

**HASSAS GÜDÜMLÜ SİSTEMLER İÇİN İKİ BANT
KIZILÖTESİ ARAYICI BAŞLIK OPTİK TASARIMI**

**OPTICAL DESIGN OF A DUAL BAND INFRARED
SEEKER FOR PRECISION GUIDED SYSTEMS**

ASLI DOĞAN

DOÇ. DR AKIN BACIOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2019

ASLI DOĞAN'ın hazırladığı “Hassas Güdümlü Sistemler İçin İki Bant Kızılötesi Arayıcı Başlık Optik Tasarımı” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Hüseyin SARI

Başkan

Doç.Dr. Akın BACIOĞLU

Danışman

Prof.Dr. Aynur ERAY

ye

Prof.Dr. şadan ÖZCAN

ye

Doç.Dr. Emre TAşCI

ye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GMşDERELİĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11/07/2019



ASLI DOĞAN

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

11/07/2019



ASLI DOĞAN

ÖZET

HASSAS GÜDÜMLÜ SİSTEMLER İÇİN İKİ BANT KIZILÖTESİ ARAYICI BAŞLIK OPTİK TASARIMI

Aslı DOĞAN

Yüksek Lisans, Fizik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Temmuz 2019, 92 Sayfa

Kızılötesi güdümlü sistemler, hedeften yayılan enerjiyi algılayarak, hedefleri tespit etmek ve etkisiz hale getirmek için kullanılır. Bu sistemlerde kullanılan optik elemanlar, kubbe, mercekler (ve/veya ayna) ve dedektördür. Çalışma kapsamında, arayıcı başlığın optik tasarımı kızılötesi spektrumun iki bandında (MWIR–LWIR) çalışacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, optik tasarım ve analiz yeteneğine sahip Zemax OpticStudio adlı program kullanılmıştır. Çalışmaya, iki bantta çalışabilen ticari dedektörler araştırılarak başlanmış ve performansları karşılaştırılarak uygun dedektör belirlenmiştir. Belirlenen dedektörün özellikleri ile optik tasarım parametreleri hesaplanarak 3 – 10 µm aralığında çalışabilen kızılötesi arayıcı başlık optik tasarımı yapılmıştır. Tasarımın –40 ile +80 °C sıcaklık aralığındaki optik performansları, farklı dört gövde malzemesi eklenerek incelenmiştir. Her bir malzemenin kullanımındaki odak bozulmaları optik pasif atermalizasyon tekniği ile düzeltilmiştir. Gövde malzemelerinin maliyet ve tedarik imkanları değerlendirilerek tasarım sonlandırılmıştır. Tasarımı yapılan arayıcı başlığın görüş açısı 16° ve modülasyon transfer fonksiyonunun (MTF) %50 olduğunda uzaysal frekansı 23 çç/mm bulunmuştur. Yapılan çalışmanın sonunda arayıcı başlık optik tasarımı, spot diyagramı, MTF, Seidel diyagramı, enerji dağılımı ile analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kızılötesi Arayıcı Başlık, IIR, Kızılötesi Görüntüleme, Atermalizasyon, Modülasyon Transfer Fonksiyonu, Optik Tasarım, Zemax, OpticStudio.

ABSTRACT

OPTICAL DESIGN OF A DUAL BAND INFRARED SEEKER FOR PRECISION GUIDED SYSTEMS

Ash DOĞAN

Master of Science, Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Akın BACIOĞLU

July 2019, 92 Pages

Infrared guided systems are used to track the target and destroy it, by using the radiation emitted from it. The main components of the guided systems can be listed as follows: a dome, a lens-set (or mirrors) and a detector. In this study, the optical design of a seeker, operating in two bands of infrared (MWIR–LWIR), is performed. Dual-band optics design has been developed by using two softwares: Zemax, OpticStudio. Before the design the seeker-optics is started, the commercially available dual-band IR detectors are searched by comparing the performances of the latest detector technologies. By using the optical parameters of the selected detector, the design of the IR imaging seeker is completed for the operation within the wavelength range of 3 – 10 μm . The temperature dependence of the optical design is also examined by using four different body materials, for the large temperature interval ranging from -40 to $+80$ $^{\circ}\text{C}$. The defocusing effect caused by using different materials is fixed by passive-optical-athermalization technique. The design is completed evaluating the cost and availability of the materials used in the design. The field of view of the optical system is found to be 16° . MTF value of each field is higher than 50% when the spatial frequency takes a value of 23 lp/mm. The results are analyzed and discussed in terms of spot-diagram, modulation transfer function (MTF), Seidel diagram and encircled energy distribution.

Keywords: Infrared Seeker, IIR, Infrared Imaging, Athermalization, Modulation Transfer Function, Optical Design, Zemax, OpticStudio.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Akın BACIOĞLU'na, tez konusunun belirlenmesinde yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Recai ELLİALTIOĞLU'na, çalışmalarım süresince desteği ve görüşleriyle her zaman yanımda olan Mehmet Caner İŞMAR'a, tez yazım sürecinde motivasyon destekleriyle yanımda olan arkadaşlarım Hanife USTA, Selva SARGIN GÜÇLÜ, Ece ALAÇAKIR DEMİR, Cem ÜSTÜNDAĞ ve Burak ELDENİZ'e, tez çalışması boyunca beni destekleyen yöneticim Sayın Ali Şimşek TEKEREK'e ve çalışmalarımı gerçekleştirebilmem için optik tasarım yazılımı imkanı sağlayan ROKETSAN A.Ş.'ye, mesleki ve akademik hayatımı bilgi ve tecrübeleriyle şekillendiren Sayın Dr. Özgür SELİMOĞLU, Sayın Dr. Devrim ANIL ve Sayın Selçuk SEYHUN'a, beni bu günlere getiren, tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan değerli babam Hasan DOĞAN ve annem Kevser DOĞAN'a, sevgili ablam Elif DOĞAN'a teşekkür ederim.

Aslı DOĞAN

Temmuz 2019, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL BİLGİLER	6
2.1. Kızılötesi Bölge ve Görüntüleme Sistemleri.....	6
2.2. Atmosferik Geçirgenlik.....	7
2.3. Siyah Cisim Işıması.....	9
2.4. Kızılötesi İmza	11
2.4.1. Arka Planın Kızılötesi İmzası	11
2.4.2. Hedefin Kızılötesi İmzası.....	12
2.4.3. Isı Fişeklerinin Kızılötesi İmzası.....	14
2.5. Arayıcı Başlık Alt Bileşenleri	14
2.5.1. Dedektör	14
2.5.2. Kubbe	15
2.5.3. Mercek.....	15
2.5.4. Kızılötesi Optik Malzemeler	17
2.6. Görüntü Kalitesini Etkileyen Faktörler	19
2.6.1. Çözünürlük ve F Sayısı	19

2.6.2. Airy Disk.....	20
2.6.3. Optik Kusurlar	22
2.6.4. Yüzey Çeşitleri	26
2.7. Optik Performans Analizleri	28
2.7.1. Spot Diyagramı	28
2.7.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu	29
2.7.3. Seidel Diyagramı	31
2.7.4. Enerji Dağılımı	32
2.8. Atermalizasyon	33
3. ARAYICI BAŞLIK OPTİK TASARIMI	35
3.1. Tasarım Gereksinimleri	37
3.2. Optik Tasarım Süreci	37
3.3. Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi	39
3.3.1. Dedektör Seçimi	39
3.3.2. Hesaplamalar	44
3.3.3. MTF Uzaysal Frekansı.....	49
3.4. Optik Malzeme Seçimi	49
3.4.1. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	49
3.4.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi	51
3.5. Optik Tasarım	53
3.6. Optik Sistemin Atermalizasyonu	62
3.7. Geçirgenlik.....	68
3.8. Optik Performans Analizleri	70
3.8.1. Spot Diyagramı Analizi	70
3.8.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu Analizi	71
3.8.3. Seidel Diyagramı Analizi.....	72

3.8.4. Enerji Dağılımı Analizi	73
4. SONUÇ	74
5. KAYNAKLAR.....	79
EKLER	83
EK 1 – Geniş Bant Kızılötesi Malzemelerin Dalgaboyuna Karşı Geçirgenlik Grafikleri.....	84
EK 2 – CONDOR II Dedektörünün Özellikleri	86
EK 3 – Projede Kullanılan Merit Fonksiyonu İşlemcileri.....	87
EK 4 – Atermalizasyon Sonrası 80 °C’deki MTF Grafikleri.....	88
EK 5 – Mekanik Gövde Malzemesi T6061 Olduğunda Çoklu Konfigürasyon Matrisi.....	90
EK 6 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu	91
ÖZGEÇMİŞ	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Kızılötesi alt bantlarının tanımlanması [15].....	6
Çizelge 2.2.	Askeri hava aracının kızılötesi imza kaynakları [3].....	13
Çizelge 2.3.	Koniklik sabiti ile yüzey şekilleri arasındaki ilişki.	27
Çizelge 3.1.	MWIR–LWIR bandında çalışan, iki bant kızılötesi dedektörler [41,42].	40
Çizelge 3.2.	Dalgaboyuna bağlı optik çözünürlük.	41
Çizelge 3.3.	İki bant kızılötesi dedektörlerin boyutları.	42
Çizelge 3.4.	Dedektör gürültü eşdeğer gücü değerleri.	43
Çizelge 3.5.	Condor II dedektörünün özellikleri.	44
Çizelge 3.6	Hedefin ve arka planın 320 K ve 1200 K’deki P, NEP ve SNR değerleri.....	47
Çizelge 3.7.	Optik tasarım başlangıç parametreleri.	48
Çizelge 3.8.	Geniş bant kızılötesi malzemelerin mekanik özellikleri [37,44].	50
Çizelge 3.9.	Geniş bant kızılötesi malzemelerin optik özellikleri [37,44].	51
Çizelge 3.10.	Geniş bant kızılötesi malzemelerin 4 ve 10 μm ’deki Abbe sayıları.	52
Çizelge 3.11.	Geometrik sınır şartları.	54
Çizelge 3.12.	Mercek sayısına göre merit fonksiyonu değerleri ve spot yarıçapları. ...	55
Çizelge 3.13.	Farklı malzeme sıralamasındaki spot yarıçapları.	56
Çizelge 3.14.	Kızılötesi görüntüleme sistemini oluşturan optik elemanların geometrik parametreleri.	59
Çizelge 3.15.	Kızılötesi arayıcı başlık optik sistemini oluşturan optik elemanların geometrik parametreleri.	61
Çizelge 3.16.	Optik sistem parametreleri.	62
Çizelge 3.17.	Gövde malzemelerinin özellikleri [45].	63
Çizelge 3.18.	Farklı optik gövde malzemelerinin, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapına etkisi (AOI=0°).	64
Çizelge 3.19.	Farklı optik gövde malzemelerinin, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapına etkisi (AOI=4°).	64
Çizelge 3.20.	Farklı optik gövde malzemelerinin, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapına etkisi (AOI=8°).	64

Çizelge 3.21. Atermalizasyondan sonra, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapları (AOI=0°).....	67
Çizelge 3.22. Atermalizasyondan sonra, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapları (AOI=4°).....	67
Çizelge 3.23. Atermalizasyondan sonra, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapları (AOI=8°).....	67
Çizelge 4.1. Sistemi oluşturan optik elemanların geometrik parametreleri.....	74
Çizelge 4.3. Tasarımı yapılan iki bant kızılötesi arayıcı başlığın özellikleri.....	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Hassas güdümlü sistem mimarisi örneği [4].	1
Şekil 1.2.	Aynalı ve mercekleli kızılötesi arayıcı başlık modeli.	2
Şekil 1.3.	Mercekleli kızılötesi arayıcı başlık modeli.	3
Şekil 2.1.	Kızılötesi görüntüleme sisteminin temel bileşenleri.	7
Şekil 2.2.	Atmosferik geçirgenlik [17].	8
Şekil 2.3.	Farklı sıcaklıklardaki siyah cisim ışımasının spektral dağılımı.	10
Şekil 2.4.	Bir uçak için kızılötesi imza kaynakları [3].	11
Şekil 2.5.	Askeri hava aracının kızılötesi imza kaynakları [3].	12
Şekil 2.6.	Kızılötesi arayıcı başlık optik tasarım yerleşimi.	14
Şekil 2.7.	Soğuk durdurma ile optik sistemin F sayısının karşılaştırması [32].	20
Şekil 2.8.	Bir lensin ışığı odaklaması.	21
Şekil 2.9.	(a) İki boyutlu dairesel kırınım modeli (b) Dairesel bir kırınımın şiddet profili.	22
Şekil 2.10.	Küresel kusuru olan mercek.	22
Şekil 2.11.	Küresel olmayan mercek.	23
Şekil 2.12.	Koma kusuru.	23
Şekil 2.13.	Astigmatizm kusuru.	24
Şekil 2.14.	Alan eğriliği kusuru.	24
Şekil 2.15.	Biçim bozulması kusuru.	25
Şekil 2.16.	(a) Enine ve (b) boyuna renk kusuru.	26
Şekil 2.17.	Spot diyagramı.	29
Şekil 2.18.	Modülasyon transfer fonksiyonu.	30
Şekil 2.19.	OpticStudio yazılımında elde edilen örnek bir modülasyon transfer fonksiyonu grafiği.	31
Şekil 2.20.	OpticStudio yazılımında elde edilen örnek bir Seidel diyagramı.	32
Şekil 2.21.	Piksel boyutu 5,5 µm olan bir detektör için tasarlanan bir optik sistemde enerji dağılımı.	33
Şekil 3.1.	Optik tasarım süreci.	38
Şekil 3.2.	Demet bölücü kullanımı [11].	40
Şekil 3.3.	Kızılötesi sahne alanı.	45

Şekil 3.4.	Görüş açısının odak uzaklığı ve dedektör ile olan ilişkisi.	48
Şekil 3.5.	Merit fonksiyonu editör ekranı örnek görüntüsü.	53
Şekil 3.6.	OpticStudio’da oluşturulan malzeme kataloğu.	54
Şekil 3.7.	Tüm malzeme sıralamaları için spot diyagramı ve görüntüleme sisteminin kesit görüntüsü.	56
Şekil 3.8.	Kızılötesi görüntüleme sistemi spot diyagramı.	57
Şekil 3.9.	Kızılötesi görüntüleme sistemi MTF grafiği.	58
Şekil 3.10.	Kızılötesi görüntüleme sisteminin kesit görüntüsü.	58
Şekil 3.11.	Kızılötesi arayıcı başlık kesit görüntüsü.	60
Şekil 3.12.	Kızılötesi arayıcı başlık spot diyagramı.	60
Şekil 3.13.	Kızılötesi arayıcı başlık MTF grafiği.	61
Şekil 3.14.	Dört farklı optik gövde malzemesi kullanımında, atermalizasyon öncesi ve sonrası spot diyagramları.	66
Şekil 3.15.	70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip arayıcı başlığın spot diyagramı.	70
Şekil 3.16.	70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip arayıcı başlığın 20,8 çç/mm’de MTF grafiği.	71
Şekil 3.17.	70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip arayıcı başlığın kesme frekansında MTF grafiği.	71
Şekil 3.18.	70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip atermal arayıcı başlığın Seidel diyagramı.	72
Şekil 3.19.	70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip atermal arayıcı başlığın bir pikseldeki enerji dağılımı.	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_{Ω}	Katı Açı Alanı
M_{λ}	Planck Işıması, Spektral Eksitans
$\alpha_{2m}r^{2m}$	Yüksek Dereceli Asferik Terim
λ_{\max}	Maksimum Dalgaboyu
$\nu_{\text{kesme frekansı}}$	Optik Kesme Frekansı
$2a$	Airy Disk Çapı
A_d	Dedektör Alanına
A_p	Bir Pikselin Alanı
A_{piksel}	Bir Pikselin Görüş Alanı
c	Işığın Boşluktaki Hızı
d'	Dedektörün Diyagonali
D	Giriş Açıklığı
dn/dT	Kırma İndisindeki Sıcaklığa Bağlı Değişim Oranı
f	Odak Uzaklığı
$F/\#$	F Sayısı
H	Kusursuz Görüntünün Merkezinden Köşesine Kadar Olan Uzaklık
h	Planck Sabiti
H'	Kusurlu Görüntünün Merkezinden Köşesine Kadar Olan Uzaklık
I	Parlaklık
K	Koniklik Sabiti

k_b	Boltzman Sabiti
M	Toplam Işıma Miktarı
$M_{arkaplan}$	Arka Plan Işıması
M_{hedef}	Hedefin Işıması
M_{nesne}	Nesnenin Işıması
$M_{siyahcisim}$	Siyah Cismin Işıması
n	Kırma İndisi
P	Yayılan Işımanın Gücü
$P_0(\lambda)$	Dalgaboyuna Bağlı Hedefin Gücü
$P_{arkaplan}$	Arka plandan yayılan ışım gücü
P_{hedef}	Hedeften yayılan ışım gücü
P_i	Anlık Değer
R	Mesafe
r	Radyal Koordinat
R_1	Merceğin Birinci Yüzeyinin Eğrilik Yarıçapı
R_2	Merceğin İkinci Yüzeyinin Eğrilik Yarıçapı
R_b	Dedektör ve Arka Plan Arasındaki Mesafe
T	Sıcaklık
$T_{arkaplan}$	Arka Plan Sıcaklığı
T_{hedef}	Hedefin Sıcaklığı
T_i	Belirli Bir İşlemcinin Hedeflenen Değeri
T_{optik}	Optik Sistemin Geçirgenliği
T_{zemin}	Zemin Sıcaklığı
W_i	İşlemciye Atanan Ağırlık

$\alpha(\lambda)$	Dedektörün Soğurma Katsayısı
ε	Yayıcılık Katsayısı
$\varepsilon_{\text{arkaplan}}$	Arka Plan Yayıcılık Katsayısı
$\varepsilon_{\text{hedef}}$	Hedefin Yayıcılık Katsayısı
θ	Görüş Açısı
λ	Dalgaboyu
v_d	Abbe Sayısı
$\sigma(\lambda)$	Sönüm Katsayısı
$\tau(\lambda)$	Atmosferik Geçirgenlik
Ω	Katı Açısı
Ω_{arkaplan}	Arka planın katı açısı
Ω_{hedef}	Hedefin katı açısı

Kısaltmalar

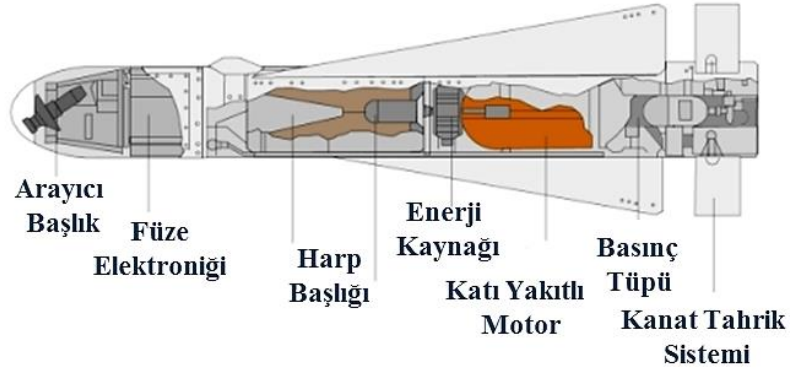
AMTIR	Kızılötesi Işımayı Geçiren Amorf Malzeme (Amorphous Material Transmitting IR Radiation)
AOI	Işığın Geliş Açısı (Angle of Incidence)
As	Arsenit
BaF2	Baryum Florür
CTE	Termal Genleşme Katsayısı (Coefficient of Thermal Expansion)
EFL	Etkin Odak Uzaklığı
FOV	Görüş Açısı (Field Of View)
GaAs	Galyum Arsenit
GD	Geometrik Distorsiyon (Biçim Bozulması)

Ge	Germanyum
HGS	Hassas Güdümlü Sistemler
KCl	Potasyum Klorür
KRS5	Talyum Boromiyodid
LWIR	Uzun Dalga Kızılötesi (Long Wave Infrared)
MF	Merit Fonksiyonu
MTF	Modülasyon Transfer Fonksiyonu
MWIR	Orta Dalga Kızılötesi (Mid Wave Infrared)
NEP	Gürültü Eşdeğer Gücü (Noise Equilevent Power)
NETD	Gürültü Eşdeğer Sıcaklık Farkıdır (Noise-Equivalent Temperature Difference)
NIR	Yakın Kızılötesi (Near Infrared)
Se	Selenit
SNR	Sinyal-Gürültü Oranına
SWIR	Kısa Dalga Kızılötesi (Short Wave Infrared)
VLWIR	Çok Uzun Dalga Kızılötesi (Very Long Wave Infrared)
ZnS	Çinko Sülfür
ZnSe	Çinko Selenür
GPS	Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
INS	Ataletsel Navigasyon Sistemi (Inertial Navigation System)

1. GİRİŞ

Hassas güdümlü sistemler, belirli bir hedefi hassas olarak vurmak ve hedef üzerindeki etkiyi arttırmak için arayıcı başlık kullanan mühimmatlardır. Bu sistemlerde kullanılan arayıcı başlık, ışımaya yayan veya yansıtan bir hedefi tespit ve takip etmek için kullanılır. Yansıtılan ışımaya kullanarak hedefi tespit ve takip eden arayıcıları kullanan sistemler aktif güdümlü sistemler; hedef tarafından yayılan ışımaya tespit ve takip eden arayıcıları kullanan sistemler pasif güdümlü sistemler olarak adlandırılmaktadır [1].

Hassas güdümlü sistemlerde arayıcı başlığın görevi hedeften gelen ışımaya kullanarak hedef ile ilgili verileri oluşturup füze üzerindeki bilgisayara aktarmaktır. Arayıcı başlık tarafından oluşturulan bilgiler bilgisayarda kanatları hareket ettirecek sinyallere dönüştürülür ve bu komutlar kanat tahrik sistemine iletilir. Kanat tahrik sistemi kendisine iletilen komutlara göre her bir kanadı uygun şekilde hareket ettirerek füzenin gerekli manevraları yapmasını ve hedefe doğru hassas bir şekilde yönlendirilmesini sağlar. Böylece füze, hedefi hassas bir şekilde vurur [2,3]. Şekil 1.1’de hassas güdümlü sistem mimarisi örneği verilmiştir.



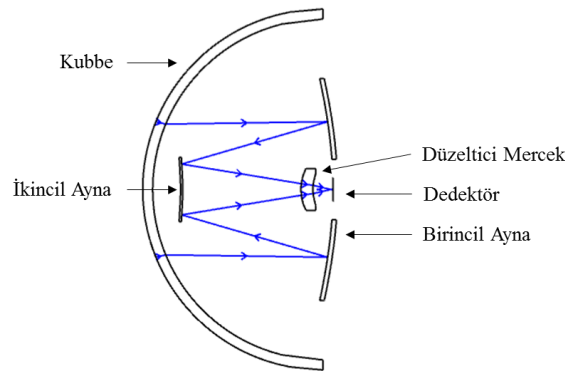
Şekil 1.1. Hassas güdümlü sistem mimarisi örneği [4].

Güdümlü sistemler radar güdümlü, lazer güdümlü, kızılötesi güdümlü, GPS/INS güdümlü sistemler olmak üzere dört temel gruba ayrılabilir. Kötü atmosfer koşullarında hassas şekilde hedefi görüntüleme özeliği dikkate alındığında en etkin sistemler kızılötesi güdümlü sistemlerdir [3].

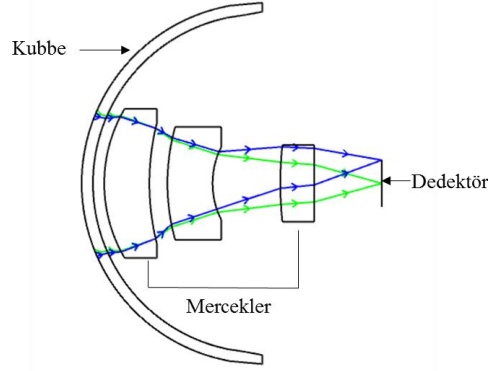
Kızılötesi güdümlü sistemler, kızılötesi ışınım kaynaklarından yayılan enerjiyi algılayarak, hedefleri tespit etmek ve etkisiz hale getirmek için kullanılır. Kızılötesi bölgede hedef tespitinin temel prensibi, arayıcı başlıkta kullanılan dedektörün duyarlı olduğu dalgaboyu bandında hedeften gelen kızılötesi enerjinin arka plan ışımından ayırt edilebilmesidir. Örneğin, hedefin uçak olması durumunda egzoz izi ve uçak gövdesi en önemli kızılötesi enerji kaynaklarıdır [5,6].

Arayıcı başlık, optik elemanlar, optomekanik elemanlar, dedektör ve elektronik elemanlardan oluşur. Optik elemanların görevi sisteme ulaşan ışınımı dedektöre odaklamak, optomekanik elemanların görevi optik elemanların uygun şekilde konumlandırılmasını sağlamaktır. Dedektörün görevi fotonları elektrik sinyaline çevirmek ve elektronik kartların görevi dedektör tarafından üretilen sinyalleri işlemektir [7].

Kızılötesi arayıcı başlıklarda aynalı ve mercekli (Şekil 1.2) ve sadece mercekli (Şekil 1.3) olmak üzere iki çeşit optik sistem yapısı bulunmaktadır [3]. Ayna ve mercekli sistemler, daha dar görüş açısına sahip arayıcı başlıklar için kullanılırken, mercekli sistemler daha geniş görüş açısına sahip arayıcı başlıklarda kullanılmaktadır. Arayıcı başlığın dar görüş açısına sahip olması, arka plan gürültü kaynaklarının azaltılmasını sağlayarak hedefin tespit edilmesini kolaylaştırır. Ancak görüş açısının az olması hedefin, görüş alanından çıkmasına ve kaybedilmesine neden olabilir. Bu nedenle, hedefi sürekli olarak, güvenli bir şekilde izleyebilmek için geniş görüş açısına sahip sistemler kullanılmalıdır.



Şekil 1.2. Aynalı ve mercekli kızılötesi arayıcı başlık modeli.



Şekil 1.3. Merceкли kızılötesi arayıcı başlık modeli.

Kızılötesi spektrumunda, uzun dalga kızılötesi (LWIR) arayıcı başlıklar, orta dalga kızılötesi (MWIR) arayıcı başlıklar ve iki bant (MWIR-LWIR) arayıcı başlıklar kullanılmaktadır. İki bantta çalışan arayıcı başlık kullanan kızılötesi güdümlü sistemler, hedefin algılanma hassasiyetini artırarak, gerçek ve sahte hedeflerin birbirinden ayrılmasına, farklı hava koşullarında etkin kullanıma ve hedefin farklı açılardan tespit edilmesine olanak sağlamaktadır [8]. İki bantta çalışan arayıcılarda, her iki kızılötesi alt bandının birbirine göre sahip olduğu avantajlar kullanılarak, biri ile hedefin tespit edilemediği anda, diğer banttardan alınan görüntüler ile hedef bilgisi oluşturmaya devam edilebilmektedir [9,10].

İki bantta çalışan kızılötesi arayıcı başlık optik tasarımları için yapılan literatür araştırması sonucunda, son yıllarda yapılmış üç farklı çalışma bulunmuştur. Ancak arayıcı başlık optik tasarım çalışmaları çok az sayıda yapılmış veya kullanım alanı savunma sanayi olduğu için yapılan çalışmaların çoğu paylaşılmamıştır. 2004 yılında, Catanzaro vd. [11], 3 – 5 ve 8 – 11 μm dalgaboyu aralıklarında çalışan 180 mm odak uzaklığına, 4° görüş açısına sahip bir optik sistem tasarlamıştır. Tasarımda altı adet mercek, bir adet demet bölücü ve dört farklı mercek malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemeler germanyum, AMTIR (amorphous material transmitting IR radiation), potasyum klorür ve çinko selenürdür. Optik sistemde kullanılan demet bölücü ile gelen ışığa iki farklı kızılötesi alt bandında çalışan dedektörlere odaklanmıştır. Sistemin, modülasyon transfer fonksiyonunun %50'sine karşılık gelen uzaysal frekans 3 – 5 μm

dalgaboyu aralığında 21 çç/mm; 8 – 11 µm dalgaboyu aralığında 15 çç/mm'dir. Çalışmada, kullanılan dedektörlerin çözünürlükleri, piksel boyutları ve çalışma sıcaklık aralığı hakkında bilgi verilmemiştir. Bu çalışmada, ortak bir görüntüleme sistemi kullanılarak gelen ışımının iki farklı dedektöre odaklanması ile hedefin iki bantta görüntülenebileceği gösterilmiştir. Ancak sistemde iki farklı dedektör ve demet bölücünün kullanılması sistemin karmaşık, büyük ve pahalı olmasına neden olmaktadır.

Yongli vd. [12], 2010 yılında çözünürlüğü 320 x 240, piksel boyutu 45 µm olan dedektör ile 3,7 – 4,8 µm ve 8 – 12 µm dalgaboyu aralıklarında çalışan, 4° görüş açısına sahip, giriş açıklığı 240 mm, odak uzaklığı 270 mm olan arayıcı başlık tasarımı yapmışlardır. Tasarımda kubbe, birincil ayna, ikincil ayna ve iki adet düzeltici mercek olmak üzere toplamda beş adet optik eleman kullanılmıştır. Düzeltici merceklerin malzemesi germanyumdur. Optik sistem –40 ile +50 °C sıcaklık aralığında atermaldir. MTF'nin %70'ine karşılık gelen uzaysal çözünürlük 11 çç/mm'dir. Çalışmada MTF'nin %50'sine karşılık gelen uzaysal çözünürlük değeri paylaşılmamıştır. 3,7 – 4,8 µm dalgaboyu aralığında, 0, ±1, ±1,4 ve ±2° ışınma geliş açıları için elde edilen spot yarıçapları sırasıyla 64,517, 139,077, 140,194 ve 63,831 µm; 8-12 µm dalgaboyu aralığında 61,239, 11,791, 116,457 ve 64,308 µm'dir. Çalışma sonucunda elde edilen tasarımın kırınım limitinde olmadığı ve spot yarıçapları incelendiğinde, bir pikselin dışında kaldığı görülmektedir.

2017 yılında Karimzadeh [13] tarafından yapılan çalışmada, çözünürlüğü 320 x 256 ve piksel boyutu 40 µm olan bir dedektör için yedi mercekten oluşan kızılötesi görüntüleme sistemi tasarlanmıştır. Tasarımda ZnS ve ZnSe olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. Odak uzaklığı 100 mm, görüş açısı 9° olan kızılötesi görüntüleme sisteminin, MTF'nin %50'sine karşılık gelen uzaysal frekans 3,3 – 5 ve 8 – 12 µm dalgaboyu aralıklarında 11 çç/mm'dir. Çalışma sonucunda görüş açısının artması ile sistemde ihtiyaç duyulan optik eleman sayısının, böylece maliyetin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca sistemde optik eleman sayısının fazla olması, montaj aşamasında merceklerin optik ekseninde hizalanmasını zorlaştırmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı hassas güdümlü sistemler için geniş görüş açısına sahip iki bant kızılötesi arayıcı başlık optik tasarımı yapmaktır. Çalışmaların, kullanılan optik eleman sayısı ve malzemesi ile milimetre başına bir çizgi çiftini ayırabilme gücü olan uzaysal frekans (çözünürlük) ve bir piksele odaklanan ışımının fiziksel ölçütü olan spot yarıçapları üzerinden değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kızılötesi iki bant arayıcı başlık optik tasarımının kırım limitine yakın, geniş görüş açılı ve yüksek çözünürlüğe sahip olması hedeflenmektedir. Bu nedenle tasarımda mercekli sistem yapısı kullanılacaktır. Mercek malzemeleri değerlendirilerek yukarıda bahsedilen çalışmalara kıyasla daha az sayıda optik eleman ile daha yüksek uzaysal çözünürlüğe ve düşük maliyete sahip bir optik sistemin tasarlanması hedeflenmektedir. Operasyonel koşullar dikkate alındığında, tasarlanan sistemin optik performansının -40 ile $+80$ °C sıcaklık aralığında [14] kararlı bir başarıma sahip olması gerekmektedir. Sistemin değişen sıcaklık koşulları altındaki başarımı, sistemi oluşturan optik elemanların yanı sıra sistemde kullanılan mekanik elemanların malzemeleri ile de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle sistemin sıcaklık gereksinimi dikkate alınarak dört farklı mekanik eleman malzemesi için, tasarlanan optik sistemin atermalizasyonu yapılacaktır. Elde edilen sistemler performans ve maliyet gereksinimleri dikkate alınarak karşılaştırılacaktır. Karşılaştırma sonucunda en yüksek performansa sahip sistem seçilerek detaylı optik analizleri gerçekleştirilecektir.

2. TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde, çalışma boyunca kullanılacak temel nicelikler ve kızılötesi sistemleri tanımlayan parametreler açıklanacak; arayıcı başlık alt bileşenleri, görüntü kalitesini etkileyen faktörler ve optik performans analizleri detaylarıyla verilecektir.

2.1. Kızılötesi Bölge ve Görüntüleme Sistemleri

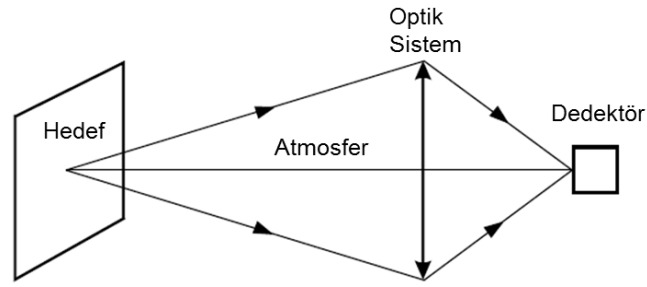
Elektromanyetik spektrumun 0,75 ile 1000 μm dalgaboyu aralığı kızılötesi bölge olarak adlandırılmaktadır. Çizelge 2.1’de kızılötesi alt bantları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kızılötesi alt bantlarının tanımlanması [15].

Kızılötesi Alt Bantları	Dalgaboyu Aralığı (μm)
Yakın Kızılötesi (NIR)	0,75 – 1,00
Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)	1,00 – 2,50
Orta Dalga Kızılötesi (MWIR)	3,00 – 5,00
Uzun Dalga Kızılötesi (LWIR)	8,00 – 14,00
Çok Uzun Dalga Kızılötesi (VLWIR)	14,00 – 25,00
Uzak Kızılötesi (FIR)	> 25,00

Mutlak sıfırın ($0\text{ K} = -273,15\text{ }^\circ\text{C}$) üzerindeki tüm nesnelere Bölüm 2.3’te detaylarıyla verileceği üzere ışınım yapar. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde hedef, MWIR ve LWIR bantlarında güneşten hedefe ulaşarak yansıyan ışımadan çok, hedefin kendi kendine yaptığı ışınım nedeniyle görülür [5].

Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde hedefin yaptığı bu ışımının görünür hale getirilmesi için optik elemanlar, dedektör ve elektronik elemanlar kullanılır. Performans gereksinimlerinin sağlanabilmesi için sistemde kullanılan bu bileşenlerin dikkatle seçilmesi gerekmektedir. Bu bileşenlere ek olarak kızılötesi sistemlerin tasarımı ve analiz süreçlerinde, sistem performansını doğrudan etkileyen hedef ve atmosfer özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Şekil 2.1’de kızılötesi görüntüleme sisteminin temel bileşenleri ve sistem performansını etkileyen parametreler gösterilmiştir.



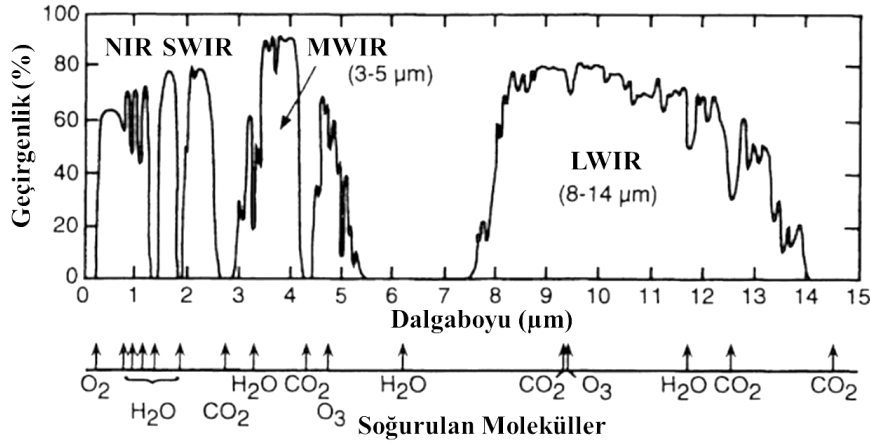
Şekil 2.1. Kızılötesi görüntüleme sisteminin temel bileşenleri.

Kendi kendine ışıma veya hedefe ait kızılötesi imza, hedefin yüzey özellikleri ile belirlenir. Atmosferi oluşturan gazlar hedeften arayıcı başlığa doğru ilerleyen ışımının iletiği frekansları sınırlar. Optik sistem, görüş açısını (FOV), optik verimliliği ve görüntü kalitesini tanımlar. Bu parametreler, dedektör ile birlikte, radyometrik doğruluğu ve elde edilen görüntünün çözünürlüğünü etkiler. Detektör, optik sinyali elektrik sinyaline dönüştüren bir dönüştürücüdür ve elektronik elemanlar bu sinyali kullanılabilir seviyelere yükseltir [5].

2.2. Atmosferik Geçirgenlik

Bir arayıcı başlığın algılayabileceği enerji, hedef ve arayıcı arasındaki atmosfer tarafından iletilen enerji miktarına bağlıdır. Atmosfer hedeften gelen radyasyonu, saçılma ve soğurma ile zayıflatır [16]. Ayrıca atmosfer bir ışım kaynağıdır ve görüntülenmek istenen hedefin arka planına da etki eder. Atmosfer temelde oksijen, azot, karbondioksit, su ve ozon moleküllerinden oluşmaktadır. Bu moleküllerin titreşimi nedeniyle kızılötesi spektrumun bazı bantlarında yüksek soğurma meydana gelir. Ancak bu moleküllerden

oksijen ve azot, özdeş iki atomdan oluşan simetrik moleküllerdir. Kızılötesi bölgede aktif değildirler ve soğurma yapmamaktadırlar. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi MWIR ve LWIR bölgesindeki atmosferik geçirgenlik NIR ve SWIR’a göre daha yüksektir. NIR ve SWIR bantlarında atmosferik geçirgenliğin düşük olmasının sebebi su buharından kaynaklanan soğurma miktarının diğer bantlara göre daha yüksek olmasıdır. MWIR bölgesinde iki bantta görülen azalma ise karbondioksit ve ozon moleküllerinden kaynaklanmaktadır [5].



Şekil 2.2. Atmosferik geçirgenlik [17].

Atmosferdeki zayıflamanın bir başka kaynağı saçılmadır. Saçılma özellikle düşük irtifalarda ve kısa dalgaboylarında etkilidir. Atmosferdeki elektromanyetik spektrumun değişmesinde etkisi olan iki esnek saçılma vardır: Rayleigh ve Mie saçılmaları. Dalgaboyuna kıyasla çok küçük olan parçacıklardan meydana gelen saçılmalar, Rayleigh saçılması olarak adlandırılır. Saçılmanın miktarı dalgaboyunun dördüncü kuvveti ile ters orantılıdır. NIR bandının LWIR ve MWIR’a göre daha fazla saçılmasının sebebi dalgaboyu ve saçılma miktarı arasındaki bu ilişkidir. Rayleigh saçılmasının aksine, dalgaboyuna kıyasla daha büyük olan parçacıklardan meydana gelen saçılmalar, Mie saçılması olarak adlandırılır. Parçacık boyutu yaklaşık olarak dalgaboyunun 1/10’undan büyük olduğunda Mie saçılması önemli hale gelmektedir [18].

Saçılmaların ve soğurmaların toplamı sönmürlenme olarak adlandırılmaktadır. Belirli bir mesafeden gelen ışımın atmosferde sönmülendikten sonra atmosferden geçme oranı, Beer yasası ile verilmektedir ve Eşitlik (2.1) ile hesaplanmaktadır.

$$\tau(\lambda) = e^{-\sigma(\lambda R)} \quad (2.1)$$

Burada $\sigma(\lambda)$ sönüm katsayısı, R hedef ile optik sistem arasındaki mesafedir. MWIR ve LWIR alt bantları, farklı hava koşullarında atmosferik iletim açısından büyük ölçüde farklılık gösterir. MWIR, daha fazla kontrast, yüksek atmosferik iletim, yüksek nemde daha yüksek geçirgenlik ve daha yüksek çözünürlük ihtiyacı duyulan uygulamalarda kullanılırken; LWIR, sis ve toz koşullarında daha iyi performans, atmosferik türbülansa daha yüksek dayanım ve güneş yansımaları ile ısı fişeklerine (flare) karşı düşük hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır [11,19].

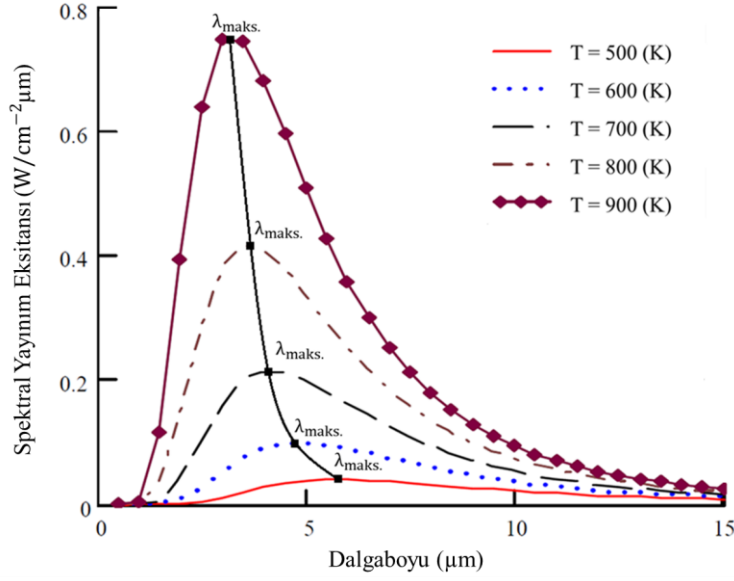
2.3. Siyah Cisim Işıması

Üzerine gelen bütün ışımayı ışımanın dalgaboyundan bağımsız olarak soğuran ideal cisme siyah cisim denir. Siyah cisim ışımasının sıcaklığa bağlı spektral enerji dağılımı Eşitlik (2.2) ile verilir. Bu eşitlik Planck eşitliği olarak adlandırılır.

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \right) \quad (2.2)$$

Burada M_λ (spektral eksitans) bir kaynak tarafından birim alan başına birim dalgaboyu aralığında yayımlanan güç, λ dalgaboyu, h Planck sabiti, k_B Boltzman sabiti, T sıcaklık ve c ışığın boşluktaki hızıdır. Eşitlik (2.2) farklı sıcaklıklar için dalgaboyunun fonksiyonu olarak Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça yüzey tarafından yayılan ışım miktarının arttığı görülmektedir. Belirli bir sıcaklıkta siyah cisim ışımasının enerji dağılımının en büyük olduğu dalgaboyu Eşitlik (2.3) ile verilir ve bu eşitlik Wien Yer Değiştirme Yasası olarak adlandırılır. Farklı sıcaklık değerleri için elde edilen sonuçlar Şekil 2.3'te sürekli siyah eğri ile gösterilmiştir.

$$\lambda_{\max} T = \frac{hc}{5k_B} = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2.3)$$



Şekil 2.3. Farklı sıcaklıklardaki siyah cisim ışımasının spektral dağılımı.

Siyah cismin birim alanından yayılan toplam ışıma Planck eşitliğinin tüm dalga boyları üzerinden integrali alınarak elde edilir ve Stefan-Boltzmann yasası olarak bilinir. Stefan-Boltzmann yasası Eşitlik (2.4) ile verilir.

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = k_B T^4 \quad (2.4)$$

Burada M siyah cismin birim alanından yayılan toplam ışımadır.

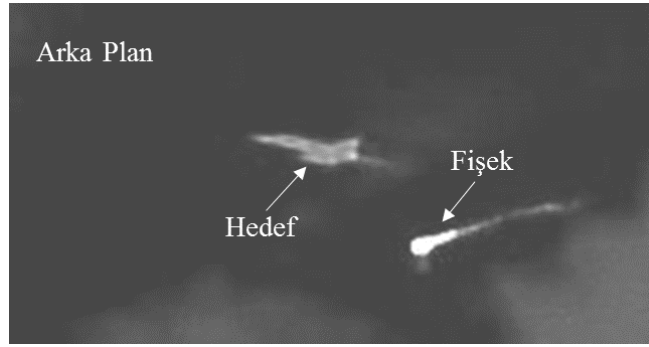
Bir cismin ışıma ve soğurma verimi yayıcılık (emissivity) katsayısı ile tanımlanır ve bu katsayı siyah cisim için 1'e eşittir ($\epsilon = 1$). Yayıcılık katsayısı 1'den küçük olan ($\epsilon < 1$) cisimler gri cisim olarak adlandırılır. Bir nesnenin yayıcılık katsayısı Eşitlik (2.5) ile verilir.

$$\epsilon = \frac{M_{nesne}}{M_{siyahcisim}} \quad (2.5)$$

Burada M_{nesne} herhangi bir nesnenin ışıması, $M_{siyahcisim}$ siyah cismin ışımasıdır.

2.4. Kızılötesi İmza

Bu bölümde, havadan havaya ve karadan havaya güdümlü sistemlerin ortak hedefi olan uçağın kızılötesi imzaları anlatılacaktır. Bir uçak için kızılötesi imza kaynakları, kızılötesi sahnenin arka planı, hedef ve şaşırtma amaçlı kullanılan ısı fişekleridir. 3 – 5 μm bandında çalışan kızılötesi güdümlü füze ile görüntülenen bir uçağın ve ısı fişeginin termal görüntüsü Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4. Bir uçak için kızılötesi imza kaynakları [3].

2.4.1. Arka Planın Kızılötesi İmzası

Arka plandaki başlıca kızılötesi kaynakları arasında dünya, gökyüzü, bulutlardan kaynaklanan ışınım ve güneş yansımaları bulunur. Arka plan kaynakları, genel olarak gri bir gövde olarak modellenir ve arka planın sıcaklığı, zemin seviyesindeki sıcaklık olarak düşünülebilir ($T_{\text{zemin}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$) [20,21].

Bir hedeften gelen kızılötesi ışınımın spektral dağılımı ve büyüklüğü, hedefin sıcaklığının ve yayıcılık katsayısının fonksiyonudur. Dünya yüzeyindeki farklı nesnelere, sırasıyla 250 – 350 K ve 0,80 – 0,95 aralığında sıcaklık ve yayıcılık katsayısına sahiptir. Yayıcılık katsayısı ve sıcaklığa ek olarak, arka planın alanı, füze arayıcı başlığının gördüğü kızılötesi sahnenin alanı ve arayıcının menzili parametreleri de arka plan ışınımının modellenmesi için gereklidir [3]. Arka plan ışınımı Eşitlik (2.6) kullanılarak hesaplanır.

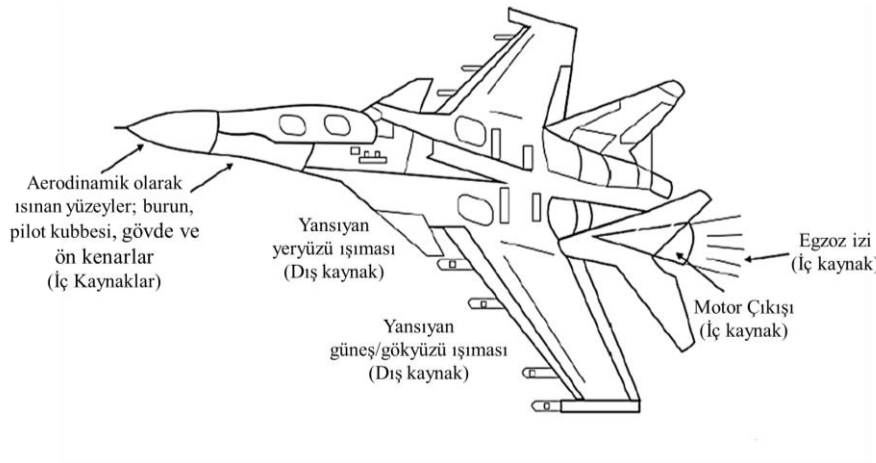
$$M_{\text{arkaplan}} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \epsilon_{\text{arkaplan}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T_{\text{arkaplan}}}} - 1} \right) d\lambda \quad (2.6)$$

Burada, M_{arkaplan} arka planın ışıması, T_{arkaplan} arka planın sıcaklığı, $\epsilon_{\text{arkaplan}}$ arka planın yayıcılık katsayısı, λ_1 ve λ_2 sırasıyla algılamanın başlangıç ve bitiş dalgaboyu değerleri, c ışık hızı, h Planck sabiti ve k_B Boltzman sabitidir.

Kızılötesi güdümlü füzeler söz konusu olduğunda, gökyüzü ışıması birincil gürültü kaynağıdır. Diğer gürültü kaynakları ihmal edilebilir. Bu nedenle, toplam arka plan gürültüsü ışıma spektrumu, gökyüzü ışıma spektrumuna benzer olacaktır.

2.4.2. Hedefin Kızılötesi İmzası

Kızılötesi güdümlü füzelerin havadaki hedefleri uçaklardır. Uçağın farklı bölümleri farklı sıcaklıklardadır ve bu nedenle farklı dalgaboyu bantlarında ışıma yaparlar. Bir uçakta farklı ışıma kaynakları iç ve dış kaynaklar olarak sınıflandırılabilir. İç kaynaklar arasında sıcak motor parçaları, uçak gövdesi ve egzoz izi yer alır. Dış kaynaklar arasında Güneşten, gökyüzünden ve yerden yansıyan ortam ışıması bulunur. Uçaklardan yayılan kızılötesi imza kaynakları Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Sıcak motor parçaları, motor çıkışı ve egzoz izi gibi daha sıcak yüzeyler daha kısa (MWIR) dalgaboyu bantlarında görüntülenirken, uçak gövdesi ve yansıyan radyasyon uzun (LWIR) dalgaboyu bantlarında görüntülenmektedir.



Şekil 2.5. Askeri hava aracının kızılötesi imza kaynakları [3].

Kızılötesi arayıcı başlıklar için hedef, farklı sıcaklığa sahip bölgeler veya alt hedefler ile modellenebilir. Alt hedefler uçağın burnu, gövdesi, motor gibi farklı bölümlerinden oluşmaktadır. Hedefin kızılötesi imza modeli, bilinen yayıcılık katsayıları, sıcaklık ve alt hedefin alanına göre belirlenir. Genel olarak uçağın alt hedeflerinin sahip olduğu sıcaklık değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir [3].

Çizelge 2.2. Askeri hava aracının kızılötesi imza kaynakları [3].

Alt Hedef	Alan (m ²)	Yayıcılık Katsayısı	Sıcaklık (K)
Gövde	30 – 50	0,9	320 – 450
Burun	2 – 5	0,9	350 – 500
Ön Kenar	1 – 2	0,9	350 – 500
Motor Çıkışı	2 – 4	0,9	380 – 550
Pilot Kubbesi	4 – 6	0,5	250 – 400
Egzoz İzinin İç Kısmı	1 – 1,5	0,5	1000 – 1200
Egzoz İzinin Dış Kısmı	2 – 4	0,5	500 – 700

Her bir sıcaklık bölgesinin veya bir alt hedefin radyasyonu, her bir bölgenin her yöne aynı şekilde yayılan gri bir gövde olduğu varsayılarak, birbirinden bağımsız olarak hesaplanır. Hedefin veya alt hedefin ışıması Eşitlik (2.7) kullanılarak hesaplanır.

$$M_{\text{hedef}} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\text{hedef}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T_{\text{hedef}}}} - 1} \right) d\lambda \quad (2.7)$$

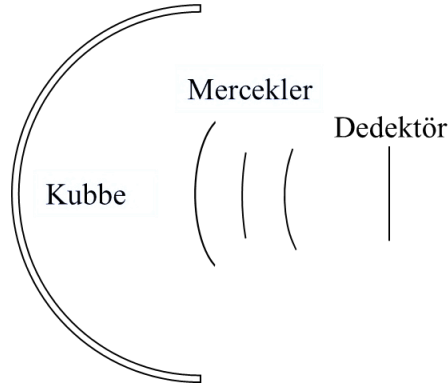
Burada M_{hedef} hedefin ışıması, T_{hedef} hedefin sıcaklığı, ϵ_{hedef} hedefin yayıcılık katsayısıdır.

2.4.3. Isı Fişeklerinin Kızılötesi İmzası

Isı fişekleri, askeri hava araçlarında kızılötesi güdümlü füze tehditlerine karşı kullanılan bir aldatma sistemidir. Bu sistemler ile hedef ışımasından daha şiddetli ışımlar elde edilerek, güdümlü füzenin hedeften saptırılması sağlanmaktadır. Isı fişekleri, siyah cisim veya gri gövde özelliklerine göre yayılan ve kimyasal olarak ısıtılan kaynaklardır. Hedeflerden çok daha küçük, daha hafif ve daha ucuzdurlar. Fiziksel olarak küçük olmaları, hedefin spektral karakteristiğine benzer sıcaklıklara ısıtılmalarına olanak sağlar.

2.5. Arayıcı Başlık Alt Bileşenleri

Kızılötesi arayıcı başlıklar mercekli veya mercek ve aynalı sistemler olarak, iki şekilde tasarlanabilmektedir. Şekil 2.6 bu tez çalışması kapsamında kullanılacak olan kızılötesi arayıcı başlık optik tasarım yerleşimini göstermektedir. Optik sistem bileşenleri sırasıyla kubbe, mercekler ve dedektörden oluşmaktadır. Arayıcı başlığın ana elemanları alt başlıklarda anlatılmıştır.



Şekil 2.6. Kızılötesi arayıcı başlık optik tasarım yerleşimi.

2.5.1. Dedektör

Malzeme yapısına ve algılama mekanizmasına bağlı olarak kızılötesi dedektörler iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar termal detektörler ve kuantum ya da foton dedektörlerdir. Termal dedektörler kızılötesi enerjiyi ısı olarak kullanır ve soğutma gerektirmezler. Ancak tepki süreleri yavaştır ve algılama kabiliyetleri düşüktür. Buna karşılık, kuantum dedektörleri daha yüksek algılama performansına ve daha hızlı tepki süresine sahiptir,

ancak görüntüleme hassasiyetleri dalga boyuna bağlıdır ve doğru ölçüm için soğutulmaları gerekir [22]. Optik tasarım için dedektörün çeşidi veya malzemesi önemli değildir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında dedektör çeşidi veya malzemesi ile ilgili detaylar verilmeyecektir.

2.5.2. Kubbe

Kızılötesi arayıcı başlıklarda kullanılan kubbeler yüksek hızlara ve sıcaklıklara dayanmalıdır. Çevresel koşullardan (örneğin toz, yağmur) etkilenmeyecek ve bu etkinin bir sonucu olarak optik performansı önemli ölçüde düşürmeyecek kadar da sert olmaları gerekir.

2.5.3. Mercek

Kızılötesi arayıcı başlıklarda kullanılan merceklerin görevi hedeften gelen ışığı dedektör yüzeyine odaklamaktır. Sistemde farklı sıcaklıklarda oluşabilecek odak kayıplarını önlemek için, tasarım öncesinde mercek malzemelerinin optik ve mekanik özelliklerinin dikkate alınması gerekir. Optik özellikler, malzemenin kırma indisi, geçirgenlik değeri, dağılma oranı ve Abbe sabitidir. Mekanik özellikler ise sertlik ve termal genleşme katsayısı ile ifade edilir. Ayrıca malzemenin kullanılabilmesi, maliyete, yüzey çeşidine ve insan sağlığına zararlı olmamasına bağlıdır.

Termal Özellikler: Optik malzemeler geniş kullanım alanlarından dolayı değişken sıcaklıklara maruz kaldıkları ortamlara yerleştirilir. Değişen sıcaklık ile malzemenin kırma indisi ve geometrik boyutları değişmektedir. Bu değişimler ile odaklanan ışımada bozulmalar meydana gelir. Bu bozulmalar, kırma indisinin sıcaklığa bağlı değişim oranı (dn/dT) ve termal genleşme katsayısı küçük olan malzemelerin kullanımı ile azaltılabilmektedir.

Sertlik: Sertlik, ürün maliyetini, optik elemanların dayanıklılığını ve üretimini etkileyen bir özelliktir. Malzemenin sertliği, optiklerin çizilme direncini de belirleyerek, kullanılacağı uygulamalara uygun bir yapıda olup olmadığı gösterir. Ancak malzeme

sertliğinin çok yüksek olması, yüzeylere şekil vermeyi zorlaştırarak maliyetin artmasına neden olmaktadır [23].

Geçirgenlik: Herhangi bir optik malzemeyi tanımlayan en önemli özelliklerden biri geçirgenliktir. Sistemi oluşturan optik elemanların, sistemin çalıştığı dalgaboyu aralığındaki geçirgenliği, dedektöre ulaşan enerji miktarını doğrudan etkilemektedir. Optik elemanların geçirgenlikleri ne kadar yüksek olursa dedektöre ulaşan enerji miktarı o kadar yüksek olacak; bu sayede hedef daha iyi görüntülenecek ve arayıcı başlığın performansı artacaktır.

Kırma İndisi: Soğurucu olmayan bir ortam için, ışığın boşluktaki hızının malzeme içindeki hızına oranı malzemenin kırma indisi olarak adlandırılır. Bir malzemenin kırma indisi ışığın dalgaboyuna ve ortamın sıcaklığına bağlıdır. Genel olarak, görünür bölge ve yakın kızılaltı bölgelerde kullanılan ve soğuruculuğu düşük olan malzemelerin kırma indisi dalgaboyu uzadıkça azalır. Ayrıca sıcaklığı artan bir ortamın optik yoğunluğu da azalır.

Dağılma: Birçok malzemenin kırma indisi, soğurması düşük de olsa, dalgaboyuna bağlı olduğundan, optik bileşen (mercek, optik-lif vb.) olarak kullanılabilmesi için kırma indisinin dalgaboyuna bağlılığı da önemlidir. Malzemenin kırma indisinin dalgaboyuna bağlılığı dağılma (dispersiyon) olarak adlandırılır.

Abbe Sayısı: Bir optik elemanın yapıldığı malzemenin dağılmasının bir ölçüsü, Abbe sayısı (v_d) olarak tanımlanmıştır. Sırasıyla 589,3 nm, 486,1 nm ve 656.3 nm dalgaboyları için malzemenin kırma indisi n_D , n_F ve n_C olarak verilirse, Abbe sayısı, $\frac{n_D-1}{n_F-n_C}$ olarak verilir. Abbe sayısı küçüldükçe dağılma büyür.

2.5.4. Kızılötesi Optik Malzemeler

Spektrumun kızılötesi bölgesinde, çok sayıda optik malzeme bulunmaktadır. Ancak, fiziksel özellikler, işlenebilirlik, maliyet dikkate alındığında ve iki bantta geçirgenlik ihtiyacı olduğunda, malzeme listesi oldukça sınırlıdır. Bu bölümde kızılötesi görüntüleme sistemlerinde, 3 – 5 ve 8 – 12 μm dalgaboyu aralığında sıklıkla kullanılan malzemelerden bahsedilmiştir. Tüm malzemelerin dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafikleri EK 1’de verilmiştir.

Germanyum: 3 – 5 μm veya 8 – 12 μm spektral bölgelerde çalışan sistemlerde, pencere ve mercek malzemesi olarak yaygın kullanılan bir malzemedir. Yüksek kırma indisine sahip olması nedeniyle yüksek yansıtıcılığa, dolayısıyla düşük (%50) geçirgenliğe sahiptir. Bu sebeple optik sistemlerde, yansıtmasız kaplamalar ile birlikte kullanılır. Germanyumun yasak enerji aralığının küçük olması, 100 $^{\circ}\text{C}$ gibi görece düşük sıcaklıklarda bile, iletkenlik bandına gerçekleşen ısıl uyarılmaların oldukça fazla olmasına neden olur. Geçirgenliği azalır. Dolayısıyla eğer, 100 $^{\circ}\text{C}$ ’nin üstünde çalışması tasarlanan bir mercek yapımında kullanılacaksa, germanyum iyi bir tercih değildir. Mekanik olarak sağlam işlenmesi orta zorlukta bir malzemedir [24].

AMTIR-1: Yüksek homojenliğe sahip, cam benzeri amorf bir malzemedir. AMTIR-1, 0,75 – 14 μm aralığında, kızılötesi pencereler, mercekler ve prizmalar için kullanılır. Kırılma indisindeki ($72 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) düşük termal değişim, objektif tasarımında odak bozulmasını önlemek adına bir avantajdır. AMTIR-1’in bileşimi $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ olduğu için mekanik ve optik özellikleri germanyuma benzemektedir. Neredeyse germanyum kadar yoğundur ancak daha düşük bir kırma indisine sahiptir ve bu sayede optik sistemde germanyum ile birlikte renk kusurlarının düzeltilmesi için iyi bir seçenek haline gelir. AMTIR-1, soğurma ve dağılımının en düşük olduğu 8 – 12 μm spektral bölgede özellikle iyi performans gösterir ve germanyumdan daha pahalıdır [25].

Çinko Selenür (ZnSe): Geniş bantta (0,63 – 18 μm aralığında geçirgen) çalışan sistemlerde sıklıkla kullanılır. Çinko selenür, çok düşük bir yayıcılık katsayısına sahiptir ve yüksek güçlü kızılötesi lazer optiği için yaygın olarak kullanılır. Çinko selenür

yumuşak bir malzemedir ve bu nedenle kolayca çizilebilir. Çinko selenür, yüksek geçirgenlik gerektiğinde, yüksek kırılma indisi nedeniyle yansıma önleyici bir kaplama ile birlikte kullanılır. Termal şoka karşı yüksek bir dirence sahiptir. Bununla birlikte çinko selenür, çinko sülfür geniş bant (ZnS_Broad) malzemesinin sertliğinin sadece 2/3'üdür. Ancak sert yansıma önleyici kaplamalar ZnSe'nin korunmasını sağlamaktadır. ZnSe'nin maliyeti çinko sülfür geniş bant ile aynıdır ve genellikle germanyumdan daha pahalıdır [26].

Çinko Sülfür (ZnS): 8 – 12 µm bandında iyi görüntüleme kalitesine sahiptir. 8 – 12 µm'ye göre daha yüksek soğurma ve saçılma ile 3 – 5 µm bandında da geçirgendir. Malzeme, yüksek dayanıma ve sertliğe sahiptir. Zorlu çevresel koşullarına sahip ortamlara karşı iyi direnç gösterir. Çinko sülfür, normal ZnS ve geniş bant ZnS_Broad olmak üzere iki çeşite sahiptir. ZnS_Broad'ın 3 – 5 µm ve 8 – 12 µm bölgelerinde geçirgenliği daha fazladır. Çinko sülfürün normal ve geniş bant geçiren çeşitleri dayanıklılık özelliklerinden dolayı özellikle hızlı uçak ve vakum uygulamalarındaki kızılötesi pencereler ve kubbeler için kullanılır [27].

Baryum Florür (BaF₂): Baryum florür, 0,25 ile 9,5 µm arasında %90'dan fazla geçirgenliğe sahiptir. Baryum florür orta sertlikte bir malzemedir ve termal şoka az dayanıklıdır. Genellikle kriyojenik soğutmalı termal görüntüleme sistemlerinde kullanılır. Pahalı ve büyük boyutlarda kolayca bulunamayan bir malzemedir [28].

Potasyum Klorür (KCl): Potasyum klorür lazer optiği, pencereler, lensler ve prizmalar için kızılötesi bölgede 20 µm dalgaboyuna kadar geçirgenlik istendiğinde kullanılır. Potasyum klorür suda çözündüğü için nemden korunmalıdır veya nemli ortamlarda çalışmasına ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmamalıdır. Kullanılabileceği ortam sıcaklığı en fazla 400 °C'dir [29].

Talyum Boromiyodid (KRS5): 600 nm – 40 µm aralığında yaklaşık %70 geçirgenliğe sahiptir. KRS5'in en yüksek çalışma sıcaklığı 200 °C'dir. Malzemenin yumuşaklığı, elde edilebilecek yüzey şeklini ve yüzey kalitesini sınırlar [30].

Galyum Arsenit (GaAs): Kızılötesi bölgede 2 – 15 µm arasında geçirgen ve yarıiletken bir malzemedir. Galyum arsenit, neredeyse germanyum kadar sert, güçlü ve yoğundur. 2,5 ile 12 µm arasında düşük soğurma katsayısına ($0,01 \text{ cm}^{-1}$) sahiptir. Malzeme germanyum ve çinko selenüre göre daha pahalıdır [31].

2.6. Görüntü Kalitesini Etkileyen Faktörler

Bir görüntüleme sisteminde optik elemanlar, dedektör ve elektronik elemanlar gibi bileşenlerin tümü bir çözünürlüğe sahiptir. Genel sistem çözünürlüğü, alt sistemlerin çözünürlüğünün bir bileşimidir. Genel olarak, iyi tasarlanmış sistemlerde, elektronik kartlar ve ekran algılanan görüntü kalitesini olumsuz yönde etkilemez. Bu nedenle, sistemin görüntü kalitesi optik elemanların ve dedektörün performansına bağlıdır.

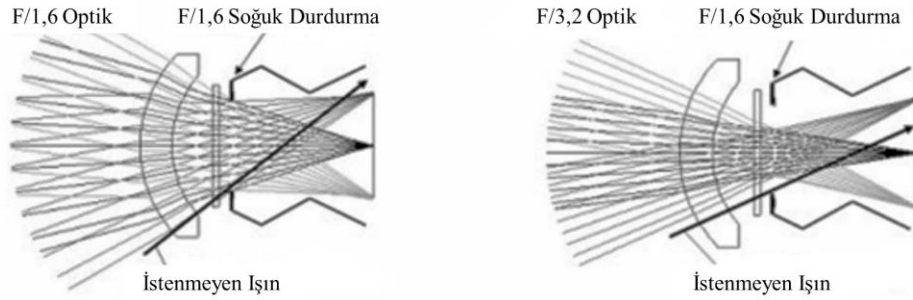
Görüntüleme sistemlerinin çözünürlüğü optik sistemde oluşan kusurlara ve dedektörün piksel boyutuna bağlıdır. Dedektörün piksel boyutu, ayırt edilebilecek en küçük boyutu (yakın mesafeli iki çizgi çiftini ayırabilme kabiliyeti) belirler. Optik sistemdeki çözünürlük ölçüsü de Airy diskidir. Airy diskin dedektörün piksel boyutundan küçük olması optik tasarımı zorlaştırırken, büyük olması da sistemin çözünürlüğünü düşürmektedir. Bu nedenle, kızılötesi görüntüleme sisteminin kalitesi, dedektör ve optik sistemin birlikte oluşturduğu görüntünün kalitesi ile belirlenir. Bu bölümde, görüntünün kalitesi üzerinde etkisi olan parametreler ve teknik özellikler açıklanacaktır.

2.6.1. Çözünürlük ve F Sayısı

Kızılötesi görüntüleme sistemi için çözünürlük, dedektörün bir piksel boyutu ile belirlenir. Daha küçük pikseller, daha fazla veri toplama noktası ile daha fazla ayrıntı elde edilmesini sağlar. Daha küçük ve fazla sayıda piksel ayrıca termal görüntüde daha büyük görsel çözünürlük anlamına gelir. Böylece, belirli bir görüş alanı için termal görüntüde daha küçük detaylar tanımlanabilir. Bu sebeple dedektör ve optik sistem için çözünürlüğü eşleştirmek önemlidir. Yanlış seçim, optik tasarımı zorlayabilir veya düşük kaliteli bir görüntü oluşmasına neden olur. Mümkün olan en iyi çözünürlük için, merceğin F sayısı ile kameranın piksel boyutu uyumlu olmalıdır. F-sayısı (F/#) sistemin etkin odak uzaklığının giriş açıklığına oranıdır ve Eşitlik (2.8) ile verilir.

$$F/\# = EFL/D \quad (2.8)$$

Bir kızılötesi arayıcının F sayısı, sistemde kullanılan dedektörün soğuk durdurmasının değerine bağlıdır. Termal gürültüyü azaltmak için, kızılötesi foton dedektörleri “dewar” adı verilen bir sistem içerisinde bulunur ve bu sistem kriyojenik sıcaklıklara soğutulur. Işın engelleyici, dedektör düzlemine bitişik olup, istenmeyen radyasyonun dedektöre ulaşmasını önler. Bu engelleyici soğuk durdurma olarak adlandırılır ve dedektörün radyasyon aldığı açığı sınırlar [5]. İstenmeyen ışınların dedektöre ulaşmaması için, optik sistemin F sayısının, dedektörün soğuk durdurma değeri ile aynı olması gerekmektedir. Şekil 2.7’de iki farklı F sayısına sahip optik eleman ile aynı dedektöre gelen ışınlar gösterilmiştir. F sayısının soğuk durdurma ile aynı değerde olması durumunda, istenmeyen ışınların dedektöre ulaşmadığı görülmektedir [32].



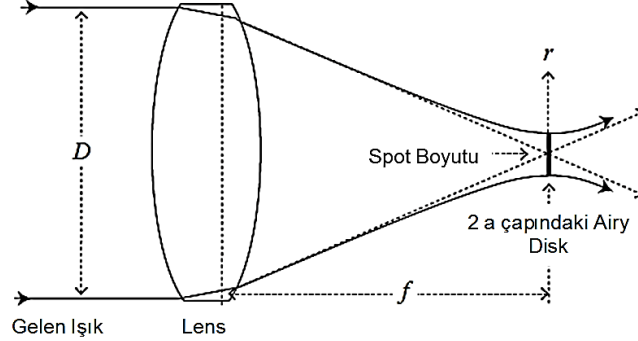
Şekil 2.7. Soğuk durdurma ile optik sistemin F sayısının karşılaştırması [32].

2.6.2. Airy Disk

Airy disk sistemdeki dairesel bir açıklıktan meydana gelen kırınımın sonucudur. Bu dairesel açıklık sistem yapısına bağlı olarak ışın engelleyici olabileceği gibi merceklerin optik açıklıkları da olabilmektedir. Şekil 2.9’da gösterildiği gibi ışığı odaklamak için D çapına sahip pozitif bir lens kullanılırsa, gelen dalga giriş açıklığında kırınıma uğrar ve odak düzlemindeki spotun çapı $2a$ Eşitlik (2.9) ile verilir.

$$2a = 2,44 \left(\frac{f\lambda}{D} \right) = 2,44 (F\# \lambda) \quad (2.9)$$

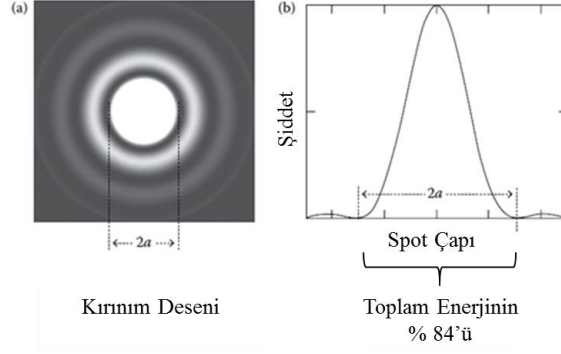
Burada f merceğin odak uzaklığı, D giriş açıklığı, λ dalgaboyudur. Airy disk'in tanımında kullanılan nicelikler Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Bir lensin ışığı odaklaması.

Bir merceğe gelen ışınların geometrik optiğe ve dalga optiğine göre davranışı Şekil 2.16'da sırasıyla kesikli ve sürekli çizgiler ile gösterilmiştir. Geometrik optiğe göre ilerleyen ışınlar odak düzleminde sonsuz küçük nokta oluşturacak şekilde odaklanırken; dalga optiğine göre ilerleyen ışınlar kırınımın bir sonucu olarak odak düzleminde $2a$ çapında bir spot oluşturacak şekilde odaklanır ve bu değer Airy disk çapıdır.

Bir merceğin veya bir optik sistemin odak düzleminde oluşturabileceği en küçük spot çapı Airy disk çapına eşittir ve Airy disk çapı optik sistemin kırınım limitini belirlemektedir. Airy disk toplam enerjinin yaklaşık %84'ünü içerir (Şekil 2.9) [5]. Bu nedenle odaklanan spot çapının %84'ü dedektörün bir piksel boyutundan küçük olmalıdır. Ulaşılabilir en küçük spot çapı bir pikselin boyutunu aşarsa, dedektör tam çözünürlük kapasitesinde kullanılamaz. Bu durum görüntüleme sisteminin çözünürlüğünün ve görüntü kalitesinin düşmesine neden olur.

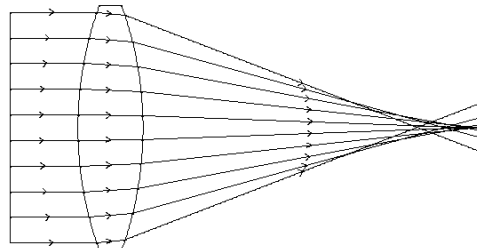


Şekil 2.9. (a) İki boyutlu dairesel kırınım modeli (b) Dairesel bir kırınımın şiddet profili.

2.6.3. Optik Kusurlar

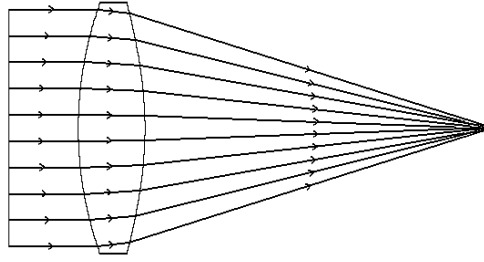
Optik kusurlar, gerçek ve ideal optik sistem arasındaki sapmalardır. Küresel yüzeyli tek mercekli optik sistemlerin neredeyse tamamında bu sapmalar vardır. Optik kusurlar, optik malzemelerin kırma indisine, dağılıma oranına ve optik yüzeylerin geometrik şekline bağlıdır [5]. Optik sistemin performansını etkileyen kusurlar, tek renk ve renk kusurları olarak ikiye ayrılır. Tek renk kusurları küresel kusur, koma, astigmatizm, alan eğriliği ve biçim bozulmasıdır. Renk kusurları ise enine ve boyuna renk kusurlarıdır [18]. Optik tasarımdaki hedeflerden biri de bu kusurları en aza indirmektir.

Küresel Kusur: Optik eksen ile ışınlar arasındaki mesafe arttıkça ışınların optik eleman yüzeyine geliş açısı artar ve daha çok kırılarak optik elemana daha yakın bir bölgede odaklanırlar. Odak noktası konumunun ışınların optik eksene olan mesafesine bağlı olarak değişmesi küresel kusur olarak adlandırılır [18]. Küresel merceklerin (Şekil 2.10) kullanımı üretim kolaylığı nedeniyle oldukça yaygındır. Ancak, küresel mercekler kusursuz görüntüleme için ideal değildir.



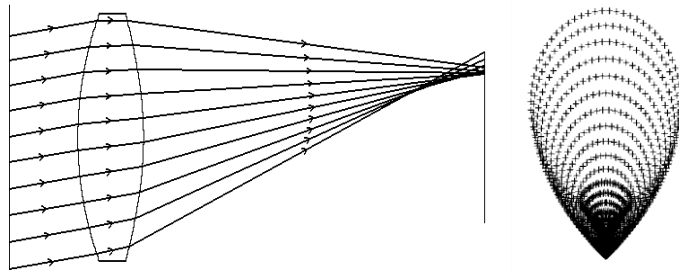
Şekil 2.10. Küresel kusuru olan mercek.

Küresel kusuru kontrol altına almanın iki temel yöntemi vardır. Bunlar optik elemanın yüzey eğriliklerinin uygun şekilde değiştirilmesi (Şekil 2.12) veya optik gücün bölünerek birden fazla elemana dağıtılmasıdır. Optik güç birkaç optik elemana bölündüğünde ışınların her bir yüzeye geliş açısı düşürülebilir ve bu sayede küresel kusur azaltılabilecektir. Küresel olmayan merceğin kullanıldığı durumda elde edilen sistemin görüntüsü Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Küresel olmayan mercek.

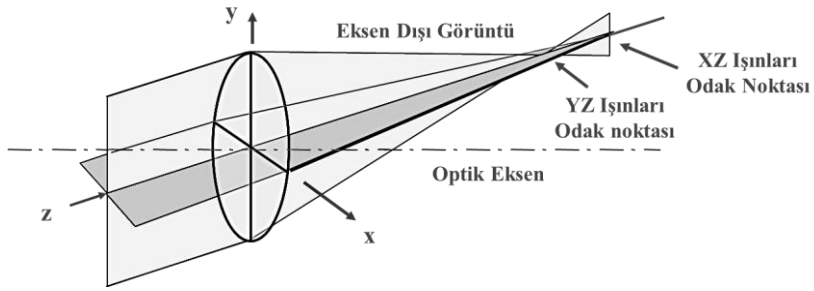
Koma: Optik sistemde merceğe açılı gelen ışınların mercek yüzeyi üzerinde kullandığı bölgeye bağlı olarak enine büyütmenin değişmesi sonucu oluşan kusur koma kusuru olarak adlandırılır. Nesne düzlemindeki bir daire, koma kusurunun etkisi ile görüntüde, sapma etkisine adını veren kuyruklu yıldız biçimli bir öge olarak görünür [18]. Örnek bir koma kusuru Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Koma kusuru.

Giriş açıklığının mercek yüzeyinde olmadığı durumlarda giriş açıklığı konumu değiştirilerek ışınların mercek yüzeyine daha simetrik şekilde ulaşması sağlanabilir ve bu sayede koma kusuru düzeltilebilir.

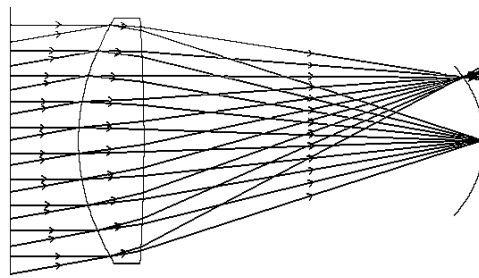
Astigmatizm: Merceğe optik eksen üzerindeki iki dik düzlemde gelen ışınlar, farklı odak noktalarına sahip olduğunda ortaya çıkan kusur astigmatizm olarak adlandırılır [33]. Şekil 2.13'te örnek bir astigmatizm kusuru gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Astigmatizm kusuru.

Küresel olmayan yüzeylere sahip mercekler kullanılarak veya mercek ile açıklık engeli arasındaki mesafe değiştirilerek astigmatizm azaltılabilir.

Alan Eğriliği: Merceğe farklı açılardan gelen paralel ışınların eğri bir yüzeye odaklanmasına alan eğriliği kusuru denir [33]. Şekil 2.14'te alan eğriliği kusuru gösterilmiştir.



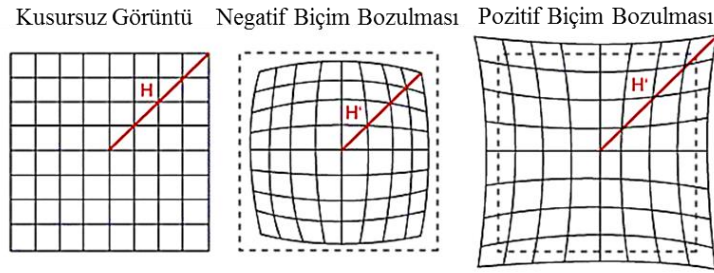
Şekil 2.14. Alan eğriliği kusuru.

Optik sistemde kullanılan mercek sayısı artırılarak veya dedektöre yakın bir bölgede iraksak mercek kullanılarak alan eğriliği kusuru düzeltilebilir.

Biçim Bozulması: Merceğin odak uzaklığı ve dolayısıyla büyütme, merceğin yüzeyine göre değişir. Bu değişim bozulmaya yol açar. Bozulma, görüntünün bölümlerinin diğerlerinden daha fazla veya daha az büyütüldüğü yerdir. Bir merceğin geometrik biçim bozulması Eşitlik (2.10) ile verilir. Görüntüde biçim bozulması iki şekilde olur, ilki kenarların merkezden büyük olduğu, pozitif biçim bozulması ve ikincisi görüntünün merkezinin kenarlardan daha büyük olduğu, negatif biçim bozulmasıdır. Şekil 2.15'te farklı biçim bozulmaları gösterilmiştir.

$$GD = 100 \cdot \frac{H' - H}{H} \quad (2.10)$$

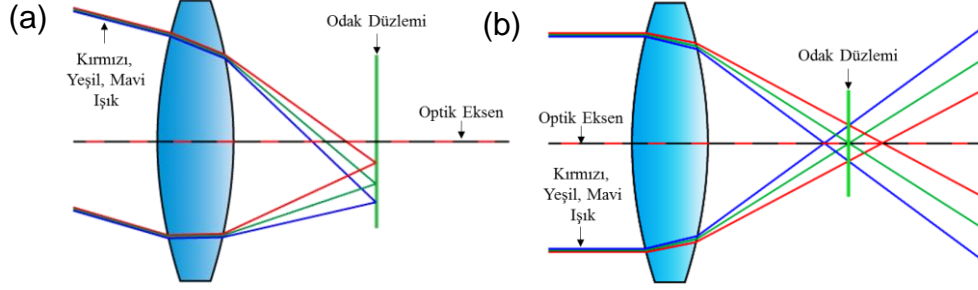
Burada H' ve H sırasıyla, kusurlu ve kusursuz görüntünün merkezinden köşesine kadar olan uzaklıktır.



Şekil 2.15. Biçim bozulması kusuru.

Renk Kusurları: Renk kusurları, malzemenin kırma indisinin dalgaboyuna bağlı olmasından kaynaklanır. Enine ve boyuna olmak üzere iki çeşit renk kusuru vardır. Enine renk kusurları, odak uzaklığının (veya görüntü pozisyonunun) dalgaboyu ile dikey yönde değişmesidir (Şekil 2.16 (a)). Optik malzemelerin kırma indisi, kısa dalgaboyları için uzun dalgaboylarına göre daha yüksektir. Bu özellik, kısa dalgaboylarının, bir merceğin her bir yüzeyinde daha güçlü bir şekilde kırılmasına neden olur. Örneğin mavi ışık ışınları

merceğe kırmızı ışıklardan daha yakın bir noktada odaklanır. Odak uzaklığının dalgaboyu ile yatay yönde değişmesi boyuna renk kusuru olarak adlandırılır (Şekil 2.16 (b)).



Şekil 2.16. (a) Enine ve (b) boyuna renk kusuru.

Iraksak bir merceğin renk kusuru, yakınsak bir merceğin renk kusurunun zıttı olur. Bu kusur iki farklı tür camdan yapılmış yakınsak ve iraksak bir mercek birleşimi kullanılarak büyük ölçüde azaltılabilir.

2.6.4. Yüzey Çeşitleri

Görüntüleme sistemlerinde performans gereksinimlerinin sağlanabilmesi için optik tasarımcıların tasarımlarının $F/\#$ değerini artırması gerekir. Bu yöntem istenen çözünürlük hedefine ulaşmayı sağlasa da, sisteme giren ışık miktarının azalmasına yol açar. Bununla birlikte, tasarımdaki optik elemanlarda küresel olmayan yüzeylerin kullanılması, kusurları düzeltir. Aynı zamanda küresel olmayan yüzeyler iyi görüntü kalitesini korurken düşük F sayısı ile yüksek verimli sistemler tasarlamayı mümkün kılar. Optik elemanlarda kullanılan üç temel yüzey çeşidi vardır. Bunlar, küresel, küresel olmayan ve konik yüzeylerdir [18].

Küresel Yüzeyler: Küresel yüzeyler yalnızca yüzeyin eğrilik yarıçapı parametresi ile tanımlanır. Küresel yüzeyin eğriliği yüzey boyunca her noktada aynıdır.

Küresel Olmayan (Aspheric) Yüzeyler: Küresel yüzeylerin aksine küresel olmayan yüzeyler yüzey boyunca sadece bir eğrilik yarıçapı ile tanımlanamaz. Çünkü yüzey eğriliği yüzey boyunca bölgesel olarak değişir.

Konik Yüzeyler: Yüksek mertebeden küresel olmayan terimlerin sıfır olduğu durumda küresel olmayan yüzey dairesel simetrik konik bir yüzey formunu alır. Bir merceğin yüzeyi Eşitlik (2.11) ile tanımlanır.

$$z(r) = \frac{r^2/R}{1 + \sqrt{1 - \frac{(1+K)r^2}{R^2}}} + \sum_{m=1}^M \alpha_{2m} r^{2m} \quad (2.11)$$

Burada R yüzeyin eğrilik yarıçapı, r radyal koordinat sisteminde optik eksene dik uzaklık ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$) ve K koniklik sabitidir. $\alpha_{2m} r^{2m}$ ise yüksek dereceli asferik terimlerdir. Yüksek dereceli terimlerin kullanılmadığı bir asferik yüzey sadece koniklik sabiti ile tanımlanır. Böyle bir durumda koniklik sabitinin aldığı değere göre yüzey şekli değişecektir.

Çizelge 2.3. Koniklik sabiti ile yüzey şekilleri arasındaki ilişki.

Koniklik Sabiti	Yüzey Şekli
$K > 0$	Kutupları Basık Elipsoid
$K = 0$	Küresel
$-1 < K < 0$	Kutupları Şişkin Elipsoid
$K = -1$	Paraboloid
$K < -1$	Hiperboloid

2.7. Optik Performans Analizleri

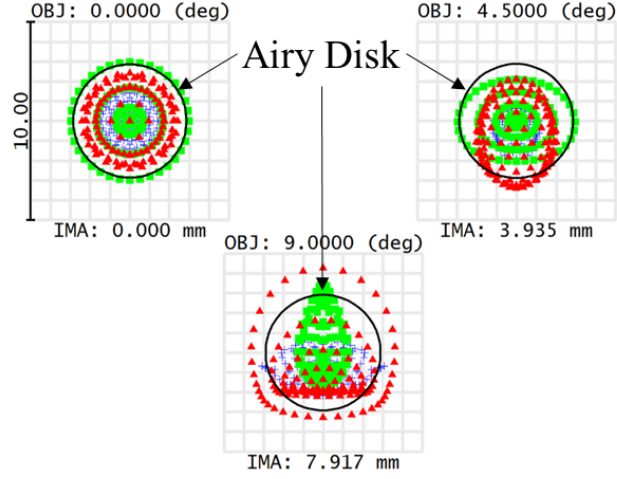
Bu bölümde çalışma kapsamında tasarlanacak olan sistemin görüntü performansının değerlendirilmesinde kullanılacak olan OpticStudio yazılımı arayüzleri açıklanacaktır. Bu arayüzler spot diyagramı, modülasyon transfer fonksiyonu, Seidel diyagramı ve enerji dağılımıdır.

2.7.1. Spot Diyagramı

Spot diyagramı, tasarlanan optik sistemi oluşturan yüzeylerden herhangi birinin üzerine gelen ışınların yüzey üzerindeki dağılımlarını gösteren arayüzdür. Spot diyagramında her nokta, bir ışınma geliş açısına ait ışınların dağılımı gösterilebileceği gibi yalnızca seçilen ışınma geliş açısına karşılık gelen ışınların dağılımını da gösterilebilmektedir. Spot diyagramındaki her nokta yüzeye ulaşan bir ışını temsil etmektedir. Spot diyagramı, optik sistemdeki geometrik veya optik kusurların incelenmesinde oldukça yaygın kullanılan bir arayüzdür.

Arayüze herhangi bir kısıtlama getirilmediği sürece spot diyagramı görüntü düzleminde oluşturulan spotun tamamını göstermektedir. Bu nedenle performansın doğru değerlendirilebilmesi için kırınım limitine karşılık gelen Airy disk değeri arayüzüne girilmeli ve değerlendirmeler bu referans dikkate alınarak yapılmalıdır.

Optik sistem tarafından oluşturulan spotun çapı, Airy disk çapına ne kadar yakınsa sistem performansı o kadar yüksektir ve spot çapının Airy disk çapına eşit olduğu sistemler kırınım limitindedir. Bu limit optik sistemin kalitesini niteliksel olarak tanımlamak için kullanılmaktadır. Şekil 2.17’de OpticStudio yazılımında elde edilen bir spot diyagramının görüntüsü verilmiştir. Her bir kare grup, bir ışınma geliş açısına karşılık gelmektedir. Bu kare gruplardaki renkli noktalar farklı dalgaboylarındaki ışınları, siyah çemberler tasarımın yapıldığı dalgaboyundaki Airy diski göstermektedir. Spot diyagramında her bir ışınma geliş açısına karşılık gelen spot görüntüleri ve boyutları bulunmaktadır. Optik tasarım sürecinde, sistemin optimizasyonu spot diyagramındaki değerler takip edilerek yapılmaktadır. Bu diyagramda birimi belirtilmeyen tüm ölçüler μm ’dir.



Şekil 2.17. Spot diyagramı.

Spot diyagramı, arayıcı başlık optik tasarımı, optimizasyonu ve performans analizi sırasında ışınların dedektör yüzeyi üzerinde oluşturdukları spot büyüklüklerinin takip edilmesinde ve bu büyüklükler kullanılarak sistemin sahip olduğu performansın değerlendirilmesinde kullanılacaktır.

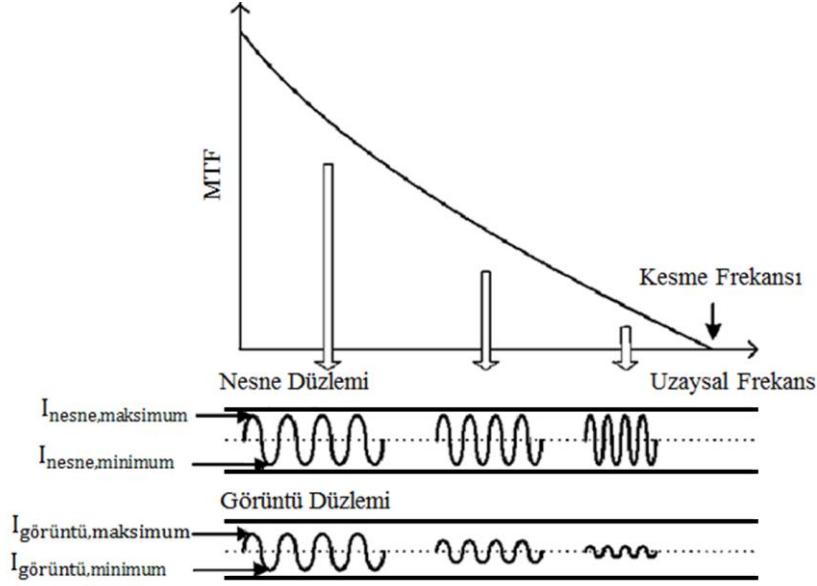
2.7.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu

Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) optik sistemin bir siyah bir beyaz çizgiden oluşan çizgi çiftini birbirinden ayırt edilebilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Birimi milimetre başına çizgi çifti (çç/mm) ya da miliradyan başına çizgi çiftidir (çç/mrad). MTF kontrastın bir ölçüsü olduğu için sistem performansı ile doğrudan ilişkili bir analizdir. Dolayısıyla optik sistemin performansının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir yöntemdir. Kontrast veya modülasyon Eşitlik (2.12) ile hesaplanır.

$$MTF = \frac{I_{\text{maksimum}} - I_{\text{minimum}}}{I_{\text{maksimum}} + I_{\text{minimum}}} \quad (2.12)$$

Burada I parlaklıktır. Eşitlik 2.24'ün daha iyi açıklanabilmesi için MTF'nin şematik görüntüsü Şekil 2.18'de verilmiştir. Şekil 2.18 incelendiğinde, hedeften gelen parlaklık ile görüntünün parlaklığının farklı olduğu görülmektedir. Görüntünün parlaklığının

azalmasının nedeni kızılötesi enerjinin optik sistemi oluşturan elemanlardan geçerken zayıflamasıdır.

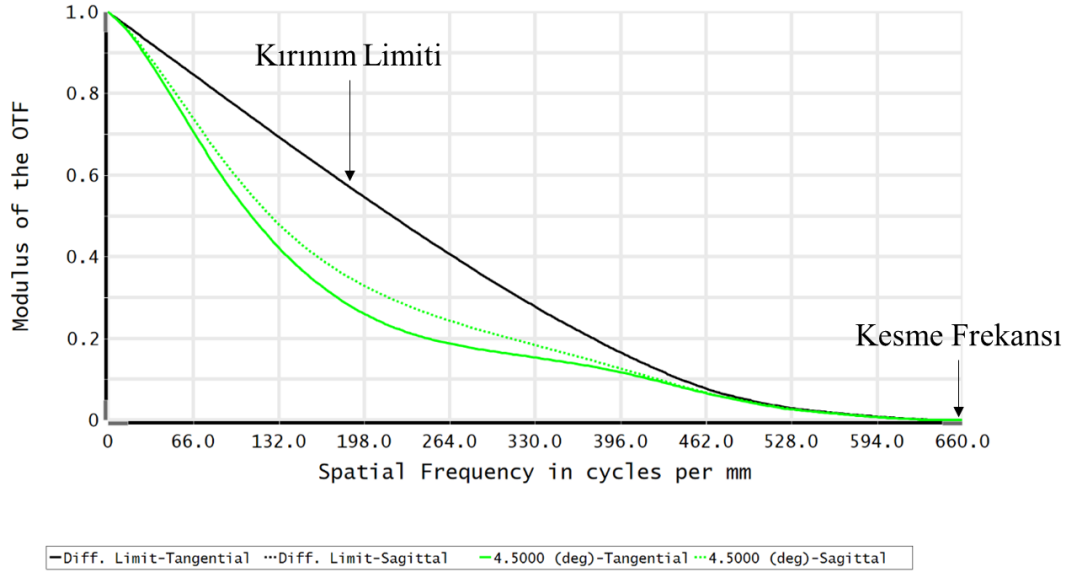


Şekil 2.18. Modülasyon transfer fonksiyonu.

MTF, 0 ile 1 arasında değişen değerlere sahiptir (ideal/mükemmel sistem için 1'dir.). MTF'nin 0'a gittiği uzaysal frekans optik kesme frekansı olarak adlandırılır ve Eşitlik (2.13) ile verilir [34].

$$v_{\text{kesmefrekansı}} = \frac{1}{(\lambda \cdot F/\#)} \quad (2.13)$$

OpticStudio yazılımındaki MTF grafiği, tasarlanan optik sistemin her bir ışığa geliş açısı için yazılım tarafından hesaplanan MTF verilerini uzaysal frekansa (milimetre başına çizgi çifti cinsinden) karşı grafik halinde gösteren arayüzdür. Şekil 2.19'da OpticStudio yazılımında tek ışığa geliş açısı için elde edilen örnek bir MTF grafiğinin görüntüsü verilmiş; kırınım limiti ve kesme frekansı nicelikleri grafik üzerinde gösterilmiştir.

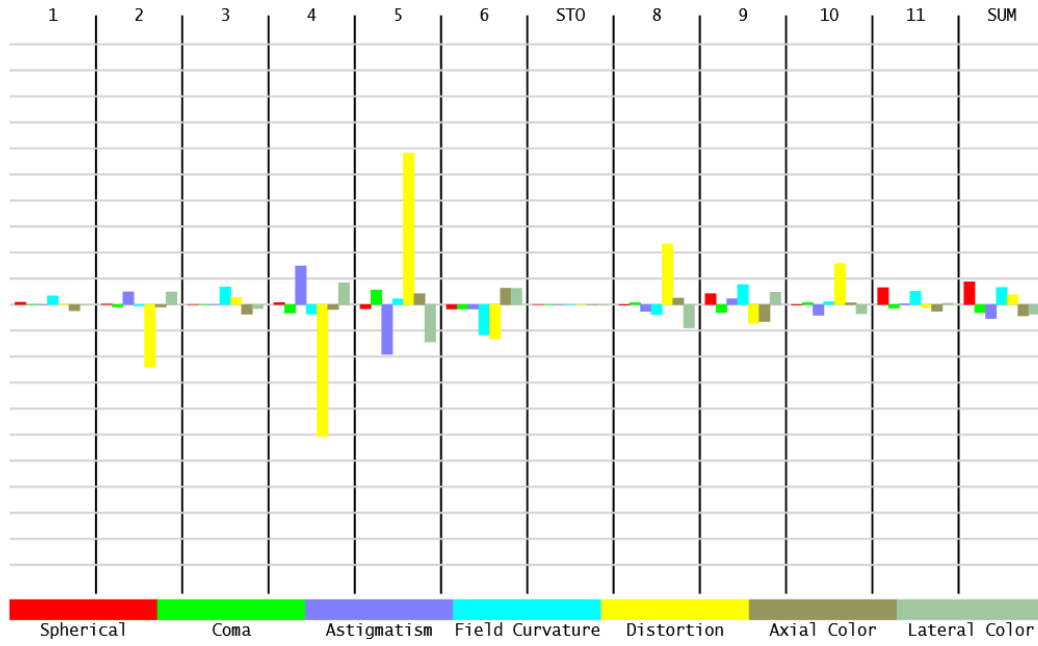


Şekil 2.19. OpticStudio yazılımında elde edilen örnek bir modülasyon transfer fonksiyonu grafiği.

MTF grafiği arayıcı başlık optik tasarımı, optimizasyonu ve performans analizi sırasında sistemin sahip olduğu çözünürlük performansının değerlendirilmesinde kullanılacaktır.

2.7.3. Seidel Diyagramı

Seidel diyagramı tasarlanan optik sistemi oluşturan yüzeyler tarafından oluşturulan optik kusurları sütun grafiği şeklinde gösteren arayüzdür. Optik sistemdeki her bir optik eleman yüzeyinin meydana getirdiği kusurlar ve tüm sistemin sahip olduğu kusurların toplamı bu diyagramda incelenir [35]. Şekil 2.20’de OpticStudio yazılımında elde edilen örnek bir Seidel diyagramı verilmiştir. Diyagramın üstünde yer alan numaralar, STO açıklık engeli, SUM odak düzlemi olmak üzere sistemi oluşturan yüzeylerin numaralarını; her bir numaranın bulunduğu bölümdeki renkli sütunlar ilgili yüzey tarafından oluşturulan optik kusurların miktarını göstermektedir. Diyagramda kırmızı, yeşil, mor, mavi, sarı, haki ve gri renkler sırasıyla küresel, koma, astigmatizm, alan eğriliği, biçim bozulması, enine renk ve boyuna renk kusurlarına karşılık gelmektedir.

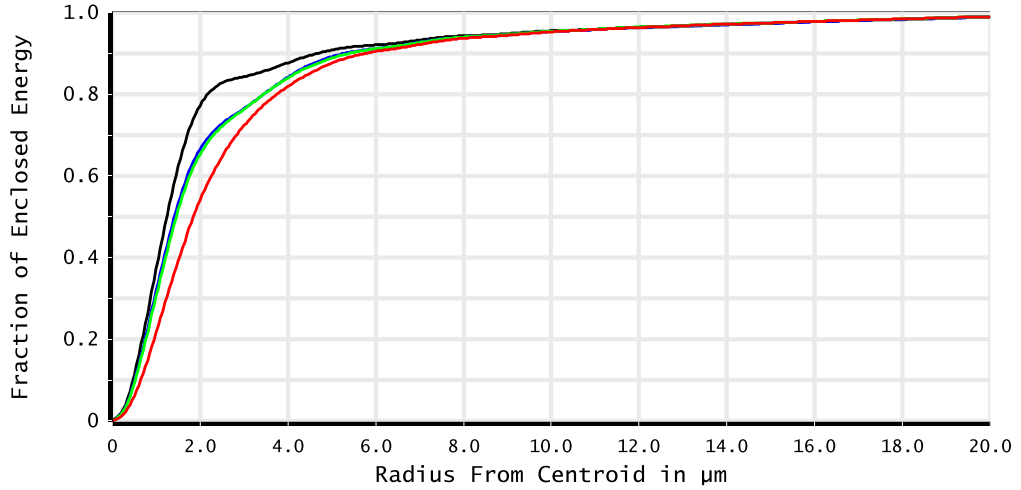


Şekil 2.20. OpticStudio yazılımında elde edilen örnek bir Seidel diyagramı.

Seidel diyagramı spot diyagramı ile birlikte arayıcı optik tasarımı, optimizasyonu ve performans analizi sırasında yüzeylerden meydana gelen kusurların belirlenmesi ve sistemin odak düzleminde sahip olduğu kusurların değerlendirilmesinde kullanılacaktır.

2.7.4. Enerji Dağılımı

Görüntü yarıçapının bir fonksiyonu olarak çizilen enerji yüzdesidir. Grafikte yatay eksen, spot merkezinden uzaklığı temsil ederken, dikey eksen spot diyagramındaki her bir açı için detektöre düşen enerjinin oranını temsil etmektedir. Enerjinin %80'inin piksel boyutuna düşmesi optik sistemin seçilen dedektör için uygun olduğunun göstergesidir [36]. Örnek olarak, Şekil 2.21, 5,5 μm piksel boyutuna sahip bir detektör ile kullanılan optik sistemin enerji dağılımını göstermektedir. Grafikte de görüldüğü gibi 5,5 μm 'ye karşılık gelen enerji dağılımı %80'den büyüktür.



Şekil 2.21. Piksel boyutu 5,5 μm olan bir detektör için tasarlanan bir optik sistemde enerji dağılımı.

2.8. Atermalizasyon

Optik sistemin sıcaklığı değiştiğinde optik elemanların tüm boyutları artar veya azalır. Sıcaklık değişimi ile değişen bir diğer parametre de sistemi oluşturan optik elemanların kırma indisleridir. Boyutlardaki ve kırma indislerindeki değişimler optik sistemin odak uzaklığında bozulmaya neden olur. Değişiklikten kaynaklanan odak uzaklığındaki bozulmayı telafi eden yöntem atermalizasyon olarak bilinir. Genel olarak kullanılan üç atermalizasyon tekniği vardır ve teknik seçimi sistemin kullanılacağı uygulamaya bağlıdır [37,38]. Bu teknikler, mekanik olarak pasif, elektromekanik olarak aktif ve optik olarak pasif atermalizasyondur. Her seçenek, söz konusu sistemin maliyetine, performansına vb. göre uygun şekilde değerlendirilir [39].

Mekanik pasif atermalizasyon, bir optik elemanların odak bozulmasını telafi eden bir miktarda mekanik parçalar kullanılarak hareket ettirilmesidir. Bu yöntemde uygun termal genleşme katsayıları aralığına sahip farklı ara parçalar veya yapısal elemanlar kullanılarak odak bozulması ortadan kaldırılabilir. Fakat optik elemanların veya ara parçalarının fazladan, farklı mekanik malzemeler ile yapılması montaj hassasiyetini bozarak, doğrusal olmayan hareketliliğe sebep olabilir. Bu nedenle, mekanik pasif atermalizasyon yöntemi, az optik elemana sahip sistemlerde kullanılır [40].

Elektromekanik aktif atermalizasyon, sıcaklık sensörlerinden gelen bilgileri kullanarak kontrollü bir şekilde hareketli mekanizmalar ile optik elemanların hareket ettirilmesidir. Karmaşık, ağır ve güç gerektiren bir yöntem olduğu için, zoom lensler gibi benzer yapı ile hareket ettirilen ve kontrol edilen sistemlerde en uygun yöntemdir [37,38].

Optik olarak pasif atermalizasyon tekniğinde, farklı mercek malzemelerini kullanılarak sistemdeki odak kaybı ortadan kaldırılır. Bu atermalizasyon yöntemi hareketli parça gerektirmediğinden, diğer tekniklere göre önemli avantajları vardır. Daha ucuz, daha güvenilir ve daha hafif tasarımları sağladığından, bu gereksinimlerin önemli olduğu sistemler için en uygun yöntemdir [40]. Herhangi bir hareketli parça eklemeyen, sadece optik elemanlar ile yapılabildiğinden ve diğer iki yöntemle göre daha güvenilir olmasından dolayı, kızılötesi arayıcı optik sistemine en uygun yöntemdir. Çalışma kapsamında optik olarak pasif atermalizasyon, optik tasarımdan sonra sıcaklık analizlerinin yapılması ve sistemin çalışması istenen sıcaklık aralığında iyileştirilmesi ile gerçekleştirilecektir.

3. ARAYICI BAŞLIK OPTİK TASARIMI

Bu bölümünde, sistemde kullanılacak dedektör ve optik eleman malzemeleri seçilecektir. Radyometrik hesaplamalar yapılarak optik sistem parametreleri belirlenecek ve OpticStudio yazılımı kullanılarak arayıcı başlık optik tasarımı yapılacaktır. Optik tasarım süreci üç aşamalıdır. İlk aşama tasarım parametrelerinin belirlenmesi ile optik sistemin başlangıç sınır şartlarının oluşturulmasıdır. İkinci aşama tasarımı iyileştirmektir. Son aşama, sistemin optik performansını değerlendirmek için analizlerin yapılmasıdır.

Optik tasarımın amacı, bir dizi sistem (örneğin, etkin odak uzaklığı) ve fiziksel (örneğin, merceğin kalınlığı) sınırlamaları karşılayan ve ayrıca yüksek optik performans (yani düşük optik kusurlar) sağlayan optimum mercek parametreleri setini bulmaktır. Bu amaca başlangıçta oluşturulan sistem optimize edilerek ulaşılabilir. Optimizasyon süreci boyunca kullanılan değişkenler, merceklerin yüzey eğrilikleri, merkez kalınlıkları, mercekler arası mesafeler, mercek malzemeleri ve yüzey çeşididir.

Optimum bir tasarıma ulaşmak için, birçok optimizasyon işleminin toplamı olarak bir Merit fonksiyonu (MF) tanımlanır. Merit fonksiyonunun anlık değeri Eşitlik (3.1) ile verilir. [35].

$$(MF)^2 = \frac{\sum W_i (P_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (3.1)$$

Burada W ağırlık, P anlık değer, T belirli bir işlemcinin hedeflenen değeri ve i farklı optimizasyon işlemcilerini gösteren alt indistir. İşlemciler merit fonksiyonuna eklenen parametrelerin ve sınır şartlarının tanımlanması için kullanılır. Merit fonksiyonunun başlangıç değeri, sistem tasarımı için fonksiyona girilen parametreler ve atanan değişkenler ile belirlenir. Fonksiyonun son değeri ise, o ana kadar atanan değişkenlerle elde edilebilecek en iyi konfigürasyonun göstergesidir. Merit fonksiyonunun son değeri ne kadar düşükse, sistemin kırım limitine yaklaşan mercek setini elde etme olasılığı o kadar yüksektir.

Çalışmaya tasarım parametrelerinin belirlenmesi ile başlanacaktır. Parametrelerin belirlenmesinden sonra arayıcı başlık optik tasarımı için iki bantta geçirgen malzemeler incelenecek ve tasarım gereksinimlerini sağlayacak malzemeler seçilecektir.

OpticStudio yazılımı ile optik tasarım, dedektörün en küçük parçası olan bir piksel modellenerek yapılmaktadır. Farklı açıda gelen ışınlar bir pikselde nasıl odaklanırsa, dedektörün tamamındaki performansı da aynı olacaktır.

Optik sistemin tasarımı için ihtiyaç duyulan parametreler, dedektörün çözünürlüğü, dedektörün bir pikselinin boyutu, dedektörün bir çizgi çiftini ayırma gücü, odak uzaklığı, giriş açıklığı, görüş açısı ve F sayısıdır. Merit fonksiyonunu sadeleştirerek optimizasyonların güvenilirliğini arttırmak için ihtiyaç duyulan parametrelerden görüş açısı yarım açı (\pm ışınma geliş açıları) olarak OpticStudio arayüzüne girilecektir.

Kubbe yapısının yarım küre şeklinde olması sebebiyle görüntüleme sistemine olan etkisi tüm ışınma geliş açılarında aynıdır ve optik gücü zayıftır. Bu nedenle optik tasarım istenilen gereksinimleri sağladıktan sonra sistemin önüne kubbe eklenecektir. Tasarım sürecinde son olarak, kubbenin de eklendiği görüntüleme sisteminin, mekanik gövde malzemeleri ile birlikte ısı analizleri yapılacaktır. Analizler sonucunda sistemin bozulan optik performansı atermalizasyon ile her sıcaklıkta benzer başarımı sağlayacak hale getirilecektir.

Çalışma kapsamında literatürde bulunan çalışmalar incelenmiş, geniş görüş açısına ve yüksek çözünürlüğe sahip bir optik tasarım bulunmamıştır. Bu sebeple özgün bir tasarım yapılacak ve incelenen çalışmalardaki eksiklikler giderilecektir.

3.1. Tasarım Gereksinimleri

Çalışma kapsamında yapılacak olan iki bant kızılötesi arayıcı başlık tasarımının yüksek performansa sahip olması için bazı hedeflerin ve sınırlamaların sağlanması gerekmektedir. Aşağıda bu hedef ve sınırlamalar sıralanmıştır.

- Odaklanan spot çapının %84'ü dedektörün bir piksel çapından küçük olmalıdır (bkz. Bölüm 2.6.2).
- Modülasyon transfer fonksiyonu, dedektörün uzaysal çözünürlüğünde %50 ve kırınım limitine yakın olmalıdır (bkz. Bölüm 2.7.2).
- Arayıcı görüntüleme sisteminin mekanik yapısı belirlenen 180 mm çapındaki hassas güdümlü sistemde kullanmaya uygun boyutlara sahip, hafif ve düşük maliyetli olmalıdır.
- -40 ile +80 °C sıcaklık aralığında sistemin optik performansının korunması gerekmektedir.
- Dedektörün bir pikselinde toplanan enerji, sisteme gelen enerjinin en az %80'i olmalıdır (bkz. Bölüm 2.7.4).

Bu hedeflere uygun sistemin tasarlanmasıyla yüksek görüntü kalitesine sahip, hafif ve düşük maliyetli bir arayıcı başlık tasarımı elde edilebilecektir.

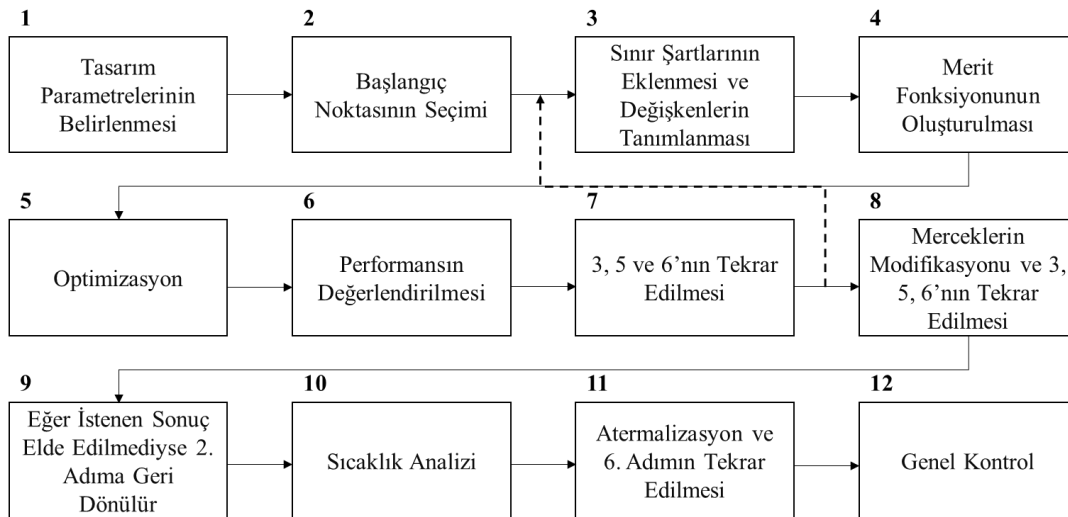
3.2. Optik Tasarım Süreci

Optik tasarım süreci tasarımı yapılan optik sistemin performansının optimize edilmesi için göz önünde bulundurulması gereken adımları içerir. Şekil 3.1'de bu adımlar gösterilmiştir. Tasarım sürecinde ilk adım gereksinimlerin belirlenmesidir. Bu gereksinimler odak uzaklığı, giriş açıklığı, F sayısı, görüş açısı, mekanik boyutlar, performans hedefi ve çevresel gereksinimlerdir. Gereksinimlerin belirlenmesinden sonra optik tasarım için bir başlangıç noktası seçilir. Eski (daha önceden yapılmış benzer) bir tasarımı kullanarak yeni optik tasarıma başlanabilir. Eğer benzer bir tasarım bulunmuyorsa, patent ve literatür taraması yapılarak tasarıma başlanabilir. Patentler ve literatürde bulunan çalışmalar kesin bir sonucun elde edilmesini sağlamasa da mercek

sayısı, mercek malzemesi ve mercek sıralaması gibi tasarımı kolaylaştıracak bilgiler verebilir. Bazı durumlarda, eski tasarımlar ile literatür ve patent taraması yapılarak hibrit bir başlangıç yapılması da iyi bir başlangıç seçimi olabilmektedir. Eğer gereksinimleri sağlayan benzer bir tasarım ve patent yoksa bu durumda özgün bir başlangıç yapılmalıdır.

Bir sonraki adım tasarımın sınır şartlarının eklenmesi ve hangi parametrelerin değişken olacağını belirlemesidir. Eğrilik yarıçapı, mercek kalınlığı, hava kalınlıkları ve malzemenin cinsi gibi geometrik parametrelere sınır değerleri eklenerek değişkenlik atanabilmektedir.

Merit fonksiyonunun oluşturulması ile OpticStudio arayüzünden optimizasyon yapılabilmektedir. Optimizasyon ile Merit fonksiyonunda belirtilen sınır değerlerine en uygun optik sistem elde edilir. Yapılan optimizasyonlar sonunda elde edilen optik sistemin performansı spot diyagramı, modülasyon transfer fonksiyonu, enerji dağılımı ve optik kusurlar incelenerek değerlendirilir. Eğer, performanslar istenen değerlere ulaşmadıysa, değişkenlerin atanması, merit fonksiyonunun oluşturulması ve optimizasyon adımları tekrar edilir.



Şekil 3.1. Optik tasarım süreci.

Geometrik parametrelerin değiştirilmesi ile elde edilebilecek en yüksek performansa ulaşıldıktan sonra mercek sayıları, malzemeleri ve yüzeyleri değiştirilerek, yeniden değişkenler atanır. Merit fonksiyonunun oluşturulması ile optimizasyonlar yapılır ve performanslar değerlendirilir. Tasarım gereksinimi olarak belirlenen değerler elde edilemediyse başlangıç noktası olarak seçilen yöntem değiştirilir ve buraya kadar anlatılan tüm adımlar tekrar edilir.

Tasarım gereksinimi olarak belirlenen değerler elde edildiğinde, optik sistemin kullanılacağı sıcaklık aralığında, performansı analiz edilir. Belirlenen sıcaklık aralığında mekanik boyutlardaki ve kırma indislerindeki değişimlerin sistemin performansına olan etkileri yüksek ise atermalizasyon yapılır. Atermalizasyon ile farklı sıcaklıklardaki bozulmalar en düşük seviyeye indirilir ve optik sistemin performansı analizler ile yeniden değerlendirilir. Son olarak genel bir kontrol yapılır ve böylece tasarım süreci tamamlanmış olur.

3.3. Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

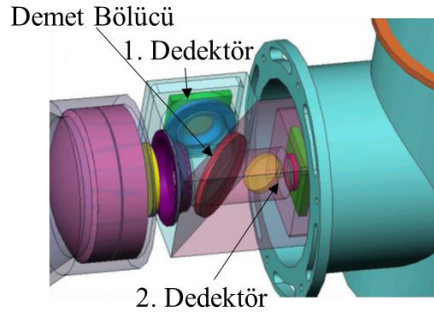
Bu bölümde, arayıcı başlığın en önemli elemanlarından biri olan dedektör belirlenerek, dedektörün özellikleri ile optik tasarım için ihtiyaç duyulan görüş açısı, odak uzaklığı, optik sistemin giriş açıklığı hesaplamaları ve radyometrik hesaplamalar yapılacaktır.

3.3.1. Dedektör Seçimi

Giriş açıklığı, F sayısı, görüş açısı gibi parametrelerin belirlenebilmesi ve hesaplanabilmesi için, öncelikle tasarımda kullanılacak dedektörün seçilmesi gerekmektedir. Dedektörün seçimi ile bir pikselin ve görüntü düzleminin boyutu belirlenmiş olacaktır.

Arayıcı başlık optik tasarımı, MWIR–LWIR dalgaboylarına duyarlı iki farklı dedektör ile yapılabilir. Böyle bir sistemde farklı kızılötesi alt bantlardan gelen ışınlar bir demet bölücü ile ilgili detektörlere yönlendirilir. Örnek bir yerleşim Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Ancak iki farklı dedektör kullanımı daha büyük hacim kaplayacak ve arayıcı başlığın

boyutunun, kullanılacağı sisteme uygun olmayan şekilde büyümesine neden olacaktır. Bu durumu ortadan kaldırmak için, MWIR–LWIR dalgaboyu aralığında çalışan iki bant kızılötesi dedektörler araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen dedektörler Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Demet bölücü kullanımı [11].

Çizelge 3.1. MWIR–LWIR bandında çalışan, iki bant kızılötesi dedektörler [41,42].

Firma/Model	Çözünürlük	Piksel Boyutu (μm)	Çalışma Dalgaboyu (μm)	NETD (mK) (30 °C)		Soğuk Durdurma, F/#
				MWIR	LWIR	
Qmagiq/Eagle 256	320 x 256	40	3,00-10,00	35-45	25-35	2,0
Sofradir/Mars BBLW	320 x 256	30	2,70-10,00	27		2,0
Leonardo/Condor II	640 x 512	24	3,00-10,00	28		2,0
IRCameras/IRC906	640 x 512	20	2,00-11,25	35		2,3

Hassas güdümlü sistemlerde kullanılan dedektörün performansı gürültü eşdeğer sıcaklık farkı (NETD), dedektörün çözünürlüğü ve dedektörün gürültü eşdeğer gücü (NEP) ile değerlendirilir. Kızılötesi dedektörlerin sıcaklık çözünürlüğü, gürültü eşdeğer sıcaklık farkı (NETD) ile tanımlanmaktadır. Arayıcı başlıkta yüksek sinyal algılaması ve düşük gürültü miktarı için, mümkün olabildiği kadar küçük bir NETD değeri istenir. Çizelge 3.1’de verilen dedektörlerin arasında en düşük sıcaklık farkını Sofradir firmasının Mars

BBLW dedektörü algılamaktadır ve Leonardo firmasının dedektörü Condor II ile aralarında 1 mK fark vardır.

Arayıcı başlıklarda kullanılan dedektörlerin hem kapladığı alan hem de maliyet açısından boyutunun çok büyük olmaması, hedef tespitindeki kayıpları önlemek için de yüksek çözünürlüklü olması istenir. Dedektörde piksel sayısının fazla ve piksel boyutunun küçük olması bu ihtiyacı karşılayabilir. Fakat piksel boyutunun, optik çözünürlüğü ve dolayısıyla optik tasarımı zorlaştırmayacak boyutta olmasına dikkat edilmelidir. Optik çözünürlüğün, seçilecek dedektörün çözünürlüğünün altında olmaması için, dedektör piksel boyutu Airy disk çapında veya ona yakın bir değerde olmalıdır. 2,00 – 11,25 μm aralığındaki dokuz farklı dalgaboyundaki Airy disk çapları, Eşitlik (2.10) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 3.2’de verilmiştir. Optik çözünürlüğün, F/1 olduğunda, 4,88 μm ile 27,45 μm arasında, F/2 olduğunda ise 9,76 μm ile 54,90 μm arasında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 3.2. Dalgaboyuna bağlı optik çözünürlük.

Dalgaboyu (μm)	Airy Disk Çapı, F/1 (μm)	Airy Disk Çapı, F/2 (μm)
2,00	4,88	9,76
2,70	6,59	13,18
3,00	7,32	14,64
4,00	9,76	19,52
5,00	12,20	24,40
8,00	19,52	39,04
9,00	21,96	43,92
10,00	24,40	48,80
11,25	27,45	54,90

Dört farklı firmanın geliştirdiği iki bantta çalışan kızılötesi dedektörlerin diyagonal, yatay ve düşey uzunlukları hesaplanmış ve Çizelge 3.3'te verilmiştir. IRC906 ve Eagle256 dedektörünün diyagonalleri 16,4 mm'dir. En büyük diyagonale sahip olan dedektör Condor II iken, en küçük diyagonale sahip olan dedektör Mars BBLW dedektörüdür.

Çizelge 3.3. İki bant kızılötesi dedektörlerin boyutları.

Dedektör	Piksel Boyutu (µm)	Yatay Uzunluk (mm)	Düşey Uzunluk (mm)	Dedektör Diyagonali (mm)
Qmagiq/Eagle 256	40	12,80	10,240	16,4
Sofradir/Mars BBLW	30	9,60	7,680	12,3
Leonardo/Condor II	24	15,36	12,288	19,7
IRCameras/IRC906	20	12,80	10,240	16,4

Dedektör seçiminde dikkat edilmesi gereken son parametre gürültü eşdeğer gücüdür (NEP). NEP dedektör hassasiyetinin bir ölçüsüdür ve dedektör üzerinde gürültü miktarı kadar sinyal oluşturabilen kızılötesi güç, gürültü eşdeğer gücü olarak tanımlanır. NEP dedektör alanına bağlıdır ve farklı boyutlardaki dedektörler farklı NEP değerlerine sahiptir. Daha küçük bir NEP değeri daha hassas bir detektöre karşılık gelir. NETD değerleri bilinen her bir dedektör için NEP değerleri Eşitlik (3.2) ile hesaplanmış; sonuçlar Çizelge 3.4'te verilmiştir.

$$NETD = \frac{4(F/\#)^2 + 1}{A_P \tau_{opt}} \frac{1}{\epsilon_{arkaplan} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha(\lambda) \frac{\partial M_{\lambda BB}}{\partial T} d\lambda} NEP \quad (3.2)$$

Burada A_p dedektörün bir pikselinin alanı, τ_{opt} optik sistemin geçirgenliği, $\epsilon_{arkaplan}$ arka planın yayıcılık katsayısı, $\alpha(\lambda)$ dedektörün soğurma katsayısı ve $M_{\lambda BB}$ bir siyah cismin spektral ışımaya değeridir. Kızılötesi dedektörlerin NETD ölçümü genellikle 25 °C'deki bir siyah cisim ile ölçülmektedir [43]. Hesaplamalar yapılırken dedektörün

soğurma katsayısı 0,6, arka planın yayıcılık katsayısı 0,98, optik sistemin geçirgenliği 1 alınmıştır. Çizelge 3.4'te mavi işaretlenmiş olan NEP değerleri, dedektörlerin sahip oldukları F sayılarındaki değerlerini göstermektedir. F sayısının artması dedektöre ulaşan ışımaya miktarını düşürmektedir. Bu sebeple aynı F sayısı ile karşılaştırmak amacıyla, F/1, 2 ve 2.3 değerleri için tüm dedektörlerin NEP değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan gürültü eşdeğer gücü değerleri incelendiğinde çalışma dalgaboyu aralıklarında en düşük değere sahip olan dedektör Condor II'dir.

Çizelge 3.4. Dedektör gürültü eşdeğer gücü değerleri.

Dedektör	Dalgaboyu Aralığı (µm)	NEP (W)		
		F/1	F/2	F/2.3
Eagle 256	3,00-10,00	$1,64 \times 10^{-11}$	$4,82 \times 10^{-12}$	$3,70 \times 10^{-12}$
Mars BBLW	2,70-10,00	$7,12 \times 10^{-12}$	$2,09 \times 10^{-12}$	$1,61 \times 10^{-12}$
Condor II	3,00-10,00	$4,72 \times 10^{-12}$	$1,39 \times 10^{-12}$	$1,06 \times 10^{-12}$
IRC906	2,00-11,25	$5,02 \times 10^{-12}$	$1,48 \times 10^{-12}$	$1,13 \times 10^{-12}$

Tüm değerler karşılaştırıldığında arayıcı başlık tasarımı için optimum performansa sahip iki dedektör, Sofradir firmasının Mars BBLW ve Leonard firmasının Condor II dedektörüdür. Condor II dedektörünün çözünürlüğü Mars BBLW'ye göre daha yüksektir ancak, boyutu yaklaşık 6 mm daha büyüktür. 6 mm fark 180 mm çapındaki bir füze için kabul edilebilir bir artıştır. NETD değerleri çok yakın olan dedektörlerin, NEP değerleri de birbirine yakındır ancak Condor II'nin hesaplanan NEP değeri daha düşüktür. Optik çözünürlük özellikleri incelendiğinde, her iki dedektörün piksel boyutu F/1'deki Airy disk çapı için küçük kalırken daha büyük F sayıları için yeterlidir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde performansı daha iyi olmasından dolayı kızılötesi arayıcı başlık optik tasarımı için Condor II dedektörü seçilmiştir. Dedektörün özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Condor II dedektörünün özellikleri.

Çözünürlük (Yatay x Düşey)	640 x 512
Piksel Boyutu	24 μm x 24 μm
Çalışma Dalgaboyu	3 – 10 μm
F/#	2
NETD	28 mK

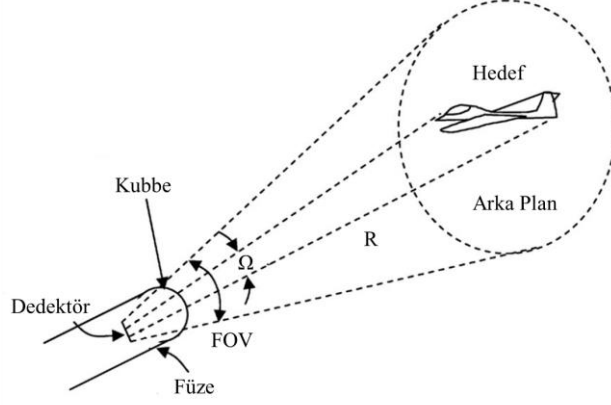
3.3.2. Hesaplamalar

Arayıcı başlığın optik tasarımı için belirlenmesi ve hesaplanması gereken temel parametreler arayıcının görüş açısı (FOV), odak uzaklığı, optik sistemin giriş açıklığı, optimizasyonun yapılacağı dalgaboyları ve atermalizasyonun yapılacağı sıcaklık aralığıdır. Dalgaboyu aralığı seçilen dedektörün algılama aralığıdır ve 3 – 10 μm 'dir. OpticStudio yazılımında, tasarım 3, 4, 5, 8, 9 ve 10 μm dalgaboyları tanımlanarak ve referans dalgaboyu 5 μm alınarak yapılacaktır. Sıcaklık aralığı sistemin çalışacağı sıcaklık aralığıdır ve -40 ile $+80$ $^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. OpticStudio yazılımında tasarım önce optik elemanların üretim sıcaklığı olan 20 $^{\circ}\text{C}$ 'de tasarlanacaktır. Sonra sıcaklık analizleri ve atermalizasyonlar 20 , -40 , 0 , 40 ve 80 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarında gerçekleştirilecektir.

Bu bölümde önce çalışma için belirlenen 70 mm'lik odak uzaklığının, 7 km'den hedefin tespit edilebilmesi için yeterli olup olmadığına radyometrik hesaplamalar ile bakılacaktır. Sonra geometrik hesaplamalar yapılacaktır.

3.3.2.1. Radyometrik Hesaplamalar

Bir pikselin görüş alanı, optik sistem tarafından görüntülenen kızılötesi sahnenin alanıdır. Bu alan, dedektörün bir pikselinin boyutuna, odak uzaklığına ve dedektör ile arka plan arasındaki mesafeye bağlıdır. Şekil 3.3'te kızıl ötesi sahne modeli verilmiştir ve bir pikselin görüş alanı Eşitlik (3.3) ile hesaplanmaktadır.



Şekil 3.3. Kızılötesi sahne alanı.

$$A_{\text{piksel}} = \left(\frac{d R}{f} \right)^2 \quad (3.3)$$

Burada A_{piksel} bir pikselin görüş alanı ve kızılötesi sahnenin arka planın alanıdır, d bir pikselinin boyutu, f odak uzaklığı ve R dedektör ile hedef arasındaki mesafedir. Çalışma kapsamında hedef tespit mesafesi 7 km ve odak uzaklığı 70 mm seçilmiş olup, dedektörün bir pikselinin her iki eksenindeki boyutu 24 μm 'dir. Bu değerler Eşitlik (3.3)'te yerine koyulduğunda hesaplanan görüş alanı 5,76 m^2 'dir. Bu değer ile hedef ve arka planın gücü hesaplanarak, hedefin 7 km'den tespit edilebilmesi için 70 mm'lik optik sistemin yeterli olup olmadığı değerlendirilecektir.

$$A_{\text{piksel}} = \left(\frac{(24 \times 10^{-3} \text{ mm}) \times (7000 \text{ m})}{70 \text{ mm}} \right)^2 = 5,76 \text{ m}^2$$

Dedektör tipinden bağımsız olarak, kızılötesi dedektörlerin yüksek sinyal-gürültü oranına (SNR) sahip olması önemlidir. Ancak SNR tek başına dedektör performansını belirlememektedir. Bu nedenle, SNR ile hedeften gelen sinyalin seviyesi arka plandaki gürültü seviyesine göre karşılaştırılır. Bir arayıcı başlığın hedefi tespit edebilmesi için, hedefin SNR değerinin arka planın SNR değerinden yüksek; hedeften gelen gücün de arka planın gücü ve dedektörün gürültü eşdeğer gücü değerinden büyük olması gerekmektedir. SNR Eşitlik (3.4) ile hesaplanır.

$$\text{SNR} = \frac{P}{\text{NEP}} \quad (3.4)$$

Burada P, dedektör tarafından watt (W) cinsinden toplanan, hedeften veya arka plandan yayılan ışımının gücüdür. NEP, sinyal-gürültü oranını veren, minimum sinyalin ölçüsü olan gürültü eşdeğer gücüdür. Hedeften ve arka plandan yayılan ışımının gücünün hesaplanması için üç boyutlu bir açının tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bir hedefin veya arka planın, üç boyutlu hacimde kapladığı alanı belirtmek için kullanılan açı, katı açı olarak tanımlanır ve Eşitlik (3.5) ile verilir.

$$\Omega = \frac{A_{\Omega}}{R^2} \quad (3.5)$$

Burada A_{Ω} yayılan ışımının yüzey alanı, R ise o yüzey alanından dedektöre kadar olan mesafedir. Eşitlik (3.6) ve (3.7) kullanılarak 3 – 10 μm aralığında hedefin gücü, arka planın gücü ve sinyal-gürültü oranı değerleri hesaplanmıştır. Hedefin en düşük sıcaklığı 320 K'dir (bkz. Bölüm 2.4.2). Bu sıcaklık değeri uçağın gövdesinden yaklaşık 30 m²'lik bir alandan algılanmaktadır ve gövdenin yayıcılık katsayısı 0,9'dur. Hedefin en yüksek sıcaklığı 1200 K'dir (bkz. Bölüm 2.4.2.). Bu sıcaklık değeri de uçağın egzoz izinden, yaklaşık 1 m²'lik bir alandan algılanmaktadır ve egzoz izinin yayıcılık katsayısı 0,5'tir.

$$P_{\text{hedef}} = \left(\varepsilon_{\text{hedef}} \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda \right) A_{\text{hedef}} T_{\text{atmosfer}} T_{\text{optik}} \Omega_{\text{hedef}} \quad (3.6)$$

$$P_{\text{arkaplan}} = \left(\varepsilon_{\text{arkaplan}} \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda \right) A_{\text{arkaplan}} T_{\text{atmosfer}} T_{\text{optik}} \Omega_{\text{arkaplan}} \quad (3.7)$$

Atmosferik geçirgenlik T_{atmosfer} Eşitlik (2.1) ile hesaplanmış, sönüm katsayısının 0,005 olduğu değer için 0,86 bulunmuştur. Optik sistemin geçirgenliği T_{optik} kızılötesi

uygulamalarda genellikle en alt limit olan %85 olarak alınmıştır. 70 mm'lik görüntüleme sistemi için değerler 3 – 10 µm dalgaboyu aralığında hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir. Hesaplamalarda arka plan sıcaklığı, zemin sıcaklığı ile aynı alınmıştır ($T_{zemin} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

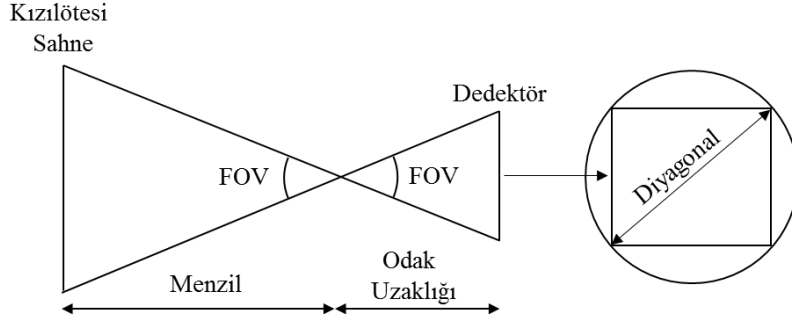
Çizelge 3.6 Hedefin ve arka planın 320 K ve 1200 K'deki P, NEP ve SNR değerleri.

	Hedef 320 K	Hedef 1200 K
P_{hedef} (W)	$4,89 \times 10^{-10}$	$3,06 \times 10^{-9}$
P_{arkaplan} (W)	$4,73 \times 10^{-11}$	$4,73 \times 10^{-11}$
NEP (W)	$1,39 \times 10^{-12}$	$1,39 \times 10^{-12}$
SNR_{hedef}	$3,53 \times 10^2$	$2,20 \times 10^3$
SNR_{arkaplan}	$0,34 \times 10^2$	$0,34 \times 10^2$

Çizelge 3.6'da verilen hedefin gücü, arka planın gücü ve sinyal-gürültü oranı değerlerine bakıldığında, hedeften yayılan gücün her iki sıcaklık değerinde, hem arka plandan hem de dedektörün eşdeğer gücünden daha yüksek olduğu görülmektedir. Hedefin görüntüde ayırt edilebilmesi için gücünün arka plandan ve dedektörün gücünden yüksek olması beklenen bir durumdur. Sonuçta, belirlenen 70 mm odak uzaklığının, hedefi 7 km'den tespit edebilmek için yeterli bir odak uzaklığı olduğu gösterilmiştir.

3.3.2.2. Geometrik Hesaplamalar

Hesaplanması gereken diğer bir parametre, görüş açısıdır (FOV). Şekil 3.4'te görüş açısının odak uzaklığı ve dedektör ile olan ilişkisi verilmiştir. Condor II dedektörü ile 70 mm'lik odak uzaklığına sahip optik sistemin, görüş açısı Eşitlik (3.8) kullanılarak hesaplanmış ve 16° değeri elde edilmiştir. Bu nedenle tasarımda kullanılacak ışınma geliş açıları $\pm 8^{\circ}$ dir.



Şekil 3.4. Görüş açısının odak uzaklığı ve dedektör ile olan ilişkisi.

$$FOV = \theta = 2 \tan^{-1} \frac{d'}{2f} \quad (3.8)$$

$$FOV = 2 \tan^{-1} \frac{(19,7 \text{ mm})}{(2 \times 70 \text{ mm})} = 16^\circ = \pm 8^\circ$$

Burada d' dedektörün diyagonal uzunluğudur. Optik sistemin giriş açıklığı F sayısına bağlıdır ve kızılötesi dedektörlerde F sayısının dedektörün tasarlandığı soğuk durdurma ile aynı olması gerekmektedir. Seçilen dedektörün soğuk durdurma F sayısı $F/2$ olduğu için optik sistemin F sayısı da $F/2$ 'dir. Bu F sayısı kullanılarak giriş açıklığı hesaplandığında 35 mm değeri elde edilmiştir. Dedektör seçimi ve yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenen optik tasarım başlangıç parametreleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Optik tasarım başlangıç parametreleri.

Parametre	Değer
Odak Uzaklığı	70 mm
Görüş Açısı	$16^\circ (\pm 8^\circ)$
Giriş Açıklığı	35 mm
F/#	2
Çalışma Dalgaboyu Aralığı	3 – 10 μm
Çalışma Sıcaklığı	-40 ~ +80 °C

3.3.3. MTF Uzaysal Frekansı

Özellikleri EK-2’de verilen Condor II dedektörünün çözünürlüğü yatay ve düşey olmak üzere sırasıyla, 640 x 512 pikseldir. Piksel boyutu 24 µm x 24 µm olan dedektörün uzaysal frekansı Eşitlik (3.9) ile hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda dedektörün çözünürlüğünün 1 mm’de 20,8 çizgi çiftine karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

$$\text{Uzaysal Frekans} = \frac{\text{Dedektörün Yataydaki Piksel Sayısı}/2}{\text{Dedektörün Yatay Uzunluğu}} \quad (3.9)$$

$$\frac{\frac{640}{2} \text{ çç}}{15,36 \text{ mm}} = 20,8 \frac{\text{çç}}{\text{mm}}$$

MTF analizi optik sistemin bir siyah-beyaz çizgi çiftini ayırma gücünü, dolayısıyla optik sistemin çözünürlük performansını gösterir. Bu nedenle tasarım sırasında, 20,8 çç/mm uzaysal frekansına karşılık gelen MTF değerinin en az %50 olması hedeflenmiştir.

3.4. Optik Malzeme Seçimi

Arayıcı başlık optik sisteminin en temel görevi, görüntünün farklı ortam şartları altında sürekli odakta kalabilmesini sağlamaktır. Odaklanmayı optik elemanların boyutsal değişimleri, sıcaklık farkları ve optik kusurlar etkilemektedir. Bu nedenle kızılötesi malzeme seçiminde, malzemelerin optik ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Optik özellikler, malzemenin kırma indisi, dağılma oranı ve Abbe sabiti, mekanik özellikler sertlik ve termal genleşme katsayısıdır.

3.4.1. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Arayıcı içerisinde kullanılacak olan kızılötesi malzemelerin farklı ortam koşulları altında benzer optik performansta çalışabilmeleri için düşük termal genleşme katsayısına, yüksek hızlarda çalışan sistemlerin en ön kısmında kullanılacağı için de yüksek sertliğe sahip

olmaları gerekir. Çizelge 3.8’de genellikle kullanılan, geniş bant kızılötesi malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.8. Geniş bant kızılötesi malzemelerin mekanik özellikleri [37,44].

Malzeme	Termal Genleşme Katsayısı ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Young Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Poisson Oranı	Termal İletkenlik ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	Knoop Sertliği HK (kg/mm^2)
Ge	5,80	103,70	5,323	0,2780	59,80	80
GaAs	5,70	83,90	5,320	0,3100	46,05	721
AMTIR-1	12,00	22,00	4,400	0,2660	1,40	170
ZnSe	7,57	70,30	5,270	0,2900	16,00	105
KRS5	58,00	15,80	7,370	0,3690	0,54	40,2
ZnS	6,50	46,00	4,080	0,2900	27,20	230
BaF ₂	18,40	53,20	4,890	0,3430	7,10	82,0
KCl	36,00	29,67	1,990	0,2160	6,53	7,20

Çizelge 3.8 incelendiğinde Ge, GaAs, ZnSe ve ZnS düşük genleşme katsayılarına sahipken, en sert malzemeler Ge, GaAs, AMTIR-1, ZnS ve ZnSe’dir. KRS5, KCl ve BaF₂ malzemeleri sıcaklık değişimine bağlı boyutsal değişimlerinin fazla olması ve yeterli sertliğe sahip olmamaları nedeniyle, arayıcı optik tasarımı için uygun olmayan malzemelerdir. Germanyum 100 °C’nin üzerinde geçirgenlik özelliğini kaybettiği, AMTIR-1 yüksek genleşme katsayısına sahip olduğu, ZnSe yumuşak ve çizilmeye müsait bir malzeme olduğu için kubbe malzemesi olarak kullanılmayacaktır. Galyum arsenit, yapısal olarak çoğu gereksinimi sağlasa da zehirli olmasından dolayı hem mercek hem de kubbe malzemesi olarak kullanılmayacaktır.

3.4.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi

Kızılötesi bölgede kırma indisleri görünür bölgeye göre daha yüksektir. Bu durum optik kusurların düzeltilmesi için bir avantajdır. Çizelge 3.9, yaygın olarak kullanılan, Bölüm 2.5.4’te bahsedilen kızılötesi malzemelerden, yapısal olarak kullanılabilir olan Ge, AMTIR-1, ZnS ve ZnSe malzemelerinin, 4 µm ve 10 µm’deki kırma indislerini ve kırma indislerinin sıcaklığa bağlı değişim oranlarını göstermektedir.

Çizelge 3.9. Geniş bant kızılötesi malzemelerin optik özellikleri [37,44].

Malzeme	Spektral Aralık (µm)	Kırma İndisi		dn/dT (x 10 ⁻⁶ /°C)
		λ =4 µm	λ =10 µm	
Germanyum (Ge)	2,00-17,00	4,0242	4,0003	396
AMTIR-1	0,70-14,00	2,5106	2,4953	72
Çinko Selenür (ZnSe)	0,55-20,00	4,4331	2,4065	60
Çinko Sülfür (ZnS)	0,37-14,00	2,2518	2,2001	54

Germanyum en yüksek kırma indisine sahiptir. Karşılaştırıldığında sertlik özelliği baryum florürden daha yüksek olduğu için en düşük kırma indisine sahip, kullanılabilir malzeme çinko sülfürdür.

Aynı zamanda, kızılötesi malzemeler düşük bir dağılma oranına sahip olma eğilimindedir. Bu özelliklerinden dolayı yüksek Abbe sayılarına sahiptirler. Malzemelerin MWIR ve LWIR bölgelerindeki dağılım oranları, Eşitlik (3.10) ve Eşitlik (3.11) kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10’da verilmiştir.

$$V_{MWIR(4\mu m)} = \frac{n_{4\mu m} - 1}{n_{3\mu m} - n_{5\mu m}} \quad (3.10)$$

$$V_{\text{LWIR}(9\mu\text{m})} = \frac{n_{9\mu\text{m}} - 1}{n_{8\mu\text{m}} - n_{10\mu\text{m}}} \quad (3.11)$$

Çizelge 3.10. Geniş bant kızılötesi malzemelerin 4 ve 10 μm 'deki Abbe sayıları.

Malzeme	Kırma İndisi			$V_{\text{MWIR}(4\mu\text{m})}$	Kırma İndisi			$V_{\text{LWIR}(10\mu\text{m})}$
	3	4	5		8	9	10	
Ge	4,0446	4,0242	4,0153	103,2	4,0053	4,0049	4,0003	600,98
AMTIR-1	2,5184	2,5146	2,5112	210,4	2,5036	2,5013	2,4953	180,87
ZnSe	2,4375	2,5106	2,4295	188,82	2,4183	2,4122	2,4065	119,68
ZnS	2,2572	2,3834	2,2461	124,63	2,2225	2,2120	2,2001	54,10

Kızılötesi bölgenin her iki alt bandı için oluşturulan Abbe sayısı-kırma indisi sonuçlarında dikkat edilmesi gereken malzeme germanyumdur. Germanyumun Abbe sayısı 3-5 μm dalgaboyu aralığında yaklaşık 100 iken, 8-10 μm dalgaboyu aralığında 600'den fazladır. Dolayısıyla germanyumun dağılma oranı LWIR bölgesinde çok iyidir. Bu alt bantta optik tasarımda tüm sistem sadece Germanyum ile yapılabilir ve renk kusurunun düzeltilmesi için bir başka malzemeye ihtiyaç duyulmayacaktır. Hatta başka malzemelerin eklenmesi dağılmayı arttırarak sistemin performansını bozabilir. MWIR bölgesinde ise böyle bir malzeme yoktur ve bu nedenle farklı kırma indislerine ve dağılım miktarına sahip malzemelerin eşleştirilmesiyle renk kusurları düzeltilebilmektedir. Bu sebeple orta dalga kızılötesi ve uzun dalga kızılötesi bantlarını kapsayan iki bant arayıcı başlık optik tasarımında, birden fazla malzeme birlikte kullanılacaktır. Germanyumdan sonra en fazla dağılma oranına sahip malzeme AMTIR-1'dir. Bu malzemenin germanyum ile birlikte kullanılması, iki bantta tasarlanacak olan sistemde oluşabilecek renk kusurlarının azaltılmasını sağlayacaktır.

3.5. Optik Tasarım

Optik sistemin tasarımına başlarken, en basit konfigürasyon tek mercektir. Bununla birlikte, tek mercek, optik sistemdeki kusurların azaltılması için yeterli değildir. Bu sebeple, 2 merceklî sisteme tüm başlangıç ve sınır parametreleri (Çizelge 3.7) girildikten sonra, değişkenlerin tanımlanabilmesi için bir merit fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan merit fonksiyonunun OpticStudio arayüzündeki görüntüsü Şekil 3.5'te verilmiştir.

Type	Wave	Target	Weight	Value	% Contrib
1 EFFL	3	70.000	1.000	70.000	0.000
2 DMFS					
3 BLNK	Sequential merit function: RMS spot x+y centroid X Wgt = 1.0000 Y Wgt = 1.0000 GQ 3 rings 6 an				
4 BLNK	No air or glass constraints.				
5 BLNK	Operands for field 1.				

Şekil 3.5. Merit fonksiyonu editör ekranı örnek görüntüsü.

Merit fonksiyonu editöründeki “Type” sütunu fonksiyon içerisine işlemcilerin (operand) eklendiği sütundur ve Şekil 3.4’te eklenen işlemci EFL’dir. “Wave” sütununa sistemin optimize edileceği referans dalgaboyu eklenmiştir. Tasarımın kırınım limiti ve spot diyagramındaki Airy disk değerleri bu dalgaboyuna göre hesaplanmaktadır. Çalışma kapsamında sistemin referans dalgaboyu orta değer olduğu için 5 µm alınmıştır ve sisteme girilen üçüncü dalgaboyudur. “Target” işlemcinin sahip olması istenen değer, “Weight” bu değerın merit fonksiyonundaki önem derecesini belirlemek üzere işlemciye verilen ağırlıktır. Optimizasyon yapıldığında, program merit fonksiyonu penceresine girilen değerler ve ağırlıkları doğrultusunda uygun bir optik sistem oluşturmaya çalışacaktır. “Value” işlemcinin anlık değerini, “% Contribution” ise istenen değer ile elde edilen değer arasındaki yüzde cinsinden sapma miktarını göstermektedir. Çalışma kapsamında merit fonksiyonuna eklenip, kullanılan tüm işlemciler EK-2’de verilmiştir. Sağ üstte bulunan “Merit Function” fonksiyonun anlık değerini göstermektedir.

Merit fonksiyonuna hesaplanan ve belirlenen değerlere ek olarak, tasarımın üretilebilir olması için geometrik sınır şartları eklenmiştir. Bu sınır şartları ve atanan değerler Çizelge

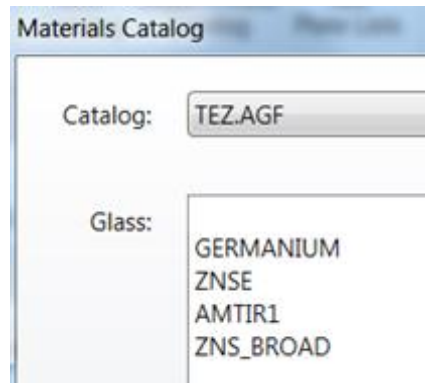
3.11’de verilmiştir. Geometrik sınırlar, merceğin kalınlığı, mercekler arası hava kalınlıkları, merceğin kenar kalınlıkları ve iki mercek kenarının arasındaki boşluklardır.

Çizelge 3.11. Geometrik sınır şartları.

Mercekteki Minimum-Maksimum Merkez Kalınlığı	6 mm – 12 mm
Mercekteki Minimum Kenar Kalınlığı	5 mm
Havadaki Maksimum-Maksimum Merkez Kalınlığı	3 mm – 100 mm
Havadaki Minimum Kenar Kalınlığı	3 mm

Değişken atanmış bir parametrenin sabit bir değerde tutulması, merit fonksiyonunu yavaşlatıp, en uygun mercek parametrelerinin elde edilmesini zorlaştırır. Bu yüzden Çizelge 3.11’deki tüm parametrelere birer aralık veya alt sınır verilmiştir.

OpticStudio yazılımının içinde üretici firmalardan alınan bilgiler ile oluşturulmuş malzeme katalogları bulunmaktadır ve malzeme değişikliği seçilen kataloglar ile yapılmaktadır. Tez çalışmasında, kullanılabilir olarak belirlenen malzemeleri içeren bir katalog oluşturulmuş ve malzemeler bu katalog kullanılarak değiştirilmiştir. Şekil 3.6’da OpticStudio’da oluşturulan malzeme kataloğunun görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.6. OpticStudio’da oluşturulan malzeme kataloğu.

Bir sonraki adım, tasarımda hangi parametrelerin değişken yapılacağına karar verme aşamasıdır. Eğrilik yarıçapı, mercek kalınlığı, hava kalınlıkları, malzemenin cinsi ve yüzey çeşidi gibi parametreler değişken yapılabilir. Hepsinin değişken olarak atanması merit fonksiyonunu yavaşlatarak doğru parametre setine ulaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, sırası ile önce eğrilik yarıçapları, sonra hava ve mercek kalınlıkları değişken olarak atanacaktır.

Tasarımın en az kaç merceкли olması gerektiğini öğrenmek adına 2 merceкли sistem ile optimizasyona başlanmıştır. Farklı optik eleman sayılarına sahip sistemlerin merit fonksiyonlarının anlık değerleri karşılaştırılarak en uygun sistemin dört merceкли sistem olduğu görülmüştür. Çünkü dört merceкли sistemin merit fonksiyonu en düşük değere ve en küçük spot yarıçapına sahiptir. Farklı mercek sayılarına sahip sistemlerde elde edilen merit fonksiyonu değerleri ve üç farklı geliş açısındaki spot yarıçapları Çizelge 3.12’de verilmiştir. Merit fonksiyonu, yapılan optimizasyon işlemlerinin toplamı olduğundan, ne kadar düşük olursa, tasarım hedeflenen kırınım limitine o kadar yaklaşır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, tasarıma dört merceкли sistem ile devam edilmesine karar verilmiştir. Tasarıma malzeme sıralaması ve ihtiyaç durumunda yüzey tipleri değiştirilerek devam edilecektir.

Çizelge 3.12. Mercek sayısına göre merit fonksiyonu değerleri ve spot yarıçapları.

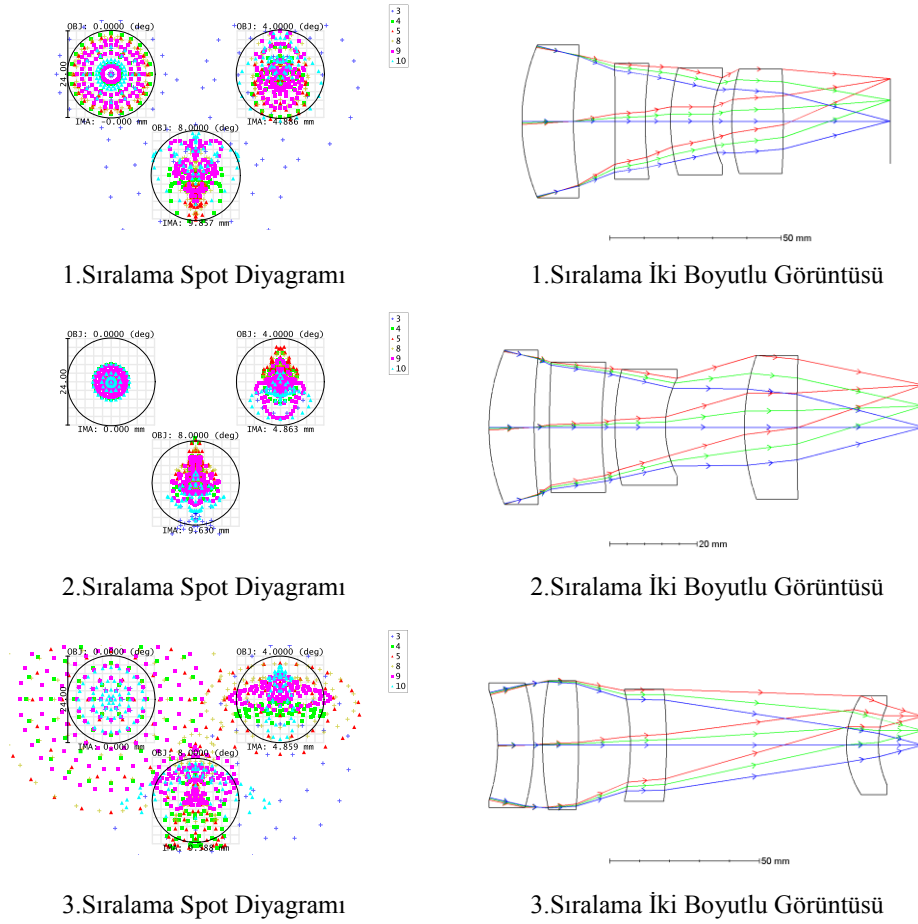
Mercek Sayısı	Merit Fonksiyonu Değeri	0° de Spot Yarıçapı (µm)	4° de Spot Yarıçapı (µm)	8° de Spot Yarıçapı (µm)
2	0,0370	104,791	107,848	116,587
3	0,0134	43,472	51,627	79,065
4	0,0045	20,726	33,433	35,712

Elde edilen dört merceкли tasarımda malzeme sıralaması, AMTIR-1/ZnS_Borad/AMTIR-1/Germanyum’dur. 0°, 4° ve 8° görüş açılarında spot yarıçapları sırasıyla 20,726 µm, 33,433 µm, 35,712 µm olarak elde edilmiştir. Malzemelerin sıralamaları

değiştirilerek (Şekil 3.7) 8° de spot yarıçaplarındaki değişimler incelendiğinde, en düşük spot yarıçapının AMTIR-1/Germanyum/ZnS_Borad/AMTIR-1 sıralamasında elde edildiği görülmüştür (Çizelge 3.13). Bu sıralamada spot yarıçapı dedektör boyutuna yakın olduğu için beşinci bir mercek eklenmemiştir.

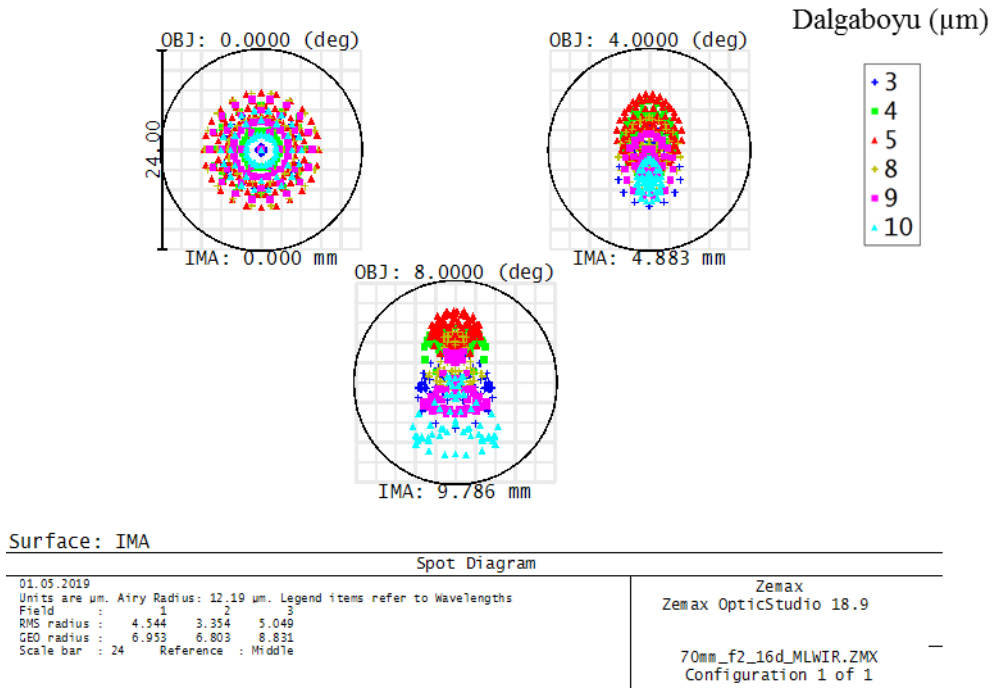
Çizelge 3.13. Farklı malzeme sıralamasındaki spot yarıçapları.

Sıralama	1.Mercek	2.Mercek	3.Mercek	4.Mercek	Merit Fonksiyonu	8° de Spot Yarıçapı (µm)
1.	AMTIR-1	ZnS_Broad	Germanyum	AMTIR-1	0,0040	29,609
2.	AMTIR-1	Germanyum	ZnS_Broad	AMTIR-1	0,0026	21,607
3.	Germanyum	AMTIR-1	ZnS_Broad	AMTIR-1	0,0061	47,316



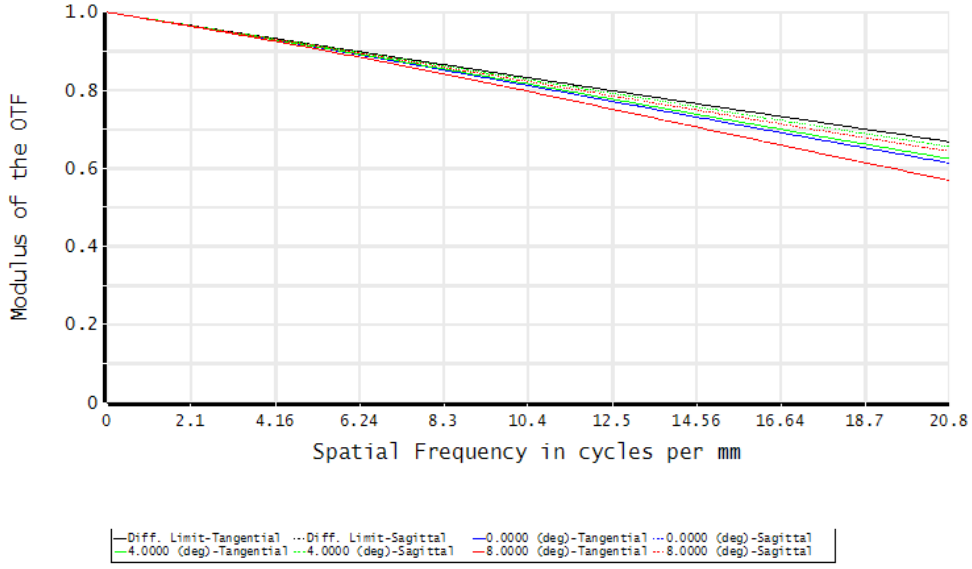
Şekil 3.7. Tüm malzeme sıralamaları için spot diyagramı ve görüntüleme sisteminin kesit görüntüsü.

Tasarımda 8° görüş açısında küresel yüzeyler ile elde edilebilecek en küçük spot yarıçapı ikinci sıralamadaki 21,607 µm'dir. Bu değer bir pikselin altında değildir. Performans gereksinimlerinin daha iyi sağlanması ve sistemin güvenilirlik seviyesinin artırılması için yüzey tipleri değiştirilmiştir. Dört merceğin, toplam sekiz adet yüzeyinden üçü küresel olmayan yüzeyler ile değiştirildiğinde görüntüleme sistemi için 0°, 4° ve 8° görüş açılarında elde edilen spot yarıçapları sırasıyla 6,953 µm, 6,803 µm, 8,831 µm'dir. Elde edilen spot görüntüleri Şekil 3.8'de verilmiştir.



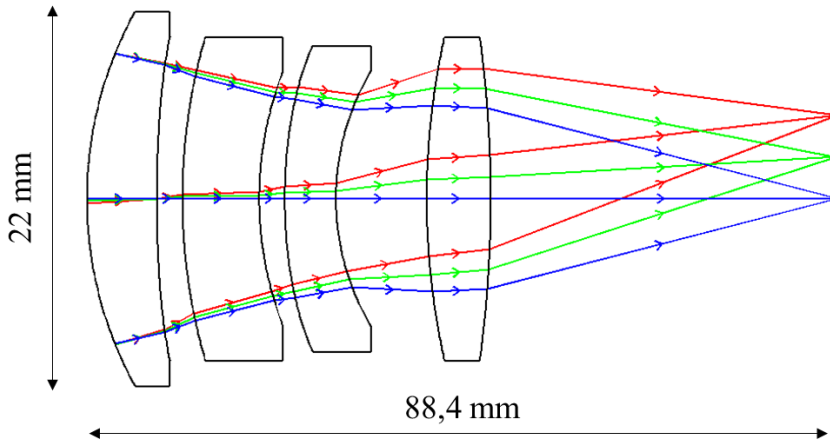
Şekil 3.8. Kızılötesi görüntüleme sistemi spot diyagramı.

Şekil 3.9'da tasarımı yapılan optik sistemin farklı açılardaki MTF grafiği verilmiştir. Şekildeki düz ve kesikli çizgilerden mavi 0°, yeşil ±4°, kırmızı ise ±8° deki değeri göstermektedir. Optik sistemin 20,8 çç/mm uzaysal çözünürlüğe karşılık gelen MTF değeri %50'nin üzerindedir. 4° deki MTF değeri (yeşil kesikli çizgi) neredeyse kırınım limitindedir ve Bölüm 3.1'deki tasarım gereksinimi sağlanmıştır.



Şekil 3.9. Kızılötesi görüntüleme sistemi MTF grafiği.

Elde edilen sistemin birinci merceğin ilk yüzeyinden dedektöre kadar olan toplam optik yol uzunluğu 88,4 mm'dir. Merceklerin yarıçapları sırası ile 22 mm, 19 mm, 18 mm ve 19 mm'dir. Şekil 3.10'da elde edilen kızılötesi görüntüleme sisteminin kesit görüntüsü verilmiştir. Tasarımdaki optik elemanları geometrik olarak tanımlayan parametreler Çizelge 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.10. Kızılötesi görüntüleme sisteminin kesit görüntüsü.

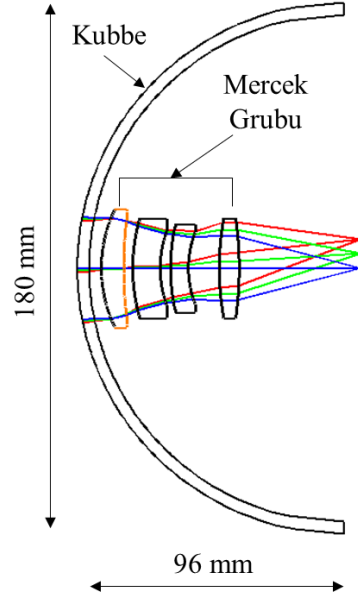
Çizelge 3.14. Kızılötesi görüntüleme sistemini oluşturan optik elemanların geometrik parametreleri.

Mercek	Yüzey	Eğrilik Yarıçapı (mm)	Kalınlık (mm)	Malzeme	Yüzey Çeşidi
1.	1	44,236	9,00	AMTIR-1	Küresel
	2	159,405	3,00		Küresel Olmayan
2.	3	61,822	8,00	Germanyum	Küresel
	4	37,185	3,44		Küresel Olmayan
3.	5	70,199	6,00	ZNS_Broad	Küresel Olmayan
	6	31,018	11,32		Küresel
4.	7	89,444	8,00	AMTIR-1	Küresel
	8	-148,792	39,64		Küresel

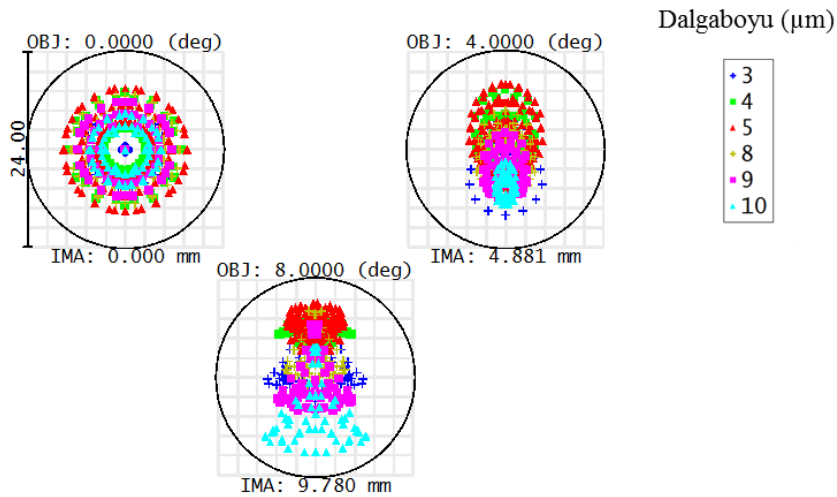
Arayıcının görüntüleme sistemi, sabit sıcaklıkta (20 °C) hedeflenen optik performansa ulaşmıştır. Artık kubbe eklenerek nihai sistemin optimizasyonu yapılabilir. Çapı 180 mm olan güdümlü sistem için tasarımı yapılan arayıcının kubbesinin yarıçapı 90 mm olmalıdır. Kızılötesi arayıcılar gimbal sistemi ile birlikte kullanıldığından, her açıdaki optik performansın sürekliliği önemlidir. Bu nedenle, eğrilik yarıçapı da 90 mm'dir. Arayıcı başlıklarda kullanılan kubbelerin kalınlığı yapısal analizler ile belirlenmektedir. Çalışma kapsamında bu analizler yapılmayacağı için kubbenin kalınlığı 4 mm alınmıştır.

Kubbe malzemesi olarak ZnS_Broad malzemesi seçilmiştir. Diğer kızılötesi malzemeler ile kıyaslandığında mekanik dayanımı yüksek, termal genleşme katsayısı düşük ve sert bir malzemedir. Germanyum gibi 100 °C'de optik özelliğini kaybetmemektedir ve GaAs malzemesi gibi zehirli değildir.

Sisteme kubbe eklendikten ve optimizasyonlar tekrarlandıktan sonra elde edilen sistemin kesit görüntüsü Şekil 3.11’de, spot diyagramı Şekil 3.12’de, MTF grafiği Şekil 3.13’te ve arayıcı başlığı oluşturan optik elemanların geometrik parametreleri Çizelge 3.15’te verilmiştir.

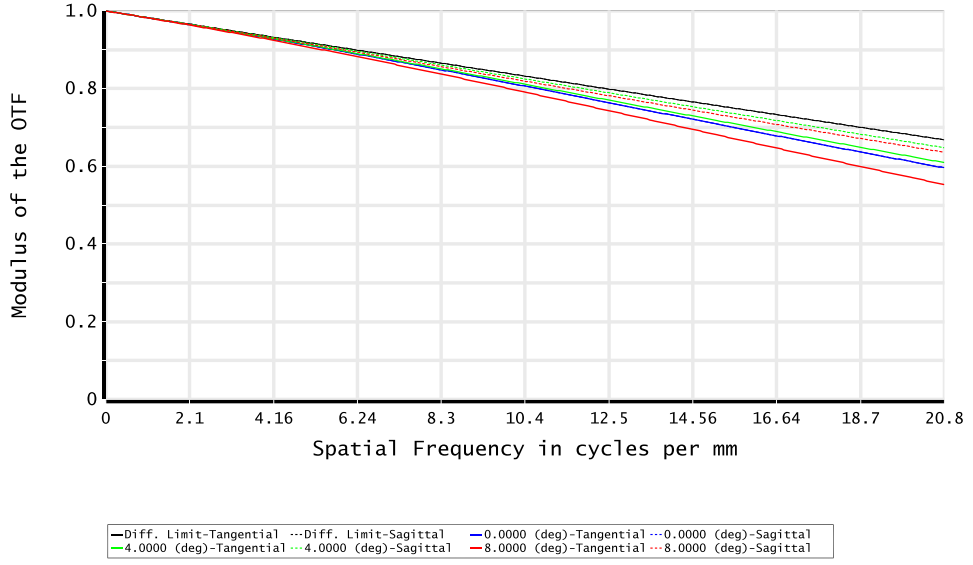


Şekil 3.11. Kızılötesi arayıcı başlık kesit görüntüsü.



Surface: IMA		Spot Diagram	
01.05.2019	Units are µm. Airy Radius: 12.18 µm. Legend items refer to Wavelengths	Zemax	
Field : 1 2 3	RMS radius : 5.067 4.014 5.734	Zemax OpticStudio 18.9	
CEO radius : 7.612 8.117 9.681	Scale bar : 24 Reference : Middle	70mm_F2_16d_MLWIR_Kubbe.ZMX	
		Configuration 1 of 1	

Şekil 3.12. Kızılötesi arayıcı başlık spot diyagramı.



Şekil 3.13. Kızılötesi arayıcı başlık MTF grafiği.

Çizelge 3.15. Kızılötesi arayıcı başlık optik sistemini oluşturan optik elemanların geometrik parametreleri.

Mercek	Yüzey	Eğrilik Yarıçapı (mm)	Kalınlık (mm)	Malzeme	Yüzey Çeşidi
Kubbe	1	90,000	4,00	ZnS_Broad	Küresel
	2	86,000	4,00		Küresel
1.	3	45,726	8,20	AMTIR-1	Küresel
	4	162,500	3,00		Küresel Olmayan
2.	5	68,919	9,00	Germanyum	Küresel
	6	40,512	3,00		Küresel Olmayan
3.	7	60,538	6,00	ZnS_Broad	Küresel Olmayan
	8	29,399	10,65		Küresel
4.	9	87,491	7,50	AMTIR-1	Küresel
	10	-143,129	40,65		Küresel

Şekil 3.12'deki spot yarıçaplarından ve Şekil 3.13'teki MTF grafiğinden görüldüğü gibi kubbe sistem performansını düşürmemiştir ve elde edilen sistem, performans gereksinimlerini karşılamaktadır. Kızılötesi arayıcı başlığın elde edilen optik sistem parametreleri Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16. Optik sistem parametreleri.

Parametre	Değer
Etkin Odak Uzaklığı	70 mm (20 °C'de)
Görüş Açısı	16° (±8°)
Giriş Açıklığı	35 mm
F/#	2
Arka Odak Uzaklığı	41 mm
Toplam Optik Yol	96 mm

3.6. Optik Sistemin Atermalizasyonu

Kızılötesi görüntüleme sisteminin belirli bir sıcaklık aralığında yüksek performansla çalışması, optik tasarımın bu sıcaklık aralığında benzer başarımda olmasını gerektirir. Optik performansların, belirlenen -40 ile +80 °C sıcaklık değerleri arasında birbirine yakın olması optik olarak pasif atermalizasyon yapılarak sağlanacaktır (bkz. Bölüm 2.9). Atermalizasyon için önce kızılötesi görüntüleme sisteminin ve kubbenin yerleştirileceği, füze gövde malzemesi seçilecektir.

Genel olarak kullanılan, optik sistem gövdesi ve füze gövdesi malzemeleri özellikleri ile birlikte Çizelge 3.17'de verilmiştir. İçlerinde en ucuz, işlenmesi kolay, hafif ve tercih edilen malzeme alüminyumun bir alaşımı olan T6061'dir. Çalışma kapsamında da füze gövdesi malzemesi olarak, hafif ve ucuz olduğu için alüminyum T6061 kullanılacaktır. Fakat görüntüleme sistemi gövdesi füze çapına oranla oldukça küçük kalmaktadır. Bu

sebeple alüminyum T6061, invar 36, paslanmaz çelik (316) ve titanyum malzemeleri kullanıldığında meydana gelen odak bozulması miktarı spot yarıçapları incelenerek belirlenecektir.

Çizelge 3.17. Gövde malzemelerinin özellikleri [45].

Malzeme	Young Modülü (GPa)	Termal Genleşme Katsayısı ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Yoğunluk (g/cm³)	Poisson Oranı	Termal İletkenlik (W/m²°C)	Sertlik Rockwell
Alüminyum (T6061)	68	23,6	2,7	0,33	167	B – 60
Paslanmaz Çelik (316)	193	16	8	0,3	16,3	B – 93
Titanyum	108	8,6	4,5	0,31	16,3	B – 80
Invar® 36	148	1,3	8	0,29	10,2	B – 90

OpticStudio yazılımında, merceklerin mekanik elemanlar ile temas edeceği yüzeylere, her bir mekanik malzemenin termal genleşme katsayıları eklenerek termal analiz yapılmıştır. Merceklerin termal genleşme katsayıları hazırlanan malzeme kataloğunda bulunmaktadır. Farklı optik gövde malzemeleri için -40 ile $+80^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değerleri arasında 0° , 4° ve 8° ışına geliş açısında elde edilen spot yarıçapları sırasıyla Çizelge 3.18, Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.20’de verilmiştir.

Çizelge 3.18. Farklı optik gövde malzemelerinin, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapına etkisi (AOI=0°).

Optik Gövde Malzemesi	Sıcaklık	-40°C	0°C	20°C	40°C	80°C
Alüminyum (T6061)	0° de Spot Yarıçapı (µm)	18,393	5,237	10,200	16,250	31,618
Paslanmaz Çelik (316)		8,930	6,910	10,200	13,627	22,159
Titanyum		12,910	6,259	10,200	14,517	26,142
Invar® 36		16,835	5,617	10,200	15,735	30,072

Çizelge 3.19. Farklı optik gövde malzemelerinin, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapına etkisi (AOI=4°).

Optik Gövde Malzemesi	Sıcaklık	-40°C	0°C	20°C	40°C	80°C
Alüminyum (T6061)	4° de Spot Yarıçapı (µm)	22,164	9,492	10,059	15,845	30,134
Paslanmaz Çelik (316)		13,097	8,486	10,059	13,416	20,709
Titanyum		16,747	8,911	10,059	14,433	24,333
Invar® 36		20,628	9,330	10,059	15,437	28,646

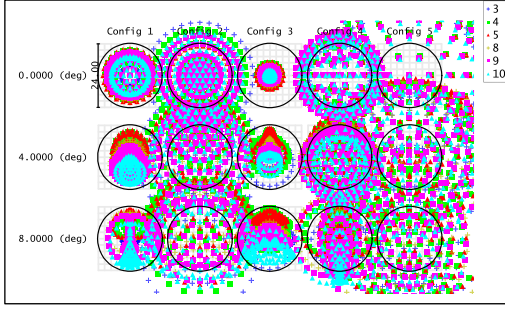
Çizelge 3.20. Farklı optik gövde malzemelerinin, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapına etkisi (AOI=8°).

Optik Gövde Malzemesi	Sıcaklık	-40°C	0°C	20°C	40°C	80°C
Alüminyum (T6061)	8° de Spot Yarıçapı (µm)	24,262	11,846	10,787	17,421	32,483
Paslanmaz Çelik (316)		15,143	9,872	10,787	14,696	23,403
Titanyum		18,743	10,612	10,787	15,575	27,449
Invar® 36		22,850	11,429	10,787	16,946	31,057

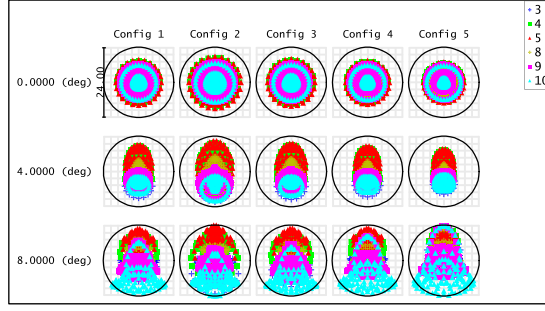
Sıcaklık farkından dolayı ortaya çıkan odak düzlemindeki değişim ile odaklanan ışınların spot yarıçapları da değişir. Bu değişim, yüksek sıcaklıklarda spotun Airy diskin dışına çıkması ile de gözlenmektedir. Çizelge 3.18, Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.20 incelendiğinde, 20 °C'deki spot yarıçapları, bir pikselin ve Airy diskin içindedir. 20 °C'deki başarımlar her malzemede benzer olduğu için bu spot yarıçapı değeri, referans olarak kabul edilmiştir. Bu yarıçap değerine kıyasla, farklı geliş açılarında, düşük ve yüksek sıcaklıklarda bozulmalar gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıktaki ve düşük sıcaklıktaki en fazla bozulma T6061 malzemesi kullanıldığında oluşmuştur. Invar 36 malzemesi kullanıldığında da spot yarıçaplarında, T6061'e benzer artışlar gözlenmiştir. 316 ve titanyum malzemeleri kullanıldığında ise bozulmalar daha azdır. Buradan atermalizasyon şartının sağlanması için, mercek malzemeleri ile gövde malzemesinin birbirini kompanse edebilmesi sonucu çıkmıştır. Yani, gövde genişirken merceğin az değişime uğraması veya mercek genişirken gövdenin değişiminin düşük olması, atermal bir sistem için yeterli değildir.

Optik tasarımda, bu aşamaya kadar yapılan tüm düzenlemeler tek bir konfigürasyon üzerindedir. Sıcaklık, mercek malzemelerinin üretim sıcaklığı olan 20 °C'de sabit tutulmuştur. Atermalizasyon ise OpticStudio programı arayüzünde çoklu konfigürasyon oluşturularak yapılır. Örnek olarak, alüminyum T6061 malzemesi için oluşturulan çoklu konfigürasyon Ek-5'te verilmiştir. Her bir konfigürasyon farklı sıcaklık değerine, dolayısıyla optik elemanların temas ettiği mekanik yüzeylerin ve kendi genleşmelerinden kaynaklı farklı geometrik ölçülere sahiptir. Her birindeki başarımların benzer olması, tüm sıcaklıklardaki konfigürasyonların aynı anda optimize edilmesi ile sağlanır. Çoklu konfigürasyon, sırasıyla 20, -40, 0, 40 ve 80 °C sıcaklıklarında oluşturulmuştur. Her bir optik gövde malzemesi için ayrı ayrı oluşturulan çoklu konfigürasyonlar, optimize edilmiştir. Optimizasyonda merceklerin eğrilik yarıçapları ve mercekler arası mesafeler değişken olarak atanmıştır. Toplam optik yol 96 mm'de sabit tutulmuştur. Yapılan optimizasyonlar, atermalizasyon ile, spot yarıçapları tüm sıcaklıklarda yine bir pikselin ve Airy diskin içinde kalacak hale getirilmiştir. Beş farklı sıcaklık değerine ait spot diyagramları, atermalizasyon öncesi ve sonrası olarak Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Ayrıca beş farklı sıcaklıkta ve farklı gövde malzemeleri kullanıldığında, optimizasyonlar sonrasında elde edilen spot yarıçapları 0°, 4° ve 8° ışınma geliş açıları için sırasıyla Çizelge 3.21, Çizelge 3.22 ve Çizelge 3.23'te verilmiştir.

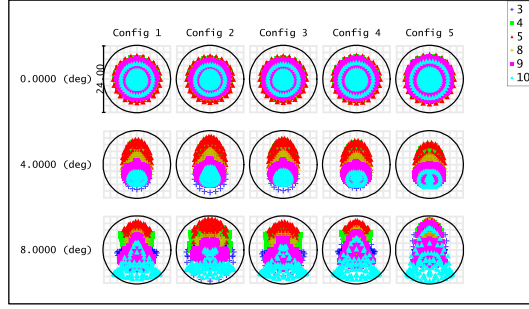
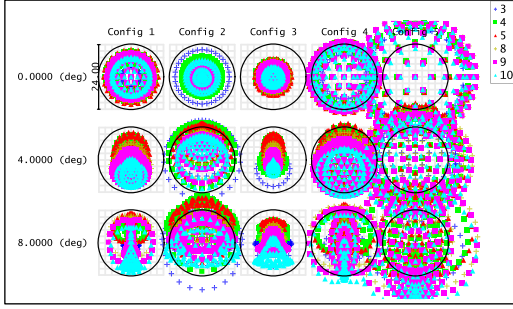
Atermalizasyon Öncesi Spot Diyagramları



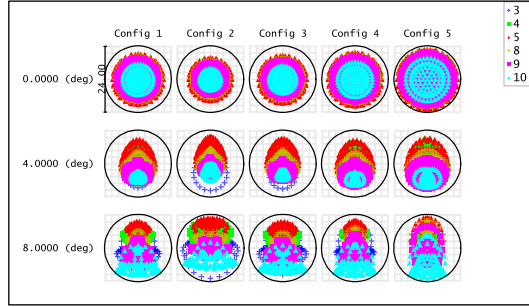
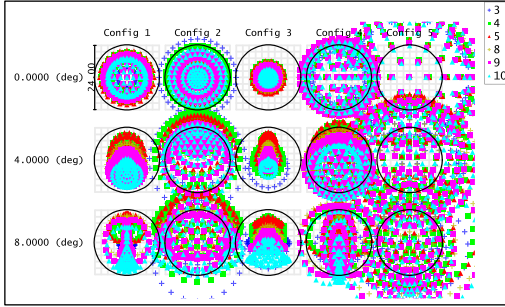
Atermalizasyon Sonrası Spot Diyagramları



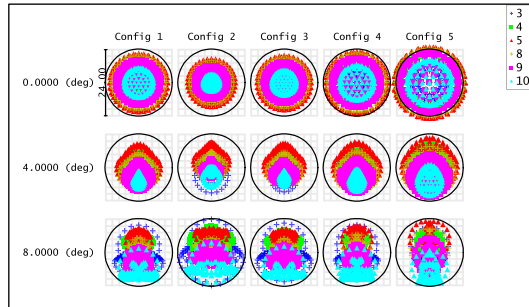
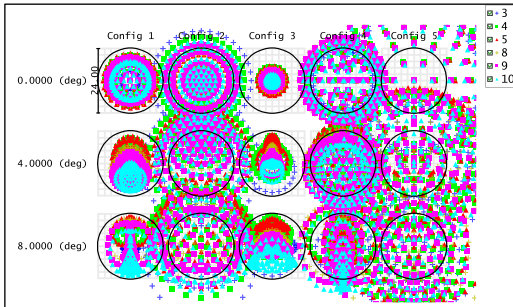
(a) Optik gövde malzemesi alüminyum T6061



(b) Optik gövde malzemesi paslanmaz çelik 316



(c) Optik gövde malzemesi titanyum



(d) Optik gövde malzemesi invar 36

Şekil 3.14. Dört farklı optik gövde malzemesi kullanımında, atermalizasyon öncesi ve sonrası spot diyagramları.

Çizelge 3.21. Atermalizasyondan sonra, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapları (AOI=0°).

Optik Gövde Malzemesi	Sıcaklık	-40°C	0°C	20°C	40°C	80°C
Alüminyum (T6061)	0° de Spot Yarıçapı (µm)	9,019	8,198	7,868	7,572	7,046
Paslanmaz Çelik (316)		8,392	8,403	8,847	8,605	8,907
Titanyum		7,865	8,740	9,257	9,807	10,974
Invar® 36		8,732	9,905	10,612	11,371	13,003

Çizelge 3.22. Atermalizasyondan sonra, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapları (AOI=4°).

Optik Gövde Malzemesi	Sıcaklık	-40°C	0°C	20°C	40°C	80°C
Alüminyum (T6061)	4° de Spot Yarıçapı (µm)	9,965	8,834	8,486	8,128	7,390
Paslanmaz Çelik (316)		9,316	8,767	8,846	8,156	7,712
Titanyum		9,313	8,760	8,456	8,645	9,409
Invar® 36		9,027	8,693	8,625	9,300	10,725

Çizelge 3.23. Atermalizasyondan sonra, farklı sıcaklıklardaki spot yarıçapları (AOI=8°).

Optik Gövde Malzemesi	Sıcaklık	-40°C	0°C	20°C	40°C	80°C
Alüminyum (T6061)	8° de Spot Yarıçapı (µm)	12,057	12,612	12,702	12,790	13,087
Paslanmaz Çelik (316)		11,073	11,972	11,969	11,944	11,968
Titanyum		11,203	11,101	11,441	11,390	11,436
Invar® 36		11,613	10,231	10,576	11,104	12,020

Atermalizasyon öncesi ve sonrası spot diyagramları kıyaslandığında, atermalizasyondan sonra tüm gövde malzemelerinin farklı sıcaklık aralığında benzer performanslar gösterdiği görülmektedir. En düşük spot yarıçapları, paslanmaz çelik 316 ve titanyum malzemesi kullanıldığında elde edilmiştir. Bu aşamada sadece spot diyagramı ile performansları değerlendirmek yeterli değildir. Bu nedenle MTF grafikleri de incelenmelidir. Tüm konfigürasyonlarda, optimizasyonlardan sonra bile en çok bozulma 80 °C’de gözlemlendiği için, dört farklı malzemenin atermalizasyonlar sonucunda 80 °C’de 20,8 çç/mm uzaysal frekansına karşılık gelen MTF değerleri (EK 2), alüminyum T6061 ve paslanmaz çelik 316 için %54, titanyum için %48 ve invar 36 için %53’tür.

MTF grafikleri incelendiğinde, MTF %50’de 20,8 çç/mm uzaysal çözünürlüğü sağlamadığı için, invar dışındaki tüm malzemelerin uygun olduğu görülmüştür. Diğer gövde malzemelerinin kullanımında, optik sistemin spot çapı bir pikselin altında kalmaktadır ve Airy diskin içindedir. Çözünürlükleri dedektörün çözünürlüğünden fazla olan konfigürasyonlarda, kırınım limitinde atermal kızılötesi optik sistem elde edilmiştir.

Paslanmaz çelik 316, titanyum ve alüminyum T6061’in yoğunlukları Çizelge 3.18’den incelendiğinde, değerlerin sırası ile değerleri 8 g/cm³, 4,5 g/cm³ ve 2,7 g/cm³ olduğu görülmektedir. Üç malzeme neredeyse birbirinin iki katı yoğunluğa sahiptir ve en hafif malzeme alüminyum T6061’dir. Ağırlık gereksiniminin kısıtlayıcı olmadığı füzelerde optik gövde malzemelerinin hepsi de kullanılabilir. Fakat ağırlık gereksiniminin kısıtlayıcı olduğu füzeler için en ideal optik gövde malzemesi T6061’dir. Benzer şekilde, malzemelerin maliyetleri sıralandığında en pahalı ve tedariki zor olan malzeme titanyum iken, en ucuz ve tedariki kolay malzeme T6061’dir. Bu nedenlerden dolayı optomekanik parça malzemesi olarak T6061 kullanıldığında elde edilen konfigürasyon ile optik analizler yapılacaktır.

3.7. Geçirgenlik

Atermalizasyon süreci tamamlandıktan sonra kubbe ve merceklerin her bir yüzeyine, yansıtmasız kaplama tanımlanmıştır. Yansıtmasız kaplamaların temel amacı optik elemanların yüzeylerinden oluşan yansımaları azaltmak ve bu sayede optik elemanların

geçirgenliğinin artırılarak dedektöre daha fazla enerji iletilmesini sağlamaktır. Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da sırasıyla kaplama tanımlanmadan önce ve kaplama tanımlandıktan sonra ışıma geliş açısına bağlı geçirgenlik değerleri verilmiştir. Şekil 3.12'deki değerler incelendiğinde kaplama tanımlanmadan önce ortalama geçirgenliğin %28; kaplama tanımlandıktan sonra ortalama geçirgenliğin %86,3 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla dedektöre ulaşan enerji kaplamanın tanımlandığı durumda, kaplama tanımlanmadan önceki duruma göre %58,3 artmıştır.

Field Pos : 0.0000 (deg)		
Transmission at	3	: 0.138181004
Transmission at	4	: 0.444295020
Transmission at	5 (µm)	: 0.568701760
Transmission at	8	: 0.293443854
Transmission at	10	: 0.198269066
Total Transmission		: 0.368598744
Field Pos : 4.0000 (deg)		
Transmission at	3	: 0.141649190
Transmission at	4	: 0.448358672
Transmission at	5 (µm)	: 0.568295322
Transmission at	8	: 0.293994310
Transmission at	10	: 0.199509252
Total Transmission		: 0.370017011
Field Pos : 8.0000 (deg)		
Transmission at	3	: 0.152248925
Transmission at	4	: 0.459231248
Transmission at	5 (µm)	: 0.565932231
Transmission at	8	: 0.295522846
Transmission at	10	: 0.203216116
Total Transmission		: 0.373680599

Şekil 3.15. Farklı dalgaboylarının, yansıtmasız kaplama yokken, üç farklı ışıma geliş açısındaki geçirgenlik değerleri.

Field Pos : 0.0000 (deg)		
Transmission at	3	: 0.918144503
Transmission at	4	: 0.902945314
Transmission at	5 (µm)	: 0.860332217
Transmission at	8	: 0.844374496
Transmission at	10	: 0.816381320
Total Transmission		: 0.867085011
Field Pos : 4.0000 (deg)		
Transmission at	3	: 0.918231842
Transmission at	4	: 0.903026705
Transmission at	5 (µm)	: 0.860500315
Transmission at	8	: 0.844434070
Transmission at	10	: 0.816430885
Total Transmission		: 0.867187355
Field Pos : 8.0000 (deg)		
Transmission at	3	: 0.917360479
Transmission at	4	: 0.902156850
Transmission at	5 (µm)	: 0.859959024
Transmission at	8	: 0.843573342
Transmission at	10	: 0.815575674
Total Transmission		: 0.866430732

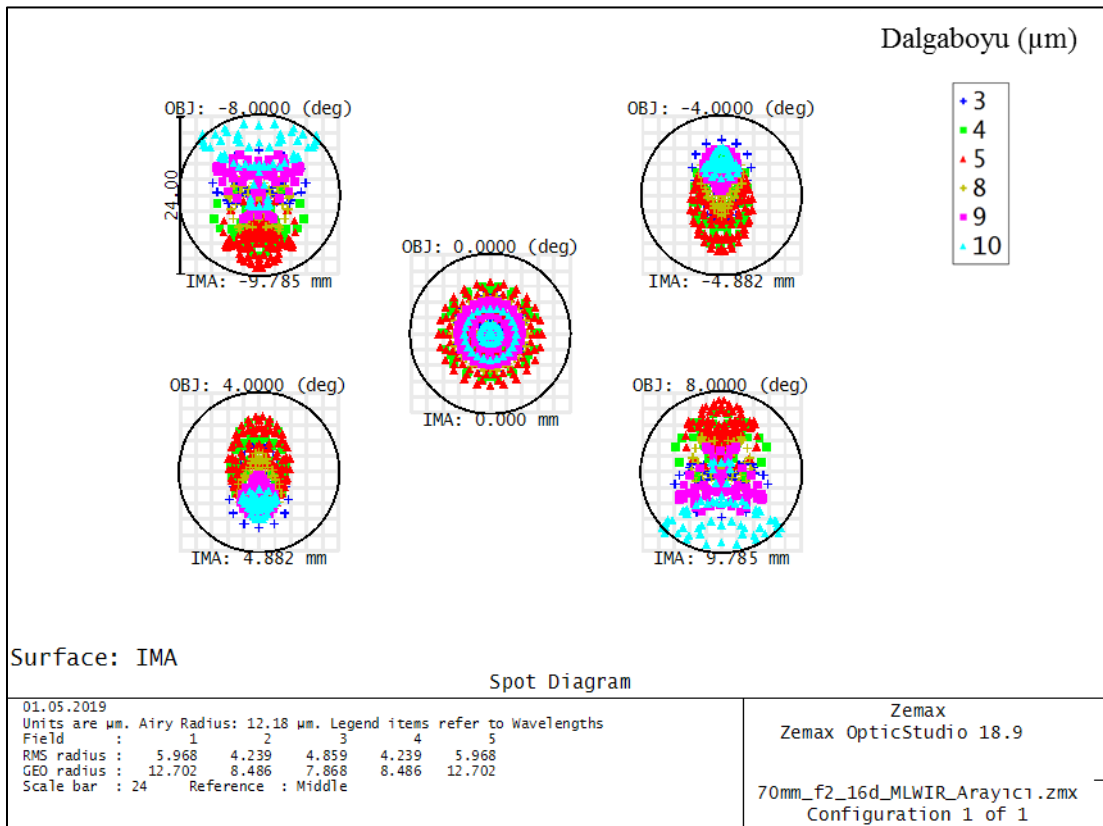
Şekil 3.16. Farklı dalgaboylarının, yansıtmasız kaplama sonrası üç farklı ışıma geliş açısındaki geçirgenlik değerleri.

3.8. Optik Performans Analizleri

Bu bölümde tasarlanan ve atermalizasyonu yapılan sistemin üretim sıcaklığı olan 20 °C'deki optik analizleri yapılacaktır. Bu analizler kapsamında spot diyagramı, MTF grafiği, Seidel diyagramı ve enerji dağılımı kullanılarak, performanslar değerlendirilecektir.

3.8.1. Spot Diyagramı Analizi

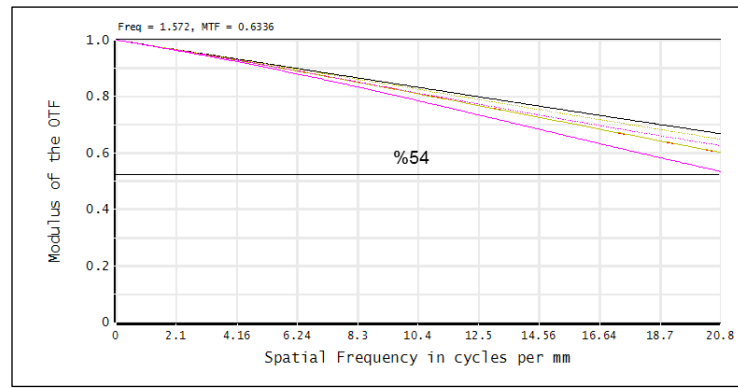
Şekil 3.15'te tasarlanan ve atermalizasyonu yapılan optik sistemin spot diyagramı verilmiştir. Spot diyagramı incelendiğinde, $\pm 8^\circ$ ışına geliş açılarındaki spot yarıçaplarının hem Airy disk yarıçapından küçük hem de 1 pikselin içinde olduğu görülmüş; tasarım gereksiniminin sağlandığı doğrulanmıştır. Spot yarıçaplarının, -8° , -4° , 0° , $+4^\circ$, $+8^\circ$ ışına geliş açılarında, 12,702 μm , 8,486 μm , 7,868 μm , 8,486 μm ve 12,702 μm olduğu görülmüştür.



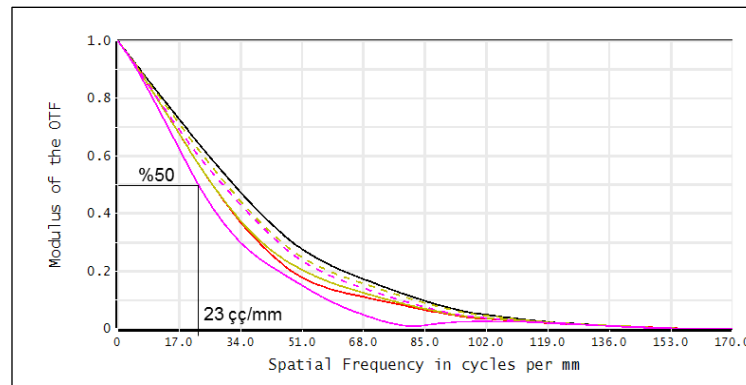
Şekil 3.15. 70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip arayıcı başlığın spot diyagramı.

3.8.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu Analizi

Görüntüleme yapan optik sistemlerin çözünürlüğünü değerlendirmenin en iyi ve spot diyagramına göre daha kapsamlı yolu MTF analizidir. Bu tasarımda, gereksinim (bkz. Bölüm 2.7.2 ve 3.1), %50 MTF'ye denk gelen uzaysal frekansın, dedektörün MTF değerinden düşük olmamasıdır. Tasarlanan ve atermalizasyonu yapılan optik sistemin, MTF grafiği Şekil 3.16'da verilmiştir ve dedektörün çözünürlüğü olan 20,8 çç/mm uzaysal frekansında MTF %54 elde edilmiştir ve performans gereksinimi sağlanmıştır. Uzaysal frekansın kesme frekansında olduğu MTF grafiği Şekil 3.17'de verilmiştir. Bu grafikte MTF değerinin %50'sine karşılık gelen uzaysal frekans arayıcı başlığın çözünürlüğü olarak tanımlanır. Sistemin optik kesme frekansı 170 çç/mm'dir ve MTF'nin %50 olduğundaki uzaysal frekans 23 çç/mm'dir.



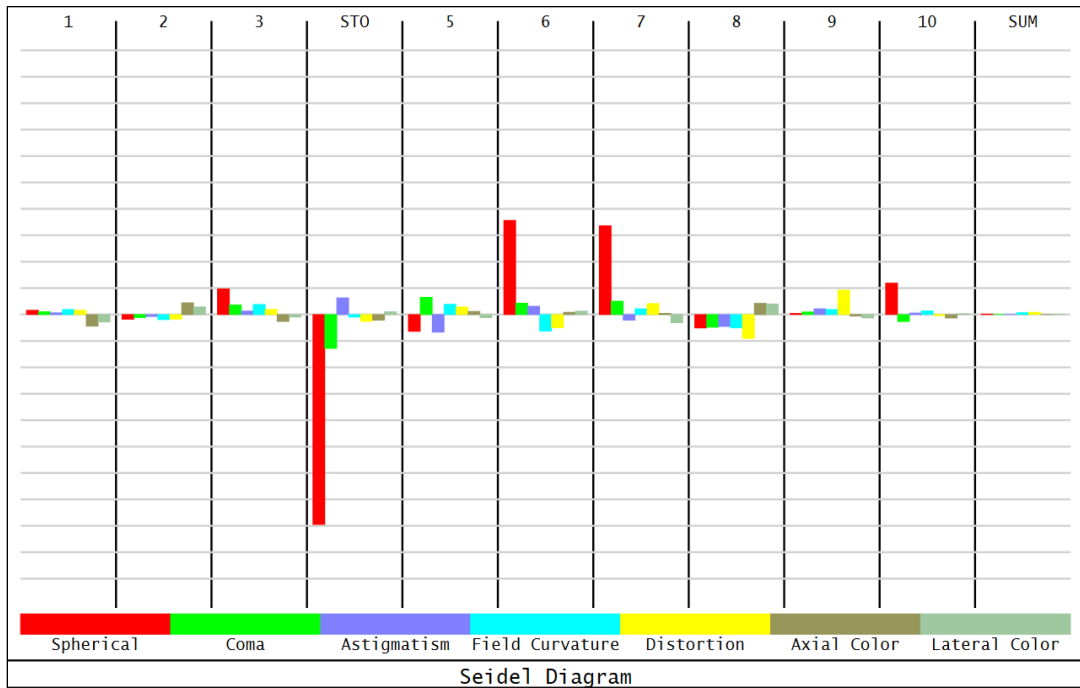
Şekil 3.16. 70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip arayıcı başlığın 20,8 çç/mm'de MTF grafiği.



Şekil 3.17. 70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip arayıcı başlığın kesme frekansında MTF grafiği.

3.8.3. Seidel Diyagramı Analizi

Seidel Diyagramı Bölüm 6.3'te anlatılan optik kusurların toplu bir gösterimidir. Diyagramdan, sistemdeki her bir optik elemanın oluşturduğu kusurlar ve tüm sistemin sahip olduğu toplam kusurlar incelenebilir. Tasarlanan ve atermalizasyonu yapılan optik sistemin Seidel diyagramı Şekil 3.18'de verilmiştir. 1 ve 2 numaralı bölümde kubbenin kusurları, 3'den 10'a kadar olan bölümlerde merceklerin kusurları ve en sağdaki bölgede toplam kusurlar görülmektedir. Diyagramdaki renklerden, kırmızı, küresel kusuru, yeşil, koma kusurunu, mor, astigmatizmi, mavi, alan eğriliğini, sarı, biçim bozulmasını, haki ve gri renk kusurlarını göstermektedir.

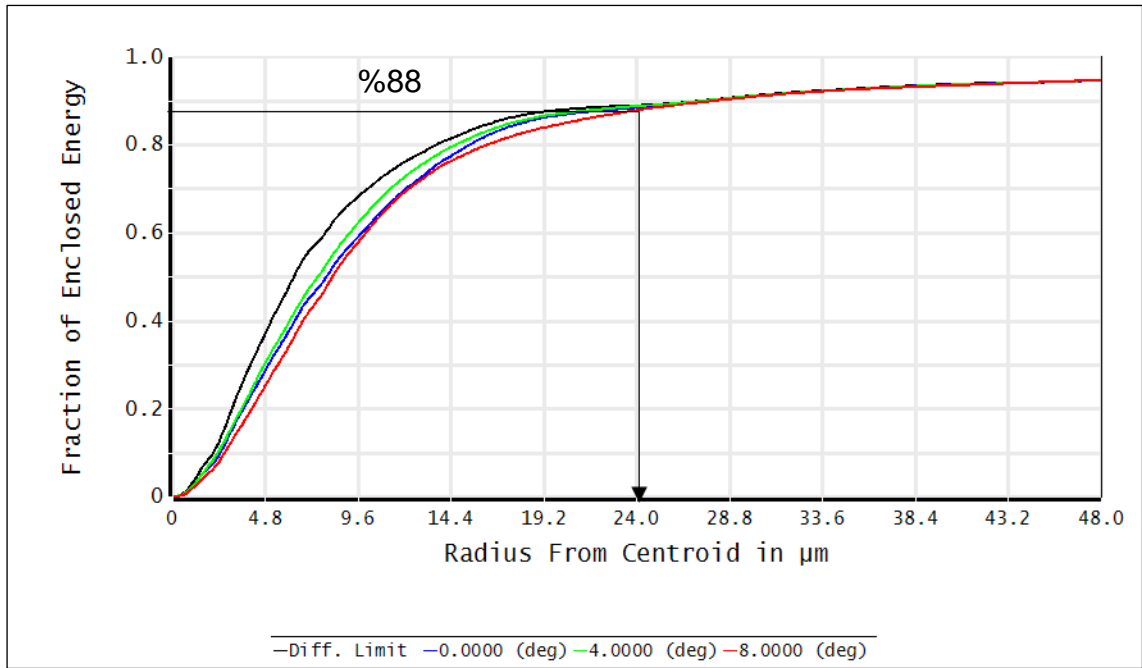


Şekil 3.18. 70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip atermal arayıcı başlığın Seidel diyagramı.

Diyagramda, yataydaki her iki çizgi arası 0,2 mm'dir. Şekil 3.18 incelendiğinde, farklı yüzeylerdeki negatif kusurlar, pozitif kusurlar ile azaltılmış ve sonuçta toplam optik kusurlar kabul edilebilir seviyeye indirilmiştir.

3.8.4. Enerji Dağılımı Analizi

Şekil 3.19’da arayıcı başlık optik tasarımı sonucunda bir piksele düşen enerji dağılımı verilmiştir. Enerji dağılımı dedektörün tamamına düşürülen enerjinin bir ifadesi olduğu için bir pikselin içine düşen miktar ile değerlendirilir. 24 μm ’de bir pikselin içine odaklanan ışınların enerji miktarı, sisteme ilgili ışına geliş açısında giren ışınların %88’idir. Dolayısıyla bir piksele düşmesi gereken enerji miktarının en az %80 olması hedefinin sağlandığı ve böylece optik sistemin dedektör için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.19. 70 mm odak uzaklığına, 16° görüş açısına sahip atermal arayıcı başlığın bir pikseldeki enerji dağılımı.

4. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında hassas güdümlü sistemler için 3 – 10 μm dalgaboyu aralığında çalışan, -40 ile $+80$ $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında atermal kızılötesi arayıcı başlık tasarımı yapılmıştır. Optik tasarımı yapılan arayıcı başlığın çapı 180 mm, kubbenin birinci yüzeyinden dedektöre kadar olan yataydaki optik yol ise 96 mm'dir. Kubbe ve merceklerin malzemeleri sırası ile ZnS_Broad, AMTIR-1, Germanyum, ZnS_Broad ve AMTIR-1'dir. Yapılan optimizasyonlar, performans analizleri ve atermalizasyonlar sonucunda elde edilen sistemin optik elemanlarının geometrik parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sistemde kubbe dahil on yüzey bulunmaktadır. Bu yüzeylerden üç tanesi küresel olmayan yüzeylerden yedi tanesi küresel yüzeylerden oluşmaktadır. Birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü merceğin mekanik çapları sırasıyla 44, 38,36 ve 38 mm'dir.

Çizelge 4.1. Sistemi oluşturan optik elemanların geometrik parametreleri.

Mercek	Yüzey	Eğrilik Yarıçapı (mm)	Kalınlık (mm)	Malzeme	Mekanik Yarıçap (mm)	Yüzey Çeşidi
Kubbe	1	90,000	4,00	ZnS_Broad	90	Küresel
	2	86,000	4,00		86	Küresel
1.	3	44,689	8,20	AMTIR-1	22	Küresel
	4	145,352	3,00			Küresel Olmayan
2.	5	71,191	9,00	Germanyum	19	Küresel
	6	21,870	3,00			Küresel Olmayan
3.	7	63,185	6,00	ZnS_Broad	18	Küresel Olmayan
	8	29,753	10,58			Küresel
4.	9	90,170	7,50	AMTIR-1	19	Küresel
	10	-137,509	40,72			Küresel

Kubbe ve merceklerin toplam kütlesi 941,082 gram; sadece merceklerin toplam kütlesi 144,918 gramdır. Ayrıca her bir merceğin sahip olduğu kütle değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Optik elemanların kütleleri.

Optik Elemanlar	Kubbe	1. Mercek	2. Mercek	3. Mercek	4. Mercek	Toplam
Kütle (g)	796,164	39,621	51,710	24,479	29,108	941,082

Tasarıma başlamadan önce ticari olarak satılan iki bant (MWIR–LWIR) dedektörler araştırılmıştır. Hangi dedektörün kızılötesi arayıcı başlık için daha uygun olacağı, dedektörlerin gürültü eşdeğer gücü, gürültü eşdeğer sıcaklık farkı ve çözünürlük parametreleri karşılaştırılarak yapılmıştır. En yüksek performansa sahip dedektörün Leonardo firmasına ait Condor II dedektörü olduğu bulunmuştur. Condor II dedektörünün çözünürlüğü 640 x 512 (yatay x düşey) ve piksel boyutu 24 μm ’dir.

Çalışmanın en başında belirlenen 7 km hedef tespit mesafesinden, 70 mm’lik odak uzaklığına sahip optik sistem ile hedefin algılanabilirliği, hedeften yayılan güce bağlı olduğu için hedeften ve arka plandan dedektöre gelen güçler hesaplanarak, dedektörün gürültü eşdeğer gücü ile karşılaştırılmış ve 70 mm odak uzaklığının hedefi görüntülemek için yeterli olduğu gösterilmiştir.

70 mm odak uzaklığı ve dedektörün diyagonali ile arayıcı görüş açısı hesaplanmış ve 16° bulunmuştur. Dedektöre ait soğuk durdurma F sayısı 2 olduğu için optik sistemin F sayısı da 2 olarak alınmıştır. Dedektörün bir siyah beyaz çizgi çiftini ayırma gücü hesaplanıp, MTF analizleri için en alt limit 20,8 çç/mm bulunmuş ve optik tasarım için ihtiyaç duyulan tüm parametreler elde edilmiştir.

Geniş bant geçirgen malzemelerin optik özellikleri, kırma indislerindeki dalgaboyuna ve sıcaklığa bağlı değişimler ile incelenmiştir. Tüm özellikler ve değişimler göz önünde bulundurulduğunda, dört farklı mercek malzemesinin (ZnS, Germanyum, AMTIR-1,

ZnSe), sıcaklık etkilerini minimuma indirmek isteyen bir sistem için en uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu malzemelerin, doğru malzemeler olduklarını göstermek ve tasarımda kullanılacak optik eleman sayısını belirlemek için farklı malzemelere sahip iki mercekli bir sistem ile tasarıma başlanmış, en küçük merit fonksiyonu değerine sahip tasarımın dört mercekli ve üç malzemeli bir çözüm ile sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu değer 0,0045 bulunmuştur ve elde edilen dört mercekli optik tasarımın 0°, 4° ve 8° ışına geliş açılarındaki spot yarıçapları sırasıyla 20,726, 33,433 ve 35,712 µm'dir.

Dört mercekli görüntüleme sisteminde malzeme sıralamaları değiştirilerek, toplam üç farklı sıralamada elde edilen merit fonksiyonu değerleri ve 8° ışına geliş açısındaki spot yarıçapları Çizelge 3.14'te verilmiştir. Bu sonuçlardan, en küçük spot yarıçapına sahip olan sıralamadaki (AMTIR-1/Germanyum/ZnS_BROAD/AMTIR-1) sekiz adet yüzeyin üç tanesi küresel olmayan yapılarak, sistemin spot çapının Airy disk ve bir pikselin içinde kalması sağlanmıştır. 0°, 4° ve 8° ışına geliş açılarında elde edilen spot yarıçapları sırasıyla 6,953 µm, 6,803 µm ve 8,831 µm'dir. Kubbe malzemesi olarak termal şoka dayanımı ve sertliği yüksek, kırma indis ve termal genişleme katsayısı düşük olduğu için kubbe malzemesi olarak ZnS_Broad seçilmiştir. Kubbe optik sisteme eklenerek ve sistem optimize edilerek sabit sıcaklık (20 °C) altında kırınım limitine yakın bir tasarım elde edilmiştir. Sistemin 20,8 çç/mm uzaysal çözünürlükteki MTF değeri %55 bulunmuştur.

Atermalizasyon için mekanik gövde malzemelerinin termal genişleme katsayıları, optik tasarıma eklenerek, her bir malzemenin odağındaki bozulma spot diyagramları ile incelenmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.18, Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.20'de verilmiştir. – 40 ile + 80 °C sıcaklık aralığında spot yarıçaplarındaki en fazla bozulma en düşük ve en yüksek termal genişleme katsayılarına sahip invar ve T6061 malzemeleri kullanıldığında görülmüştür. Bu durumun, optik malzemeler ile gövde malzemesinin değişen sıcaklık değerlerinde birbirini kompanse edememesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Spot yarıçaplarındaki, dolayısıyla odak düzlemindeki bozulmaları gidermek amacıyla dört farklı gövde malzemesi için 20, –40, 0, 40 ve 80 °C sıcaklıklarında, 4 adet çoklu konfigürasyon, toplamda 20 adet konfigürasyon oluşturulmuştur. Tüm

konfigürasyonlarda merceklerin eğrilik yarıçapları ve mercekler arası mesafeler değişken olarak atanıp, optimizasyonlar yapılmıştır.

Atermalizasyonların sonucunda optik ve mekanik elemanların farklı yönlerdeki boyutsal değişimlerini en iyi şekilde dengeleyen gövde malzemesinin paslanmaz çelik 316 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Paslanmaz çelik 316 malzemesinden sonra gereksinimleri en iyi sağlayan malzemenin alüminyumun bir alaşımı olan T6061 olduğu görülmüştür. Tedarik kolaylığı, düşük maliyet ve diğer malzemelere göre hafif olması özellikleri dikkate alınarak sistemde kullanılan mekanik parça malzemesinin alüminyum T6061 olmasının sistem performansının sağlanması için en uygun malzeme olduğu değerlendirilmiştir. Diğer iki gövde malzemesinden, invar 36'nın uzaysal frekansına karşılık gelen MTF değeri hedeflenen değer olan %50'nin altında kalmıştır. Elde edilen MTF grafikleri EK-4'te verilmiştir.

Tasarlanan sistem hedeflerin ve arka planların ortak olmasından dolayı hem havadan havaya hem de karadan havaya güdümlü sistemlerde kullanılabilecek özelliklere ve performansa sahiptir.

Nihai sistemin performansı, optik eleman üretim sıcaklığı olan, 20 °C'deki analiz diyagramları ve grafikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, geniş sıcaklık aralığında benzer performans ile çalışabilen, geniş görüş açılı, optik kusurların sistem performansını etkilemeyecek seviyede olduğu ve kırınım limitine yakın bir başarımla gösteren optik tasarım elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Pasif atermalizasyon yapılması ve uygun gövde malzemesinin alüminyumun bir alaşımı olan T6061 olması, arayıcı başlığın maliyetinin, kütesinin ve karmaşıklığının azaltılmasını sağlamıştır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, elde edilen kızılötesi arayıcı başlık optik tasarımı yüksek performanslı, atermal, geniş görüş açılı, düşük maliyetli ve üretilebilirdir. Optik tasarım ve atermalizasyon sonucunda elde edilen kızılötesi arayıcı başlık optik tasarımının özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Tasarımı yapılan iki bant kızılötesi arayıcı başlığın özellikleri.

Çalışma Dalgaboyu	3 – 10 μm
Geçirgenlik	%86,3
Görüş Açısı	16°
Optik Çözünürlük	640 x 512
MTF	Kırınım limiti >0,50 olduğunda, 23 çç/mm
Odak Uzaklığı	70 mm
F/#	2
Kubbe	ZnS_Broad
Hedef Tespit Mesafesi	7 km
Gövde Malzemesi	Al T6061
Optik Gövde Malzemesi	Al T6061

5. KAYNAKLAR

- [1] N.A. Shneydor, Missile Guidance and Pursuit: Kinematics, Dynamics and Control, Elsevier, 266p, 4-6, **1998**.
- [2] B.A. White, Advances in Missile Guidance, Control, and Estimation, CRC Press, 722p, 14-15, **2012**.
- [3] A.K. Maini, Handbook of Defence Electronics and Optronics, Wiley, 1152p, 968-993, **2018**.
- [4] Anonim, AGM-65 Maverick Missile, <http://www.ausairpower.net/USN/AGM-65-Cutaway-S.jpg> (Erişim tarihi: **10 Mayıs 2019**).
- [5] A. Daniels, Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs, Second Edition, Society of Photo Optical, 173p, **2010**.
- [6] D. V Renuka, K.M. Reddy, Infrared Background and Missiles Signature Survey. Defence Science Journal, 63(6), 611–615, **2013**.
- [7] B. Glasgow, W. Bell, Next Generation Of Imaging Infrared Seekers For Anti-Aircraft Missiles, Proc. SPIE 3377, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing IX, 26 August, **1998**.
- [8] W.D. Rogatto, The Infrared And Electro-optical Systems Handbook, Volume 3, Electro-Optical Components, Society of Photo Optical, 666p, **1993**.
- [9] S.U. Eker, M. Kaldirim, Y. Arslan, C. Besikci, IEEE Electron Device Lett., Vol. 29, 1121-1123, **2008**.
- [10] M. Tomkinson, B. Teaney, J. Olson, S. Chari, Dual-band Sensor Fusion For Urban Target Acquisition, Proc. SPIE 5784, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI, 12 May, **2005**.
- [11] B.E. Catanzaro, M. Dombrowski, J. Hendrixson, E. Hillenbrand, Design Of Dual-Band SWIR/MWIR and MWIR/LWIR Imagers, Proc. SPIE 5406, Infrared Technology and Applications XXX, 30 August, **2004**.
- [12] Y. Ma, W. Liu, W. Wang, Optical System Design Of A New Type Infrared Dual-Band Seeker, Proc. SPIE 7544, Sixth International Symposium on Precision

- Engineering Measurements and Instrumentation, 75443X, 31 December, **2010**.
- [13] A. Karimzadeh Refractive Dual Band Infrared Imager Optical Design, *IJOP*, 11 (2),133-138, **2017**.
- [14] G. Curatu, Design and Fabrication of Low-Cost Thermal Imaging Optics Using Precision Chalcogenide Glass Molding, *Proc. SPIE 7060, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX*, 706008, 29 August, **2008**.
- [15] K. Nibir, D. Ravi and K. Ashok, Advances in Infrared Detector Array Technology, *Optoelectronics - Advanced Materials and Devices*, Sergei L. Pyskin and John M. Ballato, IntechOpen, 16 January, **2013**.
- [16] A. Mann, *Infrared Optics and Zoom Lenses*, SPIE Press, 164p, 3-6, **2009**.
- [17] D.C. Harris, *Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance*, Society of Photo Optical, 428p, 2-3, **1999**.
- [18] R.E. Fischer, *Optical System Design*, Second Edition, McGraw-Hill Companies, New York, 624p, 712-714, **2008**.
- [19] C.T. Nguyen, J.P. Havlicek, G. Fan, J.T. Caulfield, M.S. Pattichis, Robust Dual-Band MWIR/LWIR Infrared Target Tracking, 48th Asilomar Conference On Signals, Systems and Computers, 2-5 November, **2014**.
- [20] S.P. Mahulikar, S.K. Sane, U.N. Gaitonde, A.G. Marathe, Numerical Studies Of Infrared Signature Levels Of Complete Aircraft, *The Aeronautical Journal*, Cambridge University Press, Volume 105 (1046), 185-192, **2001**.
- [21] S.P. Mahulikar, Prediction of Engine Casing Temperature of Fighter Aircraft for Infrared Signature Studies, SAE Technical Paper 920961, Aerospace Atlantic Conference & Exposition, **1992**.
- [22] R. Fraenkel, J. Haski, U. Mizrahi, L. Shkedy, I. Shtrichman, E. Pinski, Cooled and Uncooled Infrared Detectors For Missile Seekers, *Proc. SPIE 9070, Infrared Technology and Applications XL*, 90700P, **2014**.
- [23] P. Klocek, *Handbook of Infrared Optical Materials*, CRC Press, 632p, 123-124 **2017**.
- [24] Anonim, *Optical Materials Guide*, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/germanium-ge.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).

- [25] Anonim, Optical Materials Guide, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/amtir-1.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).
- [26] Anonim, Optical Materials Guide, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/zinc-selenide-znse.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).
- [27] Anonim, Optical Materials Guide, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/cleartrantm-zns-multi-spectral.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).
- [28] Anonim, Optical Materials Guide, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/barium-fluoride-baf2.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).
- [29] Anonim, Optical Materials Guide, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/potassium-chloride-kcl.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).
- [30] Anonim, Optical Materials Guide, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/thallium-bromiodide-krs-5.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).
- [31] Anonim, Optical Materials Guide, <https://www.janostech.com/knowledge-center/optical-materials-guide/gallium-arsenide-gaas.html> (Erişim tarihi: **11 Mayıs 2019**).
- [32] N. Gat, J. Zhang, M. De Li, L. Chen, H. Gurrola, Variable Cold Stop For Matching IR Cameras To Multiple F-Number Optics, Proc. SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII, 65420Y, 14 May, **2007**.
- [33] R. Kingslake, R.B. Johnson, Lens Design Fundamentals, Academic Press; Second Edition, 569p, 101-132, **2009**.
- [34] Joseph M. Geary, Introduction to Lens Design With Practical ZEMAX Examples, Willmann-Bell, Virginia, 462p, 389-396, **2002**.
- [35] Zemax, LLC, Getting Started With OpticStudio 16, 225p, 106-107, **2016**.
- [36] A. Y.A. Haj noor, F. M. B. Elshafia, M. M. Ahmed, IR Optical System Design Of Uncooled Thermal Imaging Camera In Long Band (8—12 μ m), IOSR Journal of

- Applied Physics 6(5), 32-40, **2014**.
- [37] D. Vukobratovich, P. Yoder, Fundamentals of Optomechanics, CRC Press, 605p, 6-96, **2018**.
- [38] A. Ahmad, Handbook of Optomechanical Engineering, Second Edition, CRC Press, 572p, 1-41, **2017**.
- [39] V. Povey, Athermalisation Techniques In Infra Red Systems, Proc. of SPIE Vol. 0655, Optical System Design, Analysis, And Production For Advanced Technology Systems, Ed. Fischer, Rogers, **1986**.
- [40] A. R. Nasyrov, Methods Of Athermalization Of Optical Systems In Thermal Imaging Devices, J. Opt. Technol. 84, 205-206, **2017**.
- [41] M. Sundaram, A. Reisinger, R. Dennis, K. Patnaude, D. Burrows, R. Cook, J. Bundas, Multi-Color IR Sensors Based On QWIP Technology For Security And Surveillance Applications, Proc. SPIE 6203, Optics and Photonics in Global Homeland Security II, 620307, 9 May, **2006**.
- [42] P. Abbott, P. M Thorne, and C. P. Arthurs, Latest Detector Developments With HgCdTe Grown By MOVPE On GaAs Substrates, Proc. SPIE 8012, Infrared Technology and Applications XXXVII, 801236, 20 May, **2011**.
- [43] Standart Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems, ASTM International, Designation E1543-00., **2012**.
- [44] M.J. Riedl, Optical Design Fundamentals for Infrared Systems, Second Edition, SPIE Press, 202p, **2009**.
- [45] K. Schwertz, J. Burge, Field Guide to Optomechanical Design and Analysis, Society of Photo Optical, Spi Edition, 154p, **2012**.

EKLER

EK 1 – Geniş Bant Kızılötesi Malzemelerin Dalgaboyuna Karşı Geçirgenlik Grafikleri

EK 2 – CONDOR II Dedektörünün Özellikleri

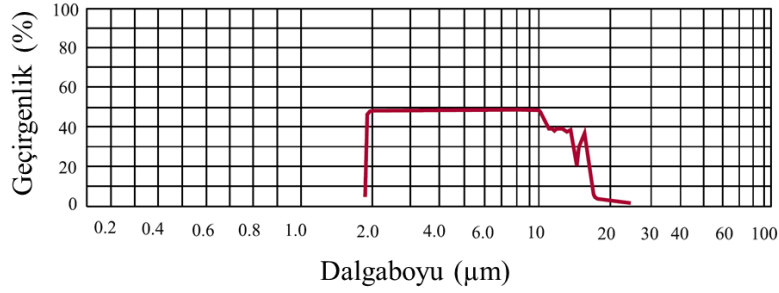
EK 3 – Projede Kullanılan Merit Fonksiyonu İşlemcileri

EK 4 – Atermalizasyon Sonrası 80 °C'deki MTF Grafikleri

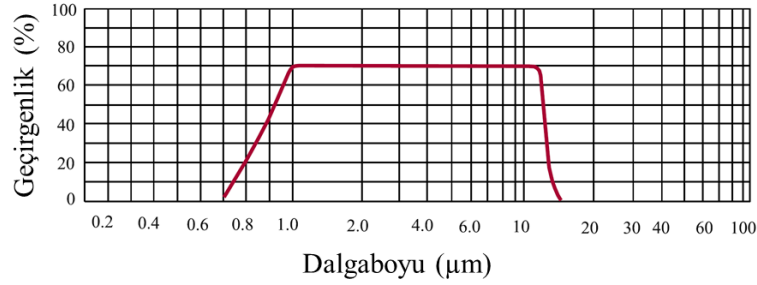
EK 5 – Mekanik Gövde Malzemesi T6061 Olduğunda Çoklu Konfigürasyon Matrisi

EK 6 – Tez Çalışması Orijinallik Raporu

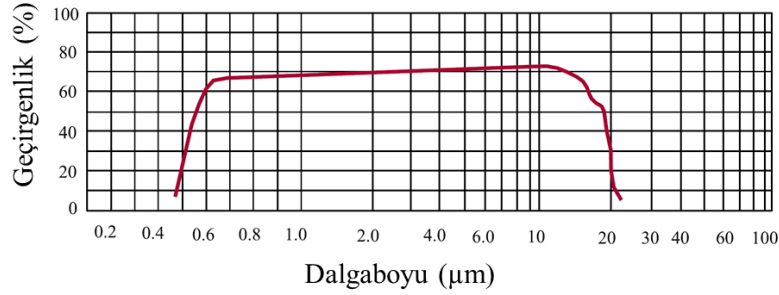
EK 1 – Geniş Bant Kızılötesi Malzemelerin Dalgaboyuna Karşı Geçirgenlik Grafikleri



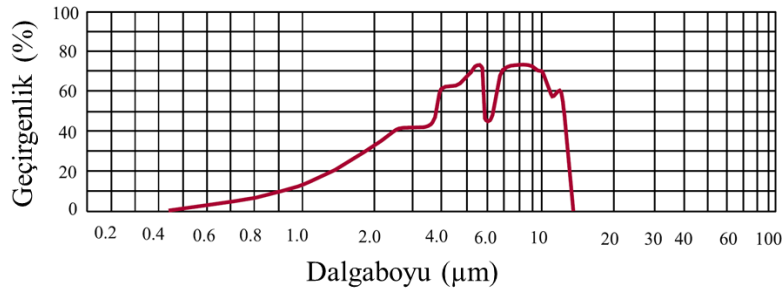
Germanyumun dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.



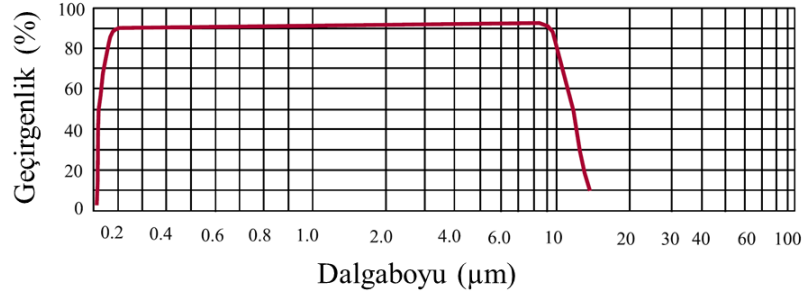
AMTIR-1 malzemesinin dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.



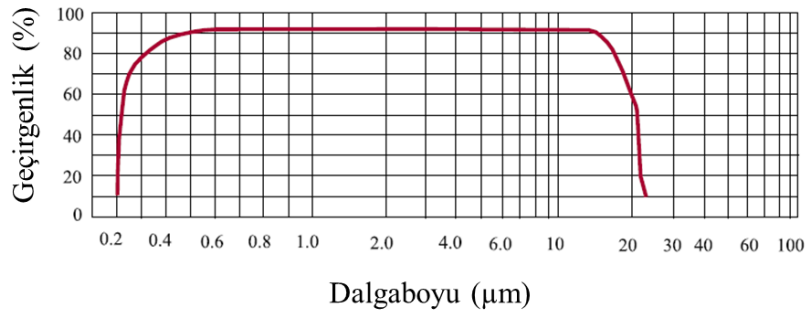
Çinko selenürün dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.



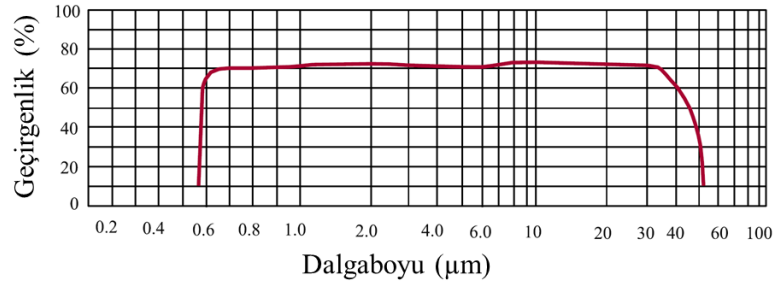
Çinko sülfürün dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.



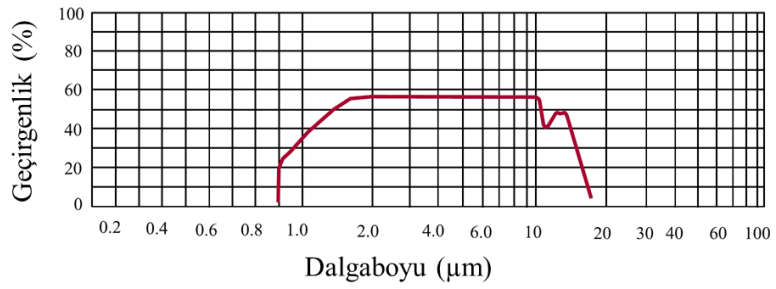
Baryum florürün dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.



Potasyum klorürün dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.



Talyum boromiyodidin dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.



Galyum arsenitin dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği.

EK 2 – CONDOR II Dedektörünün Özellikleri

CONDOR II



MAIN FEATURES

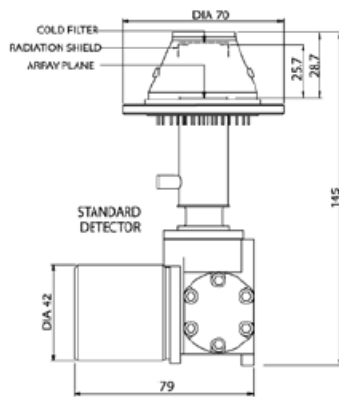
- Snapshot or interlaced operation
- Simple to use
- Concurrent 3 - 5µm and 8 - 10µm operation
- Dedicated 3 - 5µm operation
- Dedicated 8 - 10µm operation
- High electro-optic performance with low crosstalk, automatic anti-blooming at the pixel level and excellent sensitivity
- Windowing gives enhanced frame rates over selected areas of the array
- Single sensor solution for Medium Wave (MW) and Long Wave (LW) without compromise
- Combination of wave bands provides improved DRI over 1st & 2nd Generation
- Wave band switching to optimise performance in all imaging conditions.

Key Benefits

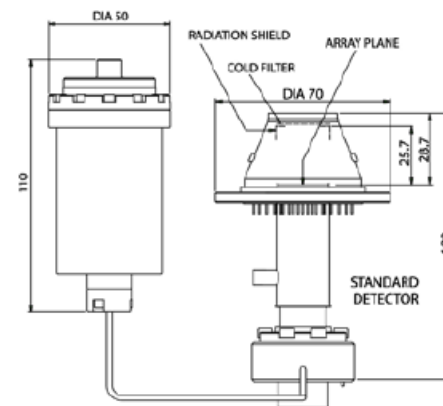
- Low cost
- High resolution
- High frame rate
- High sensitivity
- Reduction in false alarm detection.

TECHNICAL SPECIFICATION

FORMAT	
Array	640 x 512 pixels
Pixel Pitch	24µm
Active Area	15.36 x 12.29mm
TYPICAL PERFORMANCE	
NETD (median) LW	28mK (22mk dedicated LW)
NETD (median) MW	28mK (11mk dedicated MW)
Pixel Operability	>99%
INTERFACE PARAMETERS	
Modes	Snapshot or interlaced
Configuration Control	Single serial interface
Output Voltage Range	2.8V
Charge Capacity (dedicated)	LW 8 x 10 ⁶ electrons MW 8 x 10 ⁶ electrons
Number of Outputs	8
Pixel Rate	Up to 10MHz per output
Intrinsic MUX noise	50µV rms max
Array Operating Temperature	80K nominal
Nominal Operating Voltage	6V
Minimum Pins for Operation	26
Number of Input Clocks	1
Window Material	Germanium
Window Thickness	1.75mm
Cold Filter Material	Silicon
Cold Filter Thickness	0.4mm
ICDA	
Weight	<750g
Power Consumption	<10W steady state
Cooling Engine	Rotary Stirling engine
Operating Temperature Range	-40°C to +70°C
LINEAR ENGINE VARIANT	
Weight	950g
Power Consumption	<15W steady state
Cooling Engine	Linear Stirling engine
Operating Temperature Range	-40°C to +70°C



IDCA



Linear Engine Variant



2017 © Leonardo MW Ltd

For more information please email infomarketing@leonardocompany.com

Leonardo MW Ltd

First Avenue - Milbrook Industrial Estate - Southampton - Hampshire - SO15 0LG - Tel: +44 (0) 2380 702300

This publication is issued to provide outline information only and is supplied without liability for errors or omissions. No part of it may be reproduced or used unless authorised in writing. We reserve the right to modify or revise all or part of this document without notice.

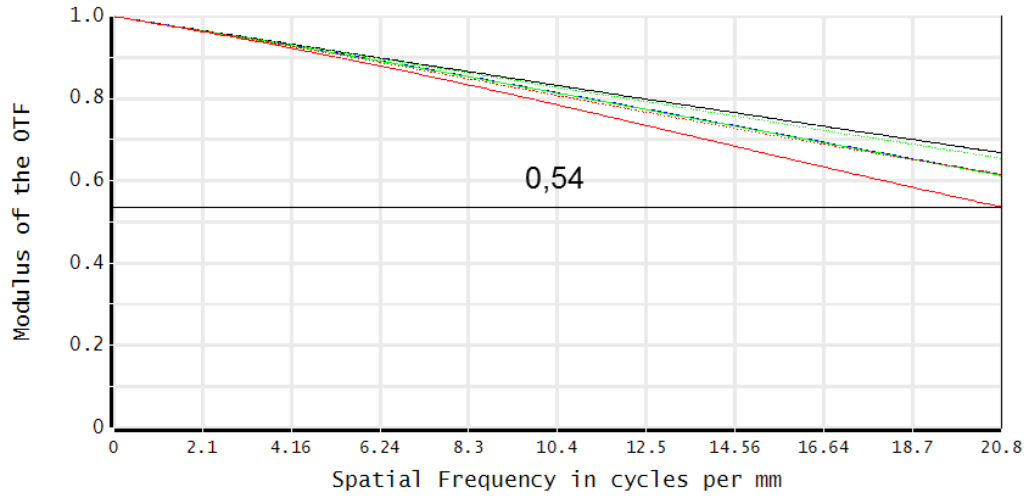
leonardocompany.com

LNDE - MM08095-1-17

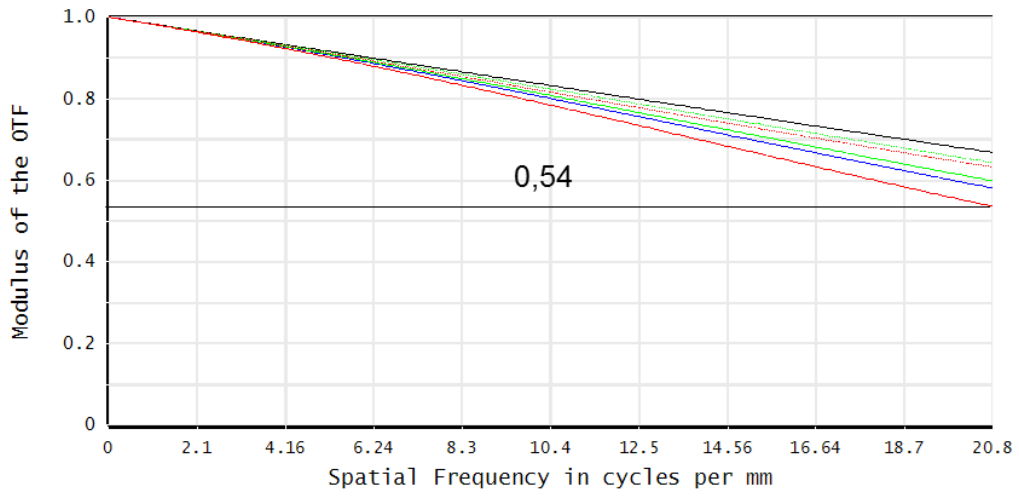
EK 3 – Projede Kullanılan Merit Fonksiyonu İşlemcileri

CTLT	(Center Thickness Less Than) Daha Küçük Merkez Kalınlığı
CTGT	(Center Thickness Greater Than) Daha Büyük Merkez Kalınlığı
CVLT	(Curvature Less Than) Daha Küçük Eğrilik
CVGT	(Curvature Greater Than) Daha Büyük Eğrilik
DIMX	(Distortion Maximum) Maksimum Dağılma
MNCA	(Minimum Center Thickness Air) Havadaki Minimum Merkez Kalınlığı
MNCG	(Minimum Center Thickness Glass) Mercekteki Minimum Merkez Kalınlığı
MNEA	(Minimum Edge Thickness Air) Havadaki Minimum Kenar Kalınlığı
MNEG	(Minimum Edge Thickness Glass) Mercekteki Minimum Kenar Kalınlığı
MXCA	(Maximum Center Thickness Air) Havadaki Maksimum Merkez Kalınlığı
MXCG	(Maximum Center Thickness Glass) Mercekteki Maksimum Merkez Kalınlığı
THIC	(Thickness Of Surface) Yüzey Kalınlığı
SPHA	(Spherical Aberration) Küresel Kusur
COMA	(Coma Aberration) Koma Kusuru
ASTI	(Astigmatism) Astigmatizm
FCUR	(Field Curvature) Alan Eğriliği
DIST	(Distortion) Distorsiyon
AXCL	(Axial Color) Enine Renk Kusuru
LACL	(Longitudinal Color) Boyuna Renk Kusuru
EFFL	(Effective Focal Length) Etkin Odak Uzaklığı
TEMP	(Temperature) Sıcaklık
CRVT	(Curvature) Eğrilik Yarıçapı
SDIA	(Semi Diameter) Yarıçap
GLSS	(Glass) Mercek Malzemesi

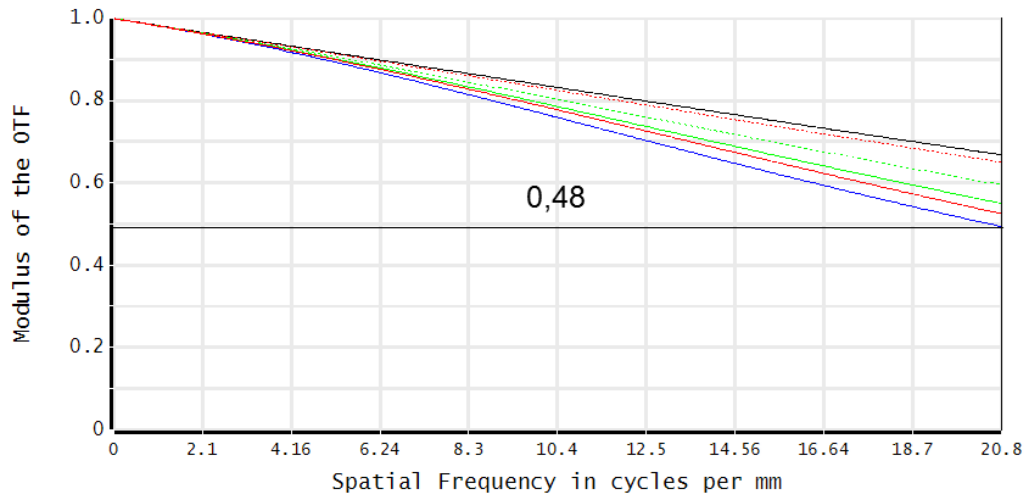
EK 4 – Atermalizasyon Sonrası 80 °C'deki MTF Grafikleri



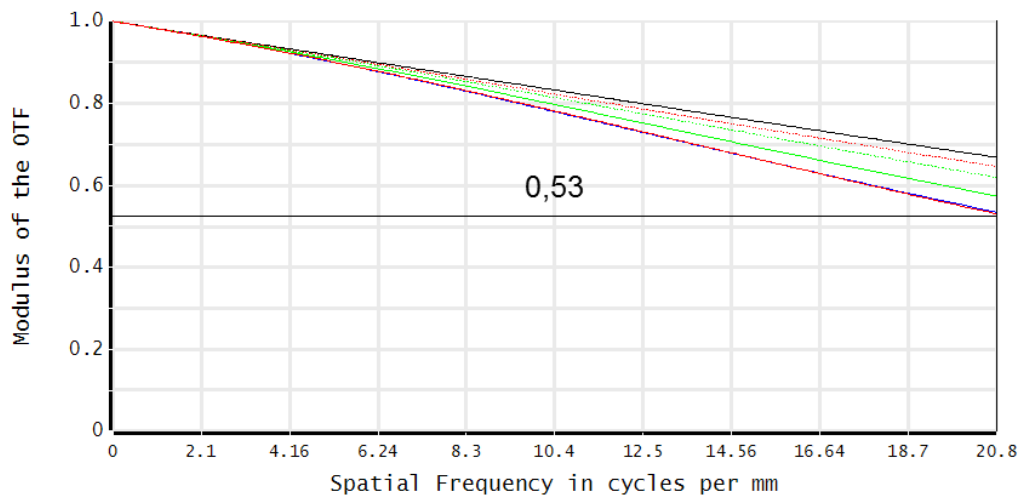
Optik gövde malzemesi alüminyum T6061



Optik gövde malzemesi paslanmaz çelik 316



Optik gövde malzemesi titanyum



Optik gövde malzemesi invar 36

EK 5 – Mekanik Gövde Malzemesi T6061 Olduğunda Çoklu Konfigürasyon Matrisi

	Active : 1/5		Config 1*	Config 2	Config 3	Config 4	Config 5
1	TEMP ▼	-	20.000	-40.000	0.000	40.000	80.000
2	CRVT ▼	1	0.011	0.011 T	0.011 T	0.011 T	0.011 T
3	THIC ▼	1	4.000	3.998 T	3.999 T	4.001 T	4.002 T
4	GLSS ▼	1	ZNS_BR...	ZNS_BR... P	ZNS_BR... P	ZNS_BR... P	ZNS_BR... P
5	SDIA ▼	1	90.000	89.964 T	89.988 T	90.012 T	90.036 T
6	CRVT ▼	2	0.012	0.012 T	0.012 T	0.012 T	0.012 T
7	THIC ▼	2	4.000	4.078 T	4.026 T	3.974 T	3.905 T
8	SDIA ▼	2	86.000	85.966 T	85.989 T	86.011 T	86.034 T
9	CRVT ▼	3	0.022	0.022 T	0.022 T	0.022 T	0.022 T
10	THIC ▼	3	8.200	8.194 T	8.198 T	8.202 T	8.206 T
11	GLSS ▼	3	AMTIR1	AMTIR1 P	AMTIR1 P	AMTIR1 P	AMTIR1 P
12	SDIA ▼	3	22.000	21.984 T	21.995 T	22.005 T	22.016 T
13	CRVT ▼	4	6.154E-03	6.158E-03 T	6.155E-03 T	6.152E-03 T	6.149E-03 T
14	THIC ▼	4	3.000	2.997 T	2.998 T	3.002 T	2.999 T
15	SDIA ▼	4	19.000	18.986 T	18.995 T	19.005 T	19.014 T
16	CRVT ▼	5	0.015	0.015 T	0.015 T	0.015 T	0.015 T
17	THIC ▼	5	9.000	8.997 T	8.999 T	9.001 T	9.003 T
18	GLSS ▼	5	GERMA...	GERMA... P	GERMA... P	GERMA... P	GERMA... P
19	SDIA ▼	5	19.000	18.994 T	18.998 T	19.002 T	19.006 T
20	CRVT ▼	6	0.025	0.025 T	0.025 T	0.025 T	0.025 T
21	THIC ▼	6	3.000	3.004 T	3.001 T	2.999 T	2.996 T
22	SDIA ▼	6	15.000	14.995 T	14.998 T	15.002 T	15.005 T
23	CRVT ▼	7	0.017	0.017 T	0.017 T	0.017 T	0.017 T
24	THIC ▼	7	6.000	5.997 T	5.999 T	6.001 T	6.002 T
25	GLSS ▼	7	ZNS_BR...	ZNS_BR... P	ZNS_BR... P	ZNS_BR... P	ZNS_BR... P
26	SDIA ▼	7	18.000	17.993 T	17.998 T	18.002 T	18.007 T
27	CRVT ▼	8	0.034	0.034 T	0.034 T	0.034 T	0.034 T
28	THIC ▼	8	10.646	10.637 T	10.643 T	10.649 T	10.656 T
29	SDIA ▼	8	15.000	14.994 T	14.998 T	15.002 T	15.006 T
30	CRVT ▼	9	0.011	0.011 T	0.011 T	0.011 T	0.011 T
31	THIC ▼	9	7.500	7.495 T	7.498 T	7.502 T	7.505 T
32	GLSS ▼	9	AMTIR1	AMTIR1 P	AMTIR1 P	AMTIR1 P	AMTIR1 P
33	SDIA ▼	9	19.000	18.986 T	18.995 T	19.005 T	19.014 T
34	CRVT ▼	10	-6.987E...	-6.992E-... T	-6.988E-03 T	-6.985E-... T	-6.982E-... T
35	THIC ▼	10	40.654	40.655 T	40.655 T	40.655 T	40.655 T
36	SDIA ▼	10	19.000	18.986 T	18.995 T	19.005 T	19.014 T

EK 6 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu

	HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA	
Tarih:06/08/2019	
Tez Başlığı / Konusu: Hassas Güdümlü Sistemler İçin İki Bant Kızılötesi Arayıcı Başlık Optik Tasarımı	
Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 79 sayfalık kısmına ilişkin, 06/08/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %2 'dir.	
Uygulanan filtrelemeler:	
1- Kaynakça hariç	
2- Alıntılar dâhil	
3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç	
Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.	
Gereğini saygılarımla arz ederim.	
06/08/2019	
Adı Soyadı: Aslı DOĞAN	_____
Öğrenci No: N14125674	_____
Anabilim Dalı: Fizik Mühendisliği	_____
Program: Yüksek Lisans	_____
Statüsü: <input checked="" type="checkbox"/> Y.Lisans <input type="checkbox"/> Doktora <input type="checkbox"/> Bütünleşik Dr.	_____
<u>DANIŞMAN ONAYI</u>	
UYGUNDUR.	
	
Doç. Dr. Akın BACIOĞLU	

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aslı DOĞAN
Doğum yeri : İzmir
Doğum tarihi : 01.05.1988
Elektronik posta adresi : asli.dogan@hacettepe.edu.tr
Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği

İş Tecrübesi

2014-2015 Nanovak Arge Bilişim Mühendislik, Danışmanlık Sanayi Ve Ticaret A.Ş.
2015-2016 Mikro-Tasarım Elektronik Sanayi Ve Ticaret A.Ş.
2016- Roketsan A.Ş.

Deneyim Alanları

Görüntüleme sistemleri, optik tasarım, optomekanik tasarım, IC paket tasarımı.

