

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GENİŞ BANT (3-12 μm) ATERMAL KIZILALTI GÖRÜNTÜLEYİCİ
OPTİK TASARIMI**

Altuğ UÇAR

FİZİK MÜHENDSİLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2010**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Altuğ Uçar tarafından hazırlanan “**Geniş Bant (3-12 μm) Atermal Kızılaltı Görüntüleyici Optik Tasarımı**” adlı tez çalışması 07/10/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mehmet KABAK

Jüri Üyeleri :

Başkan : Doç. Dr., Selim O. SELAM
Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Mehmet KABAK
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr., Hüseyin SARI
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr.Orhan ATAKOL

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GENİŞ BANT (3-12 μm) ATERMAL KIZILALTI GÖRÜNTÜLEYİCİ OPTİK TASARIMI

Altuğ UÇAR

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KABAK

Bu tez çalışmasında kızılaltı tayfın orta ve uzun şeklinde adlandırılan (3-5 μm ve 8-12 μm) iki alt bandında birden çalışabilen bir görüntüleme sisteminin optik tasarımı anlatılmıştır. Tasarım, aynı zamanda değişken hava ve mevsim şartlarında sorunsuz biçimde çalışabilmesi için belirli oranda sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyecek şekilde yapılmıştır. İlk olarak geniş bant demekle ne kast edildiği vurgulanıp ardından kızılaltı alt bantlar hakkında temel bilgiler verilmiştir. Sonrasında kızılaltı bantta tasarım yapmanın ayrıntıları anlatılıp tasarım için gerekli olan sistem parametreleri belirlenmiştir. Tasarımın yapılması sırasında baz alınacak çevre koşulları TÜRKİYE şartlarında yaşanabilen zorlu hava koşullarını temsil etmektedir ve -35°C ile $+50^{\circ}\text{C}$ arasında olacak şekilde belirlenmiştir.

Ekim 2010, 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kızılaltı, görüntüleme, geniş bant, optik tasarım, atermalizasyon

ABSTRACT

MSc. Thesis

OPTICAL DESIGN OF A BROADBAND (3-12 μ m) ATHERMAL INFRARED IMAGER

Altuğ UÇAR

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Mehmet KABAK

Optical design of an imaging system that works in two subbands of the infrared spectrum, which are called midwave and longwave (3-5 μ m ve 8-12 μ m), is described in this work. The relevant design issue is to design an athermal optic so that it is not affected by the change of temperature in terms of various season and atmospheric conditions in operation. In this study, the first attempt dealt with is to describe the broadband concept and to highlight that term. Then, basic information is presented about infrared sub-bands. After describing the details of optical design in an infrared band, the decisions on necessary design parameters are made. In this scene, environmental conditions regarded during the design process are chosen as challenging weather conditions in Turkey within the range from -35° C to +50° C.

October 2010, 68 pages

Key Words: Infrared, imaging, broadband, optical design, athermalization

TEŐEKKÖRLER

Çalıőmalarımı yönlendiren, araőtırmalarımın gelişimine katkıda bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet KABAK'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), çalıőmalarım sırasında çok önemli katkılarda bulunan ve yönlendiren sayın Dr. Alper AKMEŞE'ye, bilimsel çalıőmalarım yanında her aşamada pratik çözümleriyle bir hoca bir arkadaş olarak destek olan sayın Emk. Albay Yük. Fizik Mühendisi Namık AÇAN'a çalıőmalarım süresince birçok fedakarlıklar gösteren ve destekleyen annem ve eşime en derin duygularla teşekkür ederim.

Altuğ UÇAR

Ankara, Ekim 2010

İÇİNDEKİLER

SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. Kuramsal Temeller.....	7
2.1 Geometrik Optik ve Bazı Kavramlar.....	7
2.1.1 Mercekler.....	7
2.1.2 Kırılma (Refraction).....	7
2.1.3 Kırınım (Diffraction)	8
2.1.4 Kırılma indisi.....	8
2.1.5 Odak noktası (<i>Focal Point</i>)	9
2.1.6 Ana noktalar (Principal Points)	9
2.1.7 Etkin odak uzaklığı (<i>Efective Focal Lenght</i>).....	9
2.1.8 Arka odak uzaklığı (<i>Back Focal Lenght</i>)	9
2.1.9 Alan sınırlayıcı (<i>Field Stop</i>)	10
2.1.10 Optik açıklık (<i>Clear Aperture</i>).....	10
2.1.11 <i>f</i> Sayısı (<i>f Number</i>)	10
2.1.12 Görüş alanı (<i>Field of View</i>).....	11
2.1.13 Optik çözünürlük	11
2.2 Optik Kusurlar.....	12
2.2.1 Küresel sapınç	12
2.2.2 Koma.....	12
2.2.3 Alan eğriliği (<i>Field Curvature</i>).....	13
2.2.4 Biçim bozulması (<i>Distortion</i>)	14
2.2.5 Astigmatizm	14
2.2.6 Renk kusuru (Chromatic Aberation)	15
2.3 Optik Sistem Çeşitleri.....	16
2.3.1 Yansıtıcı optik sistemler (<i>Reflective Optical Systems</i>).....	16
2.3.2 Kırıcı optik sistemler (<i>Refractive Optics Systems</i>)	17
2.3.3 Katadioptrik Sistemler (<i>Catadioptric</i>)	18
2.4 Optik Analiz İfadeleri.....	18
2.4.1 MTF (Modülasyon Transfer Fonksiyonu).....	19

2.4.2	Nokta diyagramı (<i>Spot Diagram</i>).....	19
2.4.3	Dalga cephesi hatası	19
2.4.4	Strehl oranı	20
2.4.5	Seidel diyagramı.....	20
2.4.6	Biçim bozulması	20
2.5	Atermalizasyon.....	22
2.5.1	Termomekanik atermalizasyon	23
2.5.2	Termooptik atermalizasyon.....	24
2.6	Analitik Işın İzleme.....	24
2.7	Değer Fonksiyonu (<i>Merit Function</i>).....	25
2.8	Kızılaltı Detektörler	26
2.8.1	Termal detektörler.....	26
2.8.2	Fotonik detektörler	26
2.9	Geniş Bant Kızılaltı Detektörler.....	27
2.10	Kızılaltı Optik Malzemeler	29
3	Materyal ve Yöntem.....	32
3.1	Akromatik Sistem	32
3.2	Atermal Sistem	34
3.3	Atermal Akromatik Sistem	35
3.4	Malzeme Seçimi	38
3.4.1	Gövde malzemesi seçimi	38
3.4.2	Optik malzeme seçimi	38
3.5	Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi	42
3.6	Konfigürasyon.....	44
3.7	Tasarım.....	46
3.7.1	Tasarım parametrelerinin sisteme girilmesi	46
3.7.2	Tasarımların yapılması.....	48
3.7.3	Birinci konfigürasyon	50
3.7.4	İkinci konfigürasyon.....	51
3.7.5	Üçüncü konfigürasyon	52
3.8	Optik Başarım ve Analizler	53
3.8.1	Nokta diyagramı analizleri	53

3.8.2 Modülasyon transfer fonksiyonu analizleri.....	55
3.9 Termal Başarım Değişimi	57
4 Tartışma ve sonuç	59
EKLER.....	63
Ek 1 ÇOKLU KONFIGÜRASYON MATRİSİ.....	64
EK 2 MTF ANALİZLERİ.....	65

SİMGELER DİZİNİ

$I(\nu, T), I(\lambda, T)$	Işıma enerjisi	Watt/cm ² ster
h	Planck sabiti	J.s
k	Boltzman sabiti	J/K
c_i	Işığın boşluktaki hızı	m/s
c_v	Işığın “v” ortamındaki hızı	m/s
c_1	Sabit	Watt m ⁻² µm ⁴
c_2	Sabit	µmK
b	Wien deplasman sabiti	mK
ν	Frekans	Hz
λ	Dalga boyu	
T	Sıcaklık	K
z	Airy disk	µm
C	Renk Kusuru	mm
c	Eğrilik	mm ⁻¹
f	Odak uzaklığı	mm
f_{eff}	Etkin odak uzaklığı	mm
f_{bfl}	Arka odak uzaklığı	mm
Δf	Odak uzaklığı değişimi	µm
α	Genleşme katsayısı	10 ⁻⁶ K ⁻¹
	Optik güç	m ⁻¹
E	Eğrilik	mm ⁻¹
P	Dispersiyon	
ν	Abbe numarası	
\mathcal{P}	Isıl aberasyon katsayısı	K ⁻¹
W	Çalışma uzaklığı	km
D_x, D_y	Detektör boyutları	mm
A_x, A_y	Görüş alanı	km
M_e	Değer fonksiyonu	
T_i	Hedef değer (Target)	mm
V_i	Gerçek değer	mm
W_i	Ağırlıklandırma çarpanı	
FoV	Görüş açısı (Field of View)	°
D^*	Standart alıcılık	cm√Hz/Watt (Jones)
k_r	Koniklik sabiti	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 İdeal durumda ısısal ışınım (Siyah Cisim Işınımı).....	1
Şekil 1.2 Elektromanyetik spektrum.....	3
Şekil 1.3 Atmosferik geçirgenlik	3
Şekil 1.4 Örnek KA resimler (Borniol vd. 2003).....	5
Şekil 2.1 Mercek tipleri.....	7
Şekil 2.2 Işığın ortam değiştirirken kırılması (refraction)	8
Şekil 2.3 Işığın madde ile etkileşerek kırınımına uğraması (diffraction).....	8
Şekil 2.4 Mercek parametreleri	10
Şekil 2.5 Airy disk (Smith 2000)	11
Şekil 2.6 Küresel kusur	12
Şekil 2.7 Kama	13
Şekil 2.8 Alan eğriliği	13
Şekil 2.9 Biçim bozulması	14
Şekil 2.10 Astigmatizm.....	15
Şekil 2.11 Renk kusuru	15
Şekil 2.12 Yansıtıcı optik sistem.....	17
Şekil 2.13 Kırıcı optik sistem.....	17
Şekil 2.14 Katadioptrik sistem	18
Şekil 2.15 Analiz ifadeleri örnek çizelgeleri.....	21
Şekil 2.16 Termomekanik atermalizasyon.....	23
Şekil 2.17 Kızılaltı dedektörler (Goldberg 2003).	28
Şekil 2.18 Yetersiz görüş alanı ile kaydedilmiş resim örneği.....	28
Şekil 2.19 Kızılaltı optik malzemeler	30
Şekil 3.1 Dispersiyona karşılık Abbe sayıları grafiği	34
Şekil 3.2 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği.....	37
Şekil 3.3 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği 2.....	39
Şekil 3.4 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği 3.....	40
Şekil 3.5 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği 4.....	41
Şekil 3.6 Sistem parametreleri	42
Şekil 3.7 Birinci konfigürasyon iki ve üç boyutlu objektif modeli.....	50

Şekil 3.8 İkinci konfigürasyon iki ve üç boyutlu objektif modeli.....	51
Şekil 3.9 Üçüncü konfigürasyon iki ve üç boyutlu objektif modeli	52
Şekil 3.10 İkinci konfigürasyon için nokta diyagramı örneği.....	54
Şekil 3.11 İkinci konfigürasyon için MTF diyagramı örneği	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

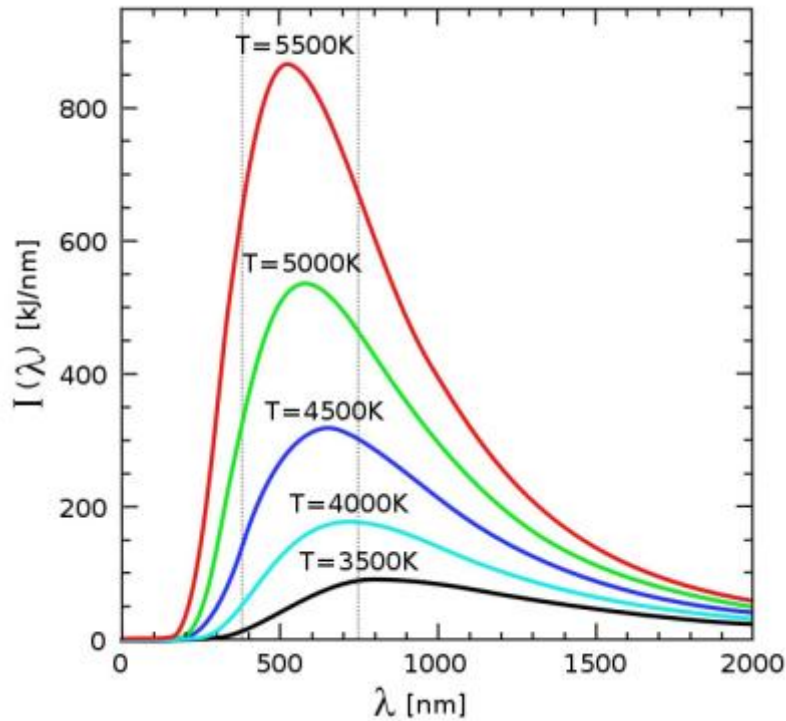
Çizelge 1.1 Kızılaltı alt bantların isimlendirilmesi (Rogalski and Chrzanowski 2002) ...	4
Çizelge 2.1 Kızılaltı Detektörler	27
Çizelge 2.2 Kullanılabilir geniş bant malzemeler (Uçar ve Kabak 2010)	30
Çizelge 3.1. Dispersiyona karşılık Abbe sayıları çizelgesi	33
Çizelge 3.2 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri (Uçar ve Kabak 2010)...	36
Çizelge 3.3 Standart detektör ölçüleri	43
Çizelge 3.4 Sistem Parametreleri	44
Çizelge 3.5 Tanımlanan algaboyları	47
Çizelge 3.6 Görüş alan noktaları	47
Çizelge 3.7 Malzeme sıralamasına göre değer fonksiyonları	48
Çizelge 3.8 Konik yüzeyleri belirlenmesi	49
Çizelge 3.9 Birinci konfigürasyon	50
Çizelge 3.10 İkinci konfigürasyon	51
Çizelge 3.11 Üçüncü konfigürasyon	52
Çizelge 3.12 Airy disk çapları	53
Çizelge 3.13 Odak düzleminde ki nokta çapları	54
Çizelge 3.14 MTF analiz sonuçları	56
Çizelge 3.15 Dalgaboyuna karşılık odak derinlikleri	57
Çizelge 3.16 Odak sapması	58

1 GİRİŞ

Sıcaklığı 0 K'nin üzerinde olan her cisim sıcaklığına bağlı olarak bir radyasyon yayar. Bu olay ısısal ışımaya (Thermal Radiation) olarak bilinir. Bu olay sonucunda elektromanyetik spektrumun geniş bir kısmında yayılım gerçekleşir. Planck'ın siyah-cisim ışınması kanununa göre bu ışımaya şiddeti,

$$I(\nu, T) d\nu = \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad 1.1$$

$I(\nu, T)$; T sıcaklığındaki siyah cismin birim yüzeyinden, birim zamanda, birim frekans ve birim katı açı başına saldırdığı enerji miktarı olup, h Planck sabitini, c ışık hızını, k Boltzmann sabitini, ν elektromanyetik dalganın frekansını, ve T kelvin cinsinden sıcaklığı temsil eder. Bazı sıcaklıklar için siyah cisim eğrileri Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 İdeal durumda ısısal ışımaya (Siyah Cisim Işınması)
(https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/14_p2.html 2010)

Frekans yerine dalga boyu ile çalışmak istenirse,

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad 1.2$$

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

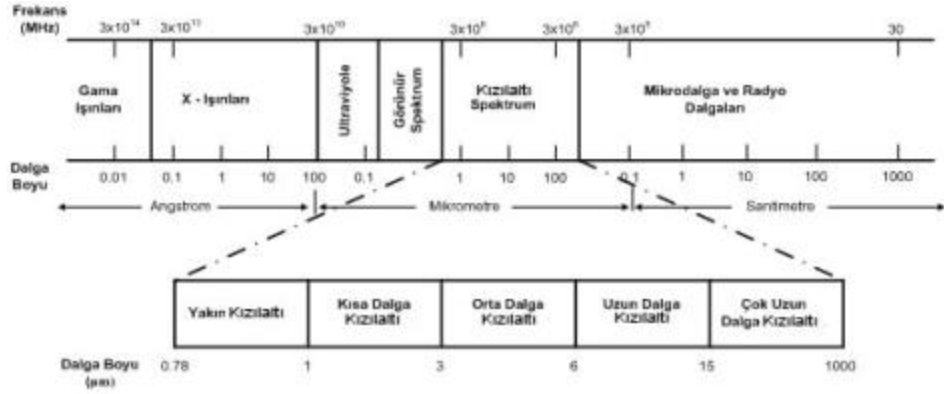
$$I(\lambda, T) = c_1 \left[\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad 1.4$$

denklem 1.1 ve 1.2 kullanılarak denklem 1.3 elde edilir (Dereniak ve Boreman 1996). Denklem 1.3 deki sabitler yerlerine konduğunda 1.4 elde edilir. Burada λ ışığın dalga boyu, c_1 ve c_2 ise sabitlerdir. Spektral radyasyon eğrisinin önemli karakteristik özelliklerinden birisi, artan sıcaklıkla tepe noktasının düşük dalgalılarına kaymasıdır. Bilinen bir sıcaklık için tepe noktası olan λ_m dalgalıyunu bulabilmek için denklem 1.4'ün türevi sıfıra eşitlenirse,

$$T_m = \frac{b}{\lambda_m} \quad 1.5$$

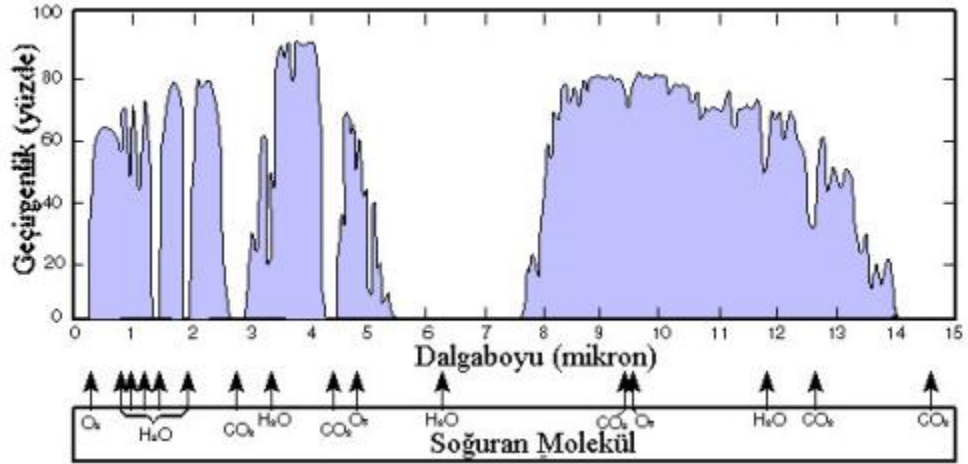
bulunur. Burada b Wien sabitidir (Jacobs 1996).

Yüksek sıcaklıktaki cisimlerin yaptığı ışınımın bir kısmı (< 800 nm) çıplak gözle görülebilirken görece soğuk cisimlerden yayılan ışınım çıplak gözle görülemez. Şekil 1.2 incelenirse görece soğuk cisimlerin yaptığı ısısal ışınımın yoğunlukla elektromanyetik spektrumun, $0.76 - 1000$ μm arasında yer alan kızılaltı bölgesinde olduğu görülebilir. Gerekli optik elemanlar ve uygun bir algılayıcı kullanılarak görece sıcak cisimlerden gelen bu ışınımın algılanmasına kızılaltı algılama denir.



Şekil 1.2 Elektromanyetik spektrum

Kızılaltı spektrum en temelde atmosferik geçirgenlik (Şekil 1.3) ve detektör algılama hassasiyetleri olmak üzere bazı teknik nedenlerden ötürü alt bantlara bölünmüştür. Literatürde farklılıklar göstermekle beraber genel bir sınıflandırma Çizelge 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.3 Atmosferik geçirgenlik

(http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window_2010)

Termal görüntülemelerde en çok kullanılan spektral bölgeler orta dalga kızılaltı (ODKA) ve uzun dalga kızılaltı (UDKA) bantlarıdır. Bu iki bandın birbirleri üzerinde avantajlı ve dezavantajlı yönleri vardır. ODKA’nın merkez dalga boyu olan 4µm için denklem 1.5’ten $T_m=724.4$ K (451 °C) ve UDKA’nın merkezi dalga boyu olan 10µm için ise

$T_m=289.7$ K (16.7 °C)' dir . Bu durumda jet motoru, yanan bir cisim gibi sıcak nesnelere görüntülemek için ODKA daha uygun iken UDKA ile bina, ağaç gibi görece soğuk cisimleri görüntülemek daha uygun olacaktır.

Çizelge 1.1 Kızılaltı alt bantların isimlendirilmesi (Rogalski ve Chrzanowski 2002)

KIZILALTI ALT BANT	KISALTMA	SINIRLAR (μ m)
Yakın Dalga Kızılaltı (Near Infrared)	YKA (NIR)	0.75-1
Kısa Dalga Kızılaltı (Short Wavelength Infrared)	KDKA (SWIR)	1 - 3
Orta Dalga Kızılaltı (Medium Wavelength Infrared)	ODKA (MWIR)	3 - 5
Uzun Dalga Kızılaltı (Long Wavelength Infrared)	UDKA (LWIR)	8 - 12
Çok Uzun Dalga Kızılaltı (Very Long Wavelength Infrared)	ÇUDKA (VLWIR)	15-1000

Aynı nedenden ODKA'da çevresine göre sıcak cisimler barındıran sahnelerde daha soğuk olan arka fon daha zor seçilebilirken UDKA'da bu ayırım daha belirgindir. Şekil 1.4 incelenirse 2 – 3.1 μ m dalgaboyunda alınan görüntüde ısı kaynağının (çakmak) 3.1 – 5.2 μ m aralığında alınana göre çok daha parlak olduğu görülebilir bu durum daha büyük dalgaboyu aralıklarında daha belirgin olacaktır. Şekil 1.3 incelendiğinde ODKA'nın UDKA'ya oranla atmosferde daha az soğurulduğu söylenebilir fakat farklı mevsim, farklı iklim ve atmosferdeki aerosol miktarına göre bu grafik değişiklikler göstermektedir. Ayrıca ODKA, UDKA'ya göre küçük dalgaboyuna sahip olduğu için yapılacak sistemlerin optik çözünürlüğü daha yüksek olacaktır bu durum Şekil 1.4'te gözlenebilir. 2 – 3 μ m dalga boyunda alınan görüntüler 3 – 5 μ m dalgaboyunda alınanlara göre daha yüksek çözünürlüklüdür.

Hava şartlarına göre (yağmur, kar, sis, vb) bazı durumlarda ODKA daha yüksek performans gösterirken bazen UDKA daha avantajlıdır. Bu durum tamamıyla hangi dalgaboylarının atmosferde daha çok veya daha az soğurulduğuyla ilişkilidir. Öte yandan optiksel telsizler atmosferin kızılaltı ışınımına karşı geçirgenliğinin en yüksek olduğu 3.99 ile 4.02 μ m aralığında çalışmaktadır (Özer 2006).



Şekil 1.4 Örnek KA resimler (Borniol vd. 2003).

a. 2-3.1 μm b. 3.1-5.2 μm

İki bandın üstün özelliklerini birleştirmenin en iyi yöntemlerinden biri geniş bant (broadband) kızılaltı detektör kullanmaktır (Uçar ve Özkan 2010). Kamufle edilmiş hedefleri algılama hassasiyetinin artırılması, sahte ve gerçek hedeflerin birbirlerinden ayrılması, tüm hava şartlarında, mevsimlerde çalışması ve uzaktan daha hassas sıcaklık ölçümlerinin yapılabilmesine olanak sağlaması geniş bant kızılaltı görüntüleyici yapılmasının temel sebeplerindendir. Bu nedenlerden hareketle günümüzde birçok özel firma ve üniversite geniş bant detektör geliştirme çalışmaları yürütmektedir (Eker vd. 2008, Kaldırım vd. 2008). Geniş bant detektörlerin geliştirilmesinin doğal bir sonucu olarak, yüksek başarımlı geniş bant optik ve kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır (Rahmlow vd. 2008).

Geniş bant optik sistem tasarlamayla ilgili temel problem, kullanılan mercek malzemelerinin kırılma indislerinin farklı frekanslar altında (bant boyunca) değişerek çok büyük miktarda renk hatası ortaya çıkmasıdır. Bu problem nedeniyle geçmişteki geniş bant sistemler yansıtıcı optik elemanlar kullanarak yapılmıştır ve bu sayede renk kusurları hiç oluşmamıştır. Yansıtıcı sistemlerin böyle bir avantajı olmasının yanı sıra dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi geniş görüş açılı sistemler yapılamamasıdır. Diğer önemli bir neden ise merkezi kararma etkisi yüzünden düşen geçirgenlik ve sistemin modülasyon transfer fonksiyonunun (MTF) UDKA bandında sınırlanmasıdır. Bu şartlar altında geniş bantta çalışması istenen yüksek çözünürlüklü ve

geniş görüş açılı bir sistemin kırıcı optik elemanlar ile yapılması gerektiği açıktır (Cooper 1989).

Tasarımın aynı zamanda Türkiye şartlarında yaşanabilen zorlu hava koşullarını temsil eden -35°C ile $+50^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklar arasında odaklı kalarak başarımını kaybetmeyecek şekilde yapılacaktır. Genelde atermalizasyon sıcaklık sensörleri vasıtasıyla sürülen servo motorlar ile sürekli kararlı bir odaklama yapabilmek için konumlandırılan hareketli mercek gruplarının bulunduğu aktif bir sistemi gerektirir. Bu tip sürücüler ve kontrol elektronikleri sistem karmaşıklığını ve ağırlığını son derece arttırmaktadır. Aktif atermalizasyonun sisteme getirdiği yükten kurtulmak, çok daha basit ve ucuz bir sistem tasarlayabilmek için bu çalışmada pasif atermalizasyon yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntemde herhangi dış mekanik ayarlama gerekmeden, farklı ısıl karakteristik gösteren malzemelerin optik güçleri uygun şekilde seçilerek, birbirlerinin yarattığı etkileri ortadan kaldırması sağlanır (Simmons vd. 2004).

Bu tez çalışmasında ilk olarak kuramsal temellere yer verilecektir. Gerekli ön bilgiler verildikten sonra pasif atermalizasyon yöntemi ve buna bağlı olarak malzeme seçimi ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Ardından sistem gereksinimleri ışığında konfigürasyon ve optik tasarıma yer verilecektir. Son olarak en iyileme işlemleri yapılmış tasarımın başarım kriterleri ve analizler üzerinden değerlendirilmesi yapılacaktır.

2 KURAMSAL TEMELLER

2.1 Geometrik Optik ve Bazı Kavramlar

Bu bölümde optiksel bir sistem incelenirken kullanılan elemanlar, terimler, denklemler ve benzeri ifadelerin tanımı yapılacaktır.

2.1.1 Mercekler

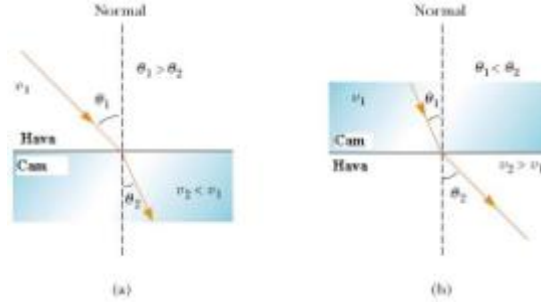
Bir optik sistem tasarımı yapılırken amaca uygun değişik tipte mercekler kullanılabilir. Mercek tiplerinin isimlendirilmesi yüzey şekillerine göre yapılır. İki yüzeyi dış bükey olan merceklere *Bikonveks*, iç bükey olanlara *Bikonkav*, bir yüzeyi iç bükey bir yüzeyi dış bükey olanlara *Menisküs* (Konveks-Konkav veya Konkav-Konveks), bir yüzeyi düzlem olanlara ise Düzlem-Konkav veya Düzlem-Konveks denir. Örnek mercek şekilleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Mercek tipleri

2.1.2 Kırılma (Refraction)

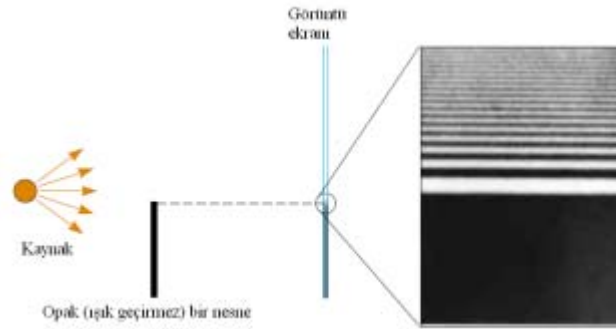
İlerleyen dalgaların ilerledikleri ortamdan başka bir ortama geçmeleri sırasında bu ortamla etkileşerek yolunu değiştirmesi veya kırılması olayıdır. Örneğin bir ışık ışınının bir mercek yüzeyine geldiğinde oluşan bir olaydır (Smith 2000).



Şekil 2.2 Işığın ortam değiştirirken kırılması (refraction)

2.1.3 Kırınım (Diffraction)

Düzlem ışık dalgaları geçirgen olmayan bariyerlerden oluşan dar bir aralıktan geçerken aralık sanki nokta ışık kaynağı gibi davranır. Perdede aydınlık ve karanlık bölgeler oluşur. Bu olay kırınım olarak bilinir ve ancak ışığın dalga modeliyle açıklanabilir.



Şekil 2.3 Işığın madde ile etkileşerek kırınımına uğraması (diffraction)

2.1.4 Kırılma indisi

Bir maddenin kırılma indisi, o madde içinde yol alan ışığın, boşlukta (vakum altında) yol alan ışığa göre ne kadar yavaş ilerlediğini gösteren bir katsayıdır. Genellikle “n” sembolü ile gösterilir.

$$n = \frac{c_v}{c_i} \quad 2.1$$

Denklemdaki c_v ışığın bir ortam içindeki hızı ve c_i ışığın boşluktaki hızıdır.

2.1.5 Odak noktası (*Focal Point*)

Kendi kendine ışık yayan veya dışarıdan aydınlatılan bir noktasal cismin olduğu varsayılan bir sistemde optik araçlar yardımı ile küresel dalgaların bir kısmının ıraksandığı veya yakınsandığı noktaya ışınlar demetinin odak noktası denir f ile gösterilir (Hecht 2005).

2.1.6 Ana noktalar (*Principal Points*)

Mercek düzlemine dik gelen paralel ışın demetine ait ışınların ve merceğe girip çıktıktan sonra kırılıp odaklanmış ışınların kesişimlerinin oluşturduğu sanal noktalardır (Şekil 2.4, P1 ve P2).

2.1.7 Etkin odak uzaklığı (*Effective Focal Length*)

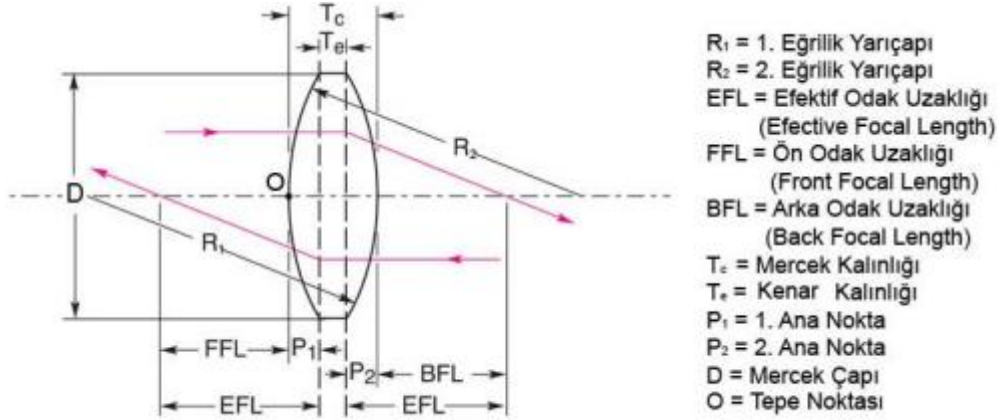
Asal eksen üzerindeki ana nokta ile odak noktası arasında kalan mesafedir (Şekil 2.4, EFL). Kalınlığı “ t ”, kırılma indisi “ n ” ve iki yüzeyine ilişkin eğrilik yarıçapları “ R_1 , R_2 ”olan bir mercek için odak uzaklığı;

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{t(n - 1)}{R_1 R_2 n} \right] \quad 2.2$$

şeklinde verilir (Smith, 2000).

2.1.8 Arka odak uzaklığı (*Back Focal Length*)

Sistemde kullanılan son optik yüzeyin tepe noktasından (Şekil 2.4, O) odak noktasına kadar olan uzalıktır (Şekil 2.4, BFL).



Şekil 2.4 Mercek parametreleri

2.1.9 Alan sınırlayıcı (*Field Stop*)

Cismin sistemle görüntülenebilen kısmının boyutunu veya açısal genişliğini sınırlayan elemandır, fotoğraf makinelerinde diyaframa karşılık gelir (Hecht 2005).

2.1.10 Optik açıklık (*Clear Aperture*)

Durdurucunun veya bağlantı arabirimlerinin, sisteme girmesine izin verdiği ışık konisinin en geniş olduğu noktadaki çaptır. En genelde ışınları ilk karşılayan yüzeyin çapıdır (Hecht 2005).

2.1.11 f Sayısı (*f Number*)

$f/\#$ şeklinde de gösterilen f sayısı, odak uzaklığının, mercek açıklığına oranıdır. Optik bir sistemin ışık alma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Görüntüdeki aydınlanma f sayısının karesiyle ters orantılıdır (Smith, 2000).

2.1.12 Görüş alanı (*Field of View*)

Bir Optik sistemde her hangi bir anda sistemi hareket ettirmeden görülebilen alanın açı cinsinden ölçüsüdür.

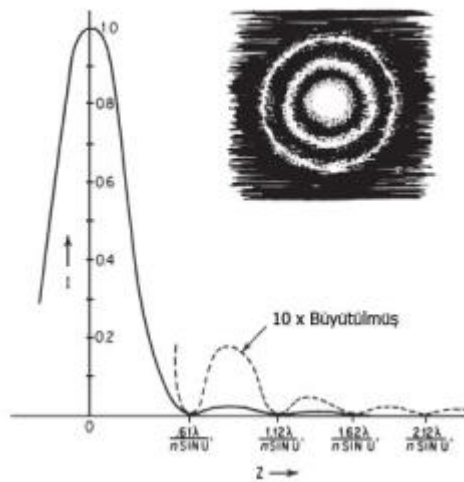
2.1.13 Optik çözünürlük

Optik bir sistemin sonlu bir giriş açıklığının olması kırınım desenin (Bölüm 2.1.3) gözlenmesine neden olur. Bu durum optik sistemin başarımını sınırlayan bir unsur olarak karşımıza çıkar. Noktasal bir ışık kaynağının görüntüsü, airy disk denen parlak bir merkezi nokta ve çevresinde giderek parlaklığı azalan halkalardan oluşur. Enerjinin %84'ü merkezde (airy disk içerisinde), %91'i merkez ve birinci halkada dağılır (Smith 2000).

Sistemde bir yerine iki noktasal ışık kaynağı kullanıldığını düşünelim. Kaynaklar arası mesafenin yeterli olmaması durumunda girişim halkaları üst üste gelir ve iki nokta birbirinden ayırt edilemez. İki noktanın ayrı ayrı algılanabilmesi için aralarındaki mesafenin en az airy disk kadar olması gerekir. Airy disk (z), F sayısı ($f/\#$) ve kullanılan ışığın dalga boyu ile orantılıdır (Smith 2000).

$$z = 1.22\lambda(f/\#)$$

2.3



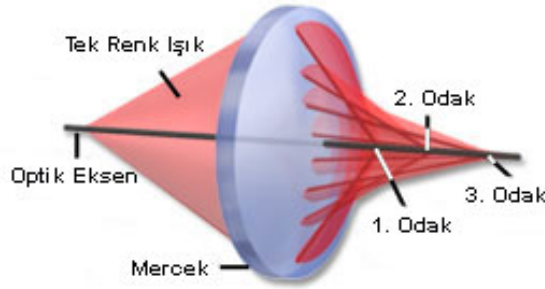
Şekil 2.5 Airy disk (Smith 2000)

2.2 Optik Kusurlar

Bir noktadan çıkan ışınların yakınsak bir optik sistemden geçtikten sonra görüntüyü oluşturmak için bir noktada odaklanması gerekir. Optik kusurlar bir noktadan çıkan ışınların optik sistemden geçtikten sonra bir noktada odaklanmamasına neden olur. Kusur, oluşan görüntünün gerçek cisimden ne kadar farklı olduğunun bir ölçüsüdür. Optik kusurlar iki ana gruba ayrılırlar: ışığın dalga boyundan bağımsız olarak sistemin geometrisinden kaynaklanan kusurlara tekrenk kusurları, kırılma indisinin frekansa bağlı olmasından kaynaklanan kusurlara renk kusurları denir.

2.2.1 Küresel sapınç

Yakıneksenel bölgeden uzaklaştıkça optik sistemin odak noktasının değişmesidir. Yakınsak sistemlerde yakıneksenel bölgeden uzaklaştıkça odak mesafesi kısalır, ıraksak sistemlerde ise odak mesafesi uzar. Kısacası, eksene yakın olmayan ışınlar için odak uzaklığının sistem açıklığına bağlı olarak değişiminin bir sonucudur (Şekil 2.6).

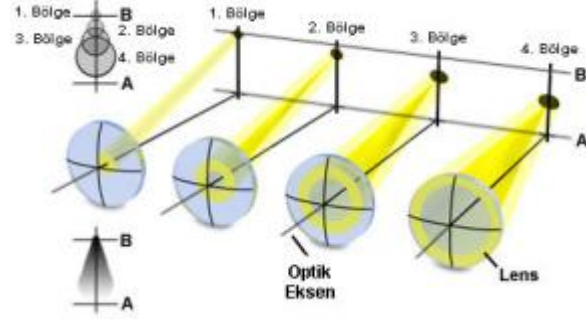


Şekil 2.6 Küresel kusur

2.2.2 Koma

Bir merceğin asal ekseninin uzak bölgelerinden geçen ışınlar için etkin odak uzaklıkları ve dolayısıyla da enine büyütme farklı olur. Görüntü noktası optik eksenindeyse bunun pek fazla bir etkisi olmaz. Fakat ışın demeti eğik olduğunda ve görüntü noktası da

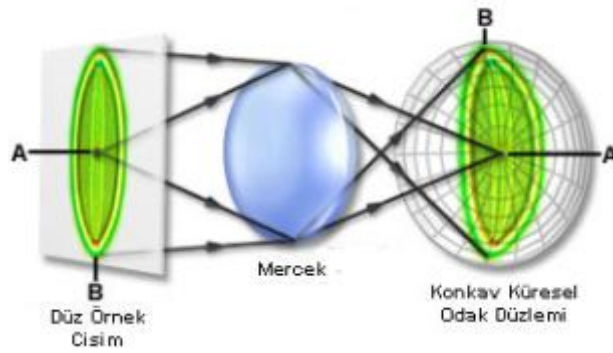
eksenden uzakta oluştuğunda bu bozulma ortaya çıkar. Bir noktanın görüntüsü odak düzleminde içeri doğru bir kama Şeklinde belirir. Biçimi nedeniyle bu Şekilde adlandırılmıştır (Milton 1995) (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Kama

2.2.3 Alan eğriliği (*Field Curvature*)

Merceğin asal eksenine dik bir cismin görüntüsü ancak yakıneksenel bölgede yaklaşık bir düzlem gibi olacaktır. Kısaca eksenden uzaklaşınca grntnin oluştuğu görüntü düzlemi bir düzlem değil bir küre yüzeyi Şeklinde olacaktır.

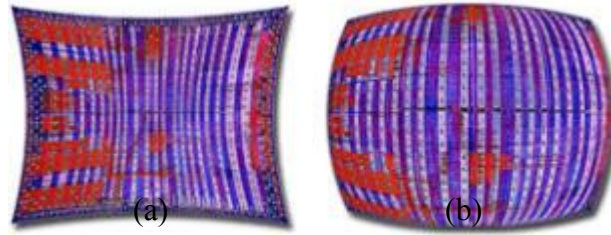


Şekil 2.8 Alan eğriliği

2.2.4 Biçim bozulması (*Distortion*)

Merceğin farklı bölgelerinin farklı odak uzaklıkları ve sonucunda farklı büyütmeleme sahip olması biçim bozulmasına neden olur. Her görüntü noktasının merkezden çapsal olarak dışarı ya da içeri kayması durumudur. Basitçe bir Y noktasının gerçekte olması gereken konum ($Y_{referans}$) ile optik sistemden geçtikten sonra bulunduğu konumun ($Y_{gerçek}$) arasındaki farktır (Hill 2007).

$$Biçim\ bozulması(\%) = \frac{Y_{gerçek} - Y_{referans}}{Y_{referans}} \times 100 \quad 2.4$$

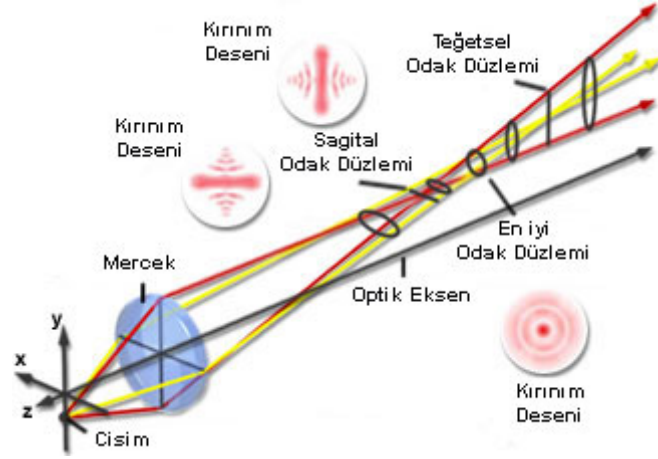


Şekil 2.9 Biçim bozulması

a. iğne yastığı (*Pincushion*) b. fıçı (*Barrel*) biçimli bozulma

2.2.5 Astigmatizm

Bir cisimin konumu merceğin asal eksenini üzerinde değilse, gelen ışınlar konisi merceğe göre asimetrik olacaktır. Sonuç olarak optik eksene dik olan teğetsel (meridyonel) ve sagittal ışınların optik yolları farklı olduğu için teğetsel ve sagittal ışınlar farklı noktalarda odaklanacaktır (Milton 1995).



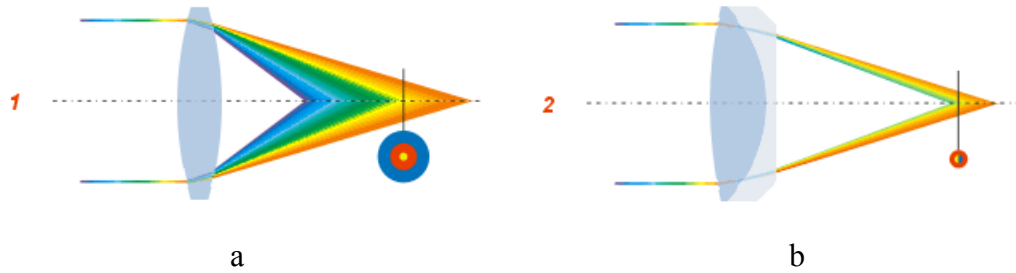
Şekil 2.10 Astigmatizm

2.2.6 Renk kusuru (Chromatic Aberation)

Renk kusuru bir merceğin ışığın farklı dalga boylarını aynı odak düzlemi üzerinde odaklayamaması sonucu oluşur. Bu olayın temel nedeni ışın çizim bağıntısının ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$), dalga boyu ile değişen kırılma indislerinin bir fonksiyonu olmasından kaynaklanır. Renk kusur katsayısı (Li vd. 2008),

$$C = \frac{n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}}{n_{\lambda} - 1} \quad 2.5$$

n_{λ} merkez dalgaboyundaki kırılma indisi, $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$, $\lambda_1 - \lambda_2$ dalgaboyu aralığınca kırılma indisi değişimi ile ifade edilir.



Şekil 2.11 Renk kusuru

Renk kusuru malzemenin cinsine ve odak uzaklığına bağlı olarak değişir. Odak uzaklıkları ve renk kusur katsayıları farklı iki malzeme eşleştirilerek (akromat çift), Şekil 2.11’de gösterildiği gibi, bu etki çok düşük seviyelere indirilebilir (Jenkis ve White 1951).

$$f_1 C_1 + f_2 C_2 = 0 \quad 2.6$$

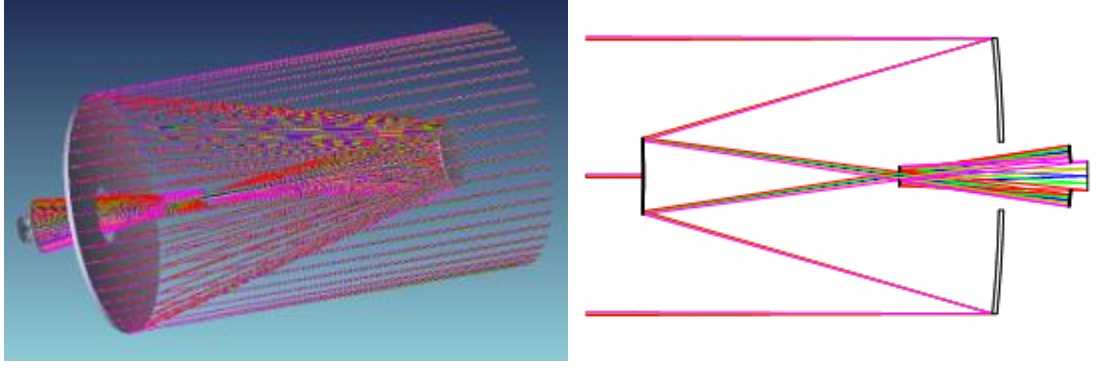
f_1 ve f_2 odak uzaklığı ve C_1 ve C_2 renk kusur katsayısı olmak üzere, denklem 2.6 sağlanabilirse üzerinde renk hatası bulunmayan bir optik sistem tasarlanmış olur. Renk hatası eksenel ve yanal olmak üzere ikiye ayrılır (Hill 2007).

2.3 Optik Sistem Çeşitleri

Optik sistemler, tasarımları yapılırken kullanılan elemanlara ve amaca göre değişiklik gösterir. Üç temel optik sistem çeşidi vardır. Bunlar yansıtıcı, kırıcı ve son olarak hem yansıtıcı hem kırıcı elemanlar içeren katadioptrik sistemlerdir.

2.3.1 Yansıtıcı optik sistemler (*Reflective Optical Systems*)

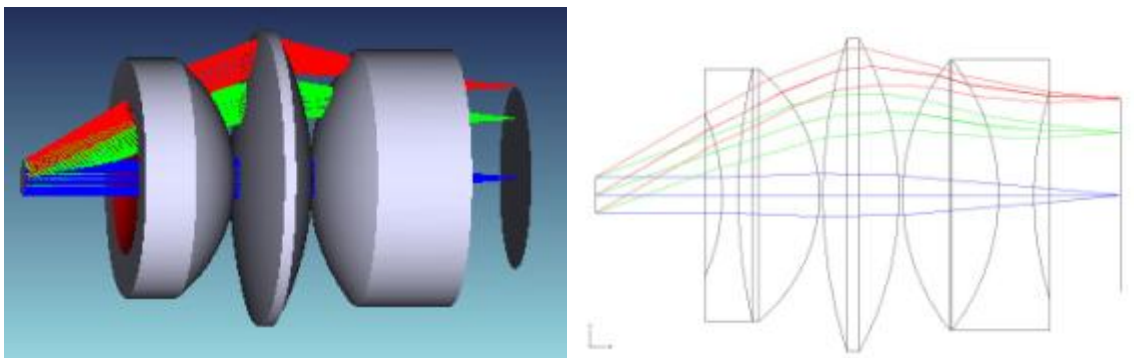
Ayna kullanarak ışığın sadece yansıtılarak yolunun (optik yolun) değiştirilmesi ile oluşturulan sistemlerdir. Bu tip sistemlerde ışık farklı bir ortamdan geçmediği sürekli hava ortamında bulunduğu için renk hataları oluşmaz. Yansıtıcı optik sistemlerin bir diğer avantajı ise sistem uzunluğunun odak uzaklığından kısa olacak şekilde tasarlanabilmesidir. Dezavantajı ise aynaların konumları nedeni ile bir birlerini perdelemeleridir. Aynalı sistemlerde oluşan enerji kaybı optik açıklık artırılarak dengelenebilir (sisteme alınan toplam enerji artırılarak). Diğer bir dezavantajı ise az sayıda optik yüzey kullanıldığı için sistemde oluşan optik kusurların azaltılmasının zor olmasıdır. Şekil 2.12’de f/15 küresel aynalı Cassegrain teleskop sisteminin modeli verilmiştir (Anonymous 2007).



Şekil 2.12 Yansıtıcı optik sistem

2.3.2 Kırıcı optik sistemler (*Refractive Optics Systems*)

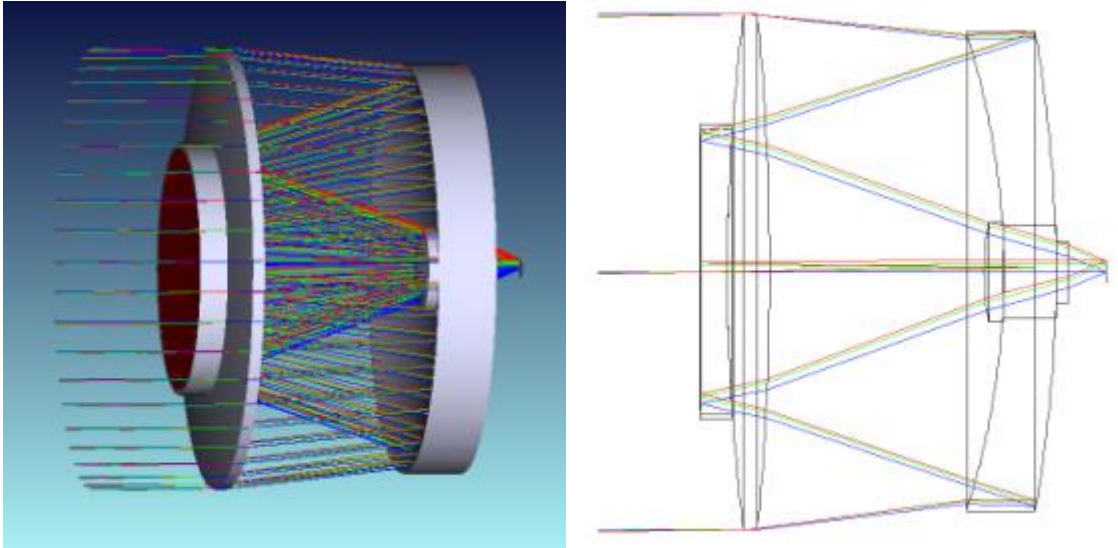
Çalışılan tayfa göre ışığa karşı şeffaf olan mercek ve prizma gibi malzemeler kullanılarak oluşturulan sistemlere kırıcı optik sistem denir. Avantajı, çok geniş görüş açılı sistemlerin yapılabilmesi ve optik kusurlardan tamamen arınmış sistemler tasarlanabilmesidir. Dezavantajı ise lazer gibi tek dalga boylu ışık kullanıldığı durumlar dışında renk hatalarının oluşmasıdır. Diğer bir dezavantajı ise ışık ışınlarının merceklerin yüzeylerinden yansması ve malzeme içerisinde soğurulması nedeni ile bir miktar enerjinin kaybolmasıdır. Yansıma nedeni ile kaybedilen ışık miktarını azaltmak için yansıtmazlık kaplamaları (*Anti-Reflection*) kullanılabilir. Örnek bir kırıcı sistem Şekil 2.13'te verilmiştir. Şekil 2.13'te 25mm odak uzaklığı olan bir tüfek nişangâhının iki ve üç boyutlu modelleri verilmiştir (Anonymous 2007).



Şekil 2.13 Kırıcı optik sistem

2.3.3 Katadioptrik Sistemler (*Catadioptric*)

Hem ayna hem de mercek kullanılarak oluşturulan sistemlere denir. Yansıtıcı ve kırıcı optik sistemlerin avantajlarından yararlanmak ve aynı zamanda sistemde oluşan optik kusurları en alt seviyelere indirmek için kullanılır. Katadioptrik sistemler her iki sistemin avantajlı yönlerini almanın yanı sıra dezavantajlarını da alırlar. Sonuç olarak katadioptrik sistemlerde aynalı sistemlerde oluşan kararma etkisi ile beraber kırıcı sistemlerde oluşan renk hataları da oluşmaktadır. Öte yandan daha dar alanlara sıkıştırılmış optik kalitesi son derece yüksek sistemler tasarlanabilmektedir. Bir giriş ve iki düzeltici (corrector) olmak üzere üç mercek ve bir ayna kullanılarak tasarlanan F1.25 Mangin-Cassegrain teleskop modeli Şekil 2.14’te verilmiştir (Anonymous 2007).



Şekil 2.14 Katadioptrik sistem

2.4 Optik Analiz İfadeleri

Optik sistemlerin başarımlarını test edebilmek için bir takım analiz ifadeleri kullanılır. Biçim bozulması ve Seidel diyagramı gibi bazı analiz ifadeleri direkt olarak optik bozulmaların bir göstergesiyken, modülasyon transfer fonksiyonu ve nokta diyagramı gibi analizler sistemdeki kusurların tamamının bir arada incelenmesine olanak tanır.

2.4.1 MTF (Modülasyon Transfer Fonksiyonu)

MTF, bir görüntüleme sisteminin farklı uzaysal frekanslar için verdiği sinüsoit tepkinin büyüklüğüdür. Diğer bir deyişle yan yana bir siyah bir beyaz çizginin birbirinden ayırt edilebilme gücü olarak da ifade edilebilir. Milimetre başına çizgi çifti (devir) ya da miliradyan başına çizgi çifti olarak verilebilir. Kontrastın bir ölçüsü olduğu için doğrudan sistem kalitesini belirleyen bir analizdir. Örnek bir MTF grafiği Şekil 2.15.a'da verilmiştir.

2.4.2 Nokta diyagramı (*Spot Diagram*)

Tek boyutlu bir noktadan gelen ışınlar optik sistemden geçtikten sonra tek boyutlu bir nokta yerine iki boyutlu bir lekeye dönüşmektedir. Bu lekenin şekli ve geometrik çapı sistemin kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Yarı iletken ışık algılayıcı detektörlerin kullanıldığı sistemlerde görüntü kalitesinin iyi bir ölçüsüdür. Örnek bir nokta diyagramı Şekil 2.15.b'de verilmiştir (Anonymous 2010).

2.4.3 Dalga cephesi hatası

Işık doğası gereği dalgalar halinde (su dalgaları gibi) yayılır. Bu dalgaların tepe ve çukur noktalarının bir çizgi yardımıyla birleştirilmesi (aynı hizaya getirilmesi) sonucu dalga cephesi oluşur. Hedeften yayılan ışınların kusursuz bir dalga cepheleri vardır. Tabi ki optik sistemden geçtikten sonra bir dalga cephesinin mükemmel kalmasını bekleyemeyiz. Teorik olarak oluşması beklenen dalga cephesi ile gerçekte oluşan dalga cephesi arasındaki fark bize dalga cephesi hatasını verir. Örnek bir dalga cephesi hata şeması Şekil 2.15.c'de verilmiştir (Anonymous 2010).

2.4.4 Strehl oranı

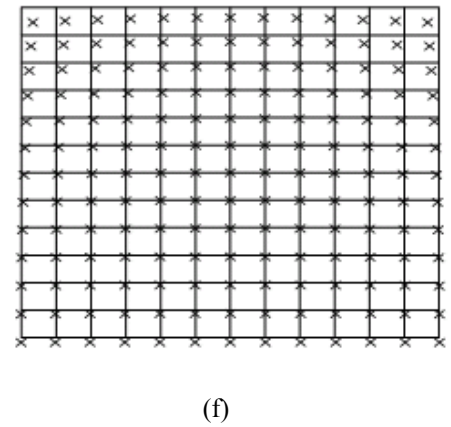
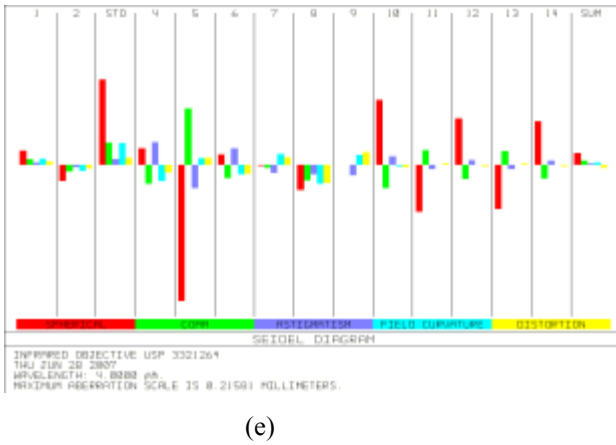
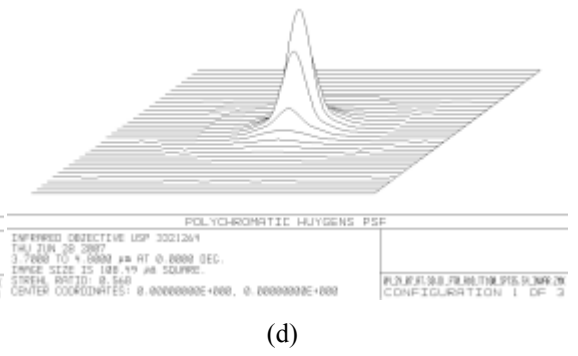
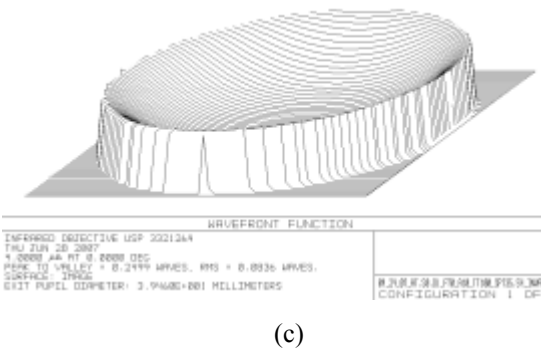
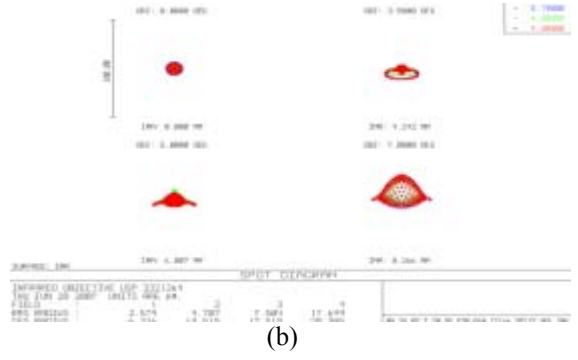
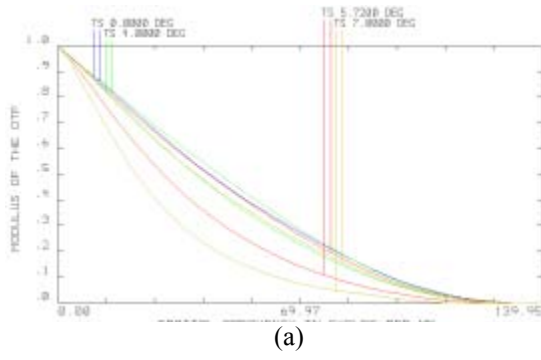
Noktasal bir ışık kaynağından yayılan ışınları, optik bir sistemden geçtikten sonra odaklandığı noktada, merkezden dışarıya doğru ışık yoğunluğu azalan bir nokta olarak görürüz (Gaussian biçimli). Strehl oranı bir nokta kaynağın oluşturduğu görüntü için, görüntü düzleminde oluşan ışın yoğunluğu ile ideal bir sistemde oluşacak ışın yoğunluğunun bir birine oranıdır. Örnek bir strehl oranı grafiği Şekil 2.15.d'de verilmiştir (Anonymous 2010).

2.4.5 Seidel diyagramı

Bölüm 2.2'de bahsedilen kusurların bir sistemde her yüzey için pozitif ve negatif olmak üzere, ne kadar olduğunu gösteren ve sonunda sistemdeki toplam kusuru gösteren bir şemadır. Kısaca tüm optik kusurları bir arada toplu olarak görülüp değerlendirilebileceği bir şemadır. Örnek bir Seidel diyagramı Şekil 2.15.e'de verilmiştir (Anonymous 2010).

2.4.6 Biçim bozulması

Bölüm 2.2.4'te anlatılan biçim bozulmasını gösteren bir şemadır. Şekil 2.15.f incelenirse her hücre köşesi gerçekte görüntünün olduğu noktayı, çarpı işaretleri ise optik sistemden geçtikten sonra noktaların geldiği konumları göstermektedir. Görüntüde oluşan noktaların içeriye doğru kaydığı (artı bozulması) görülmektedir. Bu kaymanın büyüklüğü biçim bozulması olarak ifade edilir. Biçim bozulmasının diğer bozulmalardan farkı görüntü alma işlemi sonrası giderilebilmesidir. Bu nedenle bu bozulmanın ölçülmesi görüntü kalitesinin artırılması konusunda kritik bir konudur (Anonymous 2010).



Şekil 2.15 Analiz ifadeleri örnek çizelgeleri

a. MTF b. Nokta diyagramı c. Dalga cephesi hatası d. Strehl oranı e. Seidel diyagramı f. Biçim bozulması

2.5 Atermalizasyon

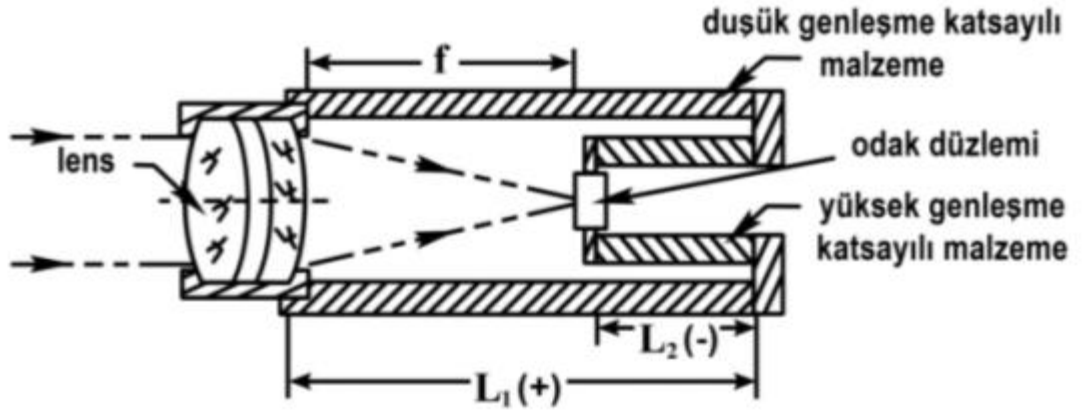
Spektrum ve mercek tasarımında kullanılan yüksek kırılma indisli malzemeler kızılaltı bantta sıcaklık değişimlerine karşı oldukça duyarlıdırlar. Atermalizasyon, sıcaklık değişiminin sistem üzerindeki bozucu etkilerinin azaltılması olarak tanımlanabilir. Sözü edilen sıcaklık etkileri beş ana grupta toplanabilir;

- a. Tüm tekrenk kusurlarının nedeni olan optik yol farklarının değişmesi;
 - Optik malzemelerin ısısasal genleşmesi,
 - Kırılma indisinin sıcaklıkla değişmesi,
 - Mekanik elemanların ısısasal genleşmesi,
 - Mekanik elemanların optik elemanlar üzerinde baskı oluşturması,
- b. Optik malzemelerin mekanik elemanlara göre düşük ısı iletkenliklerinin olması nedeniyle, malzeme içi ısıl dengenin yavaş kurulması,
- c. Sistem çevresindeki ortamın (hava, su) yoğunluğunun değişmesi,
- d. Optik malzemelerin geçirgenliklerinin değişmesi ve
- e. Optik kusurları gidermek için yapılan düzeltmelerin değişmesi.

Bir optik sistemde oluşacak ısıl bozulma bu etkilerin toplamı olarak ortaya çıkacaktır. Sistemde oluşan bozulma homojen (zamandan bağımsız düzenli bozulmalar) ve heterojen (zamanla değişen düzensiz bozulmalar) şeklinde sınıflanabilir. Homojen bozulmalar odak düzleminin pozisyonu kaydırılarak düzeltilebilecek sapmalara (*defocus*) neden olurken heterojen bozulmalar görüntünün tamamen bozulmasına neden olur. Sistem bazında ele alındıklarında homojen bozulmalar heterojen bozulmalara göre oldukça baskındır. Sistemdeki ısıl bozulmalar Termomekanik (aktif) ve Termooptik (pasif) atermalizasyon olarak isimlendirilen iki yöntem ile azaltılabilir (Gibbons 1976).

2.5.1 Termomekanik atermalizasyon

Optik sistemde kullanılacak mekanik elemanların malzemelerinin genleşme ve büzülme oranlarının birbiri ile uygun şekilde ayarlanması sıcaklık etkilerinin azaltılmasını sağlayabilir. Benzer bir sistem Şekil 2.16’da gösterilmiştir. İç içe konan iki metal borunun malzemeleri (genleşme katsayıları) uygun şekilde ayarlanırsa “ f ” mesafesi sabit kalacaktır (Anonymous 1983, Yoder 2006).



Şekil 2.16 Termomekanik atermalizasyon

$$\Delta f = \alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2 \quad 2.7$$

Burada “ Δf ” arka odak uzaklığı, “ L_1 ” dışta kullanılan metal borunun uzunluğu, “ α_1 ” ise genleşme katsayısı, aynı şekilde “ L_2 ” içte kullanılan metal borunun uzunluğu, “ α_2 ” ise genleşme katsayısıdır.

Sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem ise odak düzleminin pozisyonunu, sıcaklığın yol açtığı etkilere karşı hareket üretecek bir eyleyici (pnömatik, piyezoelektrik, elektrik, vs) kullanarak değiştirmektir. Farklı teknikler kullanılarak yapılan termomekanik atermalizasyon ancak homojen bozulmaları önlemek için kullanılabilir.

2.5.2 Termooptik atermalizasyon

Optik tasarım sürecinde malzeme (optik ve mekanik) seçiminden başlayarak tüm hesaplamalar sıcaklık farkı göz önünde bulundurularak yapılırsa optik performansı sıcaklık ile özellikleri değişmeyen veya mümkün oldukça az değişen tasarımlar üretilebilir. Bu tür bir tasarımın optik kalitesi (kusur miktarı) daima sabit sıcaklık için tasarlanan bir sisteme göre bir miktar düşük olacaktır, fakat bu yöntemi kullanarak hem homojen hem de heterojen bozulmalar azaltılabilir. Aynı zamanda değişken sıcaklık aralığı boyunca değişmeyen ve oldukça yüksek optik performans sağlanabilir (Uçar vd. 2010).

Aktif atermalizasyonun zorlukları ve sistem karmaşıklığını oldukça artırması öte yandan pasif atermalizasyonun ile son derece kararlı ve düşük maliyetli sistemler yapılabiliyor olması nedeni ile bu tez çalışmasında tasarım pasif (termooptik) atermalizasyon kullanılarak yapılacaktır.

2.6 Analitik Işın İzleme

Konfigürasyonu, malzemeleri ve fiziksel parametreleri belirlenen bir optik sistemin tasarımını tamamlamak için belirlenen optik elemanların yüzey şekillerini (küresel, küresel olmayan veya düzlem gibi) belirlemek gerekir. Bir cismin mükemmel bir görüntüsünü oluşturabilmek için cisim üzerindeki bir noktadan çıkan veya yansıyan ışınların sistemden geçtikten sonra odak düzlemine (*Focal Plane*) konan düz bir ekran üzerinde bir noktada kesiştirmek gerekir. Bu aşamada karşımıza geometrik bir problem çıkmaktadır. En basit hali ile iki küresel mercekten oluşan bir sistemde, geliş doğrultusu ve dalga boyu belirlenen (sistem parametreleri sayesinde) iki ışın için mercek yüzey çapları (4), malzeme için kırılma indisi (2), kalınlık (2) ve son olarak mercekler arası mesafeden (1) oluşan, dokuzar bilinmeyenli iki denklem kurulabilir. Sistemin karmaşıklaşması ve ekstra parametreler (küresel olmayan yüzeyler, kullanılacak metal malzemelerin genleşme katsayıları, hareketli parçalar, vs) ile değişkenlerin sayısı oldukça artırılabilir. Bu kadar çok değişkenin olduğu bir sistemde sonsuz çözüm bulunabilir fakat optik sistem için (odak uzaklığı, F sayısı, boyutsal kısıtlamalar, vs)

eldeki değerler kullanılarak bulunabilecek çözümler sınırlı sayılara indirgenir. Birçok gerçek sistemde olduğu gibi sistemin tam bir çözümü olmadığından çözüme en yakın parametreler kullanılarak en uygun optik sistem oluşturulmaya çalışılır. Bu noktada her bir değişken bir serbestlik derecesi olarak algılanmalıdır. Bir optik sistemin serbestlik derecesi ne kadar yüksekse çözümü bulmak zorlaşırken istenilen kriterlere ulaşmak kolaylaşır.

Bilinen sistem parametreleri ile ışın yolunun geometrik olarak izlenmesi yani sisteme giren ışınların yollarının tayin edilmesi işleme ‘Analitik Işın İzleme’ denir. Bu tez çalışmasında tüm hesaplamalar analitik ışın izleme yöntemleri ile yapılacaktır.

Piyasada analitik ışın izleme algoritması kullanarak optik sistem çözümlemesi veya analizi yapan bir çok paket program mevcuttur. Bu tez çalışmasında optik tasarımla ilgili tüm hesaplamalar ve en iyileme çalışmaları Zemax-EE™ paket programı ile yapılacaktır (<http://www.zemax.com>).

2.7 Değer Fonksiyonu (*Merit Function*)

Değer fonksiyonu bir optik tasarım sürecinin en önemli kısmıdır. Bir tasarımın ulaşmak istenen noktaya ne kadar yakın olduğunun göstergesidir. Ulaşmak istenilen sonuçlar (T_i) ile o anki gerçek değerlerin (V_i) farklarının karesinin, tasarımcı tarafından belirlenen bir ağırlıkla (W_i) çarpılması ile elde edilir. Bu değer basitçe;

$$M_e = \sum_i W_i (V_i - T_i)^2 \quad 2.8$$

şeklinde ifade edilir. Bir örnekle açıklamak gerekirse; odak uzaklığı 100mm, f sayısının 4 olması istenen bir sistemin analitik ışın izleme yöntemleri kullanılarak bulunan sonuçları odak uzaklığı 99.78mm ve f sayısı 4.03 ise ve f sayısının sisteme etkisinin daha büyük olduğu düşünülerek ağırlıklandırma f sayısı için 1.2 ve odak için 1.1 seçilmişse değer fonksiyonu denklem 2.8 kullanılarak “0.05432” bulunur (Smith 2004,

Kim 2006). Tasarım süreci boyunca isterlerin sağlanması veya sonuçların karşılaştırılması için değer fonksiyonları kullanılacaktır.

2.8 Kızılaltı Detektörler

Kızılaltı radyasyona tepki veren algılayıcılara, kızılaltı detektör ya da sensör denir. İki temel çeşit kızılaltı detektör vardır, termal ve fotonik (Rogalski ve Chrzanowski 2002, http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_detector, 2010).

2.8.1 Termal detektörler

Kızılaltı radyasyonun neden olduğu sıcaklık etkilerini algılayan sensörlere termal sensör denir.

- Bolometre (mikrobolometre) malzemenin sıcaklıkla direnç değişimine dayanır.
- Isıl çift (thermocouple) ve ısıl pil (thermopile) termoelektrik etkiyi kullanır.
- Golay Hücreleri termal genişlemeyi izler.
- Piroelektrik kristaller ise sıcaklıkla kristal yapısı değişen ve çıkış olarak bir elektrik potansiyeli oluşturan sensörlerdir.

2.8.2 Fotonik detektörler

Dar iletim bant aralığına sahip yarı-iletken malzemeler kullanılarak üretilen, ışığa duyarlı sensörlerdir. Fotokondaktif (*photoconductive*) ve Fotovoltaik/Fotodiyot (*photovoltaic*) sensör olarak da adlandırılırlar. Tepki süresi ve algılama hassaslığı, termal sensörlere göre oldukça yüksektir, fakat çevresel sıcaklık etkileri nedeni ile oluşan termal gürültüden kurtulmak için bu tip sensörlerin soğutulması gerekir (Rogalski ve Chrzanowski 2002).

Algılama yapılacak spektral bant aralığı, kullanılan yarı-iletken malzemelerin iletkenlik bantları arasındaki mesafeye, yani bir elektronu bir üst enerji düzeyine çıkarmak için gerekli olan enerjiye doğrudan bağlıdır. Bu nedenle kullanılan elementler ve

konsantrasyonları doğrudan algılama yapılmak istenen bandı belirler. Örnek sensör malzemelerinin tipleri ve algılama yaptıkları spektral bant aralıkları Çizelge 2.1 verilmiştir (http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window 2010, Dereniak ve Boreman 1996, Holst 2008).

Çizelge 2.1 Kızılaltı Detektörler

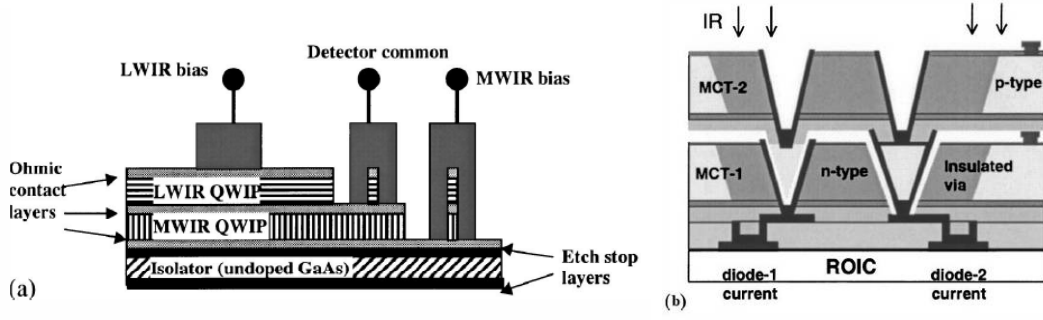
Detektör	Tip	Spektral Bant (μm)
İndiyum Galyum Arsenat (InGaAs)	Fotovoltaik	0.7 – 2.6
Galyum Arsenat (GaAs)	Fotovoltaik QWIP ¹	3 – 19
Alüminyum Galyum Arsenat (AlGaAs)	QWIP	3 – 19
Germanyum (Ge)	Fotovoltaik	0.8 – 1.7
İndiyum Antimon (InSb)	Fotovoltaik	1 – 5.5
Platinyum Silikat (PtSi)	Fotovoltaik	1 – 5
Kurşun Sülfür (PbS)	Fotokondaktif	1 – 3.2
Kurşun Selenit (PbSe)	Fotokondaktif	1.5 – 5.2
Civa Kadmiyum Tellür (MCT, HgCdTe)	Fotokondaktif Fotovoltaik	0.8 - 25
Vanadyum Pentaoksit (VO)	Mikrobolometre	1 - 5.5
Amorf Silisyum (Asi)	Mikrobolometre	1 – 6

2.9 Geniş Bant Kızılaltı Detektörler

Son yıllarda, aynı anda kızılaltı spektrumun iki alt bandında birden görüntüleme yapabilecek detektör üretmek için çok fazla çaba harcanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda aynı anda hem ODKA hem de UDKA bantlarında birden çalışan detektörler üretilmiştir.

Bu alanda geliştirilen detektörlerin tamamı fotonik detektörlerdir. Üzerine en çok çalışılan detektörler ise civa-kadmiyum-tellür ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, MCT) ve quantum-kuyu detektörlerdir (QWIP). Örnek şematik çizimler Şekil 2.17’de verilmiştir (Goldberg 2003).

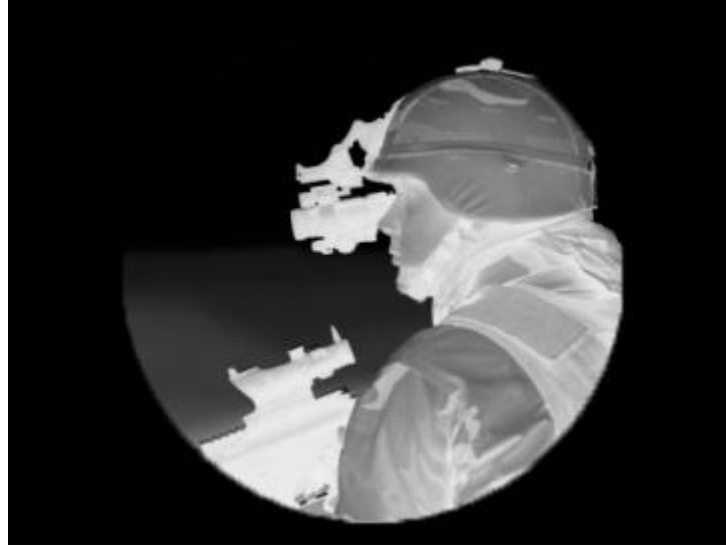
¹ QWIP (quantum-well infrared photodetectors), kuantum kuyulu kızılaltı dedektörler.



Şekil 2.17 Kızılaltı dedektörler (Goldberg 2003).

a. Çift-Bant QWIP b. MCT

Optik bir tasarım yapılmak istendiğinde detektör cinsi kritik bir konu değildir. Dikkat edilmesi gereken dalgaboyu aralığı, detektör boyutları ve çözünürlüktür. Detektör boyutunu tamamen kaplamayacak şekilde yetersiz kalmış bir görüş alanı (Şekil 2.18) detektör üzerinden kullanılmayan bölgeler oluşmasını sağlayacak veya detektör alanını fazlası ile kaplayacak gereğinden fazla büyük bir görüş alanı seçilmesi tasarımı gereksiz yere zorlaştıracaktır. Öte yandan sistemin optik çözünürlüğünün çok altında ya da çok üstünde bir detektör piksel boyutu seçmek istenmeyen sonuçlar almaya neden olacaktır.



Şekil 2.18 Yetersiz görüş alanı ile kaydedilmiş resim örneği

2.10 Kızılaltı Optik Malzemeler

Kızılaltı spektrumun 3 – 12 µm bandında geçirgen olan optik malzemelerin listesi 'da görülebilir. Fakat bu malzemelerin tamamı mercek yapımına uygun değildir. Mercek yapımına uygun malzemelerin bazılarının işlenmesi sırasında kullanılan kimyasalların insan sağlığına zararlı olması bulunabilirliklerini oldukça düşürmektedir. Geniş bant bir tasarım söz konusu olduğunda, pratikte kullanılacak malzemelerin listesi, optik ve mekanik özellikleri ile beraber Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu malzemelerin genel özelliklerinden kısaca bahsetmek gerekirse;

Germanyum: Hem orta hem uzun kızılaltı bölgelerinde düşük soğrulma değerleri olmasına karşın yüksek kırılma indisi nedeniyle yüksek yansımaya ve %50'nin altında bir geçirgenlik değerine sahiptir. Dar bant aralığı² nedeni ile 100° C ve üzerinde elektriksel iletkenliği artar ve kızılaltı ışınımına karşı soğurucu bir hal alır. Bu nedenle 100° C üzerinde kızılaltı bölgede optik malzeme olmaktan çıkar. Mekanik dayanımı orta seviyededir. Düşük geçirgenlik oranı ve zayıf bir malzeme olması nedeni ile çoğunlukla germanyum yüzeyine yansıtma (Anti-Reflection) kaplaması ve koruyucu kaplama uygulanır (Harris 1999).

Çinko Sülfür (Geniş bant, ZnS_B): Standart üretimi 8 – 10 µm bandında yüksek miktarda optik saçma (optical scatter) ve 6 µm bandında yüksek soğurma gösterir. Malzemenin geniş bant versiyonu ise optik özellikleri tüm bant boyunca karardır. Isıl şoklara karşı çok dirençli olan malzeme 800 °C'ye kadar optik malzeme olarak kullanılabilir. Düşük mekanik dayanımı nedeni ile yüzeyine koruyucu bir kaplama yapılması gerekebilir (Harris 1999).

² Elektronlarla dolu valans bandı ile boş iletim bandı arasındaki mesafenin kısa olması.

Galyum Arsenat (GaAs): Hem orta hem uzun kızılaltı bölgelerinde mükemmel optik özellik gösterir. Bant aralığı nedeni ile 460 °C ve altında rahatlıkla kullanılabilir. Mekanik dayanımı düşük ve kırılma indisi yüksek olduğu için galyum-arsenat da germanyum gibi genelde yansıtma ve koruyucu kaplama ile kullanılır (Harris 1999).

AMTIR-1: AMTIR³ kızılaltı bantta geçirgen amorf malzeme anlamına gelir (Amorphous material transmitting infrared radiation). Diğer kızılaltı optik malzemeler gibi kristalli bir yapıya sahip olmadığı için amorf şeklinde adlandırılmıştır. Bant boyunca iyi optik özellik gösterir ve düşük kırılma indisine sahiptir. İşlenmeleri oldukça kolay olmasına rağmen mekanik özellikleri kristal yapıya sahip diğer optik malzemelere göre oldukça düşüktür. Yalıtkan bir malzeme olduğu için optik özelliklerinin kaybolduğu bir sıcaklık değeri yoktur. Başka bir avantajı ise farklı üreticiler tarafından çok benzer malzemelerin üretiliyor olması dolayısıyla temininin kolay olmasıdır (http://www.janostech.com/knowledge_center/amt_material.html 2010).

Çinko Selenit (ZnSe): Kimyasal buhar çökeltme (Chemical vapor deposition, CVD) yöntemiyle üretilen kristal yapıda bir malzemedir. Görünür bölgenin sonundan başlayarak (bu nedenle kehribar ile kırmızı arası bir renge sahiptir) çok uzun dalga kızılaltı bölgesine kadar kararlı optik özellik gösterir. Optik özellikleri benzer yapıdaki ZnS'ye göre oldukça iyidir fakat ZnS'ye göre daha zayıf ve yumuşak bir malzemedir. Kızılaltı malzemeler arasında görece düşük kırılma indisi ve yüksek geçirgenliğe sahiptir.

³ AMTIR "Amorphous Materials" firmasının lisanslı ürünüdür (Ge₃₃As₁₂Se₅₅)

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Bir optik sistem tasarlanırken amaç belirli bir dalgaboyunda veya bir dalgaboyu aralığında, cisimden gelen veya yansıyan ışık ışınlarının formunu değiştirmektir. Bu değiştirme odaklama (Ör: fotoğraf makinesi), büyütme (Ör: dürbün, teleskop), taşıma (Ör: periskop), vs dir. Bu amaç doğrultusunda kullanılan her optik elemanın bir gücü vardır. Kırıcı optik sistemler için, bir merceğin optik gücü (optical power, ϕ), yüzey eğriliği E ve kırılma indisi n olmak üzere,

$$\phi = E(n-1) \quad 3.1$$

şeklinde verilir (Kidgar 2002). Sistemdeki toplam güç ise sistemde bulunan tüm elemanların optik güçlerinin toplamı olarak gösterilebilir (denklem 3.2).

$$\sum_{i=1}^n \phi_i = \phi \quad 3.2$$

Optik bir tasarımda asıl önemli olan nokta değişen şartlar altında görüntüyü sürekli odak düzleminde tutabilmektir. Bölüm 2.2’de anlatılan geometrik bozulmalar, renk hatası ve sıcaklık farkları bu durumu zorlaştıran temel etkenlerdir. Bu tez çalışmasında geniş bant atermal bir tasarım yapılacağı için üstünde durulacak konular dalgaboyu ve sıcaklık değişimi sonucu oluşan hatalardır.

3.1 Akromatik Sistem

Denklem 3.1 ve denklem 3.2 incelendiğinde istenilen optik güçte bir sistem yapmanın n yani kırılma indisine doğrudan bağlı olduğu görülebilir. f odak uzaklığı olmak üzere, denklem 3.3 incelenirse her dalgaboyu değeri için farklı bir odak uzaklığı değeri olduğu rahatlıkla görülebilir (bölüm 2.2.6).

$$\phi = 1/f \quad 3.3$$

Bölüm 0’de anlatıldığı gibi kırıcı optik bir sistemde görüntünün bütün dalgaboyu aralığı boyunca (sürekli olarak) aynı odak noktasında kalmasının sağlanması gereklidir. Başka bir deyişle geniş bant kırıcı optik bir sistem denklem 3.4 koşulunu sağlamalıdır.

$$\sum_{i=1}^n C_i \phi_i = 0 \quad 3.4$$

Belirli bir dalgaboyu aralığı boyunca oluşacak renk hatası uygun malzeme çiftlerinin eşlenmesiyle ortadan kaldırılabilir. Bu durum $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ dalga boyu aralığı olmak üzere, dispersiyonun (P),

$$P = \frac{n(\lambda_2) - n(\lambda_3)}{n(\lambda_1) - n(\lambda_3)} \quad 3.5$$

ve modifiye edilmiş Abbe sabiti (ν) (Klasik Abbe sabiti belirli dalga boyları için hesaplanır), ile bulunabilir.

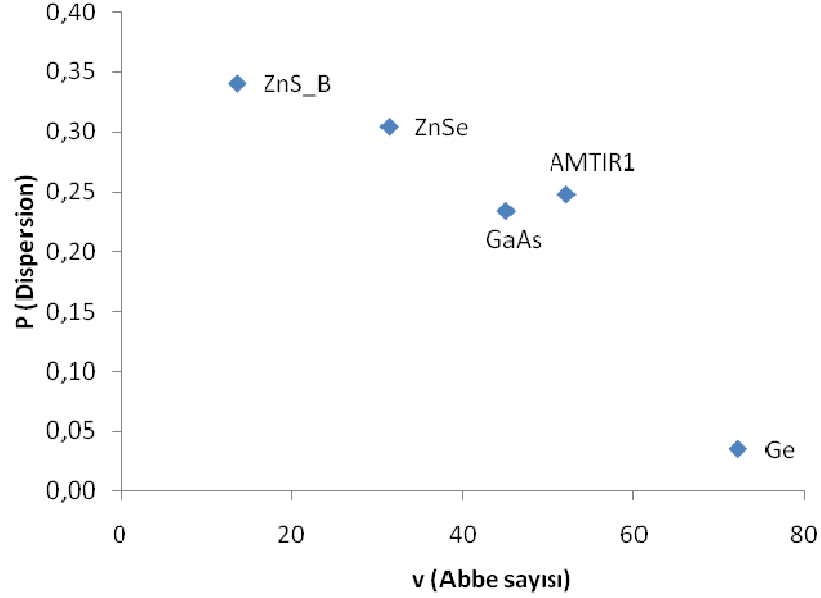
$$\nu = \frac{n(\lambda_2) - 1}{n(\lambda_1) - n(\lambda_3)} \quad 3.6$$

Bu yöntemde amaç en büyük $\Delta\nu$ ve en küçük ΔP aralığına sahip malzeme çiftlerini eşleştirmektir. (Oliva ve Gennari 1995). $\lambda_1=3$, $\lambda_2=10$, $\lambda_3=12$ olmak üzere Çizelge 2.2 deki değerler kullanılarak hesaplanan P ve ν değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Dispersiyona karşılık Abbe sayıları çizelgesi

Malzeme	P "Dispersiyon"	ν "Abbe"
AMTIR1	0.248	52.220
GaAs	0.234	45.052
Ge	0.035	72.282
ZnS_B	0.340	13.628
ZnSe	0.304	31.416

Çizelge 3.1’de verilen değerler Şekil 3.1’de dispersiyona karşılık Abbe sayısı gelecek şekilde çizilmiştir. Bu grafikten faydalanarak 3 – 12 µm dalgaboyu aralığında denklem 3.4’ü sağlayan bir çözüm bulunabilir.



Şekil 3.1 Dispersiyona karşılık Abbe sayıları grafiği

Çizelge 3.1 ve Şekil 3.1 den en büyük Δ ve en küçük ΔP koşulunu sağlayan malzeme çifti ZnS_B – AMTIR1 dir.

3.2 Atermal Sistem

İkinci olarak incelenmesi gereken nokta ise sıcaklık etkisidir. Optik bir malzemenin kırılma indisinin (n) sıcaklık (T) ile değişimi kırılma indisi sıcaklık katsayısı olarak tanımlanır. $(\partial n / \partial T)$ Bu durumda optik gücün sıcaklığa bağlı olarak değişimi;

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = E \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial E}{\partial T} (n-1) = \left(\frac{\partial n}{\partial T} - \alpha \right) \phi = \Psi \phi \quad 3.7$$

ile verilebilir. Burada α ısı genleşme katsayısı (coefficient of thermal expansion) iken ise ısıl aberasyon katsayısı olarak (thermal aberration coefficient) tanımlanabilir

(Rogers 1991). Denklem 3.7 incelendiğinde optik gücün sıcaklık altındaki değişiminin mercek malzemesine bağlı fakat mercek formundan bağımsız olduğu görülmektedir.

Denklem 3.7 optik güç yerine odak uzaklığı cinsinden (denklem 3.3) bulunmak istenirse eşitlik 3.8 elde edilir.

$$\frac{\partial f}{\partial T} = \left(\alpha - \frac{\partial n / \partial T}{n-1} \right) f = -\Psi f \quad 3.8$$

Eşitlik 3.8 incelendiğinde bir optik sistemdeki ısıya bağlı odak değişiminin, kullanılan optik malzemenin ısıl özellikleri ile kuvvetli bir ilişkisi olduğu görülmektedir. Bu durumda yüksek ısıl aberasyon katsayısı olan malzemelerin kullanıldığı bir sistemde büyük miktarda odak kaymasının oluşacağı ve görüntü kalitesinin düşeceği açıktır.

Optik sistemde sıcaklık aralığı boyunca odak noktasının aynı noktada kalmasının önemlidir. Bu nedenle sıcaklık farklarıyla karşı karşıya kalacak sistemlerin denklem 3.9 koşulunu sağlaması gerektiği söylenebilir.

$$\sum_{i=1}^n -\Psi_i \phi_i = \alpha_n L \phi^2 \quad 3.9$$

Uygun metal ve optik malzemeler bir arada kullanılarak denklem 3.9'u sağlayacak sistemler yapmak mümkündür (Li ve Shen 2008).

3.3 Atermal Akromatik Sistem

Bölüm 3.1'de renk hataları, bölüm 3.2'de ise sıcaklık etkileri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu çalışmada ise istenen iki etkinin bir arada olduğu durumda görüntünün sürekli odak düzlemi üzerinde kalmasıdır. Böyle bir çözüme ulaşmak için sistemin, 3.2, 3.4 ve 3.9 denklem sistemlerini aynı anda sağlaması gerekir.

Optik malzemelerin, birinci ekseninde renk ikinci ekseninde sıcaklık özellikleri bulunmak üzere iki boyutlu bir sistem oluşturması durumunda çizgisel bir doğru çözüm olacaktır. Yani optik malzemelerin renk kusur katsayılarına (C) karşılık ısıl aberasyon katsayısı (Ψ) çizildiği bir grafikte malzeme noktalarının bir doğru üzerinde olma durumu sistem için matematiksel bir çözüm olduğu anlamına gelir (Li ve Shen 2008).

Tam bir çözüme ulaşabilmek için son olarak gerekli olan, optik özellik göstermeyen metal gövde malzemesini bu sisteme ekleyebilmektir. Pasif atermalizasyon işleminde amaç sıcaklık sonucu mekanik elemanların oluşturacağı görüntü düzlemi kayma etkilerini dengeleyecek optik bir çözüm bulmaktır. Bu çözüm basitçe,

$$\frac{\partial f}{\partial T} = \alpha_h L \quad 3.10$$

şeklinde verilir. Burada, L mercekle detektör arasında mekanik elemanların oluşturduğu mesafe, α_h ise elemanların efektif genişleme katsayısıdır. Basit optik bir sistem için L mesafesi odak uzaklığına çok yakındır, denklem 3.8 ve 3.10 sisteminde $L \approx f$ kabul edilirse,

$$-\Psi f = \alpha_h L \quad 3.11$$

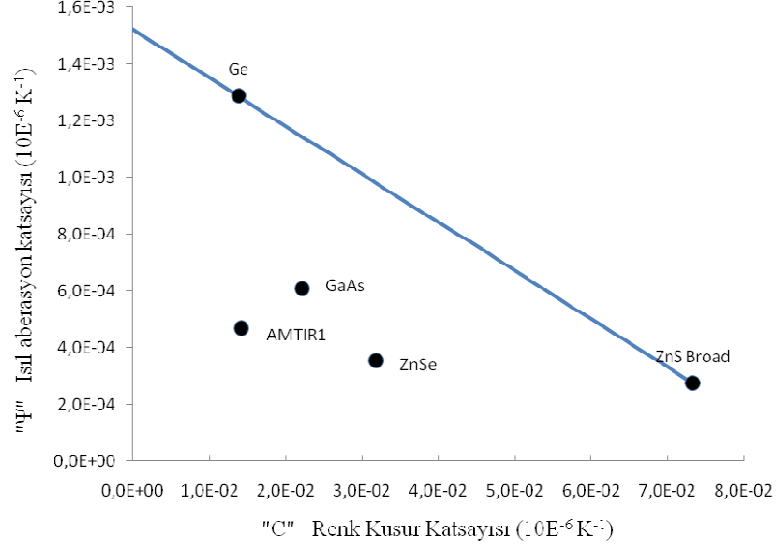
$$-\Psi = \alpha_h \quad 3.12$$

elde edilir. Bu durumda gövde malzemesinin genişleme katsayısı (α_h) optik bir malzemeymiş gibi sisteme ısıl aberasyon katsayısı olarak girilebilir (Li ve Shen 2008). Çizelge 2.2 kullanılarak hesaplanan renk kusur katsayıları C ve ısıl aberasyon katsayıları Ψ , Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri (Uçar ve Kabak 2010)

	Renk Kusur Katsayısı “ C ” (10^{-6} K^{-1})	Isıl aberasyon Katsayısı “ Ψ ” (10^{-6} K^{-1})
Ge	1.38×10^{-2}	1.29×10^{-3}
AMTIR1	1.42×10^{-2}	4.69×10^{-4}
ZnS_B	7.34×10^{-2}	2.76×10^{-4}
GaAs	2.22×10^{-2}	6.08×10^{-4}
ZnSe	3.18×10^{-2}	3.56×10^{-4}

Çizelge 3.2’de bulunan değerler renk kusur katsayılarına karşılık ısıl aberasyon katsayıları gelecek şekilde çizilmiştir ($C - \Psi$ grafiği, Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği

Şekil 3.2 incelenirse renk kusur katsayısı C , ısıl aberasyon katsayısı Ψ ve mekanik elemanların genleşme katsayısı α_h arasında ilişki daha net anlaşılabilir. Denklem 3.11 ve 3.12 bir $C - \Psi$ grafiğinde eğimi k olan bir doğruyu temsil etmektedir.

$$\Psi_i = kC_i - \alpha_h \quad 3.13$$

Burada $i=1,2$ için

$$k = \frac{\Psi_1 - \Psi_2}{C_1 - C_2} \quad 3.14$$

Şekil 3.2’de akromat atermal bir çözüm gösterilmiştir. Bu örnekte iki mercekle bir sistemde merceklerden biri germanyum diğeri çinko-sülfür kullanılarak üretilirse gövde malzemesinin grafikte M noktası olarak gösterilen yerde olması gerektiği gösterilmiştir. Çizelge 3.2’de verilen C ve Ψ değerlerinden faydalanarak öncelikle denklem 3.14’den doğrunun eğimi bulunup $C_1=0$ noktası için denklem 3.13 çözülürse M noktasında olması gereken malzemenin genleşme katsayısı $\alpha_h = -1,51 \times 10^{-3} K^{-1}$ olarak bulunur. Her ne kadar genleşme katsayısı negatif olan bazı malzemeler bulunsa da bu sonuç pratik

olarak elde edilebilir bir sonuç değildir. Bu örnek sonucunda anlamlı genleşme katsayılı malzemelere ulaşabilmek için pozitif eğimli doğrular kullanmamız gerektiği ortaya çıkmıştır.

3.4 Malzeme Seçimi

Optik sistem tasarlarken farklı malzemelere ihtiyaç duyulur fakat bunların en önemlileri mercek yapımında kullanılacak olan optik malzemeler ve gövde yapımında kullanılacak metal veya benzeri malzemelerdir. Bunların dışında yapıştırıcı, dolgu, vs malzemeler kullanılabilir. Bu bölümde ilk olarak gövde malzemesi ve ardından optik malzemelerin seçimi yapılacaktır.

3.4.1 Gövde malzemesi seçimi

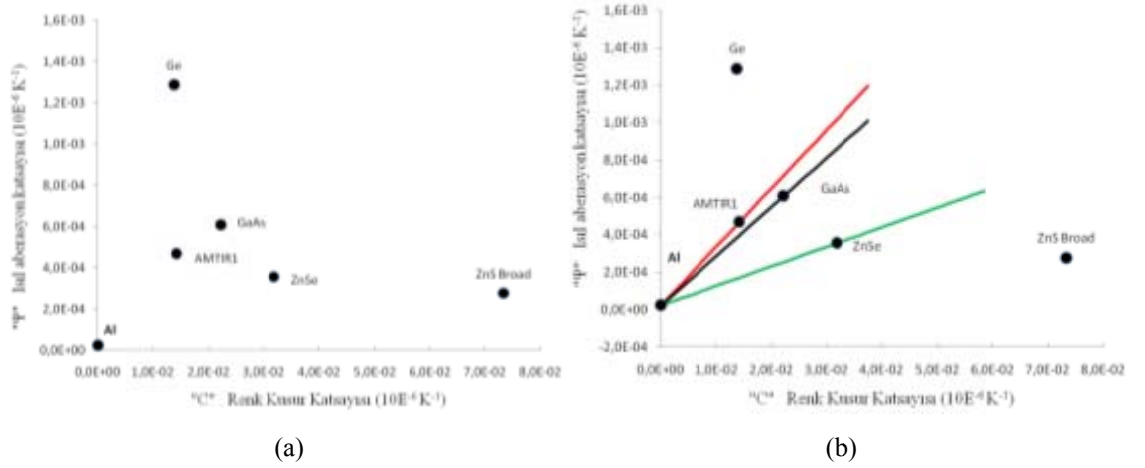
İşleme kolaylığı, yüksek dayanımına karşılık hafif olması, oksidasyona karşı olan üstün direnci ve düşük fiyatı alüminyumunu birçok sistem için olduğu gibi optik sistemler için de çok uygun bir malzeme yapmaktadır. Bu tez çalışmasında invar-kovar veya karbon fiber gibi genleşme katsayısı çok düşük fakat üretimi alüminyuma göre çok daha zor ve maliyetli olan bir malzeme seçip tasarım sürecini rahatlatmak yerine genleşme katsayısı yüksek olmasına rağmen pratikte üretimi çok daha kolay olan alüminyum seçilmiştir (Yoder 2002).

3.4.2 Optik malzeme seçimi

Gövde malzemesi seçiminden sonra tasarımın en önemli bölümlerinden biri olan optik malzeme seçimine gelinmiştir. Denklem 3.13 ile anlatılan atermal çözümü elde edebilmek için $C - \Psi$ grafiğine uygun bir gövde malzemesi eklemek gereklidir. Bu malzeme bir önceki bölümde belirlenen alüminyumdur. Optik bir malzeme olmadığı için renk hata katsayısı olmayan alüminyum için denklem 3.12'de gösterildiği gibi ısıl aberasyon katsayısı yerine genleşme katsayısının negatif değeri kullanılarak hazırlanmış bir $C - \Psi$ grafiği Şekil 3.3.a'da verilmiştir.

Bölüm 3.3’de atermal bir çözüm bulmak için pozitif eğimli bir doğru kullanılması gerekliliği ortaya çıkarılmıştı. Çözümün aynı zamanda alüminyum malzemesi ile de uyumlu olması istendiğine göre Şekil 3.3’de gösterilen AL noktasını da sağlaması gerektiği açıktır. Bu durumda atermalizasyon denklemini sağlayacak çözüm ancak bir optik malzeme ile sağlanabilir. Bu durum Şekil 3.3.b’de gösterilmiştir.

Bölüm 3.1’de anlatıldığı gibi renk hatalarından kurtulmak ancak farklı odak uzaklıklarından farklı malzemeler kullanarak mümkündür. Bu nedenle tek bir optik malzeme kullanarak anlamlı sonuçlara ulaşmak mümkün olmayacaktır.

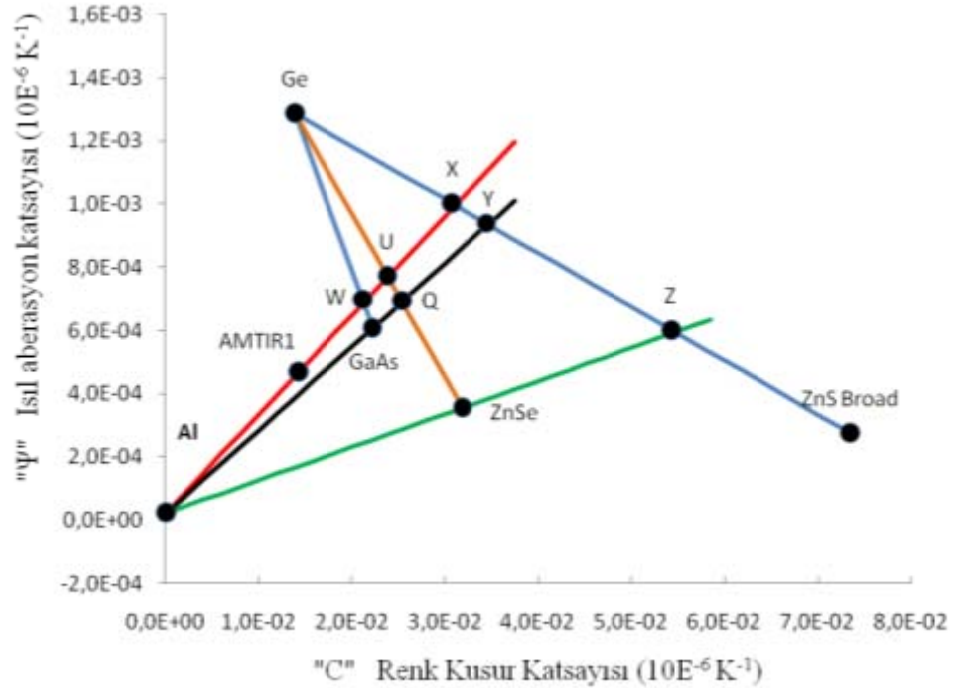


Şekil 3.3 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği 2

Bu noktada bir çözüm üretmek için alternatif bir yöntem izlenmesi gerekmektedir. Bölüm 3.1’de de anlatıldığı gibi görünür bölgede, iki farklı malzemeden yapılan iki mercek birbirlerine yapıştırılarak (dublet) yeni bir mercek grubu elde edilebilir. Yeni elde edilen bu mercek, yapılırken kullanılan malzemelerin bileşimi bir özellik gösterir. Bu tip mercekler renk hatasını ortadan kaldırmak için birçok optik sistemde sıklıkla kullanılır. Kızılaltı bölgede de benzer bir yöntem kullanılarak (malzeme çiftleme) yeni sanal malzemeler yapılabilir. Bu çalışmada da çözüme ulaşabilmek için malzeme çiftleri kullanmak faydalı olacaktır. Ancak kızılaltı bölgede mercekleri yapıştırmak için kullanılacak uygun yapıştırıcılar bulunmamaktadır. Yapıştırıcı bulunsa bile sistemin maruz kalacağı sıcaklık değişimleri altında farklı ve yüksek genleşme katsayılı malzemeleri yapıştırmak yeni sorunlara neden olacaktır. Bu nedenlerden bu çalışmada

çiftlenen malzemeler her hangi bir yapıştırma işlemi yapılmadan aralarında hava boşluğu olacak şekilde kullanılmıştır.

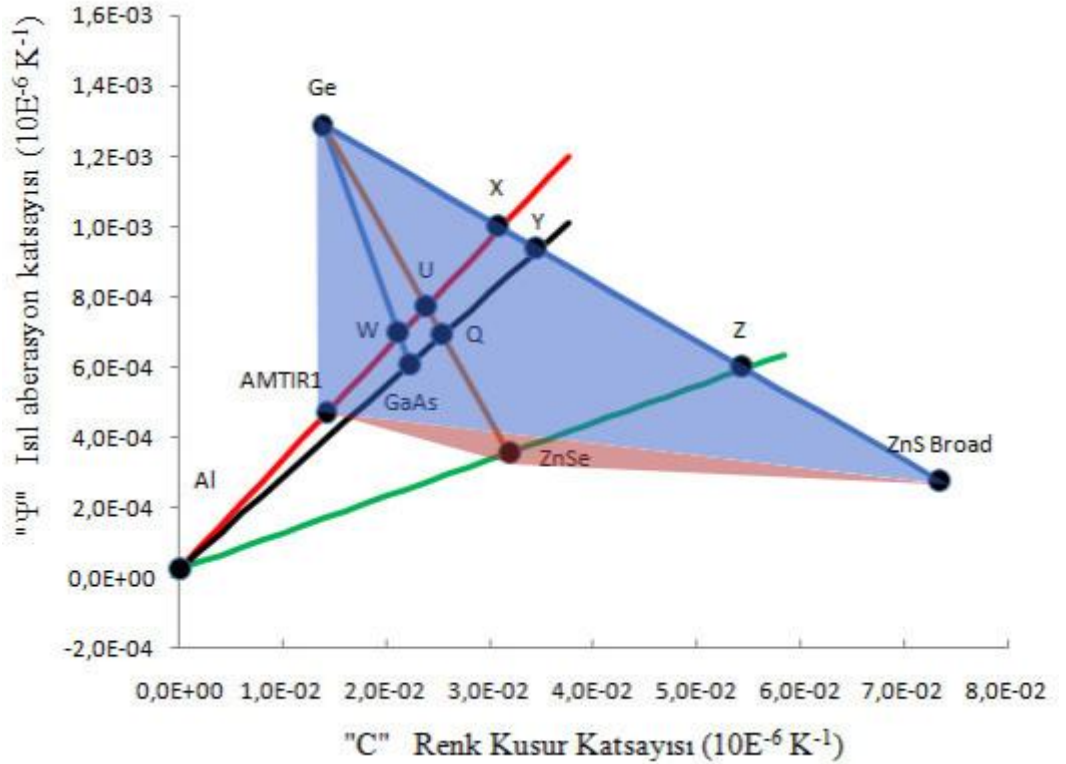
Sistem çözümü bulunması aşamasında yapılacak olan malzeme çiftlemesi işlemi herhangi iki malzeme seçilerek yapılamaz. Görünür bölgede dispersiyon ve Abbe sayıları arasındaki farklar göz önünde bulundurularak yapılan çiftlemeye paralel bir yöntem izlenmelidir (bölüm 3.1). Malzemenin çiftlenerek kullanılması durumunda sistem için atermal akromat bir çözümler bulunabilir (Li ve Shen 2008). Germanyum ve çinko-selenitin çiftlenerek “U” malzemesini oluşturması örnek bir çiftlemedir. Şekil 3.4’de birçok örnek çözüm verilmiştir.



Şekil 3.4 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği 3

Problem matematiksel olarak incelenirse, her hangi üç malzeme seçilerek bir çözüme ulaşılabacağı söylenebilir fakat fiziksel olarak bakıldığında bulunacak çözümlerin çoğu anlamlı olmayacaktır. Örnek olarak AMTIR1 ile çinko-sülfür malzemelerinin çiftlenmesi ile bir çözüm üretilmek istenirse ortaya çıkacak malzemenin özellikleri çinko-selenite çok yakın olacaktır (Kırmızı üçgen, Şekil 3.5) ve bu durumda sistem yine

tek malzeme kullanılıyormuş gibi davranacaktır. Anlatılan şartlar altında fiziksel olarak anlamlı bir sonuca ulaşmak için ΔC ve $\Delta \Psi$ 'nin en büyük olduğu malzemeler çiflenmelidir. Bu kriterin temel prensibi, Germanyum gibi çok yüksek ısıl aberasyon katsayısı olmasına rağmen çok düşük renk hatası katsayısına sahip bir malzeme ile tamamen ters özellik gösteren yani yüksek renk hatası katsayısına karşılık düşük ısıl aberasyon katsayısı olan Çinko-Sülfat'ın çiflenmesinin yeni bir malzeme oluşturmak konusunda tasarımcıya büyük esneklik sunmasıdır (Mavi üçgen, Şekil 3.5)

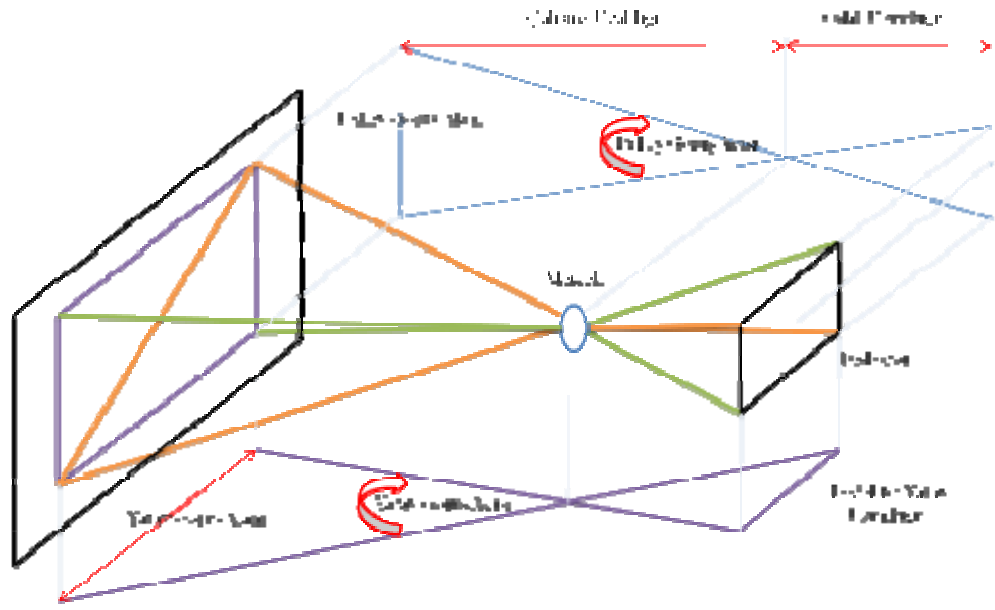


Şekil 3.5 Kızılaltı malzemelerin optik ve termal özellikleri grafiği 4

$\Delta C - \Delta \Psi$ 'nin en büyük olması durumu Germanyum ve Çinko Sülfür kullanılarak mümkündür (X, Y, Z noktaları). Bu şartlar altında diğer alternatif malzemelere oranla düşük ısıl aberasyon katsayısı ve renk kusur katsayısına sahip olması yanı sıra benzer alternatifleri olması nedeniyle bu çalışmada AMTIR1 kullanılması uygun olacaktır.

3.5 Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir optik sistem tasarlanırken sistemin kimliği niteliğinde dört parametrenin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler odak uzaklığı, optik açıklık veya f sayısı, görüş alanı ve çalışma dalgaboyudur. Beşinci bir parametre ise atermal bir tasarım yapılmak istendiği için sıcaklık aralığıdır. Dalgaboyu 3-5 μm ve sıcaklık aralığı $-35 \sim +50^\circ\text{C}$ olarak daha önce belirlenmişti.



Şekil 3.6 Sistem parametreleri

Şekil 3.6 incelendiğinde odak uzaklığı, detektör boyutları ve görüş açısı parametrelerinin birbirlerine direkt olarak bağlı olduğu görülebilir. Basit bir geometrik yaklaşımla;

$$W/A_x = f/D_x \quad 3.15$$

Burada W çalışma uzaklığı, D_x yatay detektör uzunluğu, f odak uzaklığı ve A_x yatay görüş alanını ifade etmektedir.

Bu çalışmada belirli bir gereksinim olmadığı için odak uzaklığı çok genel kullanılan bir değer olan 50 mm olarak seçilmiştir. Aynı şekilde belirli bir kızılaltı detektör kullanılması planlanmadığı için standartlaşmış detektör ölçüleri dikkate alınacaktır. Standart detektör ölçüleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde yatay detektör boyutlarının aynı kalırken dikey çözünürlüğün iki farklı değer aldığı görülebilir. Görüş alanı hesaplaması, tüm detektörler ile sorunsuz çalışabilecek bir tasarım yapabilmek için büyük olan dikey detektör boyutu üzerinden yapılacaktır.

Çizelge 3.3 Standart detektör ölçüleri

Piksel Boyutu (μm)	Çözünürlük		Detektör Boyutu (mm)	
	Yatay	Düşey	Yatay	Düşey
50	192	154	9.6	7.7
50	192	144	9.6	7.2
30	320	256	9.6	7.68
30	320	240	9.6	7.2
20	480	384	9.6	7.68
20	480	360	9.6	7.2
15	640	512	9.6	7.68
15	640	480	9.6	7.2

Odak uzaklığının ve detektör boyutlarının belirlenmesi sayesinde denklem 3.15 kullanılarak görüş alanı yatayda 10.97° , düşeyde 8.78° olarak hesaplanabilir. Köşegen üzerinden hesaplanan görüş açısı ise yaklaşık $\pm 7^\circ$ dir.

Belirlenmesi gereken son parametre ise f sayısı veya optik açıklıktır. Bölüm 2.1.11’de anlatıldığı gibi f sayısı ($f/\#$) bir sistemin ne kadar ışık toplayabileceğinin bir ölçüsüdür. f sayısı kolayca belirlenebilecek bir parametre değildir. Tüm gereksinimleri belirlenmiş bir optik sistem için f sayısı;

$$f/\# = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_\lambda D^* \sqrt{A_d}}{\sqrt{\nu}} NETD} \quad 3.16$$

şeklinde ifade edilebilir (Daniels 2009). Burada $(\partial L/\partial T)_\lambda$ istenilen dalga boyu aralığında hedeften yayılan toplam ışığı, D^* detektör başarımının bir ölçüsü olan standart alıcılığı (normalized detectivity), A_d detektör yüzey alanı, ν detektör çalışma frekansı ve son olarak NETD (Noise equivalent temperature difference) kızılaltı bir detektörün algılayabileceği en küçük sıcaklık farkını ifade etmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi bu tez çalışmasında belirli bir hedef grubu ve yine belirli bir detektör seçilmediği için f sayısını hesaplamak mümkün olmayacaktır. Bu nedenle bu parametre ile ilgili uygun bir seçim yapmak gerekecektir. Kızılaltı spektrumunda çalışan objektifler incelendiğinde, f sayılarının 0.65 ile 5.0 arasında olduğu görülmüştür (Anonymous 2007). f sayısının bu derece düşük değerlere ulaşmasının nedeni detektör başarımlarının yüksek ve kullanılan optik malzemelerin geçirgenliklerinin düşük olmasıdır.

Bu koşullar altında kızılaltı uygulamalar da dahil olmak üzere bir çok 50 mm ticari objektifte kullanılan 2.0 uygun bir f sayısı olacaktır. Belirlenen parametreler Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Sistem Parametreleri

Parametre	Değeri
Görüş Alanı (Diagonal)	$\pm 7^\circ$ (14°)
Odak Uzaklığı	50 mm
f Sayısı	2.0
Dalgaboyu Aralığı	3 ~ 12 μm
Sıcaklık Aralığı	-35 ~ +50 $^\circ\text{C}$

3.6 Konfigürasyon

Sistem parametrelerinin, optik ve gövde malzemelerinin belirlenmesinin ardından tasarıma geçmeden önce son olarak belirlenmesi gereken konfigürasyondur. Bunun için bölüm 2.3'te anlatılan optik sistem çeşitlerinden seçeneklerden biri seçilmelidir.

Bölüm 0'ten anlaşılacağı gibi pasif atermal (termooptik atermalizasyon) bir sistem tasarlayabilmek için kızılaltı malzemelerin değişken ısı ve optik özelliklerinden faydalanmak gereklidir. Malzeme seçiminde ise sistemin atermal olabilmesi için üç farklı malzeme kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu noktada, sistemin kırıcı veya katadioptrik olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Öte yandan sistem parametreleri kısmında ulaşılan $\pm 7^\circ$ görüş alanı değeri aynalı sistemler ile elde edilebilecek bir görüş alanı değeri değildir. Bu şartlarda tasarımda ayna kullanılmayacağı sadece mercek kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Bu noktada ise karar verilmesi gereken son iki husus kaç mercek kullanılacağı ve mercek yüzey tipleridir⁴. Sistem karmaşıklığının mümkün olduğunca azaltılabilmesi, üretim kolaylığı ve maliyetinin düşürülmesi açısından tasarım sürecinde sadece; kartezyen koordinat sisteminde, x ve y koordinatlar ve k koniklik sabiti olmak üzere,

$$y = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_r)c^2x^2}} \quad 3.17$$

şeklinde ifade edilebilecek standart küresel ve standart konik ($k_r=0$ durumunda standart küresel ve $k_r \neq 0$ durumunda standart konik) yüzeyler kullanılacaktır (Kumler 2005). Kaç konik yüzeyin kullanılacağı ve hangi yüzeylerin konik hangilerinin küresel olacağı ise tasarım sürecinde belirlenecektir.

Bölüm 2.6'da anlatıldığı gibi tasarıma eklenen her bir mercek sistemin serbestlik derecesini 4 – 5 derece arttırmaktadır, fakat aynı zamanda üretim ve bütünleme toleransları nedeniyle oluşan optik bozulmalar, sistem uzunluğu, ağırlığı ve maliyeti artmaktadır. Bu nedenle mercek sayısı sistem isterlerine göre uygun olarak belirlenmelidir. Bölüm 3.4.2'de belirtildiği üzere bu çalışmada malzeme gereksinimi (Germanyum, Çinko-Sülfür ve AMTIR1) en az üç mercek kullanılmasını gerekli kılmaktadır.

⁴ Mercek üretilirken standart küresel, konik, super konik, fresnel, vb gibi çok farklı yüzey profilleri kullanılabilir.

50 mm odak uzaklığı olan bir sistemde beş mercek kullanılması sistemin fazla uzun ve ağır olmasını sağlayacağından sistemde üç veya dört mercek kullanılması uygun olacaktır. Üç mercekli bir tasarım daha hafif ve daha kısa olacaktır. Fakat iyileştirilmesi sırasında çok fazla konik yüzey kullanılması gerekebilir. Çok zayıf değişkenler oldukları için mercek kalınlıklarını göz önünde bulundurmduğumuz durumda tasarımı üç mercekli altı konik yüzeyli veya dört mercekli iki konik yüzey kullanarak yapmak aynı serbesiteyi doğuracaktır (Hill 2007). Bu durumda tasarımın dört mercekli olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Kullanılan yöntemlerin doğruluğundan emin olmak ve en uygun konfigürasyonu belirleyebilmek için üç farklı tasarım yapıp sonuçlar karşılaştırılacaktır. Bu nedenle ilk olarak Bölüm 3.1’de bulunan iki malzemeli akromat çözüm (ZnS_B – AMTIR1), ikinci ve üçüncü olarak Bölüm 3.4.2’de bulunan üç malzemeli AMTIR1-Ge-ZnS ve AMTIR1-ZnSe-ZnS çözümler yapılacaktır.

3.7 Tasarım

Tasarımlar, önceki bölümlerde belirlenen konfigürasyonlara göre, gereksinim ve parametreler ışığında yapılmıştır. Bu süreçte analitik ışın izleme metodu kullanılmış ve değer fonksiyonları izlenerek sonuca ulaşılmıştır. Tasarım sürecinde mümkün olan en yüksek optik çözünürlük ve en düşük bozulma seviyelerine ulaşmak için bölüm 2.4’te verilen analiz ifadeleri, belirlenen sıcaklık aralığı boyunca incelenmiş ve mümkün olan en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Tasarım yöntemi anlatılırken verilen değer fonksiyonları ikinci konfigürasyona aittir.

3.7.1 Tasarım parametrelerinin sisteme girilmesi

İlk olarak tasarım parametreleri sırası ile sisteme girilmiştir. İki tip parametre vardır. Odak uzaklığı ve giriş açıklığı gibi sabit parametreler ve dalgaboyu, görüş açısı, sıcaklık aralığı gibi sürekli parametreler. Sisteme sırası ile sabit parametreler ve sürekli parametreler için uygun örnekleme aralıkları girilmiştir.

İlk olarak sisteme dalgaboyu aralığı için bant sınırları ve merkez dalgaboyları girilmiştir. Bu değerler Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Tanımlanan algaboyları

	Dalgaboyu (µm)	Tanım
1	3.5	ODKA alt sınır
2	4	ODKA merkez
3	4.5	ODKA üst sınır
4	8.5	UDKA alt sınır
5	10	UDKA merkez
6	12	UDKA üst sınır

İkinci basamakta görüş alanı için sistem simetrisinden faydalanarak bir yönde (pozitif veya negatif) ve “alan bazlı dengelenmiş” noktalar kullanılmıştır. “k” alan noktası ve “FoV” toplam görüş açısı olmak üzere, incelenecek görüş açısı noktaları

$$0, \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{k-1}} \times FoV, \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{k-2}} \times FoV, \dots, \frac{\sqrt{k-1}}{\sqrt{k-1}} \times FoV \quad 3.18$$

şeklinde hesaplanmıştır (Hill 2007). Burada amaç dairesel görüş alanını eşit alan parçalarına bölmektir. Dört nokta için görüş alanı değerleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Görüş alan noktaları

	Görüş Alan Noktaları (derece)
1	0.00
2	4.04
3	5.72
4	7.00

Sıcaklık aralığı basamakları için üst ve alt sınırların yanı sıra iki ara derece ile beraber toplam dört değerde işlem yapılmıştır. Bu değerler sisteme -35°, -10°, 20° ve 50° C olarak girilmiştir. Sabit parametreler ise bölüm 3.5’de belirlendiği gibi odak uzaklığı 50 mm ve optik açıklık “giriş pupil çapı cinsinde” 25 mm (*f* sayısı 2) olarak sisteme girilmiştir.

3.7.2 Tasarımların yapılması

Boyutsal değişimler sonucu oluşan birinci derece ve kusur dengesinin değişimi sonucu oluşan yüksek derece termal etkilerin giderilmesi için genel iyileştirme yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemde sıcaklıkla değişen kırılma indisi n ve boyutsal ifadeler (mercek yüzey eğrilik yarı çapları, kalınlık ve mercekler arası mesafeler) çok konfigürasyonlu bir sistem gibi ele alınarak bir çözüm matrisi haline getirilmiş ve uygun ağırlıklandırma ile en düşük değer fonksiyonuna ulaşılmaya çalışılmıştır. Burada belirlenen sıcaklık değerleri konfigürasyonların temel değişkenidir. Örnek bir çoklu konfigürasyon matrisi Ek 1 verilmiştir. Tüm hesaplamalar bu matris üzerinden ZEMAX-EE™ paket programı ile yapılmıştır.

Hesaplamalar yapılırken, hangi malzemeden yapılmış merceğin hangi sırada ve tipte olacağına karar verebilmek için olasılıklar değerlendirilmiş ve değer fonksiyonları hesaplanmıştır. Malzeme sıralandırması üzerine yapılan çalışmalarda hesaplamalar tüm yüzeyler küresel kabul edilerek yapılmıştır. İkinci konfigürasyon için yapılan “mercek yerleşim yerlerine göre değer fonksiyonları çizelgesi Çizelge 3.7’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde ikinci konfigürasyonun diğer olasılıklara göre oldukça düşük bir değer fonksiyonuna sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu konfigürasyonda malzeme sıralaması AMTIR1, Germanyum, Çinko-Sülfür ve AMTIR1 şeklinde alınmıştır. Diğer konfigürasyonlar için de hesaplama benzer şekilde yapılmıştır.

Çizelge 3.7 Malzeme sıralamasına göre değer fonksiyonları

1. Mercek	2. Mercek	3. Mercek	4. Mercek	DF*
AMTIR1	ZnS	Ge	AMTIR2	1.553
AMTIR1	Ge	ZnS	AMTIR1	0.850
AMTIR1	Ge	AMTIR1	ZnS	4.001
ZnS	Ge	AMTIR1	AMTIR1	3.944
ZnS	AMTIR1	Ge	AMTIR1	4.988
AMTIR1	AMTIR2	Ge	ZnS	4.316

*DF: Değer Fonksiyonu (hesaplama metodu bölüm 2.7’de anlatılmıştır)

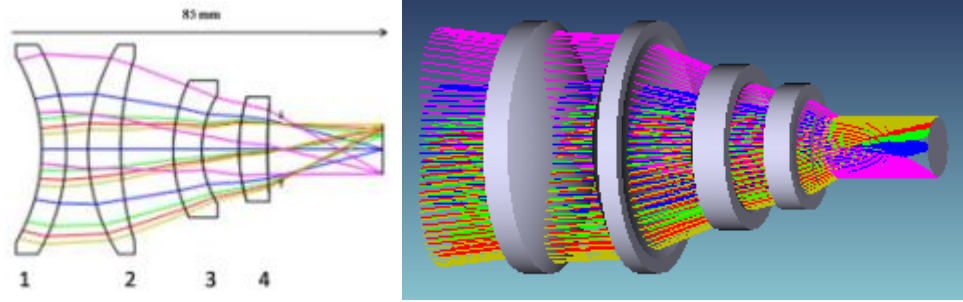
Hangi yüzeylerin konik olacağı ve kaç konik yüzey kullanılacağı ise yüzeyler tek tek konik yapıp değer fonksiyonları karşılaştırılarak belirlenmiştir. Her basamakta en düşük değer fonksiyonuna sahip olan konik yüzey sabit tutulup diğer olasılıklar değerlendirilmiştir. Yine örnek olarak ikinci konfigürasyon için hesaplanan değer fonksiyonları Çizelge 3.8’de verilmiştir. Çizelge incelenirse ilk konik yüzeyin 0.0177 lik DF ile 5. yüzey, ikinci konik yüzeyin ise 0.00705 ile 3. yüzey olması gerektiği anlaşılmıştır. Yine tablodan 3. bir konik yüzeyin sisteme eklenmesinin sistem başarımına katkısının önemsenmeyecek kadar az olduğu görülebilir. Bu nedenle sistemde iki konik yüzey kullanılması gerektiği, bunların 3. ve 5. yüzeyler olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer konfigürasyonların koniklik sabitleri bulunurken aynı yöntem izlenmiştir.

Çizelge 3.8 Konik yüzeyleri belirlenmesi

Yüzey	1. Yüzey	2. Yüzey	3. Yüzey	4. Yüzey	5. Yüzey	6. Yüzey	7. Yüzey	8. Yüzey
1. Konik DF	0.0827	0.1609	0.0529	0.1038	0.0177	0.0459	0.115	0.115
2. Konik DF	0.00774	0.00748	0.00705	0.0071	---	0.01327	0.01594	0.0163
3. Konik DF	0.00705	0.00703	---	0.00702	---	0.00701	0.00703	0.00703

3.7.3 Birinci konfigürasyon

İlk konfigürasyonda bölüm 3.1’de renk hatasının giderilmesi kısmında bulunan iki malzemeli (ZnS_B – AMTIR1) çözüm için bir tasarım yapılmıştır. Tasarlanan objektifin iki ve üç boyutlu modelleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Birinci konfigürasyon iki ve üç boyutlu objektif modeli

Tasarım ile ilgili olarak detaylı bilgi Çizelge 3.9’de verilmiştir. Tasarım sonucunda birinci konfigürasyonda Çinko-Sülfür’den yapılan ilk ve üçüncü mercek negatif menisküs, AMTIR1’den yapılan ikinci ve dördüncü mercek ise pozitif menisküs, olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.9 Birinci konfigürasyon

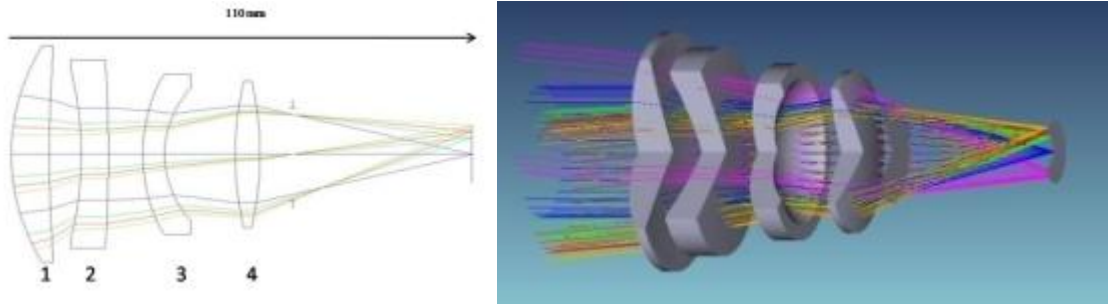
Mercek	Mercek Tipi	Malzeme	R1 Yüzey Tipi	R2 Yüzey Tipi	Odak uzaklığı
1.	Negatif Menisküs	ZnS Broad	Küresel	Küresel	-539 (mm)
2.	Pozitif Menisküs	AMTIR1	Konik	Küresel	71 (mm)
3.	Negatif Menisküs	ZnS Broad	Küresel	Konik	-79 (mm)
4.	Pozitif Menisküs	AMTIR1	Konik	Küresel	43 (mm)

Hesaplamalar sonucu ulaşılan sistemde, ikinci merceğin R1 (sistemin üçüncü), üçüncü merceğin R2 (sistemin altıncı) ve dördüncü merceğin R1 (sistemin yedinci) yüzeyi Prolate Sferoit⁵ (konik) tir tir. Sistemle ilgili diğer fiziksel parametreler ise sistem uzunluğu ve ağırlığıdır. Toplam sistem uzunluğu yaklaşık 85 mm ve mekanik ara yüzler olmaksızın toplam kütle ise yaklaşık 155 gramdır.

⁵ Prolate Sferoit k_r sıfır ile -1 arasında ($0 > k_r > -1$) olan konik yüzeylere denir.

3.7.4 İkinci konfigürasyon

Bölüm 3.4.2’de atermal akromatik bir sistem yapabilmek için seçilmesi gereken üç malzeme belirlenmiştir. Tasarlanmak üzere seçilen iki alternatiften ilki en iyi çözüm olduğu gözlenen AMTIR1-Ge-ZnS dir. İkinci konfigürasyonda bu malzemeler ile bir tasarım yapılmıştır. Tasarlanan objektifin iki ve üç boyutlu modelleri Şekil 3.8’te verilmiştir.



Şekil 3.8 İkinci konfigürasyon iki ve üç boyutlu objektif modeli

Tasarım ile ilgili olarak detaylı bilgi Çizelge 3.10’de verilmiştir. Tasarım sonucunda ikinci konfigürasyonda birinci eleman olan AMTIR1 pozitif menisküs, ikinci eleman Germanium negatif menisküs, üçüncü eleman Çinko-Sülfür negatif menisküs, son olarak dördüncü eleman AMTIR1 ise bi-konveks olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.10 İkinci konfigürasyon

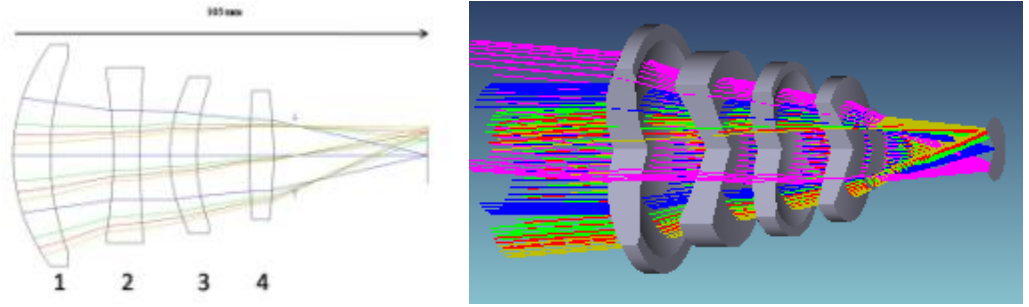
Mercek	Mercek Tipi	Malzeme	R1 Yüzey Tipi	R2 Yüzey Tipi	Odak uzaklığı
1.	Pozitif Menisküs	AMTIR1	Küresel	Küresel	37 (mm)
2.	Negatif Menisküs	Germanium	Konik		-37 (mm)
3.	Negatif Menisküs	ZnS Broad	Konik		-46 (mm)
4.	Bi- Konveks	AMTIR1	Küresel		25 (mm)

Hesaplamalar sonucu ulaşılan sistemde, ikinci merceğin R1 yüzeyi, yani sistemin üçüncü yüzeyi, Prolate Sferoit, üçüncü merceğin R1 yüzeyi, sistemin beşinci yüzeyi, Oblate Sferoit⁶ (konik) tir. Sistemle ilgili diğer fiziksel parametreler ise sistem uzunluğu ve ağırlığıdır. Toplam sistem uzunluğu yaklaşık 110 mm ve mekanik ara yüzler olmaksızın toplam kütle ise yaklaşık 100 gramdır.

⁶ Oblate Sferoit k_r sıfırdan büyük ($0 < k_r$) olan konik yüzeylere denir.

3.7.5 Üçüncü konfigürasyon

Bölüm 3.4.2’de anlatılan fiziksel kriterlere uymayan sonucu sadece matematiksel olarak sağlayan bir diğer alternatif AMTIR1-ZnSe-ZnS dir. Üçüncü konfigürasyonda bu malzemeler ile bir tasarım yapılmıştır. Tasarlanan objektifin iki ve üç boyutlu modelleri Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 Üçüncü konfigürasyon iki ve üç boyutlu objektif modeli

Tasarım ile ilgili olarak detaylı bilgi Çizelge 3.11’de verilmiştir. Tasarım sonucunda ikinci konfigürasyonda birinci eleman olan AMTIR1 pozitif menisküs, ikinci eleman Germanyum negatif menisküs, üçüncü eleman Çinko-Sülfür negatif menisküs, son olarak dördüncü eleman AMTIR1 ise bi-konveks olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.11 Üçüncü konfigürasyon

Mercek	Mercek Tipi	Malzeme	R1 Yüzey Tipi	R2 Yüzey Tipi	Odak uzaklığı
1.	Pozitif Menisküs	ZnSe	Küresel	Küresel	79 (mm)
2.	Bi-Konkav	ZnS Broad	Konik		-59 (mm)
3.	Pozitif Menisküs	ZnSe	Konik		85 (mm)
4.	Bi-Konveks	AMTIR1	Küresel		53 (mm)

Hesaplamalar sonucu ulaşılan sistemde, ikinci merceğin R1 yüzeyi, yani sistemin üçüncü yüzeyi ve üçüncü merceğin R1 yüzeyi, sistemin beşinci yüzeyi, Oblate Sferoidtir. Sistemle ilgili diğer fiziksel parametreler ise sistem uzunluğu ve ağırlığıdır. Toplam sistem uzunluğu yaklaşık 105 mm ve mekanik ara yüzler olmaksızın toplam kütle ise yaklaşık 121 gramdır.

3.8 Optik Başarım ve Analizler

Bu bölümde tasarımı tamamlanan üç konfigürasyonun başarım seviyesini gösteren analizler ayrıntılı olarak verilmiş ve gerekli açıklamalar yapılmıştır.

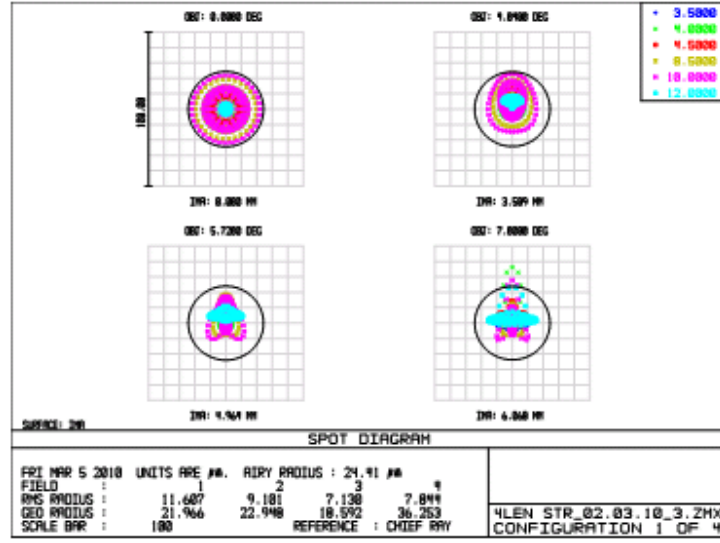
3.8.1 Nokta diyagramı analizleri

Nokta diyagramlarını incelemeden önce sistemin optik çözünürlüğünün ne seviyede olduğunu anlayabilmek için airy disk çaplarını incelemek yararlı olacaktır. Denklem 2.4 ve Çizelge 3.5 kullanılarak hesaplanan airy disk çapları Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12 Airy disk çapları (optik çözünürlük)

Dalgaboyu (μm)	Airy Disk Çapı (μm)
3.50	8.54
4.00	9.76
4.50	10.98
8.50	20.74
10.00	24.40
12.00	29.28

Çizelgeden optik çözünürlüğün 9 ile 30 μm arasında değiştiği gözlenmektedir. Geniş dalgaboyu aralığını kapsayan sistemlerde elde edilen optik çözünürlük değerleri arasında kalacak piksel boyutlu bir dedektör kullanmak uygun olacaktır. Şekil 3.10’da ikinci konfigürasyon 20°C sıcaklıktaki ve Çizelge 3.6’de verilen dört alan noktası için nokta diyagramı örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.10 İkinci konfigürasyon için nokta diyagramı örneği

Diyagramda airy disk çapı olarak (siyah dış halka) 10 μm , dalgaboyu için hesaplanan 24.4 μm kullanılmıştır. Tüm konfigürasyonların odak düzlemindeki nokta çapları Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.13 Odak düzleminde ki nokta çapları

Sıcaklık	Alan	Airy Disk Çapları (μm)				Gnl. Ort
		20	-35	-10	50	
1. Konf.	0	18.198	54.979	38.198	31.948	
	4.4	23.195	63.658	45.202	43.246	
	5.7	28.212	67.642	47.974	51.778	
	7.0	32.776	73.95	53.028	57.922	
	Ort.	25.60	65.06	46.10	46.22	
2. Konf.	0	21.966	21.413	22.349	21.624	
	4.4	22.948	25.128	21.848	24.096	
	5.7	18.592	21.453	17.12	20.112	
	7.0	36.253	45.389	31.318	41.244	
	Ort.	24.94	28.35	23.16	26.77	
3. Konf.	0	22.696	58.731	42.294	25.522	
	4.4	22.922	61.027	43.205	34.959	
	5.7	25.898	53.542	36.403	42.77	
	7.0	48.615	43.652	27.086	70.138	
	Ort.	30.03	54.24	37.25	43.35	

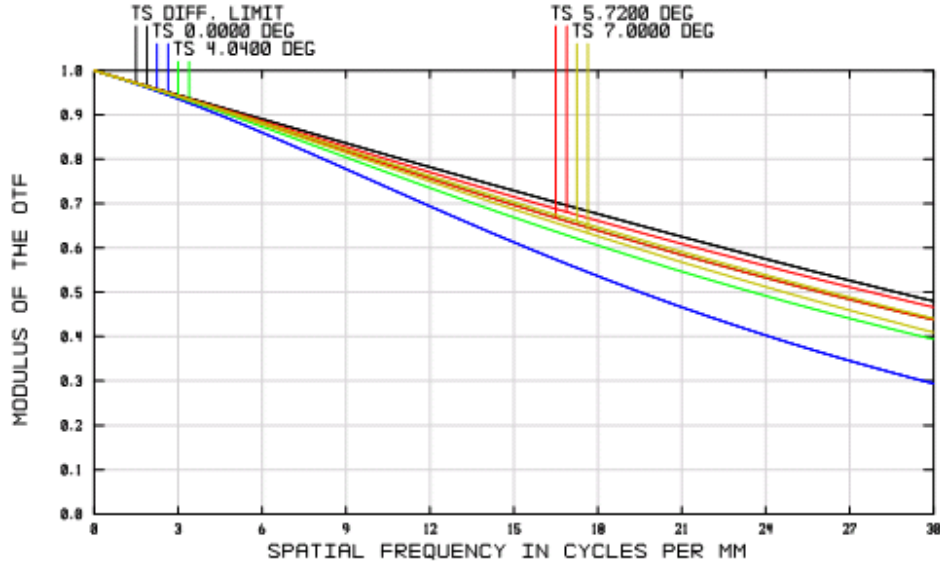
*Ort: Ortalama

**Gnl. Ort: Genel ortalama

Çizelge 3.13 incelendiğinde oda sıcaklığında (20°C) her ne kadar en düşük nokta çapı ikinci konfigürasyonda elde edilmiş olsa da üç tasarımın birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Yüksek ve düşük sıcaklıklara bakıldığında ise farklılıklar gözlenmektedir. Birinci ve üçüncü konfigürasyonda nokta çapları oldukça büyük değerlere ulaşırken ikinci konfigürasyonda oldukça küçük değişimler olduğu görülmektedir.

3.8.2 Modülasyon transfer fonksiyonu analizleri

Optik bir sistemin performansını ölçerken kullanılan en önemli kriter MTF'dir. Bunun nedeni MTF'in sistemin tamamı hakkında bilgi vermesidir. Bir sistemin MTF'i sistem altındaki her bir bileşenin MTF'lerinin toplamına eşittir. Örnek olarak bir kamera sistemi için toplam MTF en önemli bileşenler olan optik parçalar, dedektör ve okuma elektroniklerinin MTF'leri toplamıdır. Benzer şekilde optik bileşenlerin MTF'i ise odaklama⁷, aberasyonlar, toleranslar gibi tüm değişkenlerin bir toplamıdır (Smith 2004). Örnek olarak, ikinci konfigürasyonun, 20°C sıcaklıkta, dört alan noktası için MTF eğrileri Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11 İkinci konfigürasyon için MTF diyagramı örneği

⁷ MTF değerinin en büyük olduğu nokta aynı zamanda sistemin en iyi odak noktasıdır (best focus).

Şekilde yatay ve dikey eksen olmak üzere her açı değeri için iki eğri (sıfır derece hariç) ve kırınım limitini gösteren bir eğri bulunmaktadır. Kırınım limiti⁸ eğrisi teorik olarak istenilen parametreler ile ulaşılabilecek en yüksek MTF değerini temsil etmektedir. Tüm konfigürasyonların 20°C sıcaklıktaki MTF eğrileri EK 2 kısmında verilmiştir.

Konfigürasyonların 30 çizgi çifti/mm frekansında tüm sıcaklık ve görüş alan noktaları için hesaplanan MTF değerleri Çizelge 3.14’te verilmiştir.

Çizelge 3.14 MTF analiz sonuçları

	Alan		Sıcaklık		20°C		-35°C		-10°C		50°C		Gnl.Ort.
	Yön*	Kır.Lim.**	Tan	Sag	Tan	Sag	Tan	Sag	Tan	Sag	Tan	Sag	
1. Konf.	0	0.48	0.402		0.005		0.143		0.238				0.19
	4.04		0.348	0.400	0.016	0.006	0.141	0.204	0.209	0.186			
	5.72		0.302	0.379	0.018	0.026	0.137	0.262	0.183	0.143			
	7.0		0.263	0.349	0.023	0.053	0.130	0.310	0.161	0.111			
	Ort.		0.36		0.02		0.18		0.18				
2. Konf.	0	0.48	0.294		0.271		0.304		0.283				0.39
	4.4		0.394	0.438	0.380	0.424	0.400	0.444	0.387	0.431			
	5.7		0.438	0.466	0.430	0.466	0.440	0.466	0.434	0.466			
	7.0		0.441	0.410	0.441	0.420	0.439	0.404	0.442	0.415			
	Ort.		0.40		0.39		0.40		0.39				
3. Konf.	0	0.48	0.397		0.039		0.106		0.295				0.21
	4.4		0.374	0.398	0.002	0.007	0.170	0.276	0.218	0.183			
	5.7		0.338	0.304	0.030	0.143	0.210	0.398	0.158	0.108			
	7.0		0.294	0.190	0.048	0.303	0.239	0.410	0.110	0.069			
	Ort.		0.34		0.08		0.24		0.18				

*Yön, yatay/düşey

**Kır.Lim.; Kırınım limitli sistemin MTF değeri.

Tüm değerler 30 çizgi çifti/mm cinsinden verilmiştir.

Çizelge incelendiğinde tüm konfigürasyonların 20°C için iyi başarımlar sergilerken nokta diyagramı analizinde olduğu gibi yüksek ve düşük sıcaklıklarda başarımlarının oldukça azaldığı gözlenmektedir.

⁸ Kırınım limitli optik sistem üzerinde hiçbir aberasyon olmayan sistemdir.

3.9 Termal Başarım Değişimi

Sıcaklık değişiminin sistem üzerindeki en önemli etkilerinden biri aksel odak sapmasıdır. Sıcaklık sonucu sistemin odağının değişmesinin yanı sıra mekanik elemanların da uzunlukları değişeceği için bu tip sistemlerde görüntü tam olarak detektör üzerine odaklanamaz. Bir sistemin görüntü kalitesi bozulmadan tolere edebildiği en büyük odak derinliği teorik olarak (Born 2005),

$$\Delta f = \pm \frac{1}{2} \left(\frac{f}{a} \right)^2 \lambda \quad 3.19$$

şeklinde ifade edilir. Burada “ f ” odak uzaklığı, “ a ” yarı optik açıklık, ve “ λ ” ışığın dalgaboyunu göstermektedir. Bölüm 3.5’de belirlenen dalga boyları için odak derinlikleri Çizelge 3.15’de verilmiştir.

Çizelge 3.15 Dalgaboyuna karşılık odak derinlikleri

	Dalgaboyu (μm)	Odak Derinliği " Δz " (mm)
1	3.50	± 0.044
2	4.00	± 0.050
3	4.50	± 0.056
4	8.50	± 0.106
5	10.00	± 0.125
6	12.00	± 0.150

Öte yandan gerçek odak derinliği, sistemdeki son optik elemanın tepe noktasından görüntü düzlemine kadar olan mesafenin (arka odak uzaklığı) mekanik ve optik olarak ne kadar değiştiği hesaplanarak bulunabilir. Arka odak uzaklığındaki mekanik değişim kolayca boyuna genleşme denkleminden hesaplanabilir.

$$\Delta L = \alpha L (\Delta T) \quad 3.20$$

Denklemdede ΔL sistem boyundaki değişim α genleşme katsayısı ve ΔT sıcaklık aralığını temsil etmektedir. Odak noktalarındaki optik değişimi ise uç noktalardaki (-35 ve +50°C) konfigürasyonlardan elde edilebilir.

Tasarımdan alınan optik görüntü düzlemi, mekanik görüntü düzlemi ve odak sapması değerleri ise Çizelge 3.16'de verilmiştir.

Çizelge 3.16 Odak sapması

	Sıcaklık °C	Mekanik Arka Odak Uzaklığı (mm)	Optik Arka Odak Uzaklığı (mm)	Odak kayması (µm)
1. Konf.	20°C	28,362	28,362	0,000
	-35°C	28,326	28,479	-152,878
	50°C	28,382	28,303	78,570
2. Konf.	20°C	38,997	38,997	0,000
	-35°C	38,948	38,981	-33,331
	50°C	39,024	39,036	-12,092
3. Konf.	20°C	29,017	29,017	0,000
	-35°C	28,980	29,085	-104,707
	50°C	29,037	28,928	109,022

Çizelge 3.15 – Çizelge 3.16 birlikte incelendiğinde, birinci konfigürasyonun -35° C'de en uzun dalgaboyu için bile hesaplanan toleransdan büyük olduğu, üçüncü konfigürasyonun ± 106 µm değişim gösterdiği, ikinci konfigürasyonun ise en dar odak derinliği 44 µm için (3.5 µm dalgaboyu için) bile odak kaymasının en çok 33.3 µm olduğu görülmektedir.

4 TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında 3 – 12 µm dalgaboyu aralığında çalışabilen, -35 ° C ile +50° C arasındaki sıcaklık değişiminden etkilenmeyen bir objektif optik tasarımı yapılmıştır. Sıcaklık ve dalgaboyu değişiminin optik parametreler üzerindeki etkileri formülize edilmiştir. Bu formülasyon ile piyasada bulunan mevcut malzemeler kullanılarak hem renklenmeden hemde sıcaklık farkından etkilenmeyecek bir tasarım yapıp yapılamayacağı araştırılmıştır. Matematiksel olarak mevcut beş malzemenin ikili kombinasyonlarının renklenmeyi, üçlü kombinasyonlarının ise hem renklenme hemde ısıl etkileri yok etmek için bir çözüm olacağı sonucuna varılmıştır. Fiziksel çözümde ise bundan farklı olarak belirli koşulları sağlayan malzemelerin seçilmesi durumunda daha iyi çözümlere ulaşılabileceğini göstermiştir. Yöntemin doğruluğunu gösterebilmek için renklenmeyi önleyeceği düşünülen iki malzemeli bir tasarım, fiziksel çözümü sağlayan ve sağlamayan üç malzemeli tasarımlar olmak üzere toplam üç tasarım yapıp sonuçlar verilmiştir.

Birinci konfigürasyonda renklenmeye çözüm bulunurken sıcaklık değişimi sonucu oluşacak bozulmaları giderme konusunda yeterli olmayacağı düşünülen “ZnS_B – AMTIR1” kullanılmıştır. Çizelge 3.13 - 3.14 incelendiğinde ise, oda sıcaklığında başarımlar açısından birinci konfigürasyonun diğer iki tasarımdan çok farklı olmadığı gözlenmiştir. Oda sıcaklığında nokta çapları en küçük olan ikinci konfigürasyondan sadece %2.5 büyükken, MTF değerleri %10 daha düşüktür. Sıcaklık farkları arttığında ise analiz değerleri kötüleşmektedir. -35 °C'ye gelindiğinde nokta çapları %260 artarak 65 µm mertebelerine ve MTF değerleri %95 düşerek %2 mertebelerine gelmiştir. Bu sonuçlar, teorik bilgi ile uyuşur biçimde birinci konfigürasyonun renk hatalarını önlemeye yardımcı olurken sıcaklık farkı sonucu oluşan bozulmaları önlemede yetersiz kaldığını göstermiştir.

İkinci konfigürasyonda bölüm 3.4.2'de anlatılan problemin fiziksel çözümü olarak bulunan AMTIR1-ZnS_B-Ge kullanılmıştır. Çizelge 3.13 - Çizelge 3.15 incelendiğinde ikinci konfigürasyonun dalgaboyu ve sıcaklık aralığı boyunca son derece kararlı bir başarımlar sergilediği görülebilir. Sıcaklık aralığı boyunca nokta çaplarında gözlenen

değişim $\pm\%10$ iken ortalama MTF'de oluşan değişim ise ancak $\%2.5$ seviyelerindedir. Nokta çapları incelendiğinde altı dereceye kadar sistemin tüm sıcaklık aralığı boyunca kırınım limitli performans gösterdiği ancak daha sonra noktaların airy disk içinden çıktığı gözlenmektedir. İkinci konfigürasyonda da teorik bilgiyi doğrular biçimde, yapılan tasarım hem renk hatalarının hem de sıcaklık etkilerinin giderilmesinde en iyi başarıyı göstermektedir.

Üçüncü konfigürasyonun analiz çizelgeleri incelendiğinde oda sıcaklığında en büyük nokta çapına sahipken sıcaklık aralığına bakınca birinci konfigürasyona göre daha kararlı olduğu görülebilir. MTF analizlerinde de benzer şekilde, oda sıcaklığında en düşük değeri alınırken sıcaklık aralığı boyunca birinci konfigürasyona göre daha kararlıdır. Bu durum ikinci konfigürasyonun diğer iki konfigürasyona göre ne renk hatalarını ortadan kaldırma konusunda ne de atermal olarak iyi olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak bu tez çalışmasında yapılan üç tasarımın başarımları teorik bilgiler ile uyumlu sonuçlar sergilemiştir.

Sonuç olarak ikinci konfigürasyonda yapılan tasarım tüm sıcaklık ve dalgaboyu aralığı boyunca son derece kararlı ve kırınım limitine oldukça yakın başarımlar göstermiştir. Bu sayede aktif yöntemlere başvurmadan, kırıcı optik malzemeler kullanarak, büyük görüş açılı düşük maliyetli, sistem karmaşıklığı en alt seviyede tutulan bir optik tasarım olduğu ortaya çıkarılmıştır. Böyle bir sistemin kullanılmasının yararlı olacağı kanısındayım.

KAYNAKLAR

- Anonymous. 2010. http://www.janostech.com/knowledge_center/amt_material.html, Erişim Tarihi: 23/07/2010
- Anonymous. 1983. Comporary Methods of Optical Manufacturing and Testing Proc. San Diego, California
- Anonymous. 2007. Zebase Optical Design Database Version 5.0. Zemax Development Corp.
- Anonymous. 2010. Zemax Optical Design Program User's Manual. Zemax Development Corp.
- Anonymous. 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window, Erişim Tarihi: 09/07/2010
- Anonymous. 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_detector, Erişim Tarihi: 17/08/2010
- Anonymous. 2010. Zemax-EE™. <http://www.zemax.com> , Erişim Tarihi: 03/08/2010
- Born, M. Wolf, E. 2005. Principles of optics, 7th Edition, Publishing House of Electronics Industry, Beijing, 407-408.
- Borniol, E. and Baylet, J., Zanatta, J.P., Mibord, S., Gravrand, O., Rothan, F., Castelein, P., Chamonal, J.P., Ravetto, M. and Destéfanis, G. 2003. Dual-Band Infrared HgCdTe Focal Plane Array. Proc. SPIE, Vol. 4820, 491
- Cooper, E. 1989. Wide Spectral Band Infrared Refractive Lens. USP 4,871,219.
- Daniels, A. 2009. Infrared Systems – Technology & Design. SPIE DSS 2009, USA
- Dereniak, E.L., ve Boreman, G.D. 1996. Infrared Detectors and Systems. Wiley Series in Pure and Applied Optics, USA
- Eker S.U., Kaldirim, M., Arslan, Y. and Besikci, C. 2008. Large-Format Voltage-Tunable Dual-Band Quantum-Well Infrared Photodetector Focal Plane Array for Third-Generation Thermal Imagers. IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 29, NO. 10.
- Gibbons, R. 1976. Athermal Infrared Optics, Gibbons Equipment Group, Texas Instruments Inc.
- Goldberg, A.C., Kennerly, S.W., Little, J.W., Shafer, T.A., Mears, C.L, Schaake, H.F., Winn, M., Taylor, M., Uppal, P.N. 2003. Comparison of HgCdTe and quantum-well infrared photodetector dual-band focal plane arrays. SPIE Opt. Eng. 42(1) 30–46.
- Harris, C.D. 1999. Materials for Infrared Windows and Domes. SPIE Optical Engineering Press.
- Hecht, E. 2005. Hecht & Optik, Akademi Kitap evi.
- Hill, D., 2007. Advance Optical Design Using Zemax. Zemax Development Corp.
- Holst, G.C. 2008. Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems 3rd Edition. JSD Publishing SPIE Press, Florida
- Holst, G.C. 2003. Holst's Practical Guide to Electro-Optical Systems. JSD Publishing, Florida.
- Jacobs, P.A. 1996. Thermal infrared characterization of Ground Targets and Backgrounds. Tutorial Texts in Optical Engineering Volume TT26, 9,10 p
- Jenkis F.A., White H.E., 1951. Fundamentals of optics. McGraw-Hill Publ. Comp., London, 149 p

- Kaldirim, M., Eker, S.U., Arslan, Y., Tumkaya, U. and Besikci, C. 2008. Large-Format Voltage-Tunable Dual-Color Midwavelength Infrared Quantum-Well Infrared Photodetector Focal Plane Array. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 20, NO. 9.
- Kidgar, M.J. 2002. Fundamental Optical Design. SPIE Press, Washington
- Kim, N., 2006. Optical Design Using Zemax. Zemax Development Corp.
- Kumler, J. 2005. Designing and specifying aspheres for manufacturability. Proc. SPIE, Vol. 5874
- Li, H., Shen, M. 2008. An optically passive athermal infrared optical system. Proc. SPIE Vol 7060 706010.
- Milton, L. 1995. Lens Design, Third Edition Revised and Expanded, Marcel Dekker Inc.
- Oliva E., ve Gennari S., 1995. Achromatic Lens Systems for Infrared Instruments. Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, I-50125, Italy
- Özer, Y.C. 2006. Determination of the most suitable wavelength intervals for optical data transmission through the atmosphere.
- Rahmlow, T., Lazo-Wasem, J., Wilkinson, S. And Tinker, F. 2008. Dual band antireflection coatings for the infrared. Proc. SPIE 6940.
- Rogalski, A. ve Chrzanowski, K. 2002. Opto-Electronics Review, 10, (2), 111
- Rogers, J.P. 1991. Athermalisation of IR optical systems. Critical Review Vol. CR38, Infrared optical design and fabrication, SPIE.
- Simmons, R., Manning, P., and Chamberlain, T. 2004. The design of passively athermalised narrow and wide field of view infrared objectives for the observer unmanned air vehicle. Proc. SPIE 5612, pp. 236-248.
- Smith, W.J. 2000. Modern Optical Engineering, Third Edition, Mcgraw-Hill Professional Engineering.
- Smith, W.J. 2004. Modern Lens Design, Second Edition, Mcgraw-Hill Professional Engineering.
- Ucar, A. and Kabak, M. 2010. Optical design of a broadband (3 - 12 μm) athermal infrared imager. Infrared Technology and Applications XXXVI, Proceedings Vol. 7660
- Ucar, A. and Özkan, B. 2010. Comparison of midwave and longwave infrared detectors used in aerial applications. Infrared Technology and Applications XXXVI, Proc. SPIE, Vol. 7660
- Ucar, A., Kandemir, K. and Şendoğdu, Ş. 2010. Comparison of four midwave (3-5 μm) f2 objectives in the sense of their thermal performance. Infrared Technology and Applications XXXVI, Proceedings Vol. 7660
- Yoder, P. 2002. Mounting Optics in Optical Instruments, SPIE Press
- Yoder, P. 2006. Mounting Opto-Mechanical Systems Design, SPIE Press

EKLER

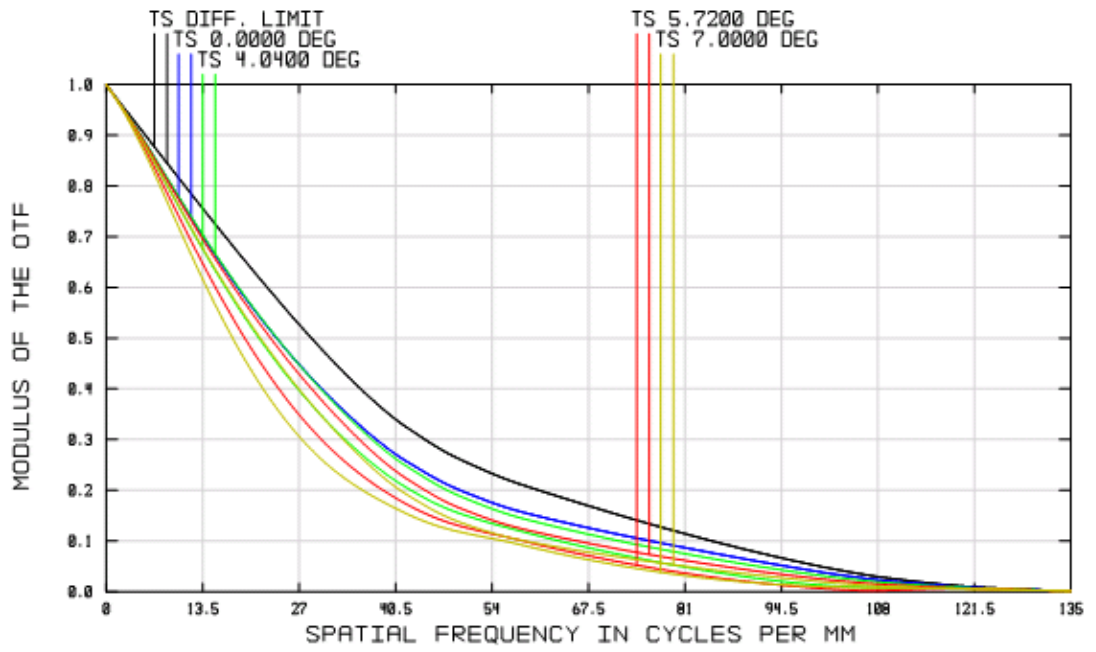
Ek 1: ÇOKLU KONFIGÜRASYON MATRİSİ

EK 2: MTF ANALİZLERİ

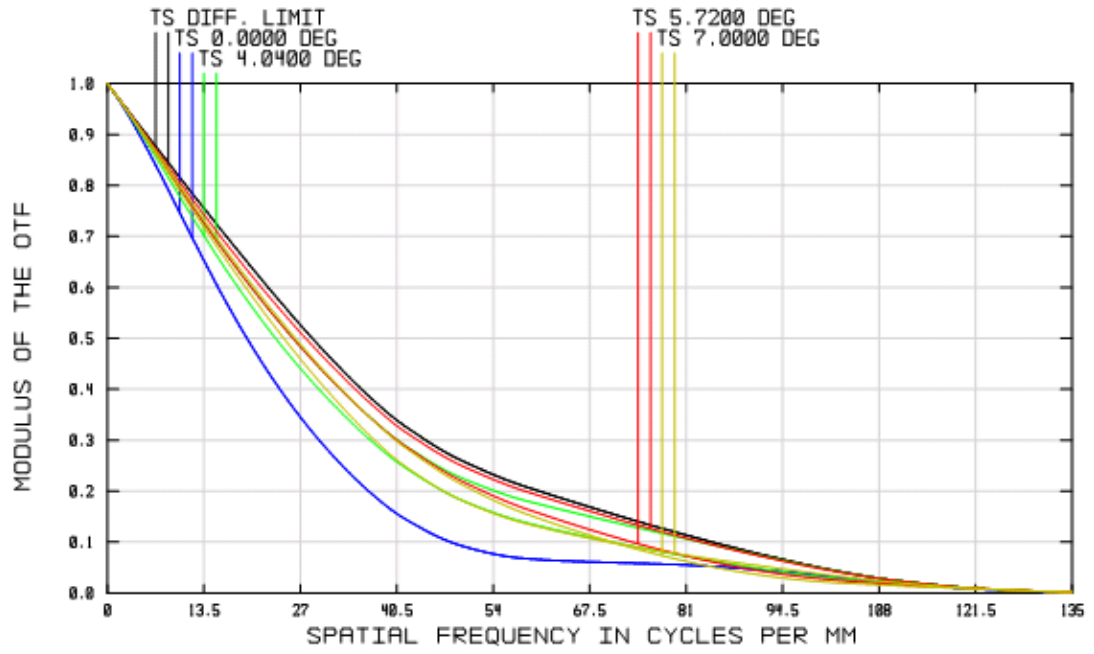
EK 1 ÇOKLU KONFIGÜRASYON MATRİSİ

#	Type	Int1	Config 1	Config 2	Config 3	Config 4
1	TEMP	0	20	-35	50	-10
2	PRES	0	1	1	1	1
3	CRVT	2	1.731E-02	2.039E-02	2.037E-02	1.731E-02
4	CRVT	3	-1.653E-03	2.740E-03	2.737E-03	-1.654E-03
5	CRVT	4	-1.178E-02	-1.182E-02	-1.181E-02	-1.178E-02
6	CRVT	5	-3.279E-03	-2.747E-03	-2.746E-03	-3.280E-03
7	CRVT	6	1.103E-02	2.310E-02	2.309E-02	1.103E-02
8	CRVT	7	2.698E-02	4.326E-02	4.324E-02	2.698E-02
9	CRVT	8	7.328E-03	1.261E-02	1.260E-02	7.331E-03
10	CRVT	9	-1.454E-02	-1.199E-02	-1.198E-02	-1.455E-02
11	THIC	1	25	25	25	25
12	THIC	2	7	7	7	7
13	THIC	3	5	6	6	5
14	THIC	4	5	5	5	5
15	THIC	5	7	6	6	7
16	THIC	6	4	4	4	4
17	THIC	7	13	13	13	13
18	THIC	8	5	4	5	4
19	THIC	9	6	6	6	6
20	THIC	10	32.231	32.956	33.020	32.209
21	GLSS	2	AMTIR1	AMTIR1	AMTIR1	AMTIR1
22	GLSS	4	GERMANIUM	GERMANIUM	GERMANIUM	GERMANIUM
23	GLSS	6	ZNS_BROAD	ZNS_BROAD	ZNS_BROAD	ZNS_BROAD
24	GLSS	8	AMTIR1	AMTIR1	AMTIR1	AMTIR1
25	SDIA	2	23.000	22.985	23.008	22.992
26	SDIA	3	21.500	21.486	21.508	21.492
27	SDIA	4	17.000	16.995	17.003	16.997
28	SDIA	5	19.500	19.494	19.503	19.497
29	SDIA	6	17.000	16.994	17.003	16.997
30	SDIA	7	14.000	13.995	14.003	13.997
31	SDIA	8	15.500	15.490	15.506	15.494
32	SDIA	9	15.500	15.490	15.506	15.494

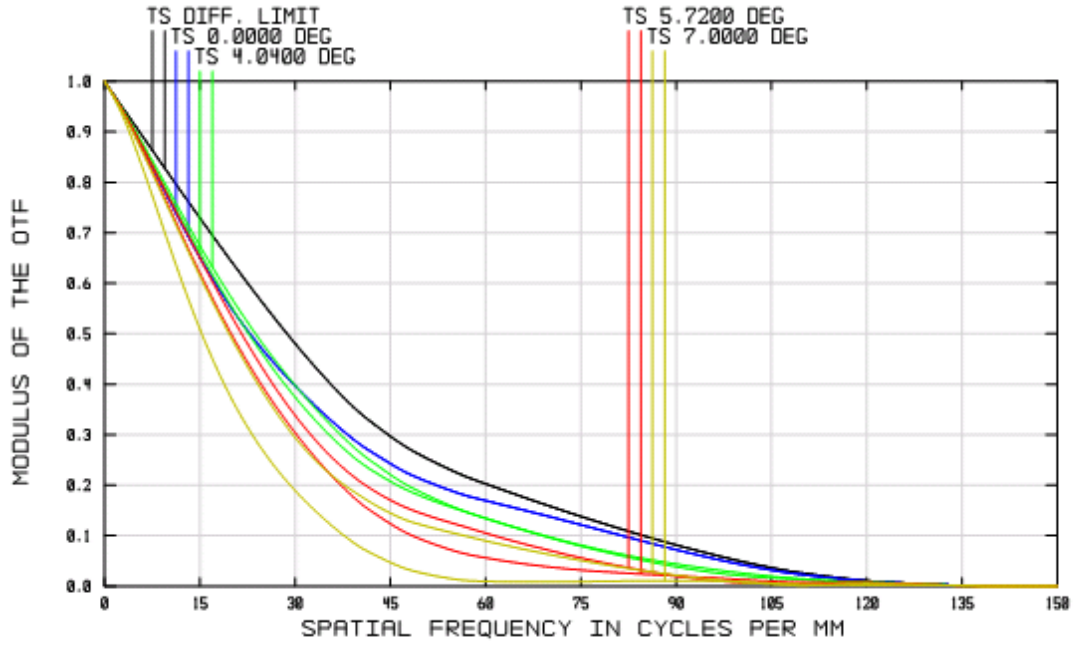
EK 2 MTF ANALİZLERİ



Birinci konfigürasyon



İkinci konfigürasyon



Üçüncü konfigürasyon

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Altuğ UÇAR

Doğum Yeri : ADANA

Doğum Tarihi : 21.04.1981

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Çankaya Milli Piyango Anadolu Lisesi (Haziran 1999)

Lisans : Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği (Ağustos 2006)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2007 – Ekim 2010)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu
Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü
2006 - ...

Yayımları (SCI ve diğer)

Özkan, B., Akmeşe, A., and Ucar, A. 2009. Evaluation of the different configurations of infrared-type gimbaled cameras in the sense of blur. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX, Proceedings Vol. 7300

Ucar, A. and Kabak, M. 2010. Optical design of a broadband (3-12 μm) athermal infrared imager. Infrared Technology and Applications XXXVI, Proceedings Vol. 7660

Ucar, A. and **Özkan, B.** 2010. Comparison of midwave and longwave infrared detectors used in aerial applications. Infrared Technology and Applications XXXVI, Proceedings Vol. 7660

Ucar, A., **Kandemir, K.** and **Şendoğdu, Ş.** 2010. Comparison of four midwave (3-5 μm) f2 objectives in the sense of their thermal performance. Infrared Technology and Applications XXXVI, Proceedings Vol. 7660

Ucar, A., **Kandemir, K.** and **Şendoğdu, Ş.** 2010. Dört farklı orta kızılötesi (3-5 μm) f2 objektifin sıcaklık değişimi altındaki başarımlarının karşılaştırılması. SAVTEK 5. Savunma Teknolojileri Kongresi, ODTU, Ankara