
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ALÇAK YÖRÜNGEDEKİ UYDU SİSTEMLERİ İÇİN YILDIZ İZLER OPTİK TASARIMI

Gül ERÇETİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2025

ETİK BEYAN

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

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

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

Gül ERÇETİN

19/08/2025

ALÇAK YÖRÜNGEDEKİ UYDU SİSTEMLERİ İÇİN YILDIZ İZLER OPTİK TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Gül ERÇETİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2025

ÖZET

Uydu platformlarında yönelim belirleme, görev doğruluğunu etkileyen önemli ve temel bir faktördür. Yıldız İzler (Star Tracker, ST), bilinen yıldız konumlarını referans alarak yüksek hassasiyetle yönelim bilgisi sağlayan önemli bir yönelim belirleme aracıdır. Bu tez çalışmasında, Alçak Dünya Yörüngesinde (LEO) görev yapacak bir uydunun pozisyon belirlemesi için kullanılacak, 1 yaysaniye (arcsecond) ölçüm hassasiyetine sahip Yıldız İzler sistemi objektif tasarımı yapılmıştır. Sistem mühendisliği çalışmaları kapsamında, sistemde kullanılacak görüntü sensörü belirlenerek, sinyal-gürültü oranı (SNR), f-sayısı (F/#) ve görüş açısı (field of view, FOV) hesaplamaları yapılarak belirlenmiştir. Görüntüleme biriminde kullanılan sensör, 1024×1024 çözünürlüğe, 18 μm piksel boyutuna ve ortalama %60 kuantum verimliliğine sahip, global shutter teknolojisine sahip radyasyona dayanıklı CMOS sensördür. F/1,2, 19° görüş açısı ve 55 mm odak uzaklığına sahip optik sistem tasarım mimarisi Double-Gauss üzerine temellendirilmiştir. Optik tasarım, radyasyona dayanıklı ve standart malzemelerle optimize edilmiş ve üretim sonrası performans dağılımını değerlendirmek amacıyla hassasiyet ve Monte Carlo analizleri gerçekleştirilmiştir. 10 000 iterasyonluk Monte Carlo simülasyonu sonucunda üretim sonrasında da optik performansın başarılı olacağı görülmüştür. Ayrıca, görüş alanı (FOV) dışından gelen kaçak-ışın kaynakları belirlenmiştir. Güneş kaynaklı kaçak-ışın etkilerini azaltmak amacıyla ışık perdesi boyutları hesaplanarak, simüle edilmiş olup dedektör üzerinde yarattığı olumsuz etkiler analiz edilmiştir. Lenslerde meydana gelen iç yansımadan kaynaklı kaçak ışınlar için "hayalet görüntü" filtresi kullanılarak kritik yüzeyler tespit edilmiştir ve bu yüzeylere anti-reflektif kaplama uygulanmıştır. Bütüncül bir yaklaşım sonucunda ST optik birimi, ölçüm hassasiyeti ve üretilebilirlik açısından hedeflenen kriterleri karşılayacak şekilde başarıyla tasarlanmıştır.

Bilim Kodu	:	20217
Anahtar Kelimeler	:	Yıldız İzler, uydu, optik tasarım, aberasyon, objektif, sinyal-gürültü oranı (SNR), modülasyon transfer fonksiyonu (MTF), tolerans analizi, kaçak-ışın analizi
Sayfa Adedi	:	102
Danışman	:	Prof. Dr. Beyza LİŞESİVDİN
İkinci Danışman	:	Dr. Özgür KARCI

OPTICAL DESIGN OF A STAR-TRACKER FOR LOW-EARTH ORBIT SATELLITE SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Gül ERÇETİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2025

ABSTRACT

Attitude determination on space platforms is a fundamental factor that directly affects mission accuracy. Star Trackers (ST) provide high-precision orientation information by referencing the known positions of stars. In this thesis, the optical unit of a Star Tracker System (STT) with 1 arc-second measurement accuracy was designed for a satellite operating in Low Earth Orbit (LEO). Within the scope of the system engineering activities, the imaging sensor was selected and system parameters such as signal-to-noise ratio (SNR), F-number (F/#), and field of view (FOV) were calculated. The imaging sensor features a resolution of 1024×1024 pixels, 18 µm pixel size, 60% average quantum efficiency, and is based on radiation-hardened CMOS technology with a global shutter. The optical system, with an F/1,2 aperture, 19° FOV, and 55 mm focal length, was based on the Double-Gauss architecture. The design was optimized using both radiation-resistant and standard optical materials. To evaluate the impact of manufacturing tolerances on optical performance, sensitivity analysis and Monte Carlo simulations were conducted. Results from a 10 000 iteration Monte Carlo simulation demonstrated that the system maintains sufficient optical performance after manufacturing. Additionally, potential stray-light sources originating from outside the field of view were identified and analyzed. To mitigate solar-induced stray-light, baffle dimensions were calculated and simulated, and their effects on the detector were assessed. Ghost image analysis was also performed to identify critical surfaces that cause internal reflections within the lenses; anti-reflective coatings were applied to these surfaces. As a result of this integrated approach, the optical unit of the Star Tracker System was successfully designed to meet the targeted criteria for both measurement accuracy and manufacturability.

Science Code	:	20217
Key Words	:	Star tracker, satellite, optical design, aberrations, objective, signal-to-noise ratio (SNR), Modulation Transfer Function (MTF), tolerance analysis, stray-light analysis
Page Number	:	102
Supervisor	:	Prof. Dr. Beyza LİŞESİVDİN
Co-Supervisor	:	Dr. Özgür KARCI

TEŞEKKÜR

Bilgi ve rehberlikleriyle tez sürecim boyunca yol gösteren, kıymetli katkıları ve akademik destekleri için danışmanım Prof. Dr. Beyza LİŞESİVDİN'e ve Prof. Dr. Bora LİŞESİVDİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. İkinci danışmanım Dr. Özgür KARCI'ya; teknik bilgisi, yönlendirmeleri, her aşamada gösterdiği sabır ve bana kazandırdığı titiz çalışma disiplini için teşekkür ederim. Sadece akademik sürece değil, aynı zamanda problem çözme yaklaşımıma ve mesleki bakış açıma kattıklarıyla bu çalışmanın şekillenmesinde önemli bir rol üstlenmiştir.

Bu çalışmanın değerlendirme sürecinde yer alarak, yapıcı eleştirileri ve kıymetli katkılarıyla tezimin daha nitelikli bir hâle gelmesine katkı sağlayan savunma jüri üyelerim Prof. Dr. Abdullah YILDIZ'a, Doç. Dr. Evren Görkem ÖZDEMİR'e ve Prof. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca sağladıkları destek, anlayış ve teşvik edici yaklaşımları için çalışmakta olduğum Opsin Elektro Optik Sistemler'e, Genel Müdürümüz Berkan BÜYÜKDAĞLIOĞLU'na ve teknik bilgisiyle yolumu aydınlatırken, koruyucu ve destekleyici tavrıyla bu süreci hem öğretici hem de keyifli kıldığı için, Elektronik ve Yazılım Tasarımı Yöneticisi İlker ŞAHİN'e çok teşekkür ederim.

Teknik konulardaki desteğin ötesinde, hayata dair bakış açımı şekillendirmemdeki katkısı için değerli Peren Yelen KORKUT'a teşekkür ederim.

Bu süreçte dostluklarıyla her zaman yanımda olan, moral ve motivasyon desteğini esirgemeyen değerli arkadaşlarım, Ali Haydar ÖZTÜRK, Arda ERGÜN, Buket KANDEHİR ve Armağan DAĞISTAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Zorlu geçen bu dönemde gösterdikleri anlayış ve verdikleri destek, benim için son derece kıymetli.

Hayatım boyunca yanımda olan, beni koşulsuzca destekleyen ve her zaman inanan aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. Anneme, her çalışmam gerektiğini söylediğimde gösterdiği anlayış ve sabrı, her zaman sessizce ama kararlılıkla yanımda oluşu için gönülden teşekkür ederim. Ailemden aldığım sevgi, inanç ve koşulsuz destek, bu yolculukta attığım her adımın en sağlam temeli oldu.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER 7

2.1. Lensler 4

2.2. Optik Parametreler 5

2.3. Airy Halka Çapı 10

2.4. Aberasyon Teori 11

2.4.1. Monokromatik aberasyon 11

3. YILDIZ İZLER 19

3.1. Yıldız İzler Sistemlerin Çalışma Prensibi 19

3.2. Yıldız Toplam Işınım Şiddeti (Total Radiance) Spektral Dağılımı 20

3.3. Yıldız İzler Tasarımı Sistem Mühendisliği Faaliyetleri 22

3.3.1. Yıldız izler sensör seçiminin yapılması 22

3.3.2. Yıldız izler ölçüm hassasiyetinin hesaplanması 25

3.3.3. Sistem etkin odak uzaklığının hesaplanması 28

3.3.4. Sinyal / Gürültü (SNR) hesaplaması 33

3.3.5. MTF bütçesi 33

Sayfa

4. YILDIZ İZLER TASARIMI 35

4.1. Yıldız İzler Optik Tasarımı 35

4.1.1. Optik tasarım sistem gereksinimleri 37

4.1.2. Yıldız izler optik tasarım sistematiği 38

4.1.3. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen altı lensli tasarım konfigürasyonu 40

4.1.4. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen Double-Gauss tasarım konfigürasyonu 43

4.1.5. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen yedi lens ile tasarım konfigürasyonu 45

4.1.6. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen yedi lensli nihai optik tasarım konfigürasyonu (asferik ve konik yüzey) 47

4.1.7. Radrasyona dayanıklı koruyucu pencere ve standart cam kataloğu ile optik tasarım 52

4.2. Yıldız İzler Tolerans Analizi 57

4.2.1. Optik parametrelerin tolerans analizi 59

4.2.2. Mekanik ve optiğin eksenel hizalama hata kaynaklı tolerans analizi 66

4.3. Yıldız İzler Kaçak-Işın Analizi 71

4.3.1. Kaçak-ışın kaynakları 71

4.3.2. Kaçak-ışının sisteme etkisi 72

4.3.3. Işık perdesi (baffle) tasarımı 73

4.3.5. Kaçak-ışın analizi ve sonuçları 75

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 83

KAYNAKLAR 85

Sayfa

EKLER..... 91

EK-1. Zemax OpticStudio yazılımı kullanılarak Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimizasyon merit fonksiyon editörü. 92

EK-2. Zemax OpticStudio yazılımı kullanılarak Radyasyona dayanıklı koruma penceresi- standart cam kataloğu ile optimizasyon merit fonksiyon editörü.. 94

EK-3. Radyasyona dayanıklı koruma penceresi ve standart cam kataloğu ile yapılan tasarıma ait tolerans data editörü (Monte Carlo tolerans analiz iterasyonu). 96

ÖZGEÇMİŞ 102

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. MAG0-MAG6 parlaklık kıyaslaması 22

Çizelge 3.2. ST sistemlerinde kullanılan ticari CMOS görüntüleme sensörleri 23

Çizelge 3.3. Yıldız İzler görüntüleme dedektörü teknik özellikleri 25

Çizelge 3.4. HFOV, yıldız sayısı ve ölçüm hassasiyeti ilişkisi. 28

Çizelge 3.5. F/1,2 objektif için MAG0-MAG6 sinyal/gürültü oranı 32

Çizelge 4.1. Optik tasarım gereksinimleri 38

Çizelge 4.2. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen ST lens dizilimi 48

Çizelge 4.3. Standart cam kataloğu ile optimize edilen ST lens dizilimi ve optik tasarım optimizasyon sonuçları 53

Çizelge 4.4. Radyasyana dayanıklı cam kataloğu (Tasarım I) ve standart cam kataloğu (Tasarım II) ile tasarım çıktılarının tüm alanlar için karşılaştırılması 57

Çizelge 4.5. Endüstriyel lens üretim toleransları; standart, hassas ve çok hassas..... 59

Çizelge 4.6. Eğrilik yarıçapı tolerans analiz verileri 60

Çizelge 4.7. ST sistemlerinde kullanılan ticari CMOS görüntüleme sensörleri 61

Çizelge 4.8. Yüzey form tolerans analiz verileri 62

Çizelge 4.9. Merkezleme tolerans analiz verileri 63

Çizelge 4.10. Monte Carlo analizi tolerans değerleri. 64

Çizelge 4.11. En hassas toleransa sahip 5 optik parametre 64

Çizelge 4.12. Mekanik hizalama toleransları; standart, hassas ve çok hassas üretim... 66

Çizelge 4.13. Eksenel merkez kaçıklık ve tilt hassassiyet analizi tolerans değerleri.... 68

Çizelge 4.14. Eksenel kaçıklık toleransı ve açısal tilt tolerans verileri..... 68

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. a) Yıldız izler birimlerinin gösterimi, b) Sodern S.A.S (Fransa) 1

Şekil 2.1. Pozitif ve negatif lens tasarımlarının gösterimi. 7

Şekil 2.2. Konkav ve konveks lenslerin odak noktasının gösterimi..... 8

Şekil 2.3. Optik tasarım parametrelerin bir optik sistem üzerinde gösterimi..... 9

Şekil 2.4. Merkez alan, orta alan ve maksimum alan gösterimi..... 10

Şekil 2.5. a) Işığın kırınım etkisi ile bir perdedeki yoğunluk dağılımı, b) Airy Halkası oluşumu 11

Şekil 2.6. Optik açıklık ve alan koordinatlarının gösterimi 12

Şekil 2.7. a) Işınların bir mercekten geçerek odaklanması (aberasyonsuz durum), b) küresel aberasyon etkisiyle ışınların farklı odak noktalarında toplandığı durum 13

Şekil 2.8. Optik eksende koma aberasyonunun görünümü 14

Şekil 2.9. Optik eksende astigmatizm görünümü..... 14

Şekil 2.10. Alan eğriliği aberasyonu; ideal ve gerçek odak düzleminin gösterimi..... 15

Şekil 2.11. Petzval yüzeyi, teğetsel ve sagittal odak yüzeyi gösterimi 16

Şekil 2.12. Fıçı ve yastık distorsiyonun gösterimi 17

Şekil 2.13. Optik eksende kırmızı (C), yeşil (D) ve mavi (F) ışınların odak noktaları 17

Şekil 3.1. ST 1, ST 2 ve ST 3 uydu üzerindeki konumunun temsili gösterimi. 19

Şekil 3.2. Bir yıldızın dalga boyuna bağlı örnek elektromanyetik spektrumu 20

Şekil 3.3. Hedeflenen ST ölçüm hassasiyetinin (α) gösterimi 25

Şekil 3.4. Görüş alanı, yıldız sayısı ve yıldız parlaklığının ilişkisi. 27

Şekil 3.5. SNR ve F/# ilişkisi. 29

Şekil 4.1. Görüş açısı ve F/# arasındaki ilişki ve optik mimarilerin dağılımı 36

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.2. Double-Gauss objektif lens dizilimi ve diyaframın konumu 37

Şekil 4.3. Optik tasarım akış diyagramı. 39

Şekil 4.4. Altı lensli (6) tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi 40

Şekil 4.5. Altı (6) lensli tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio RMS spot diyagramı. 41

Şekil 4.6. Altı (6) lensli tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio RMS spot diyagramı. 42

Şekil 4.7. Altı lensli (6) tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri..... 42

Şekil 4.8. Diyafram konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi..... 43

Şekil 4.9. Stop konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio RMS spot diagramı. 43

Şekil 4.10. Stop konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio MTF grafiği 44

Şekil 4.11. Diyafram konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri. 45

Şekil 4.12. Yedi (7) lens ile optimizasyon ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi 45

Şekil 4.13. Yedi (7) lens ile optimizasyon ve ZEMAX OpticStudio RMS spot diyagramı..... 46

Şekil 4.14. Yedi (7) lens ile optimizasyon ZEMAX OpticStudio MTF grafiği. 46

Şekil 4.15. Yedi (7) lens ile optimizasyon ZEMAX-OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri. 47

Şekil 4.16. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen asferik ve konik yüzey yüzey içeren lens dizilimi ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi. 48

Şekil 4.17. Radyasyona dayanıklı materyaller ile optimize edilen ZEMAX OpticStudio RMS spot diyagramı. 49

Şekil 4.18. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen ZEMAX OpticStudio MTF grafiği 50

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.19. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen Seidel-diyagram grafiği. 50

Şekil 4.20. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri..... 51

Şekil 4.21. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen tasarım a) tüm alan astigmatizm gösterimi, b) tüm alan koma aberasyon gösterimi. 52

Şekil 4.22. Radyasyona dayanıklı koruyucu pencere ve standart cam kataloğu ile optik tasarım lens dizilimi. 53

Şekil 4.23. Standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın RMS spot diyagramı..... 54

Şekil 4.24. Standart cam katalogu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio MTF 55

Şekil 4.25. Standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio Seidel diyagramı. 55

Şekil 4.26. Standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri..... 56

Şekil 4.27. Radyasyona dayanıklı pencere ve standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio a) tüm alan astigmatizm gösterimi, b) tüm alan koma aberasyon gösterimi..... 56

Şekil 4.28. Tolerans analiz parametreleri 58

Şekil 4.29. Optik parametrelerin tolerans analizi akış diagramı 59

Şekil 4.30. a) İdeal yüzey, b) ideal formdan sapmış, bozulmuş yüzey. 61

Şekil 4.31. Lens dizilimde en hassas yüzeylerin gösterimi 65

Şekil 4.32. Optik parametrelerin Monte Carlo analiz histogramı. 65

Şekil 4.33. Tüm optik parametrelerin Monte Carlo Analizi (%98 lık dağılım) ZEMAX-OpticStudio MTF grafiği 66

Şekil 4.34. Mekanik ve optik birimlerin eksenel hizalama tolerans analizi akış diyagramı..... 67

Şekil 4.35. Mekanik parametrelerin Monte Carlo analiz histogramı 69

Şekil 4.36. Optik ve mekanik parametrelerin Monte Carlo analiz histogramı..... 70

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.37. Optik üretim ve mekanik hizalama Monte Carlo analizi %98'lik dağılım ZEMAX-OpticStudio MTF grafiği 70

Şekil 4.38. Optik üretim ve mekanik hizalama Monte Carlo analizi en kötü durumda (worst case) dağılım ZEMAX-OpticStudio MTF grafiği. 71

Şekil 4.39. Görüntü düzlemini ulaşan kaçak-ışın. 72

Şekil 4.40. Optik lens grubunun önüne yerleştirilen ışık perdesi 73

Şekil 4.41. Işık Perdesi ile ST objektif görüş açısı arasındaki ilişki. 74

Şekil 4.42. Lens diziliminde kaçak-ışın görüntüsü. 75

Şekil 4.43. Kaçak-ışın analizi sonucunda dedektör görüntüsü 76

Şekil 4.44. 20° Güneş ışınları optik sisteme girdiğinde kaçak-ışın dağılımı 76

Şekil 4.45. 20° Güneş ışınları optik sisteme girdiğinde dedektör görüntüsü. 77

Şekil 4.46. Sistemde 20° Güneş ışınları için ışık perdesi kullanımı ile engellenmesi 77

Şekil 4.47. 20° Güneş ışınları için ışık perdesi kullanıldığında ZEMAX OpticStudio dedektör görüntüsü. 78

Şekil 4.48. ZEMAX-OpticStudio "Hayalet Görüntü" filtresi kullanılarak problemli yüzey analizi. 79

Şekil 4.49. ZEMAX-OpticStudio "Hayalet Görüntü" filtresi kullanılarak problemli yüzey analizi. 80

Şekil 4.50. ZEMAX-OpticStudio "Hayalet Görüntü" filtresi kullanılarak problemli yüzey analizi 80

Şekil 4.51. ZEMAX-OpticStudio "Hayalet Görüntü" filtresi kullanılarak problemli yüzey analiz-4 81

Şekil 4.52. Lens 3, Lens 4, Lens 5, Lens 6 ve Lens 7 yüzeylerine yansıma önleyici kaplama yapıldığında dedektör görüntüsü 81

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
arcsec	yaysaniye
arcmin	yaydakika
B_n	Sellmeir katsayısı n: 1, 2, 3,…
C_n	Malzemenin rezonans frekanslarının n: 1, 2, 3,…
cm²	santimetrekare
c	Işık hızı
d	Lens merkez kalınlığı
ē	elektron
dB	desibel
°	derece
°C	Santigrat derece
D	Optik açıklık
D_{baffle}	Işık perdesi giriş açıklığı
$E_{centroid}$	Yıldız merkezleme pikseli
$F/\#$	F-sayısı
f	Odak uzunluğu
h	Planck sabiti
H	Görüntü yüksekliği
I_i	Işık akısı, i: 1, 2, 3,…
K	kelvin
krad	kilorad
L_λ	λ dalga boyundaki spektral ışınımı
L_{baffle}	Işık perdesi uzunluğu
mm	milimetre
MP	megapiksel
n	kırıcılık indisi

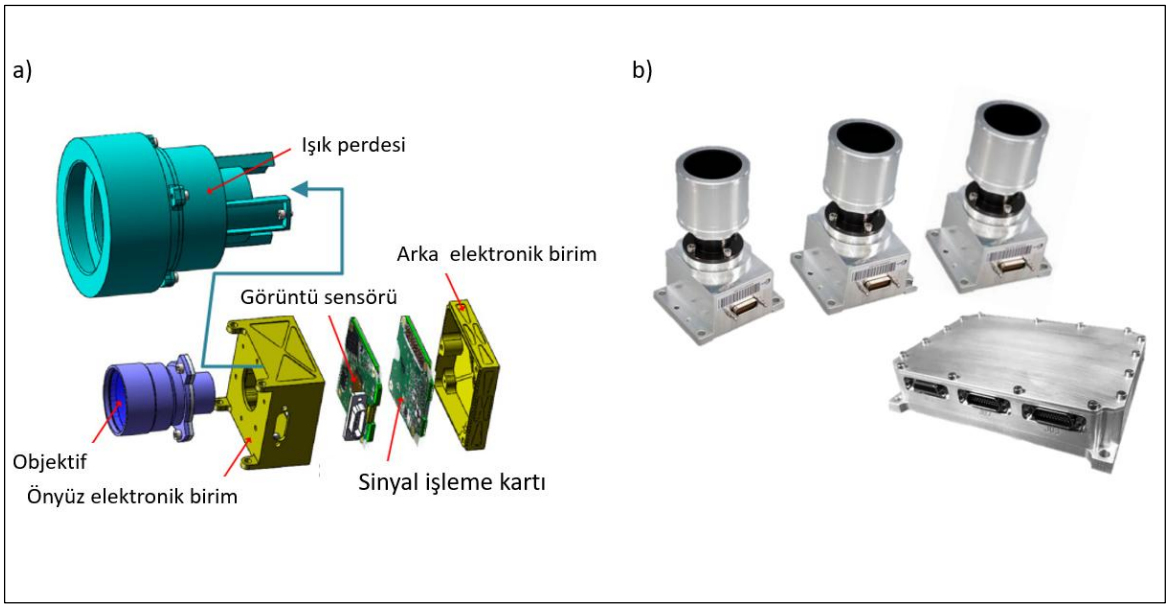
Simgeler	Açıklamalar
N_{pixel}	Sensör piksel sayısı
N_{star}	Toplam yıldız sayısı
nm	nanometre
R_i	Eğrilik yarıçapı, *i*: 1, 2, 3,…
R_p	Petzval yüzey yarıçapı
S	Sensör boyutu
S_{toplam}	Sensöre düşen toplam foton sayısı
t_{exp}	Pozlama süresi
T_{avg}	Ortalama optik geçirgenlik
T	Sıcaklık
W	Watt
z_{sp}	Petzval yüzeyine göre sagittal alan eğriliği
z_{tp}	Petzval yüzeyine göre teğetsel alan eğriliği
θ	Kaçak-ışın açısı
β	Yarı-görüş açısı
µm	Mikrometre
λ	Dalga boyu
λ_{max}	Cismin maksimum ışıma yaptığı dalga boyu
ρ	Normalize edilmiş optik açıklık
$\sigma_{readout}$	Elektronik okuma gürültüsü (ē)
σ_{shot}	Saçma (shot) gürültüsü (ē)
σ_{toplam}	Toplam gürültü (ē)

Kısaltmalar	Açıklamalar
BFL	Arka Odak Noktası
EFFL	Etkin Odak Uzunluğu
CCD	Charged-coupled device
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
FOV	Görüş Alanı (Field of View)
FPS	Saniye Başına Kare (Frame per second)
GEO	Geostatik Dünya Yörüngesi (Geostationary Earth Orbit)
HFOV	Horizantal Görüş Alanı
KV	Kuantum Verimliliği
LEO	Alçak Dünya Yörüngesi (Low Earth Orbit)
MAG	Parlaklık
MTF	Modulasyon Transfer Fonksiyonu
P-V	Tepe-Dip **(**Peak to Valley)
RMS	Kök Ortalama Kare Değeri (Root Mean Square)
SNR	Sinyal-Gürültü Oranı
ST	Yıldız İzler

1. GİRİŞ

Günümüzde, alçak Dünya yörüngesinden (Low Earth Orbit, LEO, 400 – 800 km) yer sabit yörüngesine (Geostationary Earth Orbit, GEO, 35 000 - 40 000 km) uzanan ve sayıları hızla artan yer gözlem, haberleşme, navigasyon ve araştırma uyduları hassas ve güvenilir konum/yönelim belirleme teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, Yıldız İzler sistemleri (Star Trackers, ST), uydunun uzaydaki konum ve yönelim bilgisini yüksek doğrulukla belirleyebilen temel bileşenlerden biri olarak öne çıkmaktadır. ST, Dünya yörüngesinde görev yapan uydu sistemleri yanında Güneş sistemini keşfeden uzay araçları için de adeta bir rehber görevi görmektedir. Uydu sistemlerine artan talep, optik, metroloji ve görüntüleme sensör sistemlerindeki teknolojik gelişmeler daha küçük hacimde, hafif, maliyet etkin ve yüksek performansa sahip ST'lere olan talebi de artırmaktadır [1, 2].

Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, genel olarak bir elektro-optik sistem olan ST, bir lens dizininden ve opto-mekanik yapıdan oluşan objektif, objektif önünde yer alana bir ışık perdesi, görüntüleme sensörü, arka/önyüz elektronik birimleri, görüntü işleme algoritması bileşenlerinden oluşan elektro-optik ekipmanlardır.



Şekil 1.1. a) Yıldız izler birimlerinin gösterimi [3], b) Sodern S.A.S (Fransa) AURIGA-SA ünitesi [4]

ST'nin en kritik bileşenlerinden biri olan objektif, yalnızca ışığı toplama işlevi değil, aynı zamanda yönelim belirleme doğruluğu ve hassasiyeti üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Objektifin görüş açısı, odak uzaklığı ve optik aberasyonlar, görüntüleme sensörüne düşen yıldızların noktasal konum belirleme doğruluk oranını etkileyen parametrelerdir. Bu sebeple, ST objektifinin tasarımı sistemin hacim/kütle zarfının yanında sistemin genel performansında da önemli bir rol oynamaktadır [3].

Yaygın olarak kullanılan ticari yıldız izleyici sistemleri, farklı ölçüm hassasiyetleri, optik yapılar ve sensör özellikleri ile geniş bir ürün yelpazesi sunmaktadır. AAC Clyde Space AB (İsveç), Terma A/S (Danimarka), Sodern S.A.S (Fransa), Rocket Lab USA, Inc. (ABD), Leonardo S.p.A (İtalya) ve Jena-Optronik GmbH (Almanya) gibi firmalar tarafından geliştirilen sistemler, uydunun görev gereksinimlerine göre özelleştirilebilen farklı çözüm seçenekleri ile öne çıkmaktadır. Örneğin, AAC Clyde Space AB (İsveç) ST200 modeli, yaklaşık 30 yaysaniye düzeyinde bir ölçüm doğruluğu sağlamakta olup, genellikle küp uydu (CubeSat) veya newspace olarak adlandırılan platformlarda tercih edilmektedir [5]. Daha yüksek doğruluk gerektiren görevlerde ise aynı firmanın geliştirdiği ST400 modeli kullanılarak bu değer 10 yaysaniye seviyesine kadar düşürülebilmektedir. Bu tür sistemler, özellikle hedef takip (target tracking), yer belirleme (geolocation) ve görüntü eşleme uygulamalarında görev yapan optik görev yüklerinden elde edilen görüntülerin konum doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılmaktadır [6].

Benzer şekilde, Terma A/S (Danimarka) T3 modeli ile Leonardo S.p.A (İtalya) tarafından geliştirilen A-STR/AA-STR sistemleri, 3–10 yaysaniye düzeyinde yönelim doğruluğu sağlayarak daha çok geosenkron haberleşme uydularında ve yüksek çözünürlüklü yer gözlem uydularında tercih edilmektedir [7, 8]. Bu sistemler, platform stabilizasyonuna yönelik yüksek performans kriterlerini karşılayarak, elektro-optik yüklerin uzaydaki konum doğruluğunu ve veri güvenilirliğini artırmaktadır.

Sodern S.A.S (Fransa) AURIGA-SA, HYDRA ve HORUS modelleri ise, yüksek çözünürlük gerektiren gezegen gözlemi, Güneş Sistemi dışı görevler ve astronomik incelemeler ile yüksek çözünürlüklü yer gözlem uyduları gibi uygulamalarda kullanılmakta olup, yönelim doğruluğu açısından 0,6 yaysaniye'e kadar düşen değerler sunabilmektedir [4, 9-10]. Yüksek doğruluğun ve hassasiyetin sağlanabilmesi, yalnızca gelişmiş optik tasarımlar ile değil; aynı zamanda görüntüleme sensörlerinin performansı, görüntü işleme algoritmalarının

hassasiyeti ve termal-mekanik yapının kararlılığı ile mümkün olmaktadır.

Rocket Lab USA, Inc. tarafından geliştirilen ST-16RT2 [11] ve ST-16HV [12] modelleri de yaklaşık 5 yaysaniye seviyesinde doğruluk sunmakta olup küçük uydular ve yüksek manevra kabiliyeti gerektiren görevler için uygun kompakt çözümler olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle uzayda dar hacim ve düşük güç tüketimi gerektiren platformlarda bu tür entegre çözümler tercih edilmektedir.

Ticari yıldız izler sistemlerinin optik parametreleri incelendiğinde, sistemlerin görev türlerine bağlı olarak farklı odak uzaklıkları, görüş alanı (FOV) ve diyafram açıklığı (F/#) gibi parametrelerde çeşitlendiği görülmektedir. Özellikle, Jena-Optronik GmbH (Almanya) ASTRO serisi yıldız izleyici sistemleri bu çeşitliliğin tipik örneklerinden biridir. Örneğin, ASTRO APS modeli; 43 mm odak uzaklığı, 20° × 20° görüş alanı ve F/1,2 diyafram açıklığı ile geniş görüş açılı bir sistem sunmakta olup genellikle yıldız eşleme süresinin kısaltılması ve yüksek yıldız yoğunluğu gereksinimi olan uygulamalarda kullanılmaktadır [13]. Buna karşılık, ASTRO XP modeli ise 175 mm odak uzaklığı, F/2 diyafram açıklığı ve 3,3° × 3,3° gibi dar bir FOV ile daha yüksek açısal çözünürlük sağlayarak, yüksek doğruluk gerektiren derin uzay görevleri için uygun bir çözüm sunmaktadır [14].

Geniş görüş alanına sahip sistemler, aynı anda daha fazla sayıda yıldız tespiti yapılmasını sağlayarak yıldız tanıma algoritmalarının başarı oranını artırmakta; dolayısıyla platform yönelim belirleme hızını iyileştirmektedir. Öte yandan, dar görüş alanlı sistemler daha yüksek açısal çözünürlük sağlayarak hassas yönelim gerektiren görevler için öne çıkmaktadır. Bu sistemlerde yaygın olarak kullanılan 1024 × 1024 piksel çözünürlüğe sahip tamamlayıcı metal-oksit algılayıcılar (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS), hem geniş hem de dar FOV altında yeterli görüntü kalitesi sağlayarak yıldız merkezleme hesaplamalarının doğruluğunu artırmakta ve sistemin toplam yönelim doğruluğuna katkıda bulunmaktadır.

Literatürde gerçekleştirilen akademik optik tasarım çalışmalarında da benzer sistematik eğilimler gözlemlenmektedir. Örneğin, Zhang tarafından geliştirilen sistemde, 43 mm odak uzaklığı ve 15 μm piksel boyutuna sahip sensör ile 20° × 20° FOV sağlanarak ticari sistemlere benzer bir performans hedeflenmiştir [15]. Asadnezhad, daha dar bir görüş alanı sunarak 60 mm odak uzaklığı, 14° × 14° FOV ve F/3,2 diyafram oranı kullanırken; Lui

tarafından geliştirilen sistemlerde 10°–17° arasında değişen görüş alanlarına sahip farklı optik tasarımlar önerilmiştir [16, 17]. Ayrıca, Moldabekov'un çalışmasında, 40 mm odak uzaklığı ve F/2 optik sistem ile Zhang çalışmasına benzer bir optik yapı ortaya konmuştur [18].

Bu örnekler, yıldız izleyici sistemlerinin optik tasarım sürecinde görev profiline bağlı olarak görüş alanı, odak uzaklığı, *F/#* oranı ve piksel boyutu gibi parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, ticari sistemlerde tercih edilen optik mimarilerin büyük ölçüde literatürdeki akademik önerilerle uyumlu olduğu; dolayısıyla bilimsel çalışmaların ticari ürün geliştirme süreçlerine yön verici bir nitelik taşıdığı anlaşılmaktadır.

ST sistemlerinde yönelim (attitude) belirleme süreci, görüş alanına giren yıldızların birbirlerine göre konumsal ilişkilerinin matematiksel olarak hesaplanmasına dayanmaktadır. Sistem, öncelikle görüntü düzlemine düşen yıldızların merkez noktalarını (centroid) belirler. Bu merkez noktaları kullanılarak yıldız çiftleri veya üçlüleri arasındaki açısal mesafeler hesaplanır. Hesaplanan bu açısal dağılım, bilinen bir yıldız kataloğunda (örneğin Hipparcos veya Tycho-2) yer alan yıldız grupları ile karşılaştırılır ve böylece görüş alanındaki yıldızların kimlikleri tespit edilir [19]. Bu eşleme işleminden sonra, yıldızların bilinen uzaysal konumları ile görüntü düzlemindeki ölçülen konumları arasındaki ilişki, çeşitli yönelim belirleme algoritmaları aracılığıyla çözülür. Bu aşamada platform referans koordinat sistemi (body frame) ile atalet referans koordinat sistemi (inertial frame) arasında dönüşüm sağlanması gerekir. Bu dönüşüm, genellikle Euler açıları (yaw, pitch, roll), dönüşüm matrisi (Direction Cosine Matrix, DCM) veya kuaternion temelli algoritmalar ile ifade edilir. Euler açılı çözümlemede, yönelim; üç ardışık dönme hareketiyle tanımlanır. Örneğin, x, y, z (yaw-pitch-roll) dönüş sırası, uydunun uzayda hangi yöne baktığını belirlemek için sıkça kullanılan bir yöntemdir [20].

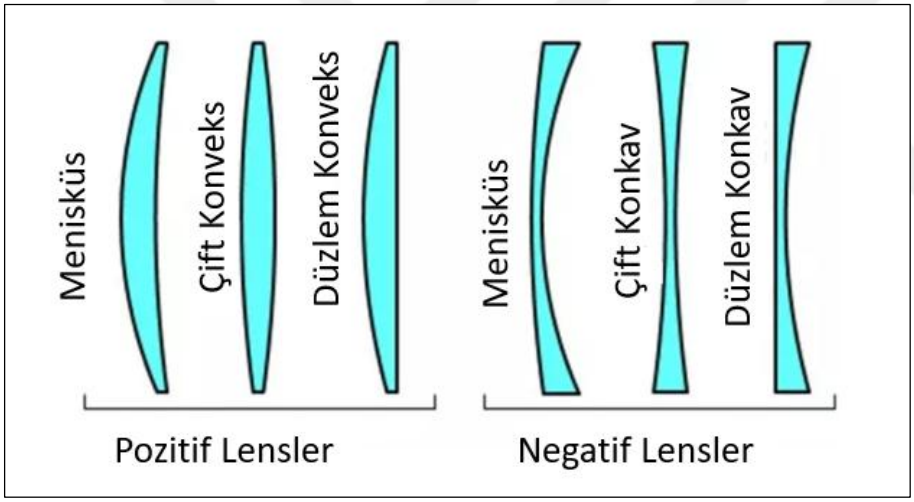
Bu çalışmanın temel amacı, 1 yaysaniye ölçüm hassasiyetine sahip, kompakt ve maliyet etkin (newspace (yeni-uzay yaklaşımına uygun) bir ST objektifi tasarlamaktır. Bu kapsamda belirlenen sistem gereksinimlerine göre optik sistemin odak uzaklığı, görüş alanı, aberasyon düzeyleri dikkate alınarak optimize edilmiş bir optik tasarım oluşturulmuştur. Optik tasarım, uzay koşullarındaki radyasyon dayanımı göz önüne alınarak iki farklı yöntem ile şekillendirilmiştir. Birinci tasarımda tüm camlar radyasyon dayanımlı katalogdan seçilerek

tasarım sonlandırılmıştır. İkinci yöntemde ise boş uzaya bakan ilk optik bileşen radyasyon dayanımlı seçilirken diğer camlar standard optik cam katoloğundan seçilmiştir. Ayrıca, üretim sırasında optik ve opto-mekanik parametrelerin sistem üzerinde yarattığı hassasiyeti analiz etmek amacıyla hassasiyet tolerans analizi, sistem üzerindeki etkisinin dağılımını görmek için Monte Carlo Analizi yapılmıştır. Görüş alanı dışından gelen istenmeyen ışınların görüntü kalitesine etkisi, sistemde kullanılması gereken ışık perdesi boyutları ve yansıma-önleyici (anti-reflect) kaplama yapılması gereken yüzeylerin belirlenmesi için kaçak-ışın analizi yapılmıştır. Tüm tasarım ve analiz süreçleri, Ansys Zemax OpticStudio yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Lensler

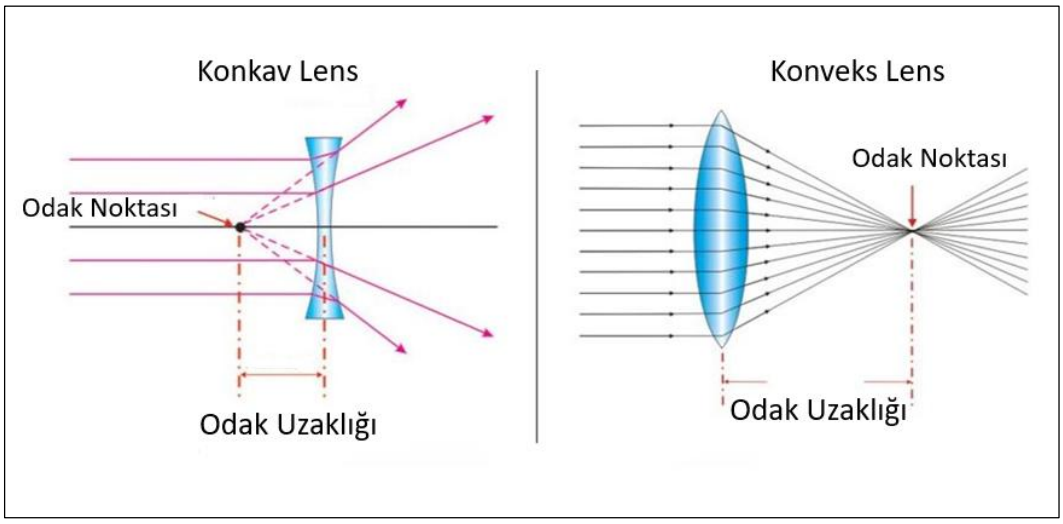
Lens (mercek), ışığı kırarak yönlendiren ve ışık ışınlarını toplama ya da dağıtma işlevi gören geçirgen bir optik bileşendir. Lensler genellikle cam veya plastik gibi şeffaf malzemelerden yapılır. Işığın, lensin eğimli yüzeylerinden geçerken kırılması, lensin temel çalışma prensibidir. Lensler, ışığı bir odak noktasında toplayabilir veya dağıtabilir. Lensin bir ya da her iki yüzeyi eğridir. Yüzeylerin eğriliği, lensin optik gücünü ve kullanım amacını belirler. Şekil 2.1'de, pozitif, yani ışığı bir noktada toplayan ve negatif, yani ışığı bir noktadan hareketle dağıtan lens tipleri örnek olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. Pozitif ve negatif lens tasarımlarının gösterimi

2.2. Optik parametreler

Paralel gelen ışınların kırılma veya yansıması sonucu bir araya geldiği ya da bir merkezden dağıldığı noktaya odak noktası (*f*) denir. Şekil 2.2.'de, konkav ve konveks lenslerin odaklama özellikleri gösterilmektedir. Konkav lens, paralel gelen ışınları dağıtarak odak noktasının lens ile aynı tarafta sanal olarak oluşmasına sağlarken; konveks lens, paralel ışınları kırarak merceğin karşı tarafında gerçek bir odak noktasında toplar. Her iki merceğin odak uzunluğu, optik eksen üzerindeki odak noktası ile lens merkezi arasındaki mesafe olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.2. Konkav ve konveks lenslerin odak noktasının gösterimi

Etkin odak uzunluğu ($EFFL$) kalın kenarlı lenslerde ya da birden fazla lensli bir sistemin odak uzaklığını temsil etmekte olup Lensmaker's denklemi kullanılarak Eş. 2.1'deki gibi hesaplanır [21].

$$\frac{1}{EFFL} = (n-1).\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1).d}{n.R_1.R_2}\right] \tag{2.1}$$

Eşitlikte *n*, malzemenin kırıcılık indisini; R_1 ve R_2, lens yüzeylerinin eğrilik yarıçaplarını ; *d* ise lens kalınlığını ifade etmektedir.

Birden fazla lens kullanıldığında etkin odak uzunluğu, EFFL, Eş. 2.2'deki gibi hesaplanır.

$$\frac{1}{EFFL} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{f_i} - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \frac{d_{ij}}{f_i f_j} \tag{2.2}$$

Son optik yüzeyden görüntü düzlemine kadar olan mesafeye arka odak noktası (BFL) denir. Eş. 2.3'deki gibi hesaplanır. BFL, son optik bileşenden sonra görüntüleme sensörünün yerleştirileceği mesafeyi temsil ettiği için tasarımda güvenli bir mesafeye ayrılmalıdır.

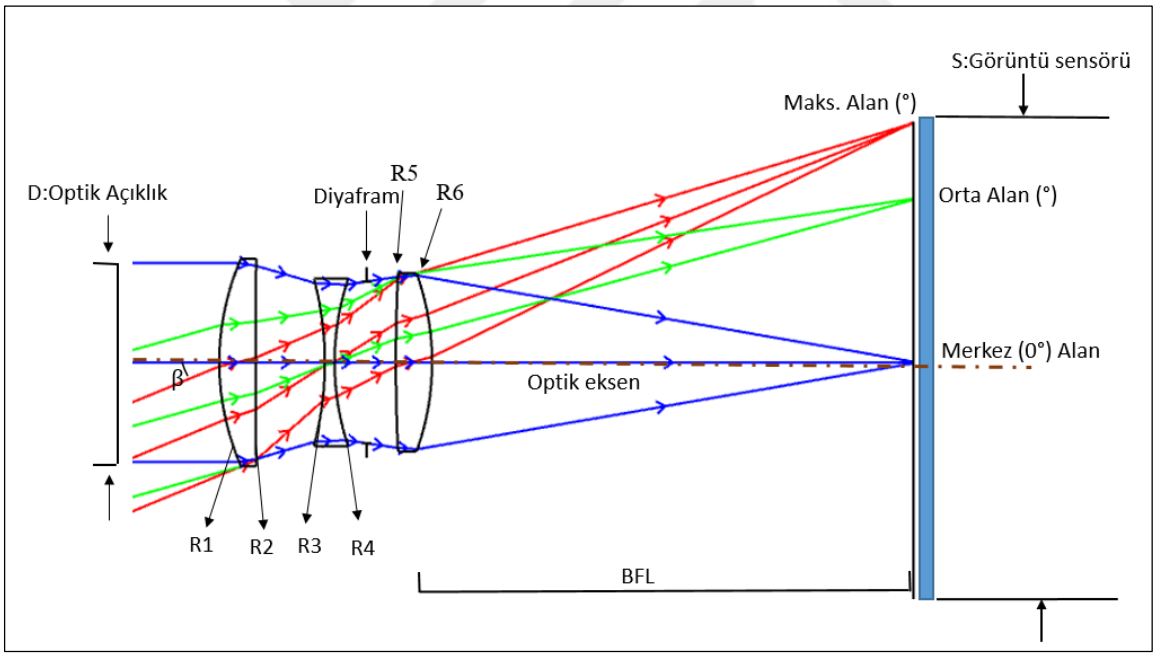
$$BFL = EFFL.\left(1 - \frac{(n-1).d}{n.R_2}\right) \tag{2.3}$$

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi optik açıklık (*D*), optik sistemde ışığın geçmesine izin verilen açıklığın çapıdır. Eş. 2.4'te gösterildiği gibi odak uzaklığının optik açıklığa oranı f-sayısı (F/#) olarak adlandırılır ve düşük *F/#*, sistemin daha fazla foton toplayarak sinyal-gürültü oranını (SNR) artırmaktadır.

$$F/\# = \frac{f}{D} \tag{2.4}$$

Tüm görüş açısı (HFOV), bir optik sistemin görüntüleyebileceği tüm alanı ifade eder. Eş. 2.5'teki gibi hesaplanır [22, 23]. Eşitlikte, $EFFL$ etkin odak uzunluğu; S sensörün boyutunu; β ise Şekil 2.3'te gösterildiği gibi yarı görüş açısını göstermektedir.

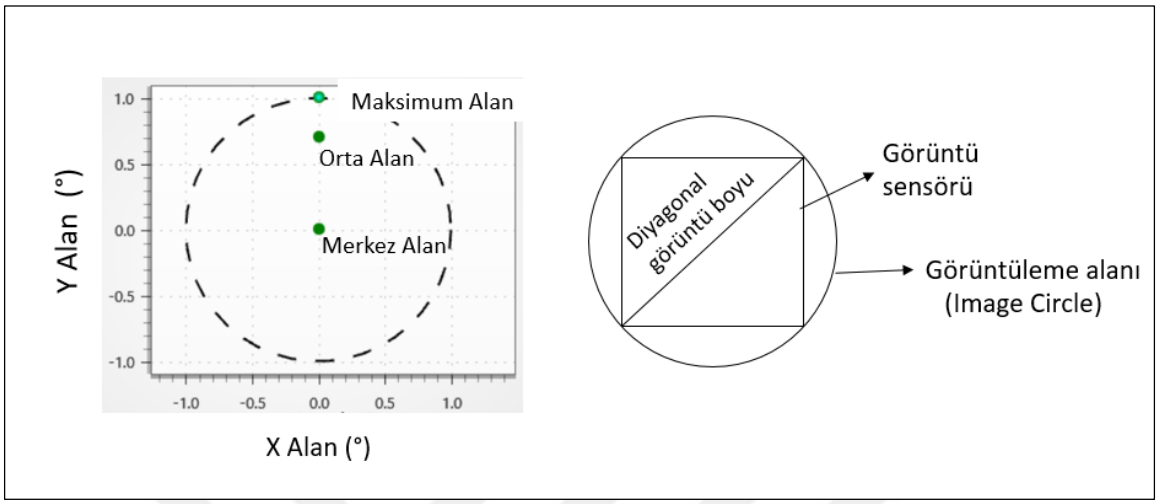
$$\mathrm{HFOV}(2\beta) = 2.\tan^{-1}\left(\frac{S}{2.EFFL}\right) \tag{2.5}$$



Şekil 2.3. Optik tasarım parametrelerin bir optik sistem üzerinde gösterimi

Ayrıca, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterildiği gibi görüş açısına karşılık gelen sensör düzlemi, üç ana alan (field) bölgesine ayrılarak incelenmektedir. Merkez Alan, (0° Field) optik eksenin üzerinde ve optik performansın en iyi (stigmatic veya aberation-free olarak adlandırılır) olduğu bölgedir. Orta Alan (Mid-Field), merkez ile center arasında kalan ve optik sistemin performansının değişkenlik gösterdiği bölgesidir. Maksimum Alan (Max.

Field) ise görüş alanının en uç noktasını temsil eder ve genellikle sistemin aberasyonların alana bağımlılığı nedeniyle optik performansının en zayıf olduğu bölgedir.



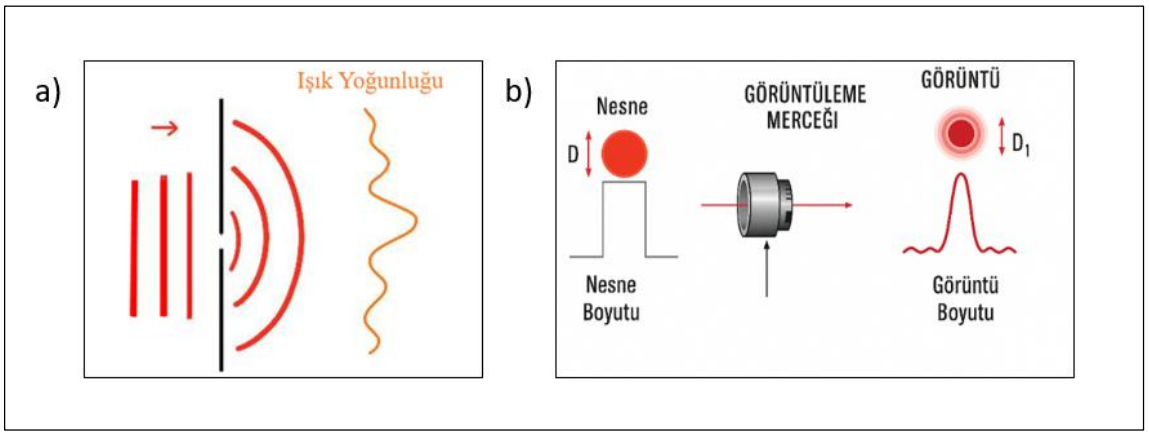
Şekil 2.4. Merkez alan, orta alan ve maksimum alan gösterimi

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi 0°, 0,7° ve 1,0° alan değerleri, sırasıyla merkez alan, orta alan ve maksimum alanı temsil eder. Buradaki 0,7°, normalize edilmiş diyagonal uzunluğun belirlediği tüm alanın yarısına karşılık gelmektedir. Hem merkez hem de maksimum alan performansının etkilerini yansıtan orta alan noktası olarak değerlendirilir. Böylece, tasarım ve optimizasyon çalışmalarında tüm görüş alanındaki optik davranışın karakteristik olarak modellenmesi mümkün hale gelir. Bu açılar, optik tasarım programlarında kullanıcıya bağlı larak farklı sayı ve oranlarda da seçilebilir.

2.3. Airy Halka Çapı

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi ışık kaynağı bir optik açıklıktan geçtiğinde, merkezde yoğun bir parlaklık ve çevresinde giderek azalan dairesel halkalardan oluşan bir desen elde edilir ve kırınım deseni olarak adlandırılır. Işık yoğunluğu en fazla olan D_1, Airy Halka çapı (Airy Disk) olarak adlandırılır. Işığın dalga boyu (λ) ve geçtiği optiğin f-sayısı ile arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu olay, tasarımın ulaşabileceği en küçük odaklama çapını belirleyen kırınım-limiti olarak tanımlanır. Airy Halka Çapı, $Ø_{Airy\ Disk}$, Eş. 2.6'daki gibi hesaplanmaktadır [23].

$$Ø_{Airy\ Disk} = 2{,}44\ .\lambda\ .F/\# \tag{2.6}$$



Şekil 2.5. a) Işığın kırınım etkisi ile bir perdedeki yoğunluk dağılımı, b) Airy Halkası oluşumu [24]

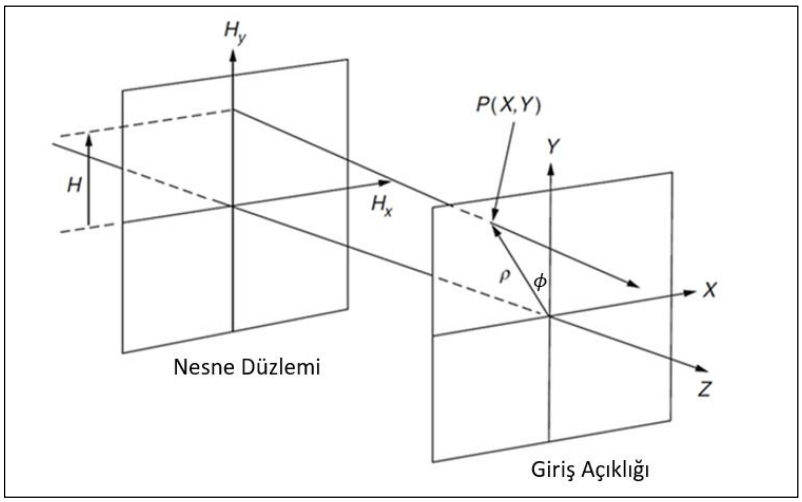
2.4. Aberasyon Teorisi

Optik sistemlerinde, ideal koşullarda beklenen kusursuz görüntüleme yerine, sistemin kırınım-limitine mümkün olduğunca yaklaşması hedeflenir. Tasarım aşamasını izleyen üretim ve hizalama süreçleri boyunca ortaya çıkabilecek sapmalar, optik performans üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğinden, bu tür hataların neden olduğu aberasyonların etkisinin azaltılarak düzeltilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde, optik tasarımda ST ölçüm hassasiyetini olumsuz etkileyebilecek temel optik aberasyonlar ayrıntılı olarak incelenmektedir. İncelemenin amacı, sistem performansını ve tasarımı değerlendirmeye yönelik yapılacak analizlere teorik bir zemin hazırlamak, tasarım sürecinde öncelikli olarak düzeltilmesi gereken optik sapmaları ortaya koymaktır. Optik aberasyonlar genel olarak monokromatik ve kromatik olmak üzere iki temel gruba ayrılır.

2.4.1. Monokromatik aberasyon

Adını Alman Fizikçi ve Matematikçi Ludwing von Seidel'den alan, 3. dereceden optik aberasyonlar, paraksiyal yaklaşımla ifade edilememektedir [25]. Dalga sapma teorisi kapsamında, optik sistemin açıklığına (pupil) ve görüş alanına (field) bağlı olarak ortaya çıkan, 5 temel monokromatik optik aberasyonu (Küresel Aberasyon, Koma, Astigmatism, Alan Eğriliği ve Distorsiyon) içerir [26].



Şekil 2.6. Optik açıklık ve alan koordinatlarının gösterimi [26]

Monokromatik aberasyonlar, dalga aberasyon fonksiyonu *W*'nin, pupil (optik açıklık) ve alan koordinatlarının (ρ, ϕ ve *H*) kuvvet serisiyle genişletilmesiyle Şekil 2.6'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Burada ρ, normalize edilmiş pupil yarıçapını; φ, pupil düzlemindeki açısal konumu; *H* ise görüntü düzleminde optik eksenden uzaklığı ifade eden görüntü yüksekliğini temsil eder. Eşitlik 2.8'de gösterildiği gibi bir optik sistemde ortaya çıkan dalga cephesi hatası, farklı aberasyon türlerinin fonksiyonlarının toplamıyla ifade edilmektedir [26, 27].

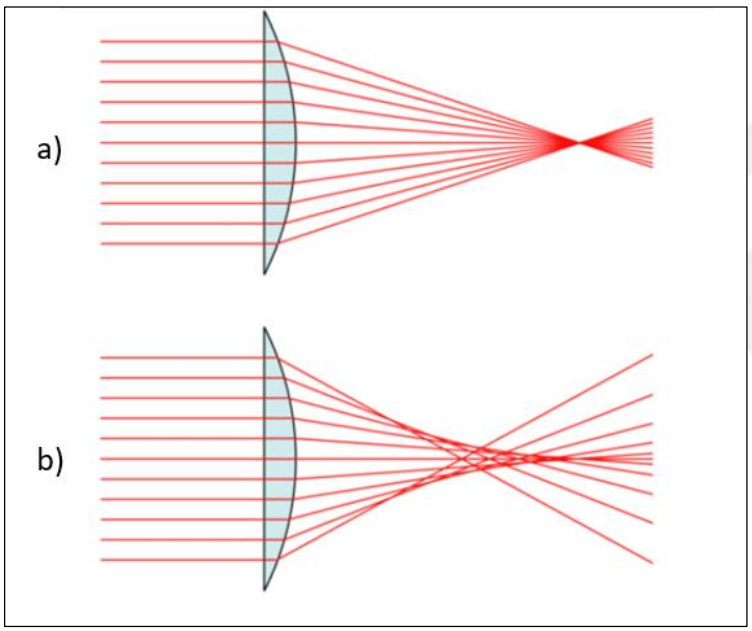
$$W_{ijk} = H^i \cdot \rho^j \cdot cos^k \phi \tag{2.7}$$

$$W(H,\rho,\phi) = W_{040}\rho^4 + W_{131}H\rho^3 \cos\phi + W_{222}H^2\rho^2 \cos\phi^2 + W_{220}H^2\rho^2 \cos(\phi) + W_{311}H^3\rho \cos(\phi) \tag{2.8}$$

Denklemde $W_{040}\rho^4$, küresel aberasyon; $W_{131}H\rho^3 \cos(\phi)$, koma; $W_{220}H^2\rho^2$, alan eğriliği; $W_{222}H^2\rho^2 \cos(\phi)$, astigmatizm ; $W_{311}H^3\rho \cos(\phi)$, distorsiyon 3. derece dalga aberasyon katsayılarıdır [27]. Her bir polinomsal katsayının (W_{ijk}) değeri, sistemdeki lens parametrelerine (kırılma indisi, kalınlık, eğrilik yarıçapı vb.) ve marjinal/merkez ışın yüksekliği (chief ray) ve açılarına bağlıdır.

Küresel aberasyon

Küresel yüzeyli lenslerde, ışınlar lens merkezi ve kenar bölgelerinde farklı şekilde kırılır (Bkz. Şekil 2.7.) Bu durum, ışınların tek bir noktada odaklanamamasına neden olur [28, 29]. Özellikle geniş açıklıklı optik sistemlerde ortaya çıkan bu aberasyon görüntünün netliğinin bozularak, bulanıklaşmasına neden olur. Asferik lens kullanımı veya birden fazla lens kullanılarak bu optik aberasyon düzeltilebilir. Küresel aberasyon, optik açıklığının dördüncü kuvveti (ρ^4) ile orantılı olarak artmaktadır. Alan (field) bağımlılığı yoktur.

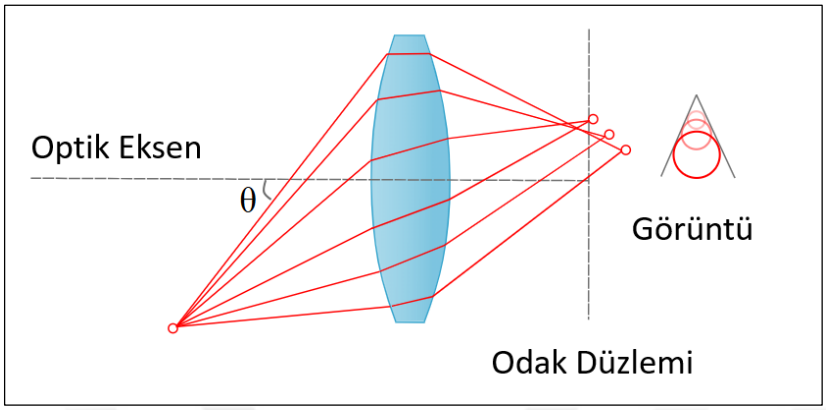


Şekil 2.7. a) Işınların bir mercekten geçerek odaklanması (aberasyonsuz durum), b) küresel aberasyon etkisiyle ışınların farklı odak noktalarında toplandığı durum [30]

Koma

Koma, küresel aberasyonun özel bir durumudur. Şekil 2.8.'deki gibi, ışık optik eksene eğik açılarla geldiğinde, merceğin merkezinden ve kenarlarından geçen ışınlar farklı noktalara odaklanır ve istenilen noktasal görüntü yerine merkezi parlak ve kenarları bulanık kuyruk şeklinde, virgüle benzeyen bir görüntü elde edilir. Geniş görüş alanı ve geniş optik açıklığa sahip sistemlerde ortaya çıkarak görüntünün kenarlarında kuyruklu yıldız benzeri bozulmalara neden olur.

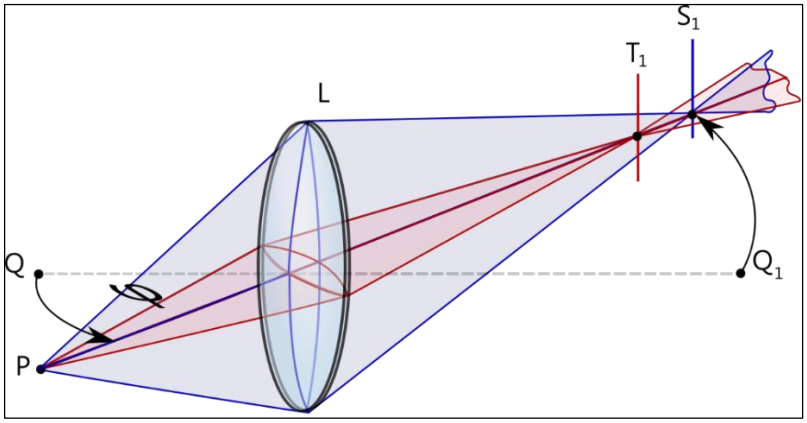
Koma, optik açıklığının küpü (ρ^3) ve görüş alanının birinci kuvveti (H) ile orantılı olarak artar.



Şekil 2.8. Optik eksende koma aberasyonunun görünümü [31]

Astigmatizm

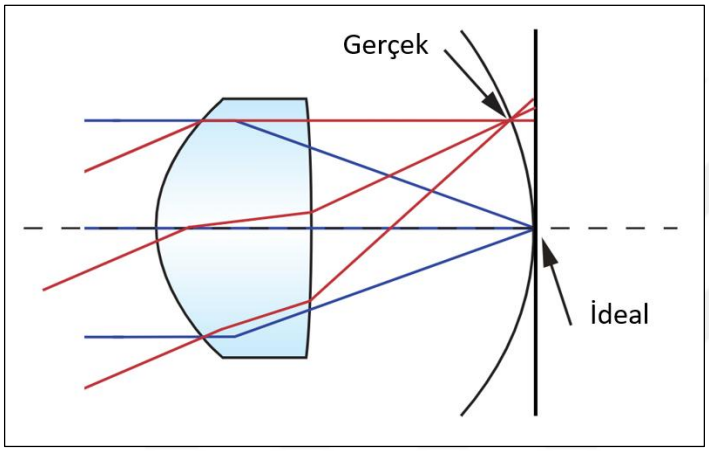
Astigmatizm, optik eksene açılı gelen ışınların, teğetsel ve sagittal olarak farklı odak düzlemlerinde odaklanmasıyla ortaya çıkan bir optik aberasyondur. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi düşey ve yatay eksende farklı odak düzlemlerinin oluştuğu bu aberasyonda, sagittal ve teğetsel eksenlerde, birbine dik iki çizgi odağı arasında net olmayan bir görüntü oluşur. Bu aberasyon, simetrik lens dizilimi ile optik tasarımda düzeltilebilir. Astigmatizm, görüş alanı (H^2) ve optik açıklık (ρ^2) ile kuadratik olarak değişmektedir.



Şekil 2.9. Optik eksende astigmatizm görünümü [31]

Alan eğriliği

Şekil 2.10'da gösterilen görüntü düzleminin düz bir düzlemde olması gerekirken, eğri bir yüzey şeklinde oluşmasına alan eğriliği denir. Görüntünün kenarlarının ve merkezinin eş zamanlı olarak net olmamasına neden olur. Optik sistemde, lenslerin optik güçlerini dengeleyecek şekilde dizilimin sonuna pozitif ya da negatif lens eklenerek, bu aberasyon düzeltilebilmektedir. Geniş görüş alanına sahip optik sistemlerde bu aberasyon daha görünür hale gelmektedir.



Şekil 2.10. Alan eğriliği aberasyonu; ideal ve gerçek odak düzleminin gösterimi [32]

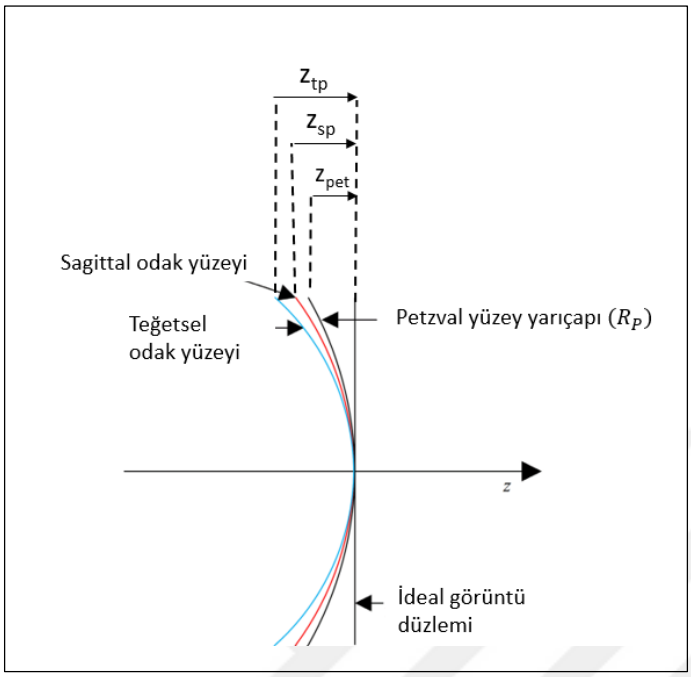
Alan eğriliği, görüş alanı (H^2) ve optik açıklık (ρ^2) büyüklüklerinin karesi ile orantılı olarak artmaktadır.

Aberasyon sonrası oluşan eğri yüzeye Petzval yüzeyi denir. Eşitlik 2.9'da gösterildiği gibi Petzval yüzeyinin yarıçapı (R_P), yüzeyin optik gücüne (φ_i) ve ortamın kırılma indisine (n_i) bağlıdır.

$$\frac{1}{R_P} = \sum \left(\frac{\varphi_i}{n_i} \right) \tag{2.9}$$

Şekil 2.11'de gösterilen z_{sp} ve z_{tp} Petzval yüzeyine göre sırasıyla sagittal ve teğetsel alan eğrilikleridir. Eş. 2.10'da Petzval yüzey konumu (z_{pet}) ile sagittal ve teğetsel alan eğrilikleri arasındaki ilişki verilmiştir.

$$z_{pet} = \frac{3.z_{sp} - z_{tp}}{2} \tag{2.10}$$

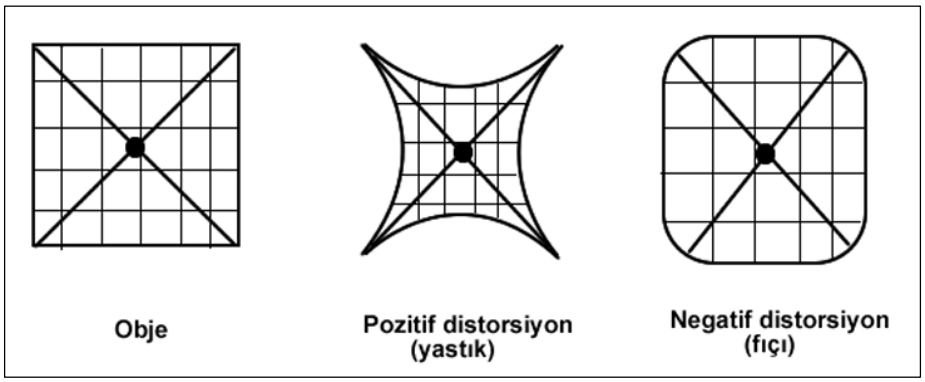


Şekil 2.11. Petzval yüzeyi, teğetsel ve sagittal odak yüzeyi gösterimi [33]

Distorsiyon

Distorsiyon, bir optik sistemde görüntünün kalitesinde kayıp yaşanmadan, sadece geometrik şeklinde bozulmalara neden olan aberasyondur. Optik sistemin odak uzunluğunun alan boyunca değişmesinden kaynaklanır. Görüntüdeki noktalar gerçek konumlarından kayar ve olması gereken gerçek görüntüden uzaklaşırlar. Geniş görüş açısına sahip sistemlerde karşılaşılan bir optik aberasyondur. Distorsiyon, görüş alanının küpü (H^3) ve optik açıklığın (ρ) birinci kuvveti ile orantılı olarak artmaktadır. Görüntü işleme yazılımları ile düzeltilebilir.

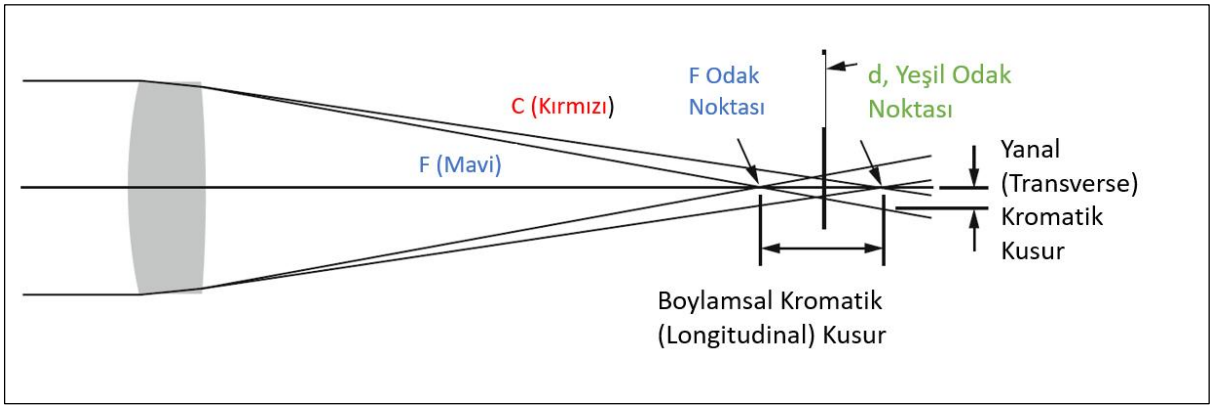
Şekil 2.12'de gösterildiği gibi pozitif (yastık) ve negatif (fıçı) olmak üzere iki temel distorsiyon türü vardır. Pozitif distorsiyon (pincushion), görüntü merkezinden kenarlarına doğru ilerledikçe iç bükey halini alarak yastığa benzer bir hal alır. Negatif distorsiyon (Barrel) ise görüntünün kenarlarının içe doğru eğildiği biçimsel bozulmadır. Görüntüdeki nesneler kenarlara yaklaştıkça küçülürken merkeze yaklaştıkça büyür.



Şekil 2.12. Fıçı ve yastık distorsiyonun gösterimi [34]

2.4.2. Kromatik aberasyon

Kromatik aberasyon, optik sistemde farklı dalga boylarındaki ışınların görüntü düzleminde aynı noktada odaklanamamasından kaynaklanan bir optik kusurdur. F (Mavi), D (Yeşil) ve C (Kırmızı) dalga boyuna sahip ışınlar optik eksenin farklı noktalarında odaklanmaktadırlar (Bkz. Şekil 2.13). Işığın dalga boyuna $n(\lambda)$ bağlı olarak hızının ve kırılma indisinin değişmesi, yani dispersiyon olayı, bu aberasyonun temel nedenidir [35].



Şekil 2.13. Optik eksende kırmızı (C), yeşil (D) ve mavi (F) ışınların odak noktaları [26]

Malzemeye özgü Sellmeir katsayısı (B_n) ve malzemenin rezonans frekanslarının katsayısı (C_n) olmak üzere, Sellmeir denklemi ile dalga boyunun kırıcılık indisine etkisi Eş. 2.11'deki gibi ifade edilir.

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \cdots \tag{2.11}$$

Sellmeir denklemi, optik malzemelerin kırılma indisini, dalga boyuna ve malzemeye göre doğru bir şekilde hesaplamamızı sağlar. Optik malzeme içinde bulunan atomik rezonans frekansları, malzeme içine gelen elektromanyetik dalgalar ile etkileşime girer ve bunun sonucunda farklı dalga boyu, malzeme içinde farklı bir hızla yayılır.

Boylamsal (Longitudinal) Kromatik Aberasyon:

Farklı dalga boylarına sahip ışınlar, optik eksen boyunca farklı odak noktalarına yönelir. Bu, odak düzleminin ileri-geri yönde kaymasına sebep olur.

Yanal (Transversal) Kromatik Aberasyon:

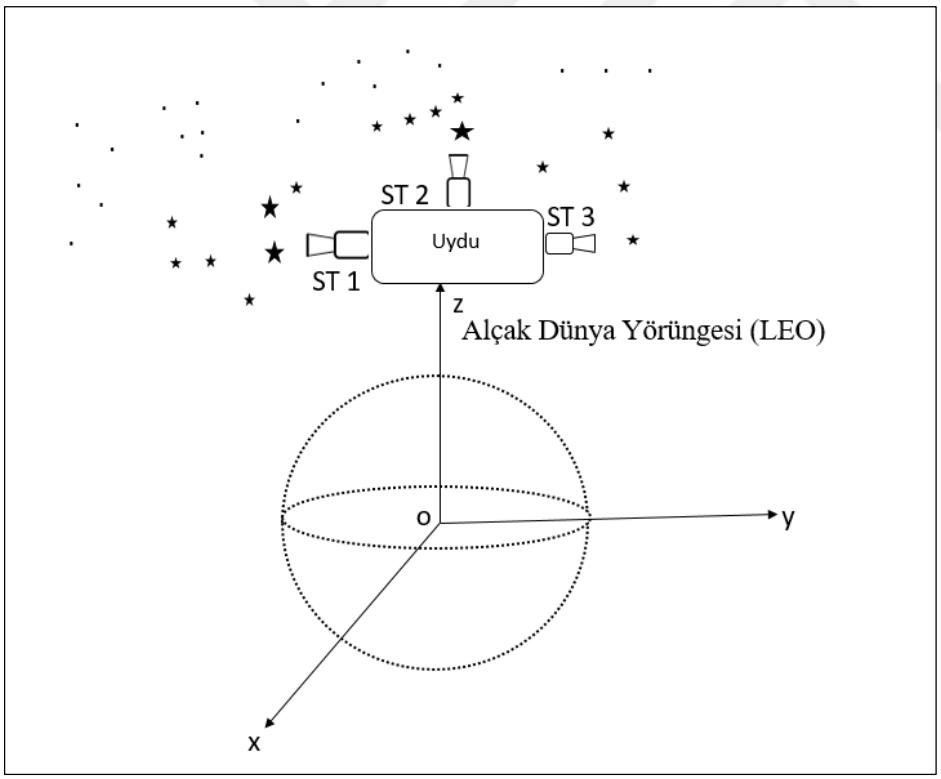
Bu türde, farklı renkler aynı düzlemde ama birbirinden farklı noktalarda odaklanır. Özellikle görüntünün kenarlarında renk kaymaları şeklinde gözlemlenir.Bu tür aberasyonlar genellikle akromatik çiftler veya apokromatik tasarımlar ile düzeltilebilir. Bu tür düzeltmelerde, farklı kırılma indisine ve dispersiyon özelliğine sahip lens malzemeleri birlikte kullanılır.

Kromatik aberasyonlar, genellikle 3. dereceden optik aberasyon olarak değerlendirilir. Fakat bu aberasyonların neden olduğu geometrik sapmalar, dalga sapma fonksiyonunun (wave aberration function) genişletilmesinde daha yüksek mertebelerde (4. derece ve sonrası) görünür hale gelir. Özellikle boylamsal kromatik aberasyon, sistemin odak uzaklığında lineer (1. derece) bir değişim gibi davranır. Yanal kromatik aberasyon, görüntü düzleminde kayma yaratarak görüntünün renk bileşenlerinde ayrışmaya neden olur.

3. YILDIZ İZLER

3.1. Yıldız İzler Sistemlerin Çalışma Prensibi

ST, yörüngedeki uyduların konumlarını ve yönelimlerini hassas bir şekilde belirlemek amacıyla kullanılan elektro-optik sistemlerdir. Bu sistemle, yıldızların görüntüsü alınarak referans bir yıldız haritası ile eşletirme yapan, bir yıldız tespit algoritması ile koordinatlar belirlenmektedir. Alınan koordinatlar, yıldız kataloğundaki bilinen konumları ile karşılaştırılarak yıldızlar tespit edilir. Elde edilen koordinatlarına göre, uydunun yönelimi, konum ve pozisyonu hassas bir şekilde tespit edilir [18]. Genel olarak uydularda, birden fazla ST birbiriyle belirli bir yönelimde yerleştirilerek çoklu görüntü alınmakta ve alınan bu görüntüler birlikte işlenerek yörünge ve yönelim hassasiyeti artırılmaya çalışılmaktadır [36, 37].



Şekil 3.1. ST 1, ST 2 ve ST 3 uydu üzerindeki konumunun temsili gösterimi

ST performansı, yazılımsal algoritmalarla birlikte optik sistem ve görüntüleme sensörü gibi donanımsal bileşenlerle doğrudan ilişkilidir. Yıldız ışığının hangi spektral bantta geldiği, bu ışığın tespit edildiği sensör ve yıldız görüntüsünün bozulmadan sensör düzlemine

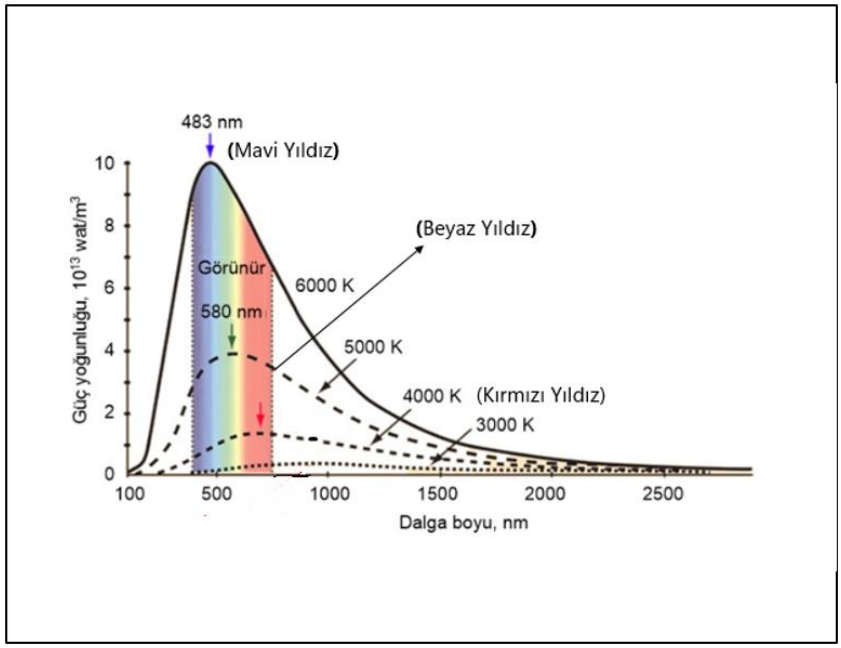
düşürülmesini sağlayan optik birim, ST'nin hassasiyetini ve dolayısıyla uydunun pozisyon doğruluğunu doğrudan etkilemektedir [38, 39].

3.2. Yıldız Toplam Işınım Şiddeti (Total Radiance) Spektral Dağılımı

Yıldızlar sıcaklıklarına bağlı olarak belirli bir spektrumda ışıma yaparlar. Eş. 3.1, Wien yasasına göre bir yıldızın sıcaklığı artıkça, yaydığı ışıma elektromanyetik spektrumun daha kısa dalga boyuna yani görünür bölgeye (400-700 nm) doğru kayacaktır. Şekil 3.2, yıldızların görünür ve kızılötesi bantlardaki spektral ışıma güç yoğunluğunu göstermektedir. Sıcak yıldızlar maksimum ışımayı görünür bölgede yaparken, soğuk yıldızlar maksimum ışımayı kızılötesi bölgede yaparlar [40].

$$\lambda_{max} = \frac{2898\ K.\mu m}{T(K)} \tag{3.1}$$

Eşitlikte, *T (Kelvin)* yıldızın mutlak sıcaklığını; λ_{max} ise cismin o sıcaklıktaki en fazla ışınım yaptığı dalga boyunu ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Bir yıldızın dalga boyuna bağlı örnek elektromanyetik spektrumu [41]

Yıldızların görsel parlaklıkları, gözlemlenen büyüklük değerleri (magnitude) ile ifade edilmektedir ve büyüklükler logaritmik olarak artmaktadır. Görsel parlaklık MAG ile

gösterilir ve MAG0 olan bir yıldız MAG6 büyüklüğündeki yıldızdan çok daha parlaktır. İdeal atmosfer koşullarında çıplak gözle bakıldığında, insan gözüyle MAG6 büyüklüğüne kadar olan yıldızlar algılanabilmektedir.

İki yıldızın parlaklıkları I_1 ve I_2, büyüklükleri ise MAG1 (m_1) ve MAG2 (m_2) olmak üzere aralarındaki ilişki Pogson Yasasına göre tanımlanır. Eş 3.2'ye göre büyüklük farkı ile parlaklık farkı arasında üstel bir ilişki vardır. Parlaklık büyüklüğündeki her bir birimlik fark, yıldızın parlaklığında yaklaşık 2,5 katlık fark yaratır. Örneğin, MAG0 olan bir yıldız ve MAG1 olan bir yıldızdan 2,5 kat daha parlaktır.

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{0,4(m_2 - m_1)} \tag{3.2}$$

Fotometrik ölçekte referans alınan astronomik olarak tanımlanmış bir yıldız $m_2 = -14,2$ parlaklığa sahip bir yıldızdır ve bu yıldızın birim alana düşen Işınım Şiddeti Eş.3.3'te tanımlandığı gibidir [40].

$$I_2 = 10^{-4}\ \frac{lumen}{cm^2} \tag{3.3}$$

Bu referans değer kullanılarak, MAG0 ($m_1 = 0$) bir yıldız için ışık akısı, I_1, Eş.3.4'teki gibi hesaplanır.

$$I_1 = 10^{-4}.10^{\frac{-0,4}{-14,2}} = 10^{-4}.10^{5,68} = 2,09\,.10^{-10}\ \frac{lumen}{cm^2} \tag{3.4}$$

$$1\ lumen = 0,00147\ W \tag{3.5}$$

Lümen cinsinden toplam Işınım Şiddeti (Total Radiance), Watt birimine çevrilirken Eş. 3.5'te verilen dönüşüm katsayısı kullanılır.

$$\mathrm{I_1} = 2,09\mathrm{x}10^{-10}.0,00147\ \mathrm{W} = 3,1\ \mathrm{x}\ 10^{-13}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{cm^2}} \tag{3.6}$$

Denklemde elde edilen sonuç, MAG0 bir yıldızın ışınım şiddetini vermektedir. Çizelge 3.1'de MAG0-MAG6 yıldızlar için göreli parlaklıklar ve yıldız ışınımları verilmiştir.

Çizelge 3.1. MAG0-MAG6 parlaklık kıyaslaması

Yıldız Büyüklüğü	Göreli Parlaklık Değişim Oranı	Toplam Işınım Şiddeti (W/cm^2)
MAG0	1	$3{,}10 \times 10^{-13}$
MAG1	$1/2{,}5^1$	$1{,}23 \times 10^{-13}$
MAG2	$1/2{,}5^2$	$4{,}90 \times 10^{-14}$
MAG3	$1/2{,}5^3$	$1{,}95 \times 10^{-14}$
MAG4	$1/2{,}5^4$	$7{,}77 \times 10^{-15}$
MAG5	$1/2{,}5^5$	$3{,}08 \times 10^{-15}$
MAG6	$1/2{,}5^6$	$1{,}28 \times 10^{-15}$

Yıldızların spektral ışınım şiddeti ve parlaklık büyüklükleri dikkate alındığında, ST için kullanılacak olan görüntü sensörünün düşük ışık seviyelerinde yüksek duyarlılığa sahip olması gerekmektedir. MAG0 ve MAG6 büyüklüğündeki yıldızlardan gelen ışık akısı az olduğu için sensör düzlemine aktarılan foton sayısı da az olacaktır. Bu sebeple, sensör seçiminde kuantum verimliliği yüksek, gürültü seviyesi düşük olan görüntüleme sensörü tercih edilmelidir. Ayrıca, bu ışığın sensör üzerine düşmesini sağlayan optik birim görüş açısı, odak uzaklığı, kullanılır optik açıklığı ve optik geçirgenlik oranı sistem performansını doğrudan etkileyen tasarım parametreleridir. Bu nedenle, ST tasarımında sensör ve optik sistem tasarım parametreleri birbiriyle uyumlu, düşük ışıkta maksimum sinyal toplama kapasitesine sahip olmalıdır.

3.3. Yıldız İzler Tasarımı Sistem Mühendisliği Faaliyetleri

3.3.1. Yıldız izler sensör seçiminin yapılması

Görüntüleme sensörü, ST'in en kritik bileşenlerinden biridir. Düşük ışık koşullarında bile yüksek verimlilikte çalışması gereken görüntüleme sensörü, piksel boyutu, radyasyona dayanımı ve shutter tipi ile optik tasarım unsurları açısından belirleyicidir. CMOS algılayıcı teknolojisindeki gelişmeler ve bu sensörlerin daha ucuz ve kolay erişilebilir olmaları nedeniyle charged-coupled device (CCD) sensörlere göre tercih edilmelerine sebep olmaktadır. Farklı üreticiler tarafından geliştirilen ve yıldız izler sistemlerinde kullanılabilecek dört farklı CMOS görüntü sensörünün temel teknik özellikleri Çizelge

3.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu karşılaştırma; sensör boyutu, piksel boyutu, spektral pencere aralığı, sensör boyutu, shutter tipi ve radyasyon dayanımı gibi temel parametreler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. ST sistemlerinde kullanılan ticari CMOS görüntüleme sensörleri

Marka	On-Semi	MikroTasarım	3D-Plus	On-Semi
Model	AR0134	-	CASPEX 4M	Star 1000
Sensör tipi	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
Sensör Boyutu	1280 x 960	1024 x 1024	2048 x 2048	1024 x1024
Piksel Boyutu	3,7 µm x 3,7µm	18 µm x 18 µm	5,5 µm x 5,5 µm	15 µm x 15µm
Dalgaboyu	400-700 nm	400-1000nm	400-1000 nm	400-1000 nm
Çözünürlük	1,2 MP	1 MP	4 MP	1 MP
Shutter	Global	Global	Global	Global
Radyasyon Dayanımı	Hayır	Evet	Evet	Evet

ON Semiconductor Corparation (ABD) AR0134 modeli [42], 1280 × 960 piksel çözünürlüğe ve 3,7 µm piksel boyutuna sahip bir sensördür. Piksel birleştirme (binning) işlemi yetenepine sahiptir. 400–700 nm aralığında, yalnızca görünür spektrumda çalışabilen bu silikon tabanlı CMOS sensör, tasarım itibarıyla radyasyon dayanımı içermemektedir. Ancak bazı çalışmalarda, maliyet etkinliği nedeniyle bu tip standart sensörlerin uzay koşullarında performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiş ve radyasyona dayanıklı alternatiflere kıyasla sınırlı görev süreleri için kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. Buna karşılık, aynı firmaya ait Star 1000 modeli, 1024 × 1024 piksel çözünürlüğü ve 15 µm piksel boyutu ile daha yüksek ışık toplama kapasitesi sunmakta; ayrıca 400–1000 nm genişliğindeki spektral kapsama alanı ve entegre radyasyon dayanımı sayesinde uzay ortamında güvenle kullanılabilecek niteliktedir.

Mikro-Tasarım Ltd. Şti. (Türkiye) [43] tarafından ilk kez ülkemizde geliştirilen CMOS sensör, 1024 × 1024 piksel çözünürlük ve 18 µm gibi oldukça büyük bir piksel boyutuna sahiptir. Bu durum, düşük ışık koşullarında yüksek sinyal seviyesi elde edilmesini mümkün kılmakta ve sinyal-gürültü oranını iyileştirmektedir. 400–1000 nm aralığında çalışabilen bu sensör, radyasyon dayanımı özelliği sayesinde uzay görevlerinde tercih edilebilecek bir diğer alternatiftir.

3D Plus S.A.S (Fransa) CASPEX 4M [44] modeli ise, 2048 × 2048 çözünürlük ve 5,5 µm piksel boyutu ile yüksek çözünürlüklü görüntüleme uygulamaları için öne çıkmaktadır. 400–

1000 nm spektral kapsama aralığına sahip olan bu sensör de radyasyon dayanımlıdır ve uzay ortamında kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

İncelenen tüm sensör modellerinin CMOS sensör teknolojisine sahip olduğu görülen sensörler global shutter yapısıyla donatılmıştır. Global shutter özelliği, hareketli platformlarda çekilen görüntülerde bozulmayı en aza indirerek yıldızların yüksek konumsal doğrulukla tespitine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, ilgili görev profiline uygun sensör seçimi; piksel boyutu, çözünürlük, spektral aralık ve radyasyon dayanımı gibi kriterler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmelidir.

Alçak Dünya Yörüngesinde bulunan bir uydunun yörünge hızı yaklaşık 7,2 km/s'dir. Bu hız, yer sabitliğine göre yıldızların dedektör düzleminde yer değiştirme süresinin kısa olmasına, yani pozlama süresinin kısa olmasına neden olmaktadır. Bu hareket ise yıldızların görüntü düzleminde çizgi olarak görünmesine ve yıldız konumunun ölçüm hassasiyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Global shutter, pozlama işlemini tüm sensör alanı üzerinde eş zamanlı yaparak, aynı anda foton toplar ve okuma işlemini gerçekleştirir. Ancak, rolling shutter teknolojisi pozlama işlemini sensör üzerinde satır satır gerçekleştirmektedir.

Piksel boyutu, görüntü sensörü seçerken dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden birisidir. Büyük piksel boyutuna sahip sensörler, düşük ışık koşullarında daha fazla foton toplayabilmektedir. Bu durum, MAG6 olan yıldızlardan gelen sinyalin daha etkin şekilde algılanmasını sağlayarak, sinyal-gürültü oranını artıracaktır. Ayrıca, radyasyona dayanıklı sensör tercih edilmesi, ST ömrünü ve güvenirliğini artırmaktadır.

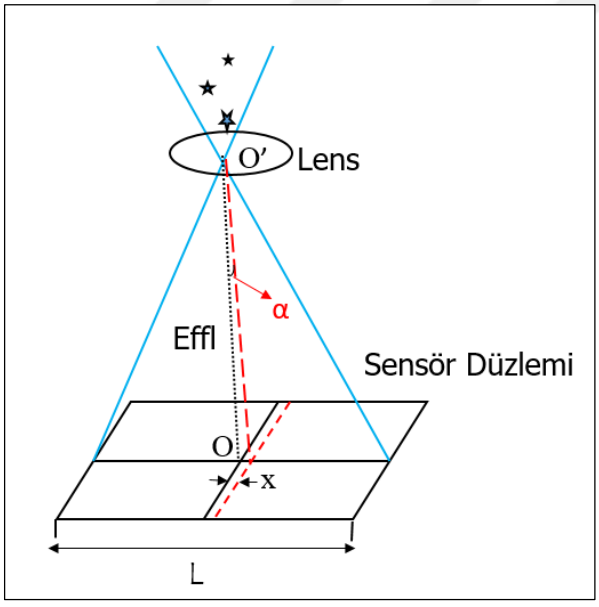
Bu değerlendirmeler ışığında, Çizelge 3.3.'te teknik özellikleri sunulan Mikro Tasarım'a ait 1024 x 1024 çözünürlük ve 18 μm piksel boyutlu, radyasyona dayanımlı, kuantum verimliliği ortalama %60'dan büyük, global shutter CMOS bir sensör kullanılarak tasarım çalışması yapılmıştır [42]. Piksel boyutu sayesinde, sensöre düşen foton sayısı artmakta, bu da yüksek sinyal-gürültü oranı (SNR) elde edilmesine olanak sağlamaktadır [19].

Çizelge 3.3. Yıldız İzler görüntüleme dedektörü teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Değerler
Sensör Tipi	CMOS
Çözünürlük	1024 x 1024
Piksel Boyutu	18 µm x 18 µm
Tarama Hızı	≤ 25 Fps
Pozlama Zamanı	10 µs-100 ms
Gürültü Seviyesi	≤ 30 ē
Radyasyon Toleransı	≥ 50 krad

3.3.2. Yıldız izler ölçüm hassasiyetinin hesaplanması

ST'te ideal durumda yıldızdan gelen ışığın optik boyunca ilerleyerek dedektör düzlemi üzerindeki bir obje-eşleniği noktaya (O noktası) düşmesi beklenir. Ancak, uydunun hareketi, ST sıcaklık kontrolü, hizalama hataları ve optik aberasyonlar sebebiyle, yıldız görüntüsü bu ideal konumdan " x " kadar saparak farklı bir noktaya odaklanabilir. Bu sapma, optik eksen ile gerçek yıldız arasındaki açısal fark olarak adlandırılır ve ölçüm hassasiyetini belirler. Ölçüm hassasiyeti Eş. 3.7'deki gibi ifade edilmektedir [19, 45].

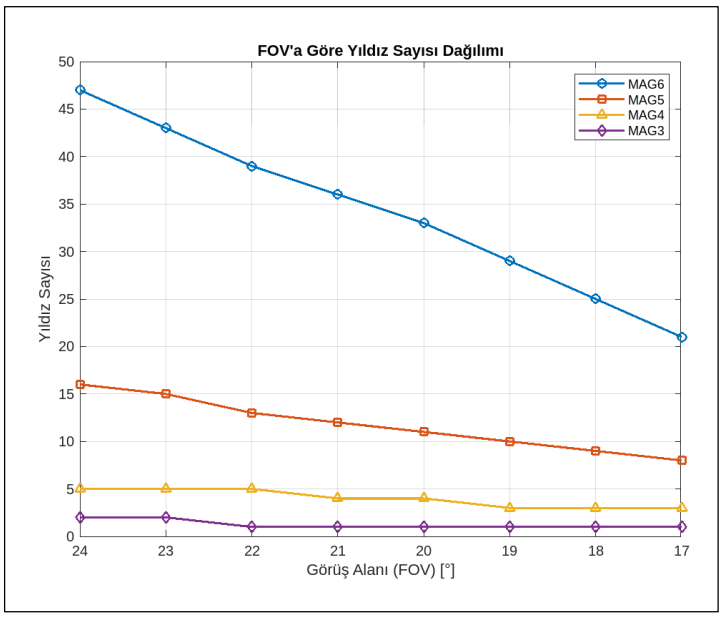


Şekil 3.3. Hedeflenen ST ölçüm hassasiyetinin (α) gösterimi

$$a = \frac{\mathrm{HFOV}(2\beta).E_{centroid}}{N_{pixel}\cdot\sqrt{N_{star}}} \tag{3.7}$$

Burada, a hedeflenen ölçüm hassasiyetini (yaysaniye cinsinden); HFOV(2β), derece cinsinden sistem tüm görüş açısını; $E_{centroid}$, yıldız merkezleme algoritmasındaki piksel başına ortalama konumlandırma hatasını; N_{pixel}, sensör piksel çözünürlüğünü; N_{star} , görüş alanına giren yıldız sayısını temsil etmektedir [19].

Şekil 3.4'te, görüş alanı arttıkça yıldız izler tarafından algılanabilen yıldız sayısındaki değişim ile eş zamanlı olarak algılanan yıldızların parlaklık sınırı (MAG) arasındaki ilişki gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, FOV değerinin artmasıyla birlikte algılanan yıldız sayısında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bu durum, daha geniş görüş alanına sahip optik sistemlerin daha fazla yıldız tespit edebileceğini göstermektedir. Ancak aynı anda, sistemin görebildiği yıldızların parlaklık eşiği büyüklük (magnitude) cinsinden azalmaktadır; yani daha geniş FOV değerlerinde yalnızca daha parlak yıldızlar tespit edilebilmektedir. Bu durum, sistemin algılama dinamiğinde FOV genişledikçe daha az sayıda sönük yıldızın görünür hale geldiğini ve yıldız parlaklığına bağlı bir seçim etkisinin oluştuğunu göstermektedir. Bu nedenle, yönelim belirleme doğruluğunu optimize etmek amacıyla görüş alanı, yıldız sayısı ve parlaklık büyüklüğü birlikte değerlendirilmelidir. ST'de hassas pozisyon ve yönelim hesaplamalarının yapılabilmesi için, görüş alanında en az üç yıldızın aynı anda algılanması gerekmektedir. Bu sayı literatürde yüksek ölçüm doğruluğu ve yıldız tanıma algoritmalarının kararlılığı için 15-20 yıldız aralığında tutulmaktadır [19, 46].



Şekil 3.4. Görüş alanı, yıldız sayısı ve yıldız parlaklığının ilişkisi

Görüş alanına giren yıldız sayısı; N_{star}, görüş açısına bağlı olarak Eş. 3.8'teki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlikte *MAGX*, görüş alanına giren yıldız parlaklık boyutunu temsil etmektedir.

$$N_{star} = 6.57.e^{1.08.MAGX}\frac{1-\cos\left(\frac{HFOV(\beta)}{2}\right)}{2} \tag{3.8}$$

Eş. 3.8 ile belirli bir parlaklık eşiğine (MAGX) sahip yıldızların gökyüzündeki yoğunluk dağılımı kullanarak, HFOV değeri verildiğinde görüş alanına giren yıldız sayısı N_{star} hesaplanmaktadır. Bu bağıntı, yıldız yoğunluğu verilerinden türetilmiş gözlemsel bir modeldir ve teorik olmaktan ziyade istatistiksel gözlemlere dayanmaktadır. Bu eşitlik kullanılarak 17°, 18°, 19°, 20°, 21° ve 22° için hesaplanan yıldız sayıları N_{star} Çizelge 3.4'te verilmiştir. Ayrıca, hesaplanan HFOV ve yıldız sayıları için yıldız yoğunluk dağılımına bağlı olarak ölçüm hassasiyetleri hesaplanmış ve Çizelge 3.4'te sunulmuştur. Buna göre 20° HFOV ve üzeri bir ST için ölçüm hassasiyetinin 2 yaysaniye seviyelerine çıktığı görülmektedir. Yıldız tespit algoritmalarının doğruluk oranının artması için ise görüş alanına giren yıldız sayısının da artması gerekmektedir. HFOV 17, 18° ve 19° görüş alanlarına sırasıyla 24, 26 ve 29 yıldız girmektedir. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, 19° HFOV hem maksimum yıldız sayısını sağlayarak algoritma performansını desteklemekte hem de ölçüm hassasiyetini hedef sınırlar içinde tutmaktadır. Eş. 3.9'da HFOV 19° için görüş alanına giren yıldız sayısı Eş. 3.8 kullanılarak örnek olarak hesaplanmıştır.

$$N_{star} = 6.57.e^{1.08.MAG6}\frac{1-\cos\left(\frac{19}{2}\right)}{2} = 29 \tag{3.9}$$

Eş. 3.10'da ise 19° görüş açısı ve 29 yıldız için ölçüm hassasiyeti Eş 3.7 kullanılarak örnek olarak hesaplanmıştır.

$$a = \frac{\mathrm{HFOV}(2\beta).E_{centroid}}{N_{pixel}.\sqrt{N_{star}}} = \frac{19°.0{,}1\ piksel}{1024\ piksel.\sqrt{29}} = 1\ yaysaniye \tag{3.10}$$

Çizelge 3.4 HFOV, yıldız sayısı ve ölçüm hassasiyeti hesaplamaları

HFOV (°)	N_{star}	Yıldız Yoğunluk Dağılımı	Ölçüm Hassasiyeti
17	24	MAG6	1 yaysaniye
18	26	MAG6	1 yaysaniye
19	29	MAG6	1 yaysaniye
20	33	MAG5	2 yaysaniye
21	36	MAG5	2 yaysaniye
22	43	MAG5	2 yaysaniye

3.3.3. Sistem etkin odak uzaklığının hesaplanması

ST'te kullanılan sensör özellikleri belirlenmiş ve ölçüm hassasiyeti, literatürde belirtilen ticari ürünler temel alınarak sistemin doğruluğu için karşılaması gereken minimum gereksinimler saptanmıştır. Ayrıca, ST sensör özellikleri (1024 x 1024 çözünürlük, 18 μm piksel büyüklüğü) ve görüş açısı 19° parametrelerine bağlı olarak, sistemin etkin odak uzaklığı hesaplanabilir durumdadır. Optik tasarımda kullanılmak üzere ST etkin odak uzaklığı, Eş. 2.5 kullanılarak Eş. 3.11'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$19\,^\circ = 2.\arctan\left[\frac{1024.18\ \mu\text{m}}{2.EFFL}\right] \tag{3.11}$$

Eşitlikte, optik sistemin $EFFL$ değeri 55 mm olarak hesaplanmıştır.

3.3.4. Sinyal / Gürültü (SNR) hesaplaması

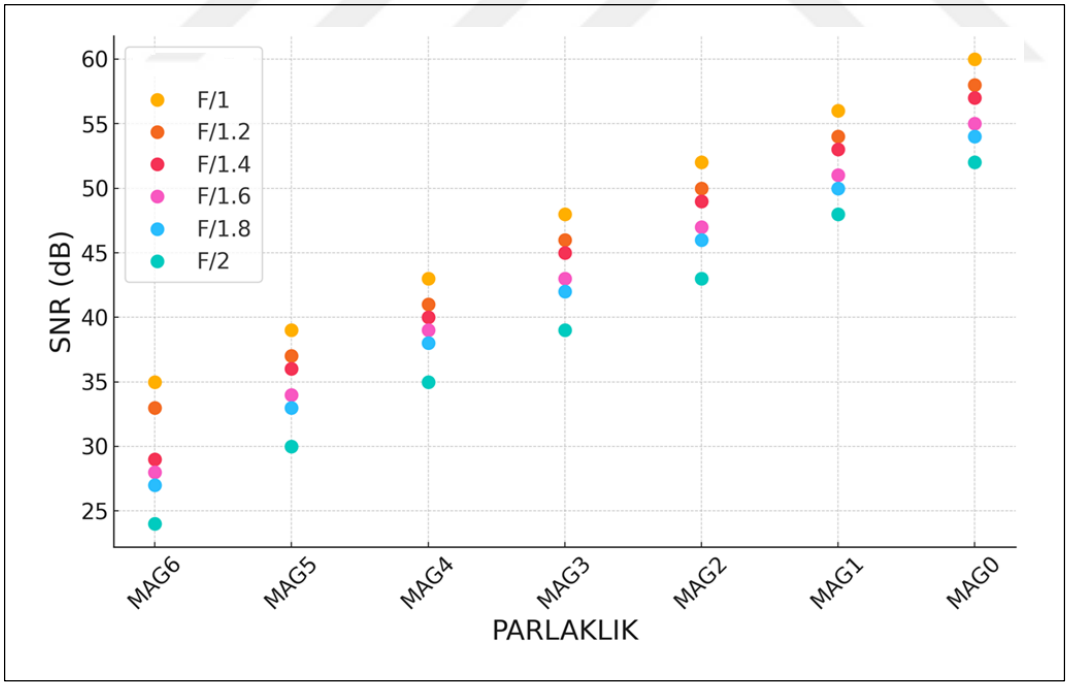
ST sinyal-gürültü oranı (SNR), sistem performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. SNR_{sistem} sensöre düşen toplam foton sayısının (S_{toplam}) sensörün toplam gürültüsüne (σ_{toplam}) oranı olarak tanımlanır. SNR, Eş. 3.12'deki ifade kullanılarak hesaplanmaktadır [47].

$$SNR_{sistem} = \frac{S_{toplam}}{\sigma_{\text{toplam}}} \tag{3.12}$$

SNR değeri, dedektöre ulaşan toplam foton sayısına bağlıdır ve bu da doğrudan optik açıklık ile ilişkilidir. Daha düşük F/# değerleri, daha büyük bir açıklık anlamına geldiği için

dedektöre daha fazla ışık düşmesini sağlayarak SNR değerini artırır. Bu durum, özellikle düşük ışık seviyelerinde çalışan ST'ler için kritik öneme sahiptir.

Şekil 3.5'te, farklı *F/#* değerleri için MAG0 ile MAG6 arası parlaklığa sahip yıldızlara karşılık gelen sinyal-gürültü oranı (SNR) değerleri gösterilmektedir. Bu analizde, F/1,2, F/1,4, F/1,6, F/1,8 ve F/2,0 açıklıklarında gerçekleştirilen SNR hesaplamaları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.5'te yapılan hesaplamalar, daha düşük F/# değerlerinin (daha büyük açıklıkların) daha yüksek SNR değerleri elde edilmesini sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle, MAG6 büyüklüğündeki bir yıldız için, F/1,2 ile 32 dB seviyesinde SNR elde edilirken, F/2 açıklığında bu değer yaklaşık 26 dB'ye düşmektedir. Bu çalışmada hedeflenen kriter doğrultusunda, ticari yıldız izleyici sistemlerinde referans alınan, MAG6 büyüklüğündeki bir yıldız için minimum 30 dB SNR sağlanması hedeflenmiştir. Bu gereksinimi karşılamak amacıyla, optik sistemin giriş açıklığı F/1,2 olarak seçilmiştir. Böylece hem yeterli ışık toplama kapasitesi sağlanmış, hem de sistem tasarımı ticari sınırlar içinde kalacak şekilde optimize edilmiştir.



Şekil 3.5. SNR ve F/# ilişkisi

Tüm optik açıklık değerleri için SNR hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.5'te karşılaştırılmıştır. Bu hesaplamalar arasında, F/1,2 açıklığına sahip sistem için yapılan detaylı SNR hesaplamaları aşağıda sunulmuştur.

ST gibi düşük ışık koşullarında çalışan elektro-optik sistemlerde, sensör düzlemine ulaşan sinyalin seviyesi ve bu sinyale etki eden çeşitli gürültü kaynakları, sistem performansının temel belirleyicisidir. Bu bölümde ST, SNR hesaplaması gerçekleştirilmiş olup hesaplama süreci 400 nm ile 1000 nm dalga boyu aralığında sensör etkin spektral penceresi için yapılmıştır.

İlk olarak, 400 nm ile 1000 nm dalga boyu aralığında tüm dalga boyları için yıldızdan gelen spektral ışınım değeri sabit olarak kabul edilmiştir. Bu değer, MAG0 büyüklüğündeki bir yıldız için radyometrik modelleme sonucu Bölüm 3.2. Eş. 3.6'da hesaplandığı gibi:

$$Ø = 3{,}1 \text{ x } 10^{-13}\ \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}\text{'dir.}$$

400 nm ile 1000 nm dalga boyu aralığında tüm dalga boyları için foton enerjisi Eş. 3.13'deki gibi hesaplanır. Eşitlikte *h*, Planck sabiti; *c*, ışık hızı; λ ise nm cinsinden dalga boyudur.

$$E_{foton} = \frac{hc}{\lambda} \tag{3.13}$$

Her bir dalga boyu için gelen toplam foton sayısı Eş. 3.14'deki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlikte L_λ, λ dalga boyundaki spektral ışınımı (W/mm².nm); E_{foton} ise ilgili dalga boyundaki tek bir fotonun enerjisini ifade etmektedir.

$$N_{foton}(\lambda) = \frac{L_\lambda}{E_{foton}} \tag{3.14}$$

Hesaplanan her foton değeri, sensörün kuantum verimliliği (QE) ile çarpılarak üretilen foto-elektron sayısı Eş. 3.15'te hesaplanmıştır. $QE(\lambda)$ sensörün o dalgaboyunda sahip olduğu kuantum verimliliği göstermektedir.

$$N_e(\lambda) = N_{foton}(\lambda).QE(\lambda) \tag{3.15}$$

Toplam sinyal $N^{\bar{e}}_{toplam}$, tüm dalga boyları için elde edilen elektron değerlerinin toplamıdır. Eş. 3.16'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$N_{toplam}^{\bar{e}} = \int_{400\,nm}^{1000\,nm} N_e(\lambda)d\lambda \;\; = 2361 \left(\frac{\bar{e}}{\mathrm{mm^2.\,s}}\right) \tag{3.16}$$

MAG0 olan bir yıldız için $2361 \left(\frac{\bar{e}}{\mathrm{mm^2.s}}\right)$ olarak elde edilir ve MAG6 olan bir yıldız için bu değer Eş. 3.17'de hesaplanmıştır.

$$MAG6\; N_{toplam}^{\bar{e}} = \frac{2361\;\bar{e}}{1/2{,}5^6} = 10\left(\frac{\bar{e}}{\mathrm{mm^2.\,s}}\right) \tag{3.17}$$

Toplam sinyal değeri, pozlama süresi ve optik açıklık alanı ile çarpılarak Eş. 3.18'deki gibi belirlenir. Eşitlikte t_{exp} , ST sisteminin pozlama süresini 0,2 s ; $\pi * \left(\frac{Effl}{2*F/\#}\right)^2$, optik açıklık alanını ve $T_{avg,}$ optik gerçirgenliği ifade etmektedir.

$$S_{toplam} = N_{toplam}^{\bar{e}}.\, t_{exp}.\, \pi.\left(\frac{Effl}{2.\,F/\#}\right)^2.\, T_{avg} \tag{3.18}$$

Eş. 3.19'da görüldüğü gibi ST toplam sinyal değerini etkileyen en önemli parametrelerden biri optik açıklıktır. Bu nedenle, sistemin düşük ışık koşullarında yeterli sinyal üretimi için, optik açıklığın doğru belirlenmesi gerekir. EFFL 55 mm ve F/1,2 için optik açıklık değeri 45,8 mm olarak hesaplanmıştır. MAG6 parlaklığına sahip bir yıldız için toplam sinyal değeri S_{toplam} Eş. 3.19'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$S_{toplam} = 10\left(\frac{\bar{e}}{\mathrm{mm^2} * \mathrm{s}}\right).0{,}2\; s.\pi.(22{,}9\; mm)^2 = \; 3186\;\bar{e} \tag{3.19}$$

σ_{toplam} ise sensörün sahip olduğu toplam gürültüdür ve Eş. 3.20'deki ifade kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{\mathrm{toplam}} = \sqrt{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{readout}^2} \;\; \bar{e} \tag{3.20}$$

σ_{shot}, Eş. 3.21'de gösterildiği gibi S_{toplam}'ın karekökü alınarak hesaplanır ve değer, elektron cinsinden verilir. $\sigma_{readout}$ elektronik okuma gürültüsü olarak adlandırılır ve shot noise dışındaki tüm gürültüleri içerir (karanlık akım, 1/f, quantization, vb). ST tasarımında

kullanılan görüntüleme sensörü için $\sigma_{readout}$ verilmiş olup Çizelge 3.3'te 30 ē olarak sunulmuştur.

$$\sigma_{shot} = \sqrt{S_{toplam}} = \sqrt{3186} = 47 \text{ ē} \quad (3.21)$$

Buradan, S_{toplam} Eş. 3.19 kullanılarak, MAG6 olan bir yıldız için 3186 ē hesaplanır. Optik geçirgenlik değeri %70 olarak alındığında, S_{toplam} 2230 ē olur.

Eş. 3.20 kullanılarak toplam gürültü, $\sigma_{\text{toplam}} = \sqrt{50^2 + 30^2} = 56$ ē olarak hesaplanır.

$$SNR_{sistem} = \frac{2230 \text{ ē}}{56 \text{ ē}} = 40 \quad (3.22)$$

Eş. 3.23 kullanılarak SNR_{sistem} dB cinsinden hesaplanmaktadır.

$$SNR_{dB} = 20.\log_{10} SNR_{sistem} = 32 \text{ dB} \quad (3.23)$$

Hedeflenen minimum 30 dB SNR değeri için, yapılan sinyal/gürültü hesabı ile yıldız izler görüntüleme biriminin F/1,2 açıklığa sahip olması gerektiği bulunmuştur. Çizelge 3.5'te farklı parlaklık büyüklüğüne sahip yıldızlar için hesaplanan SNR değerleri paylaşılmıştır.

Çizelge 3.5. F/1,2 objektif için MAG0-MAG6 sinyal/gürültü oranı

Yıldız Büyüklüğü	SNR Sistem	SNR (dB)
MAG0	737	57
MAG1	466	53
MAG2	294	49
MAG3	184	46
MAG4	114	41
MAG5	69	37
MAG6	40	32

3.3.5. MTF bütçesi

Optik bir sistemin görüntü kalitesi performansı, Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) ile tanımlanır. MTF, obje düzleminden gelerek optikten geçen ve odak düzleminde oluşan görüntünün kontrast değişimini temsil etmektedir. Uzamsal frekansın bir fonksiyonudur. Optik sistemlerde sistemin toplam MTF değeri, Eş. 3.24'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$MTF_{ST} = MTF_{Optik} \,.\, MTF_{Sensör} \,.\, MTF_{Üretim} \tag{3.24}$$

Burada MTF_{Optik}, sistemde kullanılan optik sistemin uzamsal frekansa karşı gösterdiği kontrast aktarımını temsil eder. $MTF_{Sensör}$, kullanılan görüntü sensörünün piksel yapısı ve dolayısıyla örnekleme etkisinden kaynaklanan kontrast aktarım yeteneğini tanımlar. $MTF_{Üretim}$ ise montaj, hizalama hataları, toleranslar ve yüzey kusurlarının neden olduğu üretim kaynaklı bozulmaların sistemin genel MTF performansına etkisini ifade eder.

Sensörün çözebileceği maksimum uzaysal frekans, Nyquist frekansında, piksel boyutuna bağlı olarak Eş. 3.25 ile hesaplanmaktadır.

$$Sensör\ Nyquist\ Frekansı = \frac{1}{(2\,.piksel\ boyutu)} \quad lp/mm \tag{3.25}$$

Denklemde piksel boyutu mm cinsinden ifade edilir ve lp, line-pair (aydınlık-karanlık çizgi çifti) olarak adlandırılır. Piksel boyutunun 18 µm olması durumunda Eş. 3.26'daki gibi hesaplanır.

$$ST_{Nyquist} = \frac{1000}{2.18} = 28\ \frac{lp}{mm} \tag{3.26}$$

4. YILDIZ İZLER TASARIMI

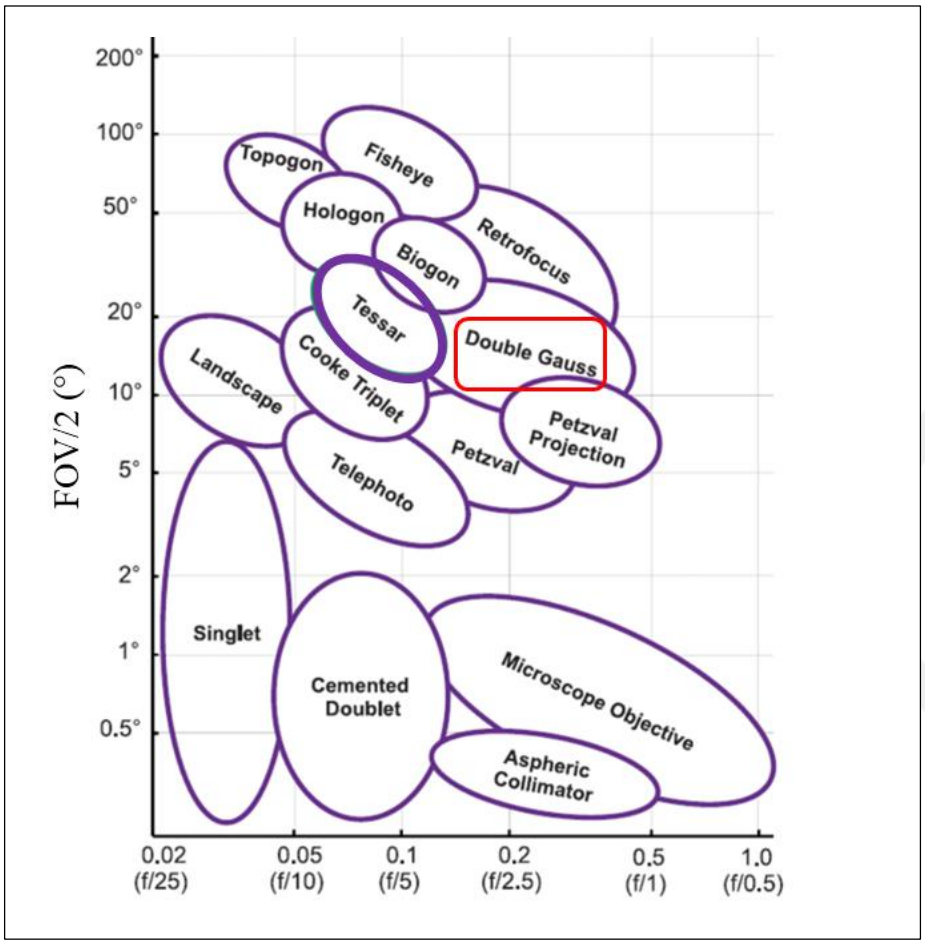
4.1. Yıldız İzler Optik Tasarımı

ST optik sisteminin performansı, kullanılan objektif mimarisi ve tasarımı ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde farklı gereksinimleri karşılamak üzere geliştirilmiş çeşitli objektif yapıları sunulmuştur. Triplet [21], Tessar [22], Heliar [25] ve Double-Gauss [29, 48] gibi temel optik mimariler, tarihsel ve işlevsel olarak önemli bir yere sahiptir.

Tarihsel süreçte geliştirilen ve günümüzde hâlâ temel alınan çeşitli objektif yapıları; düşük ışık koşullarında yüksek geçirgenlik sağlayan düşük *F/#* değerlerine ulaşma, aynı zamanda optik aberasyonları (küresel aberasyon, koma, astigmatizm, distorsiyon vb.) etkin şekilde düzeltme hedefiyle geliştirilmişlerdir. Bu yapılar, simetrik ya da yarı-simetrik tasarım ilkeleri ile hem eksenel hem de dış eksen bölgelerinde görüntü kalitesini artırmaya yönelik optimize edilmiştir. Özellikle düşük *F/#* değerlerinde çalışan sistemlerde, marjinal ışınların sistem içindeki kırınım açıları büyüdüğünden, optik kusurların giderilmesi zorlaşarak daha da kritik hale gelmektedir. Bu nedenle, söz konusu objektif mimarileri geniş görüş açısı (FOV) ve düşük aberasyon gibi birbiriyle çelişen parametrelerin dengeli biçimde karşılanmasını sağlamaktadır. Böylece, ST sistemlerinde gerekli olan yüksek görüntü kontrastı (MTF), düşük bozulma ve yüksek açısal doğruluk gibi temel performans kriterlerine ulaşmak mümkün hale gelmektedir. Geliştirilen bu optik yapılar sayesinde, maksimum görüş alanında dahi istenen MTF düzeyine ulaşılarak, sistem gereksinimleri sağlanmaktadır.

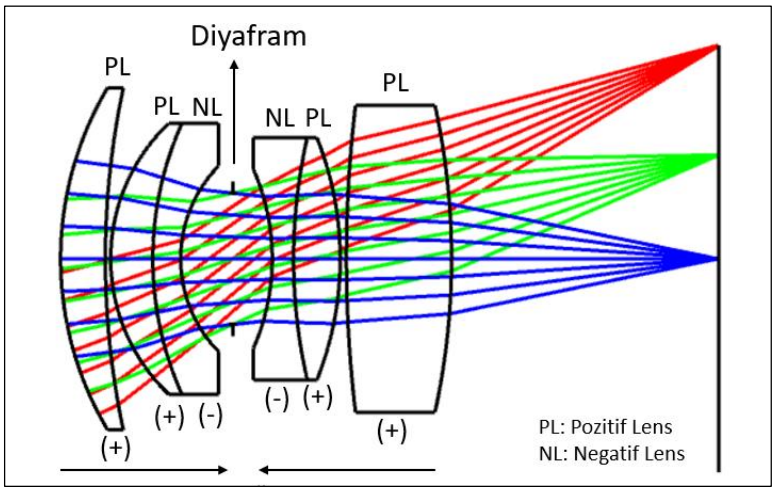
Triplet objektif mimarisi, 3 lens diziliminden (pozitif-negatif-pozitif) oluşan, genellikle F/3,5 ve üzeri optik açıklıklarda kullanıma elverişlidir. Tessar objektif mimarisi ise dört lens diziliminden (pozitif-pozitif-negatif-pozitif) oluşmaktadır. Bu yapı, 15°- 20° görüş açısına sahip sistemlerde kullanıma uygun olmasına rağmen, F/2,5 ve altındaki optik açıklıklarda optik aberasyonları düzeltmede yetersiz kalmaktadır [48]. Heliar objektif mimarisi, Tessar objektif yapısının bir varyasyonu olup beş lens diziliminden oluşur. Bu mimari, optik aberasyonları düzeltme konusunda daha etkili omasına rağmen F/2,0 ve altındaki optik açıklıklarda yüksek optik performans sağlayamamaktadır. Double-Gauss objektif, C. F. Gauss tarafından tasarlanmış olup objektif merkezinde diyafram (stop) ve diyaframın her iki yanında simetriğe yakın yerleşimli, iki iç bükey akromatik optik eleman içerir. Şekil 4.1'de

gösterildiği gibi genellikle geniş optik açıklıklı (F/1,4 - F/2) ve görüş açısı en az 20° olan optik tasarımlar için kullanılır [22-25, 49].



Şekil 4.1. Görüş açısı ve F/# arasındaki ilişki ve optik mimarilerin dağılımı [50]

Double-Gauss mimarinin simetrik yapısı, 3. derece optik aberasyonların düzeltilmesini sağlar ve Petzval toplamı sıfıra yakındır. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere lens dizilimi diyaframın (stop) her iki tarafına simetrik olarak dağıtıldığı için geniş görüş açılarında bile distorsiyon ve küresel kusurları yok edebilmektedir. Ayrıca, pozitif ve negatif lenslerin simetrik ve dengeli dağılımı sayesinde boylamsal kromatik aberasyon azaltılabilir. Sonuç olarak, Double-Gauss yapısı sayesinde, geniş açılarda optik aberasyonların düzeltilmesiyle, yüksek kontrastlı görüntüler elde edilebilir.



Şekil 4.2. Double-Gauss objektif lens dizilimi ve diyaframın konumu

ST kapsamında belirlenen 19° görüş açısı ve F/1,2 optik açıklık gereksinimleri dikkate alındığında, bu koşulları sağlayabilen Double-Gauss yapısının, ST objektif tasarımı için yüksek optik performans ve görüntü kalitesi sağlaması nedeniyle en uygun tasarım mimarisi olduğu sonucuna varılmıştır. Işığın sistemden geçmesine izin veren açıklığın sınırlandığı fiziksel elemana optik sistemlerde diyafram (stop) adı verilir. Sistemin görüş açısını, optik aberasyonları ve kaçak-ışın kontrolünü doğrudan etkilediği için optik sistem tasarlanırken diyaframın konumu ve boyutu kritik bir parametre olarak rol oynar.

4.1.1. Optik tasarım sistem gereksinimleri

Yıldız İzler bölümünde sistemin temel optik parametreleri hesaplanarak tasarım sürecine yön verecek gereksinimler belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de, optik tasarımda kullanılacak sistem gereksinimleri listelenmiştir. Belirlenen tasarım gereksinimleri doğrultusunda, ST'in ihtiyaç duyduğu görüş açısını sağlaması, görüş açısı için spot büyüklüğünün (RMS Spot Size) piksel boyutunun içinde kalması ve hedeflenen MTF değerine ulaşması beklenmektedir. ST, Alçak Dünya Yörünge koşullarında görev yapacağı için sistemin radyasyon etkilerine dayanıklı olması gerekliliği de göz önünde bulundurularak optik tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımda, Double-Gauss optik mimari ile optik aberasyonların belirlenen görüş açısı içerisinde düzeltildiği, yüksek görüntü kalitesi ve kompakt bir sistem elde edilmesi hedeflenmiştir.

Çizelge 4.1. Optik tasarım gereksinimleri ve sınır koşulları

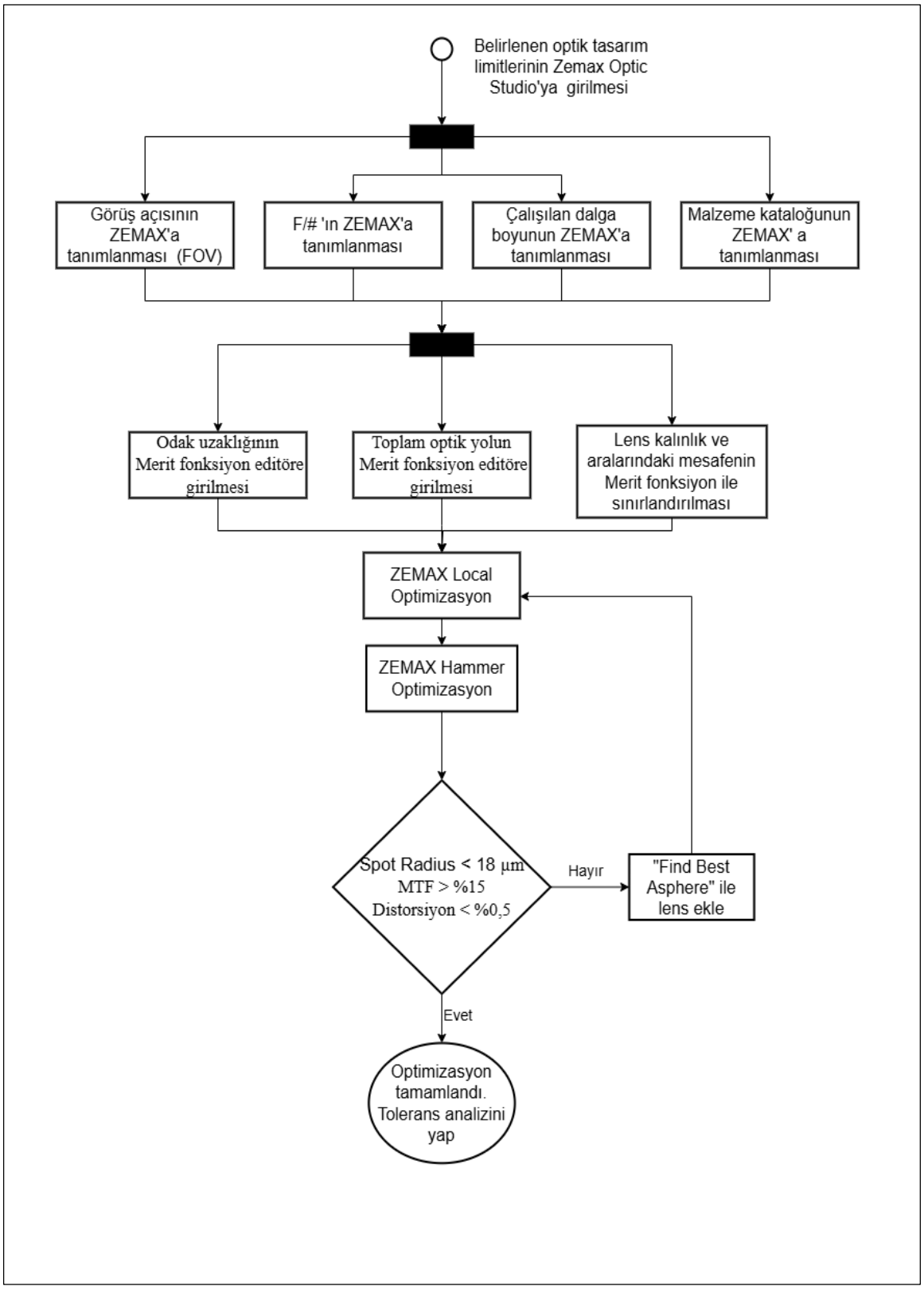
Gereksinim	Değer
Görüş Açısı	19° x 19°
Piksel Boyutu	18 µm x 18 µm
MTF Bütçesi (Optik Tasarım)	≥ %15 @ 28 lp/mm
RMS Spot Çapı	≤ 18 µm
Distorsiyon	≤ %0,5
Optik Yol Uzunluğu	125 mm
Odak Uzaklığı	55 mm
Dalga Boyu	400-800 nm
Optik Açıklık	45 mm
F-sayısı	1,2
Arka Odak Noktası	≥ 10 mm
Çevre Koşulları	Radyasyon dayanımı
Minimum Lens Mesafesi	≥2 mm

4.1.2. Yıldız izler optik tasarım sistematiği

ST için belirlenen optik tasarım gereksinimlerini sağlayacak şekilde, sistem parametreleri doğrultusunda optik tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, optik tasarım sınırları göz önünde bulundurularak 6 lensli konfigürasyon ile tasarıma başlanmış ve diyafram konumu değiştirilerek Double-Gauss mimarisine dönüştürülmüştür. Lens sayısı kademeli olarak artırılarak sistematik bir optimizasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Tasarım süresince, sistemin odak uzaklığı, *F/#* ve görüş açısı sabit tutulmuş; yüzey eğrilik yarıçapları, lens kalınlıkları, lensler arası mesafeler, optik diyafram konumu ve optik malzeme türleri değişken parametreler olarak tanımlanmıştır. Bu parametreler, Zemax OpticStudio Local ve Hammer optimizasyon araçları ile en iyi optik performansı elde edecek şekilde optimize edilmiştir.

F/1,2 ve 632 nm (optik pencerede ortalama dalga boyu olarak alınmıştır) dalga boyunda çalışan bir sistemde, kırınım-limitli Airy halka çapı 1,90 µm olarak hesaplanmıştır**.** Ancak, sistemde kullanılan dedektörün piksel boyutunun 18 µm olması, oluşan nokta görüntüsü bir pikselin çok altında kalmasına sebebiyet verdiği için optik tasarımda kırınım-limitine ulaşma zorunluluğu bulunmamaktadır.

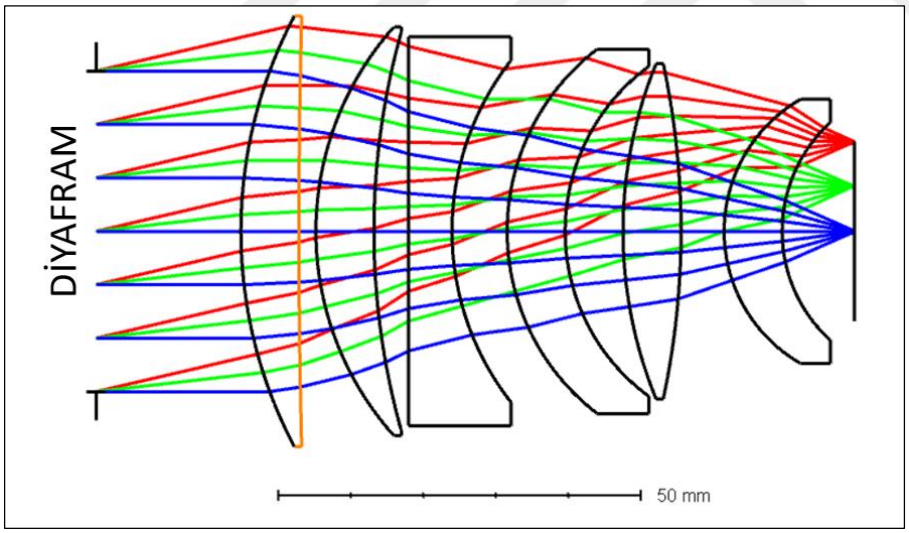
Şekil 4.3'te tasarım sürecine dair tanımlanması ve optimize edilmesi gereken parametreler optik akış diyagramında sunulmuştur.



Şekil 4.3. Optik tasarım akış diyagramı

4.1.3. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen altı lensli tasarım konfigürasyonu

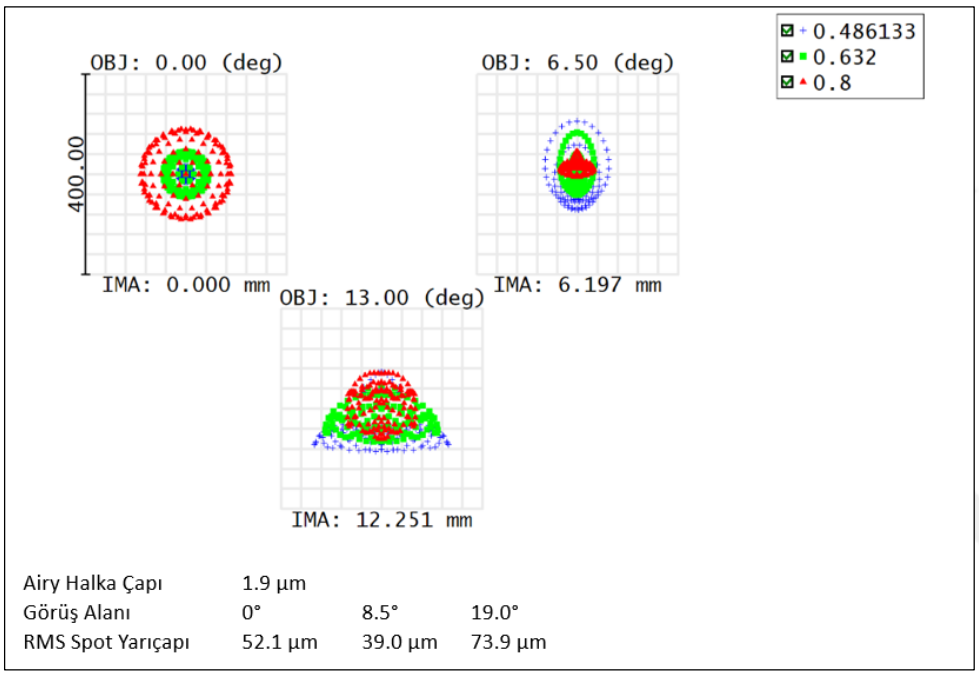
Optik sistem tasarım sürecine, altı elemanlı Double-Gauss mimarisini referans alarak başlanmıştır. Ancak klasik Double-Gauss yapılarında diyafram genellikle iki lens grubu arasında konumlandırılırken, bu tasarımda diyafram açıklığı, sistemin girişine, yani optik eksenin en başına yerleştirilmiştir. Bu yerleşim tercihi, diyafram konumunun optik sistem üzerindeki etkilerini sistematik biçimde inceleyebilmek ve özellikle merkez ile marjinal ışınların davranışlarını analiz edebilmektir. Diyafram konumunun, görüş açısı dağılımı, ışın demetinin yönlenmesi, gölgeleme ve aberasyonların sistem genelindeki dağılımı üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu yerleşimle başlamak, diyafram konumu ile optik performans arasındaki ilişkinin daha net ortaya konulmasını ve sonraki optimizasyon adımlarında daha bilinçli tasarım kararlarının alınmasını mümkün kılmıştır. Şekil 4.4'te tasarım başlangıcı olarak kullanılan 6 lensli tasarım konfigürasyonu yer almaktadır.



Şekil 4.4. Altı lensli (6) tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi

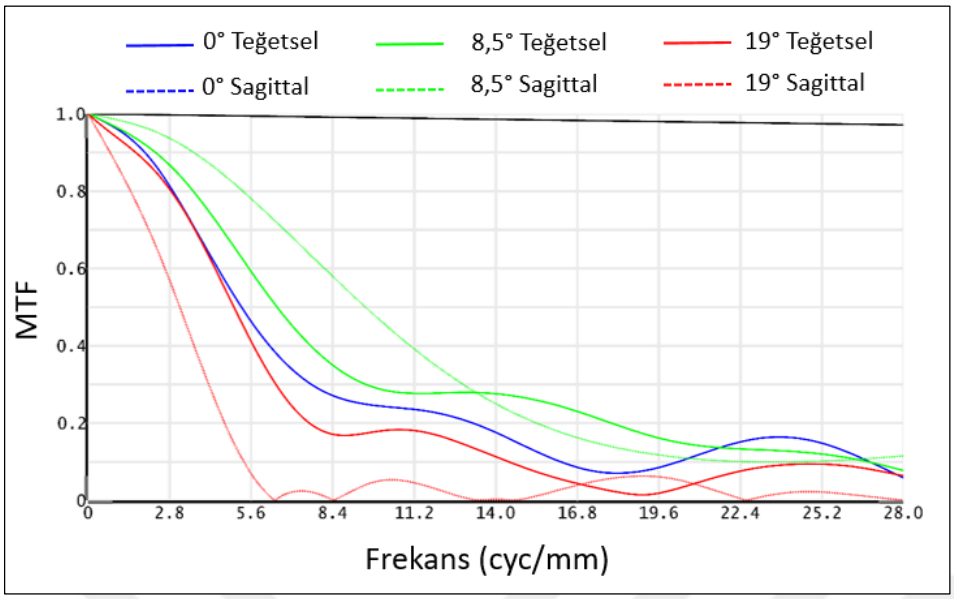
Tasarımı yapılan optik sistemin görüntüleme performansı, RMS (root mean square) spot diyagram analizleri üzerinden değerlendirilmiştir. Spot diyagramları, ideal bir noktasal ışık kaynağının görüntü düzleminde oluşturduğu dağılımı temsil eder ve sistemin odaklama kalitesi hakkında doğrudan bilgi sunar. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi sistemin merkez alan, orta alan ve maksimum alandaki RMS spot yarıçap değerleri sırasıyla 52,1 µm, 39,0 µm ve 73,9 µm olarak elde edilmiştir. Bu değerler, sistemin görüntü düzleminde oluşturduğu ışık

dağılımının büyüklüğünü ve dolayısıyla odaklama üzerindeki etkisini gösterir. Dedektör piksel boyutunun 18 µm olduğu dikkate alındığında, yıldız görüntülerinin birkaç piksel üzerine yayıldığını göstermektedir. Bu durum, alt piksel hassasiyetinde merkez tayini için kabul edilebilir olsa da özellikle kenar bölgelerde görüntü kalitesi, çözünürlük ve kontrast açısından yetersizdir. Bu nedenle sistem performansını artırmak amacıyla optimizasyon çalışmalarına devam edilmesi gerekmektedir.



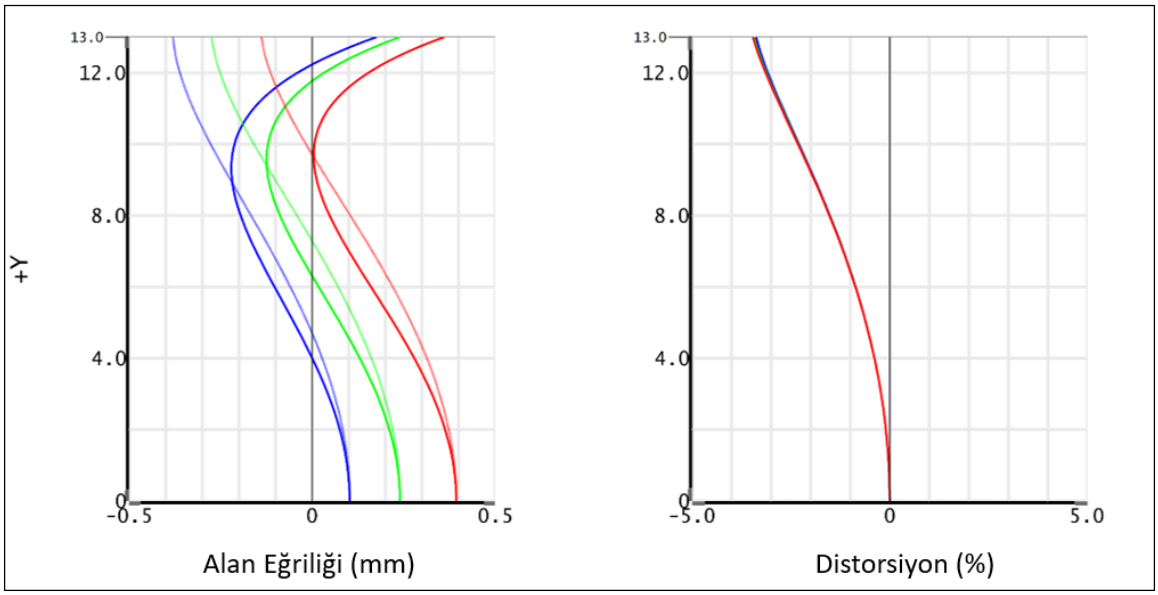
Şekil 4.5. Altı (6) lensli tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio RMS spot diyagramı

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi tüm alanlarda hedeflenen kontrast aktarım düzeyine ulaşılamadığı göz önüne alındığında sistemin MTF performansı henüz yeterli seviyede değildir. Bu durum, optik tasarımda özellikle aberasyon düzeltimi ve görüntü alanı genelinde homojen performans sağlanması açısından optimizasyon sürecinin sürdürülmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 4.6. Altı (6) lensli tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio MTF grafiği

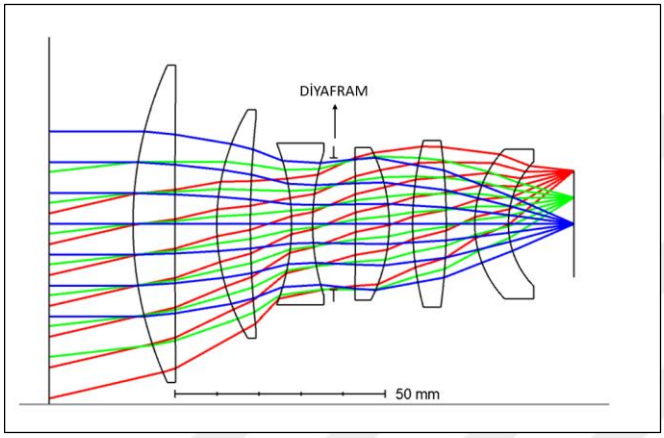
Şekil 4.7 incelendiğinde, teğetsel ve sagittal odak yüzeyleri arasındaki farkın özellikle maksimum alanda arttığı görülmektedir. Bu durum, sistemde astigmatizm ve alan eğriliği optik kusurların varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, %3,43 distorsiyon değeri ST sistemlerinde yeterli kabul edilmemektedir.



Şekil 4.7. Altı lensli (6) tasarım konfigürasyonu ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri

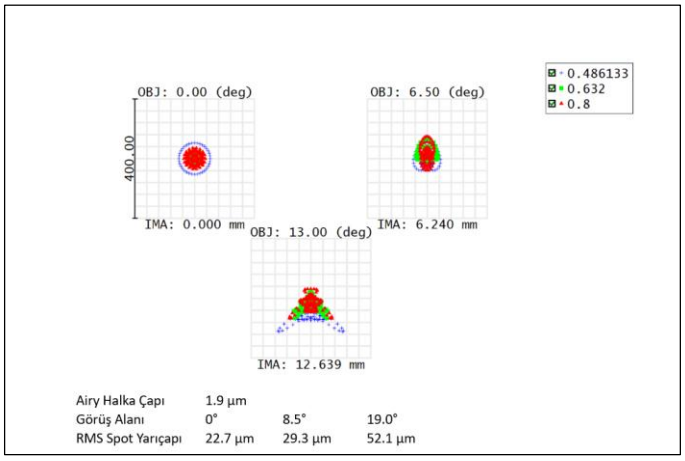
4.1.4. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen Double-Gauss tasarım konfigürasyonu

Bu konfigürasyonda, Şekil 4.8'de görüldüğü gibi diyafram konumu değiştirilerek Double-Gauss mimarisine çevrilmiştir. Ancak, Double-Gauss mimarisinde yaygın olarak uygulanan yapıştırılmış (cemented) lens çiftleri bu tasarımda termal genleşme, vakum koşulları ve yapıştırıcının radyasyon etkisiyle bozunumu sebebiyle kullanılmamıştır. Diyafram yer değişimi, sistemin performansını doğrudan etkileyerek sistem performansını artırmıştır.



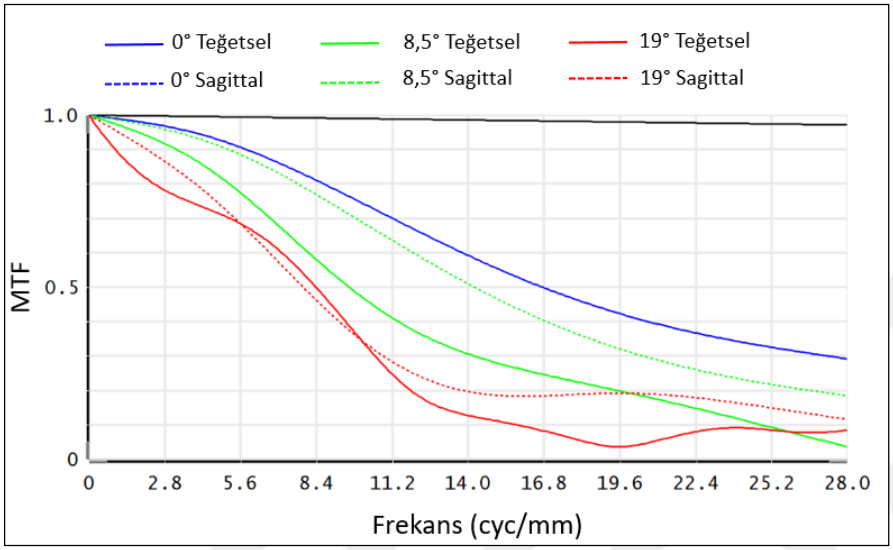
Şekil 4.8. Diyafram konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi RMS spot yarıçapları üç alan değeri için 22,7 µm, 29,3 µm ve 52,1 µm olarak sıralanmaktadır. Tüm alanlarda 18 µm piksel boyutunun üzerinde kalmasına rağmen hedeflenen değere daha yakındır.



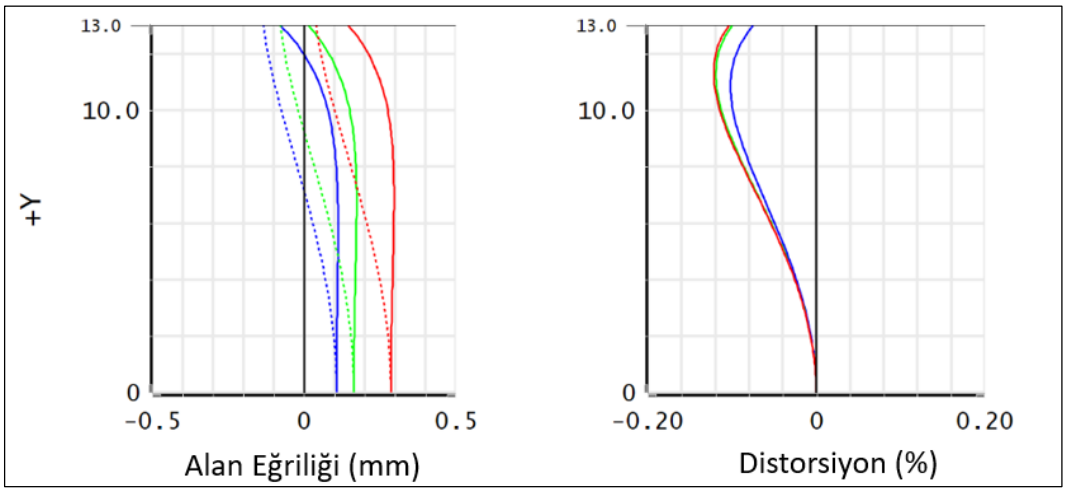
Şekil 4.9. Stop konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio RMS spot diagramı

Şekil 4.10'daki MTF grafiği, sistemin merkezde (0°) yüksek kontrast aktarımı sağladığını, ancak maksimum alana doğru (19,0°) performansın belirgin şekilde düştüğünü göstermektedir. Teğetsel ve sagittal eğriler arasındaki farkın artması, özellikle maksimum alanda astigmatizm etkisinin arttığını göstermekte olup bu alanlara yönelik optimizasyon gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.10. Stop konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio MTF grafiği

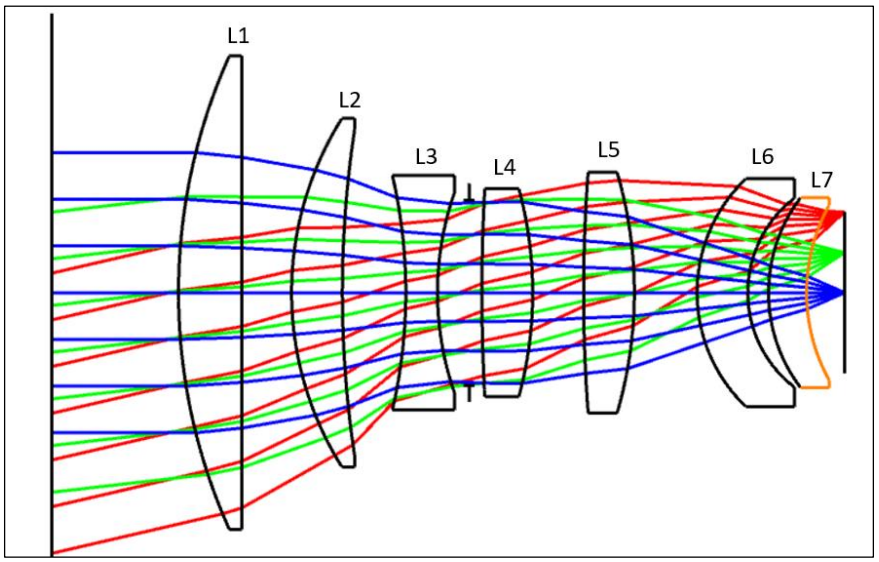
Şekil 4.11'de sunulan grafikler, sistemin alan eğriliği ve distorsiyon karakteristiklerini göstermektedir. Alan eğriliği grafiğinde teğetsel ve sagittal odak yüzeyleri arasındaki fark, özellikle maksimum alanda astigmatizmin varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, her iki eğrinin sıfır ekseninden sapması, alan eğriliğinin de etkili olduğunu göstermektedir. Distorsiyon grafiğinde ise maksimum distorsiyon değeri %0,5'nin altında kalmakta ve dağılım simetrik şekilde gerçekleşmektedir. Bu sonuç, ST sistemleri için kabul edilebilir sınırlar içinde bir geometrik doğruluk sağlandığını ve distorsiyon açısından sistemin yeterli performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.11. Diyafram konumu değiştirilmiş altı lens (6) ile tasarım ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri

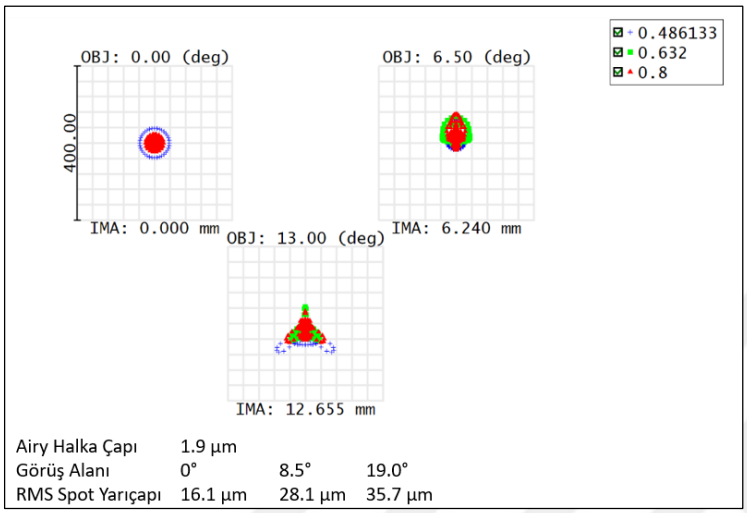
4.1.5. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen yedi lens ile tasarım konfigürasyonu

Bu aşamada altı (6) siferik lens kullanılarak gerçekleştirilen optik tasarım gereksinimleri tam olarak sağlamadığı görülmektedir. Bu nedenle optik tasarıma bir (1) lens daha eklenerek tasarıma devam edilmiştir. Şekil 4.12'de, optimize edilmiş yedi (7) lensli konfigürasyonun 2-boyutlu yerleşim (2D Layout) diyagramı sunulmuştur. Bu yapıda, lens sayısının artırılması ile birlikte, tüm görüş alanlarında önemli bir performans artışı elde edilmiştir.



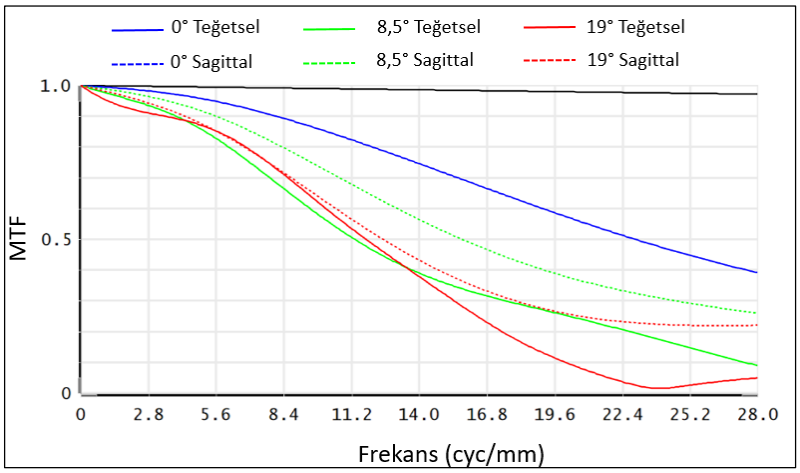
Şekil 4.12. Yedi (7) lens ile optimizasyon ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi

Şekil 4.13'te verilen RMS spot yarıçapları, sistemin merkez ve kenar görüş açılarındaki görüntü kalitesini göstermektedir. Sırasıyla 16,1 µm, 28,1 µm ve 35,7 µm olarak elde edilen RMS spot yarıçapları, önceki konfigürasyonlara kıyasla kayda değer bir iyileşme göstermiştir. Özellikle 0° alanda spot çapının 18 µm piksel boyutuna oldukça yakın olması, sistemin performansının gereksinim değerine ulaştığını göstermektedir.



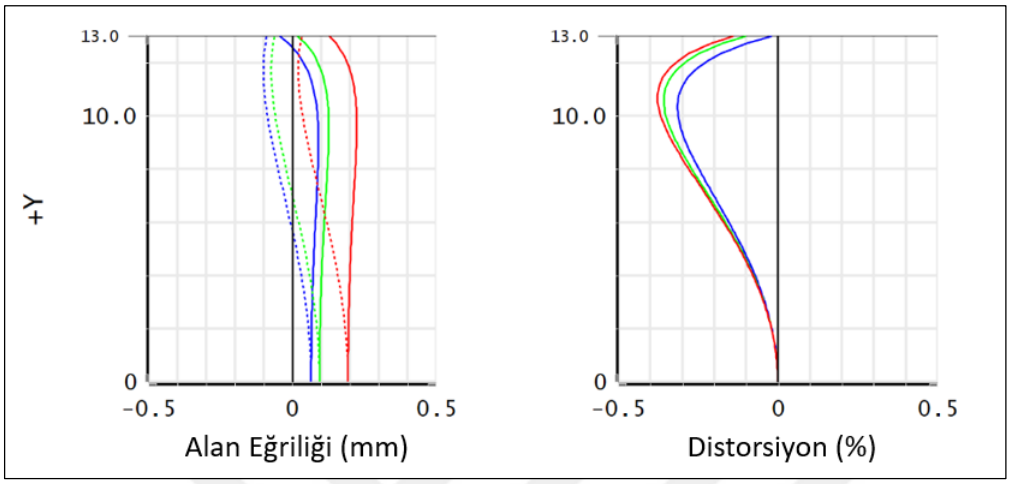
Şekil 4.13. Yedi (7) lens ile optimizasyon ve ZEMAX OpticStudio RMS spot diyagramı

Şekil 4.14'te yer alan MTF grafiği incelendiğinde, optik sistemin tüm alanlarda oldukça yüksek MTF performansı sergilediği görülmektedir. MTF eğrileri, %25 kontrast düzeyine yaklaşmakta ve kırınım-limitine yakın değerlere ulaşmaktadır. Bu durum, optik sistemin hem merkez alan hem de maksimum alanda sistem performansının iyileştiğini göstermektedir.



Şekil 4.14. Yedi (7) lens ile optimizasyon ZEMAX OpticStudio MTF grafiği

Şekil 4.15'te sunulan distorsiyon çıktısına göre, distorsiyon değeri %0,3 seviyesindedir. Bu durum, görüntü düzlemindeki doğrusal sapmaların minimuma indirildiğini ve görüntü geometrisinin başarıyla korunduğunu ortaya koymaktadır.



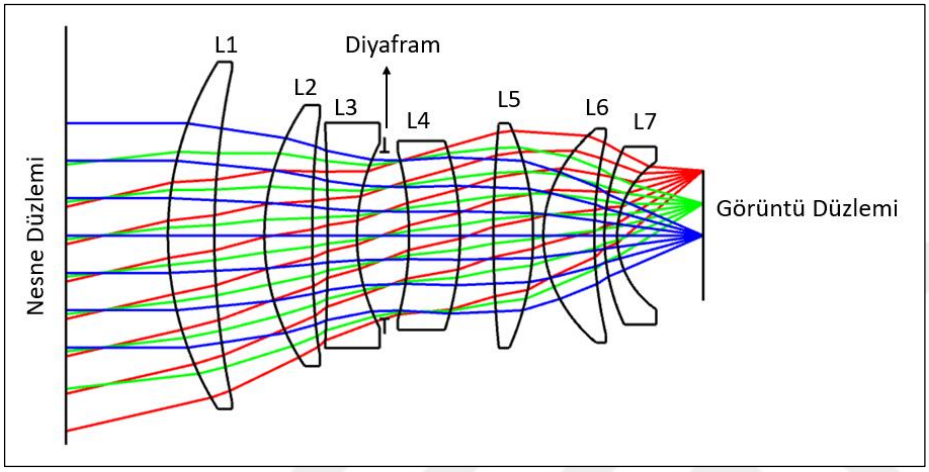
Şekil 4.15. Yedi (7) lens ile optimizasyon ZEMAX-OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri

4.1.6. Radyasyona dayanıklı cam kataloğulu ile optimize edilen yedi lensli nihai optik tasarım konfigürasyonu (asferik ve konik yüzey)

Gelinen aşamada sistemin optik performansı yükselmiş olmakla birlikte yeterli seviyeye ulaşamamıştır. Sistem performansını artırmak amacıyla optik birime yeni lens eklenmesi gerekmektedir. Ancak, ilave lens eklenmesi sistemin toplam optik yol uzunluğunu da beraberinde artırmakta, bu durum ise kompaktlık gereksinimiyle çelişmektedir. Bu tasarım kısıtını dengeleyebilmek amacıyla, sistem performansını artırırken fiziksel uzunluğu kontrol altında tutacak alternatif çözümler değerlendirilmiş ve asferik konik yüzeylerin kullanımı tercih edilmiştir. ZEMAX-OpticStudio "Find Best Asphere" optimizasyon aracı kullanılarak tüm yüzeyler sistematik biçimde taranmış ve genel görüntüleme performansını en fazla iyileştiren yüzeyler belirlenmiştir. Bu sayede, mevcut lens konfigürasyonu korunarak, sistem uzunluğu artırılmadan hedeflenen optik performansa ulaşılması mümkün olmuştur.

SCHOTT AG (Almanya) radyasyona dayanıklı cam kataloğunda [51] yer alan malzemeler kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu camlar, radyasyonun neden olduğu optik bozulmalara karşı dirençli hale getirilmek amacıyla Seryum (Ce) elementi katkılanarak formüle edilmiştir. Seryum katkısı sayesinde camların ışık geçirgenliği radyasyon altında

daha stabil kalmakta, renk merkezleri oluşumu minimize edilmekte ve kırılma indisinde meydana gelebilecek sapmalar sınırlandırılmaktadır. Tasarımda, 2 adet asferik yüzey kullanılmıştır. İlk asferik yüzey, Lens 2'nin arka yüzeyi olup asferik katsayıları sırasıyla a_2= 1,6 x 10^{-6}, a_4= -9,0 x10^{-10}, a_6= 2,0 x 10^{-12}'dır. Diğer asferik yüzey ise Lens 6'nın ön yüzeyidir ve konik katsayısı k=-0,3'tür (EK-1).



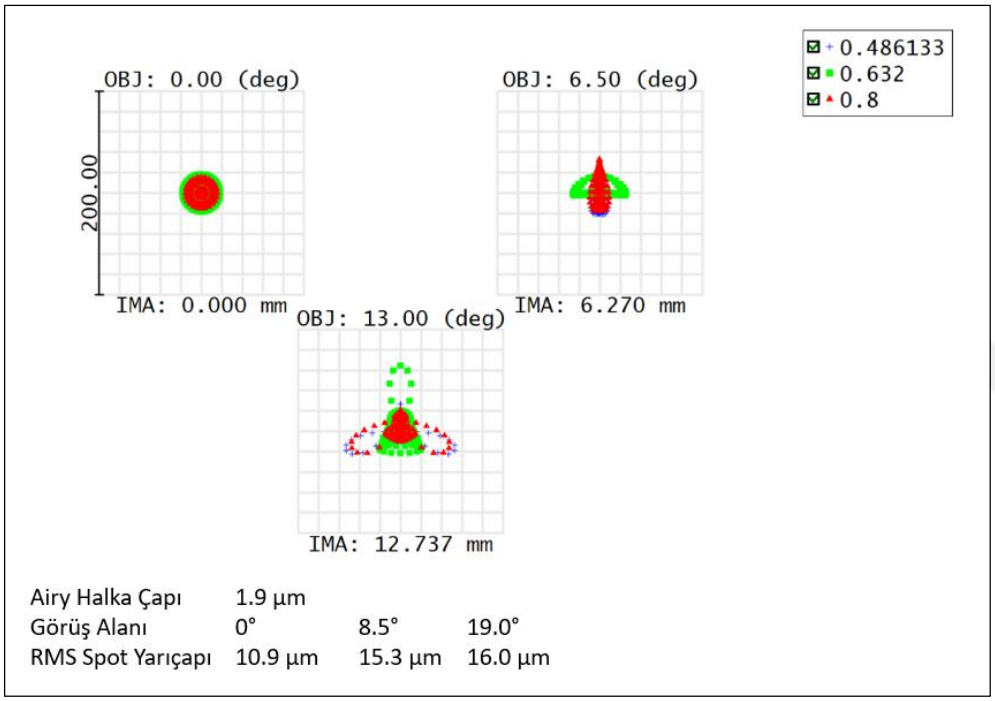
Şekil 4.16. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen asferik ve konik yüzey içeren lens dizilimi ZEMAX OpticStudio 2-boyutlu gösterimi

Çizelge 4.2. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen ST lens dizilimi

	Lens	Eğrilik Yarıçapı	Merkez Kalınlığı (mm)	Malzeme	Lens Çapı (mm)	Asferik Katsayısı
1	LENS 1	64,1	9,1	LAK9G15	68,0	
2		154,2			68,0	
3	LENS 2	45,4	9,4	LAK9G15	50,0	
4		284,3			50,0	a_2= 1,6x10^{-6}, a_4= -9,0x10^{-10}, a_6= 2,0x10^{-12}
5	LENS 3	-433,6	5,7	SF6G05	44,0	
6		38,9			44,0	
7		-				
8	LENS 4	-62,6	10,0	K5G20	33,0	
9		-58,9			33,0	
10	LENS 5	231,3	7,8	LAK9G15	42,0	
11		-54,2			42,0	
12	LENS 6	25,0	10,0	LAK9G15	42,0	k=-0,3
13		83,9			42,0	
14	LENS 7	41,2	2,5	SF6G05	34,0	
15		17,57			34,0	

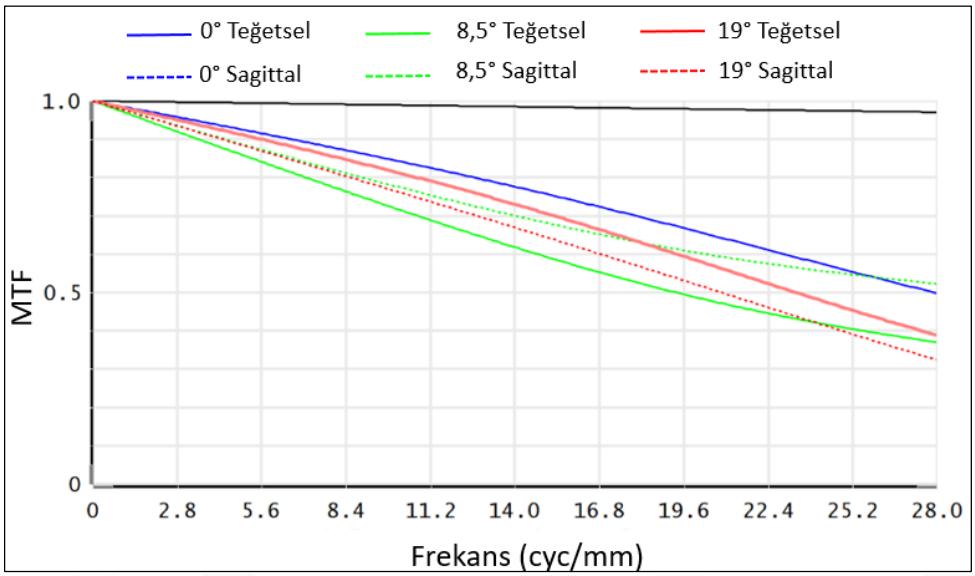
Radyasyona dayanıklı camlar, toplam iyonlaştırıcı doz (TID) açısından değerlendirildiğinde 100 krad seviyesine kadar dayanıklılık göstermekte olup, uzay görevlerinde yaklaşık 10 yıl süreyle optik özelliklerini koruyabilecek yapıya sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, özellikle ST gibi yüksek hassasiyet gerektiren uzay tabanlı optik sistemlerde uzun süreli görev uygunluğu sunmaktadır.

Şekil 4.17'de radyasyona dayanıklı materyal kataloğu ile optimize edilen tasarımın RMS yarıçapları belirlenen alanlar için 10,90 µm, 15,30 µm ve 16,00 µm olarak hesaplanmıştır ve piksel büyüklüğünün içerisine sığmaktadır.



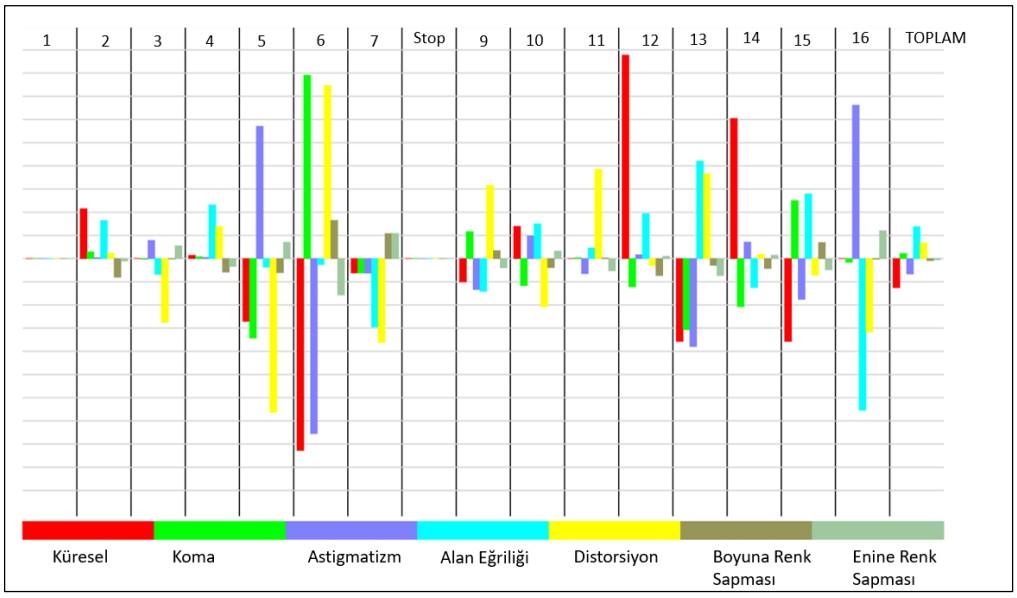
Şekil 4.17. Radyasyona dayanıklı materyaller ile optimize edilen ZEMAX OpticStudio RMS spot diyagramı

Tasarımın MTF çıktısı Şekil 4.18 değerlendirildiğinde, 0° alanda MTF'in %48 seviyesinde olduğu, maksimum alanda (19°) ise bu değerin %32 seviyesinde olduğu gözlemlenmektedir.



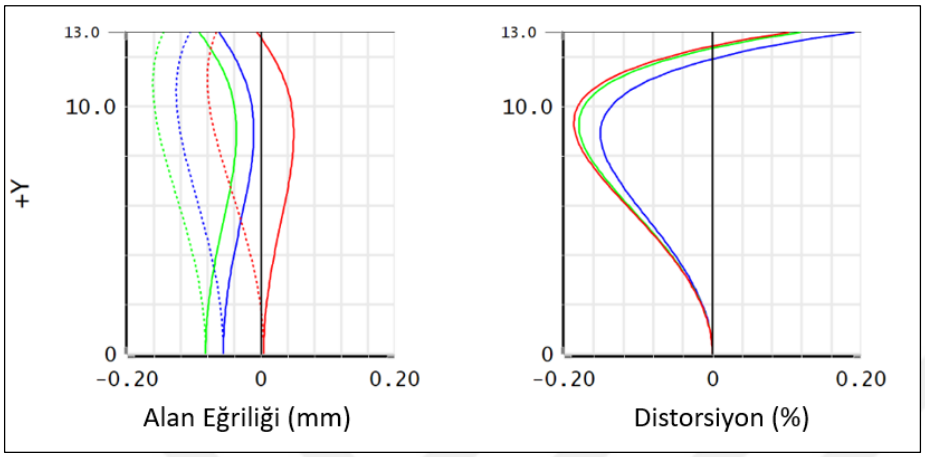
Şekil 4.18. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen ZEMAX OpticStudio MTF grafiği

Şekil 4.19, radyasyona dayanıklı optik cam kataloğu ile optimize edilen optik sistemin Seidel diyagramıdır. Bu diyagram, tasarımdaki her optik yüzeyin neden olduğu en baskın optik aberasyonu göstermektedir. Her yüzeyin ayrı ayrı pozitif veya negatif katkısı ile toplam optik aberasyon büyüklüğünü hesaplanmıştır.



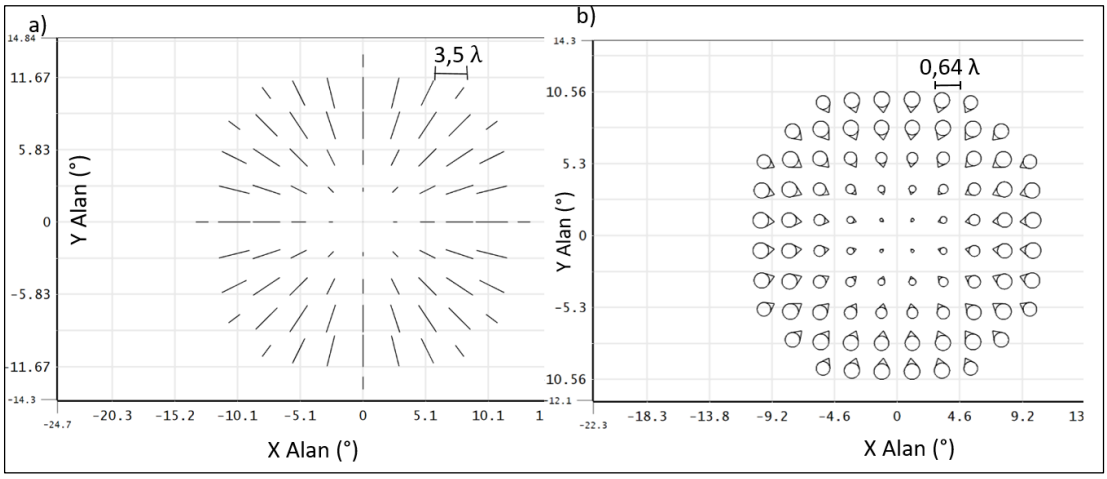
Şekil 4.19. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen Seidel-diyagram grafiği

ST'in yüksek ölçüm hassasiyet ile çalışabilmesi için distorsiyon değerinin %0,5 'in altında olması gerekmektedir. Şekil 4.20 incelendiğinde, maksimum alanda dahi bu sınırın %0,2'nin altında kaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.20. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri

Şekil 4.21'de tüm alan (Full Field Display, FFD) astigmatizma ve koma aberasyonları sunulmuştur. Astigmatizmin yaklaşık 3,5λ mertebesine ulaşarak, görüş alanının kenar noktalarında ciddi düzeyde tasarımın performansını sınırladığı gözlemlenmiştir. Buna karşın, koma aberasyonu 0,64λ seviyesinde olup sistemin merkezi eksenine yakın bölgelerde sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar, sistemin performansının özellikle astigmatizma açısından limitli olduğunu ve daha yüksek gereksinimler için daha ileri düzeyde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



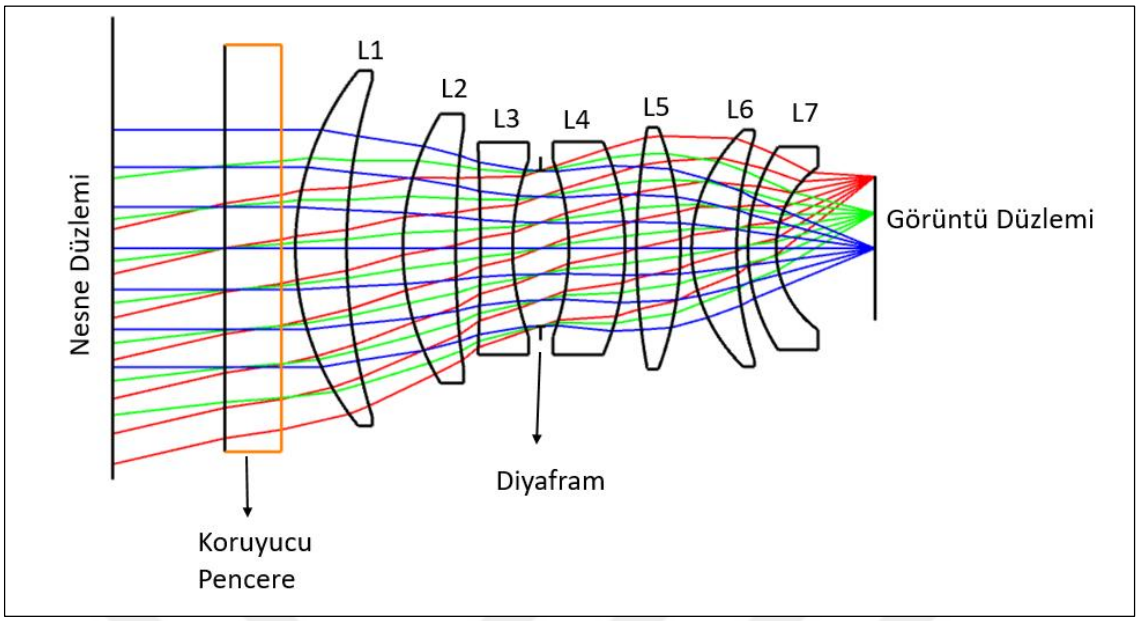
Şekil 4.21. Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen tasarım a) tüm alan astigmatizm gösterimi, b) tüm alan koma aberasyon gösterimi

Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimize edilen 7 mercekli nihai optik tasarımda RMS spot yarıçapı 0°, 8,5° ve 19° alan noktaları için sırasıyla 10,9 µm, 15,3 µm ve 16,0 µm olarak hesaplanmış ve tüm değerler piksel boyutu içinde kalmıştır. MTF değeri 0°'de %48, 19°'de %32 seviyesindedir. Distorsiyon tüm alanlarda %0,2'nin altında kalmıtır.Bu sonuçlar, kompakt tasarım kısıtı korunarak sistem performansının önemli ölçüde iyileştirildiğini, optik performans hedefinin başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir.

4.1.7. Radrasyona dayanıklı koruyucu pencere ve standart cam kataloğu ile optik tasarım

Optik tasarımda tüm optik bileşenlerin radyasyon dayanımlı camlardan oluşturulduğu tasarımın yanında, alternatif bir tasarım çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda radyasyon dayanımı, boş uzaya bakan optik bileşenin radyasyon dayanımlı seçilerek sağlanmış ve diğer optik bileşenlerin camları standart optik camlardan oluşmuştur. Tüm lens dizini metal (titanyum, invar vb) bir opto-mekanik yapı içerisine yerleştirileceği için bir radyasyon zırhı görevi görecektir. Bu yaklaşım yeni-uzay uygulamalarında karşılaşılan bir çözümdür. Standard cam kataloğu, radyasyon dayanımlı cam kataloğuna göre çok daha geniş bir spektrumda seçenek sunduğu için optik tasarımın aynı mimari için daha iyi bir performans sunması öngörülmüştür.

Yeni optik tasarım, Şekil 4.22'de görüldüğü gibi optimize edilmiştir. Tasarımda görüldüğü gibi ilk optik bileşen radyasyon dayanımlı cam bir malzeme seçilerek iki yüzeyi de düz olacak bir pencere şeklinde uygulanmıştır. İlgili pencere, optik sistemin ön yüzeyinde yer alarak, radyasyonla doğrudan temas eden ilk yüzey olarak görev yapmakta ve ardıl optik bileşenlerin (standart camlardan oluşan lenslerin) radyasyon kaynaklı bozulmalardan korunmasını sağlamaktadır. Diğer optik bileşenler, standart cam kataloğu kullanılarak optimize edilmiştir



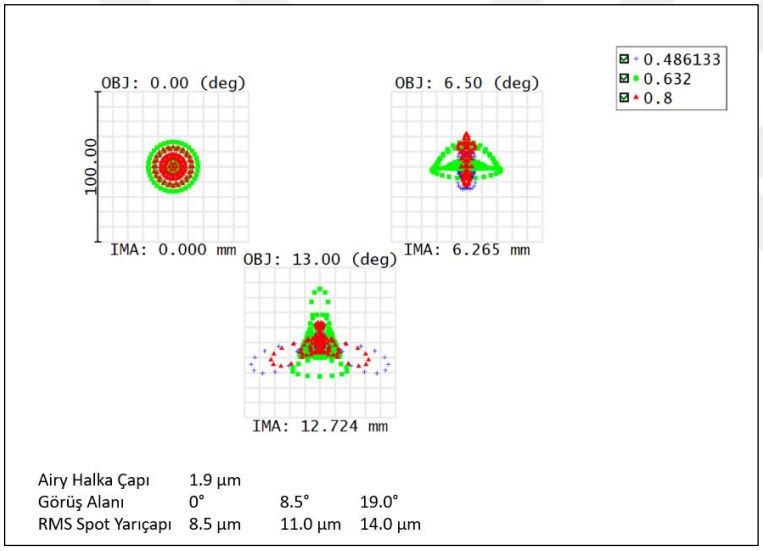
Şekil 4.22. Radyasyona dayanıklı koruyucu pencere ve standart cam kataloğu ile optik tasarım lens dizilimi

Çizelge 4.3. Standart cam kataloğu ile optimize edilen ST lens dizilimi ve optik tasarım optimizasyon sonuçları

		Eğrilik Yarıçapı	Lens Merkez Kalınlığı (mm)	Malzeme	Lens Çapı (mm)	Asferik katsayısı
1	PENCERE	Düz Yüzeyler	10,0	BK7G18	74,0	
2					74,0	
3	LENS 1	49,7	9,1	N-PSK53A	68,0	
4		99,7			68,0	
5	LENS 2	45,9	9,4	N-SK4	50,0	
6		230,6			50,0	
7	LENS 3	-382,9	5,7	N-SF6	44,0	a_2= 2,0x10^{-6}, a_4=-8,0 x10^{-10}, a_6=2,0 x10^{-12}
8		44,0			44,0	
9	DİYAFRAM	-	-	-	-	-
10	LENS 4	-44,6	10,0	N-LAK7	33,0	
11		-47,3			33,0	
12	LENS 5	119,5	7,8	N-PSK57	42,0	
13		-60,3			42,0	
14	LENS 6	27,4	8,0	N-LAK33A	42,0	
15		63,7			42,0	k=-0,26
16	LENS 7	32,8	5,0	N-SF57HT	34,0	
17		17,7			34,0	

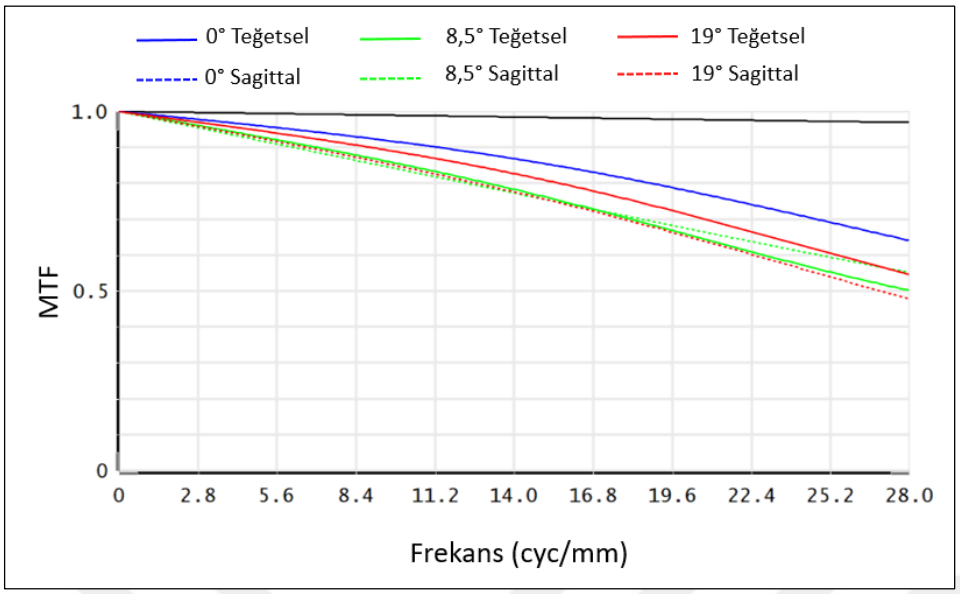
Çizelge 4.3'te gösterildiği gibi tasarımda kullanılan pencere malzemesi olarak radyasyon dayanımlı BK7G18 Schott AG kataloğundan [52] belirlenmiştir. Bu tasarımda yer alan diğer tüm lensler ise N-PSK53A, N-SK4, N-SF6, N-LAK7, N-PSK57, N-LAK33A ve N-SF57H standart cam kataloğundan [53] seçilmiştir. Standart cam kataloğunun geniş spektral geçirgenlik aralıkları, farklı kırıcılık indislerine sahip cam çeşitliliği ve uygun dispersiyon değerleri sayesinde, sistemin optik performansı optimize edilmiş ve yüksek görüntü kalitesine ulaşılmıştır (EK-2).

Şekil 4.23'te gösterildiği gibi standart cam kataloğuna göre optimize edilen tasarımda, RMS spot yarıçapı tüm görüş alanları için 8,5 µm, 11,0 µm ve 14,0 µm olarak hesaplanmıştır.



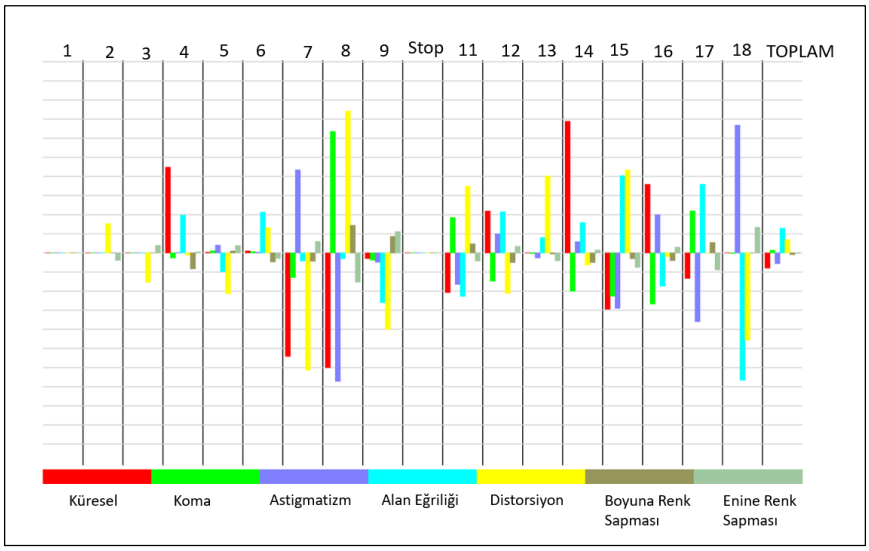
Şekil 4.23. Standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın RMS spot diyagramı

Şekil 4.24'te tasarımın MTF grafiği değerlendirildiğinde, 28 lp/mm uzaysal frekansta 0° alanda %65 performans görülmektedir. Maksimum alanda ise performansın %47 seviyesinde olduğu gözlemlenmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarım, kırınım-limitine daha yakın bir performans sağlamaktadır.



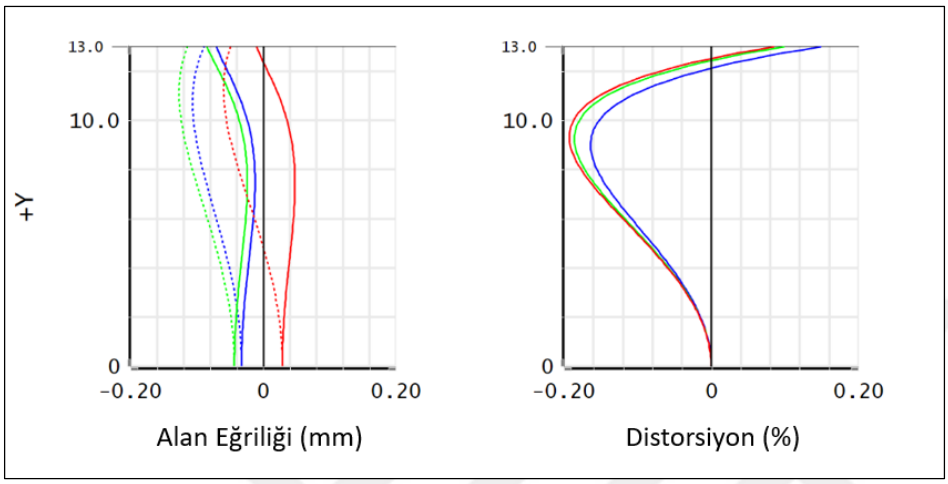
Şekil 4.24. Standart cam katalogu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio MTF grafiği

Şekil 4.25'te gösterildiği gibi astigmatizm özellikle 6–8 numaralı yüzeylerde yüksek seviyede olup sistemde baskın aberasyon bileşenidir. Koma, küresel aberasyon ve renk sapmaları dengeli bir dağılım göstermekte, distorsiyon ise tüm yüzeylerde düşük seviyede kalmaktadır. Toplam değer incelendiğinde, astigmatizmin baskınlığına rağmen diğer aberasyonların kontrol altında tutulmasıyla sistem performansının hedefleri karşıladığı görülmektedir.



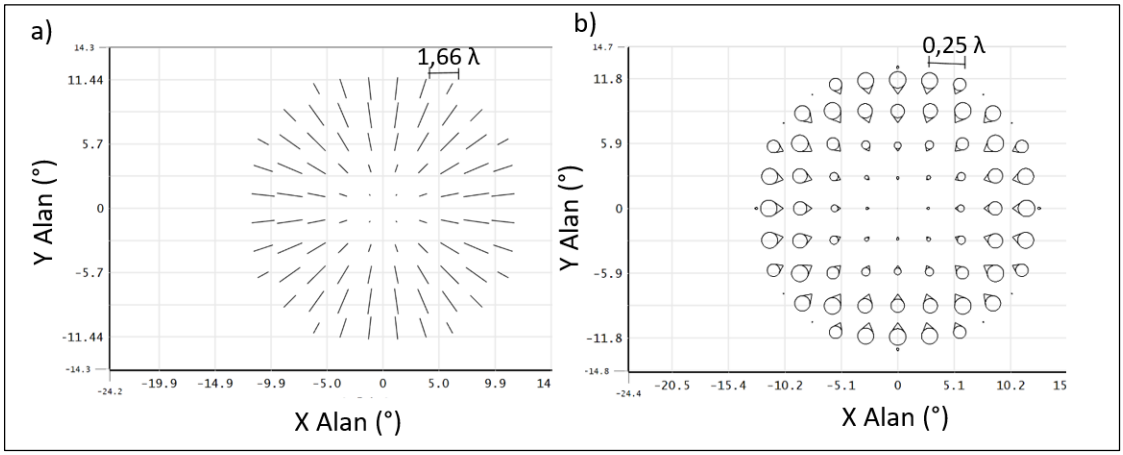
Şekil 4.25. Standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio Seidel diyagramı

Şekil 4.26'da sunulan distorsiyon grafiği incelendiğinde, maksimum görüş alanında distorsiyon oranının %0,2'nin altında kaldığı görülmektedir. Alan eğriliği grafiğinde ise teğetsel ve sagittal yüzeyler arasında odak kaymasının ±0,20 mm sınırları içinde kalarak odak düzleminin ideal görüntü düzlemine yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.26. Standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio alan eğriliği ve distorsiyon grafikleri

Şekil 4.27'de, tüm alan (FFD) astigmatizm ve koma aberasyonlarına ait gösterim verilmiştir. Astigmatizm en yüksek 1,66 λ, koma ise 0,25 λ mertebesindedir. Bu değerler, özellikle geniş görüş alanlarında görülen alan dışı sapmaların kontrol altında tutulduğunu ve sistemin optik performans açısından bir önceki tasarıma göre daha iyi düzeyde optimize edildiğini göstermektedir.



Şekil 4.27. Radyasyona dayanıklı pencere ve standart cam kataloğu ile optimize edilen tasarımın ZEMAX OpticStudio a) tüm alan astigmatizm gösterimi, b) tüm alan koma aberasyon gösterimi

Çizelge 4.4'te, radyasyona dayanıklı cam kataloğu (Tasarım I) ile standart cam kataloğu (Tasarım II) kullanılarak elde edilen RMS spot yarıçapı ve MTF değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarım II, tüm alanlarda Tasarım I'e kıyasla daha küçük spot yarıçapı ve daha yüksek MTF değerleri sağlamaktadır. Özellikle merkezde (0°) spot yarıçapı 10,9 µm'den 8,5 µm'ye, MTF ise %48'den %65'e yükselmiştir. Maksimum alanda (19°) da iyileşme görülmekte, spot yarıçapı 16,0 µm'den 14,0 µm'ye düşerken MTF %32'den %47'ye yükselmektedir; bu da Tasarım II'nin genel optik performansta belirgin avantaj ve iyileşme sunduğunu göstermektedir. Ek olarak, standard cam kataloğunun sunduğu camlar, radyasyon dayanımlı camlara göre x3-10 oranında daha ucuzdur ve maliyet etkin bir çözüm oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4. Radyasyana dayanıklı cam kataloğu (Tasarım I) ve standart cam kataloğu (Tasarım II) ile tasarım çıktılarının tüm alanlar için karşılaştırılması

	Alan	RMS Spot Yarıçapı	MTF
TASARIM I	1. Alan (0°)	10,9 µm	%48
	2. Alan (8,5°)	15,3 µm	%38
	3. Alan (19°)	16,0 µm	%32
TASARIM II	1. Alan (0°)	8,5 µm	%65
	2. Alan (8,5°)	11,0 µm	%50
	3. Alan (19°)	14,0 µm	%47

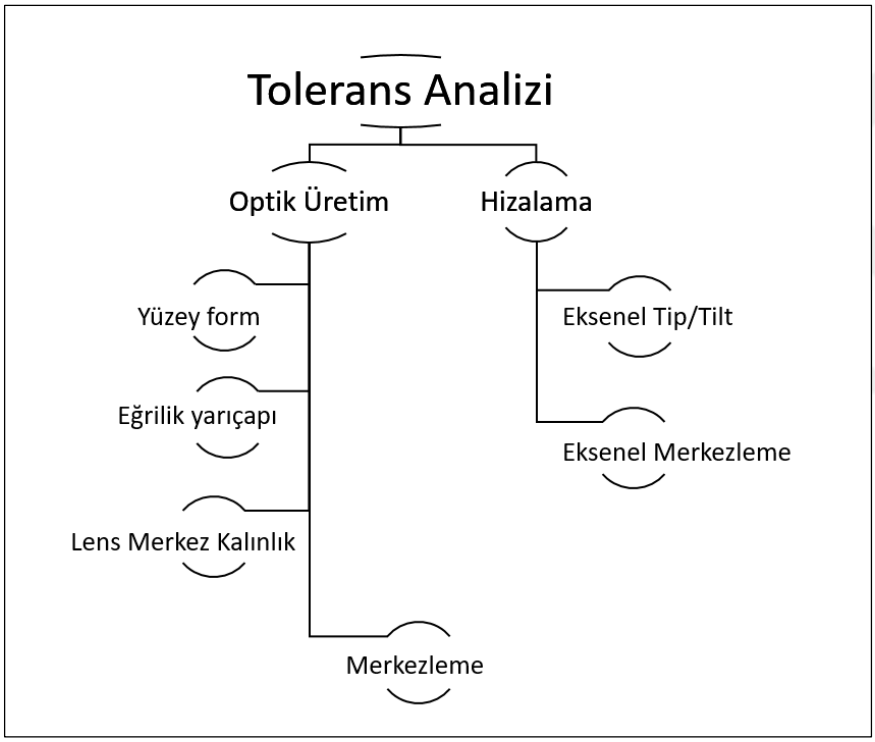
4.2. Yıldız İzler Tolerans Analizi

Tolerans analizi, optik tasarım şekillendiren önemli tasarım süreçlerinden birisidir. Üretim aşamasına geçmeden önce tasarımın üretim sonrası, gerçek dünya ile uyumluluğunu öngörebilmek için yapılan bu adımda, optik tasarımın performansının kabul edilebilir olup olmadığı kontrol edilir. Buradan elde edilen geri-bildirimler tasarıma girdi olarak verilir ve tasarım buna göre güncellenir.

Bu bölümde, optik sistemin verilen toleranslara olan duyarlılığını anlamak için ilk olarak hassasiyet analizi yapılmıştır. Şekil 4.28'de sunulan optik üretim ve hizalama olmak üzere iki ana etmenin oluşturduğu parametreler üzerinden tolerans analizi gerçekleştirilmektedir. Optik üretimden gelen eğrilik yapıçapı, yüzey form hatası, merkezleme hatası (merkezleme hatası optik üretimden gelen fakat optik hizalamaya etki eden bir parametredir) ve lens kalınlığı ile optik hizalamadan gelen ve eksenel tip/tilt parametrelerinin her biri, belirlenen

sınırlar dahilinde ZEMAX tolerans data editörde tanımlanmıştır. Optik bileşenler arasında toleranslara karşı en hassas ve en duyarsız olan lens ve parametreler belirlenmiştir.

Ayrıca, Monte Carlo yöntemi ile değişkenlerin olasılık dağılımlarından rastgele örneklemler üretilip, bunların kombine olasılıklarını belirleyerek çoklu iterasyonlar yapılmıştır. Monte Carlo analizi, optik sistemler için üretim ve montaj hatalarının performans üzerindeki etkilerini anlamak için kullanılan bir simülasyon yöntemidir. Bu analiz yöntemi, çeşitli hata kaynaklarını belirleyip her bir hata için rastgele sapmalar oluşturarak çok sayıda simülasyon çalıştırır ve sonuç olarak istatistiksel bir olasılık dağılımı verir [53].



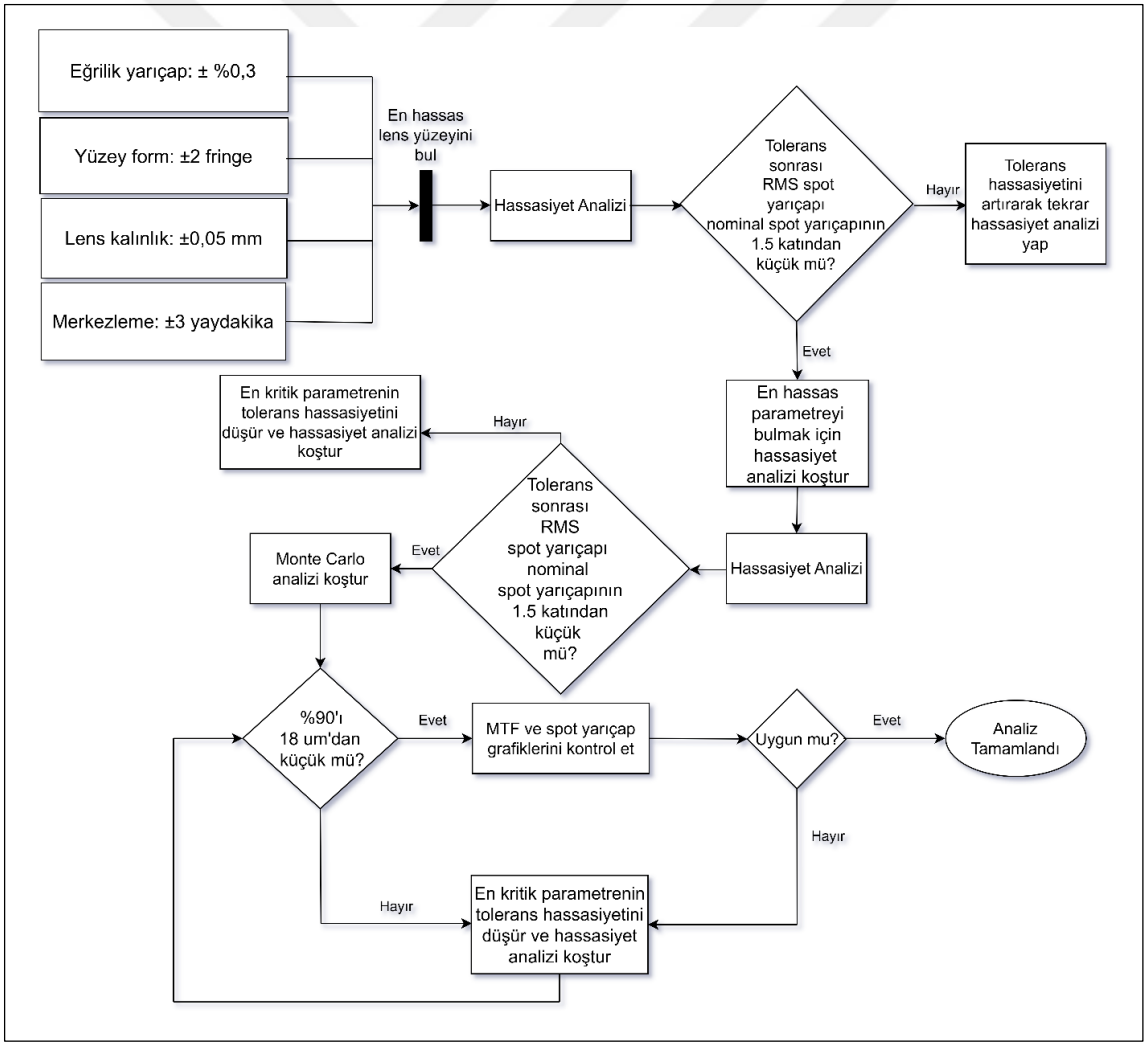
Şekil 4.28. Tolerans analiz parametreleri

Çizelge 4.5, lenslerin endüstriyel üretiminde karşılaşılan tolerans seviyelerini üç farklı üretim kalitesine göre (standart, hassas ve çok hassas) sınıflandırmaktadır. Her bir üretim düzeyi, lensin geometrik ve optik özelliklerinde ne kadar hassasiyetle üretildiğini gösterir. Standart üretimden, çok hassas üretime geçişte maliyet ise önemli bir artış göstermektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen optik tasarımın “standard üretim” ile üretilebilmesi önemli bir faktördür. Tolerans analizi, standard üretim referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.5. Endüstriyel lens üretim toleransları; standart, hassas ve çok hassas

	Standart Üretim	Hassas Üretim	Çok Hassas Üretim
Çap toleransı	0/± 0,1 mm	0/± 0,025 mm	0/± 0,01 mm
Kalınlık toleransı	± 0,05 mm	± 0,03 mm	± 0,01 mm
Kullanılır optik açıklık	%80	%90	>%90
Eğrilik yarıçapı	± %0,3	± %0,1	≤ %0,05
Yüzey formu	2λ (P-V)	λ/4 (P-V)	λ/20 (P-V)
Merkezleme	3 yaydakika	1 yaydakika	0,5 yaydakika
Yüzey kalitesi	80-50	40-20	10-5

4.2.1. Optik parametrelerin tolerans analizi



Şekil 4.29. Optik parametrelerin tolerans analizi akış diagramı

Şekil 4.29'da tolerans analizi süreci, akış şeması üzerinde adım adım gösterilmektedir. Analiz, sistemde yer alan dört ana optik parametre için standart üretim toleranslarının tanımlanmasıyla başlatılmıştır. Hassasiyet analizi, RMS spot yarıçapının, nominal değer olan 9,9 µm'un 1,5 katı (15 µm) altında kalma durumu değerlendirilerek tamamlanmıştır. Bu eşik değer, kullanılan sensörün 18 µm piksel boyutunun altında kalarak görüntü kalitesini koruyacak şekilde belirlenmiştir. Tüm parametrelerde tolerans birikiminin önüne geçilebilmesi için RMS spot yarıçapı değerinin 15 µm'nin altında olması koşulu esas alınmıştır. Hassas yüzeylerin belirlenmesini takiben, hedeflenen performans eşiğine ulaşıldığında Monte Carlo analizi uygulanarak istatistiksel dağılım değerlendirilmiştir.

Eğrilik yarıçapı hassasiyet tolerans analizi

Bir lens yüzeyinin eğrilik yarıçapı (radius of curvature), üretim sürecinde meydana gelebilecek sapmalar nedeniyle nominal değerinden farklılık gösterebilir. Bu çalışmada, tüm yüzeylere ±%0,3 standart eğrilik yarıçapı üretim toleransı atanarak hassasiyet tolerans analizi gerçekleştirilmiş ve sistem performansı üzerinde en fazla etkiye sahip olan yüzeyler belirlenmiştir. Ayar mekanizması (kompensatör) olarak arka odak noktası için ±1 mm'lik bir tolerans aralığı tanımlanmıştır.

Çizelge 4.6. Eğrilik yarıçapı tolerans analiz verileri

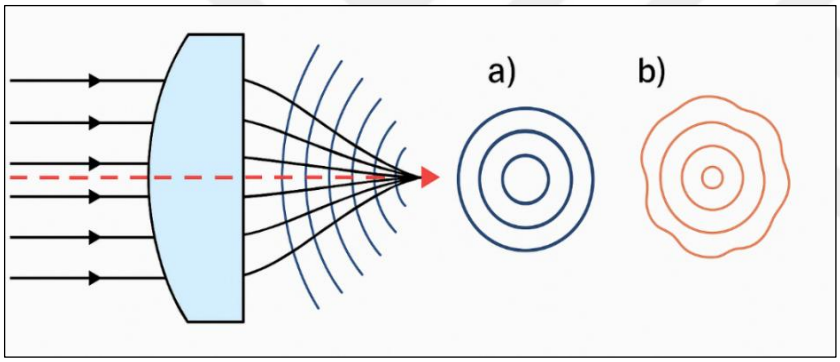
Tolerans hassasiyeti (tüm yüzeyler için)	±%0,3
Tasarım nominal RMS spot yarıçapı	9,9 µm
Tolerans sonrası RMS spot yarıçapı	10,8 µm
Tespit edilen hassas yüzeyler	Yüzey 15 ve Yüzey 12

Çizelge 4.6'da sunulduğu gibi, Yüzey 15 ve Yüzey 12, eğrilik yarıçapı toleransı açısından en hassas iki yüzey olarak tespit edilmiştir. Nominal tasarımda elde edilen RMS spot yarıçapı 9,9 µm olup, ±%0,3 tolerans değerleri altında yapılan analiz sonucunda bu değerin 10,8 µm'ye yükselmesi öngörülmektedir. Bu durum, sistemin eğrilik yarıçapı toleranslarına karşı duyarlılığının düşük olduğunu ve bu parametrenin standart üretim toleranslarıyla üretilebilecek maliyet-etkin bir bileşen olduğunu göstermektedir.Tasarım performansının hassas üretim toleransları altında ne ölçüde iyileşebileceğini değerlendirmek amacıyla, ±%0,1 tolerans aralığı ile hassasiyet analizi tekrarlanmıştır. Bu analizde nominal RMS spot

yarıçapı değeri 9,9 µm iken, tolerans etkisiyle elde edilen tahmini RMS spot yarıçapı değeri 10,0 µm olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, sistemin eğrilik yarıçapı açısından hassas toleranslara ihtiyaç duymadığını ve bu toleranslarda üretim yapılmasının yalnızca üretim maliyetlerini artıracağı, ancak optik performansa anlamlı bir katkı sağlamayacağını ortaya koymaktadır.

Yüzey form hassasiyet tolerans analizi

Yüzey form doğruluğu spesifikasyonudur ve yüzey şeklinin tasarlanan ideal formdan ne kadar saptığını açıklar. Şekil 4.30'da gösterildiği gibi yüzey form hatası, optik sistem tarafından üretilen dalga cephesi ile ilişkilidir. Herhangi bir yüzey düzensizliği, dalga cephesinde bir değişime neden olur ve optik performansı düşürür.



Şekil 4.30. a) İdeal yüzey, b) ideal formdan sapmış, bozulmuş yüzey

Bu çalışmada, tüm yüzeylere ±2 fringe (peak-to-valley, P-V) tolerans değeri tanımlanarak hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. 1 fringe, λ=632,8 nm He-Ne lazer ışığı dalga boyu (yüzey form ölçümlerinde kullanılan dalga boyu) için λ/2 kadardır.

Çizelge 4.7. Yüzey form tolerans analiz verileri

Tolerans hassasiyeti (tüm yüzeyler için)	±2 fringe
Tasarım nominal RMS spot yarıçapı	9,9 µm
Tolerans sonrası RMS spot yarıçapı	10,0 µm
Tespit edilen hassas yüzeyler	Yüzey 5 ve Yüzey 6

Çizelge 4.7'de sunulduğu gibi Yüzey 5 ve Yüzey 6, yüzey form toleransına karşı en yüksek hassasiyeti gösteren iki yüzey olarak belirlenmiştir. Nominal tasarımda elde edilen RMS spot yarıçapı 9,9 µm iken, ±2 fringe tolerans altında yapılan analiz sonucunda bu değer 10,0 µm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, tasarımın yüzey form toleransı açısından yüksek hassasiyet gerektirmediğini ve bu nedenle standart üretim toleransları ile üretimin maliyet açısından daha verimli olacağını göstermektedir.

Lens kalınlık hassasiyet tolerans analizi

Merkez lens kalınlığı, lens elemanlarının üretiminde meydana gelebilecek kalınlık sapmalarını ifade eder ve bu parametre için belirli tolerans aralıkları tanımlanması gereklidir. Bu çalışmada, tüm yüzeylere ±50 µm merkez kalınlık toleransı atanarak hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.8 Lens merkez kalınlığı tolerans analiz verileri

Tolerans hassasiyeti (tüm yüzeyler için)	±50 µm
Tasarım nominal RMS spot yarıçapı	9,9 µm
Tolerans sonrası RMS spot yarıçapı	10,4 µm
Tespit edilen hassas yüzeyler	Yüzey 11 ve Yüzey 13

Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi Yüzey 11 ve Yüzey 13, merkez kalınlık toleransı açısından en hassas iki yüzey olarak tespit edilmiştir. Nominal tasarımda elde edilen RMS spot yarıçapı 9,9 µm iken, tolerans etkileri altında bu değerin 10,4 µm'ye yükselmesi beklenmektedir. Elde edilen sonuçlar, sistemin merkez kalınlık toleransına karşı yüksek duyarlılık göstermediğini ve bu nedenle standart üretim toleranslarıyla üretimin, maliyet-etkin bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

Merkezleme hassasiyet tolerans analizi

Merceğin merkezi ile kenar bölgeleri arasında üretim sürecinde meydana gelebilecek eksenel sapmalara ilişkin olarak tanımlanan tolerans değeri, merkezleme toleransı olarak adlandırılır. Bu çalışmada, tüm yüzeylere ±3 yaydakika merkezleme toleransı tanımlanarak hassasiyet tolerans analiz iterasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.9 Merkezleme tolerans analiz verileri

Tolerans hassasiyeti (tüm yüzeyler için)	±3 yaydakika
Tasarım nominal RMS spot yarıçapı	9,9 µm
Analizs sonrası RMS spot yarıçapı	12 µm
Tespit edilen hassas yüzeyler	Yüzey 12 ve Yüzey 14

Çizelge 4.9 sunulduğu üzere merkezleme tolerans analiz sonuçlarına göre, Yüzey 12 ve Yüzey 14, merkezleme toleransı açısından en yüksek duyarlılığı gösteren iki yüzey olarak belirlenmiştir. Nominal tasarımda elde edilen RMS spot yarıçapı 9,9 µm olup tolerans etkileri altında bu değerin 12,0 µm olduğu analiz sonuçlarında görülmüştür. Tüm tolerans parametreleri karşılaştırıldığında, merkezleme toleransının sistem performansı üzerinde en belirgin negatif etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Tasarımın hassas üretim toleransları altında nominal performansa ne ölçüde yaklaşabileceğini değerlendirmek amacıyla, ±20 µm merkezleme toleransı ile hassasiyet analizi tekrarlanmıştır. Bu analiz sonucunda nominal RMS spot yarıçapı değeri 9,9 µm olup, tolerans etkisi sonrası elde edilen RMS spot yarıçapı 10,0 µm olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, tasarımın merkezleme toleransı açısından diğer parametrelere kıyasla daha hassas olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, üretim sürecinde merkezleme toleransına yönelik hassasiyetin artırılması, sistem performansını iyileştirmek açısından faydalı olacaktır. Her ne kadar 12,0 µm'lik RMS spot yarıçapı, 18 µm'lik piksel boyutunun altında kalması nedeniyle kabul edilebilir bir değer olarak değerlendirilse de nihai karara varılmadan önce tüm tolerans parametreleri birlikte analiz edilmeli, aralarındaki etkileşimler ve toplam RMS spot yarıçapına olan katkıları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmelidir.

Monte Carlo analizi

Çizelge 4.10'da verilen sınır koşullar için Monte Carlo analizi yapılacak tüm lensler için eğrilik yarıçapı, yüzey formu, merkez kalınlık ve merkezleme tolerans girdileri listelenmiştir. Tüm lenslerde eğrilik yarıçapı toleransı ±%0,3, yüzey formu ±2 fringe (P-V) ve merkezleme 3 yaydakika olarak alınmış ve Monte Carlo analizi yapılmıştır.

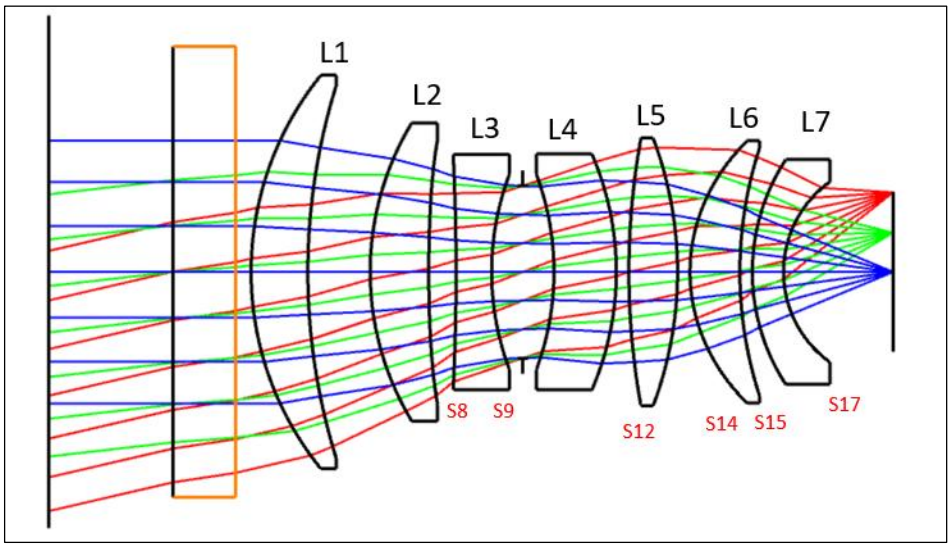
Çizelge 4.10. Monte Carlo analizi tolerans değerleri

Lens	Eğrilik yarıçapı	Yüzey Form	Merkez kalınlık	Merkezleme
1	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
2	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika
3	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
4	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika
4	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
5	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika
6	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
7	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika
8	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
9	-	-	-	-
10	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
11	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika
12	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
13	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika
14	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
15	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika
16	± %0,3	±2 fringe (P-V)	±50 µm	3 yaydakika
17	± %0,3	±2 fringe (P-V)	-	3 yaydakika

Analiz sonucuna göre nominal RMS spot yarıçapı 9,9 µm ve tolerans analizinden sonra Zemax tarafından hesaplanan RMS spot yarıçap değeri 12,0 µm'dir. En hassas tolerans parametreleri ve lens yüzeyleri Çizelge 4.11'de listelenmiş olup Şekil 4.31'de lens yüzeyleri sırasıyla gösterilmiştir.

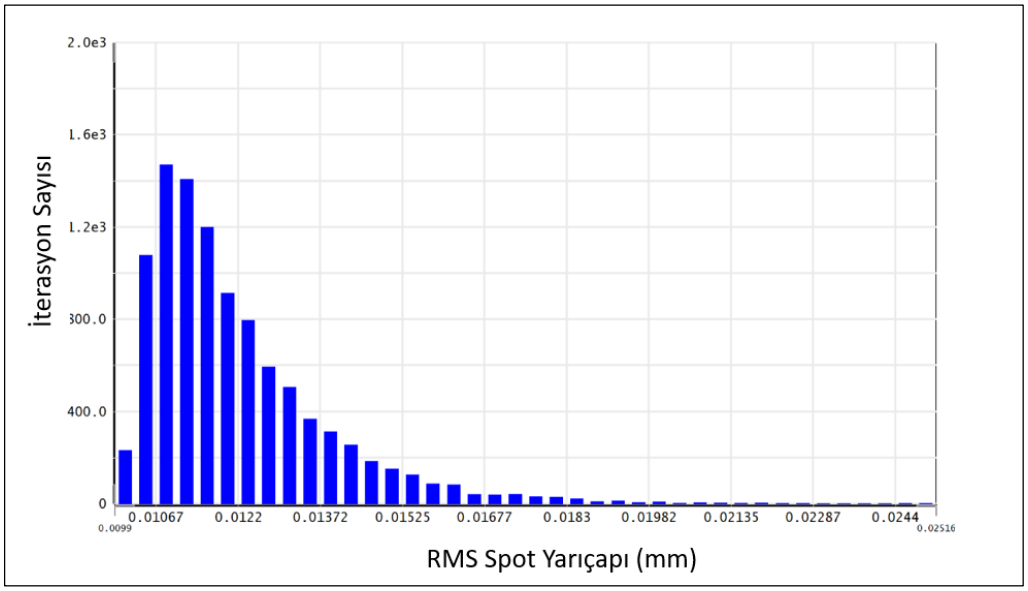
Çizelge 4.11 En hassas toleransa sahip 5 optik parametre

1	Merkezleme toleransı	Yüzey 12 (S12)
2	Merkezleme toleransı	Yüzey 8 (S08)
3	Yarıçap eğrilik toleransı	Yüzey 15 (S15)
4	Merkezleme toleransı	Yüzey 11 (S11)
5	Merkezleme toleransı	Yüzey 17 (S17)



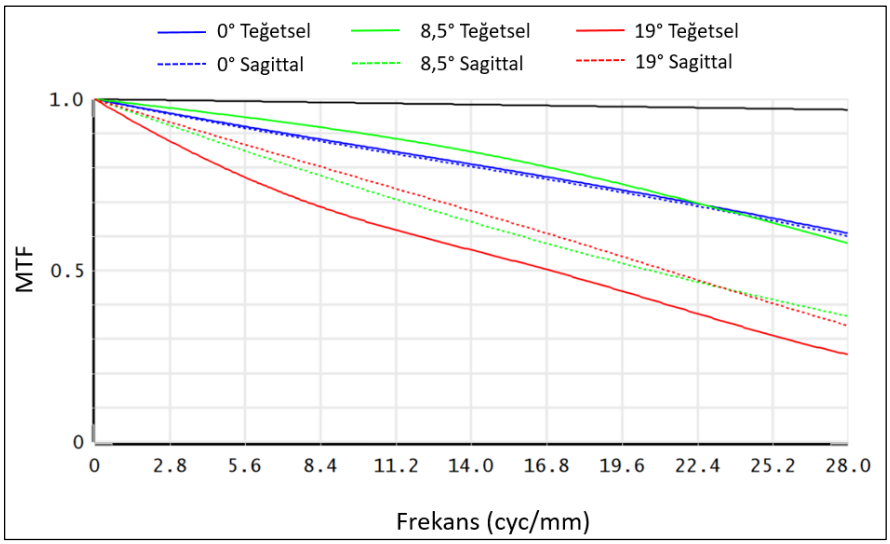
Şekil 4.31. Lens dizilimde en hassas yüzeylerin gösterimi

Şekil 4.32'de optik parametrelerin Monte Carlo analiz histogramı verilmiştir. 10 000 Monte Carlo Analizi koşturulduktan sonra elde edilen veri, tasarım üretildiğinde elde edilecek optik bütünlemelerin %98'i 16,0 µm'dan, %90'ı 13,0 µm dan ve %50'si 11,0 µm dan daha iyi RMS spot yarıçap değerine sahip olacağını göstermektedir. Sensör piksel boyutu 18,0 µm olduğu için bu değer üretim için yeterli kabul edilmektedir.



Şekil 4.32. Optik parametrelerin Monte Carlo analiz histogramı

Şekil 4.33'te %98 dağılımlı Monte Carlo analiz sonucunun MTF grafiği sunulmuştur ve MTF değeri maksimum alanda dahi %20'nin üzerindedir.



Şekil 4.33. Tüm optik parametrelerin Monte Carlo Analizi (%98 lık dağılım) ZEMAX-OpticStudio MTF grafiği

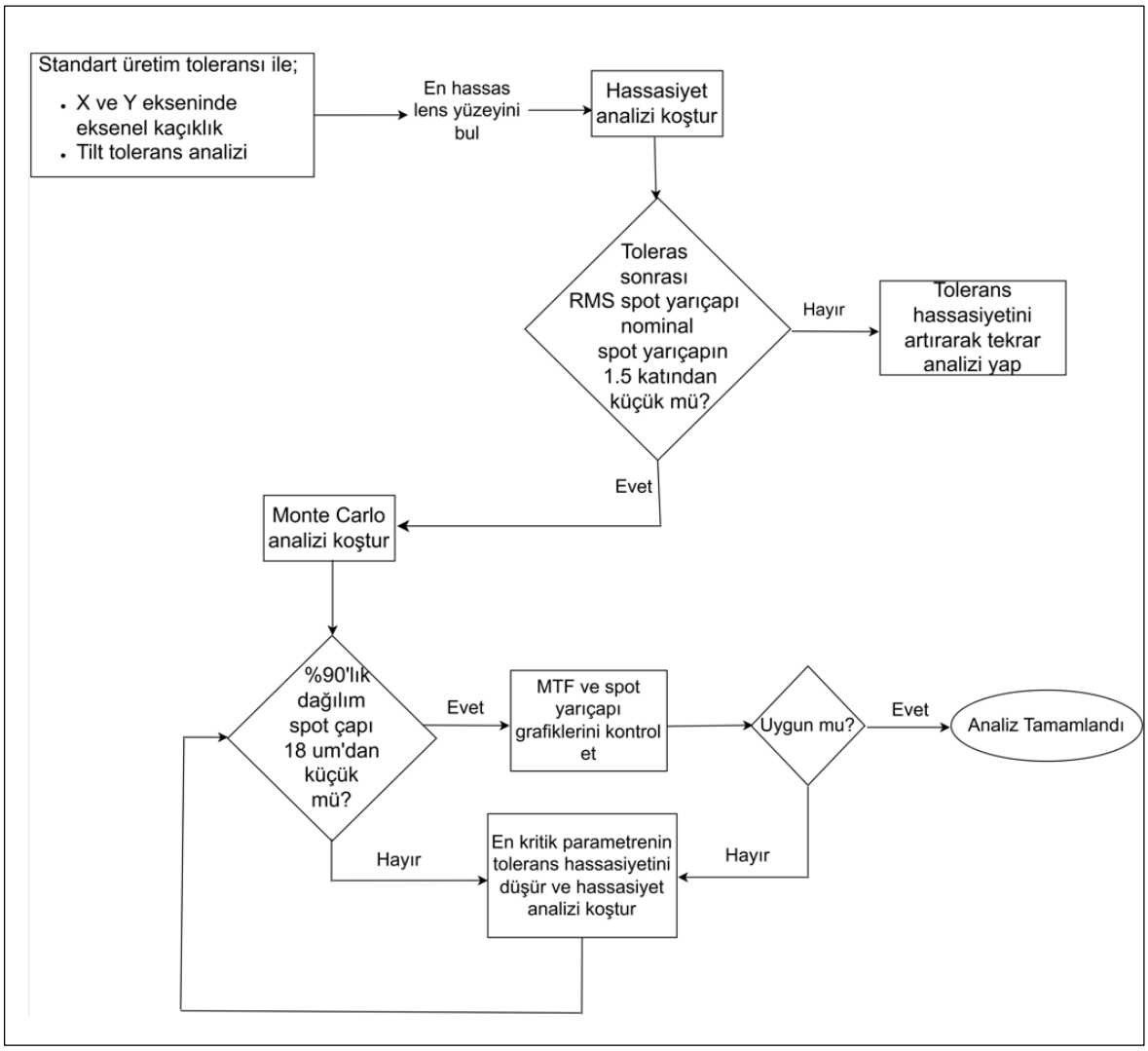
4.2.2. Mekanik ve optiğin eksenel hizalama hata kaynaklı tolerans analizi

Optik parametrelerin üretim toleransının yanı sıra optik elemanların mekanik yerleşimi, montaj hassasiyeti ve hizalama doğruluğuna bağlı olarak ortaya çıkabilecek sapmaların sistem üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla mekanik parametreler için de tolerans analizi yapılmıştır [54].

Çizelge 4.9'da, standart, hassas ve çok hassas opto-mekanik üretim süreçlerine göre tanımlanan mekanik hizalama toleransları verilmiştir. Mekanik hizalama toleransları, optik elemanların sistem içerisindeki konumlandırma doğruluğunu tanımlamakta olup eksenel kaçıklık (decentering) ve tip/tilt bileşenleri üzerinden değerlendirilir. Bu toleranslar, üretim hassasiyetine bağlı olarak farklı seviyelerde belirlenmektedir.

Çizelge 4.12. Mekanik hizalama toleransları; standart, hassas ve çok hassas üretim

	X ve Y ekseninde Eksenel Merkezleme (Decenter) (µm)	Tip/Tilt (µm)
Standart üretim	±100	±100
Hassas üretim	±50	±50
Çok hassas üretim	±25	±25



Şekil 4.34. Mekanik ve optik birimlerin eksenel hizalama tolerans analizi akış diyagramı

Çizelge 4.13'te, lens yüzeyleri için eksenel kaçıklık ve tilt toleransları verilmiştir. Tüm yüzeyler için eksenel kaçıklık toleransı ±100 µm olup Zemax OpticStudio'ya mm cinsinden tanımlanabilmektedir. Tilt toleransı ise Zemax OpticStudio'ya derece cinsinden tanımlandığı için tilt toleransları lens yüzeyinin çapına göre Eş. 4.1'deki gibi hesaplanmaktadır. Pencere ve Lens 1 için hesaplamalar örnek olarak Eş. 4.2 ve Eş. 4.3'te sunulmuştur. Lens 2 için 0,11°, Lens 3 0,13°, Lens 4 0,17°, Lens 5 0,14° Lens 6 0,14° ve Lens 7 için 0,17° olarak hesaplanır.

$$Tilt\ toleransı\ (°) = arctan\left(\frac{Tolerans\ değeri\ (mm)}{Lensin\ Çapı\ (mm)}\right) \tag{4.1}$$

$$Pencere\ Tilt\ toleransı\ (°) = arctan\left(\frac{0{,}1\ mm}{74\ mm}\right) = \ 0{,}07° \quad (4.2)$$

$$Lens\ 1\ Tilt\ toleransı\ (°) = arctan\left(\frac{0{,}1\ mm}{68\ mm}\right) = \ 0{,}08° \quad (4.3)$$

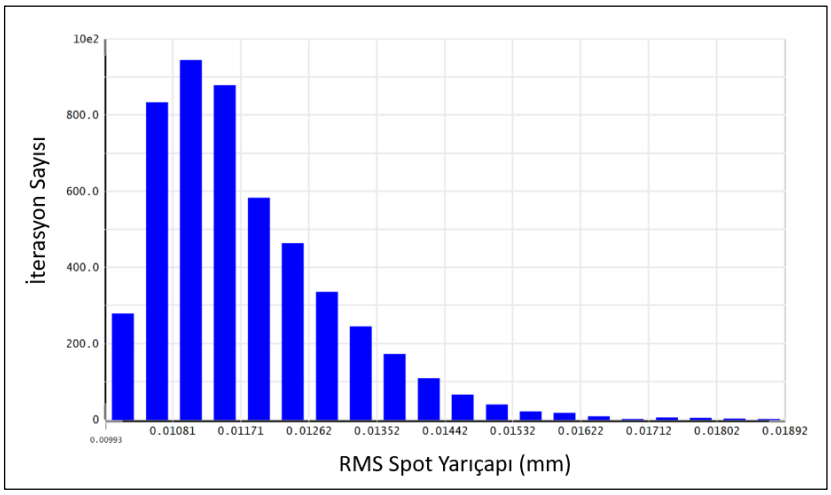
Çizelge 4.13. Eksenel merkez kaçıklık ve tilt hassassiyet analizi tolerans değerleri

Yüzey Numarası	Eksenel Merkez Kaçıklık Toleransı (µm)	Tilt Toleransı
1	±100	±0,07° (±100 µm)
2	±100	±0,07° (±100 µm)
3	±100	±0,08° (±100 µm)
4	±100	±0,08° (±100 µm)
5	±100	±0,11° (±100 µm)
6	±100	±0,11° (±100 µm)
7	±100	±0,13° (±100 µm)
8	±100	±0,13° (±100 µm)
9	-	-
10	±100	±0,17° (±100 µm)
11	±100	±0,17° (±100 µm)
12	±100	±0,14° (±100 µm)
13	±100	±0,14° (±100 µm)
14	±100	±0,14° (±100 µm)
15	±100	±0,14° (±100 µm)
16	±100	±0,17° (±100 µm)
17	±100	±0,17° (±100 µm)

Çizelge 4.14'te sunulan hassasiyet analiz sonucuna göre Lens 3'ün (Yüzey 5 ve Yüzey 6) ve Lens 5'in (Yüzey 8 ve Yüzey 9) x ve y eksenel kaçıklık ve açısal tilt toleransı sistem performansı üzerinde en hassas etkiye sahip parametreler olarak belirlenmiştir. Nomimal RMS spot yarıçapı 9,9 µm olup, tolerans analizi sonrasında RMS spot yarıçapı 14,0 µm'dur. Bu değer, 18,0 µm değerinden küçük olup, sistem performansı açısından kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

Çizelge 4.14 Eksenel kaçıklık toleransı ve açısal tilt tolerans verileri

Tolerans hassasiyeti (tüm yüzeyler için)	Çizelge 4.13 verileri
Tasarım nominal RMS spot yarıçapı	9,9 µm
Tolerans sonrası RMS spot yarıçapı	14 µm
Tespit edilen hassas yüzeyler	Yüzey 5, Yüzey 6, Yüzey 8, Yüzey 9



Şekil 4.35 Mekanik parametrelerin Monte Carlo analiz histogramı

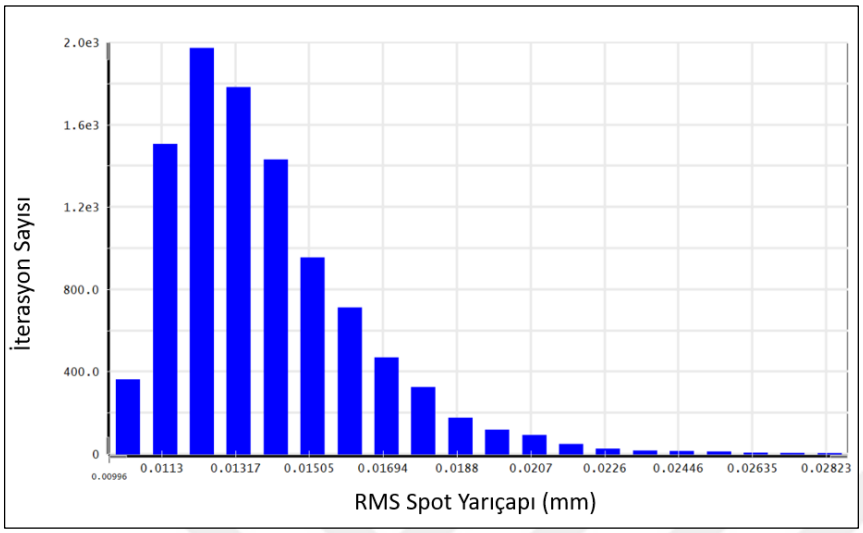
Şekil 4.35'te 10 000 iterasyonluk Monte Carlo analizi histogramı sunulmaktadır. Elde edilen veriler üretim ve montaj işlemlerinden sonra ST objektifinin yaklaşık %98'inin 16,0 µm, %90'ının 14,0 µm ve %50'sinin ise 12,0 µm'dan daha düşük RMS spot yarıçapı değerlerine ulaşacağını ortaya koymaktadır. Kullanılan görüntüleme sensörünün piksel boyutu 18,0 µm olduğundan, bu performans düzeyi üretim açısından yeterli kabul edilmektedir.

Optik üretim ve opto-mekanik hizalama tolerans parametrelerin Monte Carlo analizi

Sistem tolerans performansının gerçek ile uyumluluğunu artırmak için optik üretim ve opto-mekanik hizlama toleranslarının birlikte ele alındığı bütünleşik bir tolerans analizi yapılması gereklidir. Bu sayede bireysel dağılımların yanı sıra, bütün parametrelerin etkisi istatistiksel olarak değerlendirilebilmektedir. Sistemdeki tüm parametrelerin eş zamanlı olarak rastgele varyasyonlarla yani Monte Carlo analizi ile optik üretim ve mekanik hizalama hatalarının sistem performansına etkisinin dağılımı incelenmiştir. Çizelge 4.10, tüm optik tolerans parametre değerleri ve Çizelge 4.13 ise tüm mekanik hizalama tolerans değerleri bu bütünleşik Monte Carlo analizi için kullanılan değerlerdir (EK-3).

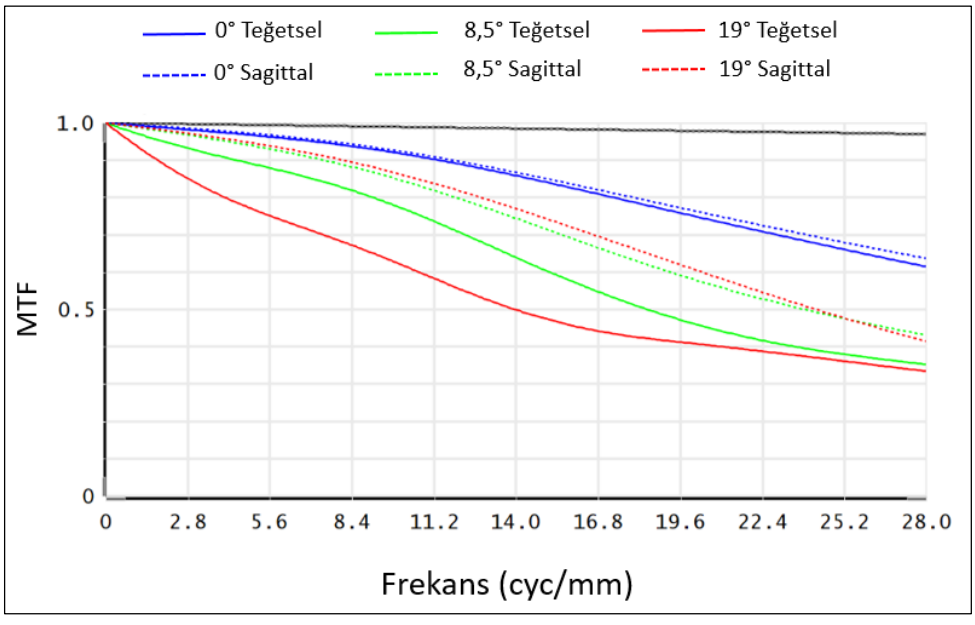
Şekil 4.36'da Monte Carlo analiz histogramından elde edilen veri, tasarım üretildiğinde elde edilecek optik bütünlemelerin %98'inin 16,0 µm'dan, %90'ı 15,0 µm'dan ve %50'si 13,0 µm dan daha iyi RMS spot yarıçap değerine sahip olacağını göstermektedir (EK-3). Sensör piksel boyutu olan 18,0 µm'dan küçük olduğu için bu değer üretim için yeterli kabul edilir. Daha hassas tolerans değerleri ile üretim yaptırmak istersenirse, optik ve mekanik olarak en

hassas bulunan yüzeylerin tolerans hassasiyet değeri artırılarak tekrar Monte Carlo analizi koşturulabilir.



Şekil 4.36. Optik ve mekanik parametrelerin Monte Carlo analiz histogramı

Şekil 4.37'te optik üretim ve mekanik hizalama Monte Carlo analizi %98'lik dağılım, MTF grafiğine göre maksimum alanda dahi MTF %30'un üzerindedir.

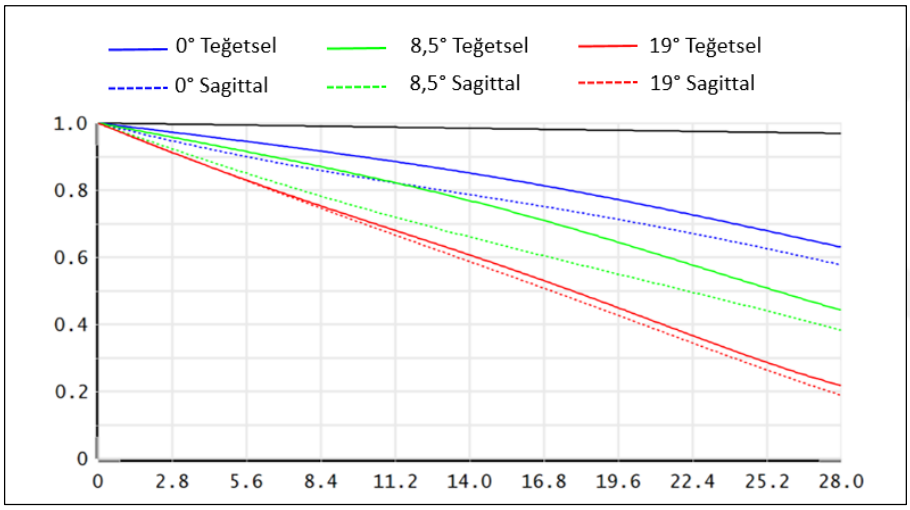


Şekil 4.37. Optik üretim ve mekanik hizalama Monte Carlo analizi %98'lik dağılım ZEMAX-OpticStudio MTF grafiği

Şekil 4.38'te verilen en kötü durumda oluşan dağılım çıktısı dikkate alınarak, MTF bütçesi hesaplanabilir hale gelmiştir. Sistemde kullanılan görüntüleme sensörü, $MTF_{Sensör}$ %65 ve optik üretim ve mekanik hizalama Monte Carlo analizi en kötü durumda MTF_{Optik} %20'dir. Bu durumda sistemin MTF bütçesi;

$$MTF_{ST} = MTF_{Sensör}.MTF_{Optik} = \%13 \quad (4.4)$$

olarak hesaplanır. Bu analiz sonuçlarına göre, en kötü durumda, optik tasarımın en önemli tasarım parametresi olan MTF gereksinimin sağlandığı görülmektedir.



Şekil 4.38. Optik üretim ve mekanik hizalama Monte Carlo analizi en kötü durumda (worst case) dağılım ZEMAX-OpticStudio MTF grafiği

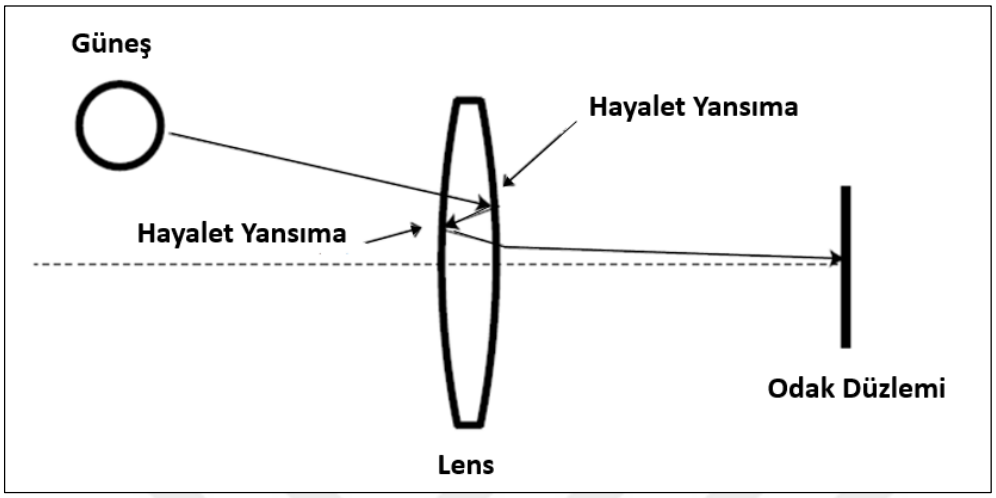
4.3. Yıldız İzler Kaçak-Işın Analizi

Kaçak-ışın, optik sistemin görüş alanı dışından gelen ve odak düzlemine ulaşan istenmeyen ışık olarak tanımlanır [55]. Kaçak-ışın kaynakları ve nedenleri bir sonraki bölümde detaylandırılmıştır.

4.3.1 Kaçak-ışın kaynakları

Optik sistemin dışından gelen Güneş ışınları, Dünya'nın ve Ay'ın yüzeyine gelen Güneş ışınlarının geri yansıması (albedo etkisi) kaçak-ışınlara neden olmaktadır [56]. Şekil 4.36'da gösterildiği gibi lens yüzeylerinden veya optik bileşenlerden yansıyan ışınlar da kaçak-ışın

kaynağıdır. Ayrıca, bileşenlerin yüzeyindeki kusurlar veya pürüzlülük nedeniyle de oluşan dağınık ışın (scatter) kaçak-ışınlara neden olmaktadır [15].



Şekil 4.39. Görüntü düzlemini ulaşan kaçak-ışın

4.3.2. Kaçak-ışının sisteme etkisi

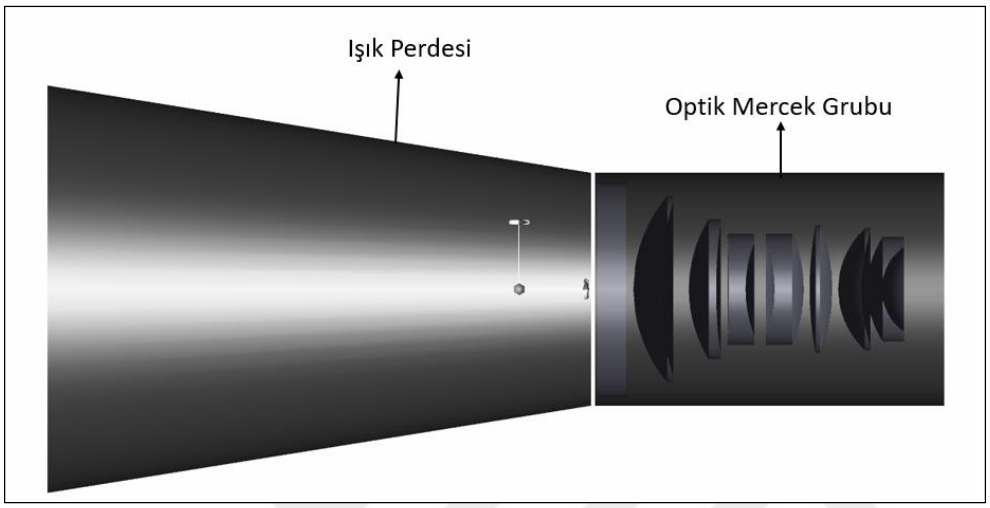
Kaçak-ışınlar sisteme girdiğinde, optik sistemin hedeflenen performansı elde edilemez. Bu ışınlar, görüntü düzleminde hayalet görüntü oluşumuna yol açmanın yanı sıra dedektörün kuantum etkinliğinin bulunduğu bant aralığında istenmeyen sinyal bileşenleri oluşturarak sinyal/gürültü (SNR) oranının düşmesine neden olur [56-58].

4.3.3. Kaçak-ışın azaltma yöntemleri

Kaçak-ışınların azaltılması için alınabilecek önlemler, optik kaplama ve mekanik uygulamalar olmak üzere iki ana grupta incelenebilir.

Optik kaplama metodu ile hayalet yansımaya neden olan yüzeyler belirlenerek bu yüzeylere yansıma önleyici (anti-reflektif) kaplamalar uygulanır. Böylece, yüzeyden geri yansıyan ışık miktarı azaltılır. Ayrıca, optik bileşenlere daha hassas üretim toleransları verilerek yüzey pürüzlülüğü düşürülebilir ve dağınık ışın (scattering) etkisi minimize edilebilir. Bu çalışma kapsamında, yüzey pürüzlülüğü etkisi çalışılmamıştır.

Mekanik uygulamalarda ise optik tutucu mekaniğinin iç yüzeyi ışığı soğuran malzemeler (örneğin, siyah anodizasyon) ile kaplanır. Güneş ve Dünya kaynaklı, görüş alanı dışından gelen kaçak-ışınların engellenmesi için ise Şekil 4.37'de gösterilen ışık perdesi en temel çözüm olarak kullanılabilir.



Şekil 4.40. Optik lens grubunun önüne yerleştirilen ışık perdesi

4.3.4. Işık perdesi (baffle) tasarımı

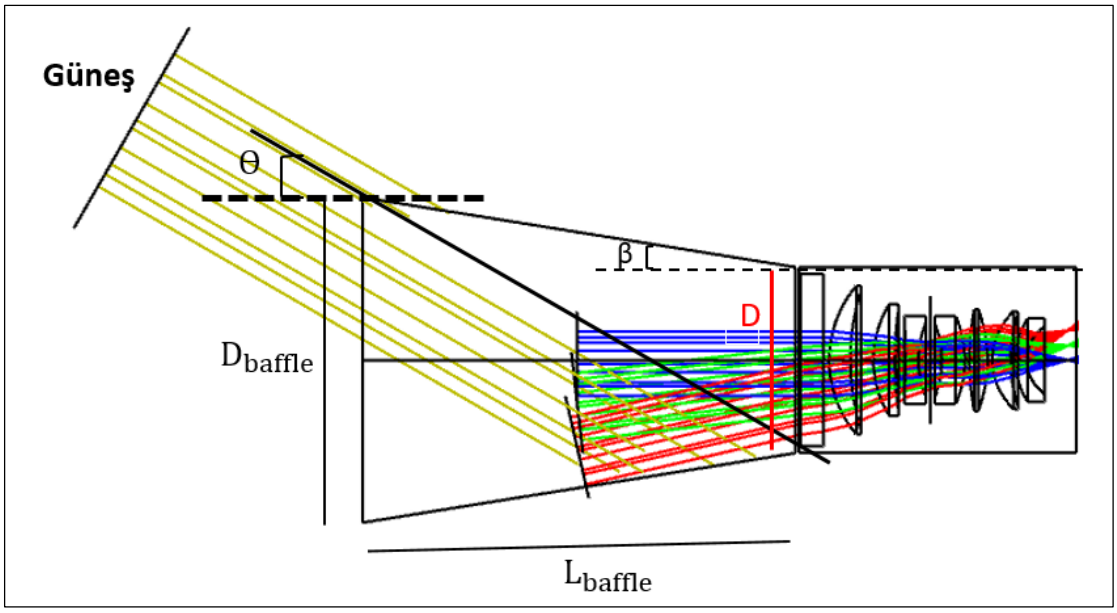
Işık perdesi, optik sistemin görüş alanı dışındaki istem dışı ışığın girmesini engelleyen bir ışık siperliği olup optik görüş açısına engel olmayacak ve görüş alanını kapsayacak şekilde tasarlanır.

Şekil 4.41'de ışık perdesi ve optik görüş açısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Eş. 4.5'de ışık perdesinin uzunluğunun (L_{baffle}), yarı görüş açısına (β), optik giriş açıklığına (D) ve bloklanmak istenen kaçak ışın açısına (θ) bağlı denklemi verilmiştir. Eş. 4.6'te ise ışık perdesi giriş açıklığının (D_{baffle}) nasıl hesaplandığı gösterilmektedir [59, 60].

$$L_{baffle} = \frac{D}{tan\theta - tan\beta} \tag{4.5}$$

$$D_{baffle} = \frac{tan\theta + tan\beta}{tan\theta - tan\beta}.D \tag{4.6}$$

Işık perdesi tasarımı yapılırken, optik sistemin görüş açısını kesmemesine dikkat edilmesi gerekir. Bunun yanı sıra ışık perdesi bloklama açısı, görüş açısından çokta büyük olmamalıdır ki kaçak-ışınları engelleyebilsin. Örneğin; 20° görüş açısına sahip bir objektif için 21° lik bloklama açısına sahip bir ışık perdesi kaçak-ışınları maksimum seviyede engelleyecek ve sistem performansını artıracaktır. Fakat, ışık perdesi bloklama açısı arttıkça ışık perdesinin çapı ve uzunluğu da doğru orantılı olarak artacaktır. Bu durum, ağırlığın ve boyutun istenmeyecek seviyede olmasına neden olabilir. Bu sebeple, kompakt ve maksimum seviyede verim sağlayacak bir ışık perdesi tasarımı ve ışık perdesi iç yüzeyinde ışık kesici halkalar (vane) kullanılır.



Şekil 4.41. Işık perdesi ile ST objektif görüş açısı arasındaki ilişki

Bu çalışmada, mekanik ışık kesici halkalar kullanılmadan, 20° bloklama açısına sahip bir ışık perdesi için çap ve uzunluk hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, Zemax OpticStudio kullanılarak simule edilmiş ve kaçak-ışın analizi yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

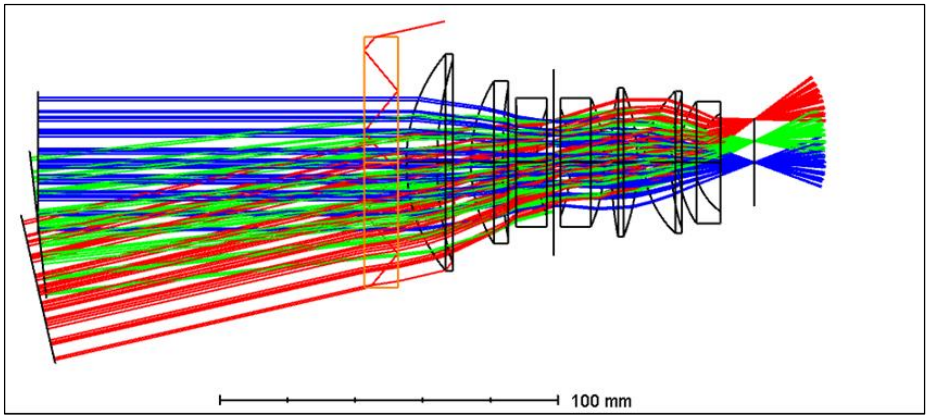
Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 kullanılarak, optik giriş açıklığı 74 mm ve bloklanmak istenen Güneş açısı 20° ve optik görüş açısı 19° olan bir sistem için, ışık perdesi uzunluğu ve ışık perdesi çapı Eş. 4.6 ve Eş. 4.7'de hesaplandığı gibi 376 mm ve 200 mm'dir.

$$L_{baffle} = \frac{74\ mm}{tan(20) - tan(9{,}5)} = 376\ mm \tag{4.6}$$

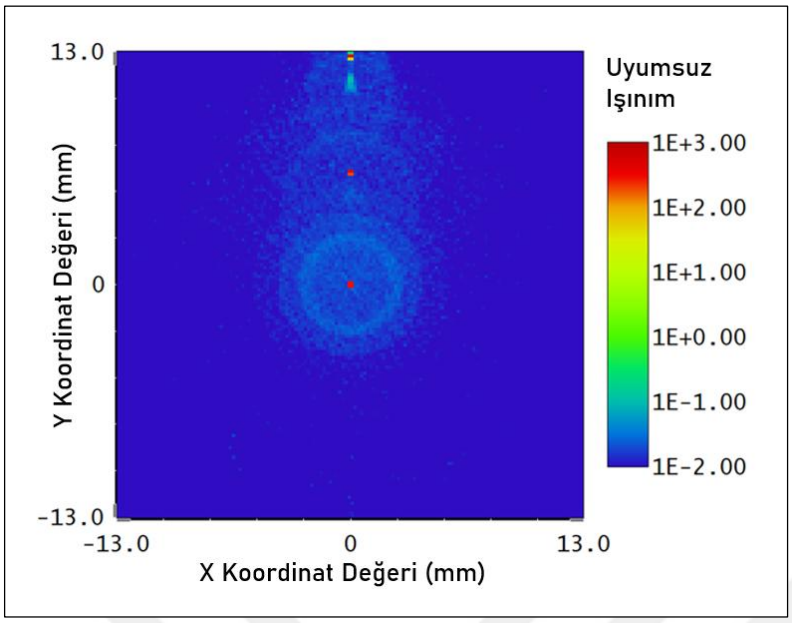
$$D_{baffle} = \frac{tan(20) + tan(9{,}5)}{tan(20) - tan(9{,}5)} . 74 = 200\, mm \qquad (4.7)$$

4.3.5. Kaçak-ışın analizi ve sonuçları

ST kaçak-ışın analizi, Zemax-OpticStudio, Non-Sequential modda yapılmıştır. Başlangıçta sistemdeki lenslerden kaynaklanan kaçak-ışınların tespiti için yansıma önleyici kaplama kulllanılmadan analiz koşturulmuştur. Kaçak-ışın tespiti için 2-boyutlu lens dizilimi Şekil 4.42'de gösterilmektedir. Şekil 4.43 ise dedektör düzlemindeki uyumsuz ışınım (incoherent irradiance) dağılımı gösterilmektedir. Yatay eksende X-Koordinat Değeri (mm), düşey eksende Y-Koordinat Değeri (mm) yer almakta olup 26 mm diyagonal görüntü düzlemini temsil etmektedir. Renk skalası, ışınım şiddetini logaritmik ölçekte (W/m²) ifade etmektedir. Kırmızı tonlar yüksek ışınım bölgelerini (10^3 mertebesi), mavi tonlar ise düşük ışınım bölgelerini (10^{-2} mertebesi) göstermektedir. Grafikte merkezden köşeye doğru sıralanmış 3 kırmızı nokta merkez alan, orta alan ve maksimum alandaki, maksimum ışınımı (odak noktası) ifade ederken, çevresinde oluşan halkasal yapılar optik eleman yüzeylerinden kaynaklanan yansımalar sonucu oluşan hayalet görüntü (ghost image) dağılımlarını göstermektedir. Bu halkalar, ışığın birden fazla yüzeyden yansıması sonucu, dedektör üzerine odak dışı olarak düşmesiyle ortaya çıkmaktadır. İlk durumda, görüntü merkezindeki parlaklık 4,42 x 10^2 W/cm² olup toplam güç 9,93 x 10^{-1} W'dır.

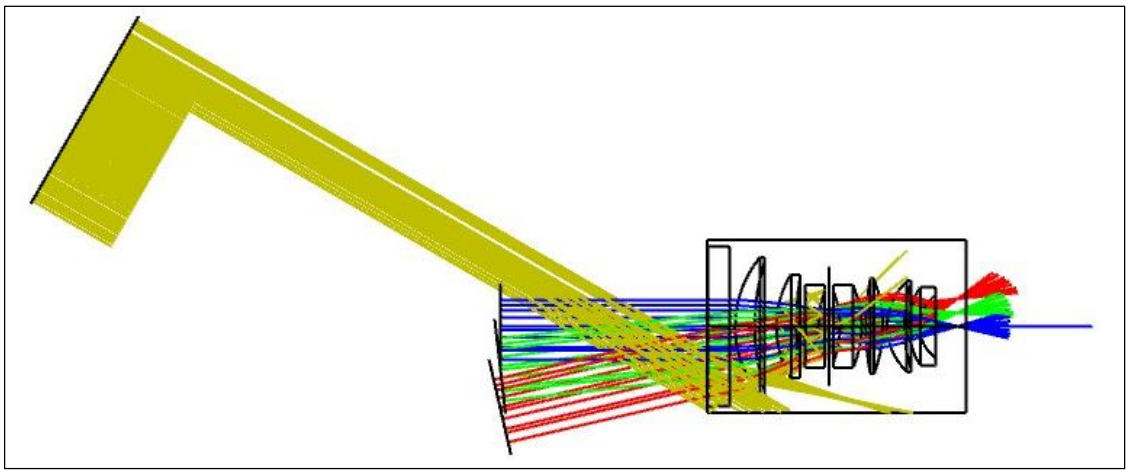


Şekil 4.42. Lens diziliminde kaçak-ışın görüntüsü



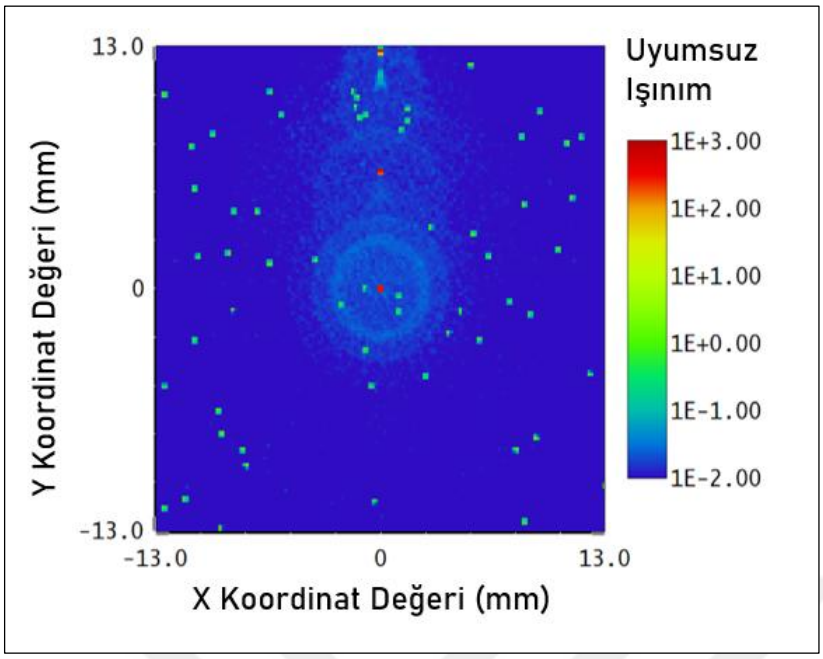
Şekil 4.43. Kaçak-ışın analizi sonucunda dedektör görüntüsü

Henüz ışık perdesi yapısı uygulanmamış konfigürasyonda, optik görüş açısı dışından gelen 20°'lik Güneş ışınlarının sistem içerisindeki etkisi incelendiğinde, lens yüzeylerinden kaynaklanan kaçak ışın oluşumu Şekil 4.44'te gösterilmiştir.



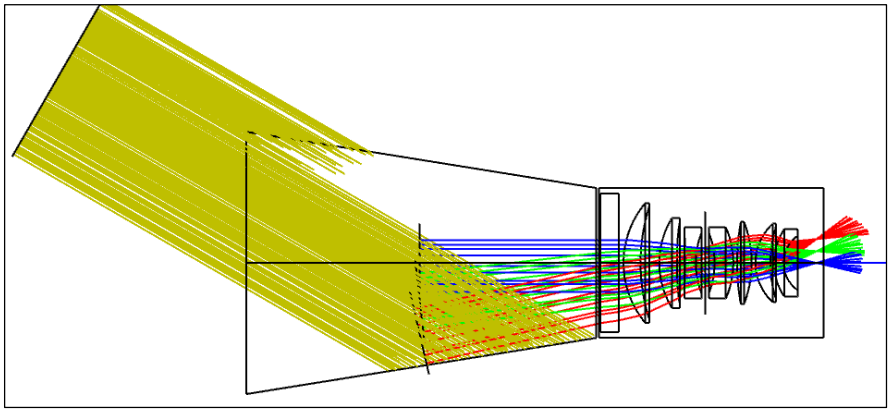
Şekil 4.44. 20° Güneş ışınları optik sisteme girdiğinde kaçak-ışın dağılımı

Şekil 4.45'te Güneş ışınları optik sisteme girdiğinde ve ışık perdesi kullanılmadığı durumda dedektörde meydana gelen kaçak-ışınlar sunulmaktadır. Dedektör üzerinde yer alan noktalar, görüntü düzlemine ulaşan kaçak-ışınların konumlarını ve bu bölgelerdeki ışıma şiddetlerini temsil etmektedir.



Şekil 4.45. 20° Güneş ışınları optik sisteme girdiğinde dedektör görüntüsü

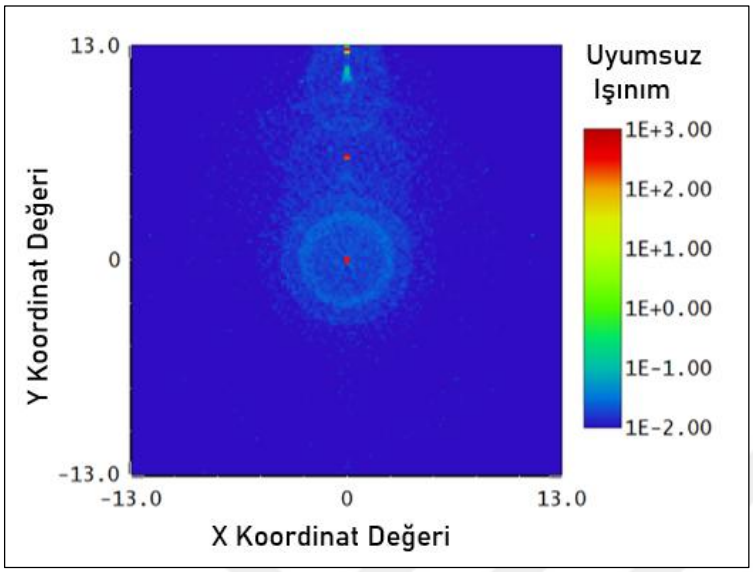
Şekil 4.46'da ise ST görüntüleme biriminin önüne yerleştirilen ışık perdesi yapısı sayesinde, Güneş'ten gelen ışınların lens yüzeylerine ulaşması engellenmekte ve bu sayede Güneş kaynaklı kaçak-ışınların oluşumu önlenmektedir.



Şekil 4.46. Sistemde 20° Güneş ışınları için ışık perdesi kullanımı ile engellenmesi

Işık perdesi kullanılan konfigürasyonda gerçekleştirilen analiz sonucunda, dedektör düzleminde Güneş kaynaklı kaçak-ışınların etkin bir şekilde engellendiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.47'de ışık perdesi kulanılan durum için dedektör analiz sonucu sunulmaktadır. Analiz sonucunda, Güneş nedenli kaçak-ışınlardan sistemin temizlendiği gözlemlenmiştir. Işık perdesi yapısının görüş alanı dışından ışık girişini sınırlamada etkili olduğu, sadece iç

yansımaların ve yüzey saçılmalarının sistem performansını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.47. 20° Güneş ışınları için ışık perdesi kullanıldığında ZEMAX OpticStudio dedektör görüntüsü

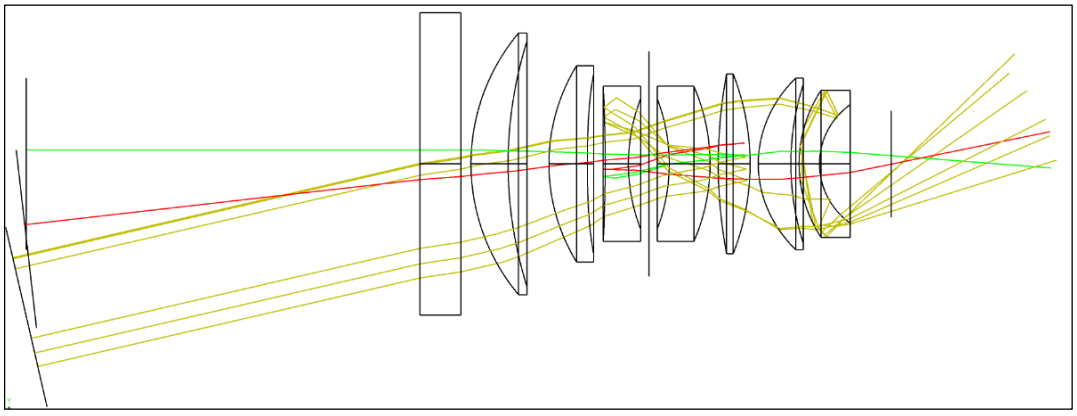
Hayalet görüntü (ghost image) analizi

Lens yüzeylerinden kaynaklanan geri yansımaları analiz etmek ve sistem performasını olumsuz etkileyen optik elemenları tespit edebilmek amacıyla "hayalet görüntü (ghost image)" filtresi kullanılır. Bu analiz yöntemi sayesinde, dedektöre ulaşan kaçak-ışınların izlediği yollar belirlenmekte ve bu ışınlara neden olan kritik yüzeyler saptanmaktadır. Tespit edilen bu yüzeylere yansıma önleyici (anti-reflektif) kaplama uygulanarak sistemdeki kaçak-ışın etkisi azaltılmakta ve görüntüleme performansını iyileştirdiği gözlemlenmektedir.

Hayalet görüntü filtresi, kaçak-ışın analizlerinde optik sistem içerisinde oluşan istenmeyen yansımaların kaynaklarını belirlemek amacıyla kullanılan etkili bir yöntemdir. Analiz girdileri, optik elemanların yüzey özellikleri, sistemin çalıştığı dalga boyu aralığı, ışık kaynağının konumu ve spektral özellikleri ile birlikte, analizde kullanılacak ışın sayısı ve yoğunluğunu içermektedir. Bir ışının maksimum kesişim sayısı (maximum intersections per ray) 4 000 olarak seçilmiş, böylece optik sistem içerisindeki tüm olası kırılma ve yansıma kombinasyonlarının izlenebilmesi sağlanmıştır. Işın başına maksimum sagment (maximum segments per ray) ise 2 000 000 olarak atanmış, bu sayede çoklu yüzeylerden kaynaklanan

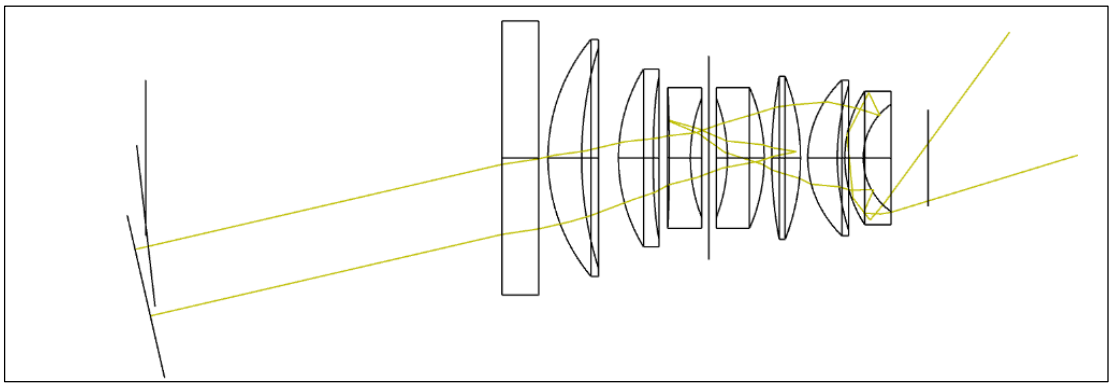
kırınım ve yansıma süreçlerinde ışınların kesintisiz olarak izlenmesi mümkün kılınmıştır. İç içe geçebilen veya temas eden nesnelerin maksimum sayısı (maximum nested/touching objects), optik elemanlar ile mekanik tutucu bileşenlerin yerleşim yapısına uygun olarak 5 değerinde tutulmuştur. Bellekte tutulabilecek maksimum kaynak dosyası ışın sayısı (maximum source file rays in memory) parametresi ise 1 000 000 olarak belirlenmiş, böylece yüksek çözünürlüklü ışın izleme yapılırken bellek kısıtlamalarından kaynaklı veri kaybı önlenmiştir. Son olarak, minimum göreceli ışın yoğunluğu (minimum relative ray intensity) değeri $5{,}0\times10^{-35}$ olarak tanımlanmıştır. Bu eşik değeri, yalnızca belirli bir enerji seviyesinin üzerindeki ışınların analizde dikkate alınmasını sağlayarak, dedektöre ulaşması muhtemel olmayan düşük enerjili ışınların elenmesine ve analiz süresinin optimize edilmesine katkı sağlamıştır [61]. Tüm bu parametreler kullanılarak dört farklı analiz koşturulmuş ve hayalet görüntü oluşumuna neden olan kusurlu yüzeyler tespit edilmiştir.

Şekil 4.48'deki Analiz-1 sonuçlarına göre, Lens 3, Lens 4, Lens 5 ve Lens 6 yüzeyleri kaçak ışın oluşumuna neden olan başlıca optik elemanlar olarak tespit edilmiştir. Lens 3 ve Lens 4 yüzeylerinde gözlemlenen kaçak-ışın probleminin temel kaynağı, Lens 5 yüzeyinde meydana gelen geri yansımaların olduğu görülmüştür.



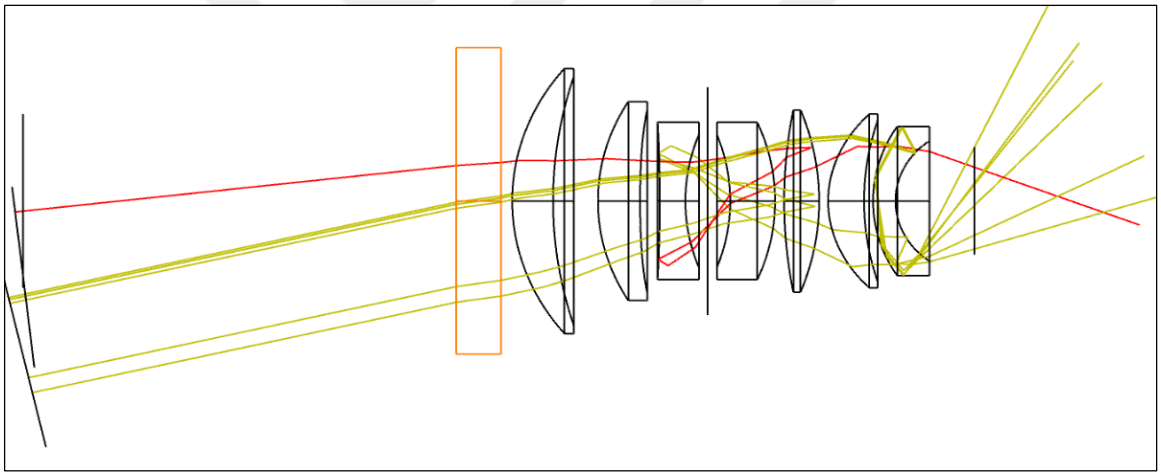
Şekil 4.48. ZEMAX-OpticStudio "Hayalet Görüntü" filtresi kullanılarak problemli yüzey analizi

Şekil 4.49'da sunulan Analiz-2 sonuçlarına göre Lens 3, Lens 5 ve Lens 7 yüzeyleri kaçak-ışın oluşumuna neden olan başlıca yüzeyler olarak belirlenmiştir



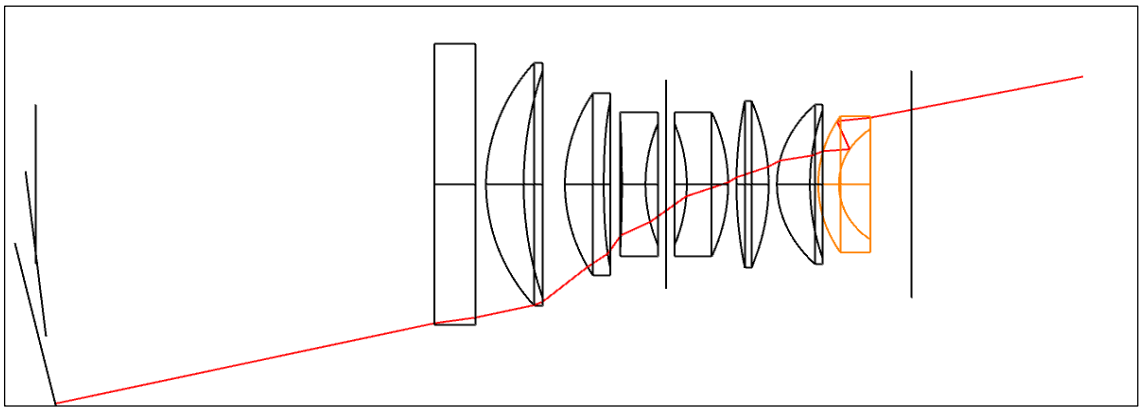
Şekil 4.49. ZEMAX-OpticStudio “Hayalet Görüntü” filtresi kullanılarak problemli yüzey analizi

Şekil 4.50’de sunulan Analiz-3 sonuçlarına göre Lens 3, Lens 4, Lens 5 ve Lens 7 yüzeyleri, sistemde kaçak-ışın problemine sebep olan yüzeyler olarak tespit edilmiştir.



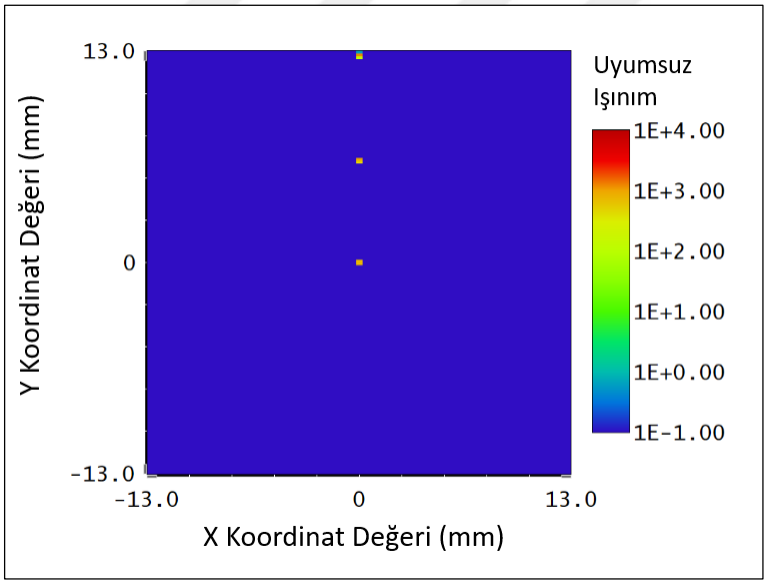
Şekil 4.50. ZEMAX-OpticStudio “Hayalet Görüntü” filtresi kullanılarak problemli yüzey analizi

Şekil 4.51’de Analiz-4 sonuçlarına göre Lens 7 yüzeyi kaçak-ışın oluşumuna neden olmaktadır. Tüm analiz çıktıları birlikte değerlendirildiğinde Lens 5, Lens 6 ve Lens 7 yüzeylerinin sistemde en fazla kaçak ışın problemine yol açan kritik yüzeyler olduğu tespit edilmiştir. Lens 3 ve Lens 4 yüzeylerinin de Lens 5’teki geri yansımalar nedeniyle kaçak ışınlara maruz kaldığı göz önünde bulundurularak, bu yüzeylere de anti-reflektif kaplama uygulanması gerekmektedir.



Şekil 4.51. ZEMAX-OpticStudio “Hayalet Görüntü” filtresi kullanılarak problemli yüzey analiz-4

Kaçak–ışına sebep olan tüm yüzeylere anti-reflektif kaplama uygulanmıştır. Şekil 4.52’de verilen analiz sonucuna göre Lens 3, Lens 4, Lens 5, Lens 6 ve Lens 7 yüzeylerine yansıma önleyici kaplama yapıldıktan sonra dedektör düzleminde kaçak ışın etkisi tamamen yok olmuştur. Görüntü merkezindeki parlaklık $1{,}08 \times 10^3$ W/cm² ve toplam güç 2,32 W olmuştur.



Şekil 4.52. Lens 3, Lens 4, Lens 5, Lens 6 ve Lens 7 yüzeylerine yansıma önleyici kaplama yapıldığında dedektör görüntüsü

Sonuç olarak, Lens 3, Lens 4, Lens 5, Lens 6 ve Lens 7 kaçak ışınlara neden olan kritik yüzeylere sahip lensler olarak belirlenmiştir.Yapılan analizler neticesinde pencere, Lens 1 ve Lens 2 hariç tüm optik yüzeylere yansıma önleyici kaplama uygulamasının, kaçak ışın

etkisinin giderilmesi açısından gerekli olduğu görülmüştür. Hayalet görüntü filtresi kullanılarak tamamlanan analiz sonuçları doğrulanmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, uydunun konum ve pozisyon bilgisinin yüksek doğrulukla belirlenebilmesi amacıyla Yıldız İzler optik biriminin sistem mühendisliği faaliyetleri tamamlanmış ve optik tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Ölçüm hassasiyetinin 1 yaysaniye ve altında olması hedeflenerek, sistemin temel optik parametreleri belirlenmiştir. Tasarım, 19° görüş açısı, 55 mm odak uzaklığı ve F/1,25 optik açıklık değerleri esas alınarak yapılmıştır.

Optik mimari olarak Double-Gauss referans yapısı tercih edilmiş ve iki farklı konfigürasyon üzerinde optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu yapı, simetrik lens dizilimi sayesinde optik aberasyonları düzeltebilme özelliğinin yanı sıra, düşük F/# ve geniş görüş açısına sahip sistemlerde sağladığı optik performans nedeniyle tercih edilmiştir. İlk konfigürasyonda radyasyona dayanıklı cam kataloğu, ikinci konfigürasyonda ise radyasyona dayanıklı koruyucu pencere ve standart cam kataloğu kullanılmıştır. Yapılan optik performans analizleri sonucunda, her iki konfigürasyonun da hedeflenen çözünürlük ve kontrast kriterlerini karşıladığı; ancak standart malzeme ile elde edilen tasarımın MTF değerleri açısından daha yüksek performans sunduğu ve maliyet açısından daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, standart malzeme kullanımına dayalı tasarımın görev gereksinimlerini karşılayan en uygun çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yıldız İzler objektif biriminin üretilebilirliğini değerlendirmek amacıyla tolerans analizi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan hassasasiyet toleransı ile en hassas parametreler belirlerken, Monte Carlo analizleri, üretim sonrası optik sistemin performans dağılımını nicel olarak ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlara göre, üretilecek sistemlerin %98'inden fazlasının 16,0 µm, %90'ının 13,0 µm ve %50'sinin ise 11,0 µm altındaki RMS spot yarıçapına sahip olacağı tespit edilmiştir. Bu değerler, sistemde kullanılan 18,0 µm piksel boyutunun altında kalarak görüntü kalitesini olumsuz etkilemeyecek seviye olup ve bu doğrultuda sistem performansının üretim koşulları altında sürdürülebilir olduğu değerlendirilmiştir.

ST objektif biriminin optik performansını ve ölçüm hassasiyetini artırmak amacıyla kaçak-ışın analizi gerçekleştirilmiştir. Güneş kaynaklı kaçak ışınları engellemek üzere ışık perdesi yapısı tasarlanmış; iç yansımaların azaltılması için optik yüzeylere anti-reflektif kaplama uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, Pencere, Lens 1 ve Lens 2 hariç tüm yüzeylere

kaplama uygulanmasıyla dedektör düzleminde yanıltıcı yıldız görüntü oluşumunun önüne geçilerek yıldızların tespit doğruluğu iyileştirilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma yıldız izleyici sisteminin optik tasarımı, tolerans analizi ve kaçak-ışın analizlerini kapsayan bütüncül bir mühendislik yaklaşımını başarıyla sunmaktadır.

İlerleyen çalışmalarda, geliştirilen yıldız izleyici sisteminin opto-mekanik tasarımının, görev sırasında karşılaşacağı yörünge koşulları ve fırlatma sürecine özgü yapısal yükler dikkate alınarak oluşturulması planlanmaktadır. Bu kapsamda, tasarım süreci termal analizlerle eş zamanlı olarak yürütülecek; analizlerde, yörüngedeki sıcaklık dalgalanmaları, malzemelerin termal genleşme özellikleri, ısı iletim yolları ve radyatif soğutma etkileri gibi parametreler değerlendirilecektir. Elde edilen termal ve yapısal analiz verileri doğrultusunda, opto-mekanik yerleşimler ile yapısal arayüzler optimize edilerek nihai tasarım şekillendirilecektir. Tasarımın tamamlanmasının ardından sistemin prototip üretimi yapılacak ve titreşim, termal vakum, radyasyon ve termal şok gibi uzay ortamını simüle eden koşullar altında test edilerek, görev için gerekli kalifikasyon kriterlerinin sağlanması hedeflenecektir.

KAYNAKLAR

1. Wang, S., Geng, Y. (23 October 2014). *Large field and high precision optical system for star tracker.* IEEE International Conference on Information and Automation, Haliar, 484-489.

2. Pissavin, P., Krebs, J. P., Lelong, P., Vidal, P., & Navoni, R. (1997). Improved star tracker for Odin satellite. *ESA SP-381, European Space Agency*, 381(1), 611-612.

3. Zhang, S., Xing, F., Sun, T., You, Z.,Wei, M. (2018). Novel approach to improve the attitude update rate of a star tracker. *Optics Express*, *26*(5), 5164-5181.

4. İnternet: Sodern S.A. (n.d.). *Auriga Star Tracker*. URL 1: https://sodern.ariane.group/wpcontent/uploads/sites/4/2018/04/Datasheet_AURIGA_2017.pdf/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

5. İnternet: AAC Clyde Space. (2023). ST200 Star Tracker. URL 2: https://www.aac-clyde.space/what-we-do/space-products-components/adcs/st200 / Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

6. İnternet: AAC Clyde Space. (2021). *ST400-T Star Tracker*. URL 3: https://www.aac-clyde.space/what-we-do/space-products-components/adcs/st400/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

7. İnternet: Terma A/S. (n.d.). T3 Star Tracker. URL 4: https://www.terma.com/products/space/star-trackers/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

8. İnternet: Leonardo S.p.A. (n.d.). *AA-STR Autonomous Star Tracker* . URL 5: https://electronics.leonardo.com/en/products/aastr/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

9. İnternet: Sodern S.A. (n.d.). *Hydra Star Tracker Datasheet*. URL 6: https://sodern.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydra.pdf/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

10. İnternet: Sodern S.A. (n.d.). *Horus Star Tracker*. URL 7: https://sodern.com/wp-content/uploads/2022/05/2022-05-Datasheet-Horus.pdf/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

11. İnternet: Rocket Lab USA, Inc. (n.d.). *ST-16RT2 Star Tracker Datasheet*. URL 8: https://rocketlabcorp.com/assets/Uploads/Star-trackers-product-sheet.pdf/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

12. İnternet: Rocket Lab USA, Inc. (n.d.). *ST-16HV Star Tracker.* URL 9: https://satsearch.co/products/rocketlab-st-16hv-star-tracker/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

13. İnternet: Jena-Optronik GmbH. (n.d.). *ASTRO APS Star Tracker.* URL *10:* https://www.jena-optronik.de/products/star-sensors/astro-aps.html/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

14. İnternet: Jena-Optronik GmbH. (n.d.). *ASTRO XP Star Tracker.* URL 11: https://www.jena-optronik.de/products/star-sensors/astro-xp.html/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

15. Hu, W. (2005). Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number. *Acta Photonica Sinica*, 34(12), 1822-1825.

16. Asadnezhad, M., Eslamimajd, A., Hajghassem, H. (2018). Optical system design of star sensor and stray light analysis. *Journal of the European Optical Society*,14(1), 9-10.

17. Chang, J., Hao, Y., Liu, J. (2009, January). *Research on aberration theory of star track systems.* In 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Optoelectronic Instruments 7156, 876-883.

18. Moldabekov, M., Akhmedov, D., Yelubayev, S., Ten, V., Albazarov, B., Shamro, A., Sukhenko, A. (24 September, 2014). *Features of design and development of the optical head of star tracker*. SPIE Conference on In Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII, Amsterdam, 540-550.

19. Liebe, C. (2002). Accuracy performance of star trackers-a tutorial. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, *38*(2), 587-599.

20. Bae, S., Smith, N., & Schutz, B. E. (2013). The GLAS algorithm theoretical basis document for precision attitude determination. *NASA Report. Austin, TX*. 10-15.

21. Sasián, J. (2012). *Introduction to aberrations in optical imaging systems*. NewYork: Cambridge University Press, 144-146.

22. Dereniak, E. L., Dereniak, T. D. (2008). *Geometrical and Trigonometric Optics*. NewYork: Cambridge University Press, 226-230.

23. Laikin, M. (2018). *Lens design*. 4th edition, Boca Raton (USA): CCRC Press. 42-45.

24. İnternet: Edmund Optics. (n.d.). Limitations on resolution and contrast: The Airy disk. URL12: https://www.edmundoptics.com/knowledgecenter/applicationnotes/imaging/limitations-on-resolution-and-contrast-the-airy-disk/ Son Erişim Tarihi: 03.08.2025

25. Born, M., Wolf, E. (2013). *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*.(7th ed.) Oxford: Elsevier, 236-240.

26. Kingslake, R., Johnson, R. B. (2009). Lens design fundamentals. (2nd ed.), Oxford (UK): Academic Press (Elsevier imprint), 132-140.

27. Thompson, K. (2005). Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry. *Journal of the Optical Society of America A*, *22*(7), 1389-1401.

28. Pixton, B. M.,Greivenkamp, J. E. (2010). Spherical aberration gauge for human vision. *Applied Optics*, 49(30), 5906-5913.

29. Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R., Galeb, R., Kress, B. C., McClain, S. C., Wiederhold, B. (2000). Bob Grant Alastair J. *Optical System Design*, (1st ed.) Newyork: McGraw-Hill, 61-65.

30. İnternet: Wikipedia contributors. (n.d.). Spherical aberration. Wikipedia. URL 13: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_aberration/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

31. İnternet: Wikipedia contributors. (n.d.). Optical aberrations – Astigmatism. URL 14: https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Astigmatism.svg/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

32. İnternet: Edmund Optics. (n.d.). How aberrations affect machine vision lenses. Edmund Optics. URL 15: https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/how-aberrations-affect-machine-vision-lenses/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

33. Xu, F., Huang, W., Liu, J., Pang, W. (2016). Design of lenses with curved Petzval image surfaces. *Journal of Modern optics*, 63(21), 2211-2219.

34. Durgut, A., Akçay, Ö. (2016). Termal kameralarda kalibrasyon şablonlarının performans analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(1),131-144.

35. Conrady, A. E. (1957). *Applied optics and optical design*. Oxford: Oxford University Press. (1st ed.). 143-145.

36. Sorensen, P. H., Davis, B. J., Kline-Schoder, R. J., Morrison, R. L. (2014). *An ultra-compact, high-accuracy star tracker*. In Proceedings of the NASA/IPM 2014 Small Satellite Conference, 1-4.

37. Muruganandan, V. A., Park, J. H., Lee, S., Jeung, I. S., Kim, S.,Ju, G. (2017). Development of the arcsecond pico star tracker (APST). *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, *60*(6), 355-365.

38. Pedrotty, S., Lovelace, R., Christian, J., Renshaw, D., Quintero, G. (2020). *Design and performance of an open-source star tracker algorithm on commercial off-the-shelf cameras and computers*. In Annual AAS Guidance, Navigation and Control Conference, Breckenidge, CO, 8-15.

39. Hancock, B. R., Stirbl, R. C., Cunningham, T. J., et al. (2001). CMOS active pixel sensor specific performance effect on star tracker/imager position accuracy. *In Proceedings of SPIE* ,4284, 43-53.

40. Ramsey, R. C. (1962). Spectral Irradiance from Stars and Planets, above the Atmosphere, from 0.1 to 100.0 Microns. *Applied Optics*, 1(4), 465-471.

41. İnternet: HyperPhysics. (n.d.). *Blackbody Radiation*. Georgia State University. URL 15: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/bbrc.html/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

42. İnternet: ON Semiconductor Corporation. (2015). *AR0134 1/3-Inch 1.2 Mp CMOS Digital Image Sensor with Global Shutter* (Rev. G, Publication order no. AR0134_DS). URL 16: https://www.onsemi.com/products/sensors/image-sensors/ar0134cs / Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

43. İnternet: Mikro Tasarım Ltd. Şti. (2024). *Broşür*. URL 17: https://www.mikro-tasarim.com.tr/wp-content/uploads/2024/11/brochure.pdf/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

44. İnternet: 3D PLUS S.A.S. (2022). CASPEX 4 Mpx Space Camera Head (3DCM734/3DCM739). URL 18: http://www.3d-plus.com/products/4mpx-space-camera-heads/ Son Erişim Tarihi: 24.08.2025.

45. Liu, X., Xing, F., Fan, S., You, Z. (2021). A compressed and high-accuracy star tracker with on-orbit deployable baffle for remote sensing cubesats. *Remote Sensing*, 13(13), 2503-2504.

46. Hashemi, M., Mashhadi, K. M., Fiuzy, M. (2019). Modification and hardware implementation of star tracker algorithms. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1524.

47. Öztürk, N., Başlar Z., Selimoğlu İ., Karcı, Ö. (2023). Signal-to-noise ratio model in Python for high-resolution space-borne electro-optic imagers. *Journal of Applied Remote Sensing*, 17(1), 014508-1,014508-17.

48. Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R., Galeb, R., Kress, B. C., McClain, S. C., Grant, A. J. B. (2000). *Optical imaging and aberrations.* Bellingham, WA: SPIE Press, 130-134.

49. Gross, H. (2007). *Aberration theory and correction of optical systems,* Vol. 3 (1st Edition). Weinheim: Wiley-VCH Press, 242-245.

50. Greivenkamp, J. E. (2004). *Field guide to geometrical optics*, (1st Edition). Washington: SPIE Press, 43-45.

51. Bentley, J., Olson, C. (2012). *Field guide to lens design*. (1st Edition). Bellingham, WA: SPIE Press, 27-30.

52. İnternet: Schott, A. G. (2023). Tie-42 radiation resistant optical glasses. URL 19: https://www. schott.com/shop/medias/schott-tie-42-radiation-resistant-optical-glasses-row.pdf. Son Erişim Tarihi: 04.08.2025.

53. İnternet: Schott AG. (n.d.). Optical glass–Downloads. SCHOTT. URL 20: https://www.schott.com/en-gb/products/optical-glass-p1000267/downloads Son Erişim Tarihi: 04.08.2025.

54. Siew, R. (2019). *Monte Carlo simulation and analysis in modern optical tolerancing*. (1st Edition). Bellingham, WA: SPIE Press, 1-4.

55. Yoder, P.,Vukobratovich, D. (Eds.). (2017). Opto-mechanical systems design: Fundamentals of optical design (Vol. 1, 1st ed.). Bellingham, WA: SPIE Press, 150-155.

56. Fest, E. (2013). *Stray light analysis and control*. (1st Edition). Bellingham, WA: SPIE Press, 85-88.

57. Crocherie, A., Pond, J., Gomez, F. D., Channon, K., Fantoni, F. (2021*).* Micro to macro scale simulation coupling for stray light analysis. *Optics Express,* 29(23), 37639-37652.

58. Breault, R. P. (1977,). Problems and techniques in stray radiation suppression. *In Stray Light Problems in Optical Systems* 107(2), 2-23.

59. Gross, H. (2007). *Aberration theory and correction of optical systems,* Vol.2 (1st Edition). Weinheim: Wiley-VCH Press, 820-840.

60. Xu, M., Shi, R., Shen, W. (2016, October). *Design of optics for compact star sensors*. In 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies, 301-307.

61. Zemax (2022), *OpticStudio User Manuel Version R2*, Zemax LLC Press, 1306-1309.

EKLER

EK-1 Zemax OpticStudio yazılımı kullanılarak Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimizasyon merit fonksiyon editörü

Merit Function Value : 9.64714498E-03
Constraints Merit Function: 1.00998345E-02
Sequential Merit Function : 8.95895487E-03

Largest 10 contributors:

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Ex	Ey	Target	Weight	Value	% Cont
4	MNCA	2	15							2.00000E+00	1.00000E+00	1.97879E+00	31.634
13	OPLT	12								1.00000E-01	1.00000E+00	1.19376E-01	26.395
1	EFFL		2							5.50000E+01	1.00000E+00	5.50076E+01	4.080
28	TRCX		2	0.00000	0.00000	0.94197	0.00000				0.00000E+00	9.69627E-02	-2.25115E-02 3.455
32	TRCX		3	0.00000	0.00000	0.70711	0.00000				0.00000E+00	1.55140E-01	1.51901E-02 2.517
76	TRCY		3	0.00000	0.50000	0.35355	0.61237				0.00000E+00	5.17135E-02	2.34398E-02 1.998
65	TRCX		2	0.00000	0.50000	0.94197	0.00000				0.00000E+00	3.23209E-02	-2.91887E-02 1.936
102	TRCX		1	0.00000	1.00000	0.94197	0.00000				0.00000E+00	3.23209E-02	2.84097E-02 1.834
6	MNEG	2	15	0.00000	0.00000						2.00000E+00	1.00000E+00	1.99494E+00 1.799
138	TRCX		3	0.00000	1.00000	0.94197	0.00000				0.00000E+00	3.23209E-02	2.61969E-02 1.559

Complete merit function:

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Ex	Ey	Target	Weight	Value	% Cont
1	EFFL		2							5.50000E+01	1.00000E+00	5.50076E+01	4.080
2	TTHI	2	16							0.00000E+00	0.00000E+00	1.05009E+02	0.000
3	OPLT	2								1.10000E+02	1.00000E+00	1.10000E+02	0.000
4	MNCA	2	15							2.00000E+00	1.00000E+00	1.97879E+00	31.634
5	MNCG	2	15							2.00000E+00	1.00000E+00	2.00000E+00	0.000
6	MNEG	2	15	0.00000	0.00000						2.00000E+00	1.00000E+00	1.99494E+00 1.799
7	MNEA	2	15	0.00000	0.00000						1.00000E+00	1.00000E+00	9.96991E-01 0.636
8	MXCT	2	15							1.00000E+01	1.00000E+00	1.00001E+01	0.000
9	CTGT	16								6.00000E+00	1.00000E+00	6.00000E+00	0.000
10	WFNO									0.00000E+00	0.00000E+00	1.25106E+00	0.000

EK-1 (devam) Zemax OpticStudio yazılımı kullanılarak Radyasyona dayanıklı cam kataloğu ile optimizasyon merit fonksiyon editörü

11 OPLT 10 1.10000E+00
0.00000E+00 1.25106E+00 0.000
12 DIMX 0 2 0.00000
1.00000E-01 0.00000E+00 1.19376E-01 0.000
13 OPLT 12 1.00000E-01
1.00000E+00 1.19376E-01 26.395
14 DMFS

15 Sequential merit function: RMS spot x+y centroid X Wgt = 1.0000 Y Wgt = 1.0000 GQ 3 rings 6 arms

EK-2 Zemax OpticStudio yazılımı kullanılarak Radyasyona dayanıklı koruma penceresi-standart cam kataloğu ile optimizasyon merit fonksiyon editörü

Merit Function Value : 4.49813921E-03
Constraints Merit Function: 2.58964626E-05
Sequential Merit Function : 7.01529048E-03

Largest 10 contributors:

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Ex	Ey	Target	Weight	Value	% Cont
41	TRCX		2	0.00000	0.00000	0.91138	0.00000				0.00000E+00	6.29648E-02	-1.61076E-02 5.283
49	TRCX		3	0.00000	0.00000	0.61700	0.00000				0.00000E+00	8.16664E-02	1.32310E-02 4.623
237	TRCX		1	0.00000	1.00000	0.90815	-0.37617				0.00000E+00	7.47544E-03	3.82004E-02 3.528
235	TRCX		1	0.00000	1.00000	0.84200	-0.34877				0.00000E+00	1.57412E-02	2.39468E-02 2.919
43	TRCX		2	0.00000	0.00000	0.98297	0.00000				0.00000E+00	2.99018E-02	-1.69859E-02 2.790
51	TRCX		3	0.00000	0.00000	0.78696	0.00000				0.00000E+00	8.16664E-02	1.01481E-02 2.720
161	TRCY		3	0.00000	0.50000	0.30116	0.72706				0.00000E+00	2.04166E-02	1.98460E-02 2.600
126	TRCX		2	0.00000	0.50000	0.84200	0.34877				0.00000E+00	1.57412E-02	-2.25759E-02 2.594
39	TRCX		2	0.00000	0.00000	0.78696	0.00000				0.00000E+00	8.16664E-02	-9.68400E-03 2.477
138	TRCX		2	0.00000	0.50000	0.84200	-0.34877				0.00000E+00	1.57412E-02	-2.18905E-02 2.439

Complete merit function:

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Ex	Ey	Target	Weight	Value	% Cont
1	EFFL		2							5.50000E+01	1.00000E+00	5.50000E+01	0.000
2	TTHI	4	18							0.00000E+00	0.00000E+00	1.03011E+02	0.000
3	OPLT	2								1.10000E+02	1.00000E+00	1.10000E+02	0.000
4	MNCA	4	17							2.00000E+00	1.00000E+00	1.99998E+00	0.000
5	MNCG	4	17							2.00000E+00	1.00000E+00	2.00000E+00	0.000
6	MNEG	4	17	0.00000	0.00000						2.00000E+00	1.00000E+00	1.99998E+00 0.000
7	MNEA	4	17	0.00000	0.00000						1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00 0.000
8	MXCT	4	17							1.00000E+01	1.00000E+00	1.00001E+01	0.001
9	CTGT	18								1.70000E+01	1.00000E+00	1.70000E+01	0.000

EK-2 (devam) Zemax OpticStudio yazılımı kullanılarak Radyasyona dayanıklı koruma penceresi- standart cam kataloğu ile optimizasyon merit fonksiyon editörü

11	OPLT	10				1.25000E+00
0.00000E+00	1.30964E+00	0.000				
12	DIMX	0	2	0.00000		
1.00000E-01	0.00000E+00	1.00031E-01	0.000			
13	OPLT	12				1.00000E-01
1.00000E+00	1.00031E-01	0.000				
14	CVVA	18				0.00000E+00
0.00000E+00	5.65594E-02	0.000				
15	RECI	14				0.00000E+00
0.00000E+00	1.76805E+01	0.000				
16	OPGT	15				3.00000E+01
0.00000E+00	1.76805E+01	0.000				
17	DMFS					

18 Sequential merit function: RMS spot x+y centroid X Wgt = 1.0000 Y Wgt = 1.0000 GQ 6 rings 8 arms

EK-3 Radyasyona dayanıklı koruma penceresi ve standart cam kataloğu ile yapılan tasarıma ait tolerans data editörü (Monte Carlo tolerans analiz iterasyonu)

Criterion : RMS Spot Radius in Millimeters
Mode : Sensitivities
Sampling : 6
Optimization Cycles : 3
Nominal Criterion : 0.00992033
Test Wavelength : 0.6328

Fields: User Defined Angle in degrees

#	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY
1	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000E+00	6.500E+00	1.000E+00	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000E+00	1.300E+01	1.000E+00	0.000	0.000	0.000	0.000

Sensitivity Analysis:

				---------- ---- Minimum ---- ----------			---------- ---- Maximum ----------		
Type		Value	Criterion	Change	Value	Criterion	Change
TRAD	4	1	-0.50000000	0.01029949	0.00037916	0.50000000	0.01015829	0.00023796
TRAD	5	1	-1.00000000	0.01005712	0.00013679	1.00000000	0.01015132	0.00023099
TRAD	6	1	-0.50000000	0.01036349	0.00044315	0.50000000	0.01022892	0.00030858
TRAD	8	1	-1.00000000	0.00995567	3.5344E-05	1.00000000	0.00997766	5.7333E-05
TRAD	9	1	-1.00000000	0.01079047	0.00087014	1.00000000	0.01086478	0.00094445
TRAD	11	1	-0.50000000	0.01072391	0.00080358	0.50000000	0.01077466	0.00085433
TRAD	12	1	-0.50000000	0.01105234	0.00113201	0.50000000	0.01094052	0.00102019
TRAD	13	1	-1.00000000	0.01019080	0.00027047	1.00000000	0.01010276	0.00018243
TRAD	14	1	-0.50000000	0.01042392	0.00050359	0.50000000	0.01034753	0.00042720
TRAD	15	1	-0.10000000	0.01002080	0.00010046	0.10000000	0.00995976	3.9427E-05
TRAD	16	1	-1.00000000	0.01020308	0.00028275	1.00000000	0.01030196	0.00038163
TRAD	17	1	-0.50000000	0.01027704	0.00035671	0.50000000	0.01015511	0.00023478
TEZI	7		-0.00010000	0.00992085	5.1752E-07	0.00010000	0.00991983	-5.0263E-07
TTHI	2	2	-0.05000000	0.00992033	3.1468E-15	0.05000000	0.00992033	2.0470E-16
TTHI	3	3	-0.10000000	0.00992033	-3.9604E-15	0.10000000	0.00992033	4.0783E-15

EK-3 (devam) Radyasyona dayanıklı koruma penceresi ve standart cam kataloğu ile yapılan tasarıma ait tolerans data editörü (Monte Carlo tolerans analiz iterasyonu)

TTHI	4	4	-0.05000000	0.00992089	5.5747E-07	0.05000000
0.00992418	3.8477E-06					
TTHI	5	5	-0.10000000	0.00993883	1.8496E-05	0.10000000
0.00992827	7.9438E-06					
TTHI	6	6	-0.05000000	0.00992181	1.4798E-06	0.05000000
0.00994281	2.2478E-05					
TTHI	7	7	-0.10000000	0.01069764	0.00077731	0.10000000
0.01073310	0.00081277					
TTHI	8	8	-0.05000000	0.01001094	9.0608E-05	0.05000000
0.01001843	9.8098E-05					
TTHI	9	9	-0.10000000	0.01039136	0.00047103	0.10000000
0.01039293	0.00047259					
TTHI	10	10	-0.10000000	0.01039812	0.00047779	0.10000000
0.01038944	0.00046911					
TTHI	11	11	-0.05000000	0.00997858	5.8245E-05	0.05000000
0.00999108	7.0748E-05					
TTHI	12	12	-0.10000000	0.01024075	0.00032042	0.10000000
0.01023992	0.00031959					
TTHI	13	13	-0.05000000	0.00994689	2.6558E-05	0.05000000
0.00994651	2.6179E-05					
TTHI	14	14	-0.10000000	0.00990077	-1.9562E-05	0.10000000
0.00995184	3.1506E-05					
TTHI	15	15	-0.05000000	0.01007499	0.00015466	0.05000000
0.01018405	0.00026372					
TTHI	16	16	-0.10000000	0.01102623	0.00110590	0.10000000
0.01125691	0.00133658					
TTHI	17	17	-0.05000000	0.01026230	0.00034197	0.05000000
0.01042088	0.00050054					
TEDX	4	5	-0.07000000	0.01016278	0.00024245	0.07000000
0.01016278	0.00024245					
TEDY	4	5	-0.07000000	0.01011186	0.00019153	0.07000000
0.01019969	0.00027936					
TETX	4	5	-0.09000000	0.01016030	0.00023997	0.09000000
0.01006025	0.00013991					
TETY	4	5	-0.09000000	0.01012107	0.00020073	0.09000000
0.01012107	0.00020073					
TEDX	6	7	-0.03500000	0.01014384	0.00022351	0.03500000
0.01014384	0.00022351					
TEDY	6	7	-0.03500000	0.01027841	0.00035808	0.03500000
0.01028971	0.00036938					
TETX	6	7	-0.07000000	0.01040504	0.00048471	0.07000000
0.01024195	0.00032162					
TETY	6	7	-0.07000000	0.01017509	0.00025476	0.07000000
0.01017509	0.00025476					
TEDX	8	9	-0.03500000	0.01004902	0.00012868	0.03500000
0.01004902	0.00012868					
TEDY	8	9	-0.03500000	0.01004167	0.00012134	0.03500000
0.01008443	0.00016410					
TETX	8	9	-0.09500000	0.01105736	0.00113703	0.09500000
0.01124838	0.00132805					
TETY	8	9	-0.09500000	0.01059689	0.00067656	0.09500000
0.01059689	0.00067656					

EK-3 (devam) Radyasyona dayanıklı koruma penceresi ve standart cam kataloğu ile yapılan tasarıma ait tolerans data editörü (Monte Carlo tolerans analiz iterasyonu)

TEDX	11	12	-0.07000000	0.00994232	2.1994E-05	0.07000000
0.00994232	2.1994E-05					
TEDY	11	12	-0.07000000	0.00994959	2.9264E-05	0.07000000
0.00995830	3.7970E-05					
TETX	11	12	-0.17000000	0.00994508	2.4752E-05	0.17000000
0.01000188	8.1550E-05					
TETY	11	12	-0.17000000	0.00993115	1.0824E-05	0.17000000
0.00993115	1.0824E-05					
TEDX	13	14	-0.03500000	0.01033865	0.00041832	0.03500000
0.01033865	0.00041832					
TEDY	13	14	-0.03500000	0.01054627	0.00062594	0.03500000
0.01051285	0.00059252					
TETX	13	14	-0.07000000	0.01016996	0.00024963	0.07000000
0.01024583	0.00032550					
TETY	13	14	-0.07000000	0.01015733	0.00023700	0.07000000
0.01015733	0.00023700					
TEDX	15	16	-0.03500000	0.01014169	0.00022136	0.03500000
0.01014169	0.00022136					
TEDY	15	16	-0.03500000	0.01046087	0.00054054	0.03500000
0.01019745	0.00027711					
TETX	15	16	-0.07000000	0.01017406	0.00025373	0.07000000
0.01028814	0.00036781					
TETY	15	16	-0.07000000	0.01015010	0.00022977	0.07000000
0.01015010	0.00022977					
TEDX	17	18	-0.03500000	0.01008538	0.00016505	0.03500000
0.01008538	0.00016505					
TEDY	17	18	-0.03500000	0.01015931	0.00023898	0.03500000
0.01037046	0.00045013					
TETX	17	18	-0.20000000	0.01073908	0.00081875	0.20000000
0.01048643	0.00056610					
TETY	17	18	-0.20000000	0.01026095	0.00034062	0.20000000
0.01026095	0.00034062					
TSTX	2		-0.05100000	0.00993338	1.3049E-05	0.05100000
0.00991479	-5.5453E-06					
TSTY	2		-0.05100	0.00992320	2.8677E-06	0.05100000
0.00992320	2.8677E-06					
TSTX	3		-0.05100000	0.00991479	-5.5428E-06	0.05100000
0.00993338	1.3054E-05					
TSTY	3		-0.05100000	0.00992320	2.8677E-06	0.05100000
0.00992320	2.8677E-06					
TSTX	4		-0.05100000	0.01008316	0.00016283	0.05100000
0.01002745	0.00010712					
TSTY	4		-0.05100000	0.01005474	0.00013441	0.05100000
0.01005474	0.00013441					
TSTX	5		-0.05100000	0.00994302	2.2690E-05	0.05100000
0.00994153	2.1200E-5					
TSTY	5		-0.05100000	0.00993698	1.6646E-05	0.05100000
0.00993698	1.6646E-05					
TSTX	6		-0.05100000	0.00998687	6.6543E-05	0.05100000
0.00995438	3.4047E-05					

EK-3 (devam) Radyasyona dayanıklı koruma penceresi ve standart cam kataloğu ile yapılan tasarıma ait tolerans data editörü (Monte Carlo tolerans analiz iterasyonu)

TSTY	6	-0.05100000	0.00992985	9.5199E-06	0.05100000	
0.00992985	9.5199E-06					
TSTX	8	-0.05100000	0.01051160	0.00059127	0.05100000	
0.01064700	0.00072667					
TSTY	8	-0.05100000	0.01041963	0.00049930	0.05100000	
0.01041963	0.00049930					
TSTX	9	-0.05100000	0.01005932	0.00013899	0.05100000	
0.01002788	0.00010754					
TSTY	9	-0.05100000	0.01002937	0.00010904	0.05100000	
0.01002937	0.00010904					
TSTX	11	-0.05100000	0.01052643	0.00060610	0.05100000	
0.01059838	0.00067805					
TSTY	11	-0.05100000	0.01019408	0.00027375	0.05100000	
0.01019408	0.00027375					
TSTX	12	-0.05100000	0.01083842	0.00091809	0.05100000	
0.01077298	0.00085264					
TSTY	12	-0.05100000	0.01032508	0.00040475	0.05100000	
0.01032508	0.00040475					
TSTX	13	-0.05100000	0.01012084	0.00020051	0.05100000	
0.01019327	0.00027294					
TSTY	13	-0.05100000	0.01005245	0.00013212	0.05100000	
0.01005245	0.00013212					
TSTX	14	-0.01700000	0.01002873	0.00010840	0.01700000	
0.01002165	0.00010132					
TSTY	14	-0.01700000	0.00999467	7.4338E-05	0.01700000	
0.00999467	7.4338E-05					
TSTX	15	-0.05100000	0.01005000	0.00012967	0.05100000	
0.01025727	0.00033694					
TSTY	15	-0.05100000	0.01006942	0.00014909	0.05100000	
0.01006942	0.00014909					
TSTX	16	-0.05100000	0.01036565	0.00044532	0.05100000	
0.01025993	0.00033960					
TSTY	16	-0.05100000	0.01021989	0.00029956	0.05100000	
0.01021989	0.00029956					
TSTX	17	-0.05100000	0.01026973	0.00034940	0.05100000	
0.01044515	0.00052482					
TSTY	17	-0.05100000	0.01022070	0.00030037	0.05100000	
0.01022070	0.00030037					
TSTX	18	-0.05100000	0.01036353	0.00044319	0.05100000	
0.01017338	0.00025305					
TSTY	18	-0.05100000	0.01012485	0.00020452	0.05100000	
0.01012485	0.00020452					
TIRR	2	-1.00000000	0.00992805	7.7201E-06	1.00000000	
0.00991321	-7.1234E-06					
TIRR	3	-1.00000000	0.00991313	-7.2049E-06	1.00000000	
0.00992805	7.7193E-06					
TIRR	4	-1.00000000	0.00993329	1.2962E-05	1.00000000	
0.00990804	-1.2295E-05					
TIRR	5	-1.00000000	0.00990909	-1.1242E-05	1.00000000	
0.00993273	1.2397E-05					
TIRR	6	-1.00000000	0.00993644	1.6114E-05	1.00000000	
0.00990537	-1.4961E-0					

EK-3 (devam) Radyasyona dayanıklı koruma penceresi ve standart cam kataloğu ile yapılan tasarıma ait tolerans data editörü (Monte Carlo tolerans analiz iterasyonu)

TIRR 8	-1.00000000	0.00994269	2.2355E-05	1.00000000	0.00990445 -1.5882E-05
TIRR 9	-1.00000000	0.00989859	-2.1741E-05	1.00000000	0.00994737 2.7035E-05
TIRR 11	-1.00000000	0.00993922	1.8890E-05	1.00000000	0.00990545 -1.4886E-05
TIRR 12	-1.00000000	0.00990847	-1.1861E-05	1.00000000	0.00993441 1.4083E-05
TIRR 13	-1.00000000	0.00992931	8.9744E-06	1.00000000	0.00991246 -7.8740E-06
TIRR 14	-1.00000000	0.00991344	-6.8869E-06	1.00000000	0.00992820 7.8730E-06
TIRR 15	-1.00000000	0.00992853	8.2013E-06	1.00000000	0.00991290 -7.4340E-06
TIRR 16	-1.00000000	0.00991534	-4.9887E-06	1.00000000	0.00992628 5.9448E-06
TIRR 17	-1.00000000	0.00992600	5.6702E-06	1.00000000	0.00991525 -5.0807E-06
TIRR 18	-1.00000000	0.00991599	-4.3437E-06	1.00000000	0.00992502 4.6925E-06
TIND 2	-0.00100000	0.00992033	4.8225E-16	0.00100000	0.00992033 -2.4564E-15
TIND 4	-0.00100000	0.00991678	-3.5460E-06	0.00100000	0.00994177 2.1435E-05
TIND 6	-0.00100000	0.00993128	1.0949E-05	0.00100000	0.00996046 4.0131E-05
TIND 8	-0.00100000	0.00994529	2.4956E-05	0.00100000	0.00991866 -1.6743E-06
TIND 11	-0.00100000	0.00992115	8.2334E-07	0.00100000	0.00992475 4.4228E-06
TIND 13	-0.00100000	0.00997502	5.4691E-05	0.00100000	0.01001166 9.1328E-05
TIND 15	-0.00100000	0.00993477	1.4437E-05	0.00100000	0.00997341 5.3077E-05
TIND 17	-0.00100000	0.00993056	1.0227E-05	0.00100000	0.00991694 -3.3885E-06
TABB 2	-0.63583786	0.00992033	-9.2114E-16	0.63583786	0.00992033 -2.5795E-15
TABB 4	-0.63389699	0.00993730	1.6967E-05	0.63389699	0.00993998 1.9650E-05
TABB 6	-0.58634330	0.00995371	3.3381E-05	0.58634330	0.00992827 7.9439E-06
TABB 8	-0.25359729	0.01009779	0.00017746	0.25359729	0.01010769 0.00018736
TABB 11	-0.58517773	0.00992098	6.4747E-07	0.58517773	0.00992006 -2.7218E-07
TABB 13	-0.68398667	0.00993885	1.8522E-05	0.68398667	0.00992971 9.3838E-06
TABB 15	-0.52270764	0.00996497	4.4640E-05	0.52270764	0.00991564 -4.6930E-06

EK-3 (devam) Radyasyona dayanıklı koruma penceresi ve standart cam kataloğu ile yapılan tasarıma ait tolerans data editörü (Monte Carlo tolerans analiz iterasyonu)

TABB 17 -0.23779912 0.00991725 -3.0775E-06 0.23779912 0.00995242 3.2085E-05 Estimated Performance Changes based upon Root-Sum-Square method:

Nominal RMS Spot Radius : 0.00992033
Estimated change : 0.00373887
Estimated RMS Spot Radius : 0.01365920

Number of traceable Monte Carlo files generated: 10.000

Nominal	0.00992033		
Best	0.01038162	Trial	10
Worst	0.02210472	Trial	48
Mean	0.01401262		
Std Dev	0.00270368		

90% >	0.016
80% >	0.014
50% >	0.013
20% >	0.011
10% >	0.010



Gazili olmak ayrıcalıktır