif (zeplin, balon vb.) ve/veya havadan ağır (insansız hava araçları, vb.) platformlar üzerinde çalışabilen bir kızılötesi görüntüleyicinin optik tasarımını yapmaktır. Optik tasarımdan önce, kavramsal temeller hakkında bilgi verilmiş ve optik sistemi sınırlayacak kızılötesi kaynak, atmosferik geçirgenlik, dedektör ve kızılötesi bölgede kullanılacak optik malzemeler ve yüksek irtifa çalışma ortamının getirdiği gereksinimler incelenmiştir. ZEMAX optik tasarım programı kullanılarak Cassegrain türü optiksel bir kamera tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın optik analizlerle performansı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: HAPs, Kızılötesi, Optik Tasarım.

OPTICAL DESIGN OF A THERMAL INFRARED IMAGER FOR A HIGH ALTITUDE PLATFORMS

ABSTRACT

The aim of this study is to create an optical design of a thermal imager working on the platforms which are lighter (zeppelin, balloon, etc.) or heavier (unmanned aerial vehicles, etc) than air in the high altitude. People are informed about conceptional principles and infrared sources, atmospheric transmissivity, detector which will limit the optical system and optical materials which can be used in the infrared region are analyzed before this optical design. The design of optical camera which is a kind of Cassegrain is performed by being used Zemax optical design software. The optical performance analysis of the design is also discussed.

Keywords: HAPs, Infrared Imaging, Optical Design

GİRİŞ

Elektromanyetik tayfin kızılötesi bölgesi $0,70 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$ arasındadır. Kızılötesi kameralar uzak bir nesnenin yaydığı kızılötesi ışınmayı tespit ederek, uzaktan algılamayı sağlar. Atmosferik şartlar gibi teknik nedenler dikkate alınarak, gerekli optik elemanlar ve algılayıcıların kullanılması ile sıcak cisimlerden gelen bu ışınımın görüntülenmesi gece görüşü, çevresel izleme, biyomedikal teşhis gibi çeşitli askeri ve sivil uygulamalarda kullanılan kilit bir teknolojidir.

Uzaktan algılama, yeryüzünü, fiziksel bağlantı kurmadan uydular ve diğer platformlardaki algılayıcılar ile inceleme tekniğidir. Uzaktan algılama için insansız hava araçları gibi yüksek irtifa platformları (HAPs) bir platform olarak, coğrafi haritalama, orman yangınları, doğal afetlerin gözlenmesi gibi amaçlarda kullanılabilir. Son dönemlerde uydulara göre olan avantajlarından dolayı tercih edilir hale gelmektedirler.

Tezin ilk bölümünde kuramsal temeller olan elektromanyetik spektrum, atmosferin optik özellikleri ve taşıyıcı sistem olarak kullanılacak yüksek irtifa platformları hakkında bilgi verildi. Optik kusurların görüntüye olan etkisi anlatıldı. Atermalizasyon ve teleskop türleri özetlendi.

İkinci bölüm, optik sisteminin tasarımı üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu tez kapsamında ele alınan görüntüleyici tasarımının temel sistem parametreleri anlatıldı. Dedektör seçimi ve kızılötesi bölgede çalışan çeşitli optik malzemeler hakkında literatür bilgisi verildi. Gerekli hesaplamalara yer verildikten sonra optik sistem tasarımı Zemax yazılımı kullanılarak yapıldı.

Üçüncü bölümde ise optik tasarım başarımları ve analizler üzerinden değerlendirilmesine yer verilmiştir, elde edilen sonuçların analizi üzerine odaklanılmıştır. Yapılan optik sistemin değerlendirilmesi, nokta diyagramı analizi, kapalı enerji grafiği, geometrik görüntü analizi, biçim bozulması grafikleri kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı 20 km yükseklikte konumlanmış sistemlerde çalışacak ve 3-5 μm orta kızılaltı bandında gözlem yapacak kızılötesi görüntüleyicinin optik sistemini tasarlamaktır. Hedef İzmit körfezi gibi gemi trafiğinin yoğun olduğu bir alan seçildiği için çalışılacak dalga boyu aralığı orta kızılaltı bölge seçilmiştir. Tasarım -50 °C ile +30 °C derece sıcaklıkları arasında odaktan çıkmayacak, şekilde yapılacaktır.



1. TEMEL KAVRAMLAR

1.1. Elektromanyetik Spektrum

Mutlak sıfırdan ($-273\text{ }^{\circ}\text{C} = 0\text{ }^{\circ}\text{K}$) daha yüksek sıcaklıktaki cisim elektromanyetik ışıma yapar. Tüm elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızı (c , m/s) ile yayıldıkları için frekans (f , Hz) ve dalga boyu (λ , m) arasındaki bağıntı,

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.1)$$

Şeklinde dir. Enerji (E), dalga boyu ve frekans arasındaki bağıntı ise,

$$E(f) = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.2)$$

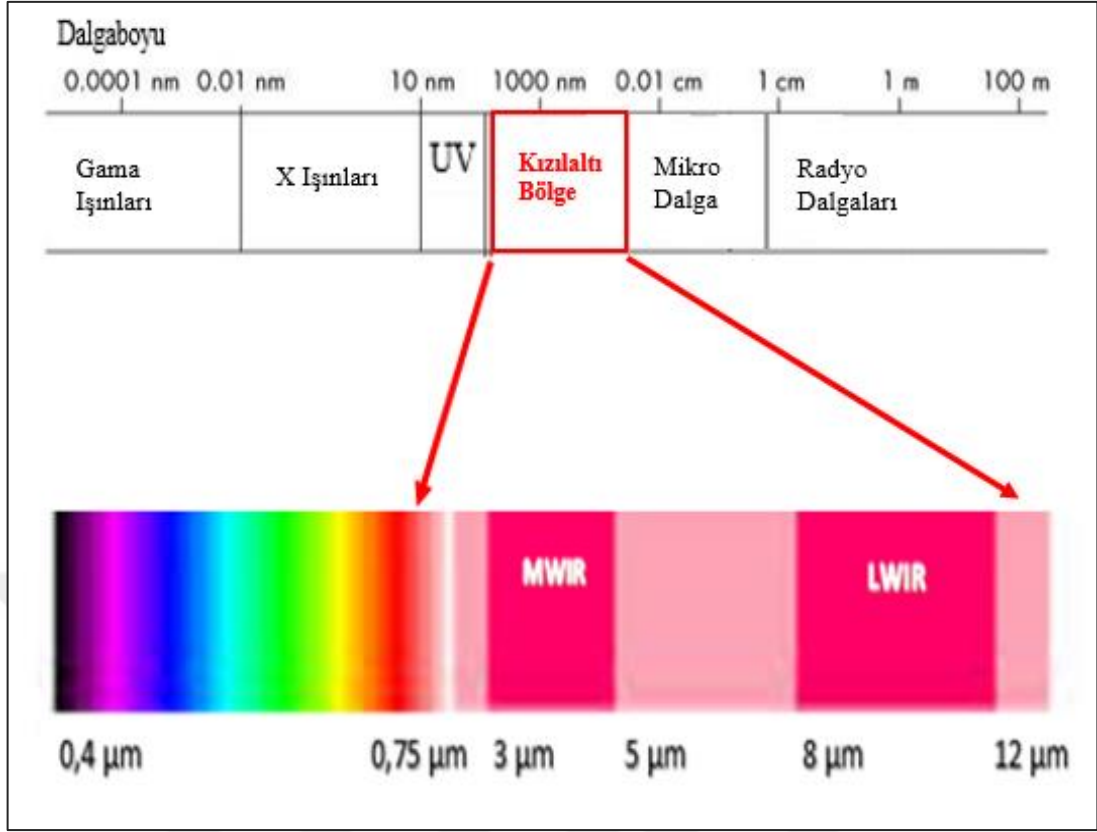
İle ifade edilir. Denklem (1.2)'de ve Denklem (1.1)'de görüldüğü gibi $E(f)$ foton enerjisi (Joule), h Planck sabiti, $6,626 \cdot 10^{-34}$ (Joule. s) ve ν (Hz) ışığın frekansı olmak üzere foton enerjisi frekansla doğru orantılı ve dalga boyu ile ters orantılıdır [1].

Max Planck radyasyonu dalga boyu ve kelvin cinsinden sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ifade etmiştir. Kara cisim ideal kavramı ve onun yaydığı radyasyonun şiddetinin spektral dağılımı Planck yasasına tabidir,

$$I(\lambda, T) = \left(\frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \right) \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} - 1} \quad (1.3)$$

Denklem (1.3)'te k Boltzmann sabitini ve T kelvin cinsinden sıcaklığı temsil eder [1].

Elektromanyetik spektrum, bütün elektromanyetik dalgaların sahip oldukları dalga boyu ve bu dalga boyuna karşılık gelen enerjiye göre dağılımından oluşmaktadır. Şekil 1.1' de elektromanyetik spektrum ve kızılötesi bölgenin detaylı gösterimi verilmiştir. Elektromanyetik dalgalar, sağdan sola frekansı artacak şekilde; radyo dalgaları,



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum [2]

1.1.1. Kızılötesi bölge

19. yüzyılda Alman gökbilimci William Herschel, prizma içinden güneş ışığını geçirerek, kırmızı ışığın ilerisine, bir termometreyi hareket ettirdiği zaman, sıcaklığın arttığını keşfetmiştir. Karanlık sıcaklık (dark heat) olarak bahsettiği bu alan, kızılötesi olarak bilinen elektromanyetik spektrumun bir bölgesidir. Latince ön ek olarak kullanılan “infra” kelimesi ötesinde veya altında anlamındadır. Kızılötesi görünür bölgedeki kırmızı rengin enerji olarak altındaki bölgeyi temsil eder [3].

Temel kaynağı ısı olan kızılötesi bölge, elektromanyetik spektrumun, görünür bölgeden mikrodalgalara kadar olan $0,70 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$ arasındaki bölgeyi ifade etmektedir. Bu bölge insan gözü tarafından algılanamaz [3]. Kızılötesi görüntüleme yapabilmek için atmosferin geçirgen olduğu bir dalga boyu aralığında algılama yapmak gerekmektedir [4]. Atmosfer geçirgenliğindeki kayıplar, dedektörlerin genellikle belirli bir bant genişliğinde çalışması gibi teknik nedenlerden dolayı kızılötesi bölge yakın, kısa, orta, uzun ve uç kızılötesi bant olmak üzere beş alt bölgeye bölünmüştür. Tablo 1.1’ de gösterilmiştir.

Literatürde kızılötesi bantların sınırları keskin değildir. Bu alt bantlar kullanılırken hedefin özelliğine göre seçim yapılır, her birinin bir diğerine göre avantajı veya dezavantajı vardır.

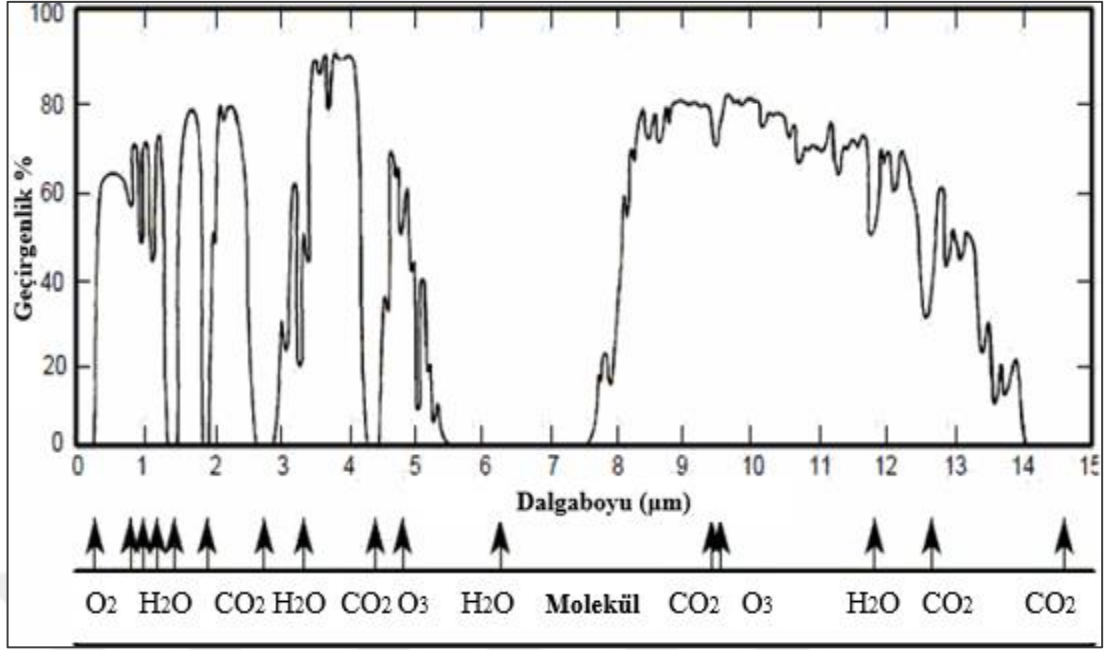
Tablo 1.1. Kızılötesi bandın alt bölümleri [5]

Yakın Kızılötesi	NIR	0,75–1,4 μm
Kısa Dalga boyu Kızılötesi	SWIR	1,4–3 μm
Orta Dalga boyu Kızılötesi	MWIR	3–8 μm
Uzun Dalga boyu Kızılötesi	LWIR	8–15 μm
Uç Kızılötesi	FIR	15–1000 μm

1.2. Atmosferin Optik Özellikleri

Atmosferin geçirgenliği kızılötesi görüntüleme sistemi tasarımı yapılırken sistemin performansını etkileyen faktörlerden biridir. Bir nesneden yayılan optik ışınım, alıcıya gelmeden önce atmosferden geçer. Kızılötesi görüntüleyiciler nesnelere yayılan kızılötesi ışınımı atmosferin geçirgen olduğu dalga boyu aralıklarında dedekte ederek görünür hale gelmelerini sağlar. Uzaktan algılama sistemlerinin gelişmesi ile atmosferin optik ışınımına etkisi, görüntüleme sistemlerinde önemli hale gelmiştir bu yüzden kızılötesi ışınımın soğurumu ve atmosferden geçiş bilgileri çok önemlidir. Tasarlanmak istenilen sistem için atmosfere giren ışınların ne kadarının alıcıya ulaştığının bilinmesi gerekmektedir [4].

Elektromanyetik ışınım atmosferden geçerken gaz moleküllerinin kimyasal yapıları nedeniyle emilim, saçılma, yayılım gibi ışınım şiddetini azaltan ve yönünü değiştiren olayların etkisinde kalır. Kızılötesi soğurma atmosferdeki Su (H_2O), karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazotmonoksit (N_2O) ve ozon (O_3) gibi soğurucu gazların dönme ve titreşim hareketlerinden kaynaklanmaktadır. İçlerinde kızılötesi ışınımı en soğurucu olan gazlar su (H_2O) ve karbondioksit (CO_2)' dir. Oksijen (O_2), azot (N_2), klor (Cl_2) gibi moleküller kızılötesi ışınımını absorblayamazlar [6].



Şekil 1.2. Elektromanyetik ışınımın atmosferden geçişi [7]

Şekil 1.2' de kızılötesi ışınımın atmosferdeki geçiş spektrumu ve algılamayı etkileyen moleküller verilmektedir. Dikkat edilirse spektrumun 4,2 µm dalga boylu bölgesinde atmosferik geçirgenlik en azdır ve bunun sebebi CO₂ soğurmasıdır. Ayrıca, verilen moleküllerin soğurma etkilerine ek olarak geçirgenlik yükseklik, bağıl nem oranı, iklim gibi atmosferik koşulların da bir fonksiyonudur [6].

Yüksek orandaki geçiş bölgeleri atmosferik pencere olarak adlandırılır. Dedektörlerin performansı gibi sınırlayıcı faktörlerin etkisinden dolayı, termal görüntüleme sistemlerinin genellikle iki temel dalga boylu bandından birinde çalıştığı düşünülmektedir. Bunlardan ilki MWIR (3-5 µm) ve ikincisi LWIR (8-14 µm) aralıklarıdır.

MWIR ve LWIR bölgelerinde çalışan sistemler cisimlerden yayılan ışığın algılanması ile çalışır [6, 8]. Ortam sıcaklığındaki bir yüzeyden yayılan ışınım 8-14 µm' lik bantta 3-5 µm' lik banttan daha fazladır. Fakat ışınım akısının küçük bir değişimi 3-5 µm bandında daha fazladır.

Temel kontrast, cisim sıcaklığındaki 1 °K değişiminde akıdaki değişimin ölçüsüdür. Yüzey sıcaklığındaki değişim kontrastın yüksek olduğu bölgede daha iyi gözlenir. Kontrast, çözünürlükten daha önemli ise 3-5 µm' lik bant sıcak nesnelere için daha uygun olabilir [8].

Güneş ışınlarının önemli miktarı, 3-5 µm kısa dalga boyu bandında düşer. Atmosferin soğurma özellikleri, uzun mesafelerde görüntüleme uygulamaları için çok önemli bir faktördür.

Kızılaltı görüntülemeyi iklim koşulları etkiler. Bazen 3-5 µm bandı, bazen 8-14 µm bandı daha uygun olur. Deniz uygulamalarında nem miktarı daha fazla olduğu için MWIR bandı daha uygun iken az nemli, soğuk ortamlarda LWIR bandı daha uygundur. Askeri uygulamalarda daha çok kullanılır. 5 km' yi aşan uzaklıklarda 3-5 µm' lik bant, 8-14 µm' lik sistemden daha iyi performans gösterebilir [6-11].

1.2.1. Albedo

Yansıtılabilirlik ya da Albedo (Latince albus = beyaz), yüzeylerin yansıtma gücü veya bir yüzeyin üzerine düşen elektromanyetik enerjiyi yansıtma kapasitesidir. Genel olarak güneş ışığını yansıtma kapasitesi için kullanılır. Albedo, cismin yüzey dokusuna, rengine ve alanına bağlı olarak değişir. Tablo 1.2 bazı yüzeylerin albedo değerlerini göstermektedir.

Elektromanyetik tayfın tümünde veya belirli bir bölümünde hesaplanabilir. Bir cisim gelen ışınımın büyük bir kısmını yansıtıyorsa, yüksek albedo değerine sahip olacak ve açık renk tonunda gözükülecektir. Albedo değeri, matematiksel olarak aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir [12],

$$\text{Albedo} = \frac{\text{Cisimden yansıyan ışınım}}{\text{Cisme gelen toplam ışınım}} \cdot 100 \quad (1.4)$$

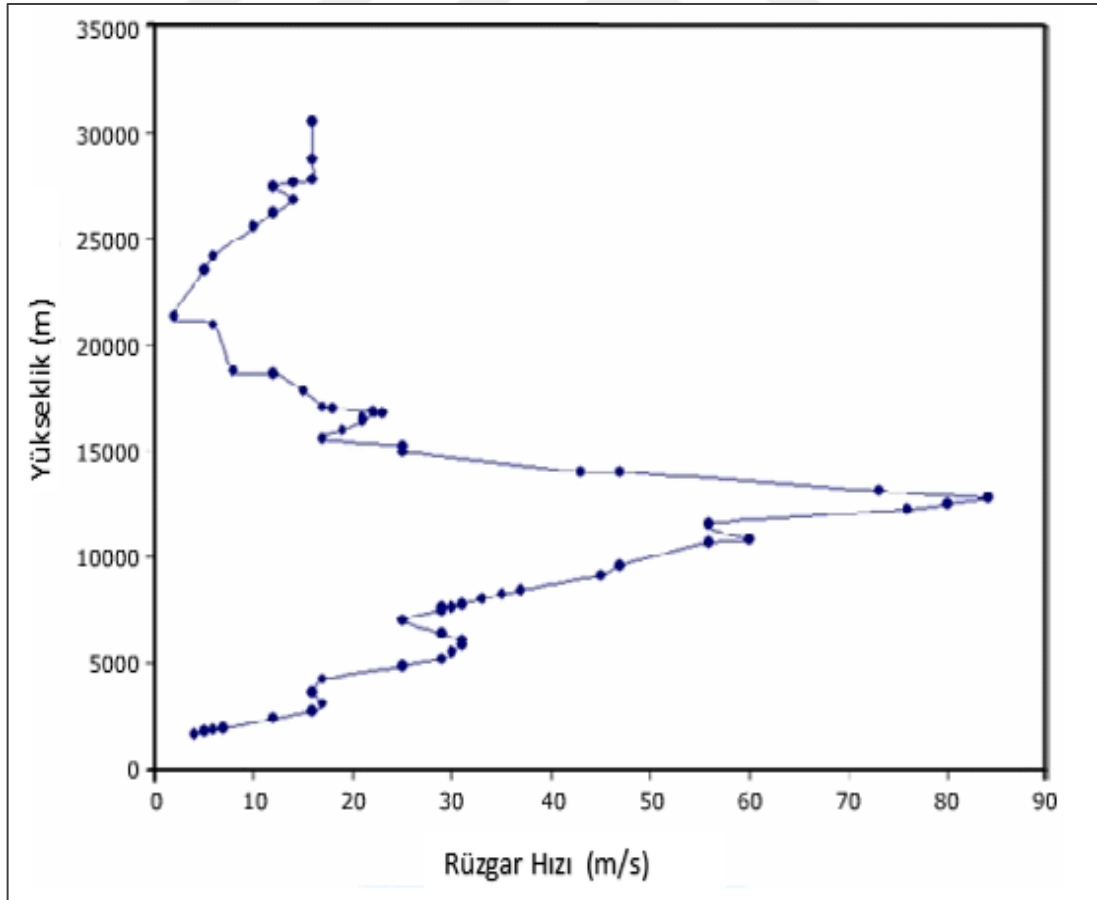
Tablo 1.2. Bazı yüzeylerin albedo değerleri [11]

Çimen	0,18-0,25
Orman	0,05-0,20
Tarla	0,10-0,25
Beton	0,55
Deniz suyu	0,05-0,22
Bulut	0,60-0,90

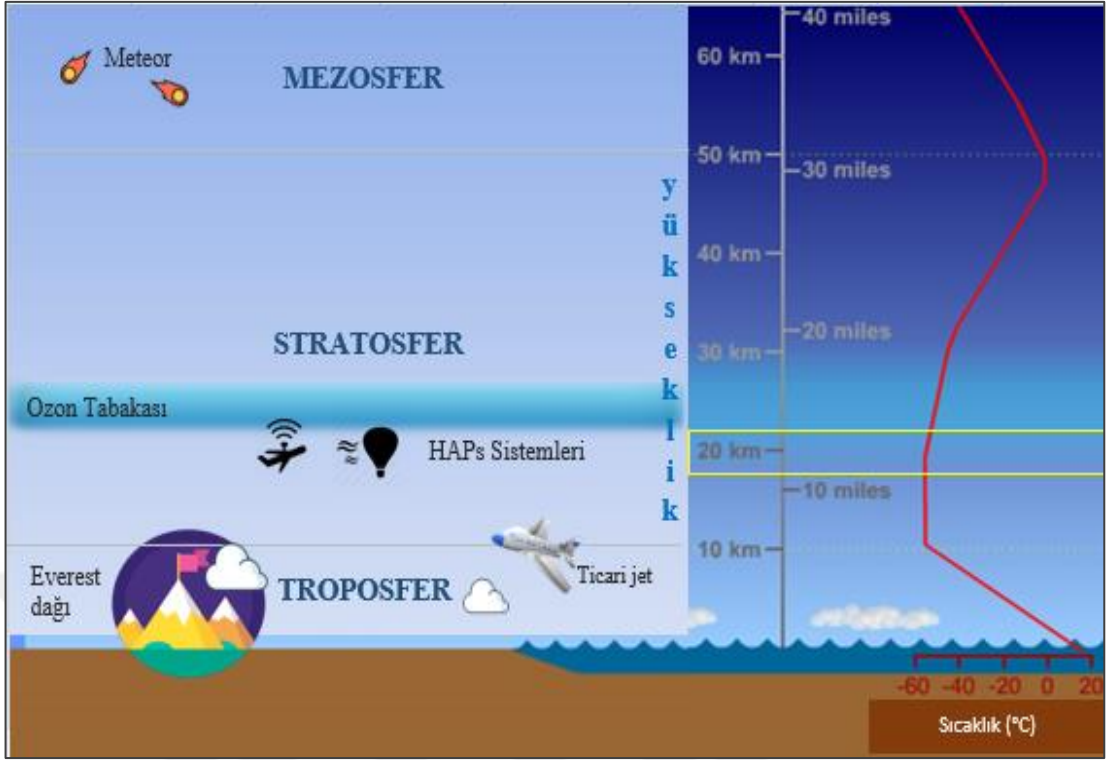
1.3. Yüksek İrtifa Platformları

Yüksek irtifa platformları (HAPs) olarak adlandırılan yarı sabit hava platformları genellikle stratosferde 17-22 km yüksekliklerde çalışan insanlı ya da insansız uçaklar ve insansız, havadan daha hafif helyum dolu hava balonlarıdır [13, 14].

HAPs sistemlerinin faaliyet gösterdiği yükseklik aralığı atmosferin stratosfer katmanındadır. Bölgenin sıcaklığı $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ derece arasında değişir, sıcaklık değişimi olmayan yer 11–25 km arasındır. Bu düşük sıcaklıklar su buharının tutunmasına engel olur. Su buharı çok az olduğundan, türbülans çok azdır. Düşük türbülans seviyeleri ve hafif rüzgârlar yüksek irtifa platformlarının konumlandırılabilmesi için en önemli etkidir, sistemlerinin konumlarını koruması için daha az güç gerekir, ek güç gereksinimi olmaksızın rüzgâra zıt yönde uçabilirler. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4 sırasıyla stratosferdeki rüzgâr hızını ve yüksekliğe bağlı sıcaklık değişimini göstermektedir [15-18].



Şekil 1.3. Atmosfer yüksekliklerine göre rüzgâr hızları [19]



Şekil 1.4. Yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık değişimi [20]

HAPs sistemlerinin havadan daha ağır (Heavier Than Air, HTA) platformlar ve havadan daha hafif (Lighter Than Air, LTA) platformlar olmak üzere iki ana sınıfı vardır [20, 21].

1.3.1. Havadan daha ağır (Heavier than air, HTA) platformlar

İnsanlı hava araçları (Manned HTA Platforms), yüksek irtifalarda uçabilecek şekilde tasarlanmış uçaklardır. Ortalama uçuş süresi yakıt kısıtlamaları ve insan faktörlerinden dolayı yaklaşık birkaç saattir. Doğal afet ve hava durumu izleme hizmetleri gibi bazı sivil hizmetlerde kullanılmaktadır [13].

İnsansız hava araçları (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs), yüksek irtifa ve uzun süre havada kalan (High Altitude Long Endurance, HALE) olarak da bilinir [22]. Bu araç kategorisi için uçuş süresi günlerden bir aya kadar değişir [22]. Bu tür uçaklar hava gemilerine göre daha hızlı uçuş ve daha fazla manevra kabiliyetine sahiptir. Aynı zamanda daha küçük boyuttadır ve işletimsel lojistiği hava ulaşımına/taşımacılığına kıyasla çok daha basittir. Bu tür uçaklar gözetim uygulamaları ve afet yardımı iletişimi için faydalı olabilir [23].

1.3.2. Havadan daha hafif (Lighter than air, LTA) platformlar

İnsansız Hava Gemilerinin (Unmanned Airships), uzun süre çalışabilmeleri en önemli avantajlarından biridir ve atmosferde herhangi bir kirlilik oluşturmazlar. Kendi gücünü ve az miktarda gaz kaybını muhafaza ederek, 5 yıl süreyle ve göreceli olarak hareketsiz kalabilirler [22]. Bu özellikler, bu tür HAPs' ları, uydu sistemlerine göre daha uygun bir teknoloji olarak nitelendirmektedir [23]. Ayrıca balonlar da LTA grubundandır ancak maksimum iş yüksekliği sadece 5 km'ye ulaştığı için, bilimsel araştırmalar ve ölçümler için kullanılabilirler [13].

Uzaktan algılama, kameralarla donatılmış uçaklar, insansız hava araçları ve uydularla sağlanmaktadır. İnsansız hava araçları gibi HAPs sistemleri, uydular ve uçaklar arasındaki boşluğu ekonomik, kalıcı ve uydu benzeri hizmetler sunarak doldurur. 9-12 km yüksekliklerinde yer alan normal ticari hava yolu trafiğinden daha yüksekte konumlandıkları için herhangi bir tehlike oluşturmaz [15, 20, 21-25]. Atmosfer dışına çıkmadıkları için uydular için kabul edilen uzay kalite şartlarına uyma zorunlulukları yoktur sadece havacılıkla ilgili düzenlemelere uymak zorundadırlar [15, 22].







HAP' ların uygulamaları, son birkaç yıldır uluslararası düzeyde önemli ilgi ve etkinlik konusu olmuştur. Ana HAP uygulamaları sivil ve askeri alanda, telekomünikasyon ve uzaktan algılama konularıdır [14]. HAP' ler, uzaktan algılama için bir platform olarak kullanılabilir. Bir alan üzerinde uzun süreler boyunca sürekli olarak kalma yeteneğine sahip oldukları için uydulara, özellikle de düşük yörüngede olanlara göre önemli bir avantaja sahiptir. Bir diğer avantajları, küçük alanlara daha yakın oldukları için daha iyi çözünürlüklü görüntülere izin vermeleridir. Coğrafi haritalama, astronomik gözlemler, askeri görevler, büyük olayların gözlenmesi, trafik yönetimi, Orman yangınları, sel, depremler gibi doğal felaketlerin izlenmesi, meteorolojik verilerin toplanması, hava, toprak veya su gibi çevresel ortamların izlenmesi için kullanılabilirler [22].

Uydu sistemlerini ele alacak olursak Yüksek İrtifalı İHA' lar "Düşük Maliyetli Uydu Görevi" yapabilmektedirler. Uydular ve uçaklar yüksek fırlatma ve uçuş maliyetine sahiptir. Bu araçlardan elde edilen görüntü ve fotoğraflar çok pahalıdır. Uydular çalışma alanından belirli gün ve saatlerde geçmektedir, tekrarlı uçuş yaptırılmamaktadır [26].

HAPs sisteminde bir bileşen arızalanırsa onarılmak için yere indirilebilir. İndirilenin yerine de çok kısa bir sürede yeni bir platform gönderilebilir, değiştirilip modernize edilebilmeleri, dünyada istenen bölgelere kaydırılabilmeleri, fırlatma aracı gerektirmemeleri gözlem uydularına göre avantajlarıdır.

Motor ve yakıt teknolojilerine yüksek oranda bağımlılıkları, yüksek irtifaya özgü atmosferik etkilere maruz kalmaları, havada kalma sürelerinin az olması, kapsamlı lojistik destek gereksinimi sınırlı yük taşıyabilmeleri büyük alanları içeren uygulamalarda yetersiz kalmaları dezavantajlarıdır [27-29]. Şekil 1.5 bazı HAPs sistemlerini göstermektedir.

Mevcut sistemlerinin geliştirilmesi ve yaşanan sorunların giderilmesi ile gelecekte birçok alanda İHA' ların ve diğer HAPs sistemlerinin daha aktif bir şekilde kullanılacağı düşünülmektedir [26].

İSİM	ÜLKE	YÜKSEKLİK	ŞEKİL
High Altitude Airship (HAA) Endurance Airship (HALE)	USA	20 Km	
High Altitude Long Endurance Airship (HALE)	EU	20 Km	
X-Station	SWISS	21 Km	
Global Hawk	USA	20 Km	
Helios	USA	15-30 Km	
Zephyr/Mercator	UK	18 Km	

Şekil 1.5. HAPs sistemleri [30]

1.4. Optik Kusurlar

Gerçek görüntülerin, basit teorinin öngördüğü ideal görüntüden farkına kusur, sapma (aberration) denir. Ludwig von Seidel 1857'de temel sapmaları araştırmış ve tayin etmek için analitik ifadeler türetmiştir [31].

Lenslerin ve aynaların geometrisine bağlı olan ve monokromatik sistemlere uygulanan küresel kusur, koma, astigmatizm, alan eğriliği ve biçim bozulması olarak adlandırılan 5 temel sapma türü, Seidel sapmaları olarak bilinir.

Eksenel (paraxial) teori ışın modelinin odak kayması dışında her zaman mükemmel görüntüyü oluşturduğunu varsayar. Dolayısıyla aberasyonların yüksek mertebeden terimlerle ortaya çıkmasını öngörür [32],

$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} \dots \quad (1.5)$$

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \frac{x^8}{8!} \dots \quad (1.6)$$

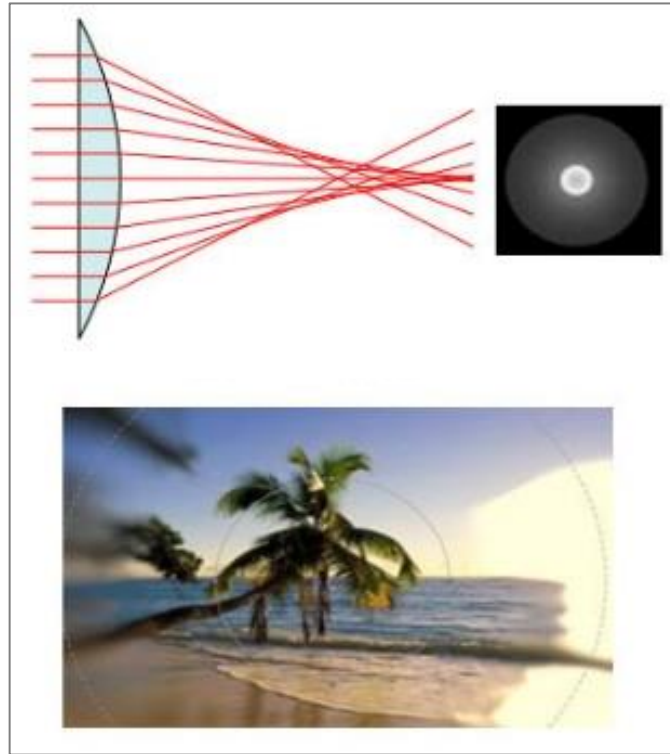
Denklem (1.5) ve Denklem (1.6) serilerindeki $\sin(x) = x$ ve $\cos(x) = 1$ ' den daha sonraki terimleri ihmal edersek tüm merceklemlerin mükemmel olduğu birinci derece optik elde ederiz. Birinci mertebeden denklemler, yakın eksenel (paraxial) bölge olarak bilinen, optik eksen etrafında ışınlar tarafından yapılan tüm açıların kendi sinüslerine eşit ayarlanabileceği kadar küçük bölge için tamamen doğrudur. Bu şartlarda sistem tasarlamak mümkün değildir. Eksenel bölgeden uzaklaştıkça optik sapmalar ortaya çıkar, x kare ve x küplü terimleri eklediğimizde, gerçek renklerin doğasından kaynaklanan ve renk sapması haricinde oluşan sapmaların belirgin olduğu üçüncü dereceden optiğe doğru ilerleriz.

Monokromatik kusurlar olarak bilinen, küresel kusur, koma, astigmatizm, görüntünün niteliğini bozarken, alan eğriliği ve biçim bozulması görüntünün biçimini bozar. Renk kusurları ışık birden fazla renk içerdiğinde ortaya çıkabilir [30-39].

1.4.1. Küresel kusur (Spherical aberration)

Yakın aksenal bölgeden uzaklaştıkça optik elemanın yüzeyinin küresel olmasından kaynaklanan bozulmalar meydana gelmektedir. Optik sistemde kullanılan küresel merceğe optik eksen dışındaki farklı bölgelerden giren, eksene paralel ışınlar küresel mercek yüzeyi ile yaptıkları açılarının farklı olmasından dolayı optik eksen üzerinde farklı mesafelerde odaklanırlar. Eksene yakın gelen ışınlar, aksenal odağa çok yakın düşerler. Mercekteki odak gelen ışınların yüksekliği arttıkça ışın aksenal odaktan uzaklaşır. Şekil 1.6' da küresel aberasyon ve görüntüye olan etkisi verilmiştir.

Küresel aberasyon, eksene yakın olmayan ışınlar için odak uzaklığının sistem açıklığına bağlı olarak değişiminin bir sonucudur. Odak uzunluğuyla ışınların kestiği yer arasındaki uzaklık boyunca küresel kusur, ışının ekrana ulaştığı noktanın eksene olan uzaklığı enine küresel kusurdur. Pek çok görüntüleyici küresel hatayı azaltabilmek için ayarlanabilir açıklık bulundurur. Aynalarda da benzer kusurlar oluşabilir. Çok uzak cisimlerin küresel kusurunu azaltabilmek için küresel yüzey yerine küresel olmayan (aspheric) optik elemanlar kullanılır. Ard arda farklı özelliklerde optik elemanlar kullanılarak küresel kusur azaltılabilir [30-39].



Şekil 1.6. Küresel kusur [37]

1.4.2. Koma (Coma)

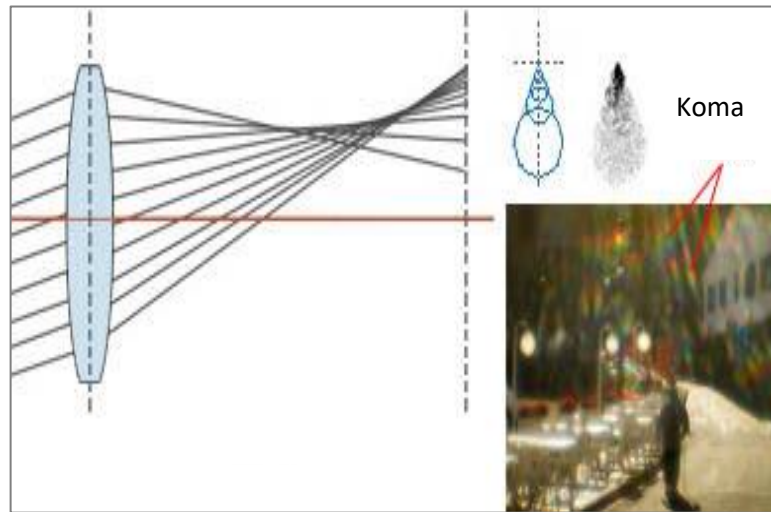
Lensin küresel aberasyon hatasının düzeltilmesine rağmen, tüm ışınların odağa getirilmesine rağmen görüntünün kalitesi keskin olmayabilir. Koma, açıklık (aperture) ile büyütmenin değişimi olarak tanımlanabilir.

Bir merceğin asal ekseninin uzak bölgelerinden geçen ışınlar için etkin odak uzaklıkları ve dolayısıyla da enine büyütme farklı olur. Bu nedenle merceğin kenarlarından gelen ışınlar merkezden geçenlere göre farklı yüksekliklerde görüntülenebilirler.

Komanın küresel kusurdan farkı yatay olarak ölçülmesidir. Küresel sapma ise düşey doğrultuda ölçülür. Koma kusurunda oluşan daireler komatik, küresel kusurda oluşan daireler merkezden dağılımlıdır.

Işın durdurucu (stop), diyafram gibi uygun optik elemanların eklenmesi ile koma kusuru azaltılabilir. Küresel olmayan yüzeyler veya belirli merceğin bileşimleri kullanılarak en aza indirgenebilir. Koma kusuru Şekil 1.7’de gösterildiği gibi kusur şeklinin kuyruklu yıldıza benzemesinden isimlendirilmiştir.

Parlama simetrik olmadığı için koma rahatsız edicidir. Koma peçinin ağırlık merkezini bulmak çok zor olduğundan küresel sapmaya göre varlığı görüntü konumunun doğru olarak belirlenmesine zararlıdır [30-39].



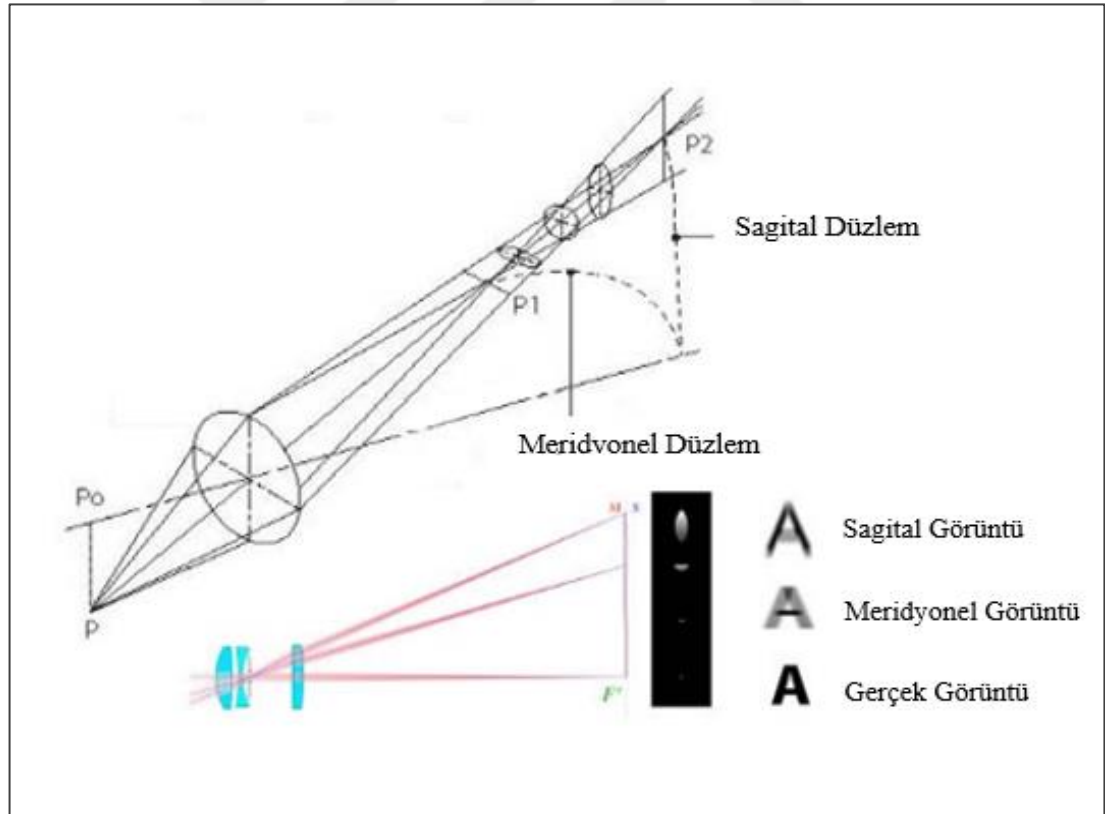
Şekil 1.7. Koma [37]

1.4.3. Astigmatizm (Astigmatism)

Küresel kusur yokluğunda bütün odak uzaklıkları aynı olduğundan bütün ışınlar tek bir odakta toplanmaktadır. Buna karşın eğik bir paralel ışın demetinin meridyonel ve sagital düzlemlerdeki durumu farklı olmaktadır. Bu durum Şekil 1.8 'de gösterilmektedir.

Sonuç olarak teğetsel ve sagital düzlemlerdeki odak uzaklıkları farklıdır. Bu astigmatik fark ışınlar merceğe daha eğik geldikçe, yani cisim noktası eksenenden uzaklaştıkça hızla artar ve eksenende bulunması durumunda sıfır olmaktadır.

Şekil 1.8'de görüldüğü gibi astigmatik odaklar arasında görüntü elips veya dairesel bulanıktır. Astigmatizm olmadığında sagital ve teğetsel görüntü yüzeyle çakışır. Petzval yüzeyinde bulunur. Astigmatizm optik elemanın yüzey özelliğine bağlı olduğundan giderilmesi de yüzey özelliğinin değiştirilmesiyle engellenebilir [30-39].



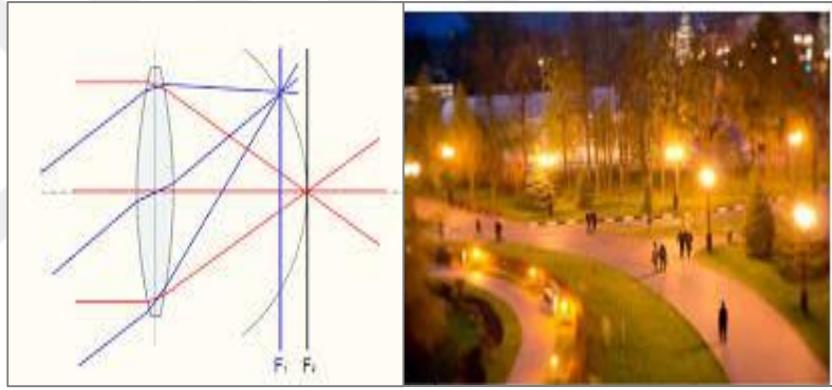
Şekil 1.8. Astigmatizm [37]

1.4.4. Alan eğriliği (Field curvature)

Kusurlardan arındırılmış optik sistemde cisim ve görüntü noktaları eşleniktir (stigmatiktir). Eksene dik koyulan düz bir cismin görüntüsü ancak yakın aksenal bölgede düz görülür.

Eksenden uzaklaşınca görüntünün oluştuğu görüntü düzlemi bir düzlem değil bir küre yüzeyi şeklinde olacaktır. Şekil 1.9 kılavuz ışınların optik sistemin küresel yüzeyi nedeniyle farklı noktalarda görüntü oluşturması, bu kusura neden olmaktadır. Yakınsak mercek için içbükey olurken, ıraksak mercek için dışbükey olur.

Bu kusur optik sistemlerde konveks ve konkav lenslerin bir araya getirilmesi ile en aza indirilir [30-39].

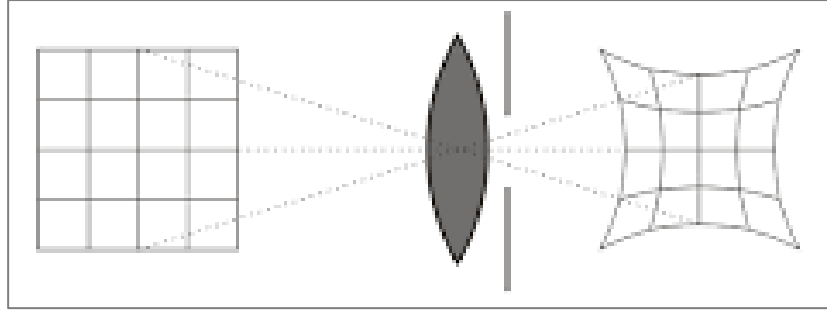


Şekil 1.9. Alan eğriliği [37]

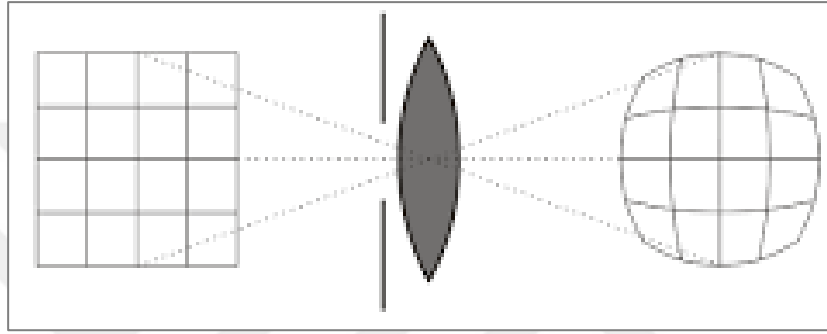
1.4.5. Biçim bozulması (Distortion)

Optik sistemdeki merceğin farklı bölgelerinin farklı odak uzaklıkları ve farklı büyütmeleme sahip olmasından kaynaklanan kusur olarak tanımlanmaktadır.

Biçim bozulmasının düzeltilmesi için stop kullanılır veya görüntü alma işleminden sonra sayısal olarak düzeltilebilir. Bu kusur Şekil 1.10' da verildiği gibi kare şeklindeki bir cismin görüntüsü konkav merceklerde fiçi şeklinde (barrel distortion), konveks merceklerde ise Şekil 1.11 iğne yastığı (pincushion distortion) şekilde görülmektedir.



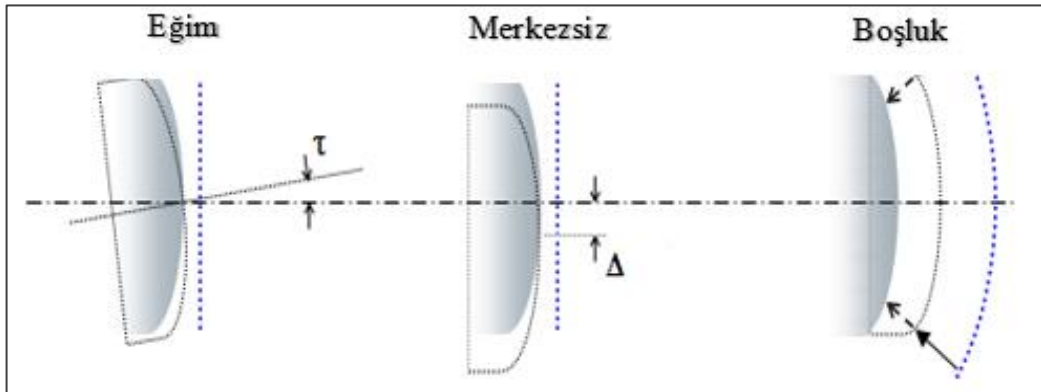
Şekil 1.10. Biçim bozukluğu (pincushion distortion) [37]



Şekil 1.11. Biçim bozukluğu (barrel distortion) [37]

Bir teleskop objektifinde, astigmatizm, alan eğriliği, biçim bozulması gibi kusurların düzeltilmesi, renk sapması, küresel sapma ve koma kusurlarının düzeltilmesi gibi birinci dereceden önemli değildir çünkü üzerinde hedefin kullanılacağı alan nispeten küçüktür [34].

Büyük teleskoplarda görüntü kalitesi teleskop sisteminde kullanılan optik elemanların kalitesine ek olarak Şekil 1.12’ de verildiği gibi hizalama hatalarına, termal değişikliklere, yüzey deformasyonlarına ve atmosfer şartlarına da bağlıdır.

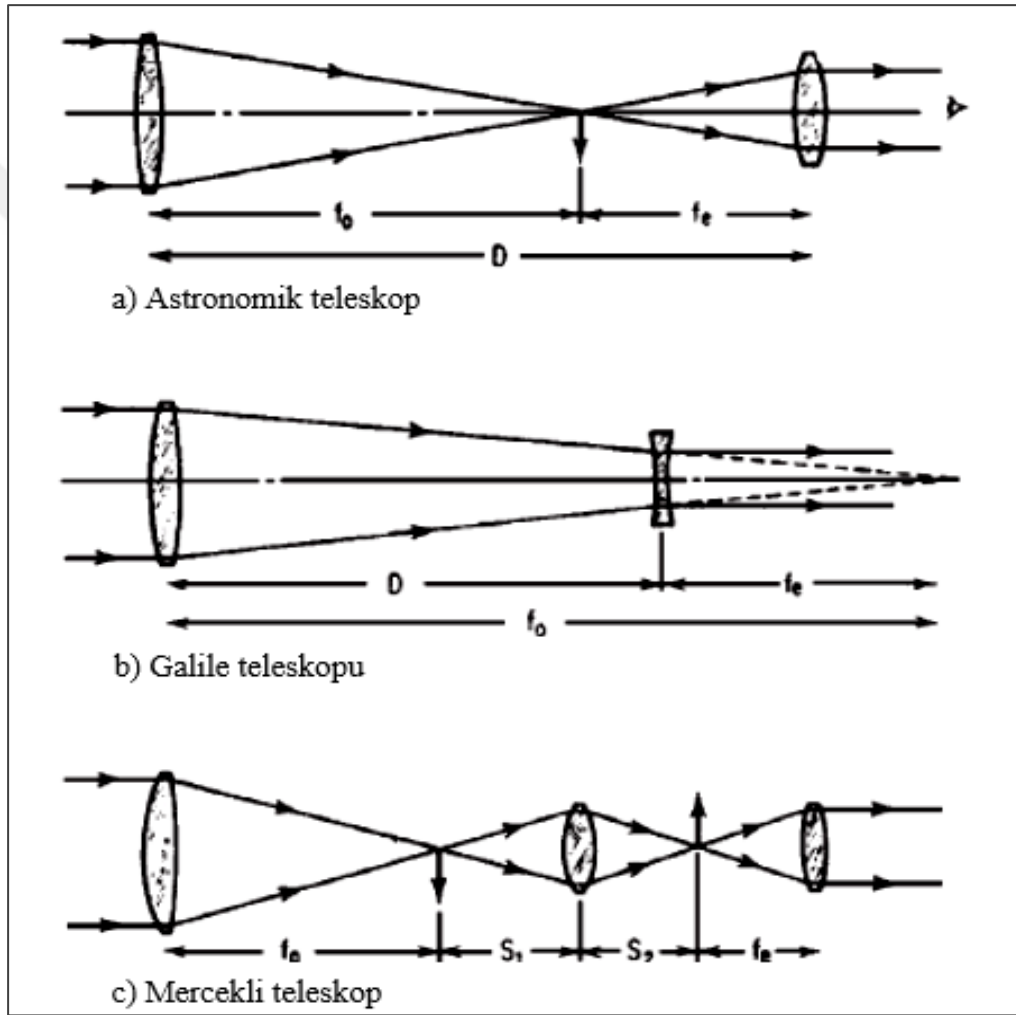


Şekil 1.12. Hizalama Hataları [37]

1.5. Teleskop Türleri

Teleskoplar optik elemanları kullanarak uzaktaki cisimlerin yaydığı ışınları toplayarak, görüntülerini oluşturan sistemlerdir.

Mercekli teleskoplar (refracting) ve aynalı teleskoplar (reflecting) olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Üçüncüsü mercek ve aynalı sistemlerin bileşimi olan aynalı-mercekli (katadioptrik) teleskoplardır.



Şekil 1.13. Merceklerden oluşan teleskop örnekleri [31]

1.5.1. Mercekli teleskoplar

Mercekli teleskoplarda, uzun bir tüp içerisindeki mercekten geçen ışık ışınları, göz merceğine gelir. Bu tür, en yaygın kullanılan teleskop türüdür. Mercekli teleskoplarda ayna bulunmaz.

Bunların bir ucunda geniş bir mercek, diğer ucunda ise ufak bir göz merceği (oküler) yer alır. Işık büyük mercekten geçer ve ufak bir demet halinde okülere gelir [40].

Merceklerden oluşan (refracting) sistemler ile geniş görüş açılı sistemler yapılabilir, Şekil 1.13' de görüldüğü gibi basit tasarıma sahiptirler ve kullanımları kolaydır. Fakat uzaktaki cisimleri görüntülemek için büyük yarıçaplar gerektirirler ve renk kusurlarına sahiptirler.

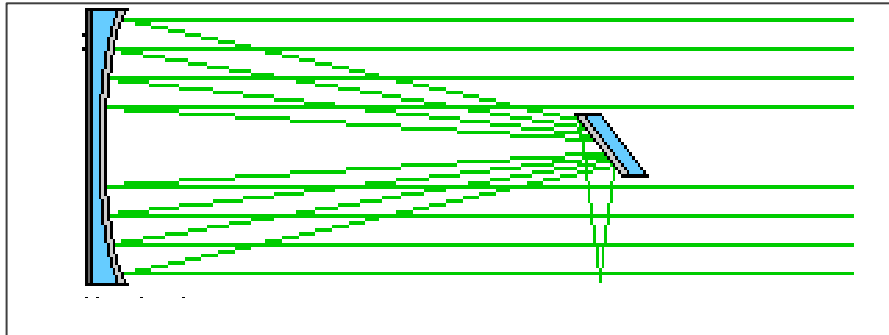
Lensler yardımıyla renk kusurları ortadan kaldırılabilir fakat bu bir miktar enerjinin kaybolmasına yol açar. Işık toplama gücü bakımından iyi kalitede büyük boyutlu optiklerin üretilmesi ekonomik değildir. [41, 42]

1.5.2. Aynalı teleskoplar

Aynalı (Reflecting) teleskoplar, mercekli teleskoplara benzer, ancak biraz daha karmaşıktır. Işığı odaklamak için aynalar kullanılır. Tüm modern kızılötesi/optik teleskoplar aynalı sisteme sahiptir çünkü ışığın bulunduğu ortam değişmediği için renk kusurları oluşmaz.

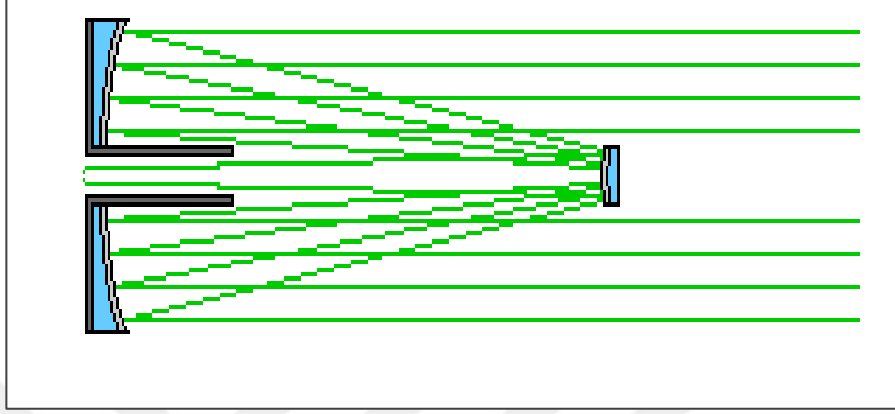
Optiklerinde düzeltilmesi gereken sorunlar olmasına rağmen, bunlar mercekli teleskoplara kıyasla önemsizdir. Aynalı sistemlerde optik ve mekanik sorunlar daha kolay giderilebilir [43].

Nevtonian teleskop; Ana aynadan yansıyan ışığı göz merceğine yansıtmak için 45 derecelik bir açı ile eğimli düz bir ikincil ayna kullanılır. Şekil 1.14' te Nevtonian bir teleskop örneği gösterilmiştir. İkincil ayna ışık kaybına sebep olduğundan büyük görüntüleme sistemleri için uygun değildir [44].



Şekil 1.14. Nevtonian teleskop [45]

Cassegrain sistemi Newtonian sisteme göre daha karmaşıktır. Şekil 1.15 küresel ya da paraboloid birincil aynayla, konveks hiperboloid olan ikinci aynadan oluşur. Böylece koma ve alan eğriliği hariç iyi görüntü düzetmesi verir. Sisteme gelen ışınlar çukur ayna yardımıyla toplanır ve tümsek aynaya gönderilir ve görüntü elde edilir.



Şekil 1.15. Cassegrain teleskop [45]

Bu tip sistemlerde ikincil ayna aracılığıyla birinci aynadan gelen ışınlar daha uzak noktalara gönderilerek sistemin (etkin) odak uzaklığı, birinci aynanın odak uzaklığının birkaç katı büyüklüğüne ulaştırılabilir. Bu sayede, diğer sistemlere göre daha uygun bütçe ile kararlı, odak uzaklığı ve görüntü ölçeği büyük bir tasarım elde edilmiş olur [46, 47].

Ritchey Chrétien kriteri teleskopu aplanatiktir. Yani küresel sapma ve komayı düzeltmek için tasarlanmıştır. 1910'ların başında ABD'li astronom George Willis Ritchey (1864–1945) ve Fransız astronom Henri Chrétien (1879–1956) tarafından tasarlanmıştır. Diğer yansıtıcı tasarımların aynaları küresel veya parabolik yüzeye sahipken R-C tasarımında hiperbolik yüzeyler kullanılır.

Hubble Uzay Teleskobu dahil olmak üzere uzay araştırmaları için kullanılan büyük teleskopların çoğu bu tasarıma sahipler. Üretimi ve test etmesi zordur, maliyetlidir.

Koma sorununu ortadan kaldırdığı için diğer tasarımlarla karşılaştırıldığında daha geniş bir alanı gözlemlene olanağı sağlar. Fakat Alan eğriliği bulunduğu için alan sabitleyici lens gereklidir. Bu lens daha düz bir alan sağlar ve astigmatizmayı en aza indirebilir.

Beş büyük optik kusurun üçünü düzeltmeyi başarır dolayısıyla bu tip teleskoplar profesyonel sistemler için tercih edilir, çünkü diğer tasarımlara kıyasla daha iyi bir optik görüntü sunar ve daha geniş bir görüş alanı sağlar. Yüksek çözünürlük uygulamaları için uygundur [35, 48, 49],

$$C1 = \frac{B - F}{2 \cdot D \cdot F} \quad (1.7)$$

$$C2 = \frac{B + D - F}{2 \cdot D \cdot F} \quad (1.8)$$

C1 ve C2, Eğrilik çapları,

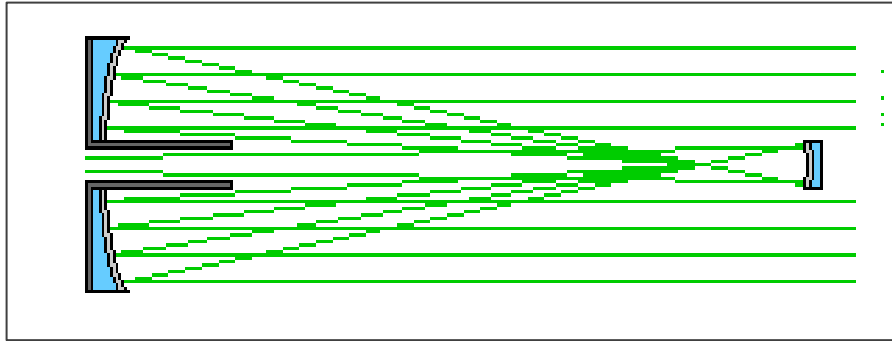
F, Giriş sisteminin etkin odak uzaklığı,

B, Arka odak uzaklığı veya ikinci ayna ile odak arasındaki uzaklık,

D, İki ayna arasındaki uzaklık,

Denklem (1.7) ve Denklem (1.8) kriterlerine uyarak tasarlanırlar.

Gregorian teleskoplarda birincil ve ikincil aynalar konkavdır. Gregorian teleskoplar Şekil 1.16' da verilmiştir. Düz bir görüntü oluşturdukları için yer dürbün olarak kullanılırlar. Küresel kusur ve koma yoktur [35].



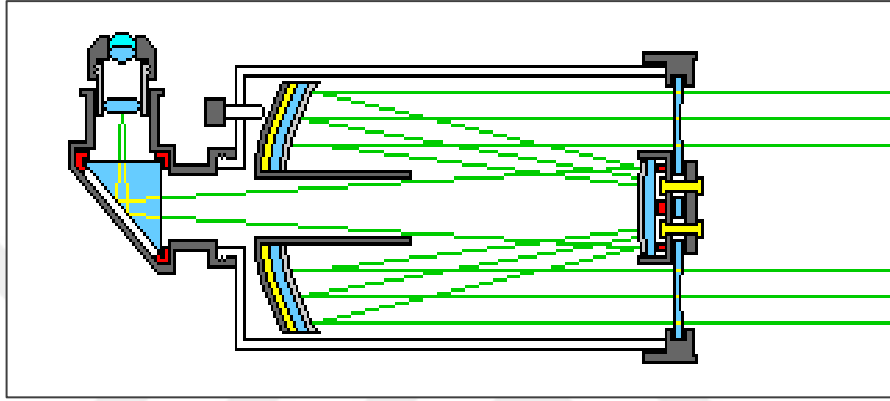
Şekil 1.16. Gregorian teleskop [45]

1.5.3. Katadioptrik teleskoplar

Aynalı ve mercekli teleskopların bir anlamda bir birleşimi olan aynalı-mercekli (katadioptrik) teleskoplardır. Bu tür teleskoplar, Schmidt-Cassegrain ve Maksutov-Cassegrain olmak üzere iki gruba ayrılır. Bu teleskoplarda ışık önce mercekten sonra da aynadan büküldüğü için teleskobun tüpünün boyu daha kısadır. Bu teleskoplar, diğer teleskop çeşitlerine göre daha pahalıdır.

Aynalı ve mercekli teleskopların avantajları, bir araya toplanarak her amaca uygun şekilde teleskop yapılabilmesidir [40].

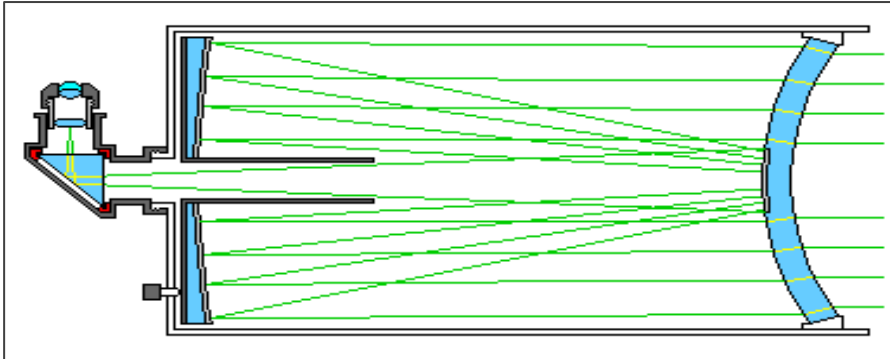
Schmidt-Cassegrain teleskoplarında ışık ince bir Schmidt düzeltici mercekten geçerek gelir. Daha sonra küresel çukur aynaya çarparak tekrar geri yansır. Şekil 1.17’ de görüldüğü gibi yansıyan bu ışınlar birinci aynanın göbeğindeki delikten geçerek göz merceğinde odaklanırlar.



Şekil 1.17. Schmidt-Cassegrain teleskop [45]

Maksutov-Cassegrain teleskoplarında, Şekil 1.18’ de verildiği gibi, Schmidt’ in koyduğu düzeltici yerine, bir tarafı iç bükümlü bir tarafı dış bükümlü olan ince bir düzeltici mercek kullanılır. Gelen ışınlar, düzeltici mercekten geçer ve çukur aynaya ulaşır. Çukur aynadan yansıyan ışınlar tümsek aynaya gelir ve oradan tümsek aynanın arasındaki göz merceğine gelir.

Bu tür teleskoplar, Schmidt teleskoplardan biraz daha düşük kalitede görüntü verir.



Şekil 1.18. Maksutov-Cassegrain teleskop [45]

1.6. Atermalizasyon

Kızılötesi bantta çalışırken, mercek malzemelerinin yapısından dolayı sıcaklık değişimiyle sistemin odak dışına çıkmamasına dikkat edilmesi gerekir. Bir IR sisteminin geniş sıcaklık aralığında gerekli optik performansı dengede tutmasına, atermalizasyon adı verilir.

En sık kullanılan IR malzemeleri, sıcaklık ile kırılma indisinde çok büyük değişiklikler sergiler ve sistemin odak uzaklığında değişikliklere yol açması nedeniyle tasarım için oldukça zorlayıcıdır.

Sıcaklık artışı, küresel bir yüzeyin asferik hale gelmesi, kırılma indislerinin artırılması veya azaltılması, sistemin içindeki ortamın (hava, su) yoğunluğunun değişmesi, kusurları gidermek için yapılan düzeltmelerin değişmesi gibi etkiler ile sonuçlanabilir.

Atermalizasyon teknikleri üç ana kategoriye ayrılır:

- Optik olarak pasif
- Mekanik pasif
- Elektromekanik olarak aktif

Her seçenek, tasarlanacak sistemin maliyeti, performansı vb. açısından uygun bir şekilde değerlendirilmelidir. Optik olarak pasif atermalizasyon, termal odaklama kaymasını telafi etmek için uygun şekilde seçilen mercek materyallerini birleştirerek sistemdeki odak kaymasını ortadan kaldırır. Bu atermalization tekniği hareketli parçalar gerektirmez dolayısıyla daha sade ve hafif tasarımlar yapılabilir. Dezavantajı ise daha fazla optik eleman kullanılan karmaşık sistemlerde geliştirilmiş pahalı mercek materyalleri içermesi gerektiğidir.

Atermal sistem için aşağıdaki üç şartın sağlanması gerekir.

1. Toplam güç şartı,
2. Akromatizm,
3. Atermalizasyon,

Toplam güç şartı, optik güç (\emptyset) mercek ve Denklem (1.10)'da verildiği şekilde ayna gibi bir optik sistemin ışığı kırma derecesini belirtir. Yüksek optik güç, kısa odak uzaklığına karşılık gelir,

$$f = \frac{1}{\phi} \quad (1.9)$$

$$\sum_{i=1}^j \phi(i) = \phi \quad (1.10)$$

Akromatizm, Denklem (1.11)'de tanımlanan Abbe sayısı (V) dalga boyuna göre kırılma indisinin değişimidir,

$$V = \frac{n(d) - 1}{n(f) - n(c)} \quad (1.11)$$

Akromatik sistemlerde küresel ve kromatik sapmaları azaltmak için en az iki mercek bir araya getirilir ve farklı dalga boylarındaki ışınların odak noktası birbirine yaklaştırılmaya çalışılır,

$$\sum_{i=1}^j \frac{\phi(i)}{V(i)} = 0 \quad (1.12)$$

Atermalizasyon, Denklem (1.12) ve Denklem (1.13)'ün içindeki malzemeye bağımlı faktör, termal cam sabiti (γ) diye bilinir ve bu γ , birim f' ye ve T' nin birim değişimine normalize edilen bir optik malzeme nedeniyle, termal güç değişimini temsil eder. α termal soğurma katsayısıdır. Denklem (1.14) ve Denklem (1.15)'i elde ederiz,

$$\frac{\partial f}{\partial T} = -f \cdot \left(\frac{\delta n / \delta T}{n - 1} - \alpha \right) \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = +\phi \cdot \left(\frac{\delta n / \delta T}{n - 1} - \alpha \right) \quad (1.14)$$

$$\sum_{i=1}^j \phi(i) \cdot \gamma(i) = -\phi \cdot \alpha(h) \quad (1.15)$$

Termal optimizasyon, herhangi bir kırıcı optik sistemin geniş bir sıcaklık aralığında çalıştırılması sırasında optik ve opto-mekanik tasarımın gerekli bir parçasıdır. Üç şartın mevcudiyeti, kesin bir çözüm elde etmek için üç farklı malzemeye ihtiyaç

duyulacağını ifade eder. Tablo 1.3' te orta kızılötesi bölge için akromatik kombinasyonların bazıları listelenmiştir. Optik olarak pasif atermalizasyon, elektromekanik olarak aktif atermalizasyona göre daha sade ve düşük maliyetli sistemlerin yapılabilmesini sağlar [50-52].

Tablo 1.3. Orta kızılötesi bölge için akromatik kombinasyonlar [50]

MALZEME BİRLEŞİMLERİ	TOPLAM EĞRİLİK (TOTAL CURVATURES)	PETZVAL TOPLAM (PETZVAL SUM)
Si+Ge+ZnS	+0,72-0,36+0,27	0,39
ZnS+MgO+Ge	+1,28-0,17-0,16	0,52
AMTIR1+Ge+Si	+0,56-0,32+0,46	0,42
Si+MgO+KRS5	+0,31-0,08+0,22	0,31
ZnSe+ZnS+Ge	+1,80-0,69-0,23	0,50
Si+CaF2+KRS5	+0,32-0,25+0,24	0,29

1.7. Optik Bileşenler

1.7.1. Aynalar

Optik aynalar, ışın yansıtacak şekilde tasarlanmış yüzeylerdir. Teknolojinin ilerlemesiyle özel kaplama yöntemleri geliştirilerek astronomi, metroloji, yarıiletken gibi istenilen uygulamalarda ışığı yansıtacak şekilde aynalar üretilmektedir.

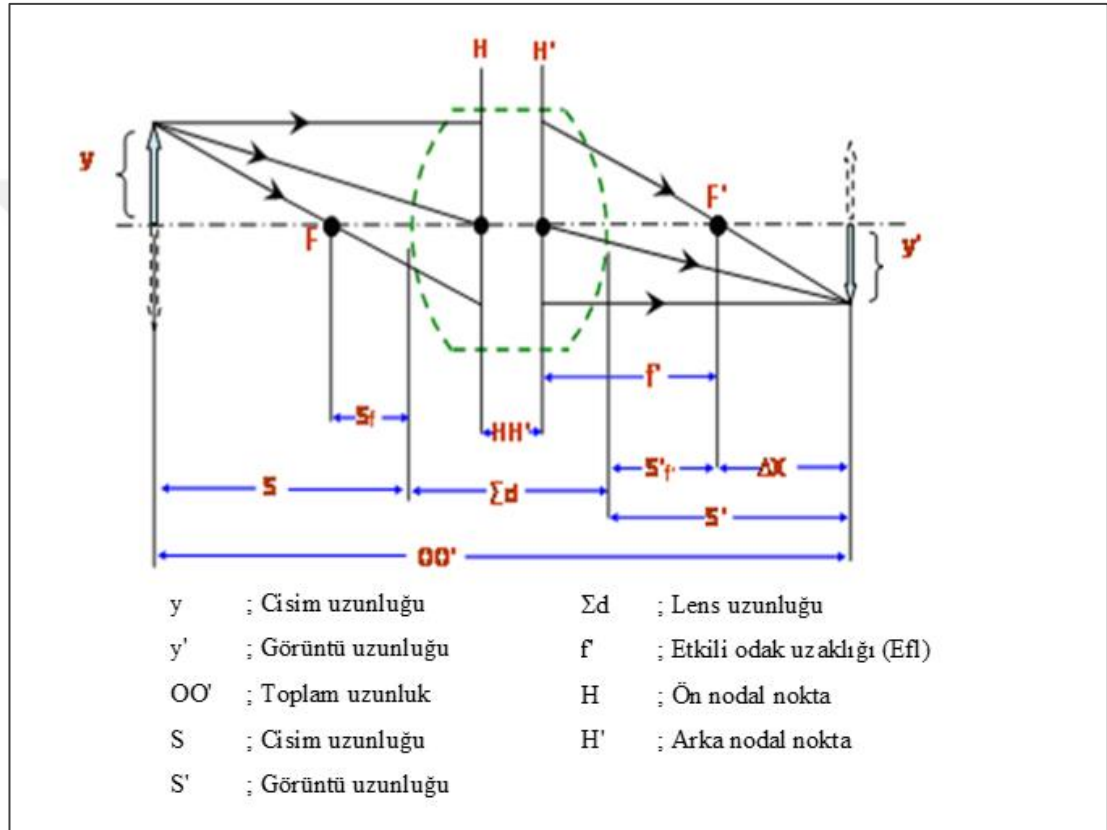
Doğru yansıtıcı kaplama seçeneğinin seçilmesi, gerekli dalga boyu veya dalga boyu aralığının yüksek yansıtma özelliğini sağlar. Düz, küresel ve parabolik aynalar olarak üç grupta incelenebilir [30-35].

1.7.2. Mercekler

Optik mercekler, optik tasarımda ışığı kontrol etmek için kullanılan en önemli araçlardır. Mercek ara yüzeylerinden en az biri eğrisel olan iki ya da daha fazla kırıcı

yüzeyden oluşur. Hedeften gelen ışık ışınlarını odaklayarak optik görüntünün oluşturulmasını sağlarlar. İnce kenarlı (yakınsak) ve kalın kenarlı (ıraksak) olmak üzere ikiye ayrılır. İnce kenarlı mercek, ışık ışınlarını kırarak bir noktada toplar. Bu nokta merceğin odak noktasıdır (f). Kalın kenarlı (ıraksak) mercek gelen ışını optik ekseninden dağıtır [30-35].

Küresel kırılma yüzeyinde tanımlanan parametreler Şekil 1.19'da gösterilmiştir.



Şekil 1.19. Küresel kırılma yüzeyinde tanımlanan parametreler [53]

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında kızılaltı bölgenin 3-5 μm alt bandında çalışan, -50 °C ile +30 °C arasındaki hava koşullarında odak kaymasının minimum olduğu kızılötesi görüntüleyici özelliğine sahip, Ritchey-Cassegrain kriterlerinde kızılötesi görüntüleyici optik tasarımı yapılacaktır.

Termal detektör seçiminden başlayarak, gerekli temel parametreler ve hesaplamalar bu bölümde açıklanmıştır. Aynı zamanda Zemax optik tasarım programı kullanılarak optik tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarım optik olarak pasif atermalizasyon tekniği kullanılarak yapılmıştır.

2.1. Detektör Seçimi

Kızılötesi detektörler cisimlerden yayılan kızılötesi ışımayı algılayan, görüntüleme sistemlerinin en önemli alt bileşenlerinden biridir. Detektörün özellikleri, optik sistemin tasarım parametrelerini ve termal kameranın en önemli temel özelliklerinden biri olan görüş alanı gibi genel hesaplarında bulunur. Tasarlanacak optik sistemin parametre ve hesaplamalarını etkilediğinden, detektör seçimi tasarımın ilk aşaması olmalıdır.

Tablo 2.1' de özetlendiği gibi kızılötesi bölgenin alt bantlarında çalışan, çeşitli piksel büyüklüklerinde ve farklı malzemelerden üretilmiş kızılötesi detektörler vardır. Gerek ışığı algılayan foton dedektörler, gerekse sıcaklık değişimlerini algılayan termal dedektörler oldukça farklı kullanım maksatlarına ve uygulama alanlarına sahiptir. Kızılötesi dedektörlerin performansı kullanılan algılayıcı malzemenin özelliklerine, piksel yapılarına, epikatman yapısı tasarımına, üretim sürecine, okuma devresine ve benzeri birçok faktöre bağlıdır [4]. Sistem tasarlanırken en uygun detektör seçilmelidir.

Optik sistemin yapımında detektör penceresinin kalınlığı ve malzemesi gibi detektörün optik ara yüzleri de optik tasarım yapılırken dikkate alınmalıdır.

Bu optik tasarımda, piksel sayısı (320×240) ve piksel aralığı ($35\mu\text{m} \times 35\mu\text{m}$) olan dedektör kullanılmıştır.

Tablo 2.1. Kızılaltı bölgede kullanılan bazı dedektör malzemeleri [54]

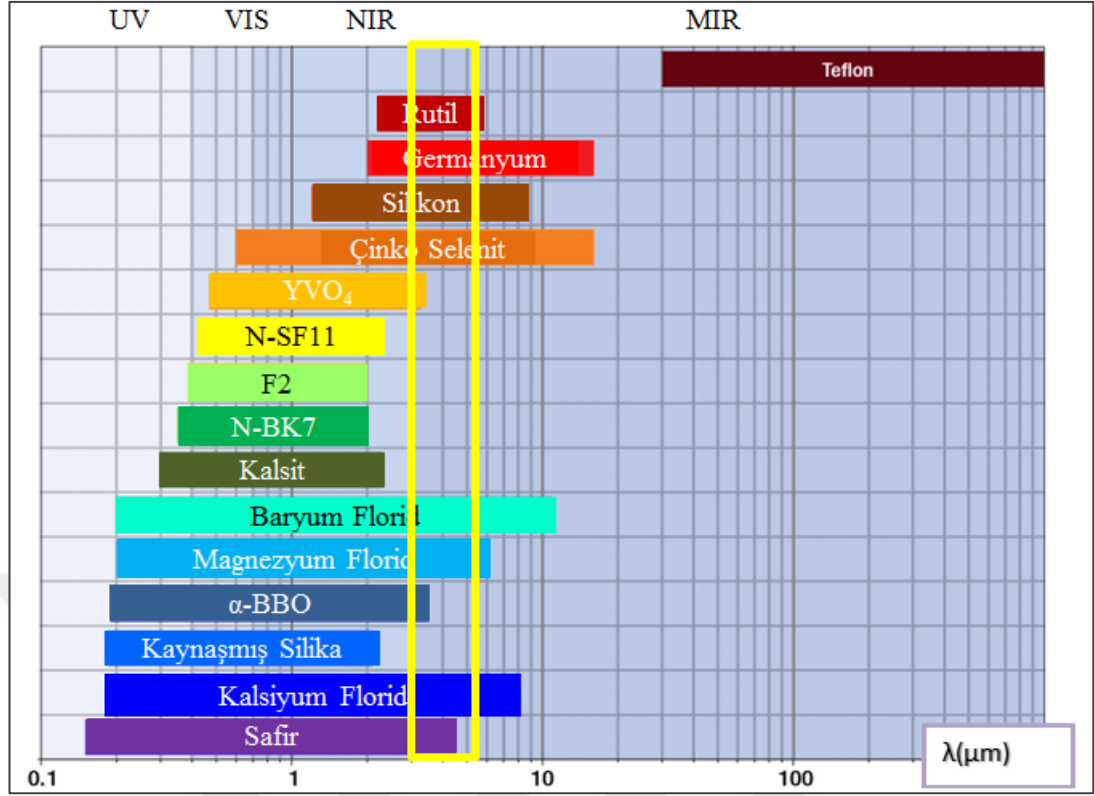
SPEKTRAL BAND	DALGABOYU ARALIĞI (μm)	DEDEKTÖR MALZEMESİ
NIR	0,74 - 1	SiO ₂
SWIR	1 - 3	InGaAs, PbS
MWIR	3 - 5	InSb, PbSe, PtSi, HgCdTe
LWIR	8 - 14	HgCdTe
VLWIR	14 - 1000	-

2.2. Kızılaltı Optik Malzemeler

Kızılaltı bölgenin farklı bantlarında mükemmel geçirgenlik oranlarına sahip birçok malzeme vardır. Fakat bazıları toksik madde içerir veya suda çözülebilir özelliklere sahiptirler [55].

Tasarım yapılırken kullanılacak olan mercekler birçok özellik göz önünde bulundurularak seçilmelidir [33]. Kızılötesi bölgede çalışacak malzeme seçilirken dikkat edilmesi gereken üç nokta, ısı özellikleri, geçirgenlikleri ve kırılma indisleridir.

Bir optik sistemin iletimi, sistem üzerinden dedektöre düşen ışık miktarı etkiler. Kullanılan merceklerin geçirgenliği yüksek olmalıdır, anti-yansıma kaplamaları yapılarak merceklerin geçirgenlikleri artırılabilir. Kırılma indisinin dalga boyuna ve sıcaklığa bağlılığı en az olmalıdır. Kızılötesi lens malzemeleri genellikle daha yüksek bir kırılma indeksine sahiptir. Genleşme katsayıları toleranslama için önemlidir.



Şekil 2.1. Optik malzemeler ve dalgaboyları [55]

Orta kızılötesi 3–5 μm alt bandında geçirgen olan optik malzemeler Şekil 2.1’ de verilmiştir, Tablo 2.2’ de ise optik ve termal özellikleri verilmiştir. Bir optik sistemde sıcaklığın etkilerini en aza indirmek, sistemi atermalize etmek, üç farklı lens malzemesi kullanılarak mümkündür [50].

Tablo 2.2. Orta kızılötesi bandında geçirgen optik malzemeler ve özellikleri [56]

MALZEME	KIRILMA İNDİSİ		Dn/dT (K ⁻¹)	SPEKTRAL BÖLGE
	MWIR $\lambda=4\mu\text{m}$	LWIR $\lambda=10\mu\text{m}$		
Germanyum	4,0243	4,00032	0,000396	2~17 μm
Silisyum	3,4290	N/A	0,000160	1,2~9 μm
ZnSe	2,4331	2,4065	0,000060	0,55~20 μm
CaF ₂	1,4096	1,30082	-0,000012	0,23~9,7 μm

Kalsiyum Florür (CaF_2), morötesi bölgeden $8\mu\text{m}$ kızılaltı bölgeye kadar ($180\text{ nm} - 8,0\mu\text{m}$) geçirgendir. $1,064\mu\text{m}$ 'de $1,428$ 'lik bir kırılma indeksi vardır. Mekanik ve çevresel olarak kararlıdır. CaF_2 , yüksek hasar eşiği olduğu için zorlayıcı uygulamalar için idealdir [57].

Silisyum(Si) lensler yakın ve orta kızılötesi bantlarının kullanıldığı uygulamalar için ideal bir seçimdir. Silisyum, yüksek ısı iletkenliği ve düşük yoğunluk sunar. Silisyum optik malzemeler görüntüleme, biyomedikal ve askeri uygulamalar için de çok uygundur. Silisyum $1,2\mu\text{m}$ ila $8,0\mu\text{m}$ arasında bir iletim aralığına sahiptir. Silika, $4,58\mu\text{m}$ 'de $3,423$ 'lük yüksek bir kırılma indisine sahiptir [57].

Thallium Bromoiodide, KRS-5 görünür bölgeden uzak kızılötesi bölgeye kadar geçirgendir. Bu malzemeyi işlerken ekstra güvenlik önlemleri gereklidir. Çok düşük su çözünürlüğü ve asitlere karşı çok kuvvetli kimyasal dirence sahiptir. Daha yüksek maliyete sahiptir. $10\mu\text{m}$ 'de ki kırılma indisi $2,37$ 'dir [58].

Çalışma dalga boyu ne olursa olsun, zorlu atmosfer şartlarında çalışacak optik sistemler için en büyük teknik zorluk, düşük yoğunluğa, yüksek sertliğe, yüksek termal kararlılığa ve iyi yüzey kalitesine sahip büyük açıklığı olan aynaları yapma yeteneğidir.

Tablo 2.3. Ayna malzemeleri [59]

MALZEME	ISIL GENLEŞME KATSAYISI (10^{-6})	YOĞUNLUK (kg/m^3)
Alüminyum	23	2700
Çelik	11	7750
Silisyum	3	2333
Titanyum	12	4650
Kaynaşmış Silika (Fused Silica)	0,05	2230
Bakır	16,6	8940

Tablo 2.3' te sıklıkla kullanılan ayna malzemeleri ve özellikleri verilmiştir. Alüminyum düşük maliyetli, kolayca üretilebilen, birçok alaşımı olan bir malzemedir. Görünür ve kızılötesi bölgede iyi bir yansıtıcılığa sahip olduğu için ayna yapımında sıklıkla kullanılır [59].

2.3. Tasarım Hesaplamaları

2.3.1. Optik açıklık (Clear aperture)

Bu fiziksel sınırlama sisteme girip görüntüyü oluşturan ışınların miktarını belirler. Ne kadar büyük olur ise, o kadar ışık toplanır. Parlaklığı kontrol eder. Şekil 2.2'de optik açıklık (D), odak uzaklığı (f) ve alan engeli gösterilmiştir [34].

Bu çalışmada net bir görüntünün oluşması için optik açıklık, $D=70$ mm seçilmiştir.

2.3.2. Alan engeli (Field stop)

Cismin sistemle görülebilen kısmının boyutunu ve açısal genişliğini sınırlayan elemana alan engeli (field stops) denir [34]. Merceğe yakınsa büyüklüğü, odağın önündeysse açığı sınırlar.

Birçok optik sistemde dedektörün sınırları alan engelidir.

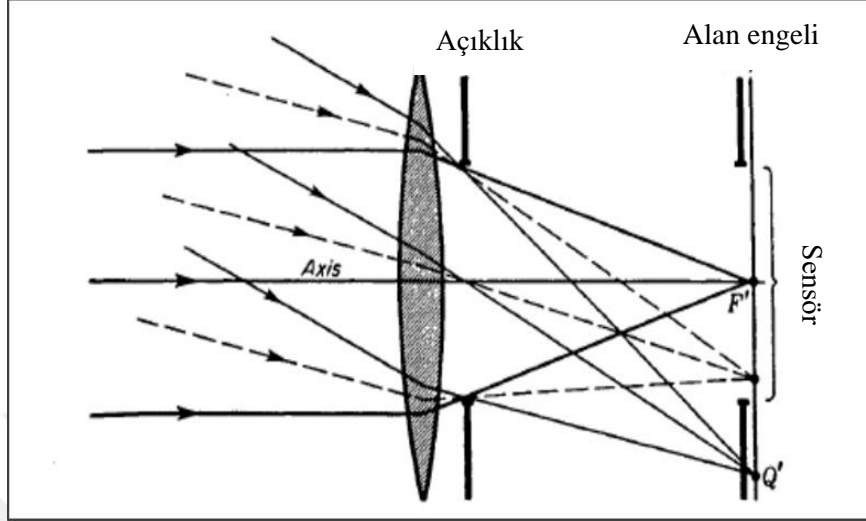
2.3.3. Etkin odak uzaklığı (Effective focal length)

Odak noktası ile ana nokta arasında kalan mesafedir. Bu çalışmanın odak uzaklığı optik kusurlarında daha kolay minimize edilebilmesi için 300 mm ($f=300$ mm) seçilmiştir.

2.3.4. F sayısı (F number)

Uzaktaki bir kaynağın küçük bir bölgesinden optik sistemde toplanan enerji miktarı, doğrudan bu enerjinin alanıyla veya daha genel olarak optik açıklığın alanıyla doğru orantılıdır. Geniş bir açıklık geniş bir ışık konisi oluşturur. Gelen enerji görüntü bölgesine yayılır. Birim zamanda birim alandaki enerji görüntü alanıyla ters orantılıdır. D/f oranına bağlı açıklık, tersine f sayısı denir, $f/\#$ ile gösterilir, Denklem (2.1) ile $f/\#$ değeri elde edilmiştir [34]. Düşük f sayısı daha parlak görüntü verir,

$$f/\# = \frac{f}{D} = \frac{300\text{mm}}{70\text{mm}} = 4,28 \quad (2.1)$$



Şekil 2.2. Açıklık, alan engeli ve odak noktası [34]

2.3.5. Albedo (Yansıtabilirlik)

Optik sistemin çalışacağı bölgeyi %40 Deniz, %30 Orman, %10 Beton, %20 Toprak, oranında varsayarsak albedo değeri Denklem (1.4) kullanılarak hesaplanan albedo değeri Denklem (2.2)'de verilmiştir.

$$\alpha = 0,15 \cdot \frac{40}{100} + 0,15 \cdot \frac{30}{100} + 0,55 \cdot \frac{10}{100} + 0,25 \cdot \frac{20}{100} \quad (2.2)$$

$\alpha = 0,210$ bulunur [60].

2.3.6. Görüş alanı (Field of view)

Bir optik sistemde herhangi bir anda sistemi hareket ettirmeden görülebilen alanın açı cinsinden ölçüsüdür [11]. Uzaktan algılanan görüntülerin kalitesini belirleyen çözünürlük; mekansal, tayfsal, radyometrik ve zamansal olarak dörde ayrılmıştır.

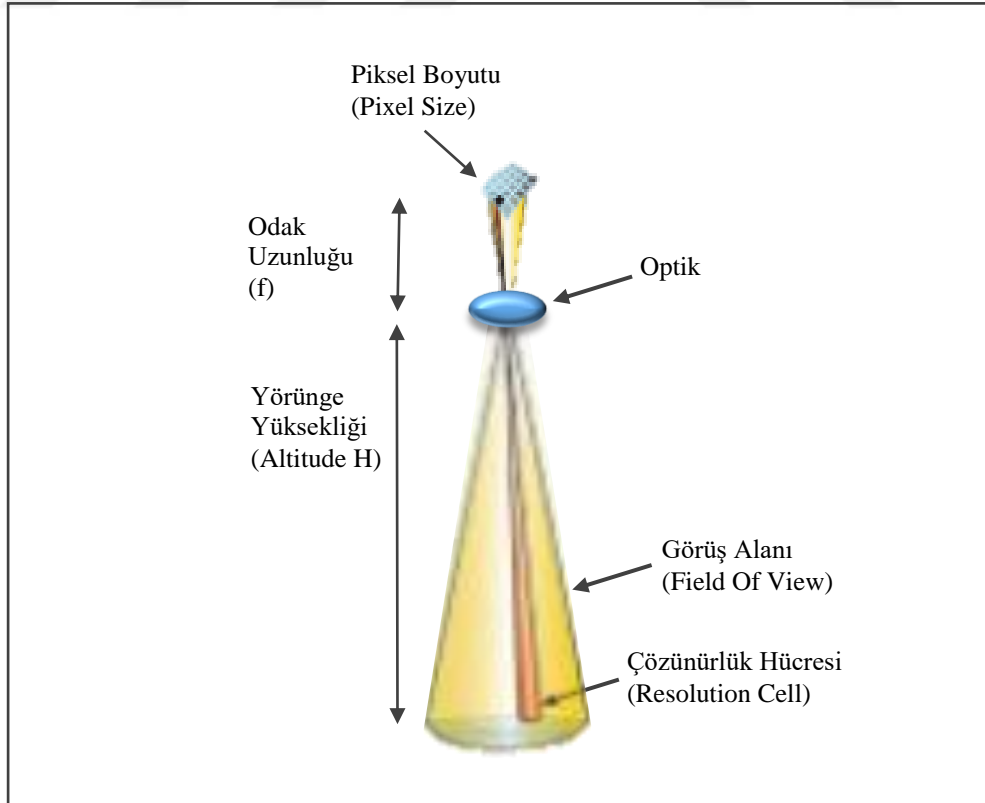
Mekansal çözünürlük her pikselin yeryüzünde kapsadığı alanı ifade eden bir terimdir. Düşük mekansal çözünürlük hassasiyetin daha iyi olduğunu ifade eder. Sensörlerin mekansal çözünürlüğü anlık görüş sahası (Instantaneous Field Of View, IFOV) ile ilişkilidir.

IFOV dedektörün çok kısa zaman aralığında görmüş olduğu sahanın ölçüsüdür yani algılayıcı tarafından kaydedilen enerjiye karşılık gelen yeryüzündeki alandır. Çözünürlük hücresi sensörün en küçük mekânsal çözünürlüğünü ifade etmektedir. Cisimleri tespit etmek için cismin büyüklüğünün çözümleme hücresinin ebadına eşit veya daha büyük olması gerekmektedir. Cismin büyüklüğü çözümleme hücresinin büyüklüğünden küçük ise tespiti mümkün olmayabilir. Çok büyük cisimlerin tespit edilebildiği görüntüler “düşük çözünürlüklü”, küçük cisimlerin tespit edilebildiği görüntüler “yüksek çözünürlüklü” olarak tanımlanabilir.

Tayfsal çözünürlük sensörün elektromanyetik spektrumda belirli dalga boyları arasında yapabileceği kayda işaret etmektedir. Belirgin bir bantta kaydedilen enerjinin dalga boyları arası geniş ise tayfsal çözümleme düşük, dar ise yüksektir.

Radyometrik çözümleme sensörün parlaklık farklılıklarına olan hassasiyetini belirtmektedir.

Zamansal çözümleme sensörün algıladığı görüntünün sıklığına işaret eder. Sensörün kapasitesine tarama genişliğine ve irtifaya bağlı olarak değişir [25].



Şekil 2.3. Optik sistemin bileşenler

Tablo 2.4. Tasarım parametreleri

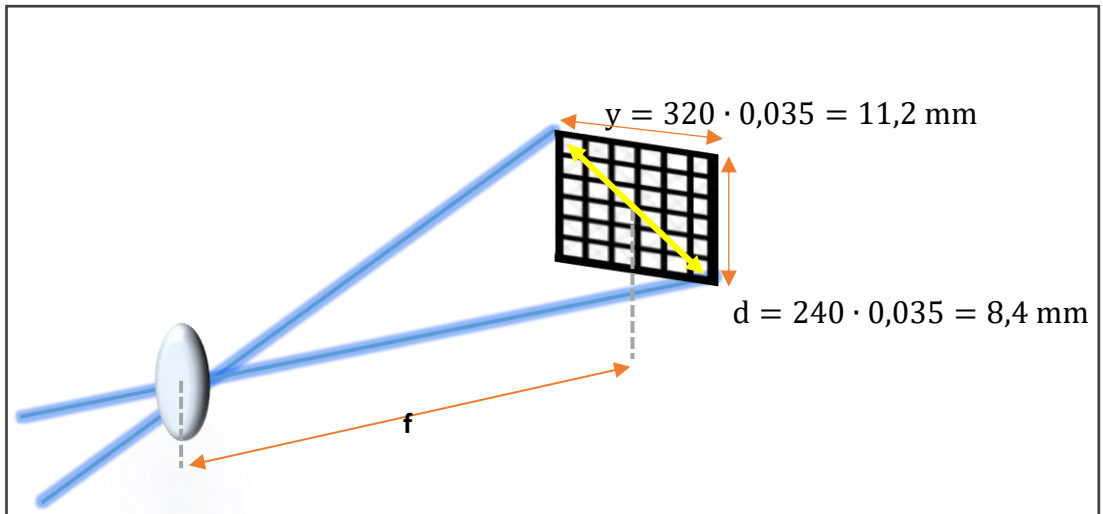
Dedektörün 1 Piksel Boyutu, w	35 μm
Dedektörün Piksel Sayısı	320 \times 240
Dalga Boyu Aralığı	3-5 μm
Yörünge Yüksekliği, H	20 km
Giriş Çapı, D	70 mm
Odak Uzunluğu, f	300 mm

Tablo 2.4’ te listelenmiş değerler ile gerekli olan diğer parametreler kullanılarak yersel çözünürlük ve görüş alanı Şekil 2.3’ten yararlanılarak üçgen benzerliği ile bulunur [61]. Denklem (2.3), Denklem (2.4) ve Denklem (2.5) kullanılarak hesaplamalar yapılır,

$$\text{Yersel çözünürlük} = \frac{H \cdot \text{Piksel boyutu}}{\text{Odak uzunluğu}} = 2,33 \text{ m} \quad (2.3)$$

$$\text{Bir pikselin görüş alanı, IFOV} = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{w}{2 \cdot f} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{Sistemin toplam görüş alanı, FOV} = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{D}{2 \cdot f} \right) \quad (2.5)$$



Şekil 2.4. Görüş alanı (Field of view, FOV) hesaplaması

Önceki bölümlerde belirlendiği gibi 35 µm piksel aralığı ile 320 x 240 piksel sayısına sahip dedektör kullandığımızı düşünerek hesaplamalar yapılmıştır.

Şekil 2.4' te gösterildiği gibi dedektörün yatay ve düşey bileşenlerinde ki FOV değerleri FOV_d ve FOV_y olarak ifade edilmiştir ve Denklem (2.6) ve Denklem (2.7) kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır,

$$FOV_d = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{D}{2 \cdot f} \right) = 1,60 \text{ derece} \quad (2.6)$$

$$FOV_y = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{y}{2 \cdot f} \right) = 2,14 \text{ derece} \quad (2.7)$$

Dedektörün köşegen uzunluğu 14 mm olduğu için köşegen için Denklem (2.8) ile FOV değeri hesaplanmıştır.

$$FOV_k = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{14\text{mm}}{2 \cdot 300\text{mm}} \right) = 2,67 \text{ derece} \quad (2.8)$$

Bir pikselin görüş alanının yeryüzündeki karşılığı, GFOV, görüntüleyicinin yerde yaklaşık 560m'ye 750m'lik bir alan kaplayacağını ifade eder. Denklem (2.9) ve Denklem (2.10) ile GFOV değerleri hesaplanmıştır.

$$GFOV_d = 2 \cdot H \cdot \tan^{-1} \left(\frac{FOV_d}{2} \right) = 560 \text{ m} \quad (2.9)$$

$$GFOV_y = 2 \cdot H \cdot \tan^{-1} \left(\frac{FOV_y}{2} \right) = 750 \text{ m} \quad (2.10)$$

$$\text{Bir pikselin görüş alanı, IFOV} = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{w}{2 \cdot f} \right) = 0,0066 \text{ derece} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11) yardımı ile bir pikselin görüş alanı olan IFOV değeri hesaplanmıştır. Odak uzaklığı ve dedektör boyutları belirlenerek yapılan sistem hesaplamalarının değerleri Tablo 2.5'te özetlenmiştir.

Tablo 2.5. Sistem Hesaplamaları

FOV _d	1,60 derece
FOV _y	2,14 derece
Yersel Çözünürlük	2,33 m
IFOV	0,0066 derece
GFOV _d	560 m
GFOV _y	750 m
f/#	4,28

2.4. Optik Sistemin Tasarlanması

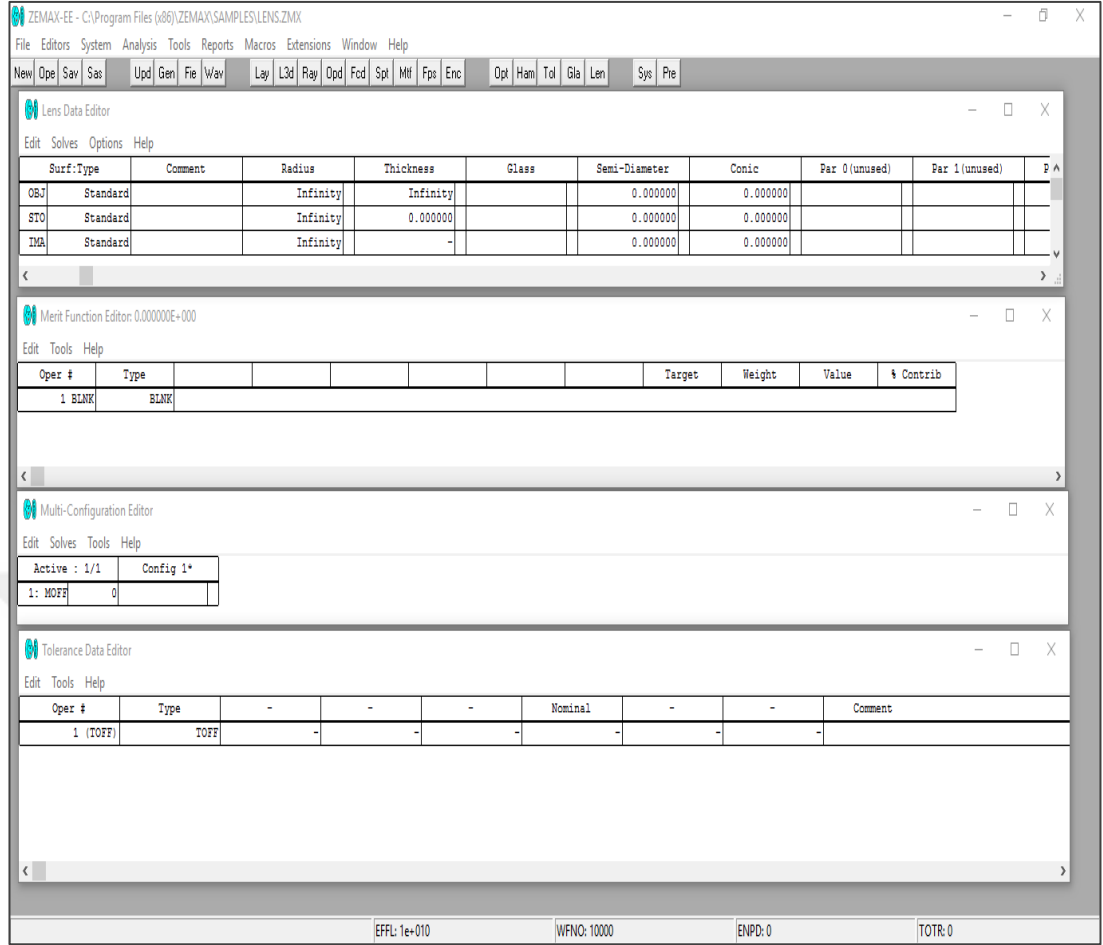
Bu çalışmada 3-5 μm dalga boyu aralığında orta kızılötesi bölgede çalışan bir görüntüleme sisteminin optik tasarımı, Zemax isimli optik tasarım yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanacak optik sistemin özellikleri için gerekli temel parametreleri önceki bölümde tanımladıktan sonra Ritchey Chrétien teleskobik yapısında bir görüntüleme sistemi tasarlanmıştır. Akromatik yapıda mercekler kullanarak elde edilen görüntünün sıcaklık değişimleri ile odak dışına çıkmaması sağlanmıştır.

Çoğunlukla kullanılan optik tasarım yazılımları OSLO, Zemax, Trace Pro & CODE V' tır. Optik tasarım yazılımının seçimi, uygulamanıza bağlıdır.

Zemax optik tasarım yazılımı, optik sistemlerin doğru ve ayrıntılı modellenmesine olanak tanıyan güçlü bir programdır. Zemax, hemen hemen her optik sistemi tasarlamayı, optimize etmeyi ve performans parametreleri ile analiz etmeyi sağlar [62].

Bu program, kırıcı, yansıtıcı optik sistemleri modellemek için ışın izlemeyi kullanmaktadır. Tasarımda kullanılacak optik bileşenlerin özellikleri girilerek sistemin sapma değerleri, ışınların izlediği yol ve görüntü büyütme oranı gibi birçok değer hesaplanabilir [63].

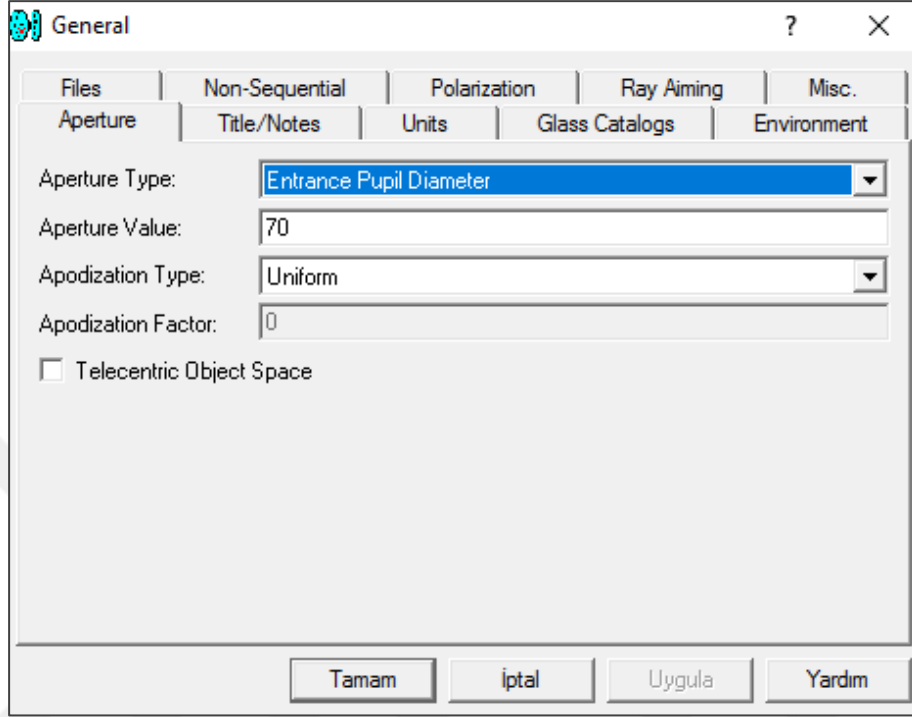


Şekil 2.5. Zemax başlangıç ekranı

Zemax yazılımının ara yüzü kullanımı kolay olacak şekilde tasarlanmıştır. Zemax başlangıç ekranı Şekil 2.5’ te görülmektedir, editörlerin birincisi, tüm optik yüzeylerin tanımlandığı “Mercek Bilgi Editörü” (Lens Data Editor)’dür. İkincisi, bir başarı işlevinin optimizasyonuna izin veren “Değer Fonksiyonu Editörü” dür. (Merit Function Editor). Üçüncüsü, aynı sistemin birden çok konfigürasyonunun tek bir dosyada modellenmesine izin veren "Multi Configuration" editörü, dördüncüsü ve sonuncusu, optik sistem üzerindeki toleransların tanımlanmasının yapıldığı "Tolerance Data" düzenleyicisidir [64, 65].

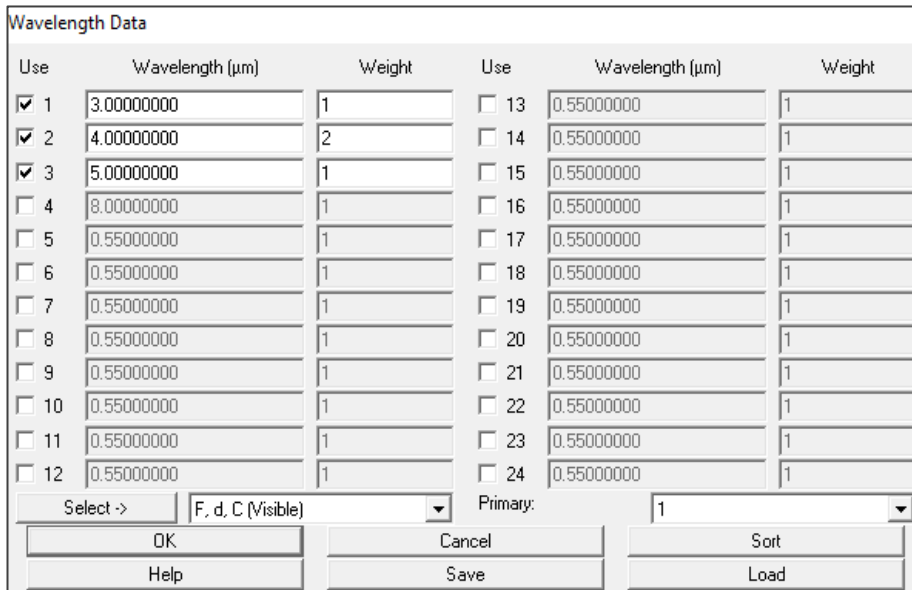
Sistemin sınırlayıcı parametrelerinden biri olan giriş açıklığı, genel sistem bilgisi (General System Data) kullanılarak, Şekil 2.6’ da görüldüğü gibi Zemax yazılımına 70 mm girilmiştir.

Genel sistem bilgisi, oküler mercek sistemine ait açıklık tipi (Aperture type), açıklık değeri (Aperture value), sisteme ilişkin notlar, sistemde kullanılan birimler gibi sistem hakkındaki genel bilgilerin belirlenebildiği bir iletişim kutusudur [64, 65].



Şekil 2.6. Genel sistem bilgisi iletişim kutusu

Şekil 2.7’ de verildiği gibi çalışacağı dalga boyu ve ağırlıkları, dalga boyu bilgisi (Wavelength Data) kullanılarak sisteme girilmiştir.



Şekil 2.7. Dalga boyu bilgisi iletişim kutusu

Zemax, değer fonksiyon editöründe, optimizasyon işlemcilerini destekler. Her bir işlemcinin hedefini gösteren bir ağırlık verilebilir. Bu tez çalışmasında EFFL, AMAG, işlemcileri kullanılmıştır [64, 65].

EFFL, istenilen etkili odak uzaklığı değerinin tanımlandığı işlemcidir. AMAG açısız büyütmenin tanımlandığı işlemcidir [64, 65].

Mercek bilgi editörü kullanılan merceklerin parametrelerinin, eğrilik yarıçaplarının, kalınlıklarının, malzemelerinin, tanımlandığı bir editördür. Mercek bilgi editöründeki değerler sistemin optimizasyonu esnasında değiştirilmektedir, optimizasyon esnasında değiştirilecek olan değerler, “Variable” şeklinde tanımlanabilmektedir [64, 65].

Tasarım yapılırken farklı mercek malzemeleri kullanılmış, mercekler ve aynalar arası mesafe, kalınlıkları sisteme girilmiştir. Değişkenler izlenerek en iyi sistem elde edilene kadar optimizasyon işlemi tekrarlanmıştır. Tablo 2.6 ve Tablo 2.7’de mercekler ve aynalar ile ilgili sistem girdileri verilmiştir.

Tablo 2.6. Görüntüleyici tasarımının mercek girdileri

MERCEK	YARIÇAP (mm)	KALINLIK (mm)	ÇAP (mm)	MALZEME (mm)
1	178,644	5,00	10,00	SILICON
2	59,042	5,00	10,00	CAF2
3	20,388	5,00	10,00	KRS5
	61,884	8,46	10,00	

Tablo 2.7. Görüntüleyici tasarımının ayna girdileri

AYNA	YARIÇAP (mm)	KALINLIK (mm)	ÇAP (mm)	KONİKLİK
1.	-172,857	-55	35	-1,135
2.	-85,161	103	15	-3,870

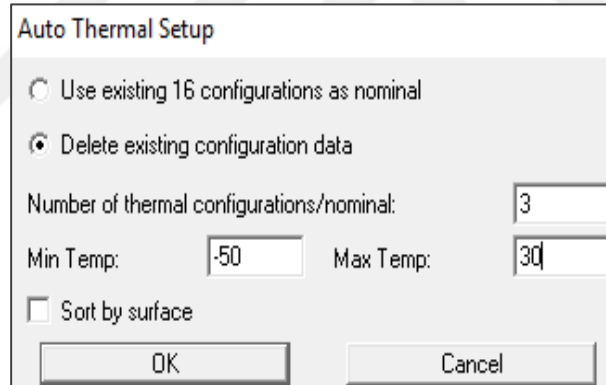
Zemax içindeki multi-configuration düzenleyicisi, tasarımı bir sıcaklık aralığında düzenlemek için kullanılabilir.

Termal analiz, Şekil 2.8'de görülebileceği gibi, multi-configuration düzenleyici' deki araçlar menüsü altında ısı yap (Make Thermal)'ı seçerek gerçekleştirilir.



Şekil 2.8. Multi configuration editör

Şekil 2.9' da gösterildiği gibi doldurulabilir.



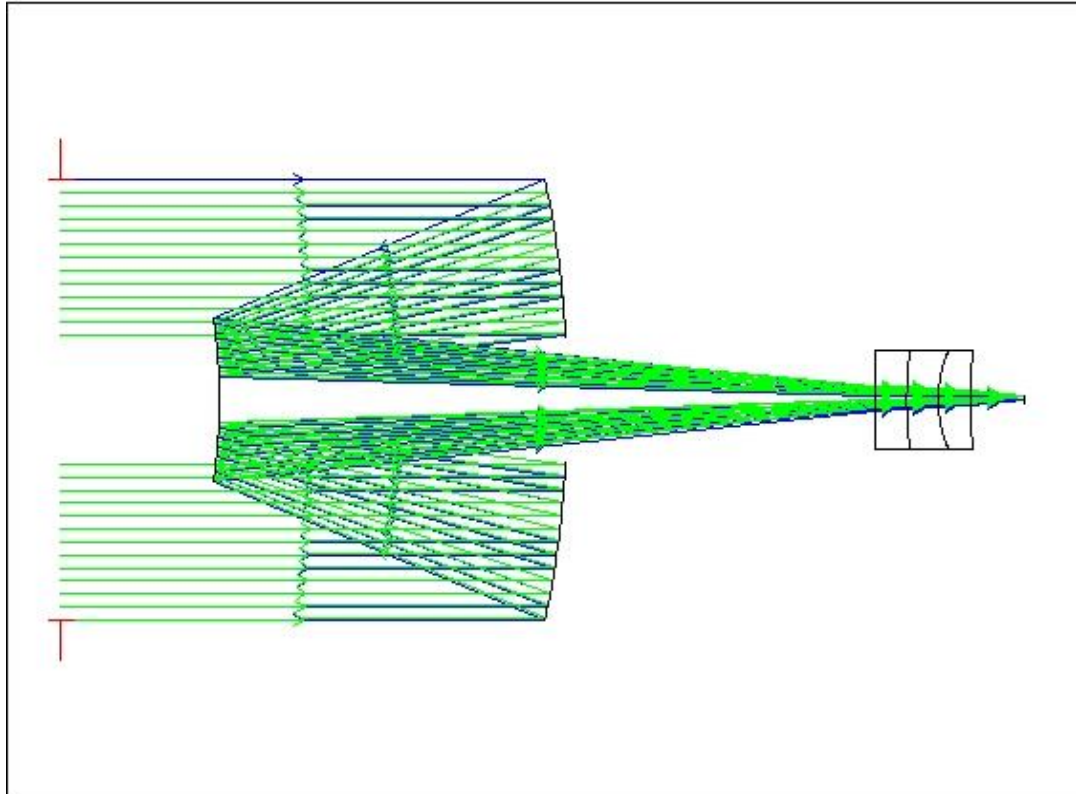
Şekil 2.9. Auto termal setup

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi Zemax -50°C' den 30°C' ye 3 tane konfigürasyon üretmiştir. Konfigürasyonlar seçilerek değişimleri görülebilir.

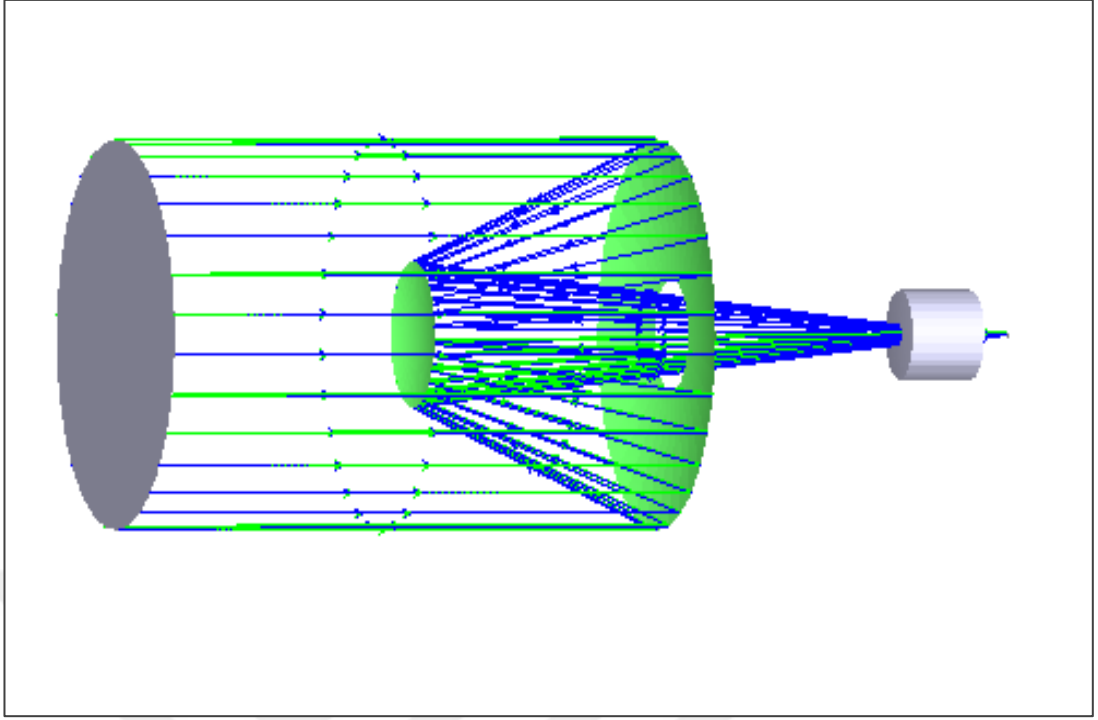
Görüntüleyici tasarımının iki boyutlu gösterimi Şekil 2.11'de ve üç boyutlu görünümü ise 2.12'de verilmiştir.

Multi-Configuration Editor										
Edit Solves Tools Help										
Active : 1/4		Config 1*		Config 2		Config 3		Config 4		
1: TEMP	0	0.000000	-50.000000	-10.000000	30.000000					
2: PRES	0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000					
3: CRVT	2	-5.78513E-003	-5.78513E-003	T	-5.78513E-003	T	-5.78513E-003	T	-5.78513E-003	T
4: CRVT	3	-0.011742	-0.011742	T	-0.011742	T	-0.011742	T	-0.011742	T
5: CRVT	4	5.597704E-003	5.598438E-003	T	5.597851E-003	T	5.597264E-003	T	5.597264E-003	T
6: CRVT	5	0.016937	0.016953	T	0.016940	T	0.016927	T	0.016927	T
7: CRVT	6	0.049047	0.049190	T	0.049075	T	0.048962	T	0.048962	T
8: CRVT	7	0.016159	0.016206	T	0.016168	T	0.016131	T	0.016131	T
9: THIC	1	80.000000	80.000000	T	80.000000	T	80.000000	T	80.000000	T
10: THIC	2	-55.000000	-55.000000	T	-55.000000	T	-55.000000	T	-55.000000	T
11: THIC	3	103.593366	103.593342	T	103.593361	T	103.593380	T	103.593380	T

Şekil 2.10. Multi configuration editör



Şekil 2.11. Görüntüleyici tasarımının iki boyutlu gösterimi



Şekil 2.12. Görüntüleyici tasarımının üç boyutlu gösterimi

3. OPTİK BAŞARIM VE ANALİZLER

Görüntü kalitesi kriterleri, bir optik sistemin görüntüleme performansını tanımlar. Görüntü kalitesi kriterleri genellikle nokta diyagramları, modülasyon transfer fonksiyonu grafikleri, biçim bozulması diyagramları, dalga cephesi hataları gibi metriklerle tanımlanır. Tablo 3.1' de verildiği gibi analiz ifadeleri geometrik ve kırınım olarak ikiye ayrılabilir.

Geometrik analiz ifadeleri, bir sistem boyunca geometrik optik ve ışın izlemesi ile hesaplanabilir. En yaygın geometrik görüntü kalitesi ifadesi nokta diyagramıdır. Çevrelenen enerjiyi hesaplamak içinde kullanılabilir. Modülasyon transfer fonksiyonu MTF hem geometrik hem de kırınım metriktir. Dedektör gibi görüntüleme sisteminin diğer yönlerinin görüntü kalitesini nasıl etkileyeceğini anlamamıza olanak tanır. Optik Mtf' yi ve dedektör Mtf' yi aynı grafikte çizerek Mtf' nin faydası anlaşılabilir [66-68].

Tablo 3.1. Geometrik ve kırınım görüntü kalitesi metriklerinin karşılaştırılması [66]

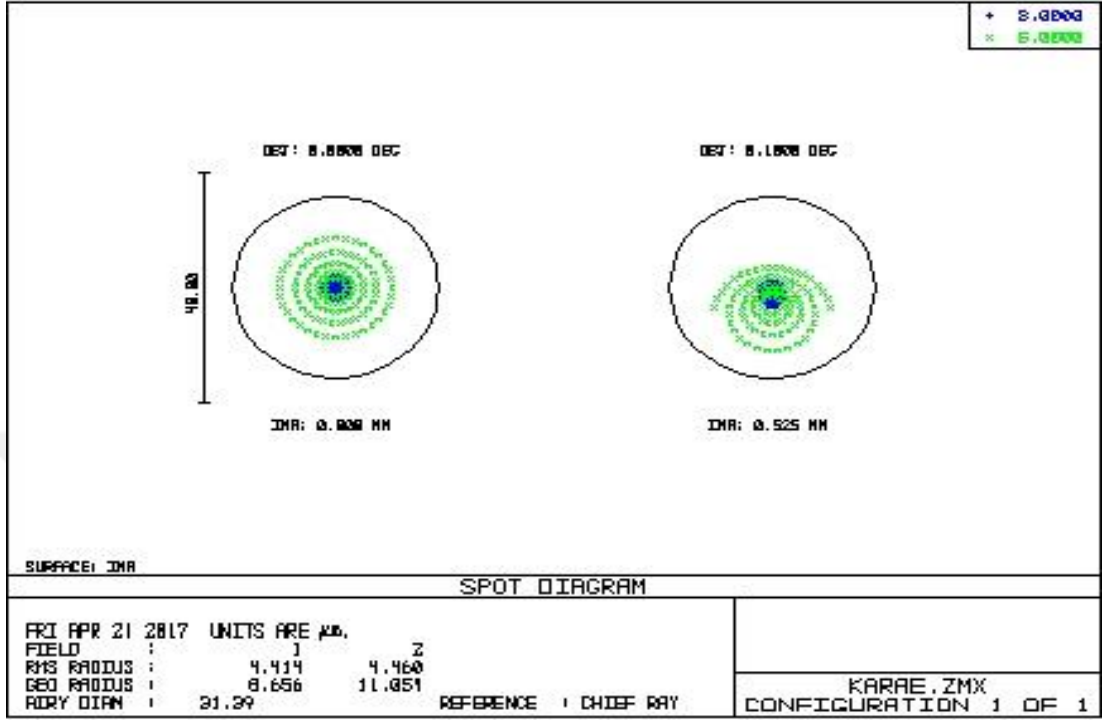
Geometrik	Kırınım
MTF	MTF
% Kapalı Enerji	% Kapalı Enerji
RMS WFE	---
Nokta Diyagramı	PSF

3.1 Nokta Diyagramı Analizleri (Spot Diagram)

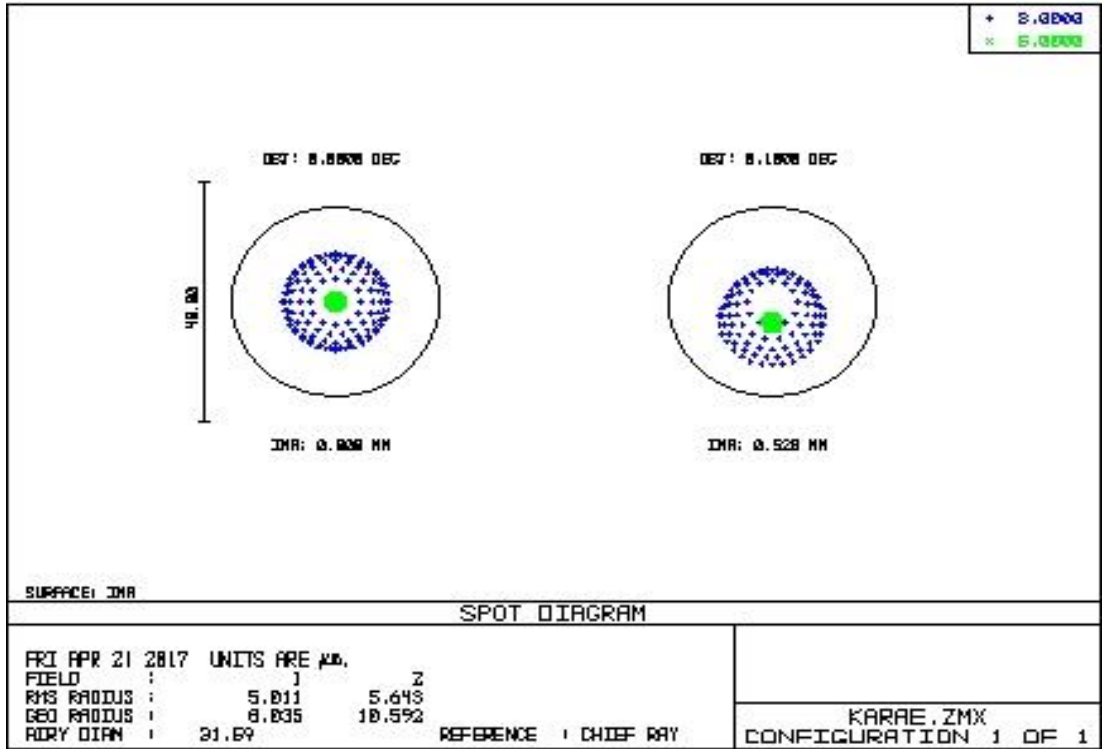
Nokta diyagramları, Zemax' te çok kullanışlı bir analiz aracıdır. Tasarlanan optik sistem tarafından asal odakta oluşturulan geometrik görüntü bulanıklığıdır [69]. Lens sistemi tarafından oluşturulan geometrik bir noktanın yapısını analiz etmek ve çeşitli sapmaların göreceli büyüklüğünü görselleştirmek için kullanılan bir yoldur [70].

Nokta diyagramının şekli, genellikle görüntüde hangi tür sapmaların olduğunu gösterir. Daha sıkı spot diyagramı daha az kusur verir. Aberasyon yoksa tek noktadır.

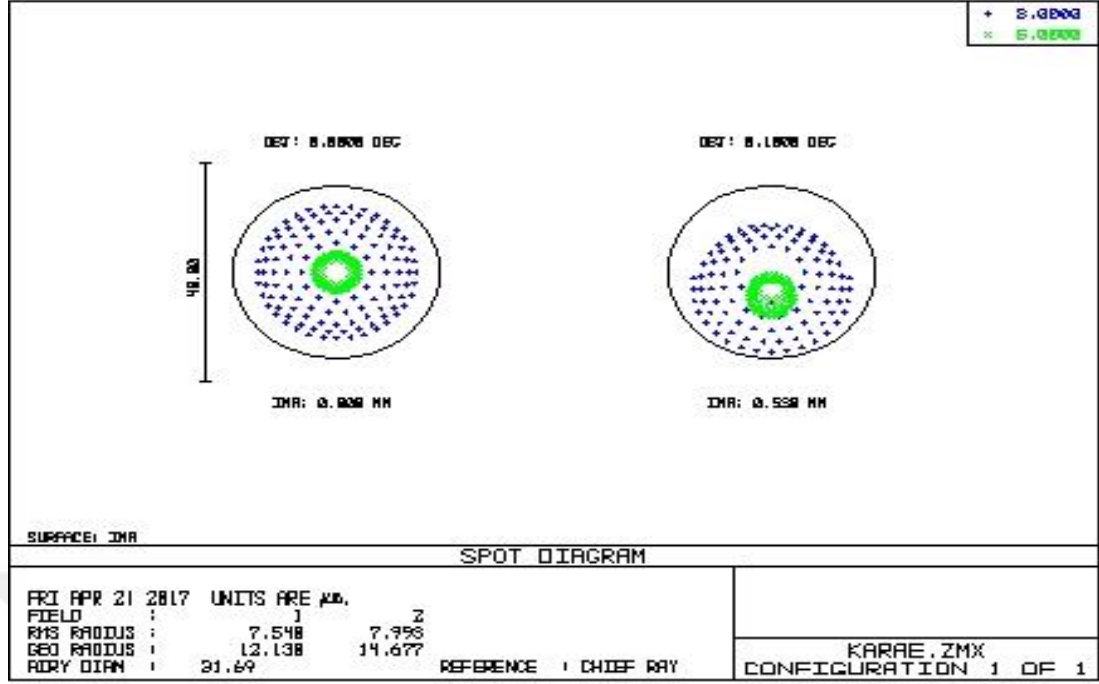
Optik çözünürlük değerleri arasında kalacak piksel boyutlu bir dedektör kullanmak uygun olacaktır [63, 70-72].



Şekil 3.1. -50 °C'lik sıcaklıktaki nokta diyagram



Şekil 3.2. 0°C' lik sıcaklıktaki nokta diyagram



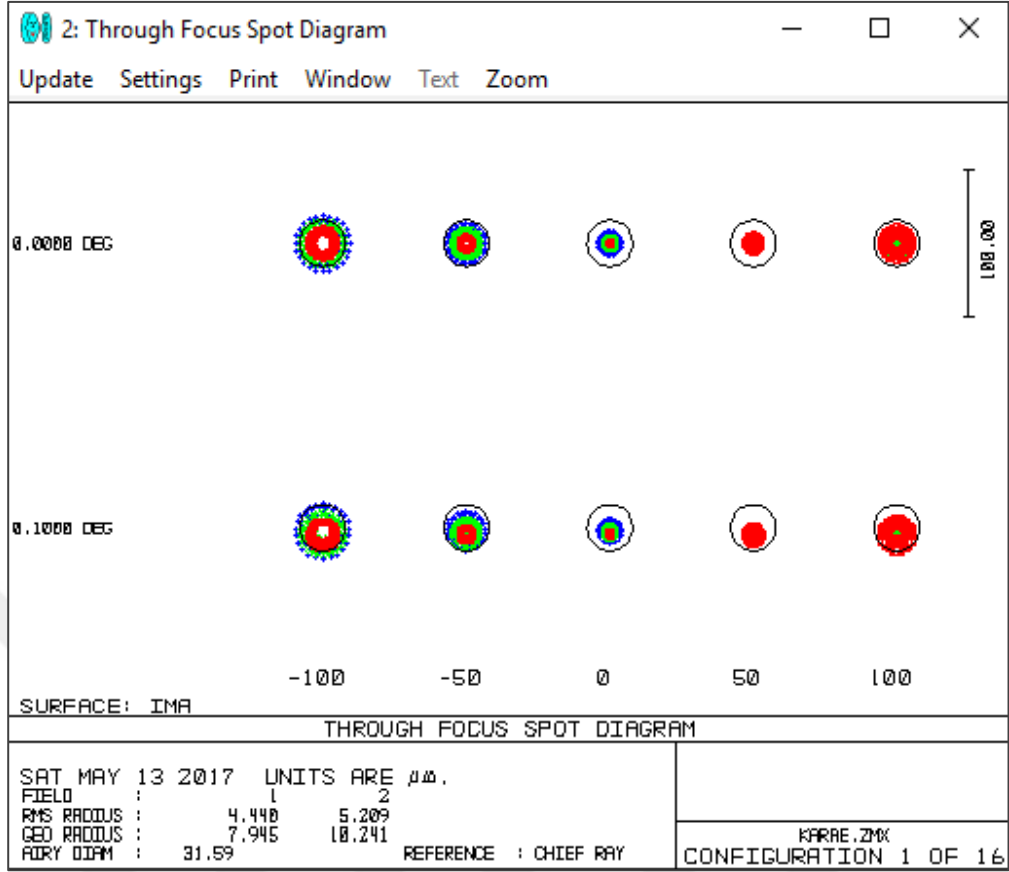
Şekil 3.3. +30 °C’ lik sıcaklıktaki nokta diyagramı

Şekil 3.1, 3.2, 3.3’ te verilen grafikler incelendiğinde 0 mm’ de tanımlanan alan noktası sol köşede gösterilmekte ve bu noktadaki ışın dağılımı yüksek ve düşük sıcaklıklarda farklılıklar göstermektedir. -50 °C için 4,414 μm, 0 °C için 5,011 μm, +30 °C için 7,548 μm rms’ lik bir alanda oldukları görülmektedir.

Bu tasarımın oluşturulmasında kullanılan en önemli kriterden biri, nokta diyagramının, dedektörün tek pikselinden (35μm'den az) daha küçük olması ve üzerine yoğunlaşmasıdır. Çünkü elektro-optik sistem çözünürlüğü optik bulanıklığın çapına ve tek detektör elemanın (piksel) boyutuna bağlıdır.

Şekillerde gösterildiği gibi noktayı çevreleyen Siyah halka (Airy Disk) çapını göstermektedir, 31,69 μm ve istenilen dalga boyu aralığındaki değerler yüksek ve düşük sıcaklıklarda dedektör piksel boyutu olan 35 μm’ nin içindedir, bu tasarımda hedef kriter karşılanır.

-50 °C’ lik sıcaklık için odak boyunca nokta diyagramı Şekil 3.4’ te verilmiştir.



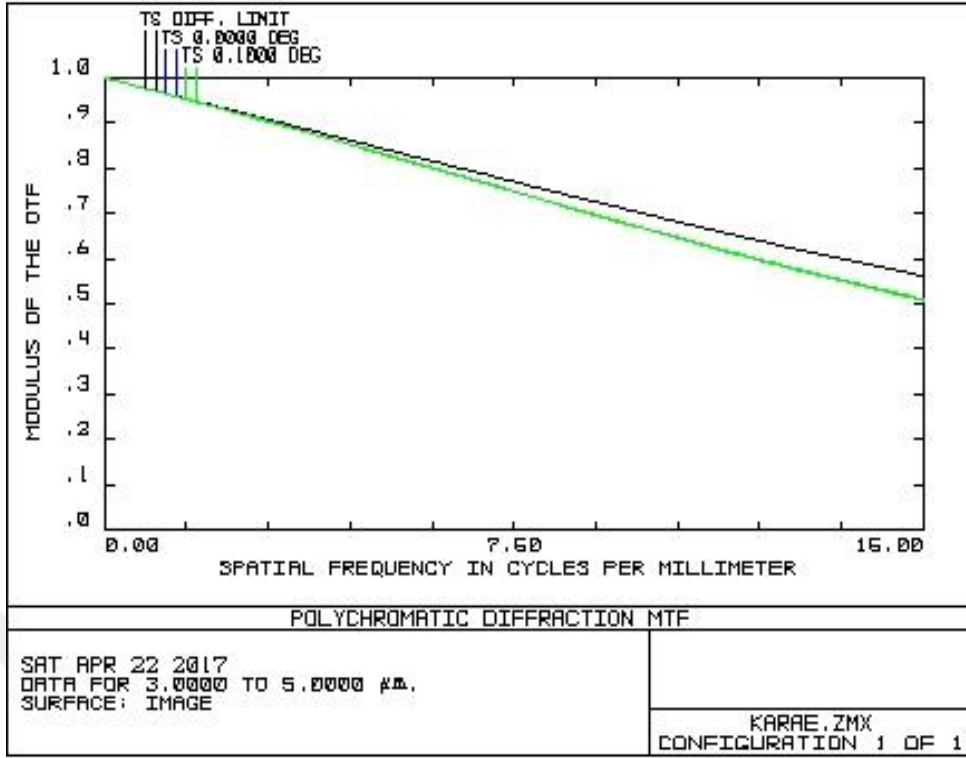
Şekil 3.4. -50 °C' lik sıcaklık için odak boyunca nokta diyagramı

3.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF)

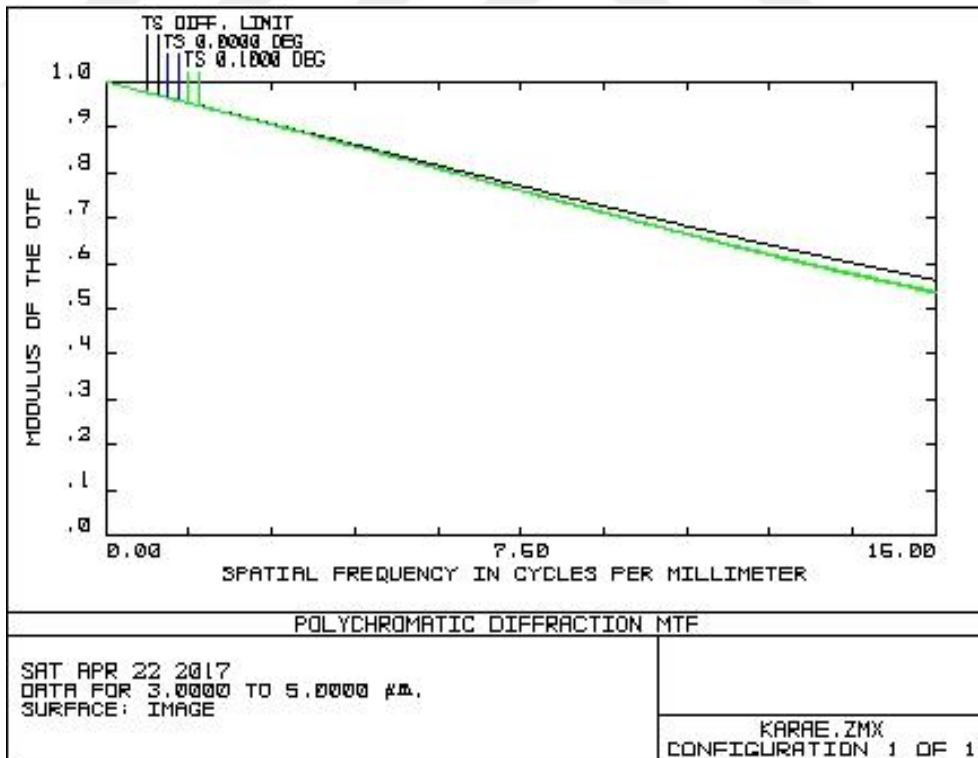
Modülasyon transfer fonksiyonu, Mtf görüntüleme sisteminin bileşenlerini temel alan çözünürlük performansını değerlendiren, optik sistem tasarımında önemli bir parametredir. Mtf' yi tanımlamak için görüntü performansını karakterize eden iki terimi kontrast ve çözünürlüğü tanımlamalıyız.

Çözünürlük optik sistemin nesne detayını ayırt etme yeteneğidir. Optik sistemin 1 mm'de ayırt edebildiği bir siyah bir de beyaz çizgi çifti sayısı frekans olarak ta bilinir. Frekansın yüzde oranı MTF değerini verir. Yüksek çözünürlüklü görüntüler, büyük miktarda ayrıntı sergileyen görüntülerdir.

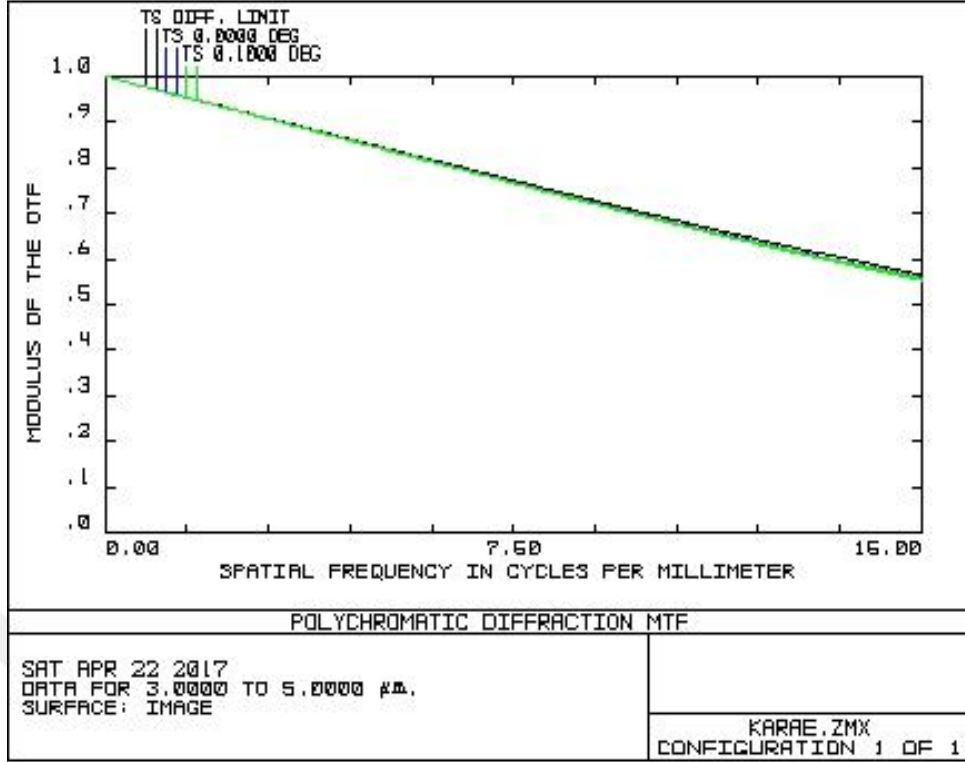
Bir görüntünün kontrastı, o görüntüdeki en parlak bölüm ile en karanlık bölüm arasındaki farktır. Kısaca MTF optik sistemden görüntüye belirli bir çözünürlükte kontrast aktarabilme yeteneğinin ölçüsüdür [73, 74]. Genel olarak, MTF ne kadar genişse çözünürlük o kadar iyidir.



Şekil 3.5. -50 °C' lik sıcaklıktaki MTF grafiği



Şekil 3.6. 0 °C' lik sıcaklıktaki MTF grafiği



Şekil 3.7. 30 °C' lik sıcaklıktaki MTF grafiği

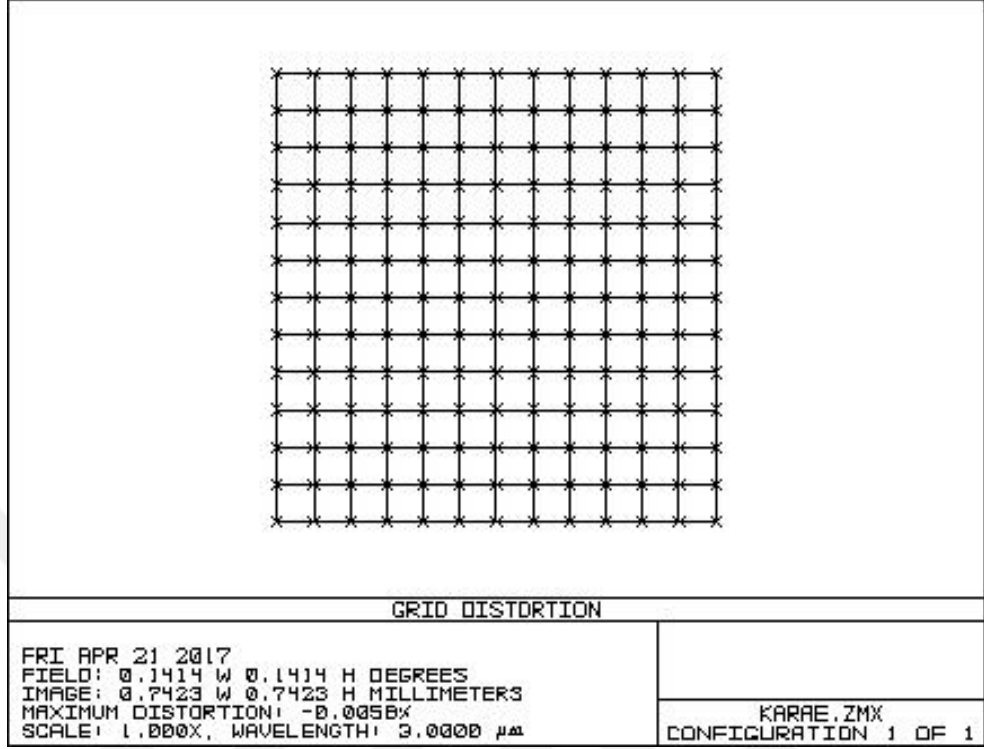
MTF grafiği değerlendirilirken uzaysal frekans değeri “nyquist frequency” olarak tanımlanan limit frekansına göre değerlendirilir [74]. Bu değer Denklem (3.1) ile hesaplanmaktadır,

$$\text{limit frekans değeri} \left(\frac{\text{cycle}}{\text{mm}} \right) = \frac{1}{2 \cdot w} \quad (3.1)$$

Bu çalışmanın optik tasarımıda 35 μm piksel büyüklüğüne sahip dedektör seçilmiştir. Bu durumda ilgili limit frekans değeri denklem (3.1)'de görüldüğü üzere 14 cycle/mm olarak bulunmaktadır. MTF' nin Nyquist frekansındaki en düşük değeri (14 cycle/mm) 0,56 değerine sahiptir. Ve -50 °C sıcaklığında MTF değeri kırınım sınırına çok yakındır, bu nedenle bu değer tasarlanan optik sistemde iyi karşılanmaktadır.

Şekiller 3.5, 3.6, 3.7' de verilen grafikler incelendiğinde -50°C için iyi başarımlar sergilerken nokta diyagramı analizinde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda başarımlarının azaldığı gözlenmektedir.

3.3. Biçim Bozulması



Şekil 3.8. -50 °C’ lik sıcaklıktaki biçim bozulması

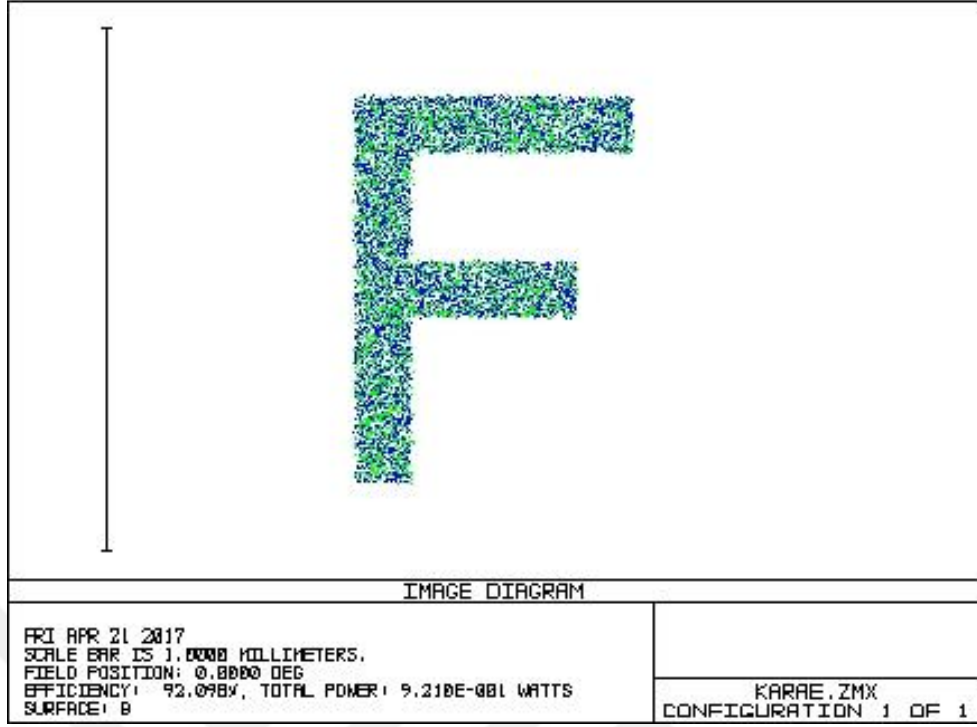
Optik tasarımının biçim bozulması diyagramı Şekil 3.8’ de gösterilmektedir. Şekilde görülen çarpı işaretleri gerçek sistemdeki görüntülerin, mükemmel sistemden sapmalarını göstermektedir.

Sistemde -0,0058% değerinde, küçük miktarda içbükey (pincushion) biçim bozulması olduğu görülmektedir.

3.4. Geometrik Görüntü Analizi (Geometric Image Analysis)

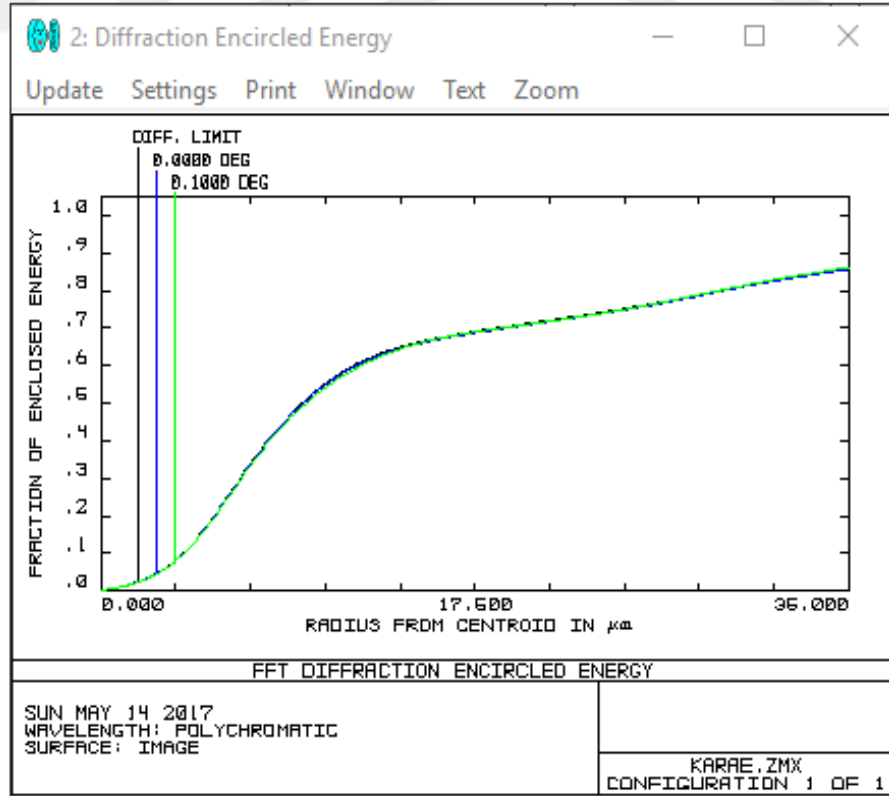
Geometrik görüntü analizi ile tasarlanan optik sistemden iletilen toplam gücün watt cinsinden verimliliği ifade edilir.

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi optik sistemin görüntüyü alma verimliliği %92,098’dir.



Şekil 3.9. -50°C' lik sıcaklıktaki geometrik görüntü analizi

3.5. Kapalı Enerji Analizi (Encircled/Ensquared Energy)

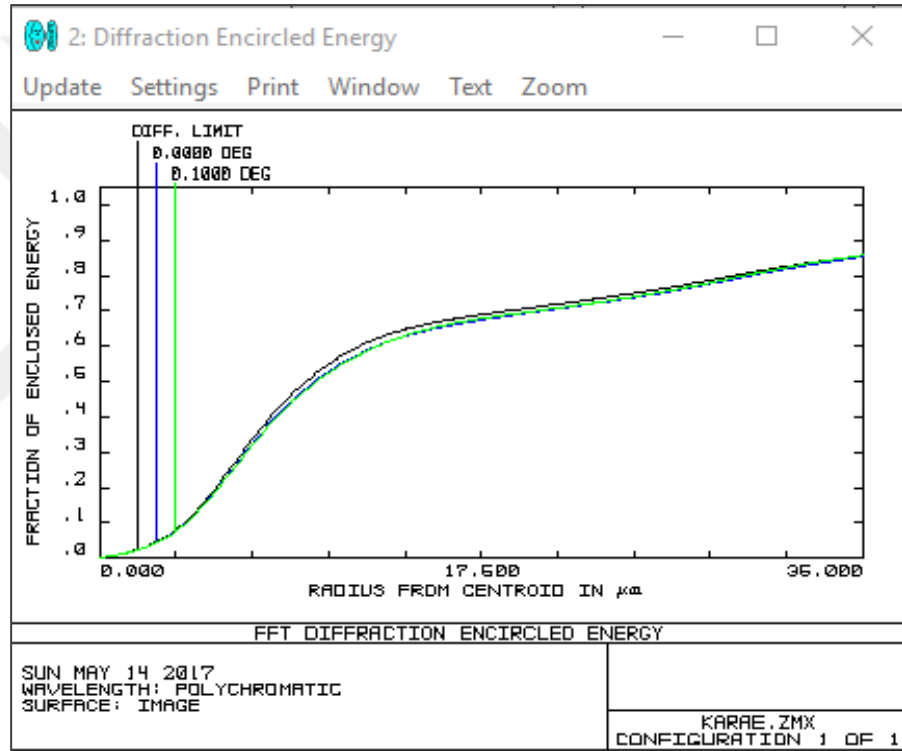


Şekil 3.10. -50 °C sıcaklıktaki kapalı enerji grafiği

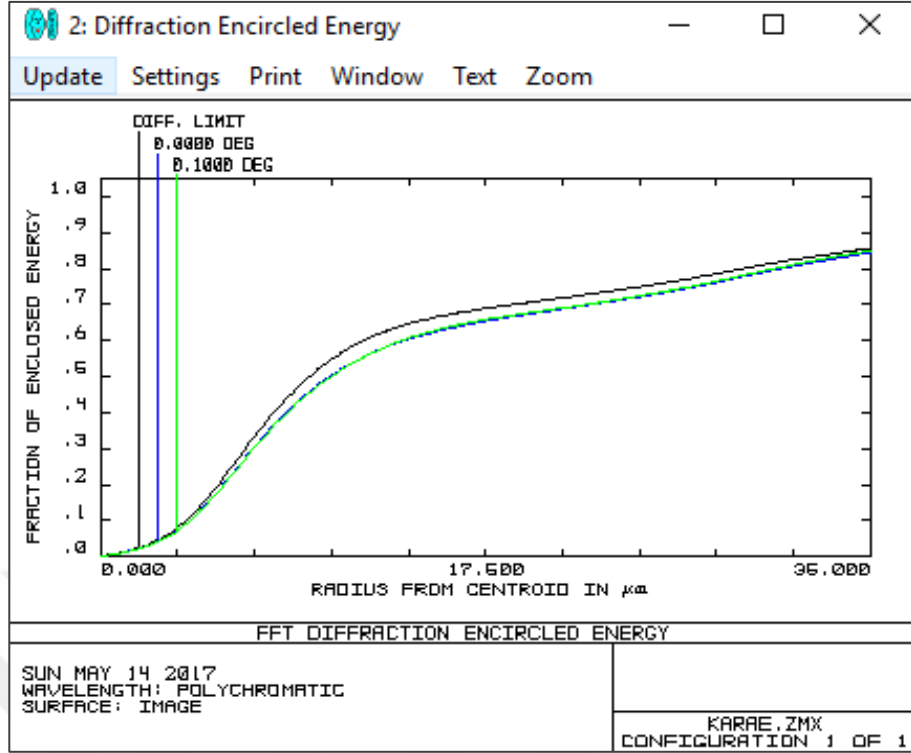
Nokta kaynağın görüntüsünden görüntü merkezinin uzaklığının fonksiyonu olarak kapsanan toplam enerjinin yüzdesidir. Bulanıklık yarıçapının fonksiyonu olarak bulanıklığın enerji yüzdesini gösterir.

Bu tez çalışmasında kullanılan dedektörün piksel aralığı 35 μm ' dir. Bir nokta nesneden gelen kapalı / çevrelenmiş enerjinin 0,8' den fazla olarak bu piksel çapına düşmesi güvenilir bir sonuç olarak kabul edilebilir.

Şekil 3.10' da gösterildiği gibi, kapalı / çevrelenmiş enerji grafiğinin -50 °C sıcaklıktaki gösteriminde % 0,8537' dir. Elde edilen bu sonuç dedektörümüzle uyuşmaktadır.



Şekil 3.11. 0 °C sıcaklıktaki kapalı enerji grafiği



Şekil 3.12. 30 °C sıcaklıktaki kapalı enerji grafiği

Farklı sıcaklıklardaki kapalı enerji grafikleri Şekil 3.11 ve 3.12’ de verilmiştir. Kırınım limiti eğrisi teorik olarak istenilen parametreler ile ulaşılabilecek en yüksek kapalı enerji grafiğini temsil etmektedir [75].

Yüksek sıcaklıklara gidildikçe dedektör merkezinden kenarlarına doğru kırınım sınırından çok küçük miktarda uzaklaştığı görülüyor. Bu nedenle bu değer tasarlanan optik sistemde iyi karşılanmaktadır.

3.6. Seidel Katsayıları (Seidel Coefficient)

Optik sapmaların toplu gösterimi Seidel diyagramıdır. Bu sapmalar birinci bölümde anlatılmıştır. Sistemi oluşturan her bir elemanın oluşturduğu sapmalar ve bu sapmaların toplamı bu diyagramda incelenebilir.

Bu tez çalışmasının Seidel diyagramı Şekil 3.13’deki gibidir. Şekil de görüldüğü gibi S1’e karşılık gelen küresel aberasyondur. S2 ise komadır. S3 ve S4 ise astigmatizm ve alan eğriliğidir. S5 ise biçim bozulması (distortion)’ dır. Bu 5 aberasyon monokromatik aberasyonlar olarak bilinir.

Seidel Aberration Coefficients:										
Surf	SPHA	S1	COMA	S2	ASTI	S3	FCUR	S4	DIST	S5
STO	0.000000		0.000000		0.000000		0.000000		0.000000	
2	-0.078691		-0.005480		-0.000020		-0.000043		-0.000000	
3	0.080519		0.005754		0.000053		0.000088		0.000000	
4	-0.001535		0.000100		-0.000007		0.000015		-0.000001	
5	0.000066		-0.000044		0.000029		-0.000026		-0.000002	
6	-0.000003		-0.000011		-0.000051		0.000052		0.000007	
7	0.000889		-0.000070		0.000006		-0.000035		0.000002	
IMA	0.000000		0.000000		0.000000		0.000000		0.000000	
TOT	0.001246		0.000249		0.000011		0.000050		0.000008	

Şekil 3.13. Seidel katsayıları (Seidel coefficient)

Şekil 3.13'te İkinci satır (2 numara), birinci aynanın kusurlarını göstermektedir. Birinci aynanın oluşturduğu kusurlar negatif yöndedir. Üçüncü satır (3 numara) ikinci aynanın oluşturduğu kusurlar görülmektedir ve bu kusurlar pozitif yöndedir.

TOT işareti ile gösterilmiş bölgede optik sistemin sahip olduğu kusurların toplam değeri görülmektedir. Her mercek farklı seviyelerde farklı optik kusurlara sahiptir. 4, 5, 6 ve 7 numaralı satırlar farklı mercek yüzeylerini ifade etmektedir. Her bir yüzeydeki kusurlar kendi toplamalarında birbirlerini yok etmektedir. Dolayısı ile optik sistemdeki kusur minimum seviyeye inmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son zamanlarda uydu ve uçaklara göre daha hızlı, düşük maliyetli ve hassas olan yüksek irtifa platformları uzaktan algılamada da kullanım alanı bulmuştur. Bu tez çalışmasında yüksek irtifa platformlarında kullanılabilecek 3–5 µm dalga boyu aralığında çalışabilen, -35 °C ile +50° C arasındaki sıcaklık değişiminden etkilenmeyen bir görüntüleyici optik tasarımı yapılmıştır. Avantajlarından dolayı Ricthey Criterian tipi teleskop sistemi seçilmiştir.

Sıcaklığa, görüş açısına, optik malzeme tipine, dedektör çözünürlüğüne ve dedektör piksel boyutuna bağlı olarak değişen gereksinim ve parametreler belirlenmiş ve bunların doğrultusunda tanımlanan durum için görüntüleyici sistemi oluşturulmuştur.

Belirlenen değerler ile FOV, IFOV gibi parametreler hesaplanmıştır. Zemax optik tasarım programının yardımıyla özellikleri 300 mm odak uzaklığına sahip, yersel çözünürlüğü 2,30 m, çalışma uzaklığı 20 km, f numarası 4,28, giriş açıklığı 70 mm, piksel boyutu 35 µm olan bir sistem tasarlanmıştır.

Tasarlanan görüntüleme sisteminin optik performanslarının MWIR bandında çalışacak bir kamera için yeterli olduğu teorik olarak gösterilmiştir. Tasarıma ait analizler, tanımlanan sıcaklık aralığında kırınım limitleri içindedir. Analiz yorumlarında da belirtildiği üzere kırınım limitlerinden uzaklaşma eğilimi gereksinimlerde tanımlanan sıcaklık aralığında minimum düzeyde olması nedeniyle bu çalışma tasarlanan görüntüleme sisteminin üretilmesi ve sistemin performansının teorikte elde edilen bilgiler ile uyumluluğunun incelenmesi yönünde sürdürülebilir.

Sonuç olarak tasarımı ve analizleri yapılan orta kızılötesi bantta çalışan kızılaltı görüntüleyici sistemi özellikle deniz trafiği, gemi atıkları gibi denizcilik uygulamalarında ve diğer kızılaltı ışımaya yapan objeleri gözlemede büyük kolaylık sağlayan ve üretilebilir bir optik sistemdir.

KAYNAKLAR

- [1] Hawkes J. F. B., Wilson J., *Optoelektronik*, 3rd ed., Değişim Yayınları, Sakarya, 2000.
- [2] Barbara S., IR Imaging Explained: a Brief Non-technical Introduction to What You Can't See, HEICO Company, <http://www.infratherm.com.au/infrared-imaging-explained.html/>, (Ziyaret tarihi: 05 Şubat 2017).
- [3] Hudson R. D., *Infrared System Engineering*, 1rd ed., Wiley-Interscience, USA., 1969.
- [4] Ülker O. E., Uzun Kızıl Ötesi Bölgede Çalışan Kuantum Kuyulu Kızıl Ötesi Fotodedektörlerin Mikro-Nano Fabrikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 305930.
- [5] Piotrowski J., Rogalski A., Uncooled Long Wavelength Infrared Photon Detectors, *Infrared Physics & Technology*, 2004, **46**, 115-131.
- [6] Öztürk A., Kızılötesi Dedektör Teknolojilerinin İncelenmesi ve Kritik Parametrelerin Dedektör Verimliliği Açısından Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011, 299586.
- [7] Anderson C. R., Infrared-Absorbing Gases and the Earth's Surface Temperature a Relatively Simple Baseline Evaluation of the Physics, Objectivistindividualist, <https://objectivistindividualist.blogspot.com.tr/2013/02/infrared-absorbing-gases-and-earths.html>, (Ziyaret tarihi: 12 Şubat 2017).
- [8] Marquis, M., Handouts on Thermal Imaging System Theory, *Texas Instruments Incorporated Defens System and Electronics*, 1996, **47**, 164-168.
- [9] Cutten G. A., Comparison of Performance of 3-5 and 8-12-µm., *Applied Optic*, 1989, **28**, 23.
- [10] Gaussorgues G., *Infrared Thermography*, 1rd ed., Chapman&Hall, London, 1994.
- [11] Uçar A., Geniş Bant (3-12 µm) Atermal Kızılaltı Görüntüleyici Optik Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 285026.
- [12] Coakley J. A., Reflectance and Albedo Surface, Oregon State University, http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter9/Ency_Atmos/Reflectance_Albedo_Surface.pdf, (Ziyaret tarihi: 12 Şubat 2017).

- [13] Malinovski A., Zielinski R. J., High Altitude Platform-Future Infrastructure, *Intl Journal of Electronics And Telecommunications*, 2010, **56**, 191-196.
- [14] D'Oliveira F. A., De Melo F. C. L., Devezas T. C., High-Altitude Platforms - Present Situation and Technology Trends, *Journal Of Aerospace Technology And Management*, 2016, **8(3)**, 249.
- [15] Hasırcı Z., Yüksek Rakımlı Platform İstasyonlarda (HAPs) Yayılım Modellemesi ve Başarım Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011, 285364.
- [16] Pidwirny M., The Layered Atmosphere, University of British Columbia Okanagan, <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7b.html>, (Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2017).
- [17] Richharia M., David L., *Satellite Systems for Personal Applications: Concepts and Technology*, 1st ed., John Wiley & Sons, UK, 2010.
- [18] Tozer T. C., Grace D., High Altitude Platforms for Wireless Communications, *Electronics & Communication Engineering Journal*, DOI: 10.1.1.9.5610.
- [19] Uherek E., The Layers of the Atmosphere, Max Planck Institute, http://www.xplora.org/downloads/Knoppix/ESPERE/ESPEREdez05/ESPEREde/www.atmosphere.mpg.de/enid/0,55a304092d09/1__Understanding_the_stratosphere/_layers_lz.html, (Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2017).
- [20] Cheng D., Altitude Of A Commercial Jet, The Physics Factbook, <https://hypertextbook.com/facts/2003/DanielCheng.shtml>, (Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2017).
- [21] İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatı, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, https://iha.shgm.gov.tr/public/document/SHTIHA_REV1.pdf?AspxAutoDetectCookieSupport=1.
- [22] Fidler F., Knappek M., Horwath J., Leeb R. W., Optical Communications for High-Altitude Platforms, *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 2010, **16**, 5.
- [23] S. Karapantazis, Pavlidou F. N., Broadband Communications via HAPS – A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2005, **7**, 1.
- [24] El-Disi A., Utilizing High Altitude Platforms (HAPs) To Provide Wirelss Communications Coverage To Close Coverage Gaps - Case Study: Providing UMTS Service to the Non-Radar Coverage Area in The Gulf of Mexico, Master Thesis, Washington University, School of Engineering and Applied Science, Saint Louis Missouri, 2010.

- [25] Kip Z., İHA Görüntülerinin Anlamlandırılması Üzerine Bir Sistem Analizi Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013,33469.
- [26] Çomert R., Avdan U., Şenkal E., İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Gelecekteki Beklentiler, *IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2012)*, Zonguldak, Türkiye, 16-19 Ekim 2012.
- [27] Kaynak Ü., Yüksek İrtifa İnsansız Hava Araçlarının Gelişim Yönü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, <http://www.hho.edu.tr/uzhaf/pdf/UnverKAYNAK.pdf>, (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2017).
- [28] Dean T., A Lighter, Cheaper Satellite, *Cosmos 61*, <https://cosmosmagazine.com/technology/lighter-cheaper-satellite>, (Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2017).
- [29] Robinson T.D., Catling D.C., Unifying Planetary Atmospheres, NASA Ames Research Center, <https://astrobites.org/2013/12/31/unifying-planetary-atmospheres/>, (Ziyaret tarihi: 8 Şubat 2017).
- [30] Radecki A., NASA Recruits Unmanned Aircraft for Earth Science, NASA Ames Research Center, <https://www.space.com/6329-nasa-recruits-unmanned-aircraft-earth-science.html>, (Ziyaret tarihi: 8 Şubat 2017).
- [31] Hecht, E., *Hecht & Optik*, 4th Ed., Akademi Kitapevi, Ankara, 2005.
- [32] Hobbs P. C. D., *Building Electrooptical Systems*, 2nd ed., A John Wiley & Sons, New York, 2009.
- [33] Smith W.J., *Modern Optical Engineering*, 3rd ed., Mcgraw-Hill Professional Engineering, USA, 2000.
- [34] Jenkins F., White H., *Fundamentals of Optics*, 4rd ed., McGraw-Hill Education, USA, 2001.
- [35] Malacara, D. Malacara, Z., *Handbook of Optical Design*, 2nd ed., Taylor and Francis e-Library, USA, 2000.
- [36] Milton L., *Lens Design*, 2rd ed, CRC Press, Florida, 2006.
- [37] Cyzarine F., Optik Sistem Sapmaları Karakteristikleri ve Ana Tipleri, <http://www.fotik-city.ru/articlereview/aberration>, (Ziyaret tarihi: 8 Şubat 2017).
- [38] Lens Tutorial Selecting the Proper Lens, Thorlabs, <https://www.thorlabs.com/tutorials.cfm?tabID=4BD528B8-11B1-4D32-BE1-CB0C6EBF020C>, (Ziyaret tarihi: 20 Şubat 2017).

- [39] Dereniak E. L., Dereniak T. D.. *Geometrical and Trigonometric Optics*, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [40] Özdemir, S., Gürol, B., Demircan, O., *Astronomi ve Astrofizik*, 2nd ed., Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2006.
- [41] Strobel N., Types of Telescopes, Astronomy Notes, <http://www.astronomynotes.com/telescop/s2.htm>, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [42] Cumbres L., Refracting Telescopes, Las Cumbres Observatory, <https://lco.global/spacebook/refracting-telescopes/>, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [43] Mirrors and Etalons, The Center for Occupational Research and Development, http://pe2bz.philpem.me.uk/Lights/-%20Laser/Info-902-LaserCourse/c06-05/mod06_05.htm, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [44] Reflecting Newtonian Telescope, Science UNSW School of Physics, http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/light/reflecting_Newtonian_telescope.htm, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [45] Majewski S. R., Telescope Optics II: Aberrations, Diffraction Effects and Image Quality, University of Virginia, <http://www.faculty.virginia.edu/ASTR5110/lectures/optics2/optics2.html>, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [46] Novak K., Cassegrain Notes, <http://bobmay.astronomy.net/CassNotes/>, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [47] Lockwood M., Cassegrain Formulas and Tips, Amateur Telescope Making, http://www.loptics.com/ATM/mirror_making/cass_info/cass_info.html, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [48] How Ritchey-Chrétiens Work, Adventures In Astronomy & Nature, https://starizona.com/acb/basics/equip_telescopes_ritchey.aspx, (Ziyaret tarihi: 5 Mart 2017).
- [49] Ser H. R., Sandau R., *Small Satellites for Earth Observation*, 1st ed., Walter de Gruyter, Berlin, 2005.
- [50] Hamdani A., Ibrahim R., Athermalization of Optical Systems in Infrared, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2015, **5**, 5.
- [51] Daiker J., Athermalization Techniques in Infrared Systems, College of Optical Sciences, https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/J.-Daiker_521-Tutorial.pdf.
- [52] Povey V., Athermalisation Techniques in Infrared Systems, *Optical System Design Analysis Production for Advanced Technology Systems*, DOI:10.1117/12.93842.

- [53] Notation According to DIN 1335 and DIN 4522, Schneideroptics, <https://www.schneideroptics.com/nomenclature.htm>, (Ziyaret tarihi: 12 Mart 2017).
- [54] Joyce D., An Introduction to Infrared Detectors, NOAO Gemini Data Workshop, https://www.noao.edu/meetings/gdw/files/Joyce_IR.pdf, (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2017).
- [55] Optical Substrates Comprehensive Guide to Optical Glass, Thorlabs, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6973, (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2017).
- [56] Klocek P., Dekker M., *Handbook of Infrared Optical Materials*, 1st ed., CRC Press, USA, 1991.
- [57] Optical Materials, Newport, <https://www.newport.com/n/optical-materials>, (Ziyaret tarihi: 21 Mart 2017).
- [58] Habashi F., Thallium, Physical and Chemical Properties, *Encyclopedia of Metalloproteins*, DOI: 10.1007/978-1-4614-1533-6_432.
- [59] Paquin A. R., *Metal Mirrors*, 1st ed., Crc Press Llc, USA, 1999.
- [60] Dilar D., Yüksek Çözünürlüklü Kamera Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, 2015, 424069.
- [61] Ballı G. B., Mikro Uydu Kamera Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003, 143469.
- [62] Meena A., Optical Design Software Comparison, Holography, <http://genuineholographics.blogspot.com.tr/2011/03/technical-comparison-benefit-of-various.html>, (Ziyaret tarihi: 25 Mart 2017).
- [63] Fisher R. E., Biljana T., *Optical System Design*, 2nd ed., McGrawhill, USA, 2008.
- [64] Özyurt O., Termal ve Gece Görüş Dürbünlerinin Optiksel Bileşenleri için Tasarım Geliştirme, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 285038.
- [65] ZEMAX Optical Design Program User's Guide Version 10.0, Focus Software, <https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Zemax/ZemaxManual.pdf>, (Ziyaret tarihi: 25 Mart 2017).
- [66] Lightsey P. A., Image Quality for Large Segmented Space Telescopes, *Proceedings of SPIE*, DOI:10.1117/12.461220.

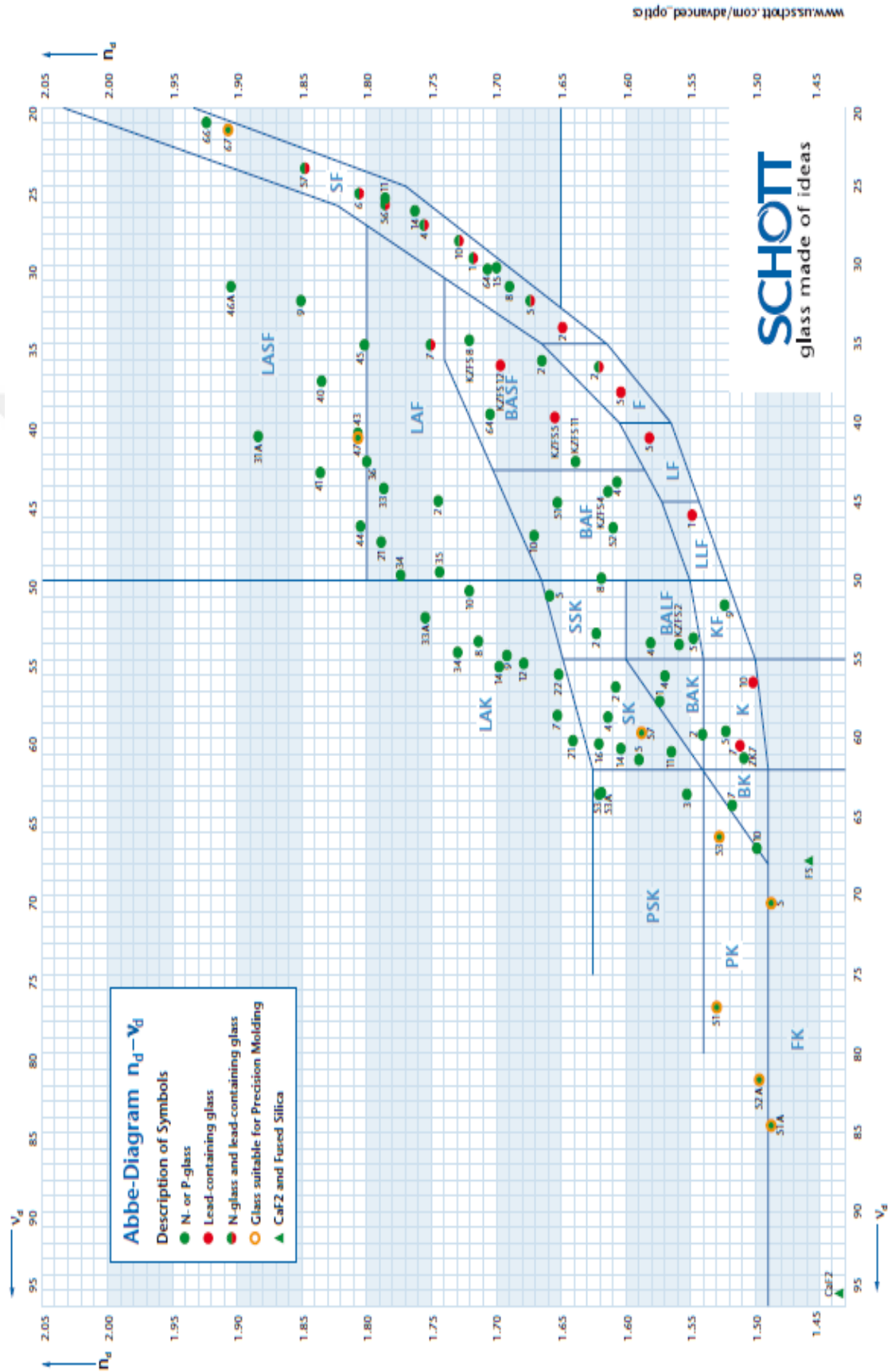
- [67] Grievenkamp J., *Field Guide to Geometric Optics*, 1st ed., Spie Press, Washington, 2004.
- [68] Hancock J. J., Image Quality Criteria –Which Metric Should I Use?, Optical Sciences 521, https://wp.optics.arizona.edu/.../Hancock_Opti521_Tutorial, (Ziyaret tarihi: 24 Mart 2017).
- [69] Irving B., Explaining What We Do: Gentle Introduction to Optical Design and Lens Design, Optical Solutions, <https://optics.synopsys.com/learn/learn-intro-optics-design.html>, (Ziyaret tarihi: 28 Mart 2017).
- [70] Juergens R., Image Quality, <https://wp.optics.arizona.edu/jsasian/wp-content/uploads/sites/33/2016/03/Opti517-Optical-Quality-2014.pdf>, (Ziyaret tarihi: 29 Mart 2017).
- [71] Geary M. J., *Introduction To Lens Design*, 1st ed., Willmann-Bell, USA, 2002.
- [72] Hecht E., *Optics*, 4th ed, Addison-Wesley, San Francisco, 2001.
- [73] Nicholson M. How to Optimize on MTF, Zemax, <http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-optimize-on-mtf>, (Ziyaret tarihi: 1 Mayıs 2017).
- [74] William T. L., *Thermal Imaging Cameras: Characteristics and Performance*, 1st ed., Crc Press, USA, 2009.
- [75] Küçükçelebi D., Çoklu Görüş Alanına Sahip Kızılaltı Görüntüleyici Optik Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015, 392633.



Ek-A

Türkçe terimlerin İngilizce karşılıkları

abbe sayısı; abbe number
açıklık; aperture
akromat; achromat
alan eğriliği; field curvature
alan engeli; field stop
arka odak uzunluğu; back focal length
biçim bozulması; distoriton
çizgi çifti sayısı / mm; line pair/mm lp/mm
dalga boyu bilgisi; wavelength data
dalga cephesi; wavefront
değer fonksiyonu; merit function
değer fonksiyonu editörü; merit function editor
eğrilik yarıçapı; radius of curvature
etkili odak uzaklığı; effective focal length
f Sayısı; f number
fiçı bozunumu; barrel distortion
genel sistem bilgisi; general system data
geometrik görüntü analizi; geometric image analysis
görüş açısı; field of view
ızgara bozunum grafiği; grid distortion
iğne yastığı bozunumu; pincushion distortion
kapalı enerji analizi; encircled energy
kırılma indisi; index of refraction
kırınım sınırı; diffraction limit
koma; coma
kusur; aberration
küresel kusur; spherical aberration
mercek bilgi editörü; lens data editor
modülasyon transfer fonksiyonu; modulation transfer function
nokta diyagramı; spot diagram



Ek-D

GENERAL LENS DATA:

```
Surfaces          :           8
Stop              :           1
System Aperture   : Entrance Pupil Diameter = 70
Glass Catalogs    : SCHOTT INFRARED
Ray Aiming        : Off
Apodization       : Uniform, factor = 0.00000E+000
Temperature (C)   : 0.00000E+000
Pressure (ATM)    : 1.00000E+000
Effective Focal Length : 302.6125 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length : 302.6125 (in image space)
Back Focal Length : 8.571014
Total Track       : 192.0571
Image Space F/#    : 4.323036
Paraxial Working F/# : 4.323036
Working F/#       : 4.315069
Image Space NA     : 0.1148935
Object Space NA    : 3.5e-009
Stop Radius       : 35
Paraxial Image Height : 0.528159
Paraxial Magnification : 0
Entrance Pupil Diameter : 70
Entrance Pupil Position : 0
Exit Pupil Diameter : 121.3106
Exit Pupil Position : 524.5373
Field Type        : Angle in degrees
Maximum Field     : 0.1
Primary Wave      : 3
Lens Units        : Millimeters
Angular Magnification : -0.5770313
```

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Yayınlar

- [1] **Kara E.**, Askın G., Simsek S., Bilgin V., Growth And Characterization Of Undoped And Lithium Doped Cobalt Oxide Thin Films, *Turkish Physical Society 30th International Physics Congress (TPS-30)*, İstanbul, Türkiye, 2-5 Eylül 2013.



ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Mersin' de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Muğla' da tamamladı. 2008 yılında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ne girdi ve 2014 yılında mezun olduktan sonra 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' nde Elektro-Optik Sistem Mühendisliği Anabilimdalı' nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.



