

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**YÜZEY EŞLENİKLİ OPTİK YAPILARIN GÖRÜNTÜLEME
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ VE ANALİZİ**

Yasemin DEMİRHAN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2026**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

YÜZEY EŞLENİKLİ OPTİK YAPILARIN GÖRÜNTÜLEME PERFORMANSININ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ VE ANALİZİ

Yasemin DEMİRHAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Küresel kubbenin hava direnci, yüksek Mach hızlarında uçan konformal kubbeye göre daha fazladır. Bu nedenle, sistemin aerodinamik performansını artırmak için konformal kubbe tercih edilmektedir. Ancak konformal kubbe, şekli ve karakteristik özellikleri nedeniyle optik performansı düşürmektedir. Bu sebeple, optik tasarım serbest biçimli (free-form) yüzeylere sahip hareketli mercekler kullanılarak düzeltilmiştir. Konformal kubbenin karakteristiklerinden kaynaklanan aberasyonlar, Chebyshev polinom yüzeylerine sahip hareketli merceklerle giderilmiştir. Konformal kubbe ile optik sistemlerin tasarımı ve analizi için Ansys Zemax OpticStudio Programı kullanılmıştır. İlk olarak, konformal kubbe üzerinden bakan optik sistem Paraksiyal yüzeyler ile tasarlanıp, ardından bu sistem kalın merceklerle dönüştürülmüştür. Konformal kubbeli optik sistem, $20^\circ (\pm 10)$ ve $30^\circ (\pm 15)$ görüş alanı için tasarlanmıştır. Bu tasarımların MTF (Modülasyon Transfer Fonksiyonu) ve Zernike Katsayıları grafiklerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada konformal kubbe kullanılan optik sistemde, soğutmalı kırıcı tipte (refraktif) bir MWIR (Orta Dalga Kızılötesi) objektif olup, mümkün olan en az sayıda mercek ile tasarlanmıştır. Bu sayede daha üretilebilir bir tasarım elde edilmesi amaçlanmıştır. Aerodinamik performans konformal kubbe ile iyileştirilmiş, konformal kubbenin temel sorunu olan optik performans kaybı ise özel serbest biçimli yüzeylerin birbirlerine göre hareket ettirilmesiyle çözülmüştür.

Mart 2026, 78 sayfa

Anahtar Kelimeler: Konformal kubbe, Chebyshev Polinomu, serbest form, aerodinamik, optik sapmalar

ABSTRACT

PhD Thesis

IMAGING PERFORMANCE IMPROVEMENT METHODS AND ANALYSIS FOR CONFORMAL OPTICAL STRUCTURES

Yasemin DEMİRHAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

The air resistance of the spherical dome is higher than that of the conformal dome flying at high Mach speeds. For improving the aerodynamic performance of the system, the conformal dome is preferred. But the conformal dome reduces the optical performance due to its shape and characteristics. For this reason, the optical design is corrected by using dynamic mercekles with free-form surfaces. The aberration induced due to conformal characteristics of the dome is corrected by using dynamic mercekles with Chebyshev Polynomial Surfaces. The Ansys Zemax OpticStudio Program is used to design and analyze optical systems with the conformal dome. Firstly, the optical system that is looking through a conformal dome is designed by paraxial surfaces, then it is converted to thick mercekles. The optical system with a conformal dome is designed for a field of regard of $20^\circ (\pm 10)$ and $30^\circ (\pm 15)$. Their MTF and Zernike Coefficients graphics are compared. In this study, the optical system using a conformal dome is a refractive cooled MWIR objective that is designed such that the smallest number of mercekles possible is used. The purpose of this is to achieve a more manufacturable design. Aerodynamic performance is improved with a conformal dome, and the main problem of the conformal dome, namely, reducing optical performance, is solved by using special freeform surfaces and moving them with respect to each other.

March 2026, 78 pages

Key Words : Conformal dome, Chebyshev Polynomial, freeform, aerodynamic, optical aberrations

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda bana öncülük eden danışman hocam Prof. Dr. Barış AKAOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), tez çalışmam boyunca bana her zorluğumda yardım ve rehberlik eden eş danışmanım Dr. Devrim ANIL'a (ASELSAN A.Ş), sağladıkları moral ve destekleri için arkadaşlarım Türkan DİNÇBAY ve Onur KÜLÇE'ye, benden manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Yasemin DEMİRHAN
Ankara, Mart 2026

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Konformal Yapı.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Kara Cisim Işıması ve Planck Yasası	5
2.2 Geometrik Optik Temel Kavramlar.....	8
2.2.1 Küresel mercekler	8
2.2.2 Küresel olmayan (asferik) mercekler	9
2.2.3 Kırılma	10
2.2.4 Odak noktası.....	10
2.2.5 Etkin odak uzunluğu (effective focal length)	10
2.2.6 Arka odak uzaklığı (back focal length)	11
2.2.7 Giriş açıklık çapı (entrance pupil diameter)	11
2.2.8 F numarası (F number)	12
2.2.9 Görüş alanı (Field of View)	12
2.2.10 Airy disk.....	13
2.3 Optik Kusurlar (Aberasyonlar).....	13
2.3.1 Küresel aberasyon (Spherical aberration).....	14
2.3.2 Koma	15
2.3.3 Astigmatizm	16
2.3.4 Alan eğriliği (Field curvature)	17
2.3.5 Renk kusuru (Chromatic aberration)	18
2.3.6 Biçim bozulması (Distortion)	19
2.4 Optiksel Analiz Parametreleri	20
2.4.1 Nokta diyagramı (Spot diagram)	20

2.4.2 MTF (Modülasyon Transfer Fonksiyonu)	21
2.4.3 Dalga cephesi hatası	21
2.4.4 Seidel diyagramı	22
2.4.5 Işın grafiği (Ray Fan).....	22
2.5 Monte Carlo Tolerans Analizi	23
2.6 Kızılötesi Detektör Çeşitleri	23
2.6.1 Foton detektörleri.....	24
2.6.2 Termal detektörler	24
2.7 Kızılötesi Optik Cam Malzemeler	25
2.7.1 Germanyum (Ge)	26
2.7.2 Silisyum (Silicon-Si)	27
2.7.3 Çinko sülfür (Zinc sulfide - ZnS).....	28
2.7.4 Çinko Selenit (Zinc Selenide-ZnSe).....	28
2.8 Üretim	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1 Küresel Kubbeli Objektif Tasarımı	35
4.1 Sapmaları Düzeltmek için Chebyshev Polinomlu Serbest Formlu Yüzeyle Sahip Konformal Kubbe Tasarımı ve Adımları	40
4.1.1 Paraksiyal tasarım	40
4.2 Literatür ve Denenmiş Tasarım Çalışmaları.....	45
4.3 Chebyshev Yüzeyli Paraksiyal Tasarım	50
4.4 Chebyshev Polinom Yüzeyli Hareketli Merceklerle Konformal Tasarımı (FOR $\pm 10^\circ$).....	51
4.5 Chebyshev Polinom Yüzeyli Hareketli Merceklerle Konformal Tasarım (FOR $\pm 15^\circ$).....	56
4.6 Narcissus Analiz Sonuçları.....	62
4.7 Tolerans Analiz Sonucu	68
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ.....	78

SİMGELER DİZİNİ

h	Planck sabiti	$J \cdot s$
c	Işığın boşluktaki hızı	m/s
v	Işığın “v” ortamındaki hızı	m/s
λ	Dalga boyu	μm
T	Sıcaklık	K
c	Eğrilik	mm^{-1}
k	Konik sabiti	—
Δf	Odak uzaklığı değişimi	μm
α	Genleşme katsayısı	$10^{-6} K^{-1}$
MTF	Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF)	$cycles/mm$
V	Abbe numarası	—
EFL	Etkin odak uzaklığı (Effective Focal Length)	mm
BFL	Arka odak uzaklığı (Back Focal Length)	mm
ENPD	Giriş Açıklık Çapı (Entance Pupil Diameter)	mm
NITD	Narcissus Induced Temperature Difference	K
FOV	Görüş açısı (Field of View)	$^{\circ}$
FOR	Hareket açısı (Field Of Regard)	$^{\circ}$

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Hava sürtünme katsayısı-incelik oranı grafiği	2
Şekil 1.2 Konformal yapı boyutları.....	3
Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum.	4
Şekil 2.2 $T = 500\text{ K}$ sıcaklığındaki bir kara cisim kaynağı için planck eğrisi grafiği.....	6
Şekil 2.3 Seçilen spektral bant genişliği içindeki ışıınım yayılımı	7
Şekil 2.4 Dalga boyuna göre atmosfer geçirgenliği	7
Şekil 2.5 Mercek çeşitleri.....	8
Şekil 2.6 Küresel mercekler	9
Şekil 2.7 Mercek odak uzaklık gösterimi.....	11
Şekil 2.8 Giriş açıklık çapının gösterimi.....	11
Şekil 2.9 F-Numarasına göre açıklık gösterimi	12
Şekil 2.10 Görüş açısı gösterimi.	12
Şekil 2.11 Airy disk	13
Şekil 2.12 Küresel kusur	14
Şekil 2.13 Küresel aberasyonlu görüntü	15
Şekil 2.14 Koma.....	15
Şekil 2.15 Koma optik aberasyonun görüntü üzerindeki etkisi	16
Şekil 2.16 Astigmatizm.....	16
Şekil 2.17 Alan eğriligi	17
Şekil 2.18 Alan eğriligi aberasyonlu	17
Şekil 2.19 Kromatik aberasyon	18
Şekil 2.20 Kromatik aberasyon	19
Şekil 2.21 Fıçı ve yastık biçim bozulması	20
Şekil 2.22 Spot diyagramı	21
Şekil 2.23 Seidel diyagramı	22
Şekil 2.24 Termal detektör yapısı	25
Şekil 2.25 Optik camların ışık iletim grafiği.....	26
Şekil 2.26 Germanyum mercek.....	27
Şekil 2.27 Silisyum mercek.....	27
Şekil 2.28 Çinko sülfür mercek.....	28
Şekil 2.29 Çinko selenit mercek.....	28

Şekil 3.1 Narcissus bulunan görüntü.....	33
Şekil 4.1 Küresel kubbeli tasarım yerleşimi	36
Şekil 4.2 Küresel kubbeli tasarımın ışın fan grafiği.....	36
Şekil 4.3 Küresel kubbeli tasarımın kromatik odak kayması grafiği	37
Şekil 4.4 Alan eğriliği ve biçim bozukluğu grafiği.....	38
Şekil 4.5 Küresel kubbeli tasarımın MTF grafiği	39
Şekil 4.6 RMS dalga cephesi hatası	39
Şekil 4.8 FOR: 0°'deki MTF grafiği.....	43
Şekil 4.9 FOR: 5°'deki MTF grafiği	44
Şekil 4.10 FOR: 10°'deki MTF grafiği.....	44
Şekil 4.11 Deforme edilebilir ayna	46
Şekil 4.12 Gradyan indisli malzeme	46
Şekil 4.13 Konformal kubbeli gradyan indisli optik sistem.....	47
Şekil 4.14 Gradyan indisli tasarımın MTF grafiği	48
Şekil 4.15 Sabit Chebyshev polinom yüzey mercekli sistem	49
Şekil 4.16 Sabit Chebyshev polinom yüzey mercekli tasarımın MTF grafiği.....	49
Şekil 4.17 Paraksiyal ve Chebyshev polinom yüzeylerinin tasarımı	50
Şekil 4.18 Hareketli Chebyshev yüzeyli konformal optik sistem (FOR:0°).....	51
Şekil 4.19 Merceklerin dönme hareketi	53
Şekil 4.20 Hareketli Chebyshev yüzeylerine sahip konformal optik sistem (FOR:10°)	53
Şekil 4.21 FOR: 0°'deki MTF grafiği.....	54
Şekil 4.22 FOR: 5°'deki MTF grafiği.....	54
Şekil 4.23 FOR: 10°'deki MTF grafiği.....	55
Şekil 4.24 FOR: 10°'deki zernike saçak katsayı grafiği	56
Şekil 4.25 Hareket açılarına göre merceklerin dönme açısı grafiği.....	57
Şekil 4.26 FOR:0 ile 15 derece arasındaki MTF grafiği.....	58
Şekil 4.27 FOR:0 ile -15 derece arasındaki MTF grafiği.....	59
Şekil 4.28 FOR: 0°'deki MTF grafiği.....	60
Şekil 4.29 FOR: 5°'deki MTF grafiği.....	60
Şekil 4.30 FOR: 10°'deki MTF grafiği.....	61
Şekil 4.31 FOR: 15°'deki MTF grafiği.....	61
Şekil 4.32 FOR: 15°'deki zernike saçak katsayı grafiği	62
Şekil 4.33 Yüzeylerin NITD 3 boyutlu grafiği	63

Şekil 4.34 Renklere göre ayrılmış yüzeylerin NITD katkıları	64
Şekil 4.35 Mercek üzerindeki narcissus etkisi	64
Şekil 4.36 Objektifin toplam NITD grafiği.....	65
Şekil 4.37 Narcissus görüntüsü	65
Şekil 4.38 Yüzeylerin NITD 3 boyutlu grafiği	66
Şekil 4.39 Renklere göre ayrılmış yüzeylerin NITD katkıları	66
Şekil 4.40 Toplam yüzeylerin NITD değerleri	67
Şekil 4.41 Narcissus görüntüsü	68
Şekil 4.42 Tolerans için mercek gösterimi.....	69
Şekil 4.43 Kompensatör istatistiği	71
Şekil 4.44 Worst Offenders listesi	71
Şekil 4.45 %90 Üretim veriminde tolerans MTF grafiği	72
Şekil 4.46 %80 Üretim veriminde tolerans MTF grafiği	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Küresel kubbeli tasarım parametreleri	35
Çizelge 4.2 Konformal kubbe parametreleri	40
Çizelge 4.3 Optik sistemin parametreleri	40
Çizelge 4.4 FOR 10°'de merceklerin chebyshev polinom katsayısı	52
Çizelge 4.5 Zernike saçak katsayıları	55
Çizelge 4.6 Dönen merceklerin açıları	56
Çizelge 4.7 FOR 15°'deki merceklerin chebyshev polinom katsayıları	58
Çizelge 4.8 Tolerans değerleri	70

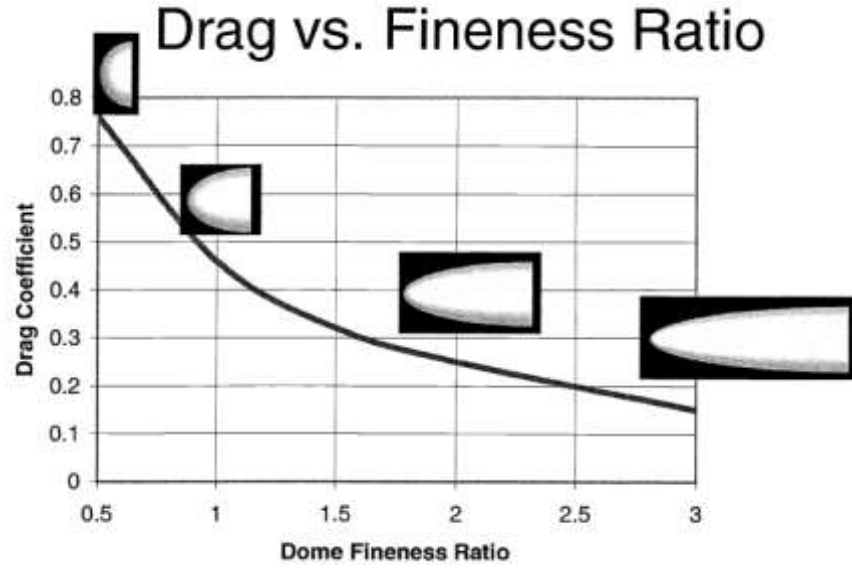
1. GİRİŞ

Konformal kubbeler, özellikle askeri, uzay ve uzaktan algılama uygulamalarında çeşitli optik sistemlerin ayrılmaz bileşenleridir. Bu kubbeler, hassas optik ekipmanları korurken, engelsiz bir görüş imkanı sağlamaktadır. Ancak, bu kubbelerin içsel eğriliği ve şekli, görüntü kalitesini düşüren optik aberasyonlara neden olmaktadır. Bu sorunları azaltmak amacıyla, konformal kubbelerin neden olduğu aberasyonları düzeltmede serbest biçimli (freeform) yüzeylerin kullanılmasının önemi arttırmaktadır. Bu tez, konformal kubbe aberasyonlarını düzeltmek için serbest biçimli yüzeylerin kullanılmasının prensiplerini, yöntemlerini ve faydalarını araştırmaktadır.

Bir kızılötesi hava platformun kubbesinin şekli genellikle küresel veya yarımküreseldir. Bu tür kubbeler, tasarımı ve üretimi nispeten kolay olduğundan ve optik aberasyonları daha düşük olduğu için tercih edilmektedir. Bu nedenle, küresel kubbe bu tür sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, küresel kubbeler kullanıldığında hava platformun aerodinamik performansı göz önünde bulundurulmaz. Hava platformu süpersonik hızda uçtuğunda, küresel kubbe hızı ve menzili önemli ölçüde etkilemektedir. Büyük bir aerodinamik direnç oluşturduğundan dolayı, hava platformun maksimum hızı küresel kubbe tarafından olumsuz etkilenmektedir. Bu sebeple, hızlı uçan platformlar için küresel veya yarımküresel kubbe en iyi tercih değildir. Yarımküresel kubbe uçuş sırasında büyük aerodinamik sürüklenmeye neden olmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, toplam direncin yaklaşık %50'sinin kubbeden kaynaklandığını göstermektedir (Zhang vd. 2018).

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, bu sorunları gidermek amacıyla konformal bir optik sistem geliştirilmiştir. Küresel kubbeye karşılaştırıldığında, konformal kubbe daha iyi aerodinamik performansa ve daha küçük radar kesit alanına sahiptir.

Konformal kubbenin şekli elips, hiperbol, eğri veya daha yüksek incelik oranı (finess ratio) sağlayan diğer asferik formüller olabilmektedir. İncelik oranı arttıkça, kubbenin neden olduğu sürüklenme azalmaktadır (Nelson vd. 2013).



Şekil 1.1 Hava sürtünme katsayısı-incelik oranı grafiği (Nelson vd. 2013)

Şekil 1.1’de, kubbenin sürtünme katsayısının en boy oranı arttıkça kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Örneğin, Mach 3 uçuş hızına sahip hava platformlarında, 1,5 en boy oranına sahip konformal bir yapı kullanıldığında aerodinamik sürtünme, küresel bir yapının yarısı kadardır. Konformal kubbe, hava platformun aerodinamik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiği görülebilmektedir (Zhang vd. 2018).

1.1 Konformal Yapı

Burun yarıçapı r ve konik sabiti k parametreleri, konformal kubbelerin şeklini tanımlamaktadır. Burun yarıçapı ve konik sabiti aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır (Zhang vd. 2013).

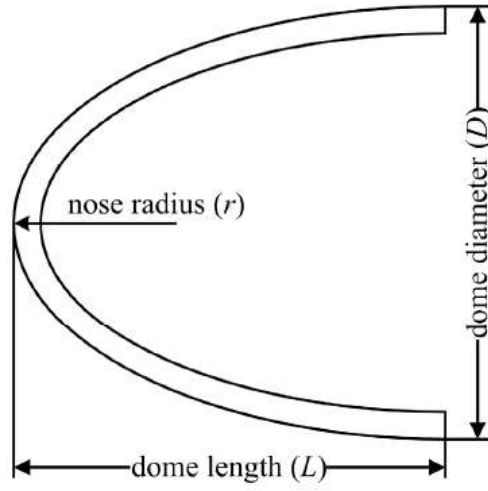
L = Konformal kubbenin uzunluğu

D = Konformal kubbenin çapı

F = İncelik oranı

r = Konformal kubbenin yarıçapı

k = Konformal kubbenin konik sabiti



Şekil 1.2 Konformal yapı boyutları

$$F = \frac{L}{D} \quad (1.1)$$

$$r = \frac{D}{4F} \quad (1.2)$$

$$k = \frac{1}{4F^2} - 1 \quad (1.3)$$

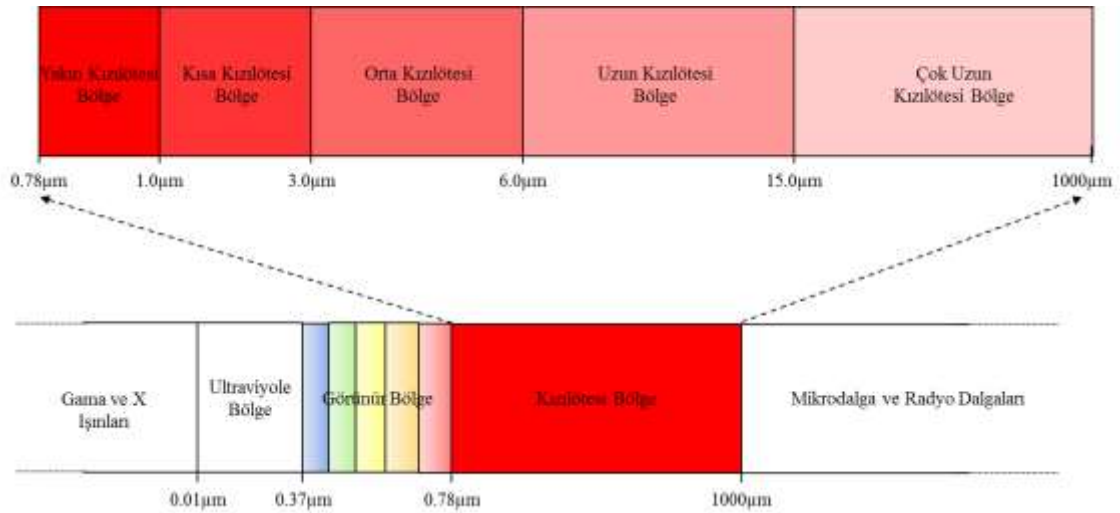
Konformal kubbeler, optik geçirgenliği yüksek ve çevresel koşullara dayanıklı malzemelerden üretilmektedir. Safır, ZnS ve ZnSe gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışma da safır kullanılmıştır. Safır camı geniş spektrumda geçirgenliğe, yüksek mekanik dayanım ve uzun çevresel dayanıma sahiptir. Literatürdeki çalışmalarda da kubbe camı olarak kullanıldığı görülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Kızılötesi dalga boyu, elektromanyetik spektrumda görünür ışığın kırmızı ucunun ötesinde ve mikrodalga bölgesinin öncesinde yer alan ışıyım aralığını ifade etmektedir. Yaklaşık olarak $0,7 \mu\text{m}$ ile $1000 \mu\text{m}$ (700nm – 1mm) arasındaki dalga boylarını kapsamaktadır. Kızılötesi ışınlar insan gözüyle görülemez. Kızılötesi ışıyım, özellikle ısı süreçleriyle ilişkilidir; mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklığa sahip tüm cisimler kızılötesi ışıyım yaymaktadır.

Bu dalga boyu aralığı, maddelerin moleküler titreşim ve dönme hareketleriyle etkileşime girdiğinden, uzaktan algılama, atmosfer bilimi, termal görüntüleme ve astronomi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Atmosferdeki su buharı, karbondioksit ve diğer gazlar kızılötesi ışıyımı belirli bantlarda soğurduğundan, kızılötesi dalga boyları enerji dengesi, sera etkisi ve iklim çalışmalarında kritik bir öneme sahiptir.

Aşağıda elektromanyetik dalga spektrumu ve kızılötesi bölgesi gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum (Küçükçelesi 2015)

Kızılötesi (IR) bölge, görünür ışıktan daha uzun, ancak milimetre dalgalarından daha kısa dalga boylarına sahip tüm elektromanyetik dalgayı kapsamaktadır. IR bölgesi askeri

cihazların da kullanıldığı bant aralığıdır. Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum Şekil 2.1’de IR bölgelerinin dalga boyu aralıkları gösterilmektedir (Rogalski ve Chrzanowski 2014).

Çizelge 2.1 Kızılötesi bölgelerinin dalga boyları

BÖLGE (KISALTMA)	DALGA BOYU ARALIĞI (µm)
Yakın Kızılötesi (NIR)	0.75–1
Kısa Dalga Boyu Kızılötesi (SWIR)	1–3
Orta Dalga Boyu Kızılötesi (MWIR)	3–5
Uzun Dalga Boyu Kızılötesi (LWIR)	8–12
Çok Uzun Dalga Boyu Kızılötesi (VLWIR)	15–1000

Yakın ve kısa kızılötesi bölgelerde algılama, ortam ışıınının hedef cisim tarafından yansıtılan kısmının tespitine dayanmakta; orta ve uzun kızılötesi bölgelerde ise cismin kendi sıcaklığından kaynaklanan termal ışıının esas alınmaktadır. Kızılötesi spektrumun yakın, kısa, orta ve uzun dalga boyu alt bölgeleri, kullanım alanlarına bağlı olarak çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Yüksek sıcaklıktaki hedeflerin görüntülenmesinde orta dalga boyu kızılötesi (MWIR) tercih edilirken, düşük sıcaklıktaki hedefler için uzun dalga boyu kızılötesi (LWIR) bölge daha uygundur.

2.1 Kara Cisim Işınması ve Planck Yasası

Mutlak sıfırın (0 K) üzerindeki tüm cisimler elektromanyetik ışıma yayar ve bu ışıının şiddeti dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir. Bu davranış Planck’ın kara cisim ışıması yasası ile açıklanmaktadır.

Kara cisim, üzerine gelen tüm ışınları soğuran mükemmel bir ışıma kaynağı olarak tanımlanır. Max Planck (1858-1947), kara cismin yaydığı ışıma ile sıcaklık ve dalga boyu arasındaki ilişkiyi bulmak için yaptığı araştırmada, kendi adıyla anılan ünlü denklemi geliştirmiştir. Çalışmaları, 1918’de Nobel ödülünü aldığı kuantum teorisinin temellerini atmıştır (Riedl 2001).

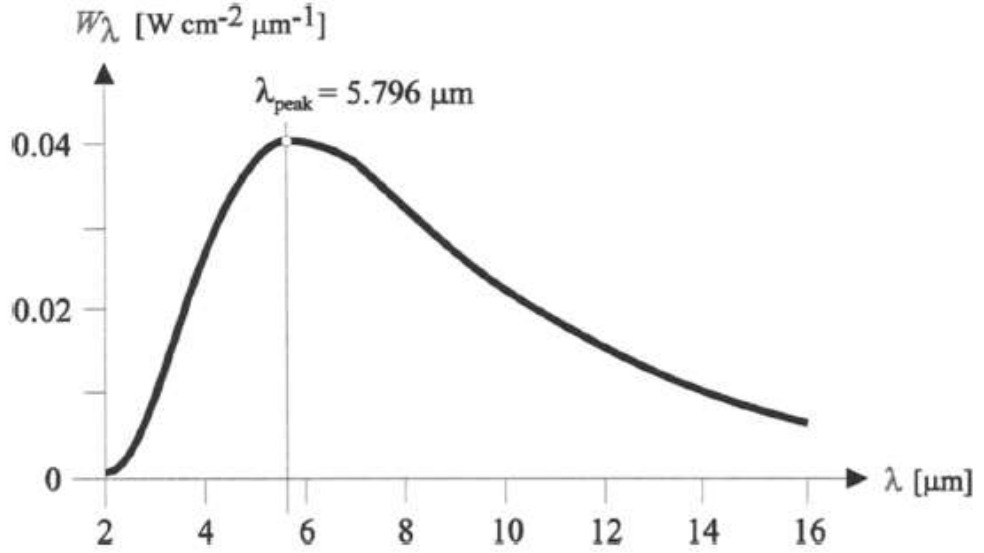
Kara cisim ışıma eğrisini tanımlayan denklem aşağıda gösterilmektedir:

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{C_2/\lambda T} - 1]} \quad (2.1)$$

Burada W: Spektral ışıma yayılımı ($W/cm^2 \cdot \mu m$), λ : Dalga boyu(μm),

T: Kara cisim sıcaklığı (K), alan santimetre karedir ve katsayılar; $C_1 = 37,418$, $C_2 = 14,388$, e:Logaritma tabanıdır. (e:2,718...)

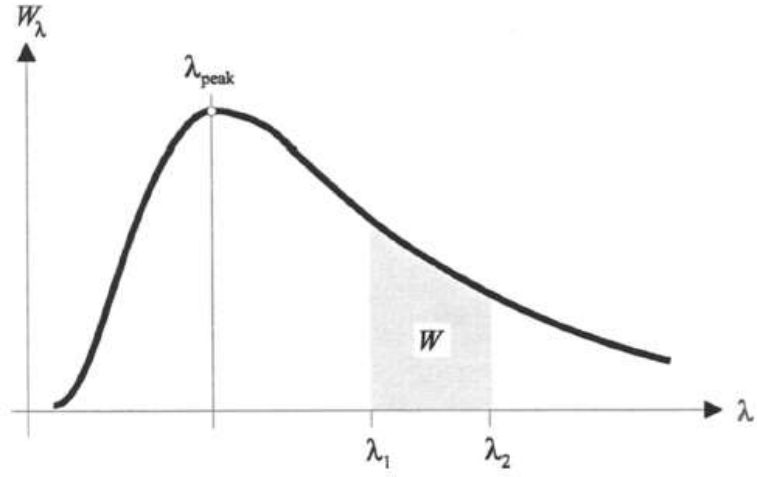
Denkleme baktığımızda kara ışıma eğrisi olan W_{λ} dalga boyuna bağlıdır. Dalga boyu 500 K'lık bir kara cisim için Planck eğrisi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 T = 500 K sıcaklığındaki bir kara cisim kaynağı için planck eğrisi grafiği (Riedl 2001)

Bir spektral bant üzerindeki ışıma yayılımını belirlemek için, sınırlayıcı dalga boyları λ_1 ve λ_2 arasındaki Planck eğrisi altında kalan bölge dahil edilerek hesaplanmaktadır. Seçilen bir spektral bant örneği Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

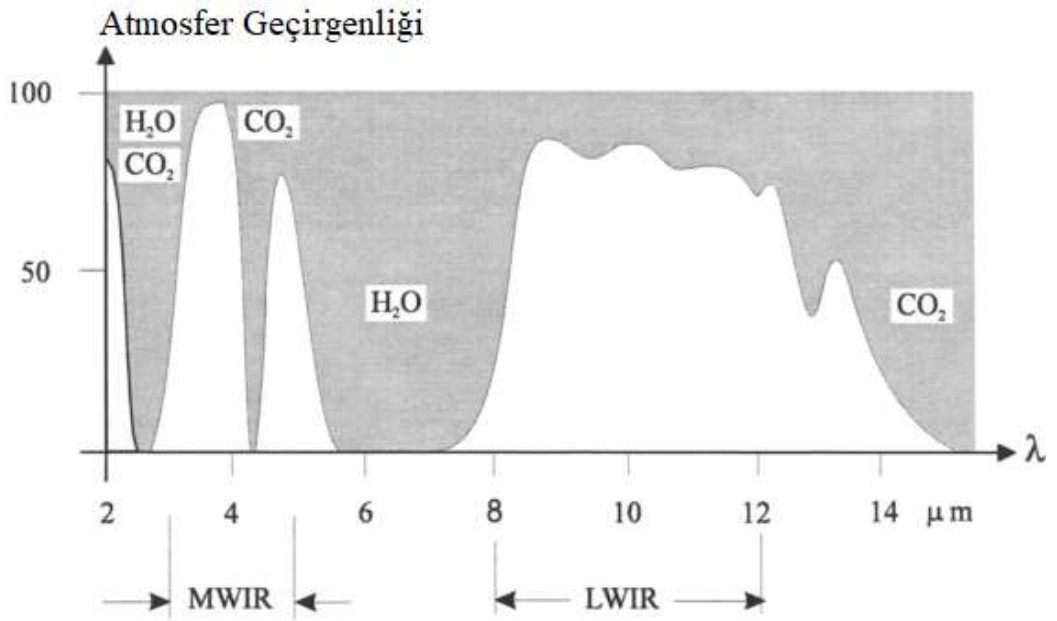
$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda} d\lambda \quad (2.2)$$



Şekil 2.3 Seçilen spektral bant genişliği içindeki ısıtım yayılımı (Riedl 2001)

Atmosferde bulunan su buharı, toz ve çeşitli gaz molekülleri, yayılan ısıtımın dalga boyuna bağlı olarak değişen oranlarda yansıtılmasına ya da soğurulmasına neden olmaktadır. Kızılötesi dalga boyları aralığında atmosfer geçirgenliği su buharı ve karbondioksit gibi moleküllerden etkilenmektedir.

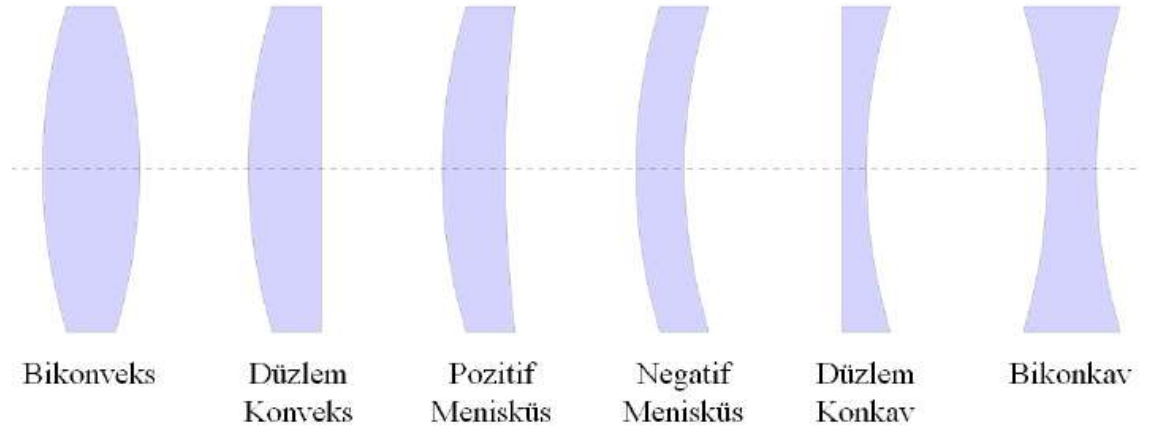
Atmosfer geçirgenliğinin su buharı ve karbondioksitten etkilendiği kızılötesi dalga boyu bölgeleri aşağıda Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Dalga boyuna göre atmosfer geçirgenliği (Riedl 2001)

2.2 Geometrik Optik Temel Kavramlar

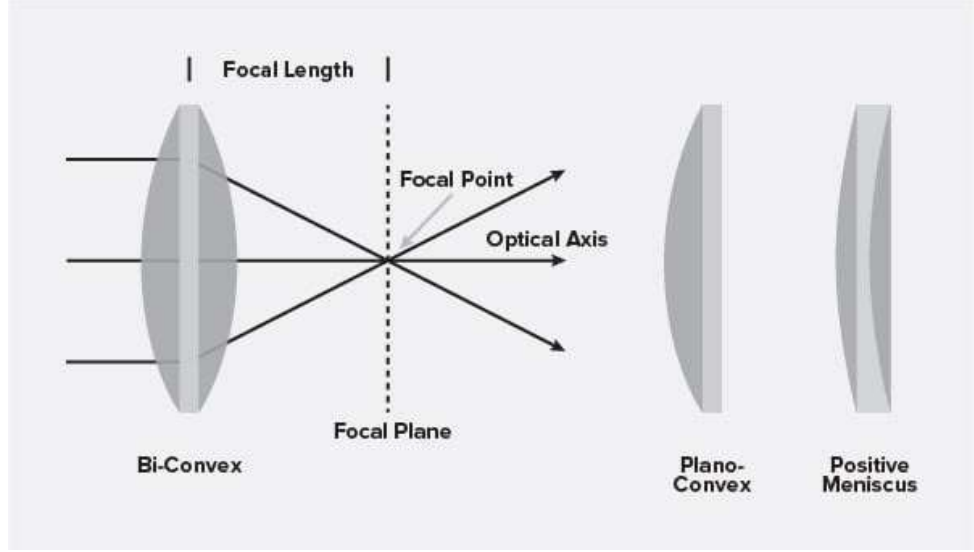
Bu bölümde optik sistem analizinde yararlanılan elemanların, terimlerin, formüllerin ve ilgili kavramların açıklamaları yapılacaktır. Görüntüleme sistemlerinin tasarımı sürecinde, sistemin kullanım amacına bağlı olarak farklı türde merceklerden yararlanılmaktadır. Optik hataların en aza indirilmesi ve odaklamanın daha dar bir alanda gerçekleştirilebilmesi için, optik tasarımlarda çeşitli sayılarda ve özelliklerde mercekler kullanılmaktadır. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi, bu mercekler yüzey geometrilerine göre sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2.5 Mercek çeşitleri (Küçükçelebi 2015)

2.2.1 Küresel mercekler

Küresel mercekler, ışığı genişletmek, odaklamak için kullanılan en yaygın ve temel optik elemanlardır ve optik sistemlerde görüntüleme amacıyla sıklıkla kullanılmaktadırlar. Küresel bir merceğin her bir yüzeyi içbükey (merceğin içine doğru kavisli), dışbükey (merceğin dışına doğru kavisli) veya düz (eğriliği olmayan) olabilmektedir.



Şekil 2.6 Küresel mercekler (<https://lacroixoptics.com/spherical-mercekes>)

2.2.2 Küresel olmayan (asferik) mercekler

Basit bir küresel şekilden sapan küresel olmayan bir yüzey eğriliği ile karakterize edilmektedirler. Asferik yüzey profilinin temel avantajı, merceğin ekseninden çıkan ışığın, merceğin merkezine yakın veya eksen üzerinde (merceğin merkezinden) geçen ışıktan farklı kalınlıkta bir malzemeden geçmesinden kaynaklanan optik bir etki olan küresel sapmaları düzeltme yeteneğidir. Farklı bir malzeme miktarından geçen ışık farklı şekilde kırılır ve bu da her ışığın biraz farklı bir düzlemde odaklanmasına neden olmaktadır (<https://www.meetoptics>).

Küresel olmayan merceklerin tercih edilmesi, optik sistemlerde daha az mercek kullanılmasına olanak tanır ve bu da ağırlık, boyut ayrıca optik kusurlar ile performans bakımından iyileşme sağlar.

Asferik bir yüzey, aşağıdaki denklemle tanımlanabilir;

$$z = \frac{\frac{\rho^2}{r}}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\frac{\rho^2}{r^2}}} + a_1\rho^2 + a_2\rho^4 + a_3\rho^6 + a_4\rho^8 + a_5\rho^{10} + a_6\rho^{12} \quad (2.3)$$

Burada z ve ρ , sırasıyla asferik yüzeyin sarkma (sag) miktarını ve radyal değişkenini (yüzeyin eğrilik yarıçapı değil) ifade etmektedir. r , yüzeyin eğrilik yarıçapını, k ise konik parametreyi temsil etmektedir.

2.2.3 Kırılma

Bir maddenin kırılma indisi, ışığın o madde içinde ilerlerken, boşluktaki hızına oranla ne derece yavaşladığını gösteren bir değerdir. Genellikle “ n ” harfiyle sembolize edilmektedir.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4)$$

Denklemden yer alan v ışığın bir ortamda yayılma hızını; c ise ışığın boşluktaki hızını ifade etmektedir.

2.2.4 Odak noktası

Kendi ışığını yayan ya da dışarıdan aydınlatılan noktasal bir cismin bulunduğu bir sistemde, optik düzenekler aracılığıyla küresel dalgaların bir bölümünün toplandığı veya dağıldığı noktaya odak noktası denir ve bu nokta f harfiyle gösterilmektedir.

2.2.5 Etkin odak uzunluğu (effective focal length)

Etkin odak uzaklığı, tek bir merceğin veya bir mercek grubunun odak uzaklığıdır.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{t(n-1)}{R_1 R_2 n} \right] \quad (2.5)$$

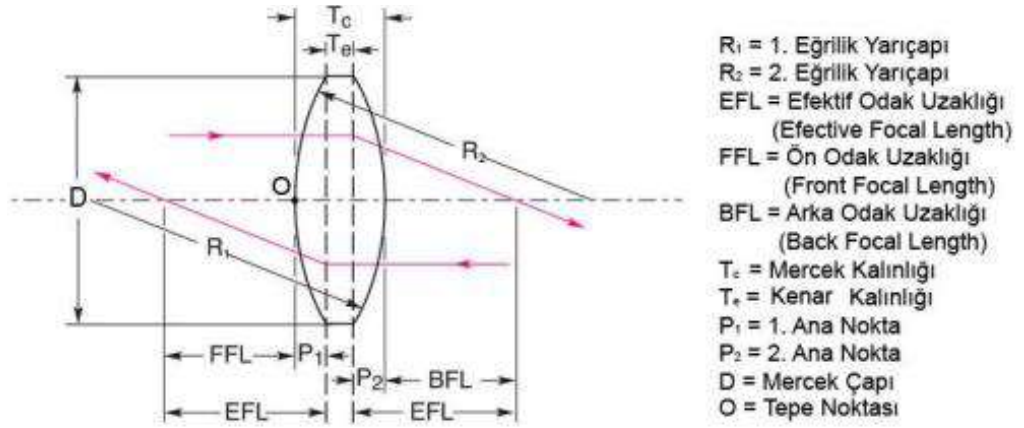
Burada:

- f : merceğin odak uzaklığı,
- n : merceğin kırılma indisi,
- R_1, R_2 merceğin yüzeylerinin eğrilik yarıçapları,

- t : merceğin kalınlığıdır.

2.2.6 Arka odak uzaklığı (back focal length)

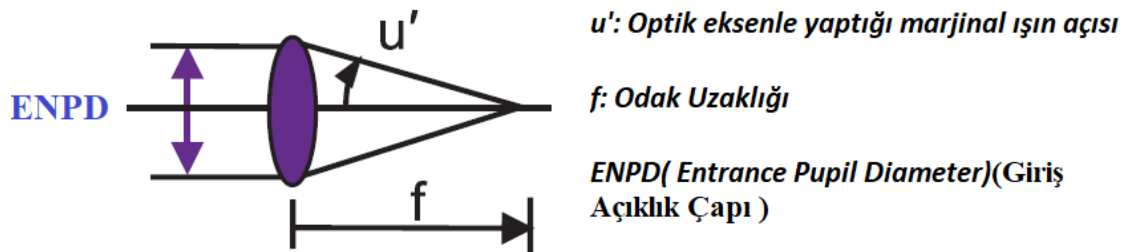
Merceğin arka yüzeyinden odak düzlemine kadar olan mesafe arka odak uzaklığıdır.



Şekil 2.7 Mercek odak uzaklık gösterimi (Uçar 2010)

2.2.7 Giriş açıklık çapı (entrance pupil diameter)

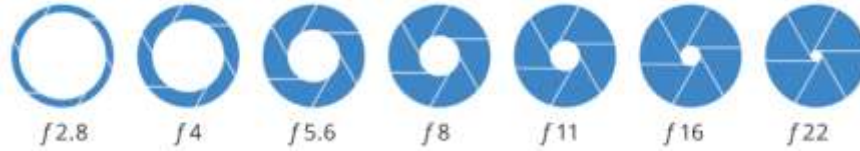
Giriş açıklık çapı nesne uzayındaki ışın demetinin boyutunu belirler ve mercek sistemlerinin açıklığını ifade etmede yaygın olarak kullanılan bir tanımdır (Bentley ve Olson 2012).



Şekil 2.8 Giriş açıklık çapının gösterimi

2.2.8 F numarası (F number)

Bir merceğin odak mesafesinin, giriş açıklık çapına oranına f numarası ($f/\#$) denilmektedir.



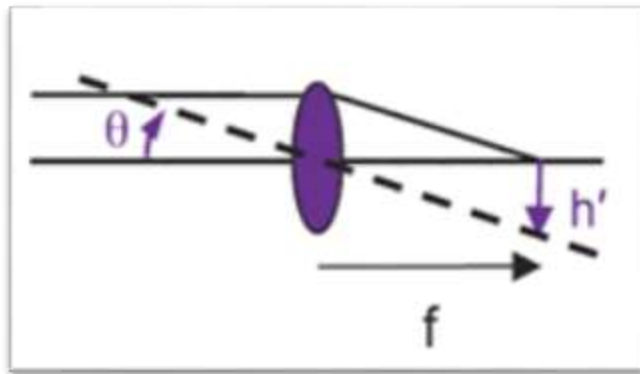
Şekil 2.9 F-Numarasına göre açıklık gösterimi (<https://www.opto-e.com>)

2.2.9 Görüş alanı (Field of View)

Görüş alanı, bir mercek sistemi tarafından görüntülenebilen alanı ifade etmektedir. Bu, nesnenin kameranın sensörünü dolduran kısımdır. Bir optik sistemin görüş alanı (FOV), nesne yüksekliği, nesne açısı veya görüntü yüksekliği olarak belirtilebilmektedir. Görüntü yüksekliği, doğrudan detektörün boyutuyla ilişkilendirilebilmektedir.

Görüş alanının yarısı (HFOV(Half Field of View)), obje yüksekliği (h) veya görüntü yüksekliğinin (h') yarıçapını ifade ederken, tam görüş alanı (FFOV(Full Field of View)) ise bu değerin çapını göstermektedir (Bentley 2012).

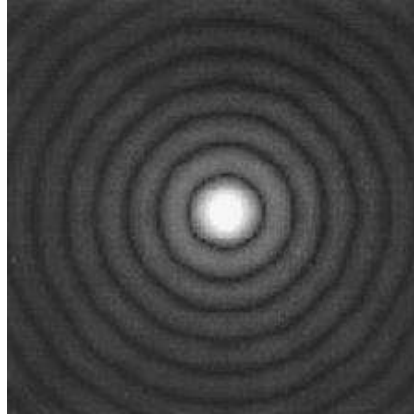
$$h' = f \tan \theta \quad (2.6)$$



Şekil 2.10 Görüş açısı gösterimi (Bentley 2012)

2.2.10 Airy disk

Bir nokta ışık kaynağı tarafından oluşturulan görüntü, Airy disk adı verilen parlak bir merkez bölgesi ile bunun çevresinde parlaklığı giderek azalan halkalardan oluşan bir desen şeklindedir (Şekil 2.11). Işık enerjisinin yaklaşık %84'ü bu merkez bölgesinde, geri kalan kısmının önemli bir bölümü ise, merkezle birinci halka arasında yoğunlaşır ve bu oran toplam enerjinin yaklaşık %91'ine ulaşmaktadır (Smith, 2000).



Şekil 2.11 Airy disk (Fischer vd 2008)

2.3 Optik Kusurlar (Aberasyonlar)

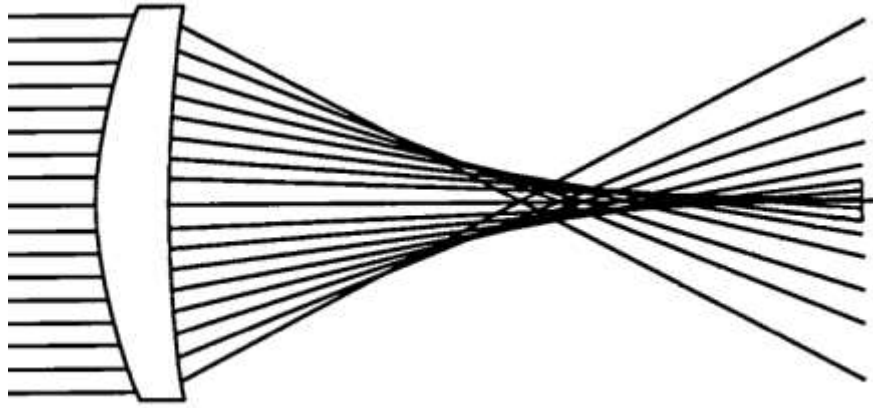
Optik kusurlar veya aberasyonlar, bir optik sistemde (mercek, ayna, mikroskop, teleskop vb.) gelen ışığın ideal odak noktasında toplanamaması sonucu, görüntüde bozulma, bulanıklık, renk sapması veya şekil bozulması gibi hataların oluşmasına neden olan optik hatalardır.

Genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadırlar:

- **Monokromatik aberasyonlar** (tek dalga boyunda da oluşan hatalar)
- **Kromatik aberasyonlar** (farklı dalga boylarının farklı şekilde kırılmasından kaynaklanan hatalar)

2.3.1 Küresel aberasyon (Spherical aberration)

Optik sistemlerde kullanılan küresel merceklerde, optik eksene paralel gelen ve merceğin farklı bölgelerinden geçen ışınlar, mercek yüzeyine farklı açılarla geldikleri için optik eksen üzerinde aynı noktada odaklanmazlar. Bu durum sonucunda, ışınlar tek bir x noktasında birleşmek yerine, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi optik eksen boyunca belirli bir Δx aralığında odaklanmaktadır.

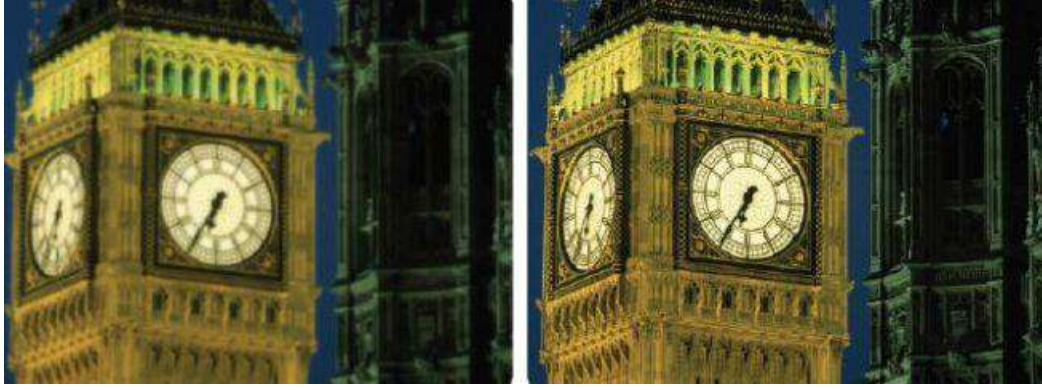


Şekil 2.12 Küresel kusur (Fischer vd 2008)

Bu tür hata, küresel sapma veya küresel kusur olarak adlandırılmaktadır. Küresel olmayan (asferik) yüzeyli özel merceklerin kullanılması veya optik sistemdeki merceklerin oluşturduğu küresel kusurların birbirini dengeleyecek şekilde seçilmesiyle bu hata giderilebilmektedir.

Küresel sapma, optik sistemlerde mercek yüzeyinin küresel geometrisinden kaynaklanan bir odaklama hatası olup, bu etkiyi azaltmak veya ortadan kaldırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, küresel olmayan (asferik) yüzey geometrisine sahip özel merceklerin kullanılması ya da sistemde yer alan merceklerin küresel sapmalarının birbirini dengeleyici (kompanse edici) şekilde tasarlanması yer almaktadır.

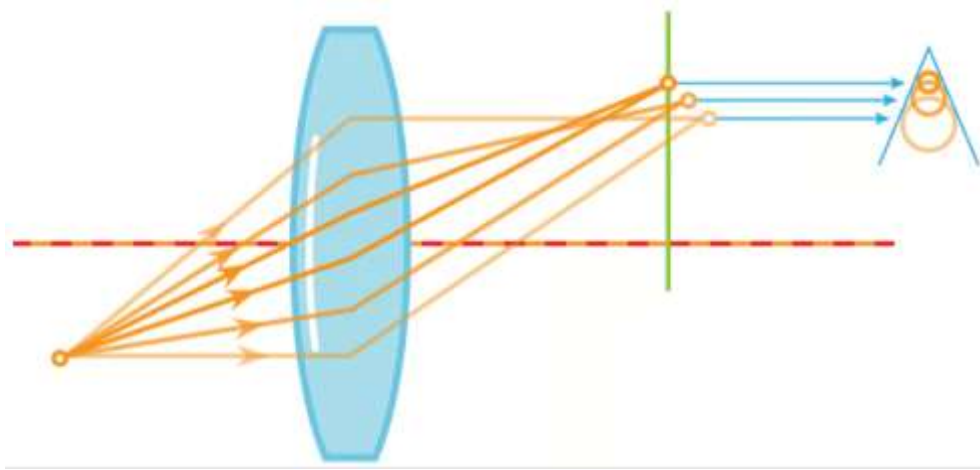
Küresel kusurun oluşturduğu görüntü bozulmaları aşağıdaki Şekil 2.13’de gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Küresel aberasyonlu görüntü (solda) ve düzeltilmiş görüntü (sağda)
(<http://www.clspectrum.com>)

2.3.2 Koma

Optik eksene paralel olmayan ışınların neden olduğu bu tür hata, Şekil 2.14’de gösterildiği üzere, optik sistemlerde görülen bir görüntüleme kusuru olarak tanımlanmaktadır. Bu hatanın etkisini azaltmak için, optik sistemde mercek arkasına bir iris veya diyafram yerleştirilmesi ya da sisteme mercek eklenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil 2.14 Koma (<https://photographylife.com>)

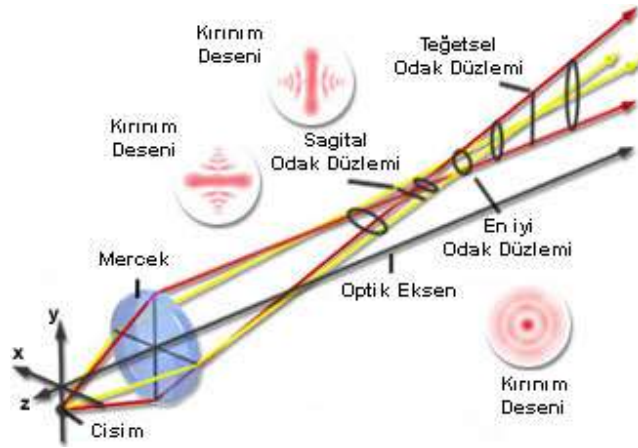
Koma tipi optik kusurun görüntüye etkisi Şekil 2.15’de gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Koma optik aberasyonun görüntü üzerindeki etkisi (Küçükçelebi 2015)

2.3.3 Astigmatizm

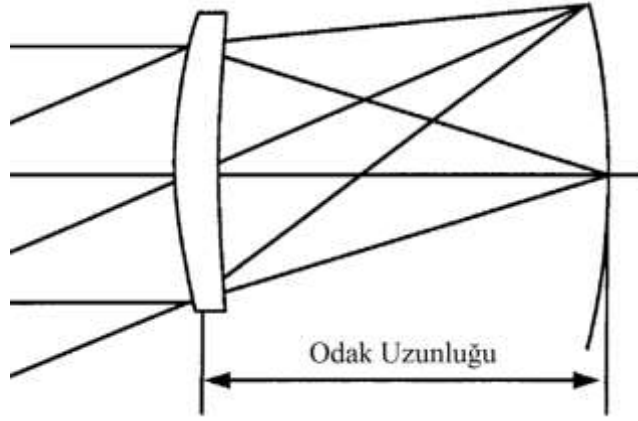
Bir nesne merceğin asal ekseninde değilse, merceğe ulaşan ışınlar asimetrik bir koni şekli oluşturur. Bu durumda, optik eksene dik doğrultuda yer alan teğetsel ve sagittal ışınların izlediği optik yollar birbirinden farklı olur. Dolayısıyla, teğetsel ve sagittal ışınlar optik eksen üzerinde aynı noktada değil, farklı konumlarda odaklanmaktadır (Milton 1995).



Şekil 2.16 Astigmatizm

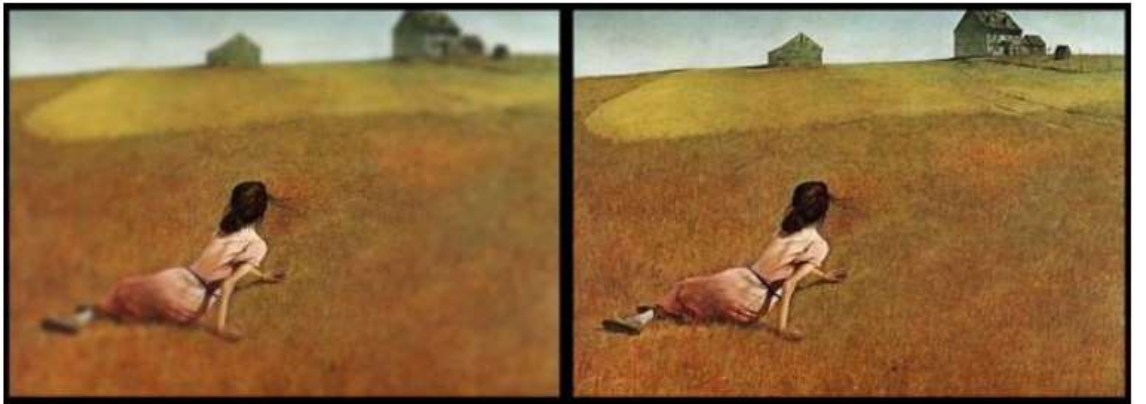
2.3.4 Alan eğriliği (Field curvature)

Bir objenin farklı noktalarının optiğe olan uzaklıklarının birbirinden aynı olmaması, bu noktalar üzerinden geçen ışınların farklı oranlarda kırılmasına neden olur. Bu durum sonucunda, objenin optik sisteme yakın bölgeleri ile uzak bölgeleri farklı biçimlerde kırınımına uğrar ve bu da objenin görüntüsünde belirli bir şekil bozulmasına (deformasyona) yol açar. Bu aberasyon görüş açının karesi ile artmaktadır. Bu tür hatalar, optik sistemlerde konveks ve konkav merceklerin uygun biçimde birleştirilmesiyle azaltılabilmektedir.



Şekil 2.17 Alan eğriliği (Fischer vd 2008)

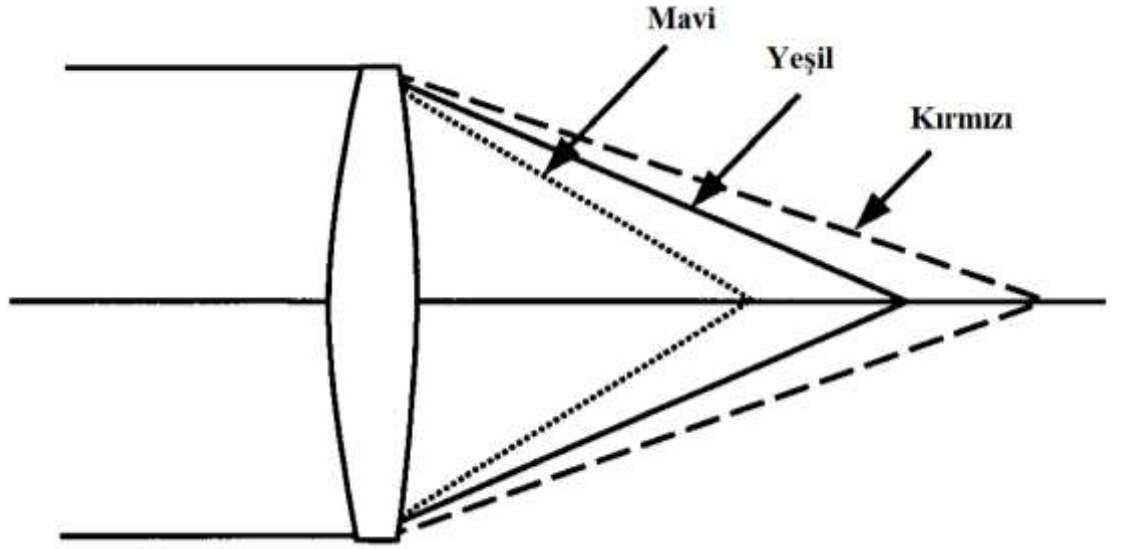
Alan eğriliği aberasyonun görüntü üzerindeki etkisi Şekil 2.18’de gösterilmektedir.



Şekil 2.18 Alan eğriliği aberasyonlu (solda) ve düzeltilmiş görüntü (sağda)
(<http://wolfcrow.com>)

2.3.5 Renk kusuru (Chromatic aberation)

Kromatik sapmalar, mercek malzemesinin kırılma indisinin dalga boyuna bağılı olarak değişmesinden (malzeme dispersiyonu ile tanımlanır) kaynaklanır. Bu nedenle, tek bir nesne noktasından gelen farklı dalga boylarındaki ışıklar, görüntü düzleminde farklı noktada odaklanmaktadır.



Şekil 2.19 Kromatik aberasyon (Mavi, Yeşil, Kırmızı Işıkların Odaklandığı Noktalar)

Renk sapmaları, uygun abbe numaralı (V) doublet mercek ile düzeltilmektedir. Kromatik aberasyonu gidermek için aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (2.7)$$

$$\varphi_1 = \varphi \frac{V_1}{V_1 - V_2} \quad (2.8)$$

$$\varphi_2 = -\varphi \frac{V_2}{V_1 - V_2} \quad (2.9)$$

Kromatik aberasyonlu görüntü aşağıda Şekil 2.20’de gösterilmektedir.



Şekil 2.20 Kromatik aberasyon (<https://photoworldtours.com>)

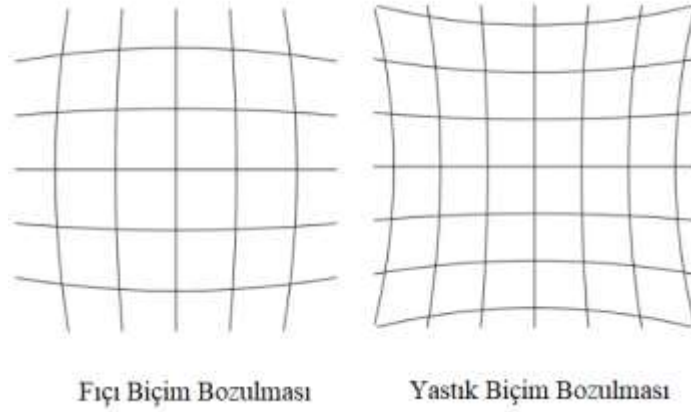
2.3.6 Biçim bozulması (Distortion)

Görüntü bulanıklığına yol açmayan tek sapma, bozulmadır. Sistemdeki bozulma hariç diğer tüm sapmalar düzeltilirse, bir nesne noktası, eksenel konumundan kaydırılmış mükemmel bir görüntü noktasına yansıtılır. Bozulma miktarı, uzunluk birimleri cinsinden yanal yer değiştirme veya eksenel görüntü yüksekliğinin yüzdesi olarak ifade edilebilmektedir. Bozulma şu şekilde tanımlanmaktadır (Fischer vd 2008).

$$\text{Biçim Bozulması} = \frac{y-y_p}{y_p} \quad (2.10)$$

Burada y görüntü düzlemindeki yükseklik ve y_p Paraksiyal yüksekliktir.

Yastık ve fıçı olmak üzere iki çeşit biçim bozulması bulunmaktadır. Yastık (pincushion) biçim bozulması, alanın kenarına doğru büyütmenin artması ile oluşmaktadır. Fıçı (barrel) biçim bozulması ise, alanın kenarına doğru büyütmenin azalması durumunda meydana gelmektedir.



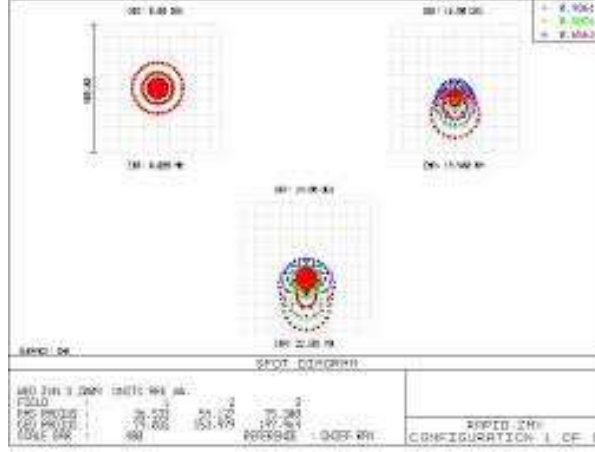
Şekil 2.21 Fıçı ve yastık biçim bozulması

2.4 Optiksel Analiz Parametreleri

Optik sistem tasarımında, sistem performansının belirlenen kriterleri karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek amacıyla çeşitli optik analiz araçları kullanılmaktadır; bu araçların bir kısmı doğrudan optik kusurları tanımlar, diğer kısmı ise bu kusurların görüntü ve sistem çıktısına etkilerini yansıtmaktadır.

2.4.1 Nokta diyagramı (Spot diagram)

Optik sistemden görüntülenen sahneden merceklerle gelen ışınlar, mercekler aracılığıyla detektör üzerindeki her bir piksel üzerinde odaklanır. Odaklanmış her bir ışın demeti, Şekil 2.22’de gösterildiği gibi noktasal bir görüntü oluşturur. Bu noktasal görüntünün şekli ve geometrik çapı, optik sistemin performansı ve kalite düzeyi hakkında bilgi sağlamaktadır.



Şekil 2.22 Spot diyagramı

2.4.2 MTF (Modülasyon Transfer Fonksiyonu)

Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF), bir görüntüleme düzeninin uzaysal frekans spektrumu boyunca uygulanan sinüzoidal nitelikli girdilere karşı ürettiği çıkışın genlik oranını tanımlayan nicel bir performans göstergesidir. Alternatif bir anlatımla, ardışık siyah–koyu bantlardan oluşan periyodik desenlerin sistem tarafından hangi kontrast düzeyinde seçilebildiğini ortaya koymaktadır. Bu parametre çoğunlukla milimetre başına çizgi çifti (lp/mm) ya da miliradyan başına çizgi çifti birimleriyle ifade edilmektedir. Kontrastın frekansa bağlı aktarım özelliklerini yansıtması sebebiyle MTF, optik sistemlerin ayırt etme kapasitesini ve genel görüntüleme başarımını değerlendirmede temel ölçütlerden biri olarak kabul edilmektedir.

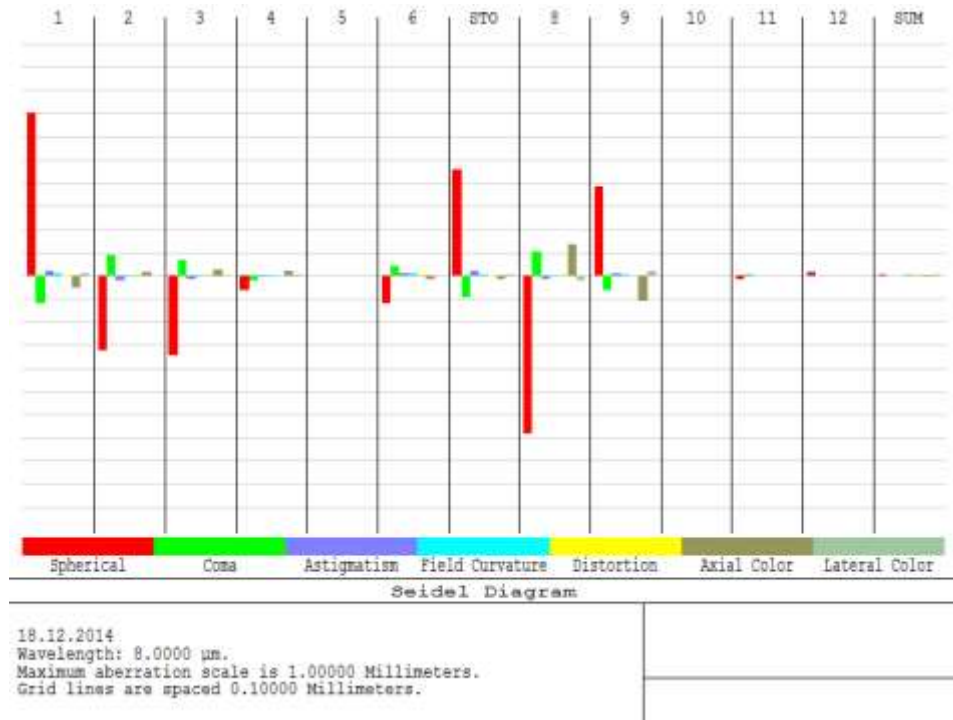
2.4.3 Dalga cephesi hatası

Işık, yapısal özellikleri itibarıyla dalga formunda yayılan fiziksel bir olgudur ve bu nedenle yayılımı dalga kurallarına uygun şekilde gerçekleşmektedir. Bu yayılım sırasında dalganın eş fazlı noktalarının (örneğin tepe ya da çukur noktalarının) geometrik olarak birleştirilmesiyle dalga cephesi tanımlanır. İdeal bir optik kaynaktan çıkan ışınlar, kuramsal olarak düzgün ve kusursuz dalga cepheleriyle temsil edilmektedir. Bununla birlikte, ışık bir optik sistemden geçtikten sonra dalga cephesinin ideal formunu aynen koruması beklenmez. Kuramsal olarak öngörülen dalga cephesi ile sistem çıkışında elde

edilen gerçek dalga cephesi arasındaki sapma, dalga cephesi hatası olarak adlandırılmaktadır.

2.4.4 Seidel diyagramı

Optik kusur diyagramı (Seidel diyagramı), bir optik sistemdeki tüm kusurların toplu olarak gösterildiği bir araçtır. Her merceğin yüzeyi için ortaya çıkan tüm optik sapmalar bu diyagramda ayrıntılı şekilde sunulmaktadır (Şekil 2.23). Diyagramın sonunda ise, sistemdeki bütün merceklerin katkılarıyla oluşan toplam optik sapma yer almaktadır.



Şekil 2.23 Seidel diyagramı

2.4.5 Işın grafiği (Ray Fan)

Ray Fan grafiği, pupil (giriş açıklığı) boyunca farklı noktalardan geçen ışınların, ideal görüntü noktasından ne kadar saptığını gösterir. Zemax tasarım Programında teğetsel ve sagittal ekseninde göstermektedir.

- X eksen (Yatay)

Normalize pupil koordinatı -1 ile +1 arasındadır. -1 ve +1: açıklık kenarlamı, 0 ise merkezini göstermektedir.

- Y eksen (Dikey)

Işın sapması yani aberasyonları göstermektedir. Birimi:µm (mikrometre) veya dalga boyu cinsinden (waves). İdeal durumu da sıfırdır.

2.5 Monte Carlo Tolerans Analizi

Zemax OpticStudio ortamında gerçekleştirilen Monte Carlo tolerans analizi, optik sistem performansının üretim ve montaj kaynaklı kaçınılmaz parametre sapmalarına karşı duyarlılığını istatistiksel olarak değerlendiren bir yöntemdir. Bu yaklaşımda, yüzey eğrilik yarıçapı, merkez kalınlık, kırılma indisi, yüzey desantrasyonu ve tilt gibi tasarım parametreleri, önceden tanımlanan tolerans aralıkları ve dağılım fonksiyonları (çoğunlukla normal dağılım) çerçevesinde rastgele örneklenir ve her bir örnekleme için sistem performans metrikleri (örneğin MTF, RMS dalga cephesi hatası veya spot çapı) yeniden hesaplanmaktadır.

Çok sayıda simülasyon sonucunda elde edilen performans dağılımı üzerinden ortalama değer, standart sapma ve belirli bir kabul kriterini sağlayan sistem yüzdesi (yield) belirlenerek tasarımın üretilebilirliği ve güvenilirliği nicel olarak ortaya konur. Bu yöntem, nominal tasarım performansının ötesine geçerek gerçekçi üretim koşulları altında sistem davranışını öngörmeyi ve kritik tolerans parametrelerini tanımlamayı mümkün kılmaktadır.

2.6 Kızılötesi Detektör Çeşitleri

Kızılötesi detektörler, çalışma prensiplerine bağlı olarak foton detektörleri ve termal detektörler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır.

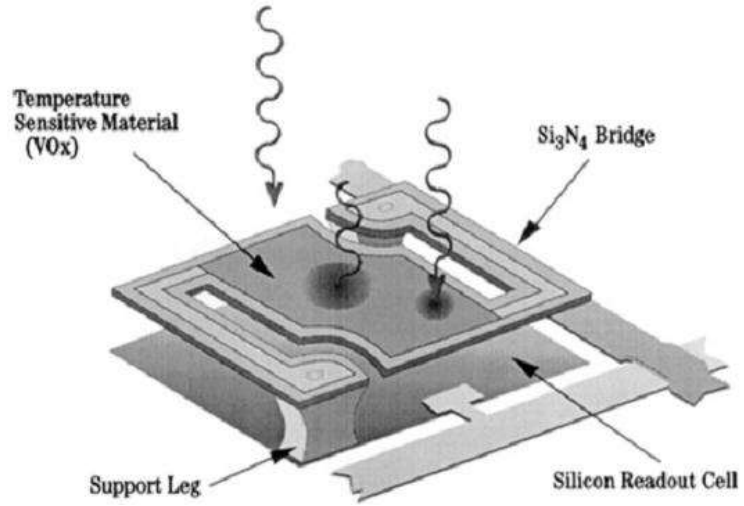
2.6.1 Foton detektörleri

Foton detektörleri, dar iletim bandına sahip yarı iletken malzemeler üzerinde, üzerine düşen fotonların yol açtığı uyarılma sonucunda elektrik yükü taşıyıcılarının oluşmasını sağlayarak algılama yapabilen cihazlardır. Bu taşıyıcılar tarafından oluşturulan elektriksel akım, elektronik devreler aracılığıyla işlenerek görüntü oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Foton detektörleri, fotoiletken (photoconductive) ya da fotovoltajik (photovoltaic) detektörler olarak sınıflandırılmaktadır.

Bu tür detektörler, termal detektörlere kıyasla daha hızlı tepki verirler. Ancak, bu detektörler, monte edildikleri sistemin termal enerjisinin yanı sıra kendi içsel termal enerjisini de algılayabildiğinden, ortamda arka plan gürültüsü oluşabilmektedir. Arka plan gürültüsünü minimize etmek ve detektörün termal enerjiye duyarlılığını optimize etmek amacıyla, sistemde soğutma birimleri kullanılmaktadır. Bu soğutucular, sistemi istenen düşük sıcaklıkta tutarak, soğutma işleminin sürekliliğini sağlar. Soğutma verimliliğini artırmak ve sıcaklık dengesini sabit tutmak için, sisteme "dewar" adı verilen bir yapı eklenir. Bu yapı, soğutma sisteminin etkisini daha uzun süre devam ettirir ve böylece sistemin sürekli ve düzenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

2.6.2 Termal detektörler

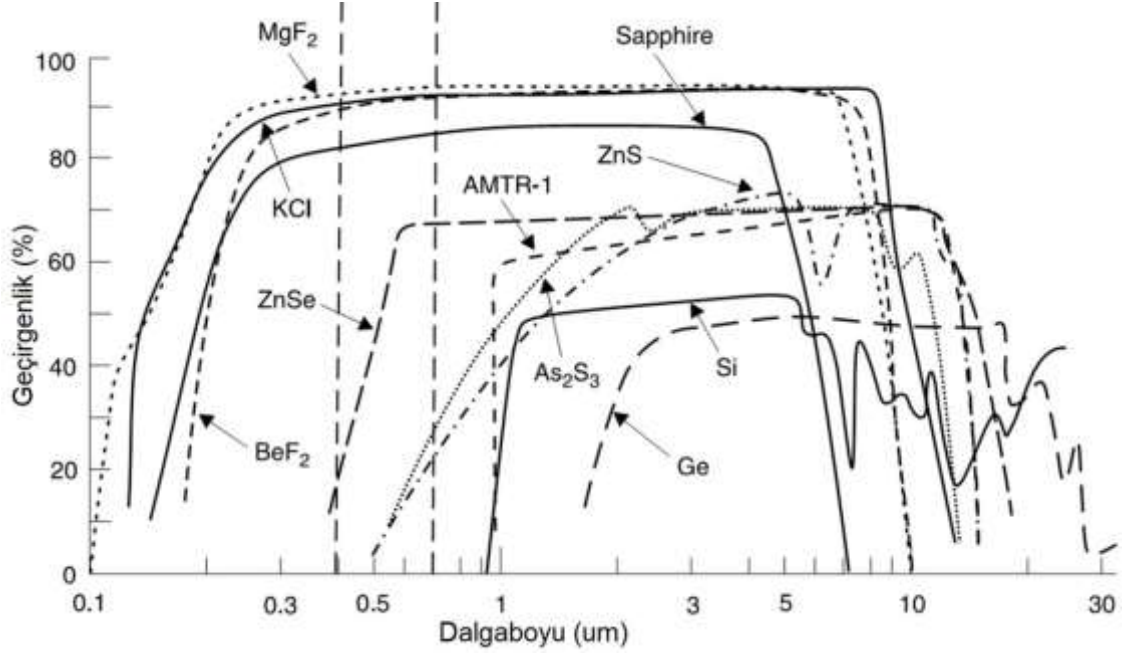
Termal detektörler, sıcaklık değişimlerine duyarlı algılama cihazlarıdır; bu detektörlerde, optik sistem tarafından detektör yüzeyine yönlendirilen ışınım, malzeme tarafından soğrulur ve bu ısının hızlı bir şekilde algılanarak detektör malzemesinin sıcaklığının artmasına neden olur. Algılama, sıcaklıkla değişen belirli fiziksel özellikler aracılığıyla gerçekleştirilir. Eğer algılama, sıcaklıkla dirençte meydana gelen bir değişime dayanıyorsa, bu tür detektörler bolometrik detektörler olarak adlandırılır. Eğer değişim, farklı potansiyellerin temas noktalarındaki değişimle gerçekleşiyorsa, bu detektörler termal çift (thermocouple) olarak sınıflandırılır. Diğer bir durumda, değişim iç elektrik alanındaki değişikliklerle meydana geliyorsa, bu tür detektörlere ise pyroelektrik detektörler denir.



Şekil 2.24 Termal detektör yapısı (Rogalski ve Chrzanowski 2002)

2.7 Kızılötesi Optik Cam Malzemeler

Görünür spektrum için çok sayıda cam türü mevcut iken orta dalga kızılötesi (MWIR) ve uzun dalga kızılötesi (LWIR) spektral bantlarında kullanılabilecek malzeme sayısı azdır. Aşağıda kızılötesi bant aralığında kullanılan bazı malzemler anlatılmaktadır. Şekil 2.25’de MWIR ve LWIR bantlarında kullanılan camlar gösterilmektedir. Optik tasarımda kızılötesi camlar kullanılmıştır.



Şekil 2.25 Optik camların ışık iletim grafiği (Rogalski ve Chrzanowski 2002)

2.7.1 Germanyum (Ge)

Germanyum, yaygın olarak kullanılan kızılötesi optik malzemelerden biridir ve özellikle $3\ \mu\text{m}$ – $5\ \mu\text{m}$ ile $8\ \mu\text{m}$ – $14\ \mu\text{m}$ dalga boyu aralıklarında tercih edilmektedir. Yüksek kırılma indisine sahip olması, optik sistemde oluşabilecek hataların minimize edilmesini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, Germanyumun kırılma indisi sıcaklığa bağlı olarak $dn/dT = 0,000396\ \text{K}^{-1}$ oranında değişmekte olup, bu değer BK7 camının $0,0000036\ \text{K}^{-1}$ 'lik değişimiyle karşılaştırıldığında oldukça yüksektir; bu durum, sıcaklık değişimlerinde odak noktasının önemli ölçüde kaymasına yol açmaktadır.

Germanyum malzemesi, düşük mekanik dayanımı ve sınırlı optik geçirgenliği nedeniyle, hem mukavemetini artırmak hem de optik transmisyonunu iyileştirmek amacıyla genellikle yansıma önleyici antireflection (AR) veya koruyucu kaplamalar ile yüzey modifikasyonuna tabi tutulmaktadır. Bu kaplamalar, malzemenin optik performansını yükseltirken aynı zamanda mekanik dayanıklılığını da artırmaktadır.



Şekil 2.26 Germanyum mercek (<https://www.franoptics-group.com>)

2.7.2 Silisyum (Silicon-Si)

Silisyum, germanyum gibi kristal yapılı bir malzemedir. 8 μm ile 14 μm LWIR bandında soğurma nedeniyle öncelikle 3 μm ile 5 μm MWIR spektral bantlarında kullanılmaktadır.

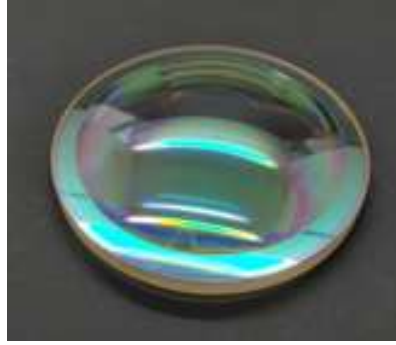
Silisyumun kırılma indisi $n = 3,4255$ ve sıcaklıkla kırılma indisi değişimi de yüksektir ($\frac{dn}{dT} = 150 \text{ ppm/K}$). Dağılımı nispeten düşüktür. Elmas tornalamada işlenebilmektedir, ancak Germanyum malzemesine göre işlenmesi daha zordur (<https://wp.optics.arizona.edu/optomech>).



Şekil 2.27 Silisyum Mercek (<https://www.edmundoptics.com>)

2.7.3 Çinko sülfür (Zinc sulfide - ZnS)

Çinko sülfür, hem orta dalga kızılltesi (MWIR) hem de uzun dalga kızılltesi (LWIR) uygulamalarında kullanılan bir diğ r yaygın malzemedir. Çinko sülfür genellikle kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemiyle üretilir. Diğ r adıyla Cleartran, piyasada çok bulunan ve LWIR dalga boyu aralığına kadar mercek veya pencere olarak kullanılabilen malzemedir.



Şekil 2.28 inko Sülfür Mercek (<https://sinoptix.eu>)

2.7.4 Çinko Selenit (Zinc Selenide-ZnSe)

Çinko selenit, kızılltesi ve görünür dalga boyunu geçirmektir. Çinko sülfüre çok benzerdir, ancak kırılma indisi ($n=2,4065$) daha yüksek ve yapısal olarak daha zayıftır. Çinko selenitin çinko sülfüre göre avantajı, çinko sülfüre göre çok daha düşük bir soğurma katsayısına sahip olmasıdır.



Şekil 2.29 inko Selenit Mercek (<https://www.thorlabs.com>)

2.8 Üretim

Germanyum, silisyum, çinko sülfür ve çinko selenit gibi kızılötesi malzemelerin üretim yöntemleri genel olarak normal cam optiklerine benzer. Kristal yapıli malzemelerin çoğı higroskopiktir (su emer), bu da onlarla çalışmayı zorlaştırabilmektedir.

Germanyum, silisyum, çinko sülfür, çinko selenit ve florürler gibi bazı kızılötesi malzemeler tek noktadan elmas tornalama yöntemiyle işlenebilir. Safir elmas tornalama yöntemiyle işlenemez. Tasarımda asferik mercekler kullanmamız gerektiğinde elmas tornalama önem kazanmaktadır.

Merceklerinin yüzeylerine iyi yansıma önleyici kaplamalar gereklidir, çünkü kızılötesi (IR) malzemeler genellikle çok yüksek kırılma indisine sahiptir; bu da Fresnel yansımalarının önemli ölçüde artmasına ve dolayısıyla geçirgenliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu malzemeleri nemden kaynaklanan hasarlardan korumak için de uygun kaplamalar gerekmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tasarımlar Ansys Zemax Programında tasarlanarak analizleri yapılmıştır. Programın Merit fonksiyonunu optimize ederken, optik tasarım aracı Ansys Zemax OpticStudio'nun editörü kullanılmıştır. Merit Fonksiyonu editörü, optimizasyon için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

Optimizasyonda bir değer fonksiyonu, merceğin genel istenen performansını yansıtan tek bir değeri temsil etmektedir. Belirtilen tüm işlemlerin ortalama karekökünün (RMS) hesaplanmasıyla oluşturulmaktadır.

M = Merit Fonksiyon

w_i = i Operand için Ağırlık Katsayısı

c_i = i Operand için Mevcut Değeri

t_i = i Operand için Hedef Değeri

$$M = \sum_{i=1}^m w_i^2 (c_i - t_i)^2 \quad (3.1)$$

Paraksiyal yüzeyden kalın merceğe dönüşüm yapılırken aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

İnce Mercekin Gücü:

$$\emptyset = \frac{1}{f} = (c_1 - c_2)(n - 1) \quad (3.2)$$

$\emptyset$ = İnce mercekin gücü

c_1 = İlk yüzeyin eğriliği

c_2 = İkinci yüzeyin eğriliği

n = Mercekin kırılma indisi

İlerleyen bölümlerde anlatılan konformal kubbeli objektifinde kullanılan Chebyshev polinom yüzeyinin analitik formülasyonu aşağıda bahsedilmektedir.

Chebyshev Polinom Yüzevi: Ansys Zemax OpticStudio birçok serbest biçimli yüzey türüne sahiptir. Bunlardan biri, Chebyshev polinomlarıyla oluşturulan serbest biçimdir. Chebyshev polinomu, ortogonal bir polinom olarak tanımlanmaktadır. Chebyshev polinomunun temel avantajı, Chebyshev polinomu katsayılarının ortogonal olmasıdır. Bu sayede tasarımcılar, katsayıları birbirlerini etkilemeden bağımsız olarak optimize edebilmektedir. Yani katsayı doğrusal olarak bağımsızdır ve bu da yüzeyin geometrisini tanımlamaktadır. Bu, diğer asferik yüzey türlerine göre çok daha kolay bir tasarım formu sağlayabilmektedir. Ayrıca, Chebyshev polinomu, dönme simetrisi ve eliptik olmayan bir açıklık sağlayabilen dönme simetrisi serbest biçimli polinomların aksine, Kartezyen koordinatlarla türetilmektedir.

Birinci türden Chebyshev polinomu aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir:

$$T_n(x) = \cos(n \cos^{-1}(x)), n = 0 \dots \infty, x \in [-1,1] \quad (3.3)$$

İlk altı Chebshev polinom katsayısı şu şekildedir:

$$T_0(x) = 1 \quad (3.4)$$

$$T_1(x) = x$$

$$T_2(x) = 2x^2 - 1 \quad (3.5)$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x \quad (3.6)$$

$$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1 \quad (3.7)$$

$$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x \quad (3.8)$$

$$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1 \quad (3.9)$$

Çarpma kullanılarak oluşturulan iki boyutlu Chebyshev polinomu $t_{ij}(x,y)$:

$$t_{ij}(x,y) = T_i(x) \cdot T_j(y), \quad i, j = 0 \dots \infty, x \in [-1,1], y \in [-1,1] \quad (3.10)$$

Chebyshev polinomlarının sonlu toplamalarını kullanarak serbest formlu yüzeyin sag denklemini elde edebilmektedir:

$$\frac{c(x^2+y^2)}{1+\sqrt{1-c^2(x^2+y^2)}} + \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M a_{ij} T_i(\bar{x}) \cdot T_j(\bar{y}) \quad (3.11)$$

a_{ij} 'ler Chebyshev polinomlarının toplamının katsayılarıdır; $\bar{x}$, $\bar{y}$ normalize edilmiş yüzey koordinatlarıdır, N ve M x ve y boyutlarındaki maksimum polinom dereceleridir ve c polinomun eklendiği taban küresinin eğriligidir.

Optik tasarımın mimarisi aşağıda anlatılan adımlarla yapılmıştır.

Tasarım prosedürünün özeti şu şekilde yapılmıştır:

1.) Soğutmalı bir MWIR detektör ve soğuk diyafram (cold stop) Zemax'e yerleştirilir ve tasarım, detektörden dış ortama doğru olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.) Toplam 4 Paraksiyal mercek, detektör ile konformal kubbe arasına yerleştirilmiştir ve bu Paraksiyal mercekler, 0° görüş açısında (field of regard) konformal kubbeden kaynaklanan aberasyonları en aza indirecek şekilde optimize edilmiştir.

Başka bir deyişle, konformal kubbenin merkezinden bakılırken oluşan aberasyonları azaltmak amacıyla tasarlanmıştır.

3.) Daha sonra en yakın iki Paraksiyal yüzey, iki adet germanyum mercek ile değiştirilir; bu yüzeylerden biri Chebyshev Polinomu ile tanımlanan serbest biçimli (freeform) bir yüzey olarak tasarlanır. Böylece konformal kubbe (dome) aberasyonları bu serbest biçimli yüzey sayesinde giderilmektedir. Bu işlem, 0° görüş açısı (field of regard) için gerçekleştirilmektedir.

4.) Bir sonraki adım olarak, kalan iki Paraksiyal mercek yukarıda verilen formüller ve yaklaşım kullanılarak kalın merceklerle değiştirilerek arayıcı objektif tasarımı tamamlanmıştır. Objektifin tamamı optimize edilip ve son iki objektif merceğinin yüzeyleri, MTF hedefine ulaşmak için asferik hale getirilmiştir. Bu, 0° 'lik bir görüş alanı için yapılmıştır.

5.) Son adım olarak, objektif 5° , 10° veya 15° gibi farklı bir görüş alanına hareket ettirildiğinde, konformal kubbe simetrik olmayan sapmalarının üstesinden gelmek için z eksenini boyunca Chebyshev polinomlarına sahip iki merceğin dönüş açısı optimize edilmiştir. Bu, Zemax'a birden fazla konfigürasyon eklenerek ve tüm parametreler farklı FOR değerleri için birlikte optimize edilerek yapılmıştır. Sonuç olarak, 0° , 5° , 10° veya 15° gibi tüm FOR'lar için iyi bir sonuç elde edilebilmektedir.

Son olarak optiğin yuva ve detektör sıcaklık farkından kaynaklan optikten detektöre yansıyan narcissus etkisi aşağıda anlatılmaktadır.

Narcissus: Narcissus kelimesi Antik Yunan mitolojisinden gelmektedir. Narcissus, olağanüstü güzelliğiyle tanınan ancak kendisine aşık olan herkesi küçümseyerek reddeden bir gençtir. Ona aşık olan su perisi Echo da reddedilince büyük acı çeker. Bu kibirli davranışları nedeniyle tanrıça Nemesis, Narcissus’u cezalandırır. Narcissus bir gün suya baktığında kendi yansımasını görür ve bunun kendisi olduğunu anlamadan bu görüntüye aşık olur. Ancak bu yansıma ulaşılmaz olduğu için Narcissus onu elde edemez ve sonunda tükenerek ölür. Ölümünden sonra bulunduğu yerde nergis çiçeği ortaya çıkar.

Tipik bir kızılötesi optik sisteminde, detektörün yüzey sıcaklığı genellikle ortam sıcaklığından çok daha düşüktür. Narsis etkisi, detektörün, mercek yüzeylerinden istenmeyen yansımalar yoluyla, arka plan ortam sıcaklığından farklı sıcaklıklardaki kaynakları görmesiyle ortaya çıkar. Bu kaynaklar genellikle detektörün kendisinin yansımalarıdır, bu nedenle narsis terimi kullanılmaktadır. Yani narcissus, detektörün kendini görmesi demektir. Ortaya çıkan görüntü, alan konumuna bağlı olarak arka plan radyasyonunda ani değişiklikler göstermektedir (Lau 1977). Aşağıdaki görüntü gibi görüntü merkezinde bir karartıya sebep olmaktadır.



Şekil 3.1 Narcissus bulunan görüntü (Howard ve Abel 1982)

Krojenik olarak soğutulmuş detektör ile mercek yuvası arasında bir sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu sıcaklık farkı gürültü oluşturarak görüntü performansını bozmaktadır.

Merceklerin geometrik şekli geri yansımayı etkilemektedir. Narcissus azaltmak için tasarım ona göre yapılarak ve yansıma önleyici kaplama ile azaltılabilmektedir.

Narcissus kaynaklı sıcaklık farkı olan NITD (Narcissus Induced Temperature Difference) aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

Bir piksel i için j yüzeyinden kaynaklanan NITD, aşağıdaki analitik yöntemle hesaplanmaktadır. $N(\lambda, T_h)$; T_h yuvarının kara cisim spektral ışımasıdır, $N(\lambda, T_d)$; detektörün kara cisim spektral ışımasıdır, λ_1, λ_2 çalışma dalga boyu sınırlarıdır, T_h mercek yuvasının sıcaklığıdır,

T_d detektör sıcaklığıdır, T_{ms} ortalama sahne sıcaklığıdır, R_d normalize edilmiş detektör tepkisi, t_o ortalama optik iletimdir, t_j incelenen yüzeye kadar olan optik iletimdir, R_j incelenen yüzeydeki geri yansımadır (Aslan 2022).

$$NITD_{ij} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [N(\lambda, T_h) - N(\lambda, T_d)] R_d(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial N(\lambda, T_{ms})}{\partial T} R_d(\lambda) d\lambda} \frac{t_j^2}{t_o} R_j \sigma_{ij} \quad (3.12)$$

Genel olarak MWIR tasarımlarında soğutmalı, LWIR tasarımlarında da soğutmasız detektör kullanılmaktadır. Bu çalışmada MWIR dalga boyu bant aralığında olduğu için soğutmalı detektör kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Küresel Kubbeli Objektif Tasarımı

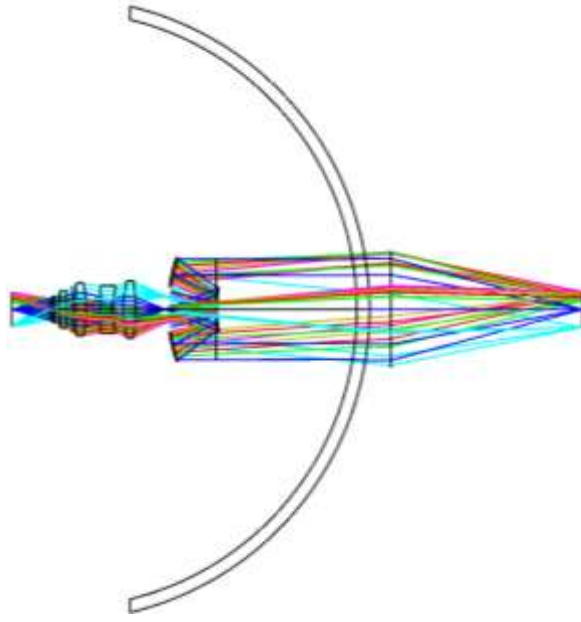
Orta dalga kızılötesi (MWIR) arayıcı objektif tasarımı, aşağıdaki tabloda belirtilen özellikler doğrultusunda tasarlanmıştır. Küresel kubbeli yapısı nedeniyle farklı hareket açıları (Field of Regard, FOR) için optik performansı değişmemekle birlikte, aerodinamik performansı sınırlı kalmaktadır.

Küresel kubbeli arayıcı tasarımında küresel, asferik mercekler ve aynalar kullanılmıştır. Ayna yapısı Cassegrain tipine benzemektedir. MWIR bir tasarım olduğu için soğutmalı detektör kullanılmıştır. Objektifin parametreleri aşağıdaki Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Küresel kubbeli tasarım parametreleri

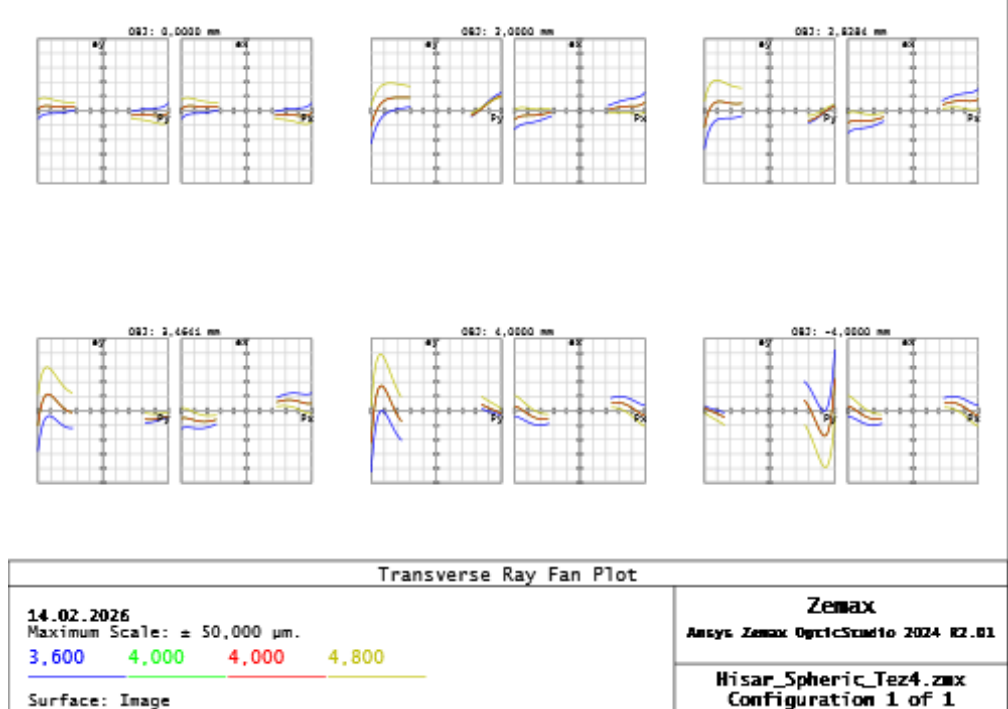
Optik Sistemin Parametreleri	Tasarım Değerleri
Kubbenin Kalınlığı (mm)	3
F sayısı	1.95
Görüş Alanı (mm)	8
Dalga boyu (μm)	3-5 μm
Detektör Boyutu	256x192
Detektör Piksel Boyu	25 μm

Tasarımın optik yerleşimi Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Küresel kubbeli tasarım yerleşimi

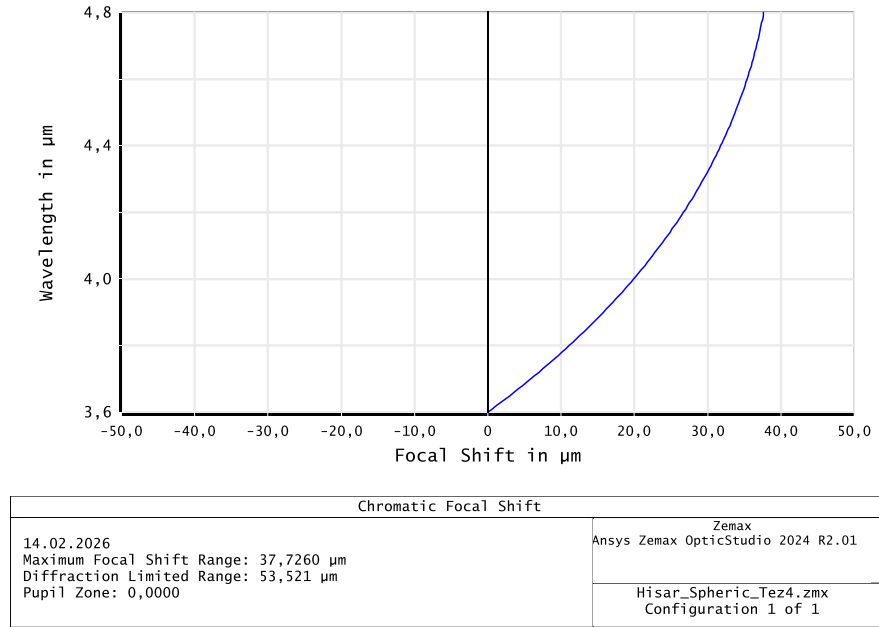
Tasarım optik performansını gösteren analiz sonuçları ilerleyen sayfalarda gösterilmektedir. Işın dağılımını ve sistemdeki sapmaları gösteren ışın fan grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Küresel kubbeli tasarımın ışın fan grafiği

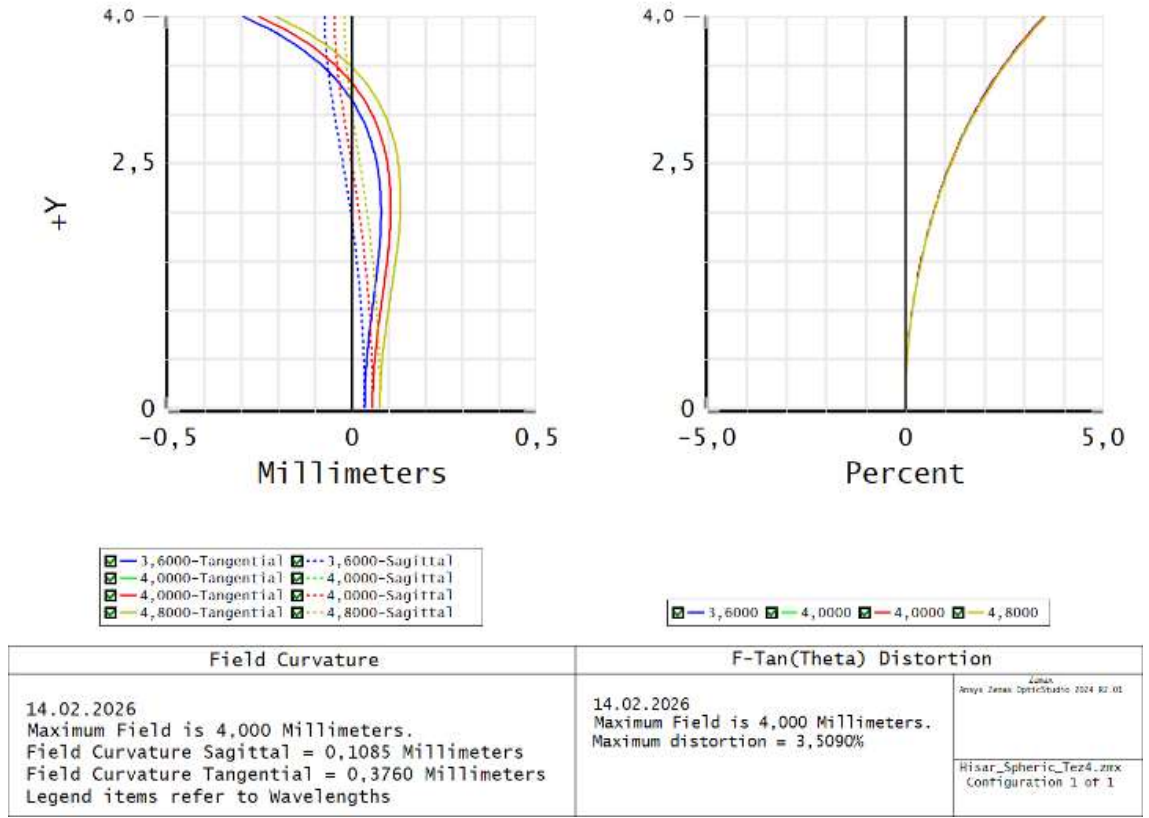
X eksenini diyaframı y eksenini ise aberasyonlara bağlı sapmaları göstermektedir. Tasarımın ışın fan grafiğine göre maksimum değeri $50\mu\text{m}$ 'dir. Ayna sistemi olduğu için ikincil aynanın çapına bağlı olarak kararırma olmaktadır.

Şekil 4.3'de sistemin kromatik aberasyonunu göstermektedir.



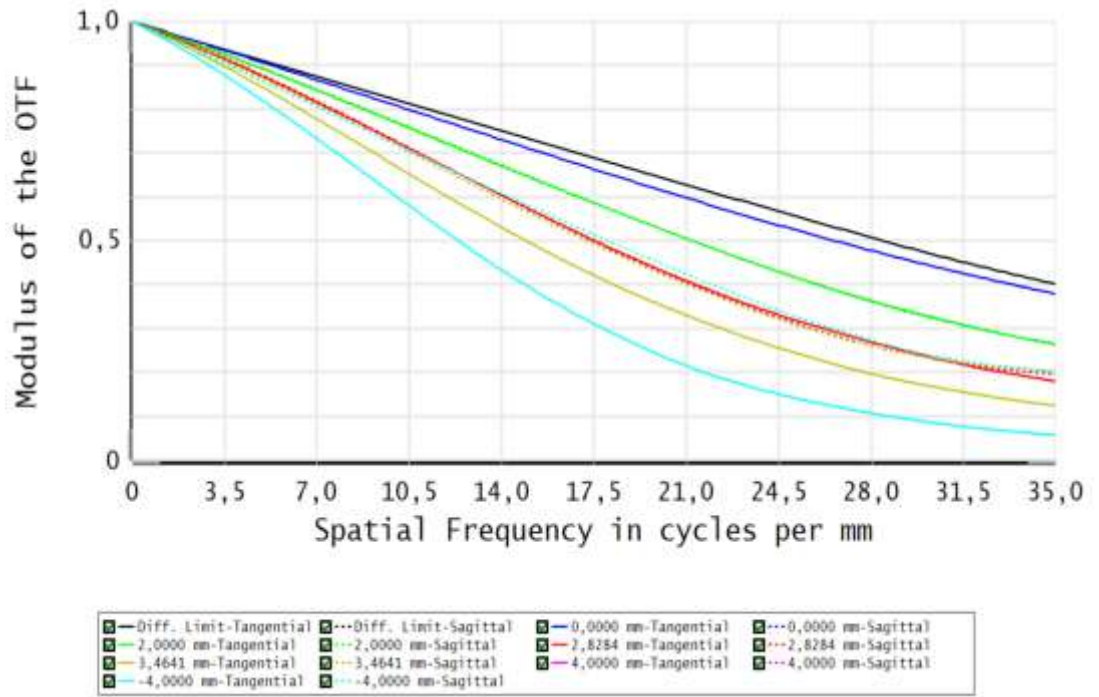
Şekil 4.3 Küresel kubbeli tasarımın kromatik odak kayması grafiği

Kromatik aberasyon fiziksel sınır olan kırınım limitinde altındadır. Şekil 4.4'de alan eğriliği ve biçim bozukluğu grafikleri verilmiştir.



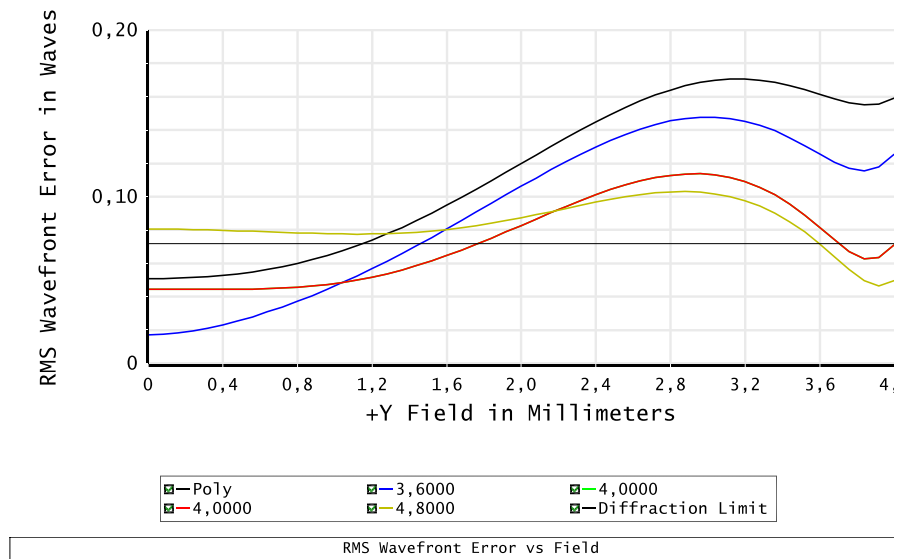
Şekil 4.4 Alan eğriliği ve biçim bozukluğu grafiği

Sistemin biçim bozukluğu değeri %3,5'dir. %5 değerinin altı bizim için uygun bir değerdir. Şekil 4.5'de küresel kubbeli tasarımın nominal MTF grafiği gösterilmektedir. Merkez ve dış açılardaki MTF değerleri verilmiştir.



Şekil 4.5 Küresel kubbeli tasarımın MTF grafiği

Merkez açı değeri kırınım limitine yaklaştığı görülmektedir. Açıya bağlı (koma, astigmatizm ve alan eğriligi) aberasyonların artmasıyla MTF değerleri de en dış görüş açılarına doğru gittikçe azalmaktadır.



Şekil 4.6 RMS dalga cephesi hatası

Şekil 4.6’da RMS (Root Mean Square) cinsinden tüm dalga boylarında açıya bağlı değişen dalga cephesi hatası gösterilmiştir. Görüş açısı arttıkça kırınım limit değerinden uzaklaşmaktadır. Maksimum RMS dalga cephesi hatası 0,2 wave değerinin altında olduğu görülmektedir.

4.1 Sapmaları Düzeltmek için Chebyshev Polinomlu Serbest Formlu Yüzeylere Sahip Konformal Kubbe Tasarımı ve Adımları

4.1.1 Paraksiyal tasarım

Literatürde, aerodinamik ve optik performans açısından değerlendirilen konformal yapılarda incelik oranı 1 ile 1,5 arasında seçilmiştir. İncelik oranı arttıkça optik sapmaları düzeltmek zor olduğundan, literatürdeki çalışmalarda genellikle 1 olarak seçilmiştir. Bu çalışmada da incelik oranı 1 olarak seçilmiş ve kubbenin yarıçapı ve konik sabiti yukarıda verilen denklem 1.1, 1.2, 1.3 formülleriyle hesaplanmıştır. Konformal kubbenin parametreleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Konformal kubbe parametreleri

Burun Yarıçapı (mm)	Kalınlık (mm)	Malzeme	Kubbe Yarıçapı (mm)	Mekanik Yarıçapı (mm)	Kubbenin Konik Sabiti
-34,750	3	Safir	60	70	-0,750
+37,100	3	Safir	70	70	-0,739

Konformal kubbeden bakan optik sistemin bazı parametreleri ve sistem parametreleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Optik sistemin parametreleri

Optik Sistemin Parametreleri	Tasarım Değerleri
Kubbenin Kalınlığı (mm)	3
F sayısı	1.95
Görüş Alanı (mm)	8
Dalga boyu (µm)	3-5 µm
Hareket Açısı (°)	±10
Detektör Boyutu	256x192
Detektör Piksel Boyu	25 µm

Konformal kubbeli optik tasarımda soğutmalı Orta Dalga IR termal detektör kullanılmıştır. İlk olarak, mercek grupları Paraksiyal yüzeylere girilerek temsil edilmiştir. Sistem ilk adımda Paraksiyal olarak optimize edilmiştir. Konformal kubbenin neden olduğu sapmaları gidermek için, kubbeye en yakın Paraksiyal yüzeyler serbest biçimli merceklerle dönüştürülmüştür. İki merceğin yüzeylerinden biri, Chebyshev Polinomu'nun kullanıldığı serbest biçimli bir yüzeye dönüştürülmüştür. Bu merceklerin katsayıları ve eğrilik yarıçapı değerleri optimize edilmiştir. Daha sonra, diğer mercek grupları da kalın merceklerle dönüştürülerek ve optimize edilmiştir.

Paraksiyal konformal kubbe optik sistemi, Çizelge 4.3'deki parametrelere göre tasarlanmıştır. Tüm optik elemanlar öncelikle Paraksiyal olarak tutulmaktadır. Paraksiyal elemanların bilinen avantajlarından biri, sapma olmamasıdır. Dolayısıyla, bu sistemde sapma yalnızca konformal kubbeden kaynaklanmaktadır. Paraksiyal elemanlı konformal kubbe tasarımı optimize edilmiştir.

Bu temsili arayıcı (seeker) objektifi, tüm soğutmalı termal kamera sistemlerinde olduğu gibi detektörden dış ortama doğru tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde, %100 soğuk diyafram (cold stop) verimliliği sağlamak amacıyla cold stop %100 doldurulmuştur. Detektör formatı ve piksel aralığından (pixel pitch) yola çıkılarak detektör yüksekliği 8 mm olarak hesaplanmış ve bu yüksekliğin yarısı, Zemax için FOV tanımı olarak ± 4 mm şeklinde kullanılmıştır.

Asferik (Even Aspheric) ve serbest biçimli (freeform) yüzeyler nedeniyle, doğru örnekleme sağlamak amacıyla biraz daha fazla sayıda FOV kullanılmıştır. Toplamda 7 FOV tanımlanmıştır; bunlardan biri eksen üzerinde (0,0), diğerleri ise eksen dışı FOV'lardır.

Tasarım sürecinde arayıcı objektifi için kırıcı (refraktif) tasarım formu tercih edilmiştir. İki standart mercek ve Chebyshev polinomu ile tanımlanmış iki mercek kullanılmıştır. Konformal kubbe objektifini oluşturmak için toplam dört mercek kullanılmıştır.

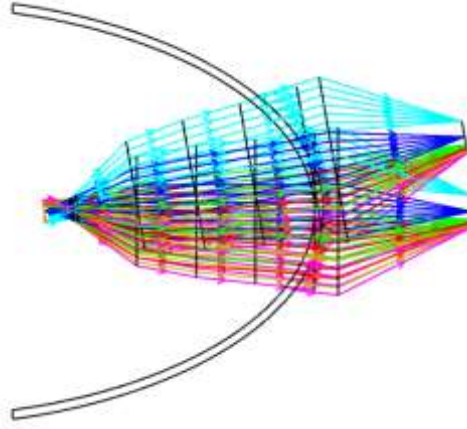
Arayıcı sistemlerde, özellikle düşük hacim ve geniş FOR (Field of Regard) gereksinimlerinde, yansıtıcı (reflektif) tasarımlar da tercih edilebilmektedir. Ancak bu çalışmada, Chebyshev polinomlarının uygulanabileceği yeterli optik elemanın bulunmaması ve aynaların merceklerde olduğu gibi kolayca hareket ettirilememesi nedeniyle reflektif tasarım tercih edilmemiştir.

Sonuç olarak dört elemanlı bir objektif tasarımı benimsenmiş ve tasarıma, her bir merceğin optik gücünü dengelemek ve konformal kubbenin neden olduğu aberasyonları incelemek amacıyla Paraksiyal bir başlangıç tasarımıyla başlanmıştır. Tasarım, konformal kubbe üzerinden bakan objektifin farklı açıları için gerçekleştirilmiştir.

Arayıcı sisteminde objektifler kubbeye göre hareketlidir ve hava platform hedef arama ve bulma amacıyla kullanılmaktadır. Objektifin hareket açısı Field of Regard (FOR) olarak adlandırılmaktadır. FOR açısı ne kadar büyük olursa, arayıcının performansı o kadar iyi olmaktadır. Bu nedenle çalışmada artan FOR değerleri denenmiştir.

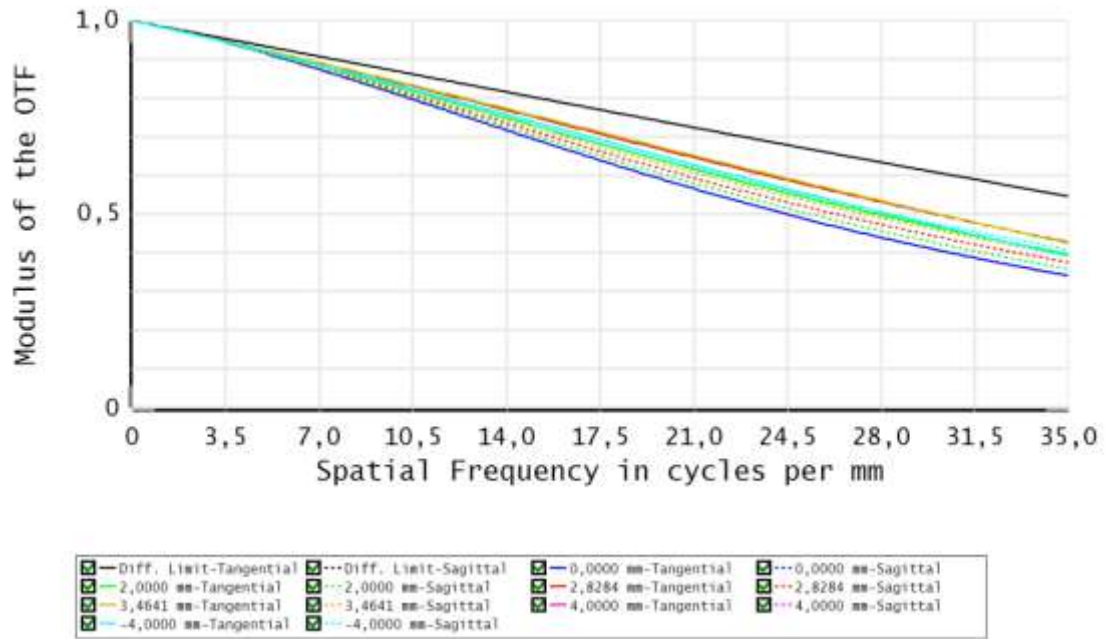
Literatürde konformal kubbelerin aberasyon düzeltimi için gradyan indisli (Gradient Index) malzemeler, uyarlanabilir optik (adaptive optics) ve faz plakaları (phase plates) gibi birçok farklı yöntem denenmiştir. Ancak dinamik dönmeye sahip serbest biçimli yüzeyler yeni bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Sistem yerleşimi aşağıda Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

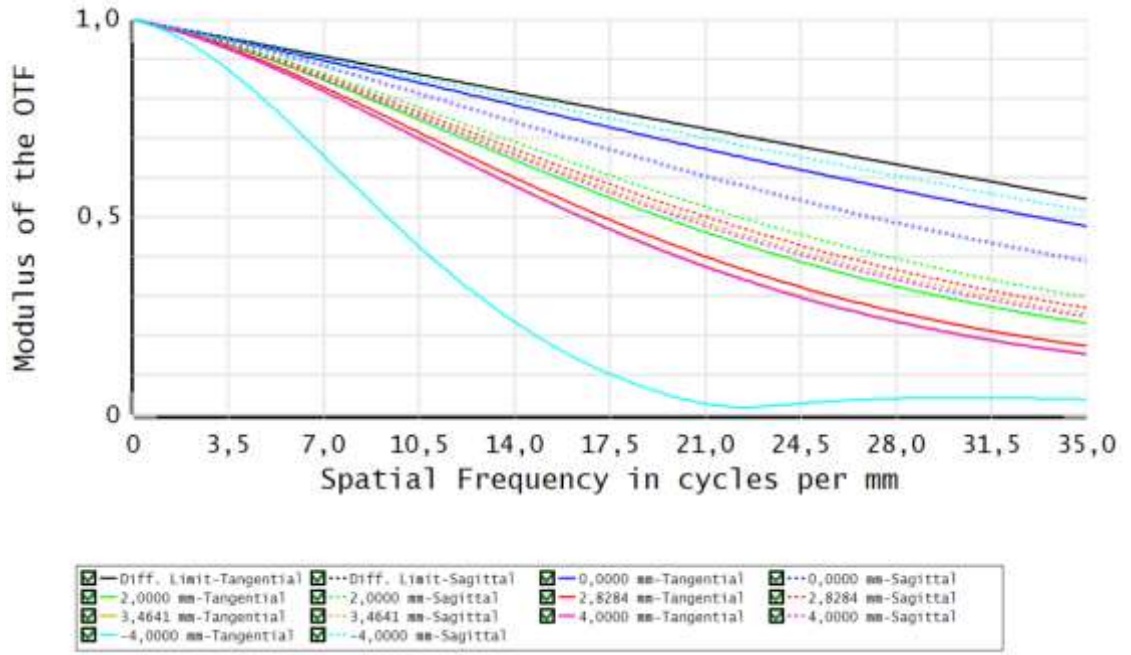


Şekil 4.7 Paraksiyal optik elemanlara sahip konformal kubbe optik sistemi

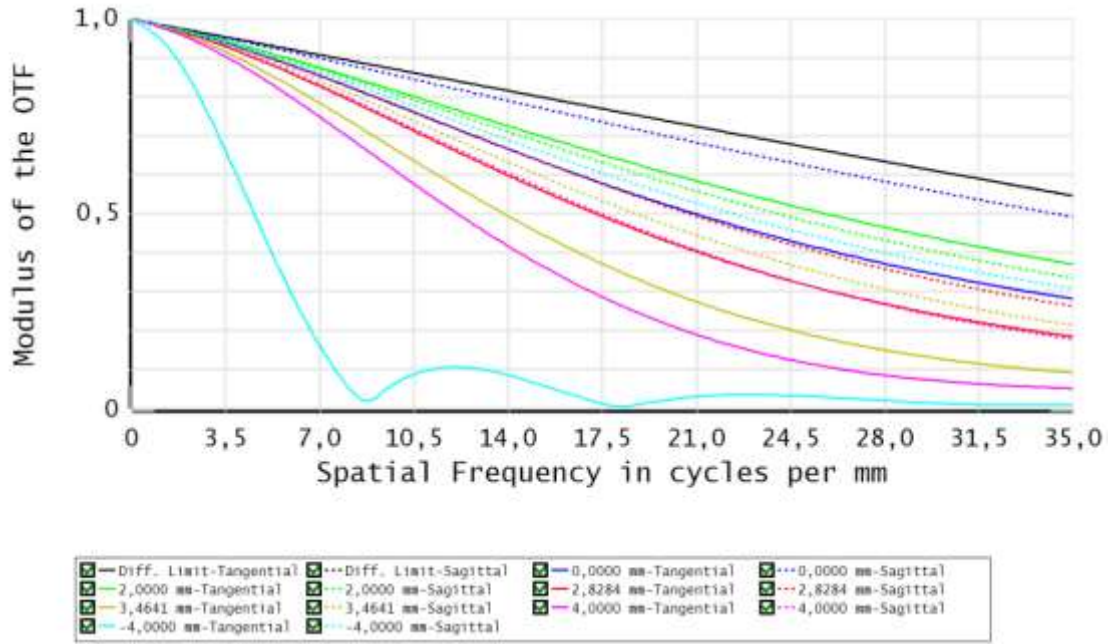
Optimizasyon sonrası sistemin MTF grafikleri Şekil 4.8 Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmektedir. Aşağıda sırasıyla 0, 5 ve 10°’de üç farklı bakış alanına (FOR) sahip MTF grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.8 FOR: 0°’deki MTF grafiği



Şekil 4.9 FOR: 5°'deki MTF grafiği



Şekil 4.10 FOR: 10°'deki MTF grafiği

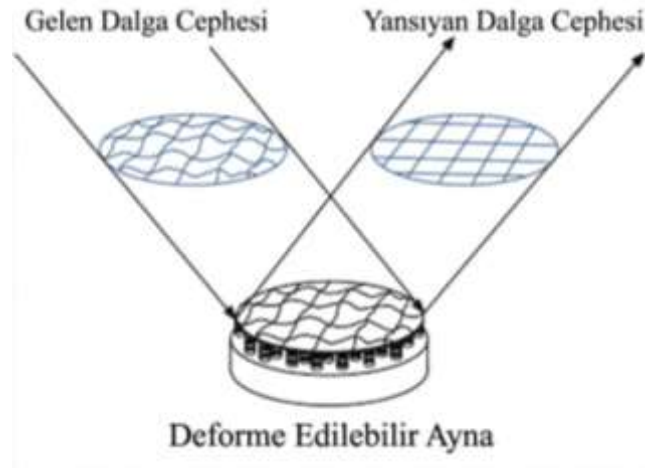
MTF değerleri 0° FOR'da yüksek iken, 5° FOR ve 10° FOR'da MTF değerleri düşmektedir. FOR arttıkça, konformal kubbenin yapısı nedeniyle asimetrik sapmalar artmaktadır. Eksen içi ve eksen dışı MTF değerleri birbirinden ayrılmakta ve sistemin görüntü performansı düşmektedir.

Bu çalışma kapsamında, tüm FOV'lar (görüş alanları) için MTF grafiklerinin tamamı sunulmuştur. Ayrıca, objektifin kubbeye göre farklı Field of Regard (FOR) açıları için de tüm grafikler verilmiştir. Farklı FOR değerlerine sahip tüm FOV'lar için performans, 35 lp/mm uzaysal frekansında kontrol edilmiştir. Eğer 35 lp/mm'de MTF değeri 0,20'nin (%20) üzerindeyse, sistemin frekans performansı kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir. Bu MTF kriteri, küresel kubbeye sahip benzer bir arayıcı (seeker) tasarımına bakılarak belirlenmiştir.

Yukarıda görülebileceği üzere, özellikle eksen dışı (off-axis) alanlar için MTF değerleri bu sınırın altındadır. Bu grafikler, herhangi bir Chebyshev yüzeyi veya bu yüzeylerin hareketi olmadan elde edilen sonuçlara aittir. Daha sonraki aşamada, eksen dışı alanlar için MTF değerleri iyileştirilmiş ve büyük bir kısmı bu hedefi karşılar hale gelmiştir.

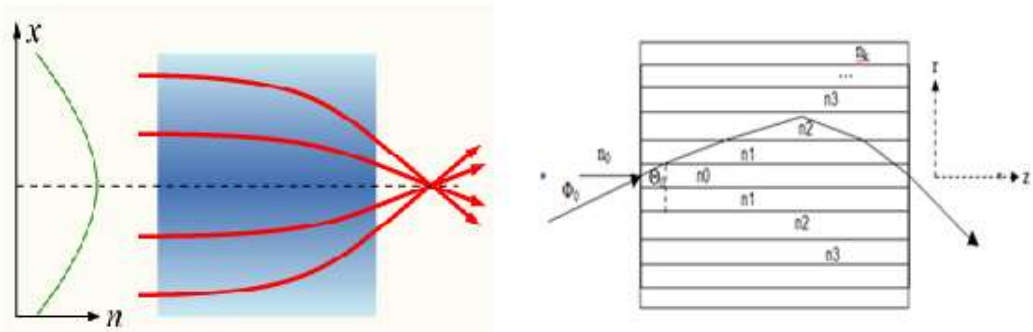
4.2 Literatür ve Denenmiş Tasarım Çalışmaları

Konformal kubbeli optik sistemlerde, kubbenin rotasyonel olmayan simetrik yapısından ve görüş açısına bağlı kırılma etkilerinden kaynaklanan yüksek dereceli aberasyonları azaltmak ve sistemin MTF gibi performans metriklerini iyileştirmek amacıyla literatürde hem aktif hem de pasif çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu kapsamda en yaygın yaklaşımlardan biri, dalga cephesi hatalarını gerçek zamanlı olarak telafi edebilen deforme edilebilir aynalar (adaptive optics) olup, özellikle geniş görüş açılarında ve değişken çevresel koşullar altında yüksek performans sağlama açısından önemli bir avantaj sunmaktadır; ancak bu yöntem yüksek maliyet, karmaşık kontrol algoritmaları ve ek sensör gereksinimi nedeniyle sistem entegrasyonunu zorlaştırmaktadır.



Şekil 4.11 Deforme edilebilir ayna

Uzamsal koordinatlara göre kırılma indisi değişen ve pasif bir düzeltme yöntemi olan, gradyan indisli (GRIN) malzemeler ışınların ortam içerisinde kontrollü şekilde yönlendirilmesine olanak tanıyarak daha kompakt ve entegre çözümler sunmakta, ancak üretim zorlukları ve dispersif etkiler nedeniyle uygulama alanları sınırlı kalmaktadır. Literatürde gradyan indisli konformal kubbe kullanılarak optik aberasyonlar çözümlemeye çalışılmıştır. Fakat konformal kubbenin üretimi nispeten küresel kubbeye göre daha zorken gradyan indisli malzemeli yapmak üretim sürecini zorlaştırmaktadır.



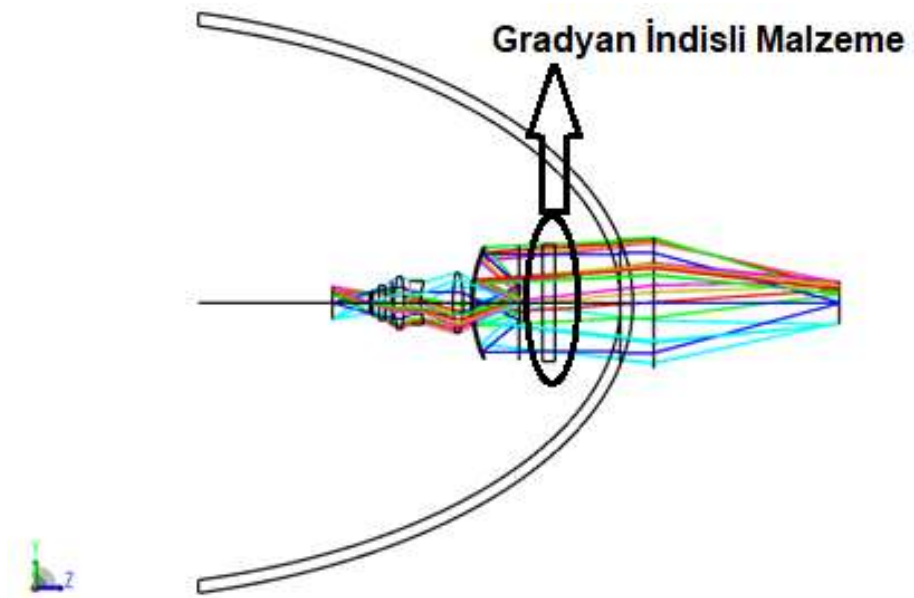
Şekil 4.12 Gradyan indisli malzeme

Diğer çalışılan yöntem ise düzeltici mercek grupları (corrector lenses) ile dinamik optik elemanlar kullanılarak asimetrik aberasyonlar azaltılmaya çalışılmıştır. Fakat bu yöntem üretim toleranslarının daralmasına ve sistemin daha karmaşık bir yapı haline gelmesine neden olmaktadır.

Denenen Bazı Tasarım Çalışmaları

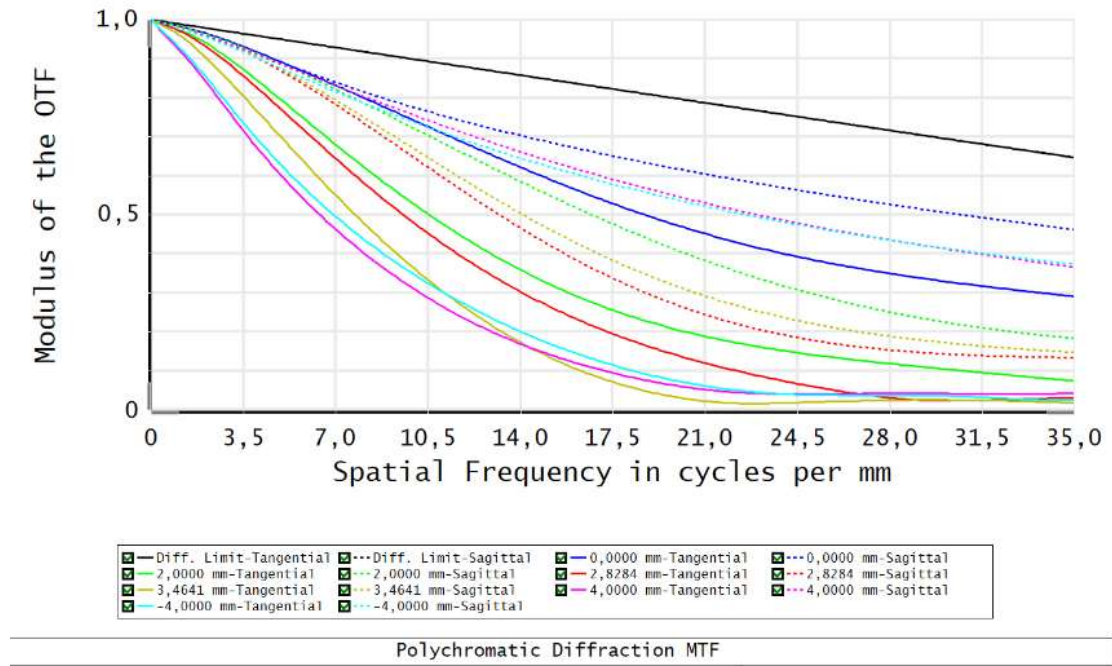
Aerodinamik performansı arttırmak amacıyla konformal kubbeli tasarıma geçilmiştir. Konformal kubbeli yapıya geçildiğinde yapının şeklinden kaynaklı asimetrik aberasyonları düzeltmek için literatürdeki çalışmaların araştırılması yapılarak bazı yöntemler denenmiştir.

Öncelikle tasarımda konformal kubbenin önüne bu aberasyonları kompanse etmek amacıyla sistemin optik yoluna bir Gradyan İndisli (GRIN) malzeme entegre edilmiştir. Gradyan indisli eleman, optik eksen boyunca veya radyal yönde değişen kırılma indisi profili sayesinde, ışık demetlerinin dalga cephesini malzeme içinde düzelterek, geleneksel merceklerin tek başına gideremediği asimetrik aberasyonları düzeltilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.13’de Konformal Kubbeli gradyan indisli tasarımın yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Konformal kubbeli gradyan indisli optik sistem

Konformal Kubbeli tasarımlar genel olarak ayna ve merceklerden oluşan katadioptrik sistemlerden oluşmaktadır. Bu tasarımda katadioptrik mimaride yapılmıştır. Konformal kubbenin önündeki optik yola gradyan indisli malzeme yerleştirilerek kubbeden kaynaklı aberasyonları çözmek amaçlanmıştır. Ansys Zemax Programında modellenerek analizi yapılan tasarımın optik performans metriği olan MTF grafiği aşağıda Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

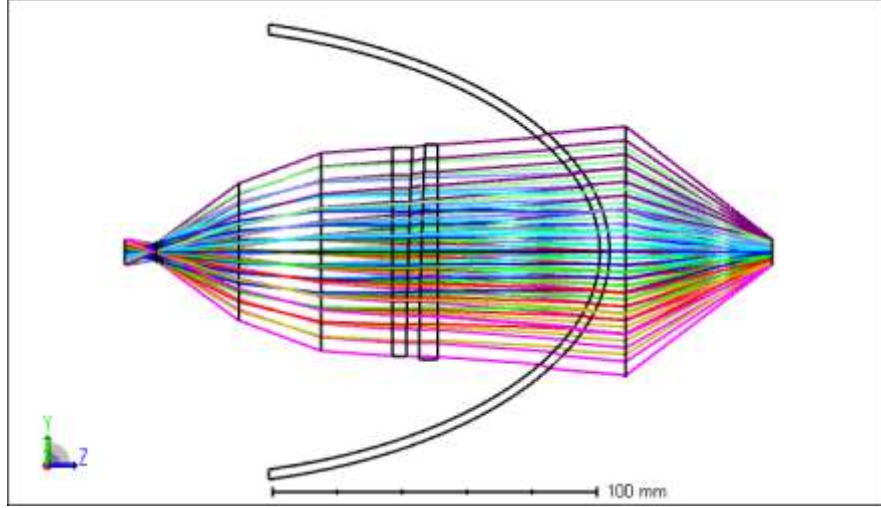


Şekil 4.14 Gradyan indisli tasarımın MTF grafiği

Şekil 4.14’deki MTF grafiğine baktığımızda eksen merkezinde ve dışındaki görüş açılarındaki MTF değerlerinin fiziksel sınır olan kırınım limitinden uzak olduğu görülmektedir. Eksen dışı görüş açılarındaki MTF değerleri 21 cycles/mm frekans değerinden sonra sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Kubbeden kaynaklı aberasyonlar bu yöntemle düzeltilememiştir. Başka çeşitte yüzeylerde denenmiş fakat benzer performans elde edilmiştir.

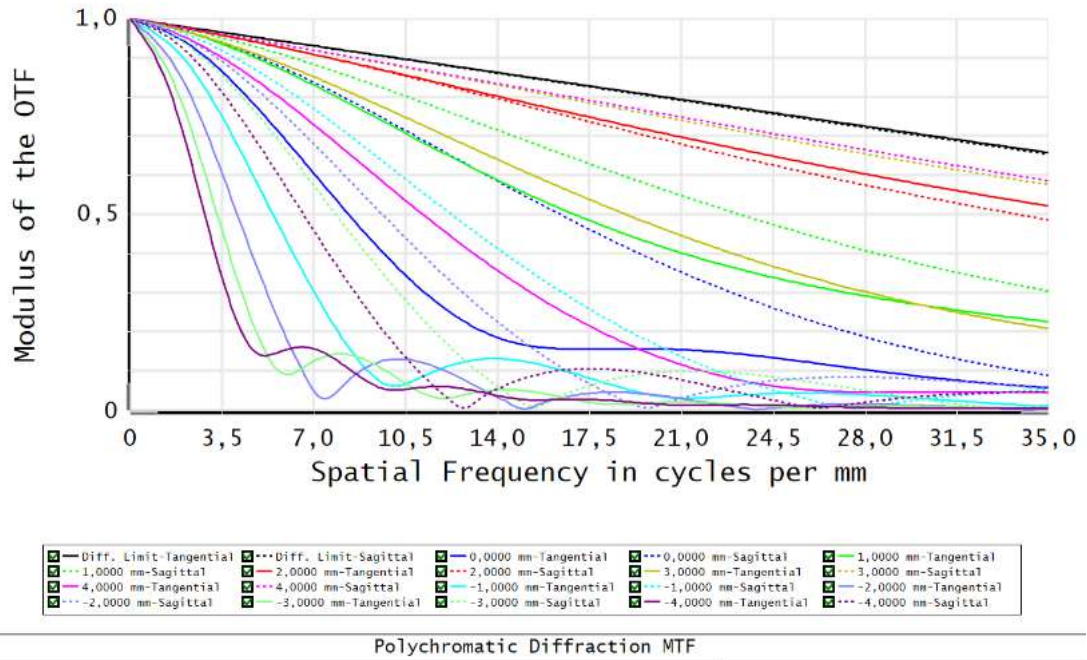
Serbest biçimli yüzey olan Chebyshev Polinom yüzeyli iki tane mercek optik yola yerleştirilerek aberasyonlar çözümlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.15’de tasarımın

yerleşimi gösterilmektedir. Tasarım paraksiyel ve birbirine bakan yüzeyleri Chebyshev polinom yüzeyli olan sabit iki tane germanyum mercekten oluşmaktadır.



Şekil 4.15 Sabit Chebyshev polinom yüzey mercekli sistem

Şekil 4.16’da tasarımın MTF grafiği gösterilmektedir. Eksen merkezi ve dışındaki MTF değerleri gösterilmiştir. Gradyan indisli tasarıma göre ara görüş açılarında MTF değeri yükselirken genel olarak düşük performans sergilediği görülmektedir.



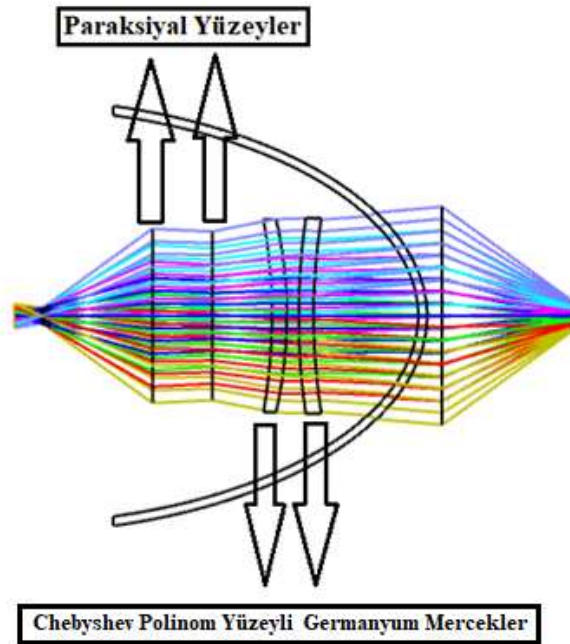
Şekil 4.16 Sabit Chebyshev polinom yüzey mercekli tasarımın MTF grafiği

Yapılan denemeler sonucunda kubbeden kaynaklı asimetrik aberasyonlar sabit merceklerle çözülemediği görülmektedir.

4.3 Chebyshev Yüzeyli Paraksiyal Tasarım

Konform kubbenin neden olduğu asimetrik sapmaları azaltmak için sistem, Chebyshev polinom yüzeyli hareketli mercekler kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarım detayları aşağıdaki gibidir:

Tasarımda Paraksiyal yüzeyler ve Chebyshev polinom yüzeyli iki hareketli mercek bulunmaktadır. Chebyshev polinom yüzeyli mercekler, birbirlerine göre zıt yönlerde dönmektedir. Başka bir deyişle, lazer mesafe ölçme sistemlerindeki Risley prizma çiftleri gibi, z yönünde birbirlerine göre ters yönde dönmektedirler.



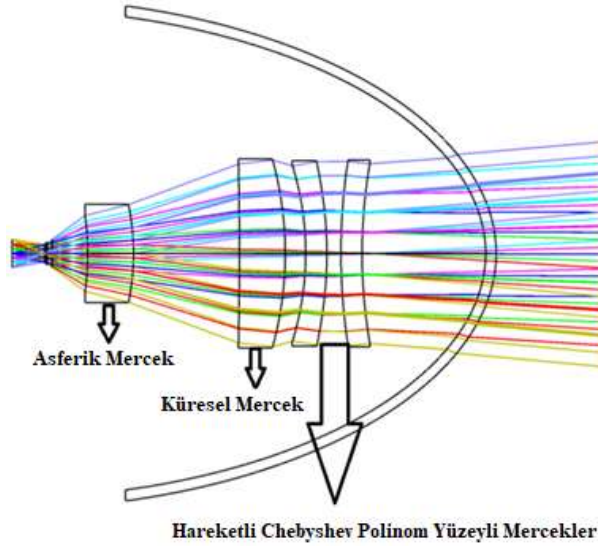
Şekil 4.17 Paraksiyal ve Chebyshev polinom yüzeylerinin tasarımı

Birinci hareketli mercek z yönünde dönerken, diğer mercek -z yönünde aynı derecede dönmektedir. Merceklerin Chebyshev Polinom yüzeylerinin katsayıları ve dönme açıları merit fonksiyonunda optimize edilmiştir.

Kırıcı objektifi tasarımının tamamlanması için, görüntü düzlemine yakın iki mercek, Paraksiyal yüzeyler yerine eklenmiştir. Sistemde ayna yapısı tercih edilmemiştir. Optik sistem toplam 4 mercekten oluşmaktadır.

4.4 Chebyshev Polinom Yüzeyli Hareketli Merceklerle Konformal Tasarımı (FOR $\pm 10^\circ$)

Optik sistem, bir yüzeyinde Chebyshev polinomu bulunan hareketli merceklerle optimize edilmiştir. Ayrıca, refraktif objektif kısmında asferik ve küresel mercekler kullanılmıştır. Dinamik olarak dönen merceklerin tek yüzeyleri Chebyshev polinomludur. Chebyshev polinom yüzeyi, konformal yapıdan kaynaklanan sapmaları çözmek için kullanılmıştır. Farklı Chebyshev açıları, oluşan sapmaları çözmek için ters dönen bir çift olarak kullanılmaktadır. Konformal kubbenin neden olduğu sapmaları, farklı Chebyshev açıları için statik düzeltici tasarımıyla azaltmak çok zor olduğundan, Chebyshev yüzeyli bu dinamik Germanyum mercek çifti seçilmiştir. Konformal yapıdan kaynaklanan asimetric sapmaları farklı Chebyshev açılarında düzeltilmektedir.



Şekil 4.18 Hareketli Chebyshev yüzeyli konformal optik sistem (FOR:0°)

Arayıcı objektifin tasarımında toplam 4 mercek kullanılmıştır. Mercek sayısı, kompaktlığı ve gimbal yapısına kolay uyumunu korumak ve görüş alanlarını en üst düzeye çıkarmak için mümkün olduğunca az tutulmuştur. Bu nedenlerle, her merceğin

yüzeyi asferik veya serbest formlu olarak seçilerek performanslarına göre değerlendirilmiştir. Bu deneme yanılma süreci sonucunda, öndeki iki mercek de serbest formlu yüzeyler kullanılmıştır. En uygun bu yüzeyler olarak belirlenmiştir. Tasarımcının deneyimi, simetrik asferik veya serbest formlu yüzeyler için doğru yüzeyleri seçmede de büyük önem taşımaktadır.

Chebyshev yüzeyli ve asferik mercekler Germanyum cam malzemesidir. Germanyumun işlenmesi diğer termal malzemelere göre daha kolaydır. Aynalı Cassegrain objektif yerleşimi tercih edilmemiştir. Bu şekilde optik sistem, mercek ve aynaların her ikisini de kullanan karma bir tasarıma göre daha üretilebilir ve hizalanması daha kolaydır. Chebyshev yüzey katsayıları, asferik mercek konik sabiti ve asferik katsayıları, düşük katsayı değişkeniyle başlanarak optimize edilmiştir. Sonuç olarak, serbest formlu yüzeyler ve asferik mercekler, istediğimiz performansı karşılayacak kadar düşük bir katsayıya sahiptir. Bunları daha karmaşık hale getirmek ve katsayıları artırmak tercih edilmez çünkü sisteme hassasiyet getirmektedir. Toleranslandırmayı, üretimi ve ölçümü zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, daha düşük katsayılı asferik mercekler ve serbest formlu yüzeyler tercih edilmektedir.

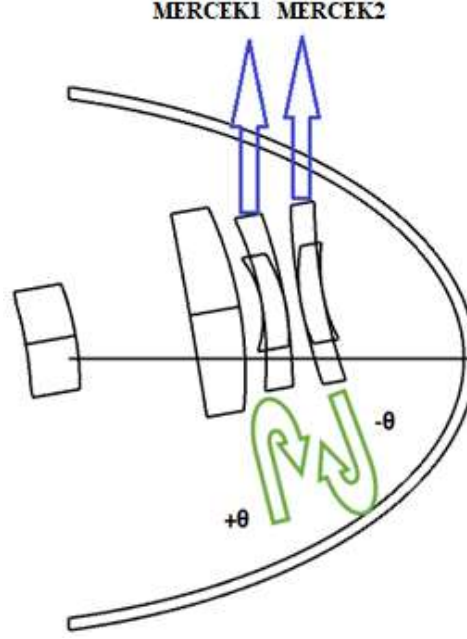
Aşağıda gösterilen iki merceğin yüzeylerinden biri Chebyshev polinomlu yüzeydir. Bu yüzeylerin katsayıları, konformal kubbe sapmalarını düzeltmek için optimize edilmiştir. Chebyshev katsayıları Çizelge 4.'de gösterilmiştir.

Normalize edilmiş polinom katsayıları $c(i, j)$ ikinci derecedendir. Katsayıların derecesi üretim kolaylığı sağlaması açısından mümkün olduğunca düşük tutulmuştur.

Çizelge 4.4 FOR 10°'de merceklerin Chebyshev Polinom katsayısı

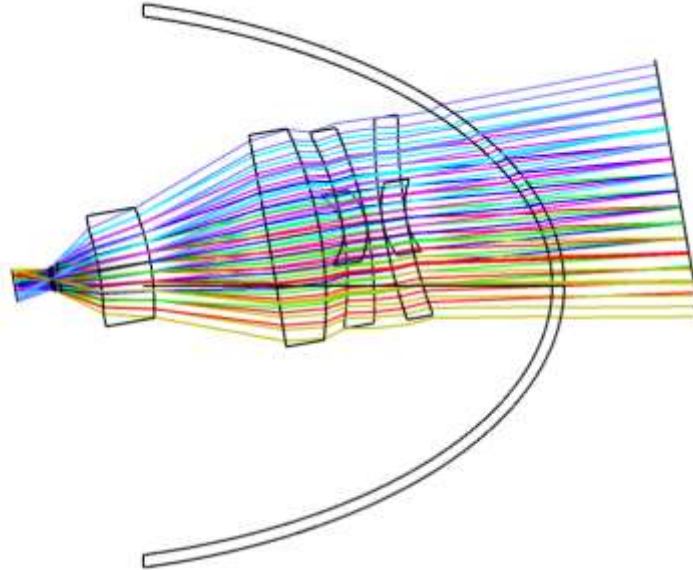
Chebyshev Polinom Katsayıları	c(1,0)	c(2,0)	c(0,1)	c(1,1)	c(2,1)	c(0,2)	c(1,2)	c(2,2)
Mercek1	5,18E-04	-5,43E-03	-5,09E-05	-3,10E-06	2,68E-07	-5,43E-03	-5,60E-07	-2,08E-06
Mercek2	3,20E-04	-1,86E-04	-2,44E-05	-3,32E-06	-1,07E-06	-1,85E-04	-9,84E-07	1,82E-06

Optik sistemin 1 ve 2 numaralı mercekleri Şekil 4.19’da görüldüğü gibi z yönünde dönmektedir. 1 numaralı mercek θ° döndüğünde, 2 numaralı mercek $-\theta^\circ$ dönmektedir.



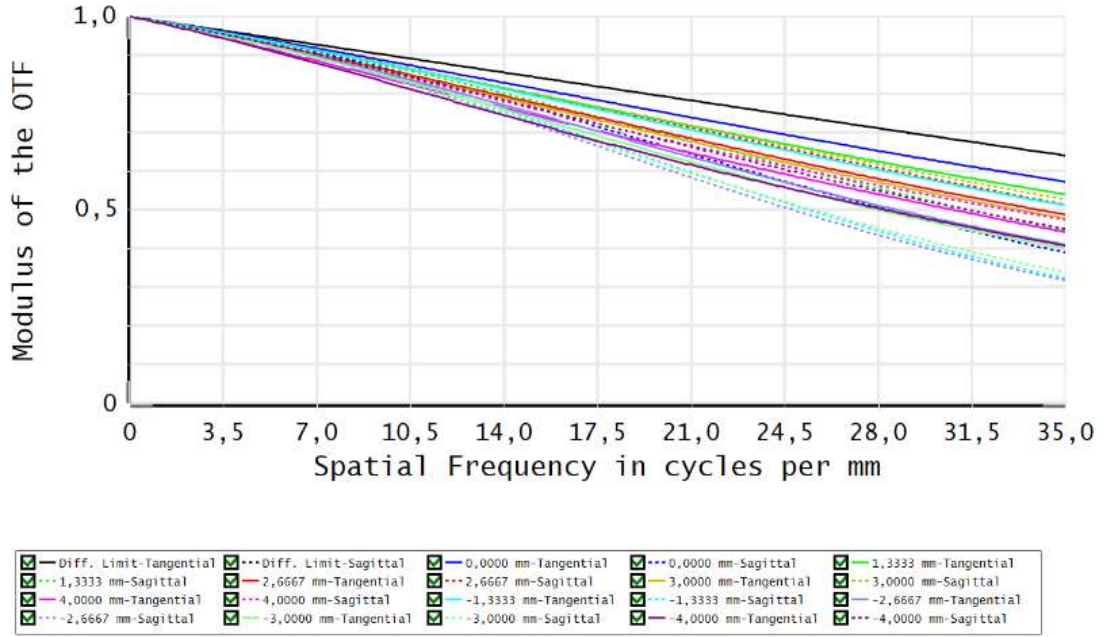
Şekil 4.19 Merceklerin dönme hareketi

FOR:10° için konformal optik sistemin yerleşimi Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

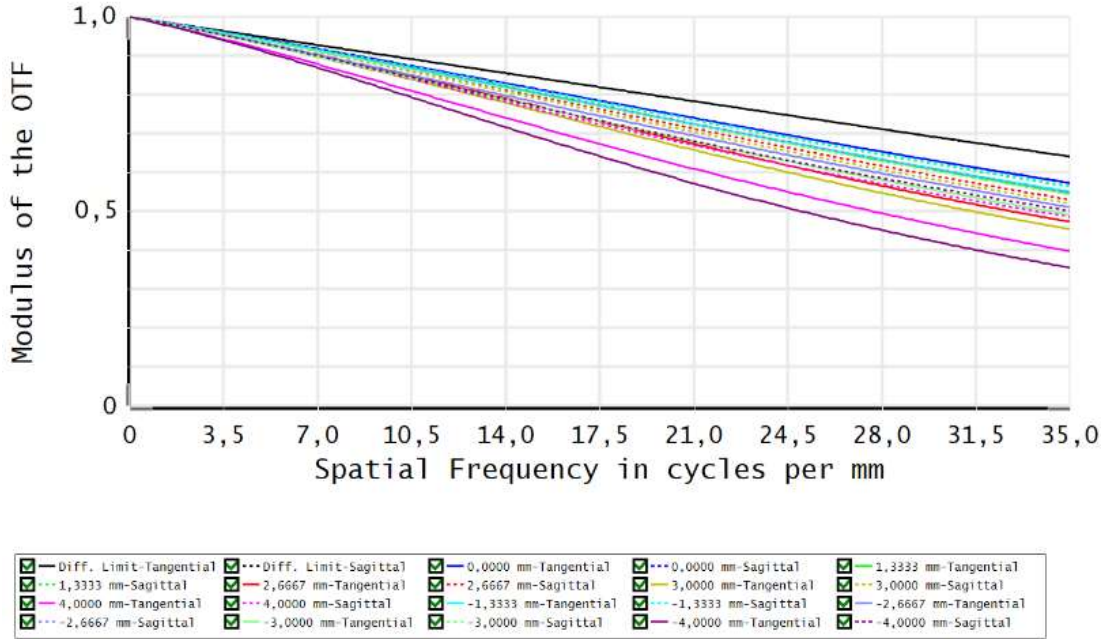


Şekil 4.20 Hareketli Chebyshev yüzeylerine sahip konformal optik sistem (FOR:10°)

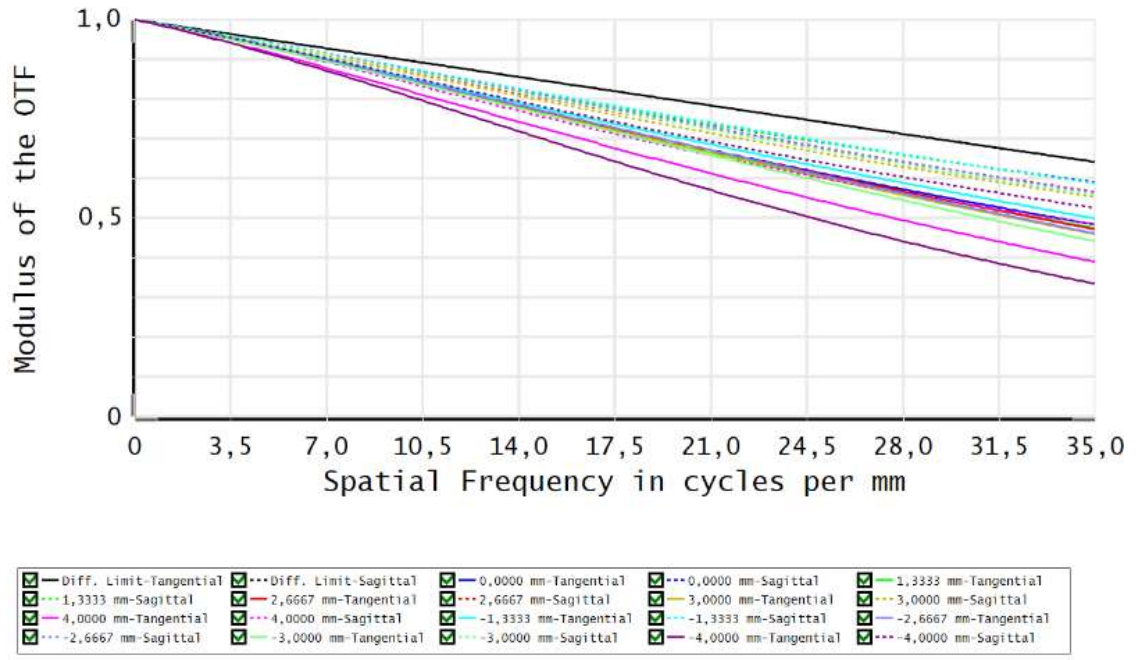
Konformal kubbenin sapmalarını ortadan kaldırmak için tasarım sırasında merceklerin eğrilik yarıçapları, Chebshev katsayıları ve dönüş açıları optimize edilmiştir. Analiz edilen MTF sonuçları Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 FOR: 0°'deki MTF grafiği



Şekil 4.22 FOR: 5°'deki MTF grafiği

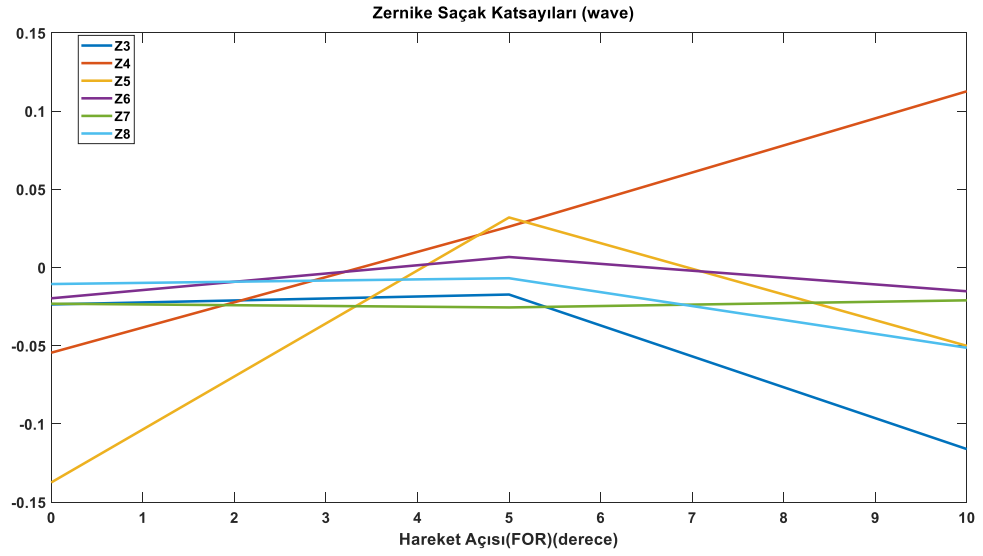


Şekil 4.23 FOR: 10°’deki MTF grafiği

Sapmaları ifade eden Zernike Katsayıları aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Zernike katsayıları 0,15 wave’den küçüktür.

Çizelge 4.5 Zernike saçak katsayıları

Terim	Zernike Saçak Katsayıları	Aberasyon Adı
Z1	1	Piston
Z2	$p \cos (A)$	X Eğim
Z3	$p \sin (A)$	Y Eğim
Z4	$2p^2 - 1$	Odak
Z5	$p^2 \cos (2A)$	X Astigmatizm
Z6	$p^2 \sin (2A)$	Y Astigmatizm
Z7	$(3p^2 - 2) p \cos (A)$	X Coma
Z8	$(3p^2 - 2) p \sin(A)$	Y Coma
Z9	$(6p^4 - 6 p^2 + 1)$	Üçüncü Dereceden Küresel Aberasyon



Şekil 4.24 FOR: 10°'deki zernike saçak katsayı grafiği

En önemli Zernike Katsayısı Z4'tür (Odak). Z4 Zernike katsayısı, FOR açısıyla birlikte artmaktadır. Z5 Zernike Katsayısı (X Astigmatizm) ikinci önemli katsayıdır. Z5 önce azalıp sonar yaklaşık 5° görüş hattından sonra artmaktadır. Z3 (Y Eğim) Zernike katsayısı 5°'den sonra artış göstermektedir. Zernike katsayıları genellikle negatif değerlerine sahiptir.

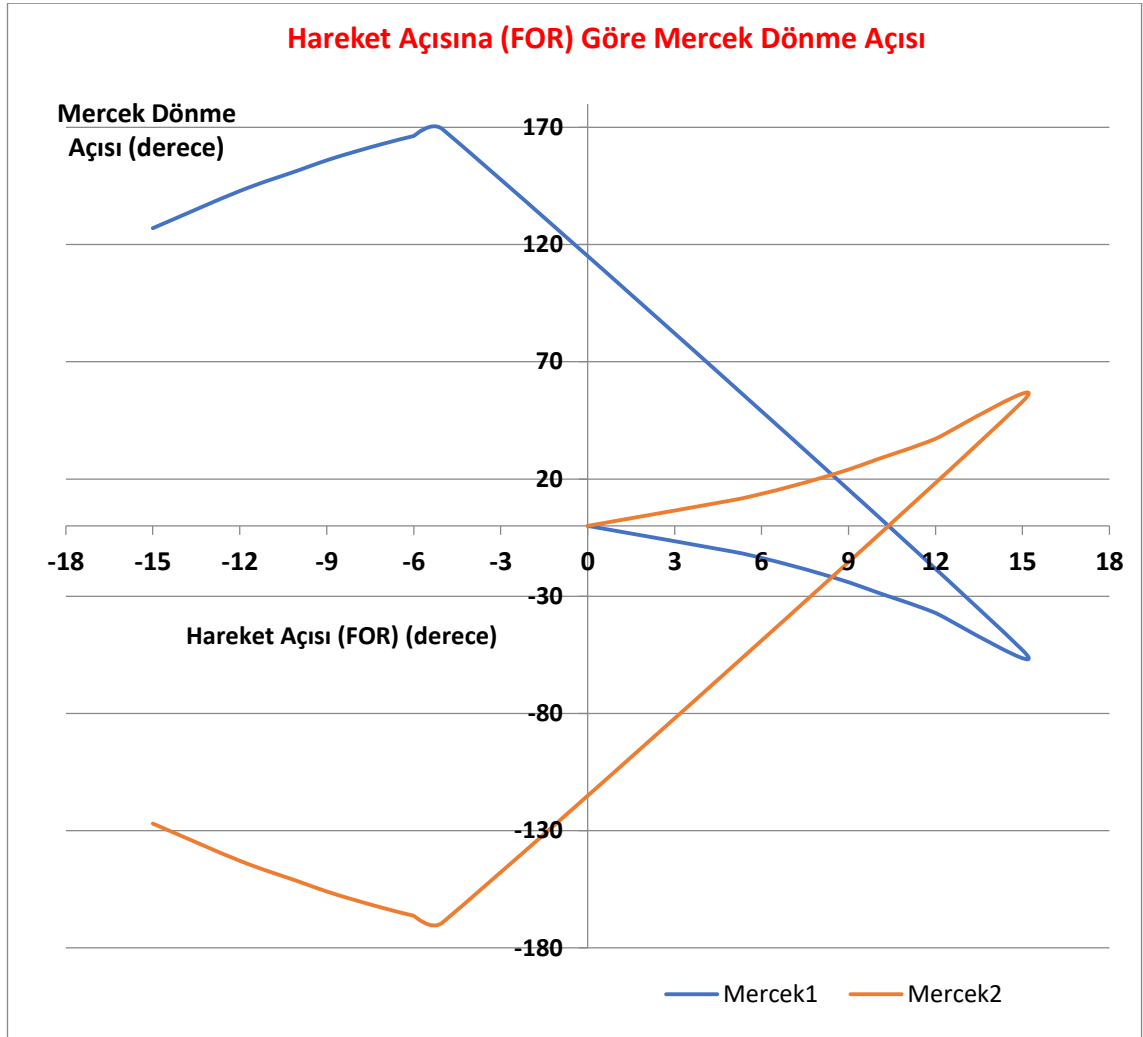
4.5 Chebyshev Polinom Yüzeyli Hareketli Merceklerle Konformal Tasarım (FOR $\pm 15^\circ$)

Aynı tasarım parametreleri kullanılarak, optik sistem 15°'lik bir bakış hattı (FOR) için optimize edilmiştir. Merceklerin farklı FOR değerleri için dönüş açıları Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Birinci ve ikinci merceklerin dönüş açılarının büyüklükleri aynı, ancak işaretleri farklıdır.

Çizelge 4.6 Dönen merceklerin açıları

AÇI PARAMETRELERİ	DEĞERLER												
Hareket Açısı (FOR) (°)	0	5	7	8	10	12	15	-5	-7	-8	-10	-12	-15
Mercek1 (°)	0	-10,960	-16,807	-20,262	-28,420	-37,131	-53	169,174	163,193	159,738	151,580	142,869	127,000
Mercek2 (°)	0	10,960	16,807	20,262	28,420	37,131	53	-169,17	-163,193	-159,738	-151,580	-142,869	-127,000

Mercek1 ve Mercek2'nin hareket açılarına göre merceklerin z yönündeki dönme açısı grafiği Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Mercek1 ve mercek 2 aynı büyüklükte zıt yönde dönmektedir. Bu iki mercek tek motorla sürülebilmesi için bu şekilde tasarlanmıştır. Arayıcı tasarımlarda hacim önem arz ettiği için tek motor tercih edilmiştir.

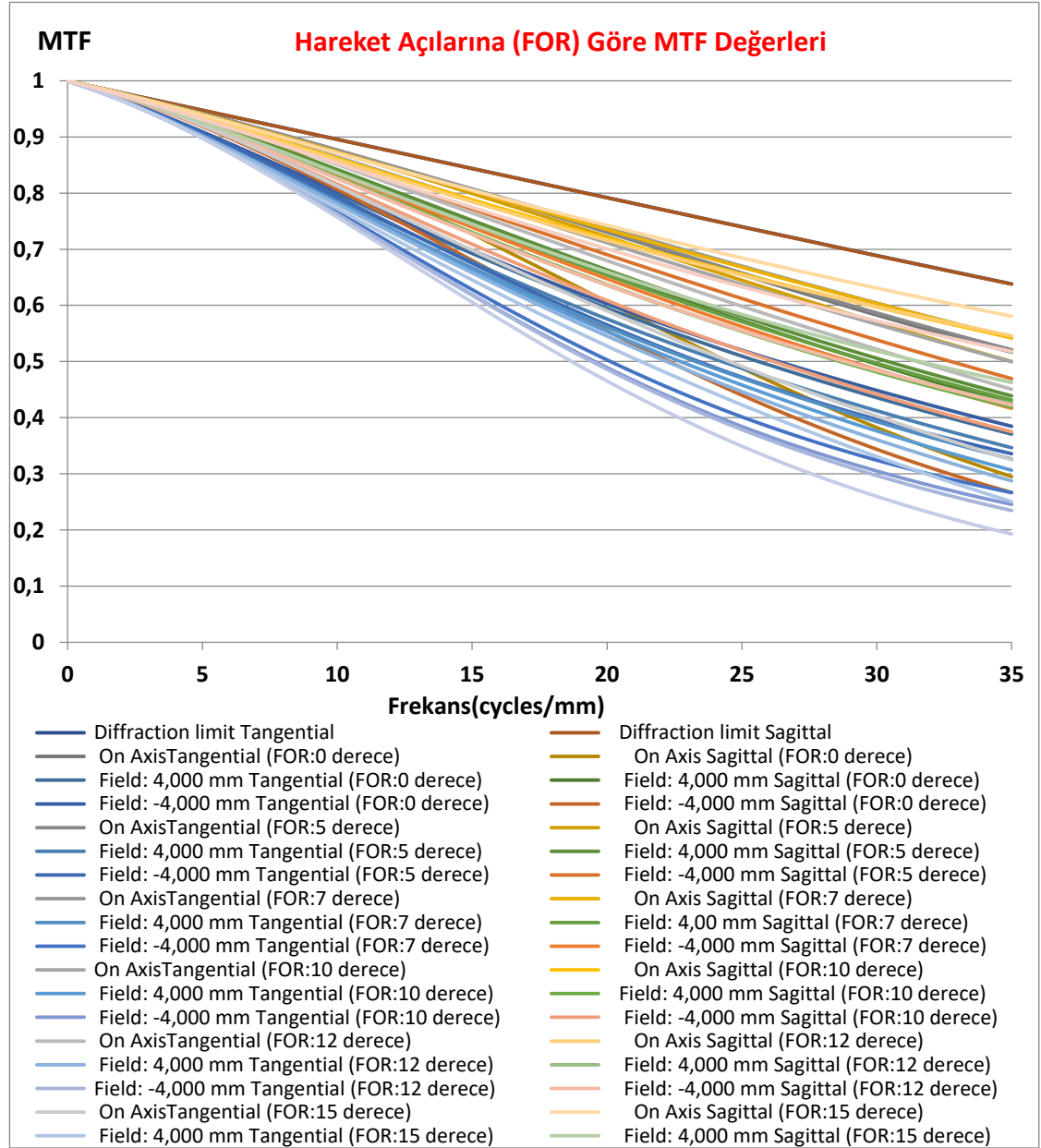


Şekil 4.25 Hareket açılarına göre merceklerin dönme açısı grafiği

Chebyshev polinom yüzeylerinin katsayıları, konformal kubbenin sapmalarını düzeltmek için optik sistemde optimize edilmiştir. Bu katsayılar Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Normalize edilmiş polinom katsayıları $c(i, j)$ 15 ikinci derecedendir.

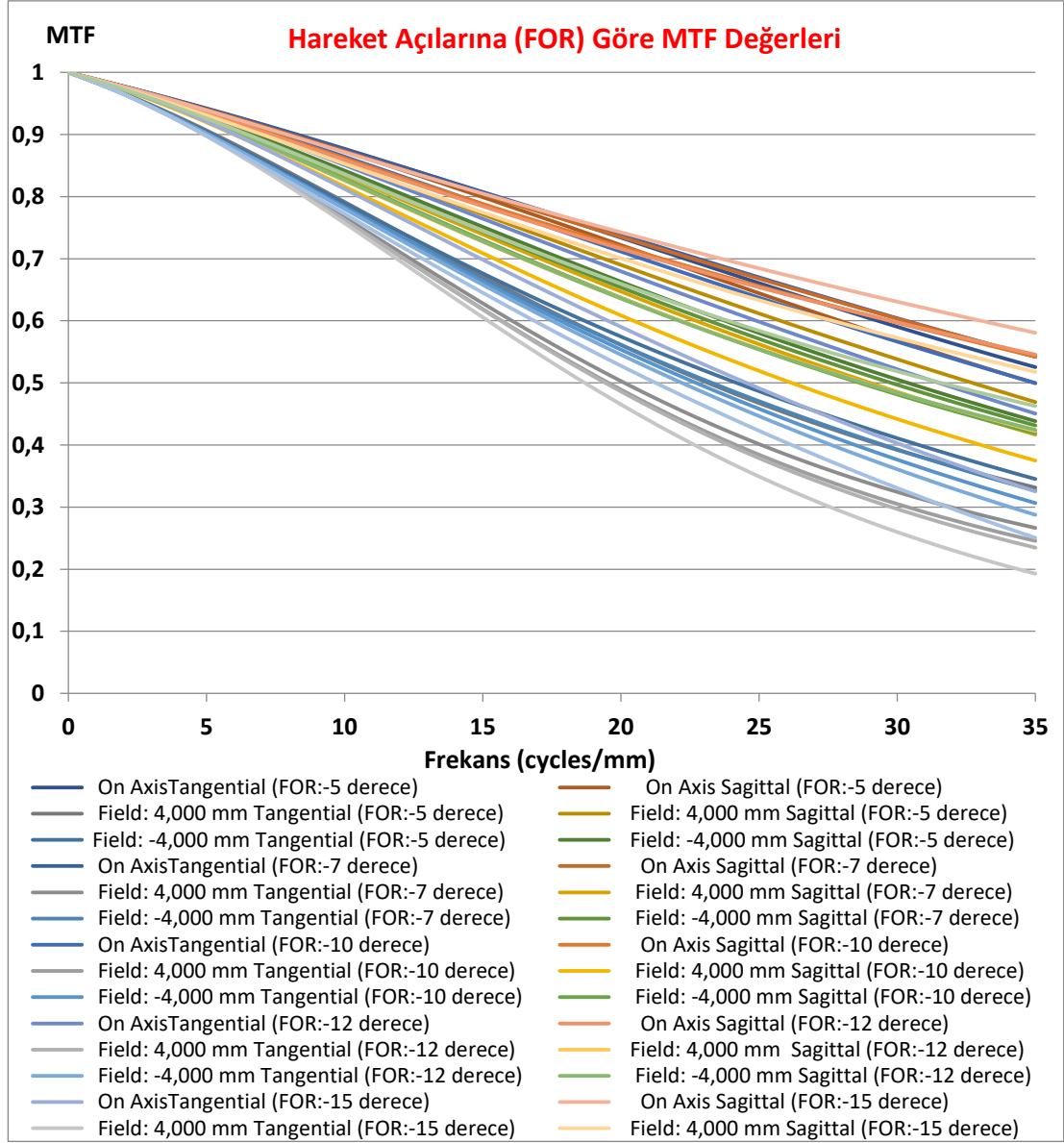
Çizelge 4.7 FOR 15°'deki merceklerin chebyshev polinom katsayıları

Chebyshev Polinom Katsayıları	c(1,0)	c(2,0)	c(0,1)	c(1,1)	c(2,1)	c(0,2)	c(1,2)	c(2,2)
Mercek1	9,64E-04	-5,04E-03	-1,42E-04	-5,36E-06	-1,22E-06	-5,04E-03	-6,78E-07	-9,41E-07
Mercek2	6,40E-04	7,94E-04	-8,44E-05	-5,81E-06	-1,31E-06	7,94E-04	-1,99E-06	1,67E-07



Şekil 4.26 FOR:0 ile 15 derece arasındaki MTF grafiği

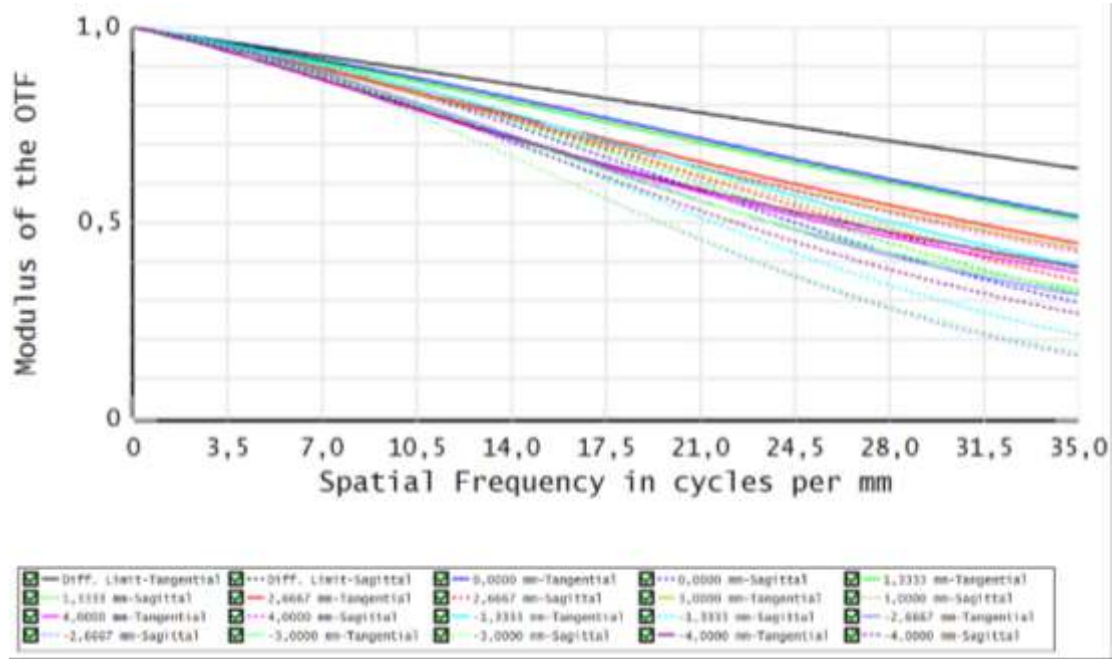
Şekil 4.26'da FOR açısı 0 ile 15 derece arasındaki eksen merkezi ve dışındaki görüş açılarındaki MTF değerleri gösterilmiştir.



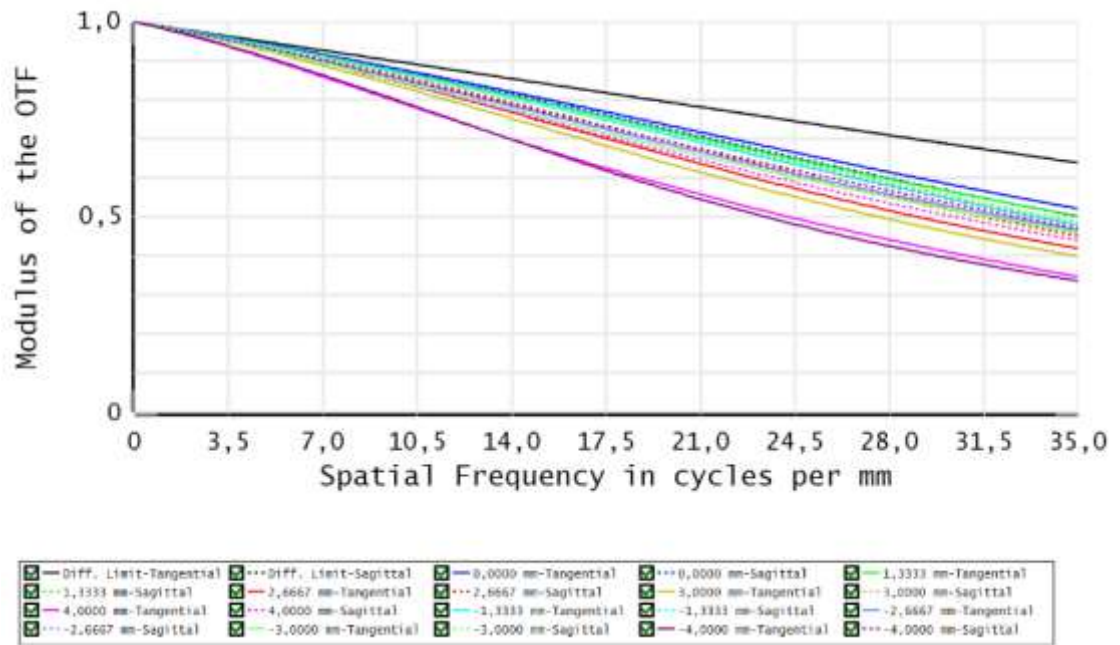
Şekil 4.27 FOR:0 ile -15 derece arasındaki MTF grafiği

Şekil 4.27’de FOR açısı 0 ile -15 derece arasındaki eksen merkezi ve dışındaki görüş açılarındaki MTF değerleri gösterilmiştir.

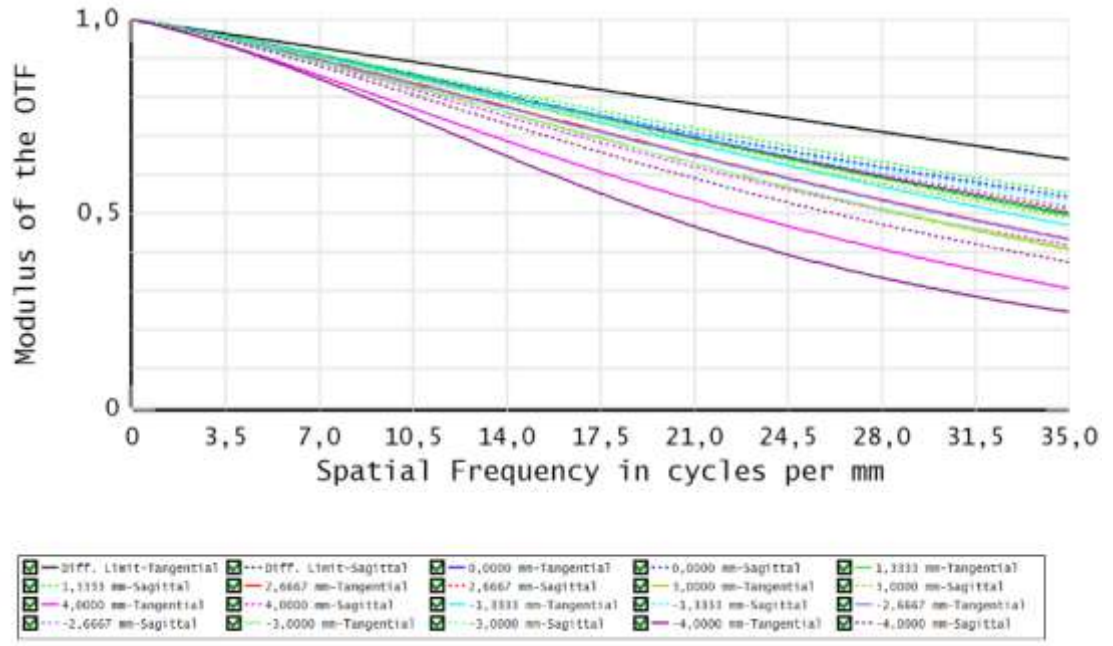
Farklı FOR açıları için yapılan analizden elde edilen MTF ve Zernike grafikleri aşağıda Şekil 4.28, Şekil 4.28, Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de gösterilmektedir.



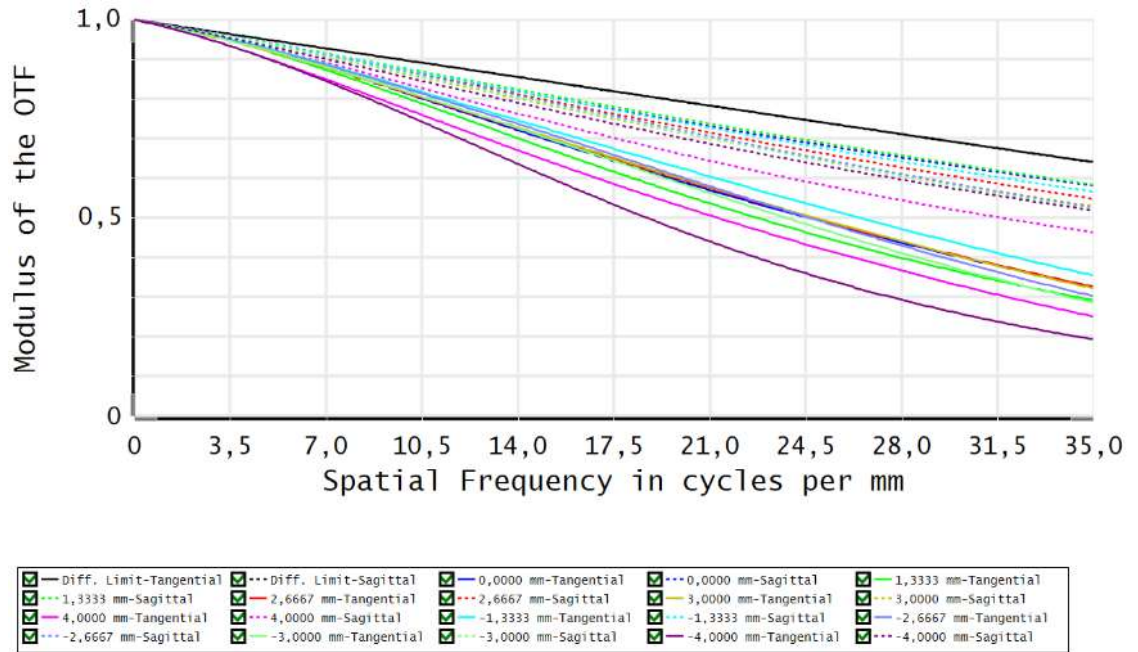
Şekil 4.28 FOR: 0°’deki MTF grafiği



Şekil 4.29 FOR: 5°’deki MTF grafiği



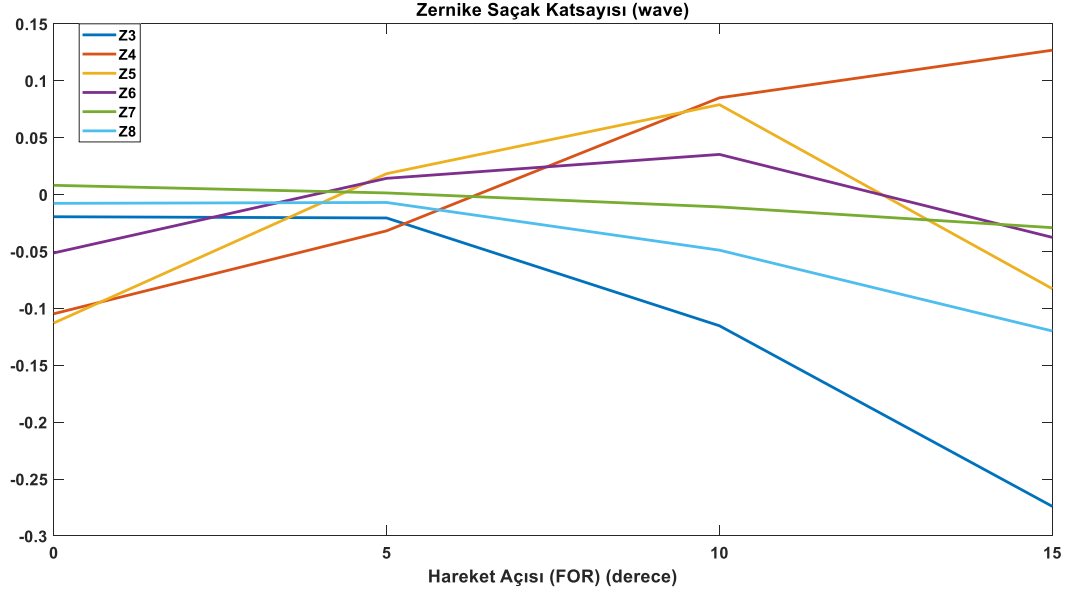
Şekil 4.30 FOR: 10°’deki MTF grafiği



Şekil 4.31 FOR: 15°’deki MTF grafiği

Görüş Alanı açısı arttıkça, özellikle astigmatizm ve diğer sapmalar da artmaktadır. Buna bağlı olarak, artan sapmalarla birlikte MTF değerleri de azalmaktadır. Ancak bu durumda bile, yüksek frekanslardaki MTF değerleri hala 0,2’den büyüktür.

Zernike katsayıları da $\text{FOR} \pm 15^\circ$ 'de 0,15 wave değerinin altındadır.



Şekil 4.32 $\text{FOR}: 15^\circ$ 'deki zernike saçak katsayı grafiği

Z3, Z4 ve Z8 Zernike Katsayıları, $\text{FOR} \pm 15^\circ$ 'de $\text{FOR} \pm 10^\circ$ durumundan daha yüksektir. Bu, öngörülebilir bir sonuçtur. Konformal yapı simetrik olmayan sapmalara neden olduğundan, bu sapmaları en aza indirmek için, Chebyshev polinom yüzeylerine sahip hareketli mercekler kullanılmıştır. Chebyshev polinom yüzeyli mercekler birbirlerine göre zıt yönlerde hareket etmektedir. Böylece konformal yapıdan kaynaklı optik sapmalar, Chebyshev polinom merceklerinin kullanımıyla azalmaktadır.

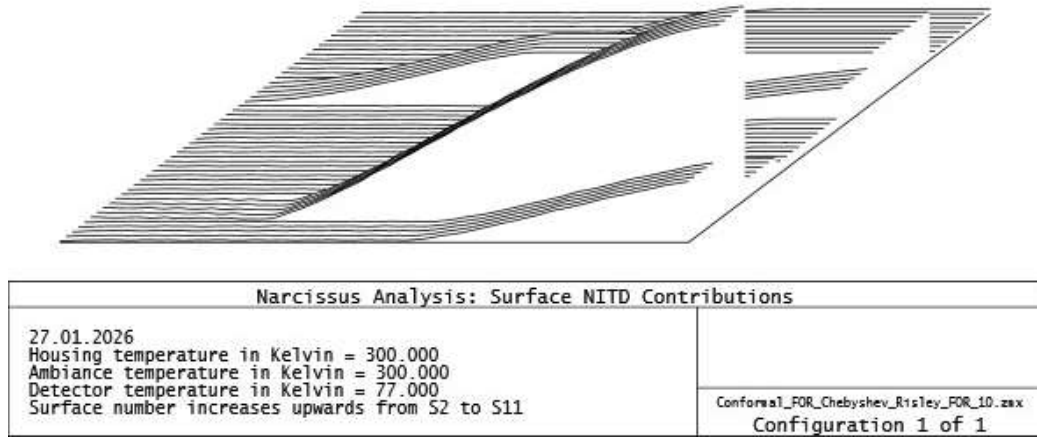
4.6 Narcissus Analiz Sonuçları

Narcissus etkisi, kızılötesi merceklerde soğuk detektörün kendi üzerine yansımasıdır. Narcissus etkisi genellikle görüntünün merkezinde keskin, koyu bir disk olarak kendini gösterir ve kızılötesi görüntü kalitesini büyük ölçüde düşürür. Kızılötesi merceklerdeki bu iki etki, genellikle optik tasarımın sonlarında, tüm optik güçler, malzemeler ve konumlar bu etkiler dikkate alınmadan belirlendikten sonra analiz edilmektedir. Bu nedenle, tasarım çok iyi bir performansına sahip olsa da, narcissus etkisi açısından düşük performans gösterebilmektedir (Aslan 2022).

Bu bölümde FOR açısı ± 10 ve ± 15 derece olan objektifler için aşağıda belirtilen sıcaklıklarda narcissus analizi yapılmıştır.

Gövde ve sahne (görüntülenen ortam) sıcaklıkları 300 K, soğutmalı detektör sıcaklığı ise 77 K olarak atanmıştır.

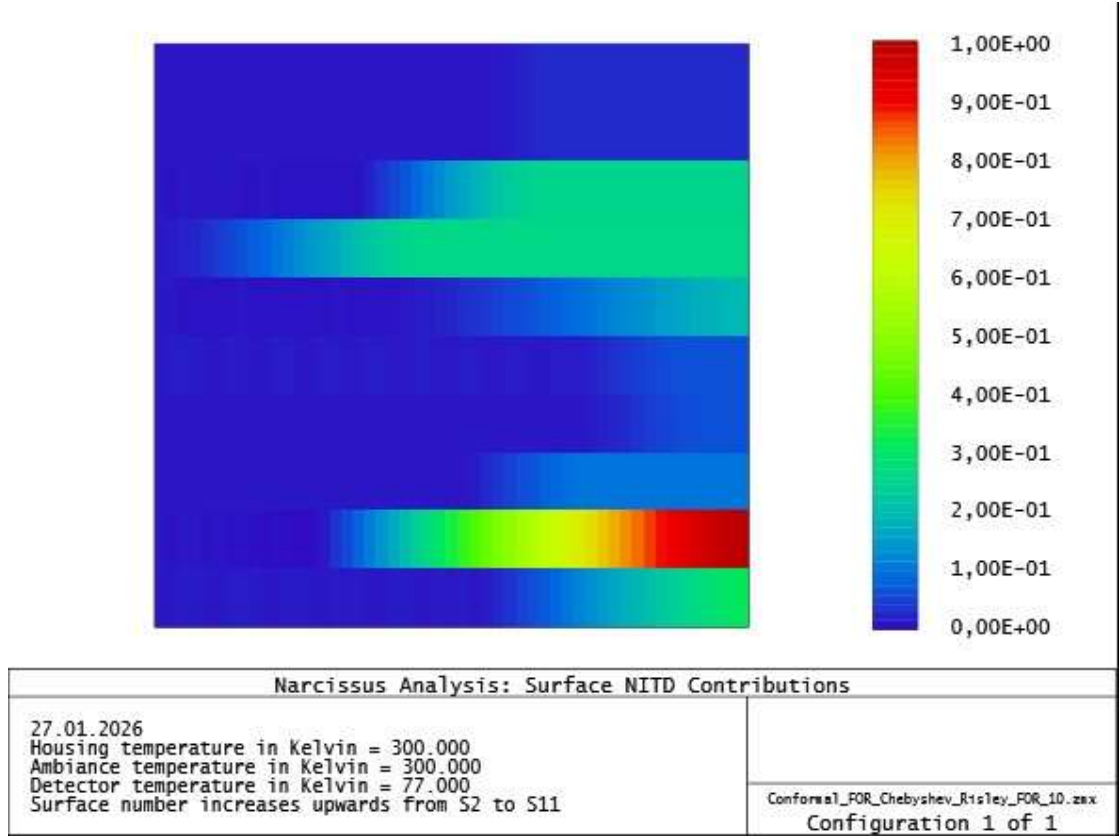
FOR açısı 10 derece olan objektifin Narcissus sonuçları aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.33 Yüzeylerin NITD 3 boyutlu grafiği

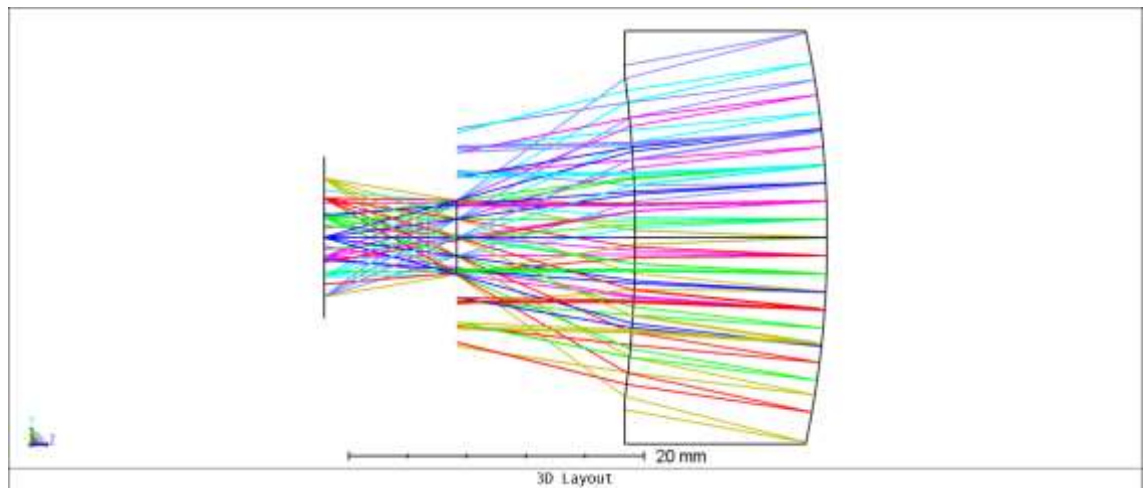
Objektifde en fazla yansıma yaparak NITD (Narcissus Induced Temperature Difference) değeri en yüksek olan yüzeylerin 3 boyutlu hali Şekil 4.33’de gösterilmiştir.

Şekil 4.34’de her bir yüzeyin renklere göre ayrılmış NITD değerlerini göstermektedir. Kırmızı renge doğru gidildikçe bu değer artmaktadır.



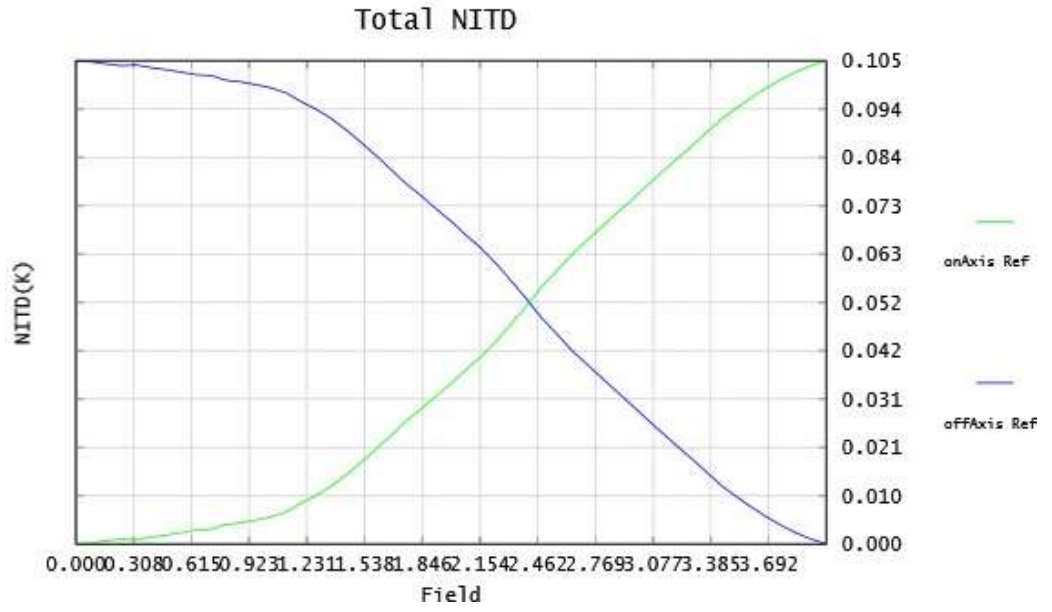
Şekil 4.34 Renklere göre ayrılmış yüzeylerin NITD katkıları

Narcissus etkisine en çok katkı sağlayan mercek yüzeyi Şekil 4.35’de gösterilmektedir.



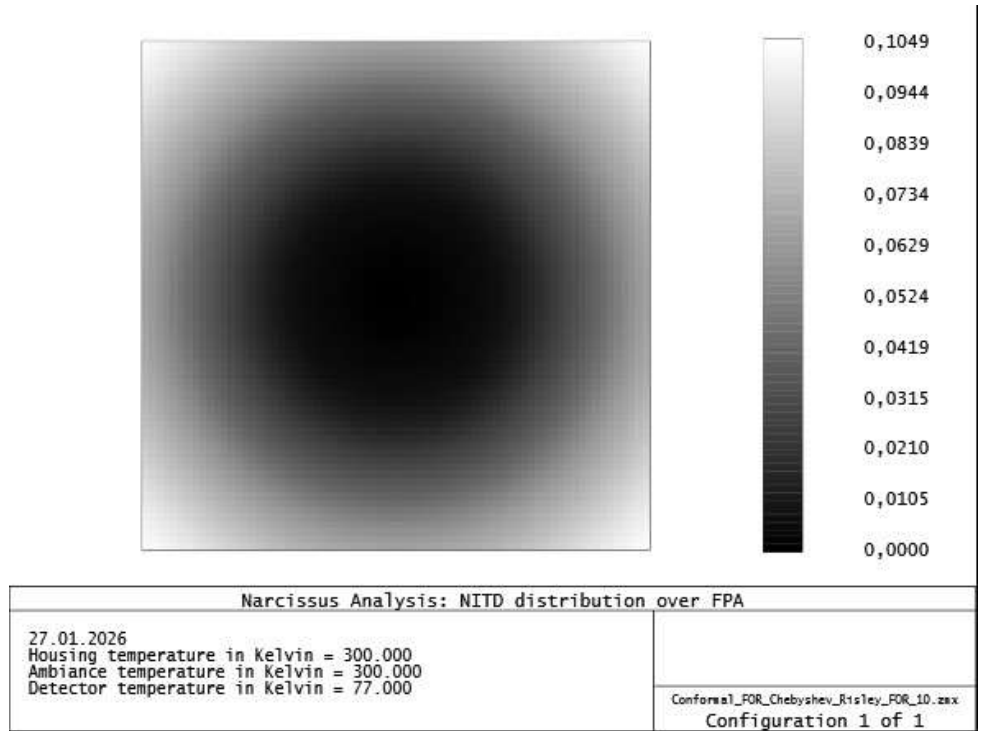
Şekil 4.35 Mercek üzerindeki narcissus etkisi

Şekil 4.36’da gösterildiği gibi narcissus etkisinden dolayı merceğin yüzeyinden detektöre doğru yansıdığı görülmektedir.



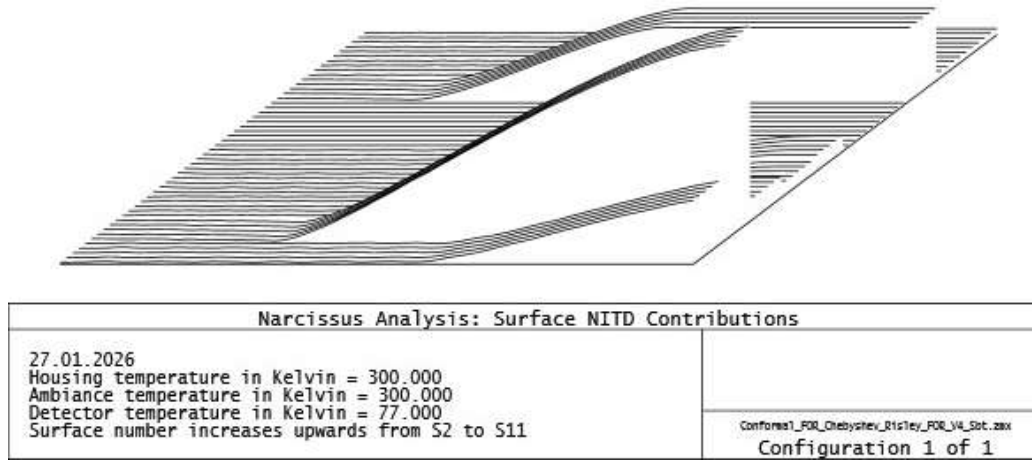
Şekil 4.36 Objektifin toplam NITD grafiği

Toplamda maksimum NITD değeri 0.1K'dir. Bu değer termal tasarım için kabul edilebilir bir değerdir. Görüş açısına arttıkça makul olan doğrusal bir grafikte artmaktadır. Şekil 4.37'de narcissus görüntüsü verilmiştir.



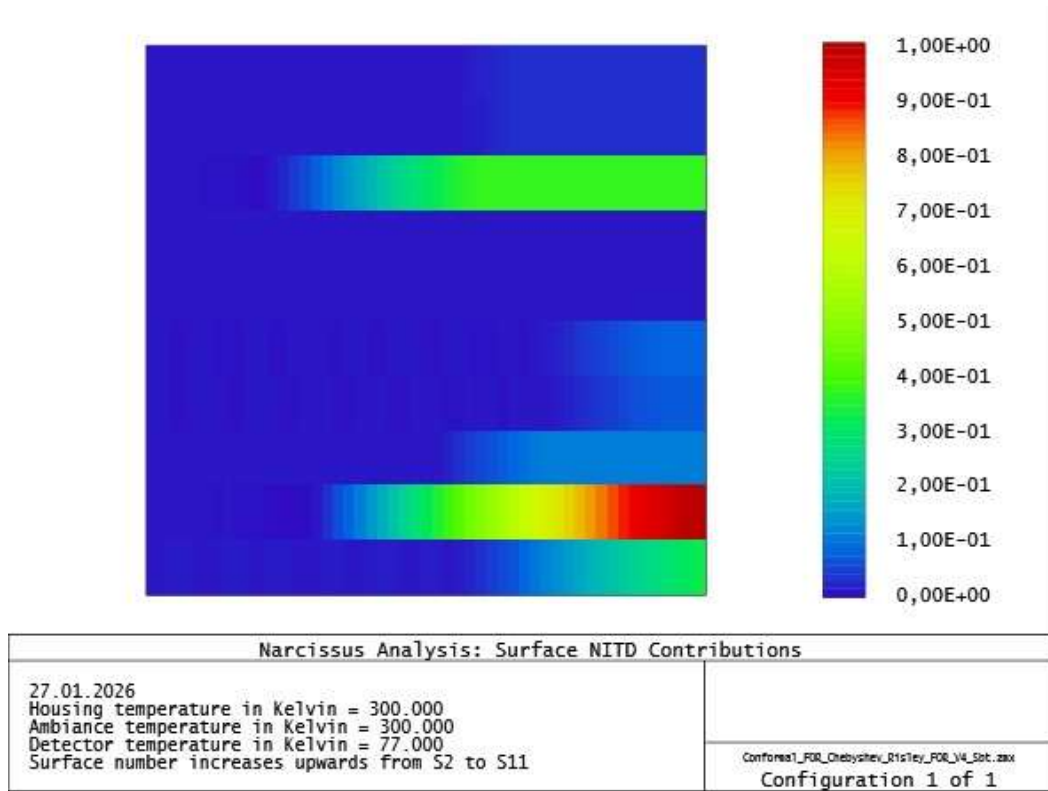
Şekil 4.37 Narcissus görüntüsü

FOR açısı 15 derece olan objektifin Narcissus sonuçları aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.38 Yüzeylerin NITD 3 boyutlu grafiği

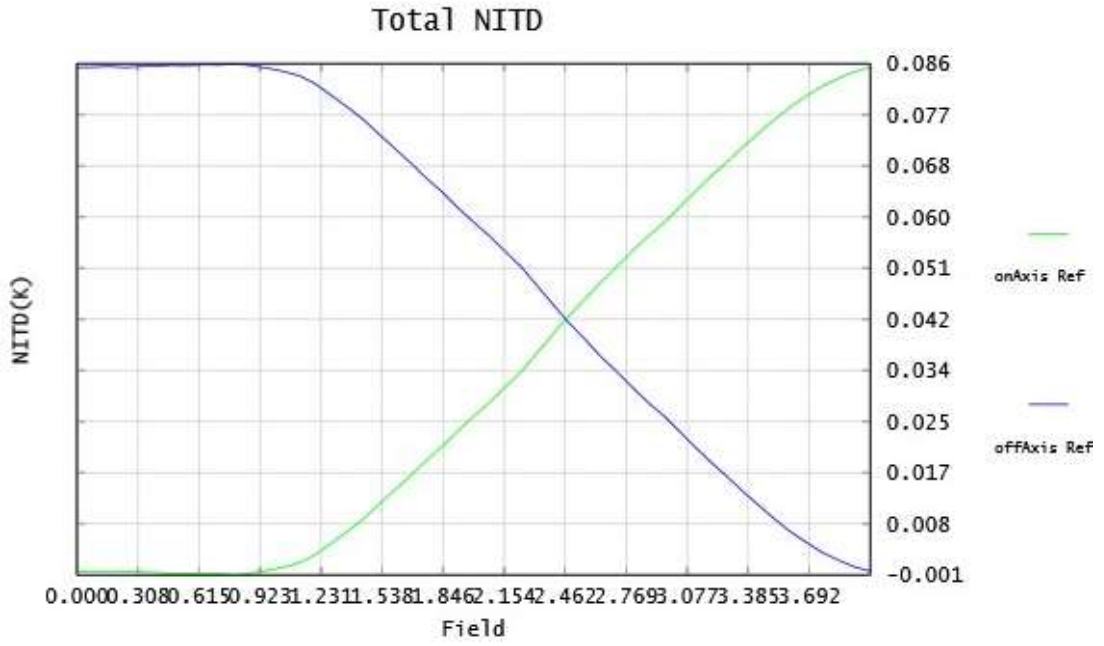
Objektifte en fazla yansıma yaparak NITD değeri en yüksek olan yüzeylerin 3 boyutlu hali Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



Şekil 4.39 Renklere göre ayrılmış yüzeylerin NITD katkıları

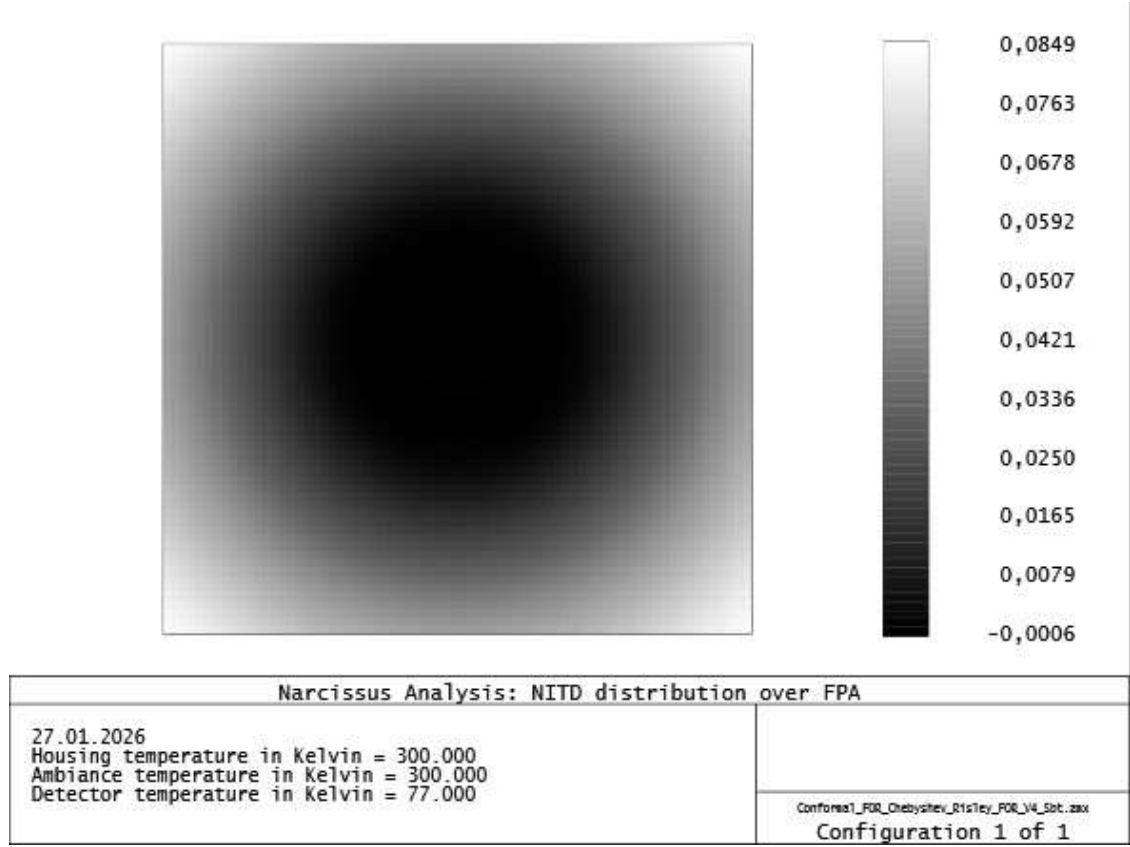
Narcissus etkisine en çok katkı sağlayan mercek yüzeyi Şekil 4.39'da gösterilmektedir.

FOR açısı büyük olan tasarımda da aynı yüzeyden daha fazla Narcissus etkisine katkı gelmiştir. FOR açısı farklı olan aynı objektif olduğu için benzer sonuçlar gelmiştir.



Şekil 4.40 Toplam yüzeylerin NITD değerleri

Toplamda maksimum NITD değeri 0,086 K'dir. 0,1 K değerinin altındaki toplam NITD termal tasarım için kabul edilebilir makul bir değerdir.



Şekil 4.41 Narcissus görüntüsü

Yukarıdaki Şekil 4.41’de narcissus görüntüsü verilmiştir.

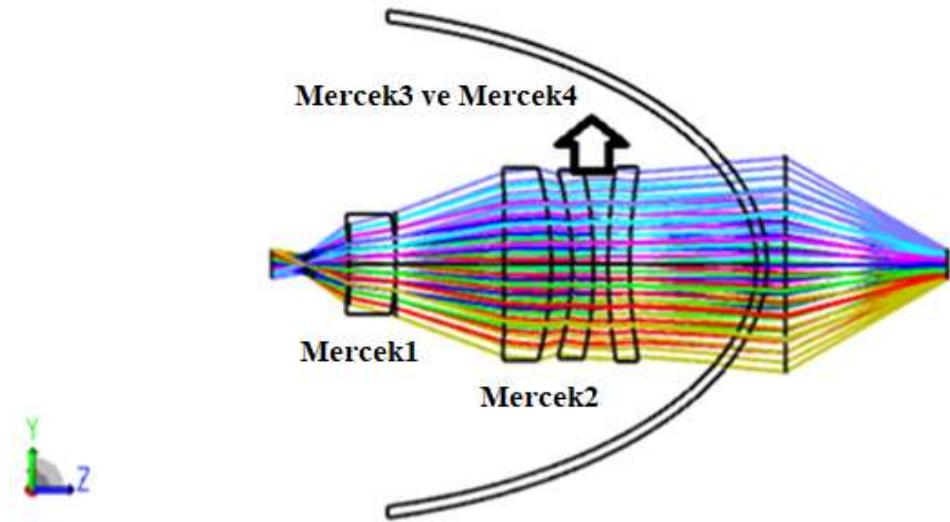
4.7 Tolerans Analiz Sonucu

Bir optik tasarımda; güç yani merceğin eğrilik yarıçapı (power), yüzey hatası (irregularity), optik kama (wedge), konik sabitler, asferik katsayılar, merceklerin merkez kalınlığı, miktarı, mercek çapları, optik malzemelerin kırılma indisi ve Abbe sayıları, hava aralıkları ile mercek ya da mercek gruplarının merkez kaçıklığı ve eğim değerleri gibi tüm optik ve optomekanik parametreler, üretim ve optomekanik konumlandırma tekniklerine bağlı olarak nominal tasarım değerlerinden istatistiksel biçimde sapma göstermektedir.

Optik sistemin görüntü kalitesi bu tasarım parametrelerine bağlı olduğundan, üretim ve optomekanik hizalama sonrasında görüntü kalitesin de tasarımda öngörülen nominal

değerden sapma meydana gelmektedir. Üretim ve optomekanik konumlandırma hataları optik sistemlerde kaçınılmazdır. Toleranslandırma sürecinin temel amacı, gerekli görüntü kalitesini sağlayacak şekilde her bir mercek için üretim ve optomekanik konumlandırmaya atanacak uygun tolerans değerlerini belirlemektir.

Çoğu durumda, tolerans sapmalarının neden olduğu görüntü kalitesi bozulması, maliyeti önemli ölçüde artıracak ya da sistemi üretim sınırlarının ötesine taşıyacak şekilde toleransları sıkılaştırmak yerine, seçilen kompanzatörler (compensators) aracılığıyla telafi edilmektedir. Tasarımda bir optik eleman kompanzatör olarak seçilir ve hareket verilerek kümülatif tolerans birikmesi sonucu odak kaçıklığı giderilebilmektedir. Bu tasarımda Şekil 4.42’de gösterilen mercek1 kompanzatördür ve $\pm z$ yönünde hareket etmektedir.



Şekil 4.42 Tolerans için mercek gösterimi

Ansys Zemax Programında 500 Monte Carlo analizi koşulmuştur. Aşağıda gösterilen Çizelge 4.8’de tasarımın tolerans değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.8 Tolerans değerleri

Mercekler	Güç(Power)	Yüzey Hatası (Irregularity)	Optik Kama (Wedge)	Merkez Kaçıklığı(Decenter)	Merkez Eğimi (Tilt)
Mercek 1	±4 Fringe	± 2 Fringe	±0,01 mm	±50µm	±30µm
Mercek 2	±4 Fringe	± 2 Fringe	±0,01 mm	±50µm	±50µm
Mercek 3	±4 Fringe	± 2 Fringe	±0,01 mm	±30µm	±50µm
Mercek 4	±4 Fringe	± 2 Fringe	±0,01 mm	±50µm	±50µm

Mercek1, mercek2 ve mercek3 hareketli olduğundan optomekanik tasarımına motor eklenilmektedir. Motorun da kendi mekaniği olduğu için bu merceklere de grup merkez kaçıklığı ve eğim toleransı girilmektedir.

Mercek1 grup merkez kaçıklığı 50µm, grup eğim toleransı 40µm'dur. Mercek3 ve mercek4 ise z yönünde birlikte hareket etmektedir. Mercekler aynı motorla sürüleceği için grup toleransları aynıdır. Bu mercekler için ise grup merkez kaçıklığı 30µm, grup eğim toleransı 50µm'dur.

Merceklerin kalınlık ve hava boşluğu toleransları sırasıyla ±50µm ve ±100µm'dir. Kırılma indisi ±0,0005, abbe numara toleransı da ±%0,5'dir. Genel tolerans değerleri girilmiştir.

Monte Carlo tolerans analizi sonucu çıktıları aşağıda gösterilmektedir. Şekil 4.43'de kompensatör olan mercek1'in ±z yönündeki maksimum hareket miktarını ve her bir verim için kriter değeri göstermektedir.

Compensator Statistics:

Thickness Surf 5:

Nominal	:	0,023469
Minimum	:	-0,181203
Maximum	:	0,235478
Mean	:	0,018217
Standard Deviation	:	0,079234

98% >	0,14789387
90% >	0,12185694
80% >	0,11177872
50% >	0,09746558
20% >	0,08729273
10% >	0,08284275
2% >	0,07873273

Şekil 4.43 Kompensatör istatistiği

Tasarımın tolerans analizinde en hassas gelen merceklerin sırayla listesi Şekil 4.44’de gösterilmiştir. İlk sırada mercek1 grup eğimi, ikinci sırada mercek merkez kaçıklığı ve üçüncü sırada da mercek3+mercek4 grup eğim hassas gelmiştir. Worst offender (en büyük etkiye sahip hatalar) listesinde çıkan değerler üretim kabiliyetleri göz önünde bulundurularak sırasıyla kısılmıştır.

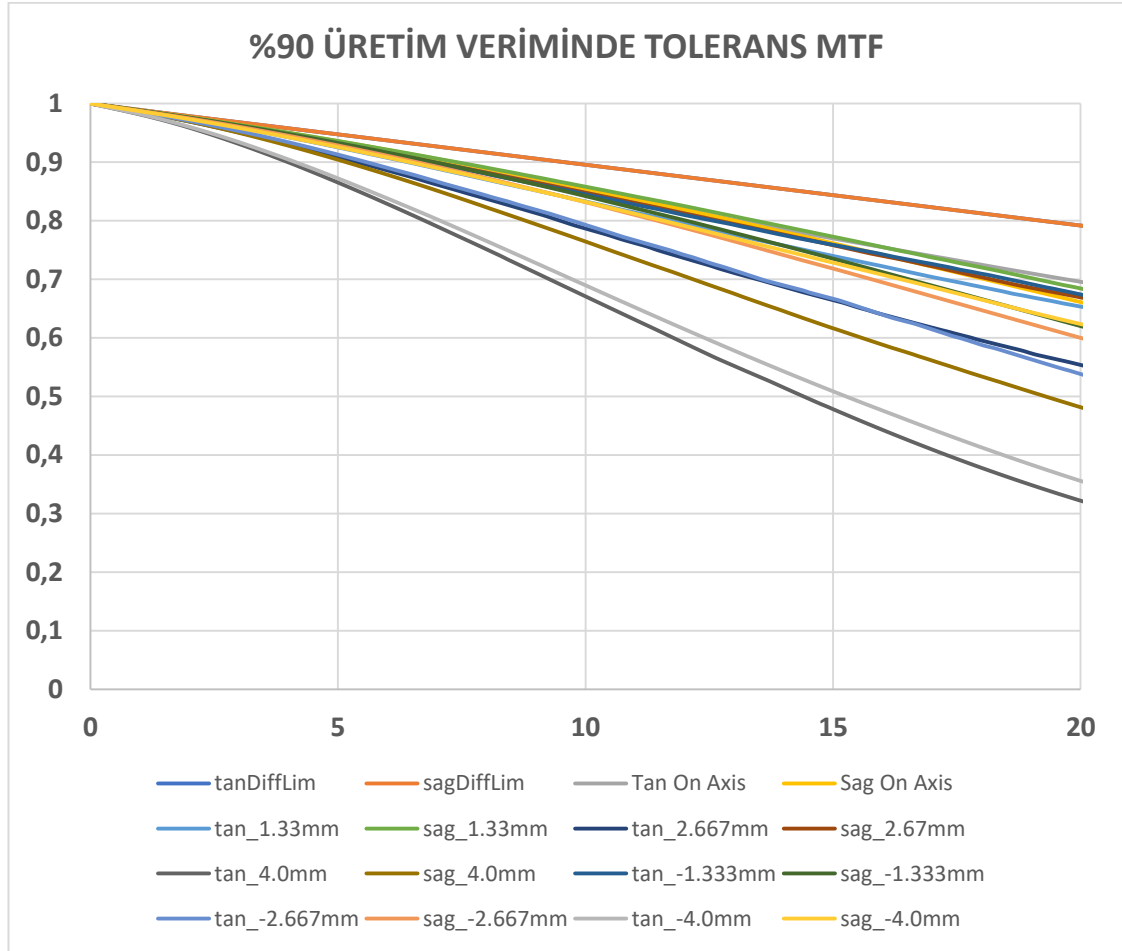
Worst offenders:

Type			Value	Criterion	Change
TPAR	6	3	-0,08200000	0,09312259	0,01454966
TEDY	15	16	-0,03000000	0,09230182	0,01372889
TPAR	14	2	-0,03000000	0,09207101	0,01349808
TIRR	3		-2,00000000	0,09200135	0,01342842
TIRY	7		-0,01000000	0,09140551	0,01283258
TPAR	6	2	0,05000000	0,09060991	0,01203698
TEDY	7	8	0,05000000	0,09060991	0,01203698
TIRR	2		2,00000000	0,09006820	0,01149527
TETX	7	8	-0,06200000	0,08822631	0,00965338
TTHI	3	3	-0,10000000	0,08719590	0,00862296
TTHI	11	11	-0,10000000	0,08719590	0,00862296
TETX	15	16	-0,05400000	0,08679063	0,00821770
TEDY	12	13	0,05000000	0,08640332	0,00783039
TPAR	6	4	-0,08200000	0,08603295	0,00746001
TPAR	14	3	-0,05300000	0,08598633	0,00741340

Şekil 4.44 Worst Offenders listesi

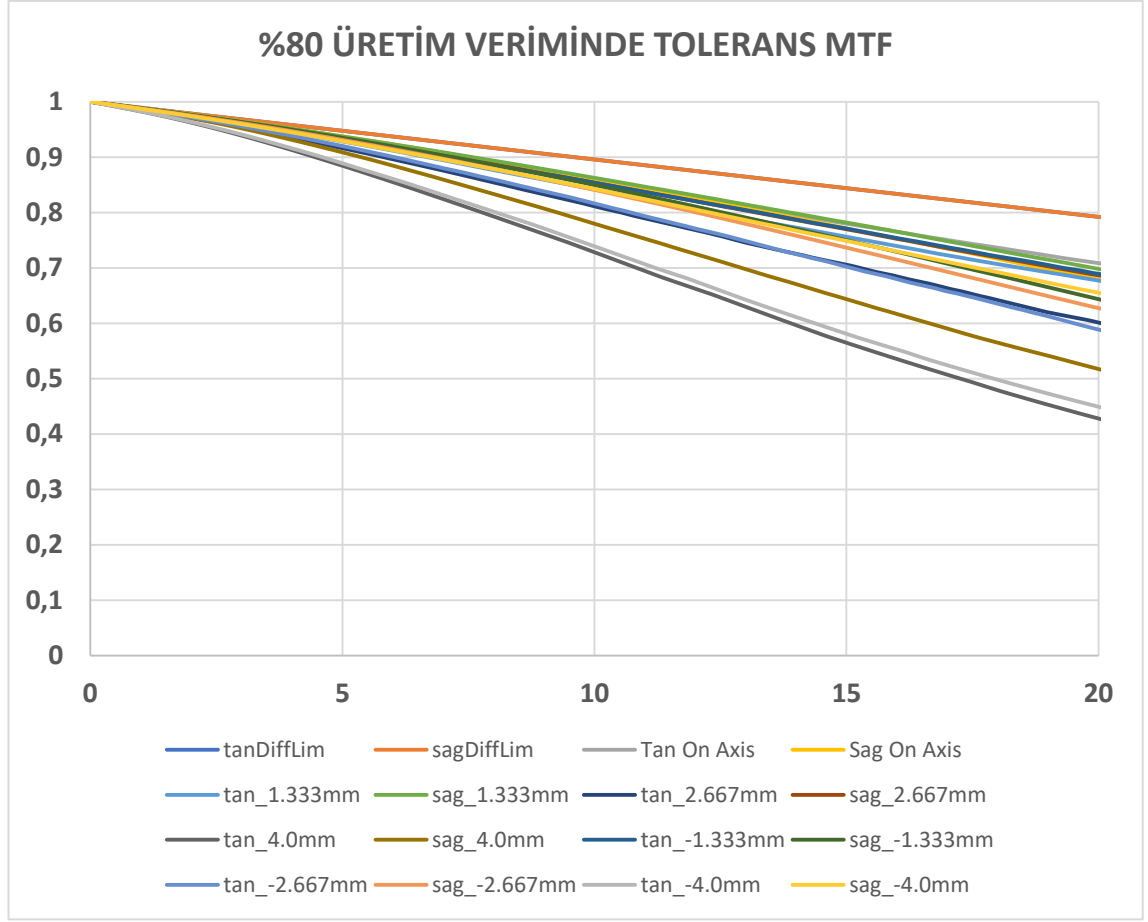
Tolerans analizi sonucu çıkan %90 ve %80 üretim veriminde çıkan toleranslandırılmış MTF grafikleri Şekil 4.45 ve Şekil 4.46’da gösterilmektedir. %90 verimde demek üretilecek 10 cihazdan 9 tanesi minimum bu MTF değerlerinde olacak demektir.

Şekil 4.45’de %90 üretim veriminde teğetsel (tangential) ve sagital (sagittal) eksenlerdeki merkez ve en dış görüş açılarındaki tolerans MTF değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.45 %90 Üretim veriminde tolerans MTF grafiği

Şekil 4.46’da %80 üretim veriminde teğetsel (tangential) ve sagital (sagittal) eksenlerdeki merkez ve en dış görüş açılarındaki tolerans MTF değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.46 %80 Üretim veriminde tolerans MTF grafiği

İki grafikte de merkez görüş açısındaki MTF değerleri kırımın limitine yakındır. Dış açılara gidildikçe beklenildiği gibi MTF değeri düşmektedir. Genel olarak detektör Nyquist frekansı olan 20 cycles/mm boyunca merkez açıda kırımın limitine yakındır.

Bu optik tasarımın optomekaniği tasarlanmadığı için teorik olarak üretilebilir toleranslar girilerek analiz sonuçları çıkarılmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Öncelikle, konformal yapıdan kaynaklanan asimetrik aberasyonların en aza indirilmesine yönelik farklı yöntemler literatürde araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, en etkili yöntemin Chebyshev polinom yüzeylerine sahip hareketli merceklerin kullanılması olduğu görülmüştür. Bu yöntem, bu çalışma kapsamındaki denememiz dışında literatürde uygulanmamıştır.

Ayrıca, çalışmada Cassegrain tipi yansıtıcı düzenek gibi aynalı bir yapı kullanılmamış; bunun yerine tamamen dört mercekten oluşan bir objektif tasarım düzeni tercih edilmiştir. İki mercek objektifte, diğer iki mercek ise yüzeylerinden biri Chebyshev polinom yüzeyi olacak şekilde karşılıklı döner yapıdadır. Bu optik sistem, üretilebilirlik açısından en uygun tasarımlardan biridir. Buna ek olarak, sistem 30°'lik oldukça iyi bir Görüş Alanı (FOR: $\pm 15^\circ$) sunmakta ve tüm FOR boyunca iyi optik performans sergilemektedir. Yüksek FOR açıları ve uzaysal frekanslarda ise sistemin performansı astigmatizm aberasyonu tarafından sınırlanmaktadır.

Konformal kubbe, asimetrik aberasyonlara neden olmaktadır ve bu aberasyonlar statik düzelticilerle giderilememektedir. Bu nedenle tasarımda serbest biçimli yüzeylere sahip hareketli mercekler kullanılmıştır. Üretilebilirliği korumak amacıyla Chebyshev polinom katsayıları olabildiğince düşük tutulmuştur. Chebyshev polinomları genellikle ayna yüzeylerinde kullanılmakla birlikte, bu çalışmada mercek yüzeylerinde uygulanmış ve bu sayede üretim süreçleri kolaylaştırılmıştır.

Aerodinamik açıdan bakıldığında, parabolik bir konformal kubbe yüksek Mach sayılarında hava sürüklemesini azaltmaktadır. Hava platformları yüksek Mach hızlarında uçmaktadır. Küresel kubbenin oluşturduğu yüksek hava sürüklemesi, aerodinamik performansı olumsuz etkilemektedir. Konformal kubbenin kullanımı aerodinamiği iyileştirmekte; dinamik serbest biçimli mercekler ise konformal kubbenin optik performans açısından oluşturduğu olumsuzlukları gidermektedir. Böylece hem aerodinamik hem de optik açıdan kararlı ve ayrıca üretilebilir bir tasarım elde edilmiştir.

Bu çalışmada, konformal bir kubbe için önce statik ardından dinamik olmak üzere farklı türde aberasyon düzeltme yöntemleri geniş bir FOR aralığına ulaşacak şekilde denenmiştir. Konformal kubbe üzerinden bakan objektifin FOR hareketiyle değişen optik aberasyonları, arayıcı objektifin öndeki iki elemanının dinamik olarak döndürülmesiyle kontrol altına alınmıştır; bu elemanlarda serbest biçimli yüzeyler kullanılmıştır. Serbest biçimli yüzey tipi olarak Chebyshev polinomu tercih edilmiş ve gereken performans seviyesine ulaşmada etkili olmuştur. Sonuç olarak, seçilen aberasyon düzeltme yöntemi ve serbest biçim yüzey tipi sayesinde yüksek düzeyde performans elde edilmiştir. Bu yöntem uygulandığında, konformal kubbe optik performans kaybı olmadan kullanılabilir hale gelmekte ve aynı zamanda yüksek aerodinamik performans sağlanabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonymous. 2026, <https://www.meetoptics.com/academy/aspheric-mercekes>, Eriřim Tarihi: 15/02/2026
- Anonymous. 2010. Zemax Optical Design Program User's Manual. Zemax Development Corp.
- Anonymous. 2026, <https://lacroixoptics.com/spherical-mercekes>, Eriřim Tarihi: 15/02/2026
- Anonymous. 2026, <https://wp.optics.arizona.edu/optomech>, Eriřim Tarihi: 15/02/2026
- Anonymous. 2026, <https://support.zemax.com>, Eriřim Tarihi: 15/02/2026
- Aslan, S. H., 2022. *Analysis of narcissus effect in infrared optical systems with cooled detectors* (Doctoral dissertation). Middle East Technical University, Turkey.
- Aslan, S. H., 2016. *SWIR objective design using Seidel aberration theory* (Master's thesis). Middle East Technical University, Turkey.
- Bentley, J. & Olson, C., 2012. *Field guide to mercek design*. Bellingham, WA: SPIE Press.
- Demirhan, Y., Anıl, D. ve Akaoğlu, B. (2025). Correcting conformal dome optical aberrations by using a rotating freeform optical element. *Applied Optics*, 64(29), 8671–8681
- Dheyab, A. B., Hammod, H. Y., Abdullah, G. H., Muayad, M. W. & Hassan, A., 2014. Gradient-index mercekes in imaging applications using Zemax program. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3, pp. 16834–16839.
- Dong, B., Li, Y., Han, X. L. & Hu, B., 2016. Dynamic aberration correction for conformal window of high-speed aircraft using optimized model-based wavefront sensorless adaptive optics. *Sensors*, 16(9), 1414.
- Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B. ve Yoder Jr., P. R., 2008. *Optical system design*. McGraw-Hill, New York.
- Howard, J. W. ve Abel, I. R., 1982. Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems. *Applied Optics*, 21, 3393–3400.
- Küçükçelebi, D., 2015. Çoklu görüş alanına sahip kızılaltı görüntüleyici optik tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Lau, A. S., 1977. The Narcissus effect in infrared optical scanning systems. In: *Stray Light Problems in Optical Systems*, Vol. 107, pp. 57–62. Bellingham, WA: SPIE.
- Liu, Z., Yu, H. & Huang, Y., 2022. Conformal dome aberration correction based on the integrated design of inner surface and fixed corrector. *Infrared Physics & Technology*, 120, 103967.
- Milton, L., 1995. *Mercek Design*, 3rd Edition Revised and Expanded. New York, NY: Marcel Dekker Inc.

- Mills, J. P., 2001. Conformal optics: theory and practice. In: *Novel Optical Systems Design and Optimization IV*, Vol. 4442, pp. 101–107. Bellingham, WA: SPIE.
- Nelson, J. D., Gould, A., Smith, N., Medicus, K. & Mandina, M., 2013. Advances in freeform optics fabrication for conformal window and dome applications. In: *Window and Dome Technologies and Materials XIII*, Vol. 8708, pp. 261–270. Bellingham, WA: SPIE.
- Riedl, M. J., 2001. *Optical design fundamentals for infrared systems*, Vol. 48. Bellingham, WA: SPIE Press.
- Rogalski, A. & Chrzanowski, K., 2014. Infrared devices and techniques (revision). *Metrology and Measurement Systems*, 21(4), pp. 565–618.
- Smith, W. J., 2000. *Modern Optical Engineering*, 3rd Edition. New York, NY: McGraw-Hill Professional Engineering.
- Sparrold, S. W., Mills, J. P., Knapp, D. J., Ellis, K. S., Mitchell, T. A. & Manhart, P. K., 2000. Conformal dome correction with counter-rotating phase plates. *Optical Engineering*, 39(7), pp. 1822–1829.
- Uçar, A., 2010. *Geniş bant (3–12 μm) atermal kızılaltı görüntüleyici optik tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Zhang, W., Zuo, B., Chen, S., Xiao, H. & Fan, Z., 2013. Design of fixed correctors used in conformal optical system based on diffractive optical elements. *Applied Optics*, 52(3), pp. 461–466.
- Zhang, Y., Chang, J. & Niu, Y., 2018. Research on conformal dome of Karman-curve shape. In: *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments*, Vol. 10616, pp. 411–416. Bellingham, WA: SPIE.
- U, J., Chen, S., Dang, F., Li, X., Shi, X., Wang, H. & Fan, Z., 2021. The suppression of aero-optical aberration of conformal dome by wavefront coding. *Optics Communications*, 490, 126876.
- Zhang, W., Chen, S., Hao, C., Wang, H., Zuo, B. & Fan, Z., 2014. Conformal dome aberration correction with gradient index optical elements. *Optics Express*, 22(3), pp. 3514–3525.
- Zhao, C., Cui, Q. & Mao, S., 2016. Aberration and boresight error correction for conformal aircraft windows using the inner window surface and tilted fixed correctors. *Applied Optics*, 55(10), pp. 2626–2633.