ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAÇAK IŞINLARIN ANALİZİ, İSTENMEYEN ETKİLERİNİN YAZILIM DESTEKLİ PRATİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİYLE GİDERİLMESİ VE YAZILIM MODELİNİN ÜRETİLEN PROTOTİPLER ÜZERİNDEN ALINAN ÖLÇÜMLERLE DOĞRULANMASI

Selçuk SEYHUN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2012

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Selçuk SEYHUN tarafından hazırlanan "Kaçak Işınların Analizi, İstenmeyen Etkilerinin Yazılım Destekli Pratik Çözüm Yöntemleriyle Giderilmesi ve Yazılım Modelinin Üretilen Prototipler Üzerinden Alınan Ölçümlerle Doğrulanması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin SARI

Jüri Üyeleri :

Doç. Dr. Mehmet BAYAT
Gazi Üniversitesi, Fizik Bölümü

Prof. Dr. Mehmet Kabak
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Hüseyin SARI
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Özer KOLSARICI

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KAÇAK IŞINLARIN ANALİZİ, İSTENMEYEN ETKİLERİNİN YAZILIM DESTEKLİ PRATİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİYLE GİDERİLMESİ VE YAZILIM MODELİNİN ÜRETİLEN PROTOTİPLER ÜZERİNDEN ALINAN ÖLÇÜMLERLERLE DOĞRULANMASI

Selçuk SEYHUN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin SARI

Opto-mekanik yapılar, diğer adıyla objektifler, görüş alanı içerisinde yer alan bölgeden gelen fotonları algılayıcı üzerine aktarma görevini üstlenirler. Bu çalışmada geniş açılı görüntüleme yapan objektiflerin mekanik yapılarından kaynaklanan saçılmalar ele alınmıştır. Saçılmaların kaynakları tanımlanarak, bu kaynaklardan meydana gelen saçılmaların özellikle görüntüleme amaçlı olmayan lazer arayıcı başlık gibi alt sistemlerdeki performans düşürücü etkileri gösterilmiştir. Bu etkilerin engellenebilmesi için prototip üretimler yapılması yerine bilgisayar modelleri ile bu etkilerin belirlenebileceği ve engellenebilmesi için alınacak önlemlerin yine bilgisayar ortamında yapılabileceği gösterilmiştir. Bilgisayar modellerinin gerçek ürün ile uyumlu sonuçlar verdiğinin gösterilmesi amacı ile deneme üretimleri yaptırılarak deneysel ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre opto-mekanik yapılarda meydana gelen kaçak ışınların üretim öncesi bilgisayar modelleri ile oldukça gerçekçi bir şekilde tespit edilebilmeleri ve giderilmeleri için gerekli düzeltmelerin yapılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu sayede önemli ölçüde zaman, işgücü ve maliyet kazanımı sağlanabilmektedir.

Eylül 2012, 90 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kaçak Işınlar, Perde, Saçılmalar, Sekmeler, Hayaletler, Opto-mekanik sistem tasarımı

ABSTRACT

Master Thesis

A STUDY ON ANALYSIS OF STRAY LIGHT, REDUCTION OF UNWANTED STRAY LIGHT EFFECTS WITH SOFTWARE AIDED PRACTICAL APPLICATIONS AND VERIFICATION OF SOFTWARE MODEL WITH MEASUREMENTS FROM MANUFACTURED PROTOTYPES

Selçuk SEYHUN

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin SARI

Opto-mechanical structures (objectives) are employed to transfer photons which are collected from their field of view (FOV) to the detector plane. This work, mainly concentrates on stray light caused by inner mechanical structure of large FOV objectives. Sources of stray light are defined and unwanted, performance decreasing effects of stray light are shown in non-imaging applications like LASER seeker heads for missiles. It is shown that, instead of manufacturing expensive prototypes computer simulations can be used to identify and also take necessary precautions to prevent or decrease stray light before production. In order to present effectiveness of computer models actual protype objectives are manufectured and tested. According to data accusation results, stray light caused in opto-mechanical structures can be quite realisticly identified and prevented using computer models. This prevents loss of significant amount of time, work and cost.

September 2012, 90 pages

Key Words: Stray Light, Baffle, Bounces, Ghosts, Scattering, Opto-mechanical system design

TEŞEKKÜR

Beni yetiştiren ailem, bütün öğretmenlerim, benim ben olmam oyununda sahne alan herkes; iyi ki varsınız. Hepinize sonsuz teşekkürler…

"You hold onto friends by keeping your heart a little softer than your head."
(Star Wars - The Clone Wars – Season I – Episode 7)

Selçuk SEYHUN

Ankara, Eylül 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
TEŞEKKÜR ..... **iii**
SİMGELER DİZİNİ ..... **vi**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **vii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **x**
1. GİRİŞ **1**
2. KAPSAM **2**
3. KURAMSAL TEMELLER **3**
3.1 Kaçak Işın **3**
3.1.1 Farklı dalgaboylarındaki ışıkların optik olarak filtrelenmesi **4**
3.1.2 Yansıma önleyici kaplamaların kullanılması **5**
3.1.3 Mekanik yapıdan kaynaklanan yansıma ve saçılmaların engellenmesi **7**
3.1.4 Sekmeler ve hayaletler **9**
3.1.5 Yapısal saçılma **18**
3.1.6 Düşük ışın seviyesinde kullanılan sistemler **19**
3.2 Saçılmaların Çeşitleri **20**
3.2.1 Rayleigh saçılması **20**
3.2.2 Mie saçılması **21**
4. METOD VE YÖNTEMLER **22**
4.1 Modelleme ve Analiz Teknikleri **22**
4.1.1 Hayalet analizi **22**
4.1.2 Saçılma yönü analizi **23**
4.1.3 Saçılmaların modellenmesi **24**
4.1.4 Gizli parıldama **25**
4.1.5 Temizlik **25**
4.2 Baskı Altına Alma Teknikleri **27**
4.2.1 Üç sekme kuralı **27**
4.2.2 Dişler ve perdeler **27**
5. BİLGİSAYAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI **29**
5.1 Optik Tasarım **29**
5.1.1 Pozisyon bulucu dört dilimli algılayıcılar **29**
5.1.2 Geniş görüş açısına sahip arayıcı optik tasarımı **32**
5.1.3 Dar bant geçirgen filtrenin modellenmesi **35**
5.1.4 Optik tasarım **38**
5.1.5 Optik tasarımın vignetting performansı **38**
5.2 Objektif Ham Maddesinin Belirlenmesi **40**

5.3 Objektif İçi Perde Tasarımının Yapılması 44
5.3.1 En verimli perde geometrisi 49
5.3.2 Perde profili tasarımı 52
5.3.3 Diş profilleri 53
5.4 Bilgisayar Modelinin Oluşturulması ve Değerlendirilmesi 54
6. DENEYSEL DOĞRULAMA TESTLERİ 69
6.1 Test Düzeneği 70
6.1.1 1064 nm lazer kaynağı 71
6.1.2 Enerji sönümlendiriciler 72
6.1.3 Demet büyültücü 73
6.2 Test Sonuçları 76
7. SONUÇ VE TARTIŞMA 80
KAYNAKLAR 82
EKLER 83
EK 1 83
EK 2 84
EK 3 89
ÖZGEÇMİŞ 90

SİMGELER DİZİNİ

AR	Yansıma Önleyici *(Anti-Reflective)*
BRDF	Çift Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu *(Bidirectional Reflectance Distribution Function)*
CAM	Bilgisayar Destekli Üretim *(Computer Aided Manufacturing)*
DBC	Çift Yansıma Kombinasyonları *(Double Bounce Combinations)*
IR	Kızılötesi *(Infrared)*
LAZER	Uyarılmış Işıma ile Işık Yükseltilmesi *(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)*
LWIR	Uzun Dalga Kızılötesi *(Long Wave Infrared)*
MWIR	Orta Dalga Kızılötesi *(Middle Wave Infrared)*
NIR	Yakın Kızılötesi *(Near Infrared)*
NUC	Homojen olmayan dağılımların düzeltilmesi *(Nonuniformity Correction)*
TİY	Tam İç Yansıma *(Total Internal Reflection)*

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Cassegrain bir teleskop içerisinde meydana gelen kaçak ışınlar 3
Şekil 3.2 Çeşitli algılayıcıların dalgaboyuna bağlı algılayıcılıkları 4
Şekil 3.3 1064 nm dar bant geçirgen filtre (Iridian Spectral Technologies) 5
Şekil 3.4 1064 nm dar bant geçirgen filtreler 5
Şekil 3.5 Yansıma önleyici kaplamaların işleyiş mekanizması 6
Şekil 3.6 1064 nm dalgaboyunda V tipi yansıma önleyici kaplama 7
Şekil 3.7 Görüntüleme sistemlerinin görüş alanları 7
Şekil 3.8 Odak uzaklığına bağlı olarak görüş alanının değişmesi 8
Şekil 3.9 Kaçak ışınların azaltılması için kullanılan parasoley 9
Şekil 3.10 İki alan ışınlarının ideal odaklanması 10
Şekil 3.11 Çift yansıma kaçak ışınları: Bu örnekte odak düzlemi üzerinde odaklama olmadığından sorun teşkil etmiyor 10
Şekil 3.12 MgF_2 kaplamanın optik özellikleri (Materion Resource Center) 11
Şekil 3.13 Dijital kamerada oluşan saçılma izleri 12
Şekil 3.14 Orta dalga kızılötesi görüntüleme sistemlerinde kullanılan camlar 13
Şekil 3.15 Örnek kızılötesi mercek tasarımı 14
Şekil 3.16 Narcissus etkisi örneği 15
Şekil 3.17 Narcissus önleyici tasarım 17
Şekil 3.18 Geniş görüş açısına sahip mercek sistemleri 19
Şekil 4.1 Çok geniş açıda ışın göndererek TİY analizi yapılması 24
Şekil 4.2 Objektif üzerindeki tozlardan ötürü meydana gelen gizli parıldama 26
Şekil 4.3 Namlu içerisindeki perde yapısı örnekleri 28
Şekil 5.1 Bilgisayar modeli oluşturulan sistem 29
Şekil 5.2 Dört dilimli algılayıcı 29
Şekil 5.3 Algılayıcı üzerindeki lazer beneğinden ışığın açısal konumunun bulunması 30
Şekil 5.4 Lazer geliş açısına karşı sapma sinyali grafiği 31
Şekil 5.5 Lazer benek nüyüklüğüne bağlı olarak görüş alanı değişimi 31
Şekil 5.6 OSI Optoelectronics firmasının PIN-100-YAG model numaralı dört dilimli algılayıcısı 32
Şekil 5.7 Pyrex camının dalgaboyuna bağlı geçirgenlik değerleri 33
Şekil 5.8 RG850 camı 33

Şekil 5.9 RG850 camının dalgaboyuna karşı gerçirgenlik eğrisi 34
Şekil 5.10 BK7 camı dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği 35
Şekil 5.11 NB-1064-20 nm filtresi 36
Şekil 5.12 Pelkin Elmer Lambda 950 spektrofotometre cihazı 36
Şekil 5.13 Optik tasarım 38
Şekil 5.14 Yitirilen ışınlar 39
Şekil 5.15 Algılayıcı üzerinde görüş alanı ve toplam görüş alanı sınırlarında benek görünüşleri 39
Şekil 5.16. Ametal numuneler 41
Şekil 5.17 CAM tezgahı 41
Şekil 5.18 Ürettirilen numuneler 42
Şekil 5.19 Pelkin Elmer Lambda 950 spektrofotometre cihazı 42
Şekil 5.20 Ürettirilen numunelerin dalgaboyuna karşı yansıtıcılık değerleri 43
Şekil 5.21 Farklı perde konfigürasyonlarına ait katı modeller 44
Şekil 5.22 Objektif prototipi katı modeli 45
Şekil 5.23 Perde analizi Zemax modeli 45
Şekil 5.24 Farklı perde konfigürasyonlarında dedektör üzerine düşen kaçak ışınlar 46
Şekil 5.25 Namlu içerisindeki perde sıklığının saçılma azaltılmasına etkisi 47
Şekil 5.26 Dağınık ve speküler yansımalı perdelerin karşılaştırılması 48
Şekil 5.27 Bir optik sistemin namlusu ve marjinal ışın konumları 50
Şekil 5.28 Tipik perde profili 52
Şekil 5.29 İdeal ve gerçek diş profilleri 53
Şekil 5.30 İdeal ve gerçek dış katı modelleri 54
Şekil 5.31 Optik tutucu mekanik bütünün katı modeli 55
Şekil 5.32 Kubbe ile filtre arasındaki Aralayıcı-01'in farklı perde yükseklik/sıklık oranlarına sahip tasarımları 56
Şekil 5.33 Filtre ile mercek arasındaki Aralayıcı-02'in farklı perde yükseklik/sıklık oranlarına sahip tasarımları 57
Şekil 5.34 Mercek ile algılayıcı arasındaki Aralayıcı-03'ün farklı perde yükseklik/sıklık oranlarına sahip tasarımları 58
Şekil 5.35 Zemax sıralı kipe aktarılan opto-mekanik tasarım 59
Şekil 5.36 Dört dilimli algılayıcının dalgaboyuna karşı yansıtıcılık grafiği 60

Şekil 5.37 Sıralı olmayan kipteki Zemax modeli 61
Şekil 5.38 Objektife karşıdan gelen ışınların üzerinde oluşturduğu lazer spotu 61
Şekil 5.39 Dört dilimli algılayıcı dilim notasyonları 64
Şekil 5.40 Işıma geliş açısına karşı sapma sinyali grafiği 64
Şekil 5.41 Perdeli modellerin sıralı olmayan kip analizleri 65
Şekil 5.42 Bilgisayar modeli analiz sonuçları 66
Şekil 5.43 Artan perde sıklığına karşı görüş alanı grafiği 67
Şekil 6.1 Deneysel testler için üretimi gerçekleştirilen parçalar 69
Şekil 6.2 Test düzeneği 70
Şekil 6.3 İki eksenli gimbal üzerine takılı test objektifi 70
Şekil 6.4. 1064 nm lazer kaynağı 71
Şekil 6.5. Dalgaboyuna karşı atmosferik geçirgenlik 71
Şekil 6.6. 0,1 Optik yoğunluklu ND Filtre 72
Şekil 6.7 Demet büyültücü 73
Şekil 6.8. Demet büyültücü çeşitleri 74
Şekil 6.9 Lazer ışıma kaynağı ve demet büyültücü 75
Şekil 6.10 Deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması 77
Şekil 6.11 Artan perde sıklığına karşı görüş alanı grafiği (deneysel) 79
Şekil 7.1. Kubbe tutucu teknik çizimi 84
Şekil 7.2. Yan gövde teknik çizimi 85
Şekil 7.3. Kubbe ile filtre arasında kalan aralayıcı 86
Şekil 7.4. Filtre ile mercek arasında kalan aralayıcı 87
Şekil 7.5. Mercek ile algılayıcı arasında kalan aralayıcı 88
Şekil 7.6. Algılayıcı sistemin optik tasarımı 89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 RG850 camının özellikleri 34
Çizelge 5.2 BK7 camının özellikleri 35
Çizelge 5.3 Dar bant geçirgen optik filtenin ışıma geliş açısına bağlı geçirgenliği 37
Çizelge 5.4 Işıma geliş açısına bağlı algılayıcıya foton aktarılma yüzdesi 40
Çizelge 5.5 Kullanılan mühendislik plastiklerinin teknik özellikleri 43
Çizelge 5.6 Artan perde sayısına göre dedektöre düşen ışıma miktarındaki değişimin normalize edilmiş sonuçları 47
Çizelge 5.7 Bilgisayar modelinin analiz sonuçları 62
Çizelge 5.8 Işıma geliş açısına bağlı olarak algılayıcı üzerinde elde edilen ışıma..... 63
Çizelge 5.9 Bilgisayar modeli test senaryoları 66
Çizelge 5.10 Her test için elde edilen kullanılabilir FOV ve h/p oranları 67
Çizelge 6.1 EO-Kule'de kullanılan ND filtreler..... 73
Çizelge 6.2 Perdesiz aralayıcıların kullanıldığı objektif ile elde edilen çıktılar..... 76
Çizelge 6.3 Deneysel ölçüm ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması 78
Çizelge 6.4 Deneysel ölçümlerle elde edilen kullanılabilir FOV ve h/p oranları..... 78

1. GİRİŞ

Kaçak ışınlar, optik sistemlerde algılayıcılar tarafından algılanan istenmeyen sinyalleri ifade eden bir tanımlamadır. Kaçak ışınları azaltabilmek için öncelikle bu ışınların nedenlerinin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi gerekir. Kaçak ışınlar kimi zaman optik elemanlardaki kusurlardan, saçılmalardan ve geri yansımalardan, kimi zaman da mekanik yüzeylerdeki iç saçılmalardan meydana gelmektedir.

Optik tasarım yaparken kullanılan birçok yazılım mevcuttur. Bu yazılımların çoğu tasarım yapmaya yardımcı olmanın yanında yapılmış tasarımların kaçak ışın analizlerinin de yapılmasına olanak veren özelliklere sahiptirler.

Bu çalışmanın ilk bölümünde kaçak ışınların opto-mekanik yapıdan kaynaklandığı durumlar ağırlıklı olarak ele alınmış ve bilgisayar destekli pratik yaklaşımlarla tasarım sürecine olumlu katkılar sağlanabileceği gösterilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, bilgisayar destekli tasarım modelinin doğrulanması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan optik ve mekanik bileşenler üretilerek, testler yapılmış ve bilgisayar destekli tasarım iyileştirme çalışmalarının gerçeğine oldukça yakın çıktılar sağlayabileceği gösterilmiştir.

Bilgisayar destekli modellerin, optik sistemlerde, kaçak ışınlardan kaynaklanan ölçüm hatalarının önlenmesindeki etkin kullanımı önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar, çok sayıda prototip üretilmesi için tasarım, üretim, test faaliyetleri için harcanan işçilik sürelerinde ve maliyetlerinde büyük oranda azalmalar sağlanması olarak özetlenebilir.

2. KAPSAM

Kaçak ışık analizleri 1064 nm dalgaboyunda görüntüleme yapan bir elektro-optik sistemin performansının iyileştirmesi için yapılmıştır. Söz konusu sistem optik elemanlardan bu elemanların dizildiği bir optik namludan, toplanan ışınları algılayan bir algılayıcıdan, sinyal okuma/işleme donanımı ve yazılımından oluşmaktadır. Bu elektro-optik sistemin bileşenleri tez içerisinde ayrıntılı bir biçimde tanımlanmıştır.

Kuramsal temellerin ifade edilmesinin ardından bu sistem öncelikle sanal ortamda oluşturulmuştur. Optik, mekanik ve algılayıcı bileşenlerin ayrıntılarının başarılı bir biçimde tanımlanması sayesinde başarılı bilgisayar modellemelerinin yapılabilmesi mümkündür. Oluşturulan modelde kaçak ışınların istenmeyen etkilerinin gösterilmesinin ardından yine bilgisayar ortamında bu etkilerin nasıl giderilebileceği gösterilmiştir.

Elde edilen modelleme sonuçlarının doğrulanabilmesi açısından deneysel bir çalışmanın gerçekleştirilmesi zorunludur. Bu sebeple uygun bir mekanik gövde üretimi ve optik bileşenlerinin tedarikinin ardından tasarım doğrulama prototipi üretilmiştir. Uygun bir test ortamında prototipten ölçümler alınarak, modellemede öngörülen performans artışının ne derecede sağlanabileceği gösterilmiştir.

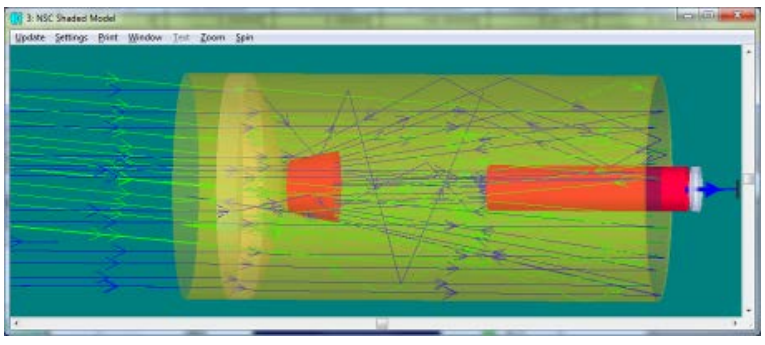
3. KURAMSAL TEMELLER

3.1 Kaçak Işın

Bir optik tasarım, ne kadar önlem alınırsa alınsın dedektör üzerine bir miktar istenmeyen ışığın düşeceği prensibine dayanır. Bu istenmeyen ışık kaçak ışın olarak isimlendirilir.Bir optik sistemde, kaçak ışınlara neden olan, saçılma problemlerini çözebilmek için problemin kaynağının tanımlanabilmesi gerekir. İdeal şartlar söz konusu olsaydı, tasarımcı sistemi her yönüyle modelleyerek daha üretim aşamasına geçilmeden sistem gereksinimlerini sağlayacak bir ürünü tasarlayabilirdi. Fakat bu kadar detaylı modellemeler çok uzun süreler gerektirirler ve sonuçları da yanıltıcı olabilir. Kaçak ışın modellerini yorumlayabilmek için azami dikkat sarfedilmesi gerekir. Bu konuya modelleme ve analiz çalışmaları sırasında değinilecektir. Kaçak ışınların sorun olarak ortaya çıkmasının beklendiği sistemlerde her zaman belli miktarda deneysel çalışmanın da yapılması gerekir. Bu tür hata düzeltme ve değerlendirme çalışmaları optik sistemlerin üretiminde alışılagelmiş bir uygulamadır.

Dedektöre ulaşan kaçak ışınlar optik sistemin dinamik çalışma aralığı üzerinde sınırlayıcı bir etkiye sahiptir. Bir bakıma bu Sinyal/Gürültü oranı veya kontrast oranı gibi fikirlerle benzerdir. Kaçak ışınlar;

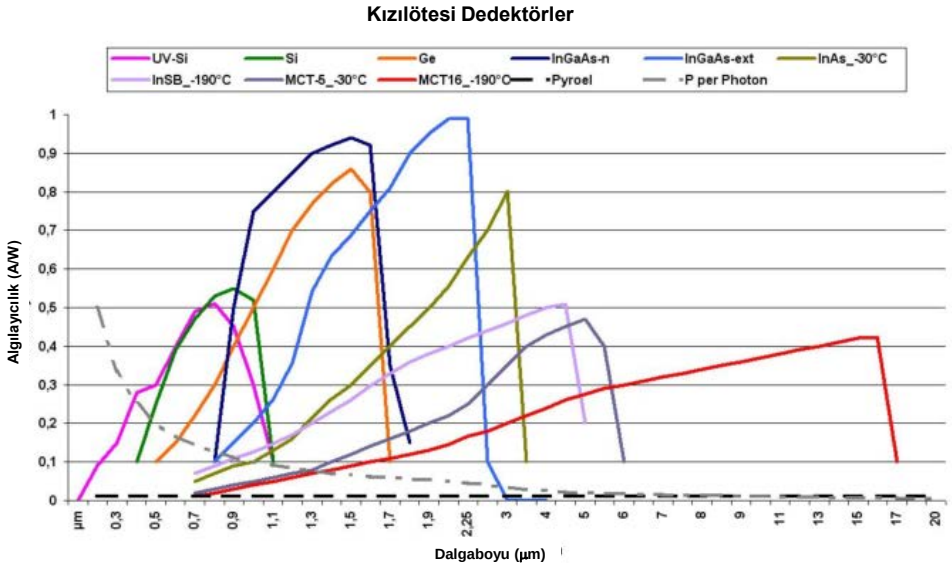
- Algılanması istenilenden farklı dalgaboyunda ışınların algılanmasından
- Sistemin görüş açıklığı sınırları dışında kalan aralıktan gelen ışınlardan
- Başka ışık kaynaklarından
- Sistem içerisindeki optik elemanlardan
- Mekanik yapıdan kaynaklanabilirler.



Şekil 3.1 Cassegrain bir teleskop içerisinde meydana gelen kaçak ışınlar

3.1.1 Farklı dalgaboylarındaki ışıkların optik olarak filtrelenmesi

Kullanılacak olan sistemin 1064 nm dalgaboyundaki ışınları algılaması istenmektedir. Yaygın olarak kullanılan dedektörlerin üzerlerine düşen ışığa bağlı olarak tepki verdikleri dalgaboyu aralıkları oldukça geniştir (Şekil 3.2).

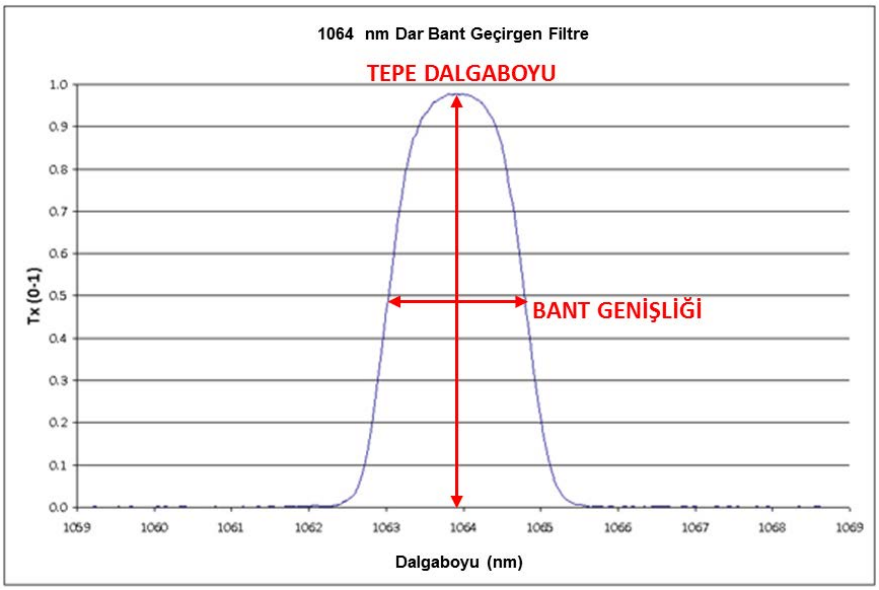


Şekil 3.2 Çeşitli algılayıcıların dalgaboyuna bağlı algılayıcılıkları

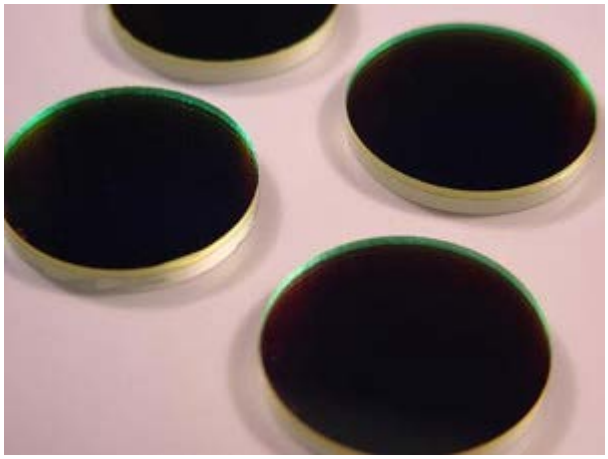
Bu sebepten ötürü istenmeyen dalgaboylarında ışımaların engellenebilmesi için optik filtreler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip filtreler dar bant geçirgen filteler olarak tanımlanırlar. Bu tip filtreler üretilirken dikkate alınması gereken tasarım parametreleri şunlardır;

- Maksimum geçirgenliğin istendiği tepe dalgaboyu
- Maksimum geçirgenliğin % cinsinden büyüklüğü
- Geçirilmesi istenilen ve engellenmesi istenilen dalgaboyları
- Bant genişliği

Bant genişliği, maksimum geçirgenliğin yarısının sağlandığı dalgaboylarının farkıdır. Eğer çok dar bir görüş açısına sahip bir sistem tasarlanıyorsa bant genişliği de dar yapılabilir. Fakat geniş görüş açılı sistemlerde geniş bant genişlikleri kaçınılmazdır.



Şekil 3.3 1064 nm dar bant geçirgen filtre (Iridian Spectral Technologies)

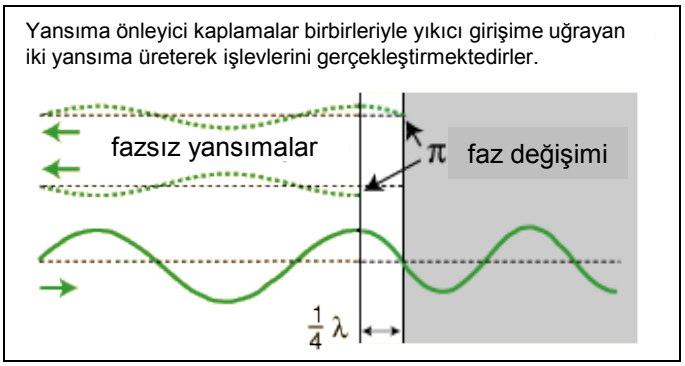


Şekil 3.4 1064 nm dar bant geçirgen filtreler

3.1.2 Yansıma önleyici kaplamaların kullanılması

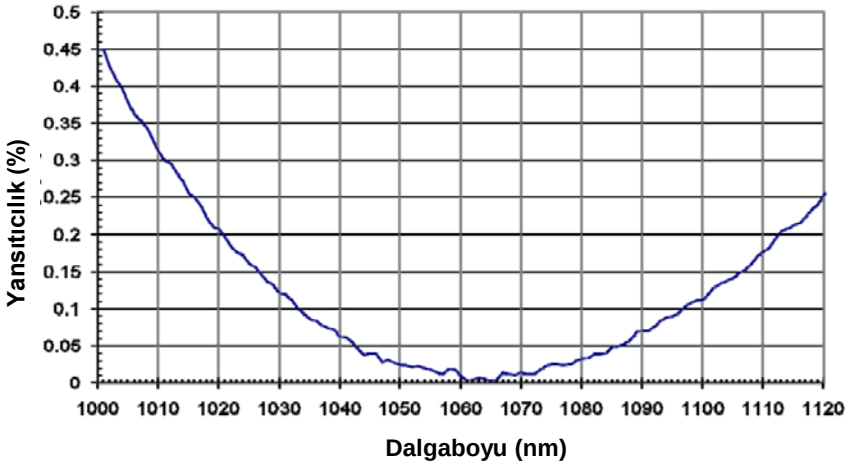
Yansıma önleyici ince film kaplamalar optik bileşenlerden geçen ışıktaki azalmayı, faz değişimleri ve yansıtıcılığın kırılma indisiyle olan ilişkisinden yararlanarak önemli ölçüde giderirler. Optimum kırılma indisindeki tek bir çeyrek dalga kaplama bir dalgaboyu için yansımayı yok edebilir. Çok katmanlı kaplamalarla görünür bölgenin tüm spektrumu boyunca meydana gelen kayıp engellenebilir.

Yansıma önleyici kaplamaların arkasında yatan fikir ince bir filmden yararlanarak çift arayüz oluşturmak ve bu sayede iki adet yansıma elde etmektir. Eğer bu iki yansıyan dalga arasında bir faz farkı varsa birbirlerini kısmen veya tamamen söndüreceklerdir. Eğer kaplama çeyrek dalgaboyu kalınlığında ve üzerine kaplandığı camın kırılma indisinden daha küçük bir kırılma indisine sahip ise o zaman iki geri yansıma arasında 180 derecelik bir faz farkı oluşacaktır.



Şekil 3.5 Yansıma önleyici kaplamaların işleyiş mekanizması

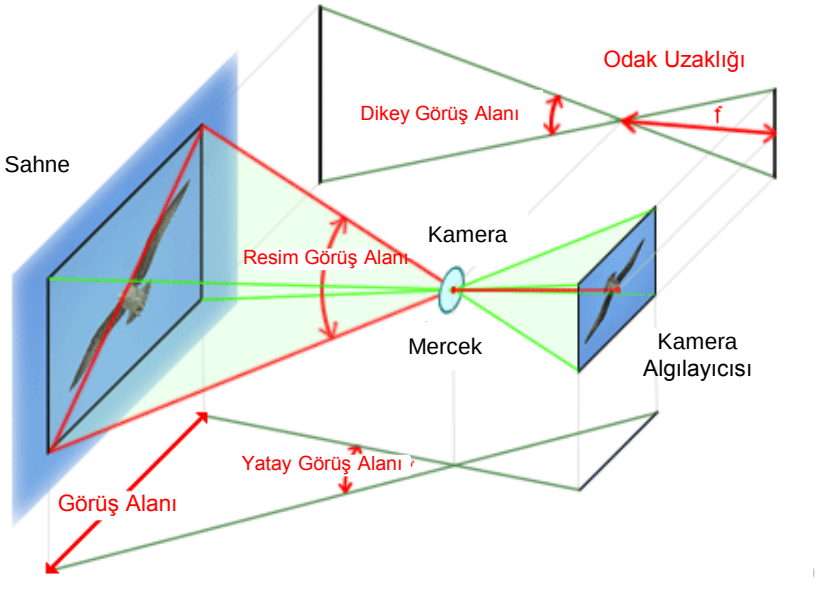
Optik sistemlerin yansıma önleyici kaplamaları seçilirken çalışılacak dalgaboyuna dikkat edilmelidir. Lazer görüntüleyici sistemlerde tek bir dalgaboyunda çalışıldığı için genelde "V" tipi kaplamalar tercih edilir. Bu tip kaplamaların dalgaboyuna karşı geçirgenlik eğrisi V şeklinde olduğu için böyle isimlendirilirler. Geçmesi istenen dalgaboyu haricindeki diğer dalgaboylarına daha büyük yansıtıcılık gösterdiğinden sıklıkla tercih edilen bir filtredir.



Şekil 3.6 1064 nm dalgaboyunda V tipi yansıma önleyici kaplama

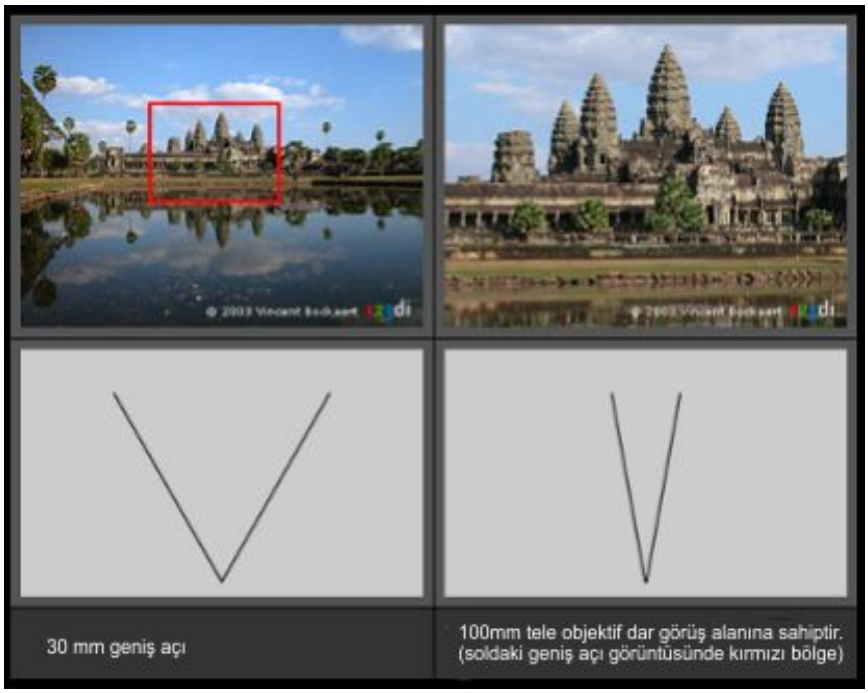
3.1.3 Mekanik yapıdan kaynaklanan yansıma ve saçılmaların engellenmesi

Optik sistemler tasarlanırken belli bir görüş alanına sahip olacak şekilde tasarlanırlar. Bu sistemlerin sahip oldukları görüş alanlarının büyüklüğü açı cinsinden ifade edilir. Kullanılan algılayıcının şekline bağlı olarak görüş açıları düşey ve yatay eksenlerde birbirlerinden farklı olabilir. En ve boy oranı belirli olan dikdörtgen yapılı algılayıcılarda toplam görüş alanı (FFOV – Full Field of View) diagonal görüş açısı cinsinden verilir.



Şekil 3.7 Görüntüleme sistemlerinin görüş alanları

Optik sistemlerin odak uzaklıklarına bağlı olarak görüş alanları değişir. Kısa odak uzaklığına sahip olan bir sistemde daha büyük görüş alanları elde edilirken odak uzaklığı arttıkça görüş alanı da küçülür. Görüş alanının küçülmesinin miktarı arttıkça sistemin görüntü büyültme kabiliyeti de artacaktır. 35 mm'lik film (24 mm x 36 mm) fotoğrafçılığında 50 mm'lik odak uzaklığına sahip bir lens "normal lens" olarak isimlendirilir. Çünkü böyle bir optik sistem yaklaşık olarak insan gözünün görüş alanına (yaklaşık 46 derece) sahiptir. İnsan gözünün görüş alanı 53 derecedir.



Şekil 3.8 Odak uzaklığına bağlı olarak görüş alanının değişmesi

Bir optik sistem tasarlanırken görüş alanı dışından gelen ışımaların dedektör üzerine ulaşmayacağı varsayılarak tasarım yapılır. Fakat uygulamada bu durum hiçbir zaman gerçekleşmez. Görüş alanından daha büyük açılarda gelen ışımalar mekanik bileşenler üzerinden sekerek algılayıcı yüzeyine ulaşırlar. Bu istenmeyen ışınlar algılayıcı üzerinde gürültü sinyaline neden olur ve elde edilen görüntüyü bozarlar.

Görünür bölgede çalışan optik sistemlerde (400 nm - 700 nm) geniş açılarda gelen ışımalardan kurtulmak için bir çok basit çözüm yeterli olmaktadır. En yaygın kullanılan ve işe yarayan çözüm parasoley (parasoleil) kullanımıdır.



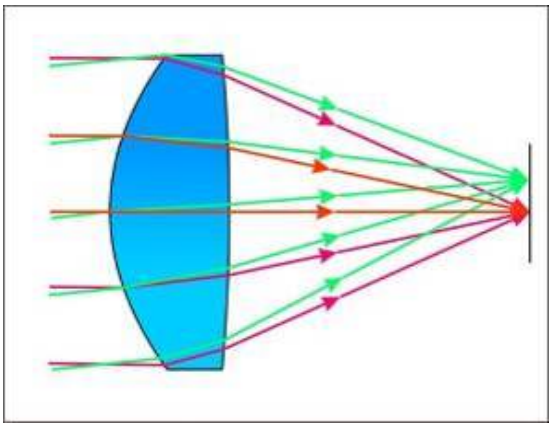
Şekil 3.9 Kaçak ışınların azaltılması için kullanılan parasoley

Bu çözüm, uzak mesafelerden algılanan lazer sinyalini algılayıcı üzerine toplayan optik sistemlerde uygulanabilir değildir. Algılanan sinyal neredeyse gürültü seviyelerinde iken sadece parasoley ile yapılan engelleme kaçak ışın seviyesini gerektiği kadar azaltmamaktadır. Konu ile ilgili bilgi "3.1.5 Yapısal Saçılma" başlığı altında ayrıntılı olarak verilecektir.

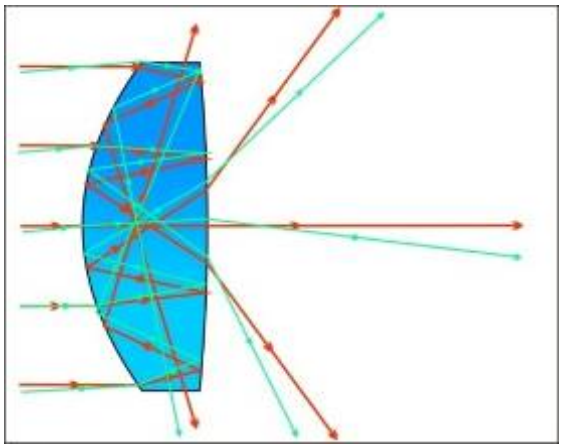
3.1.4 Sekmeler ve hayaletler

3.1.4.1 Görünür bölge sistemleri

Bir optik sistemin kaçak ışın analizinde ilk olarak çift yansımalara ve bunun sonucunda oluşan görüntüler olan hayalet görüntülere bakmak doğru bir başlangıç noktası olacaktır. Bir optik yüzeyden geçtikten sonra geliş yönüne doğru geriye yansıyan ışının geçtiği optik yüzey tarafından tekrar yansıtılması sonucunda *"çift yansıma kaçak ışınları"* oluşur (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11). Bu yansımaların görüntü düzleminde odaklanmamasını sağlamak tasarımcı tarafından sağlanması zorunlu bir sistem gereksinimidir. Pratik uygulamalarda optik elemanların yüzeyleri yukarıda anlatıldığı gibi genelde yansıma önleyici (AR) kaplamalara sahip olduğundan çift yasıma problemi ile nadiren karşılaşılmaktadır. Yine de emin olmak için her tasarımda ve üretimden sonra laboratuvar ortamında kontrol edilmesi yerinde olacaktır.



Şekil 3.10 İki alan ışınlarının ideal odaklanması



Şekil 3.11 Çift yansıma kaçak ışınları: Bu örnekte odak düzlemi üzerinde odaklama olmadığından sorun teşkil etmiyor

Görünür bölgede, kaplamasız cam yüzeyler *Fresnel* yansımasına neden olurlar. *Fresnel* yansıması (% *R*) aşağıda verilen eşitlik yardımı ile hesaplanır.

$$R(\%) = 100\% \left(\frac{n_{cam} - n_{hava}}{n_{cam} - n_{hava}} \right)^2 \qquad 2.1$$

(n_x: x malzemesinin kırılma indisi)

Eğer $n_{hava} = 1$ ve $n_{cam}=1,5$ alınacak olursa, her yüzey için;

$$R(\%) = 100\% \left(\frac{1,5-1}{1,5+1} \right)^2 = 100\% \left(\frac{0,5}{2,5} \right)^2 = 100\%(0,2)^2 = \%4 \qquad 2.2$$

yansıtıcılık bulunur.

Göreli olarak ucuz sayılabilecek bir AR kaplama bile (örneğin, MgF_2 kaplama) minimum %98'lik bir tepe geçirgenliğe sahiptir. O zaman da geriye kalan %2'lik geri yansımadan kaynaklanacak bir *çift yansıma* başlangıç enerjisinin sadece %0,04 kadarı olur. Bu da, saçılmadan kaynaklanan gürültü sinyalinin meydana getirdiği görüntünün asıl görüntüye göre 1:2500 oranında zayıf olması anlamına gelir. Bu oran saçılma sinyali ışınlarının algılayıcı üzerine odaklanmadığı durumlarda odaklanan görüntü sinyaline göre daha da zayıflar.

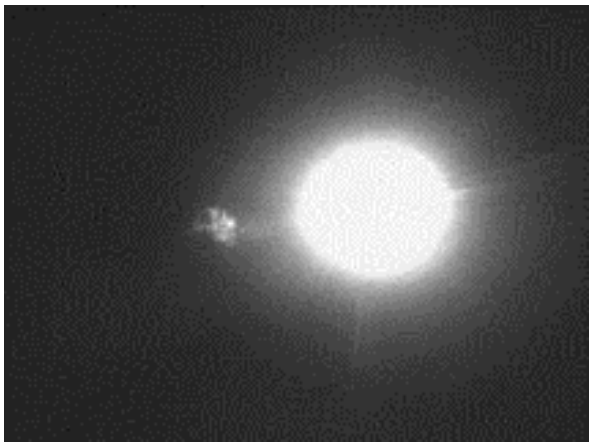
Bu noktada akıllara MgF_2 kaplamanın da bir kırılma indisi olduğu ve üzerine kaplandığı camın optik etkilerini değiştirebileceği düşüncesi gelebilir. MgF_2 kaplamasının optik özellikleri Şekil 3.12'de verilmektedir. Görüldüğü gibi kaplama malzemesinin kırılma indisi görünür ve yakın kızılötesi (NIR) bölgede önemli ölçüde değişmemektedir. Bu kırılma indisi değeri görünür ve NIR bölgede yaygın olarak kullanılan cam malzemelerinin kırılma indislerinden (Pyrex: 1,474, BK7: 1,504 @ 1064 nm) çok farklı değildir. Ayrıca kullanılan kaplamanın mikron seviyelerindeki inceliğinden ötürü sadece ölçülemeyecek kadar küçük bir eksenel kaçıklığa neden olmaktadır.

Saydam bölge (1 μm'den daha az kalın katmanlar	1.200 angstrom (UV)'den 8 μm (IR)'a
Soğurma	>8 μm yavaşca başlar ve 10 μm civarında 700 nm kalınlıktaki katmanlarda %2'ye ulaşır
Alttaşlara tutunma	Camlara, Safir ve ZnS'a iyi tutunur.
Kırılma İndisi	1,390 @ 300nm 1,380 @ 400nm 1,375 @ 450nm 1,370 @ 500nm 1,365 @ 600nm 1,360 @ 700nm 1,350 @ 1.000nm 1,340 @ 1.500nm

Şekil 3.12 MgF_2 kaplamanın optik özellikleri (Materion Resource Center)

Çoğu durumda görüntülenen bölgede parlak bir nesne olduğunda görüntünün karanlık kalan kısmında çift sekme ile oluşan görüntüler haricinde bu kusurların etkin olduğu durumlarla karşılaşılmaz.

Şekil 3.13.'de verilen örnekte bir ticari dijital kameranın arkasında siyah fon bulunan parlak bir ışık kaynağını görüntülemesi örneği verilmektedir. Bu, bir optik sisteme yapılabilecek en yıkıcı kaçak ışın testlerinden birisidir. Test edilen sistem çok büyük olasılıkla böyle bir görüntüleme amacıyla kullanılacak olmamasına karşın, optik sistemin kaçak ışın performansının görüntülenebilmesi açısından faydalı bir yaklaşımdır. Işık kaynağının etrafında bir hale oluşmaktadır. Bu, optik sistem lenslerinin yüzey saçılmaları sonucunda oluşur. Işık kaynağına göre sol tarafta kalan küçük yuvarlak görüntü ise lens sisteminin bir ya da birden fazla elemanından kaynaklanan çift sekme yansıması sonucunda oluşmaktadır. Eğer ışık kaynağı görüntüde sağa doğru hareket ettrilecek olursa, küçük yuvarlak şekil de sola doğru gidecektir.

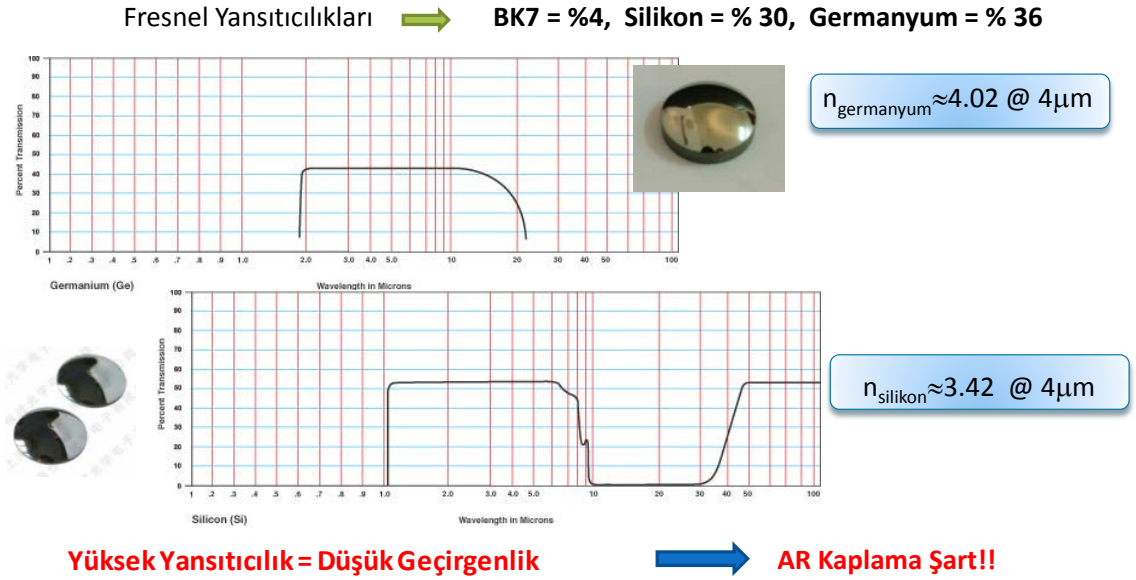


Şekil 3.13 Dijital kamerada oluşan saçılma izleri

3.1.4.2 Kızılötesi sistemlerde dikkat edilmesi gereken hususlar

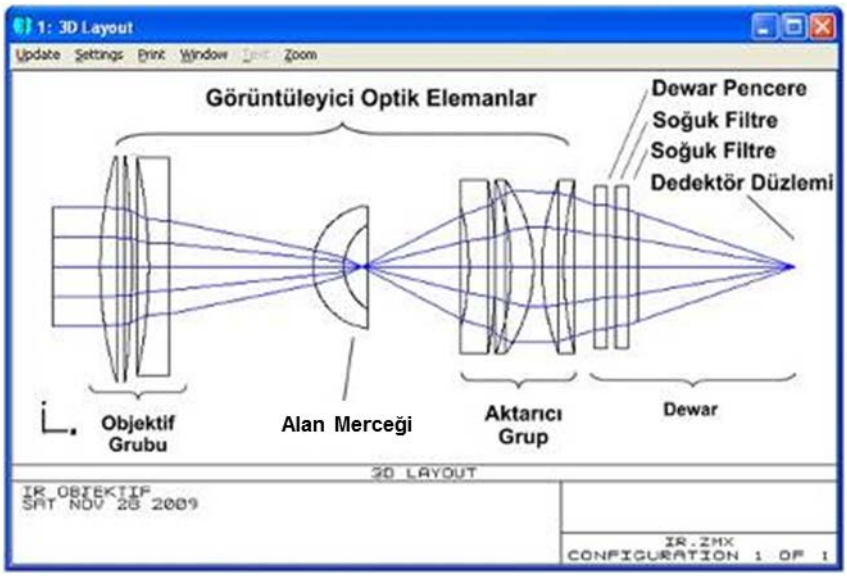
Kızılötesi (IR) sistemlerde kullanılan optik malzemeler görünür bölgede görüntüleme yapan camlara göre genellikle daha yüksek kırılma indisine sahiptir. Tipik örnekleri Silikon ($n_{silikon}$≈3,42 / 4 μm) ve Germanyum'dur ($n_{germanyum}$≈4,02 / 4 μm). Açık havada kaplamasız olarak kullanılan Silikon ve Germanyum'un IR dalgaboylarındaki *Fresnel*

yansımaları görülür bölge dalgaboylarında kullanılan cam malzemelere göre oldukça yüksektir. Görünür bölgede yaygın olarak BK7 camı bu aralıkta %4 yansıtıcılığa sahipken IR bölgede kullanılan Silikon ve Germanyum sırası ile %30 ve %36 yansıtıcılığa sahiptirler. Bu yüzden de IR optik malzemelere AR kaplama yapılması sadece kaçak ışın azaltılması için değil, aynı zamanda iyi optik gerçirgenlik sağlanabilmesi için de bir zorunluluktur.



Şekil 3.14 Orta dalga kızılötesi görüntüleme sistemlerinde kullanılan camlar

IR görüntüleme sistemleri dikkatle ele alınması gereken özgün bir optik saçılma davranışı gösterirler. IR görüntüleyicilerin çoğu 3-5 µm orta dalga IR (MWIR) ve 8-14 µm uzun dalga IR (LWIR) bölgelerinde çalışan soğutmalı dedektörler kullanırlar. Bu dalgaboylarında çalışacak sistemleri tasarlayanların oda sıcaklığında optik malzemelerin ve objektif iç yüzeylerinin siyah cisim ışıması yaptığını dikkate alması gerekir.



Şekil 3.15 Örnek kızılötesi mercek tasarımı

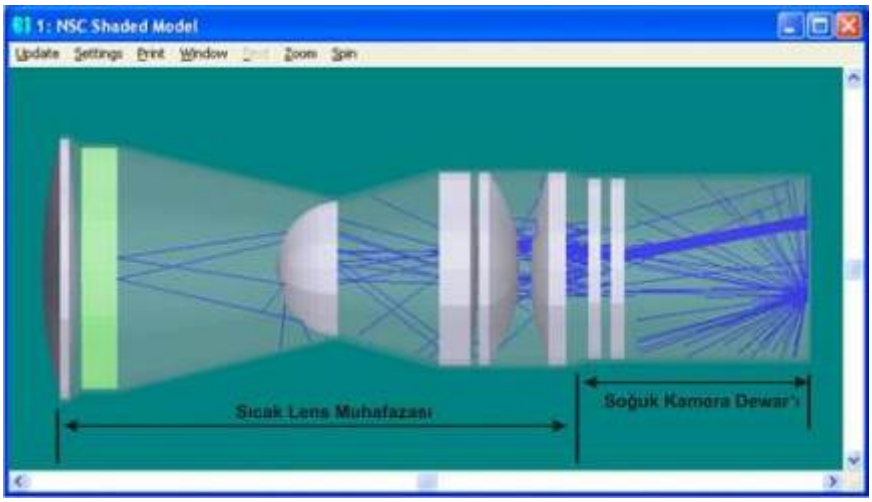
Tipik bir IR görüntüleme sistemi Şekil 3.15'de verilmektedir. Objektifin ilk elemanları Silikon ve Germanyum'dan oluşan bir ikili mercek grubudur. Hemen arkalarında aberasyon düzeltici bir alan merceği yer almaktadır. Görüntüleme sırasında mercek elemanlarının tamamının soğuk bir ortamda tutuldukları kabul edilmektedir.

Sıfır derece geliş açısıdaki ışınlar için %100 soğuk kalkan verimliliği, sağlanması gereken tasarım parametrelerindendir. %100 soğuk kalkan verimliliği ile anlatılmak istenen şudur; Dedektör yüzeyi üzerine gelen her foton bu yolu soğuk kalkan açıklığından geçerek alacak, her zaman bir optik elemandan geçerek ilerleyecek, hiçbir zaman iç yüzeylerden ileri geri yansıyarak tekrar dedektör üzerine düşmeyecektir.

Uygulamada ise % 100 soğuk kalkanı verimliliğine sahip tasarlanmış bir sistemde bile dikkate alınması gereken birçok termal katkı mevcuttur. Optik elemanların olması gerektiği gibi kaplanmadıkları durumlarda *Fresnel* yansımaları en büyük termal katkıyı meydana getirirler. Diğer faktörler ise optik yüzeylerin kirliliği ve lens malzemelerinden kaynaklanan emisyonların meydana getirdikleri katkılardır. Tabii bu son bahsettiğimiz katkıların çok küçük ve engellenemeyen katkılar olduğunu söylememiz gerekir. Bir sistemdeki optik elemanların sayısını azaltabilmek her zaman tasarımcının

hedeflerinden birisi olmalıdır. Optik kaplamalar seçilirken azami dikkat sarfedilmeli, geliş açısının artması ile geçirgenliğin ne kadar çok azaldığı iyi hesaplanmalıdır.

Şekil 3.16'ya bakıldığında dikkate alınması gereken birçok nokta karşımıza çıkmaktadır. Öncelikle odak düzlemi üzerinde hayali bir ışık kaynağı oluşturulmuştur. Bu, dedektör üzerindeki bu kenar pikselinin tam olarak ne göreceğini anlamamıza yardımcı olur. Öncelikle gelen birçok ışının soğuk kamera *Dewar*'ın içerisinde sonlandığına dikkat ediniz. Dewar yüzeyleri soğuk olduğundan buraya ulaşan fotonlar yüzey tarafından soğurulurlar ve termal katkıları olmaz. Yüzeylere temas etmeden ilerleyen ışınlar ise yollarına devam ederek objektifin ikinci lensine ulaşırlar. *Fresnel* yansımalarının etkilerinin incelenebilmesi amacı ile bu lens yansıtıcı bir eleman olarak tanımlanmıştır. Bu noktadan itibaren ışın yönelimleri dolaylı yönelimlerdir. Bu noktadan sonra da ışınların ilerlemelerini takip edecek olursak, bazı ışınların tekrar dedektör yüzeyine ulaşmalarının mümkün olduğunu görebiliriz. Bu ışınların bazıları sıcak olan objektif yüzeylerinden yansıyarak dedektör yüzeyine ulaşmaktadırlar. Bu da sıcak bir objektif duvarının dedektör üzerinde termal sinyal katkısı olacağını gösterir. Bu katkı iyi optik AR kaplamaların uygulanması ile düşük seviyelere çekilebilir.



Şekil 3.16 Narcissus etkisi örneği

Odak düzlemi üzerinde elde edilen termal sinyal gürültüsü *"sıcak"* objektif iç yüzeyi ve *"soğuk" Dewar* katkılarının toplamının bir sonucudur. Eğer dedektör düzlemi üzerindeki her nokta aynı katkıya maruz kalıyorsa, o zaman tüm odak düzlemi üzerinde

aynı ortalama büyüklüğe sahip gürültü sinyali oluşmalıdır. Bu gürültü de elde edilen görüntüden bu ortalama gürültü sinyalinin çıkartılması ile kolayca temizlenebilir.

3.1.4.3 Narcissus etkisi

Odak düzlemi boyunca arka plan gürültü sinyallerinin homojen bir biçimde dağılmadığı durumlarda sorunlar ortaya çıkacaktır. Dedektör merkezinde yer alan bir noktayı düşünelim; *Fresnel* yansımalarının geri dönüp dedektör üzerinde odaklandığı bu noktada soğuk gürültü sinyali etkindir. Eğer aynı sırada dedektörün kenarında yer alan bir nokta soğuk *Dewar* yüzeyine değil de sıcak objektif iç çeperlerinden kaynaklanan yansımaların etkisi altında kalıyorsa o zaman da bu noktada sıcak gürültü sinyali etkin olacaktır. Beyaz renk ile sıcak noktaların temsil edildiği bir görüntüde, düzgün bir şekilde düzeltilememiş siyah bir nokta ile karşılaşılacaktır. Bu sonuç *Narcissus Etkisi* olarak tanımlanır (Şekil 3.16). *Narcissus,* Yunan mitolojisinde kendi yansımasına aşık olan trajik bir karakterdir. Eğer yapılan tasarımda da *Narcissus Etkisi* oluşuyorsa tasarımımızı da benzer bir trajik son bekliyor demektir (Lau, A. S., 1977).

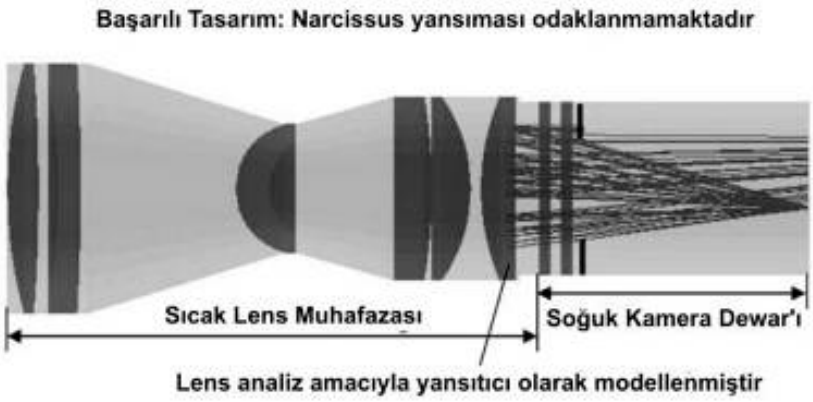
Homojen olmayan gürültü sinyali düzeltmesi (NUC / Nonuniformity Correction) önceden elde edilmiş bir arkaplan gürültü resminin, görüntülemede elde edilen her görüntü karesinden tek tek çıkartılması ile gerçekleştirilir. Arka plan gürültü resmini elde edebilmek için homojen bir görüntü kullanılmalıdır. Ne yazık ki objektifin sıcak olan iç duvarları genellikle termal olarak kararlı davranış göstermediğinden dedektörün kenarlarındaki piksellerin maruz kaldıkları gürültü sinyalleri de kararsız bir davranış gösterirler. Soğuk etki ile dedektör ortasında meydana gelen gürültü sinyali bu termal değişikliklerden etkilenmez. Eğer sıcak duvarlar soğutulacak olursa ve orjinal kalibrasyon verisi uygulanırsa sıcak bir merkez ile soğuk kenarlardan oluşan bir görüntü elde edilir. Geniş bir termal aralıkta çalışan IR sistemleri için farklı sıcaklıklarda kalibrasyon verileri toplanmalı ve gerektiğinde en uygun NUC tablosu uygulanmalıdır. Arada kalan sıcaklık değerleri için ise interpolasyon yöntemi ile ara NUC tablolarının elde edilmesi genelde işe yarayan bir yöntemdir. Bunların yanında objektif yüzeyinin emisyon karakteristikleri de dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Farklı

sıcaklıklarda ve geliş açılarında farklı yansıtıcılık gösteren yüzeyler elde edilen gürültü seviyelerinde çizgisel olmayan sapmalara neden olabilirler.

Her türlü sorunun objektif üretiminden sonra elektronik olarak düzeltilmesini bir alışkanlık haline getirmemek gerekir. Elektronik görüntü temizlemek çoğu zaman tasarıma destek sağlasa da yapılan her düzeltme dedektörün dinamik bant genişliğini azaltacaktır. Eğer IR optik sistemimizden iyi bir performans bekliyorsak *Narcissus Etkisi* azaltılmış bir tasarımın yapılması zorunluluktur.

3.1.4.4 Optik tasarımda Narcissus etkisini azaltma yöntemleri

Narcissus özel bir durumdur ve etkisini tek yansımalık olaylarda gösterir. Optik üzerindeki *Narcissus* etkisi kaçınılmazdır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için tüm dedektör alanı boyunca soğuk gürültünün yayılması gerekir. Şekil 3.17'da kaynak olarak dedektör tanımlanmış ve bu yüzey üzerinden eksenden çıkan ışın demetinin optik eleman yüzeyinden yansıyarak odaklanmadan dedektöre geri döndüğü durum gösterilmiştir. Genelde dedektör yüzeyine en yakın olan optik elemandan kaynaklanan *Narcissus Etkisi*nin azaltılması gerektiğinden bahsetmiş olsak da sistemdeki tüm optik yüzeyler için *Narcissus* etkisi ile oluşan *Fresnel* yansımalarının ortadan kaldırılması gerekir.



Şekil 3.17 Narcissus önleyici tasarım

Günümüzdeki optik tasarım yazılım paketlerinin çoğunda optik tasarımın sıralı olmayan *(non-sequential)* bir modelinin oluşturulabilmesi ve böylelikle sadece merceklerin değil mercekleri tutan yapının yüzeylerinden saçılan ışınımların da incelenebilmesi mümkündür. Bu yazılımlarda gerektiği zaman iç yüzeyleri, optik elemanları ve algılayıcıları bile ışık kaynakları olarak tanımlayarak analiz yapmak mümkündür. Algılayıcı tarafından algılanan sinyalin dağılım düzgünlüğüne bakarak *Narcissus* etkisine neden olan kaçak ışın yollarının saptanması mümkün olmaktadır.

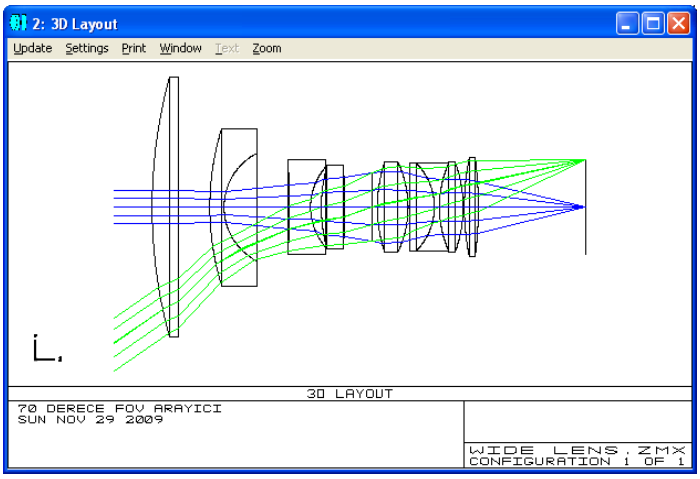
3.1.5 Yapısal saçılma

Yapısal saçılma ile başa çıkmak daha zor olabilir. Bu tip saçılma optik elemanları tutan mekanik yapının üzerine gelen ışınımı tekrar optik eksen doğrultusunda yönlendirilmesi ile gerçekleşmektedir. Hatta kimi zaman bu saçılmaya neden olan ışık kaynağı optik tasarımın görüş alanı dışında bile kalıyor olabilir.

Yapısal saçılma aşağıda verilen teknikler kullanılarak en aza indirilebilir:

- Lensleri tutan mekaniklerin iç yüzeylerini karartmak ve dişler açmak.
- Stratejik öneme sahip yerlere perde *(baffle)* koymak.
- Lenslerin, algılayacıyı üzerinde görüntü oluşturulmasına katkıda bulunmayan kenarlarına ve kısımlarına da mümkünse karartma yapmak.
- İki lens yüzeyindeki açıklığın konumsal sapmasını mümkün olduğunca azaltmak, bu özellikle geniş görüş açısına sahip lens sistemleri için gereklidir.

Yapısal saçılma sıklıkla geniş görüş açılı sistemlerde gözlenmektedir. Bunun en önemli nedeni de ön lens giriş açıklığının tipik olarak gelen alan ışın demetlerine göre büyük olmasıdır. Şekil 3.18'de tipik bir geniş alan lens sistemi görülmektedir. Bu kadar büyük bir açıklık sistem içerisindeki kaçak ışın miktarında ciddi bir artışa neden olmaktadır.



Şekil 3.18 Geniş görüş açısına sahip mercek sistemleri

Kaçak ışınlar odak düzlemine doğru yönelmemiş olsalar da yapısal saçılmalara sebep olarak dedektörde gürültü oluşturma olasılıkları oldukça fazladır. Eğer giriş açıklığı mümkün olduğunca azaltılabilirse kaçak ışınların olası ilerleme yolları da azaltılmış olacaktır. Kaçak ışın engelleme amaçlı bir tasarımda ideal çözüm için optik stop yüzeyinin yarıçapının giriş açıklığı olarak girilen yarıçap (gelen ışınların yarıçapı) ile aynı büyüklükte tanımlandığı tasarım adımlarının seçilmesi gerektiği düşünülebilir.

Böyle bir yaklaşımın tasarımı aşırı zorlaştıracağı, karmaşıklaştıracağı ve dolayısıyla da maliyetleri arttıracağı unutulmamalıdır. Burada açıklık çapını küçültmek için açıklık ayrımını kontrol etmeye çalışıldığına dikkat edilmelidir. Tercih edilen yol giriş açıklığı çapının küçültülmesi değildir. Giriş açıklık çapını değiştirmek sistemi yavaşlatabilir ve sistemin temel optik performansını olumsuz yönde etkileyebilir.

3.1.6 Düşük ışın seviyesinde kullanılan sistemler

Algılanan sinyalde kaçak ışın oranının fazla olduğu sistemlerde kaçak ışınlar önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu tür sorunlarla; görüntü alınan ortamdaki ışık seviyelerinin düşük olduğu, bu yüzden de kullanılan algılayıcıların yüksek hassasiyete sahip olduğu ve uzun pozlama sürelerinin kullanıldığı sistemlerde karşılaşılmaktadır.

Astronomik teleskop sistemleri detaylı kaçak ışın analizlerinin yapılmasının gerektiği sistemlere güzel bir örnektir. Teleskop aynasına ulaşan ay ve yıldız ışıkları kaçak

ışınlara sebep olmaktadır. Astronomik teleskoplarda yüksek hassasiyetli algılayıcılar kullanılır ve çoğunlukla uzun süreli pozlama ile çalıştırılırlar. Bu koşullar altında oldukça düşük seviyeli kaçak ışınlar bile algılanan sinyal şiddetinin yanında büyük kalabilir. Teleskopların bulunduğu tesislere giden yollardaki aydınlatmaların sayısı azaltılarak veya tamamen kaldırılarak teleskopa giren kaçak ışınların azaltılmasına çalışılmaktadır.

3.2 Saçılmaların Çeşitleri

Çizgisel optik saçılma iki ana grupta tanımlanabilir; Rayleigh ve Mie Saçılması. Çizgisellikten kastedilen optik akıya oranla çizgiselliktir. Yani, daha fazla ışığın optik sisteme ulaşması daha fazla saçılma sonucunu doğuracaktır. Çizgisel olmayan optiksel davranışların bir sonucu olan Raman ve Brilloun saçılmalarına burada değinilmeyecektir. Bu tür saçılmalar lazer ve fiber optik tabanlı iletişim uygulamalarında etkin olmaktadır. Bu konular tez çalışmasının kapsamı dışında kalmaktadırlar.

3.2.1 Rayleigh saçılması

Işığın dalgaboyuna oranla çok küçük ebatlarda olan nesnelerden kaynaklardan ışık saçılmasına Rayleigh Saçılması denilmektedir. Aerosol gazlar bu tür saçılma kaynaklarının iyi bir örneğidir. Lord Rayleigh bu saçılmayı aşağıdaki eşitlikle tanımlamıştır(http://www.princeton.edu/cefrc/Files/2011%20Lecture%20Notes/Alden/Lecture-7-Rayleigh.pdf , 2012) .

$$Rayleigh\ Saçlması\ \ \alpha\ 1/\lambda^4 \qquad 3.1$$

Dalgaboyunun dördüncü kuvveti ile ters orantılı olduğunu gösteren bu bağıntı mavi ışığın neden kırmızı ışıktan daha fazla saçıldığını açıklamaktadır. Beyaz ışığın dünyanın atmosferine dik olarak geldiğini düşünelim. Atmosfer, mavi ışığı kırmızı ışıktan daha fazla saçtıracaktır. Denklem 3.1'ü kullanarak 450 nm dalgaboyundaki mavi ışığın 650 nm dalgaboyundaki kırmızı ışığa göre 4,4 kat daha fazla saçıldığını buluruz. Eğer atmosfer olmasaydı tıpkı aydaki astronotlar gibi biz de gökyüzünü siyah olarak görürdük. Dünyada beyaz ışığın mavi bileşeni atmosferde daha fazla saçıldığından gökyüzünün rengi mavidir. Daha da ileri gidecek olursak, güneş ufuk hizasında batmak

üzere iken güneş ışınlarının geçmesi gereken atmosfer kalınlığı artmaktadır. Bu da özellikle kısa dalgaboylarındaki daha büyük kayıptan ötürü gözlemcinin güneşi daha kırmızı olarak algılamasına neden olur. Aslında güneş daha az mavi olmaktadır. Bu da bize günbatımında güneşin neden portakal rengine ve sonrasında kırmızıya döndüğünü göstermektedir.

3.2.2 Mie saçılması

Işığın dalgaboyuna oranla daha büyük nesnelerden kaynaklanan ışık saçılmasına *Mie Saçılması* denilir. Genel olarak, saçtırıcı parça ışığın dalgaboyunun 1/10'undan daha büyük olmaya başladığı durumdan itibaren *Mie Saçılması* etkin hale gelmektedir.

Mie teorisi herhangi bir yarıçapa sahip veya küresel parçacıklar için genel bir teoridir. *Mie Saçılması* özellikle koloidler için kullanışlıdır. Bu, uzun fiber optik kullanımında iyi iletişim kalitesi sağlayabilmek için kritik öneme sahip olan ve azaltılması gereken bir saçılma türüdür.

4. METOD VE YÖNTEMLER

4.1 Modelleme ve Analiz Teknikleri

4.1.1 Hayalet analizi

Optik bileşenler arasındaki çift yansımalardan kaynaklanan ve çoğu kez gözlemcinin kendisini de görüntülemesiyle sonuçlanan istenmeyen görüntülere hayalet görüntü denilir. Birçok optik sistem tasarım yazılımı kabiliyetlerine göre farklı seviyelerde hayalet görüntü analizi yapma yeteneğine sahiptir. Sıralı optik modellerde, çift yansıma hayalet ışınlarını inceleyebilmek için şu adımlar izlenmelidir;

- Kırıcı bir optik yüzeyi aynaya dönüştürerek ilk yansımayı gerçekleştirin.
- İkinci optik yüzeyi de bir aynaya dönüştürerek ikinci optik yansımayı meydana getirin.
- Odak düzlemine kadar ışınları izleyin.

Tek yansıma kombinasyonlarının sayısı mercek sistemindeki kırıcı yüzeylerin sayısının artması ile beraber artmaktadır. n adet kırıcı yüzey olduğunu varsayarsak çift yansıma kombinasyonlarının sayısı (DBCs: Double Bounce Combinations) aşağıdaki eşitlik ile verilir;

$$DBCs = \sum_{1}^{n} (n-1) \qquad 4.1$$

Her durumda odak düzlemi üzerindeki ışınların ıraksaması incelenir. Eğer spot çok küçük ise (tipik olarak <1 mm'lik bir çift yansıma spot büyüklüğü çok küçük kabul edilmektedir) bu durumda çift yansıma kaynaklı hayalet görüntü probleminin önüne geçilebilmesi için kırıcı optik yüzeylerin eğrilik yarıçapları ile oynanmalı ve çift yansıma sonucu oluşan spot çapı 1 mm'nin üzerine çıkartılmalıdır.

Tek yansıma analizlerinde her yüzey bir aynaya dönüştürülerek ışınların sonlandırıldığı noktalar incelenmektedir. Tek yansıma analizleri yaygın olarak aydınlanma kaynağı ve algılayıcının aynı optik hat üzerinde yer almadıkları sistemlerde kullanılmaktadır.

Tek yansıma analizleri aynı zamanda soğuk dedektörün optik bir kaynağa dönüştürüldükleri sistemlerde *Narcissus* analizi yapmak için de kullanılabilir. Bu

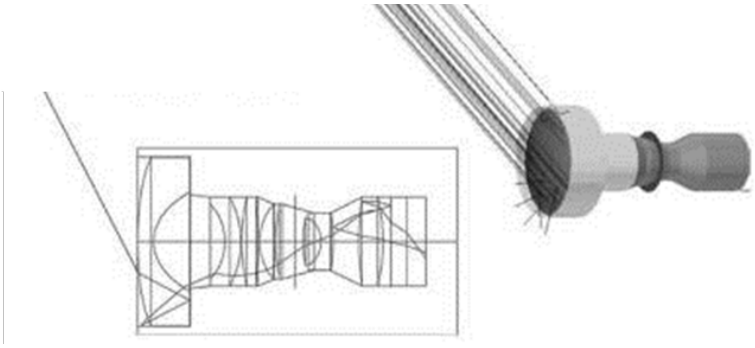
kullanımda soğuk sinyal odak düzlemi üzerinde odaklanmayacak (defocus) biçimde tasarlanarak *Narcissus* geri dönmesi azaltılabilir. *Narcissus* analizi için alternatif bir yöntem de, mekanik yapı da dahil sistemdeki her nesnenin ışık kaynağı olarak tanımlanmasıdır. Birçok optik tasarım ve analiz yazılımında nesnelerin bu şekilde tanımlanmasını sağlayabilecek özellikler mevcuttur. Bu yaklaşım ile her nesne siyah cisim ışıma kaynağı olarak tanımlanabilmekte ve sonuçta daha doğru bir yaklaşım yapılabilmesi münkün olmaktadır.

4.1.2 Saçılma yönü analizi

Yapısal saçılmanın bir sorun teşkil etmediğinden emin olabilmek için örnek nesne olan noktalar temsili açı aralıkları boyunca konumlandırılarak ölçümler alınır.

Şekil 4.1'de bir örnek verilmektedir.

Şekil 4.1'de gelen ışının izlediği optik yolun engellenmesi gerekir. Bunu sağlamak için ya bir mercek koruyucu kapak eklenmeli ya da sistem içerisinde uygun bir yere engelleyici perde konulmalıdır. Şekilde verilen örnekte objektifin iç yüzeyleri ayna veya yüksek yansıtıcılığa sahip yüzey olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemle en olumsuz ışın yönelimlerinin tanımlanabilmesi mümkün olmaktadır. Daha başarılı iyileştirmeler için objektif iç yüzeyleri saçtırıcı yüzeyler olarak tanımlanmalıdır. Tekil speküler yansımalar ve tekil dağınık yansımaların engellenmesi optik sistemlerdeki kaçak ışınların büyük kısmını ortadan kaldırabilecektir. Analizi biraz daha detaylandırarak ikincil saçılmaların da dikkate alınması saçılmaya duyarlı uygulamalarda gerekli olabilir.



Şekil 4.1 Çok geniş açıda ışın göndererek TİY analizi yapılması[1]

Analizlerde seçilen örnek alan noktaları optik sistemin geometrik görüş alanının dışına kadar arttırılmalıdır. Parlak bir ışık kaynağı veya güneş, FOV'un dışında kalan açılardan gelerek mekanik yapıda saçılmakta ve kaçak ışınlara neden olabilmektedir.

Dublet veya triplet mercek yapılarının kaçak ışın analizlerine daha fazla önem verilmesi gerekir. Bazı durumlarda bir mercek elemanının içerisinde tam iç yansımanın (TİY) gerçekleştiği durumlar olabilmektedir. Dublet ve triplet elemanlarının da bulunduğu sistemlerde meydana gelen TİY, mercekleri bir arada tutan optik yapıştırıcıdan etkilenmektedir. Birbirine yapıştırılmış olan iki merceğin kırılma indislerinin arada kullanılan yapıştırıcının kırılma indisinden çok büyük veya çok küçük olduğu durumlarda bu konuya daha fazla dikkat edilmesi gerekir. Optik yapıştırıcılar genelde 1,5 ile 1,6 arasında değişen kırılma indislerine sahiptirler. Optik modelde bulunan görülmeyen yüksek kırılma indisi arayüzü aslında ince bir düşük kırılma indisli malzemeye dağıtılmıştır. Örneğin; 50 mm çapındaki bir mercek için yaklaşık 25 μm kalınlığındadır. Mercek yüzeyine dik açılarda gelen ışın doğrultularında mercek sisteminin performansına olumsuz etki etmeyecek kadar düşük bir saçılmaya sebep olsalar da arayüzdeki kritik açıyı değiştirirler. Bunun neticesinde TİY davranışı da değişmektedir. Dublet ve triplet yapıların kaçak ışın analizlerinin sistem boyunca başarılı bir şekilde analizlerinin yapılabilmesi için yazılım ortamındaki modellemenin aradaki yapıştırıcıyı da içerecek şekilde yapılması gerekir. Bu tip analizler optik tasarım ve analiz yazılımlarının sıralı olmayan kiplerinde kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

4.1.3 Saçılmaların modellenmesi

Kaçak ışın kaynaklarını incelerken kaçak ışın sinyalinin görüntüye göre oranının doğru kestirilebilmesi önemlidir. Bir modelde kaçak ışınların incelenmesi gitgide küçülen ışık kaynaklarının yerleştirilmesini gerektirebilir. Kaynağa ulaşan sinyalin şiddetini takip ederken yanılgıya düşmek olasıdır. Kaçak ışınların enerjisini toplam görüntünün

[1] Bu sistemde ilk lensteki tam iç yansıma (TİY) ciddi bir sorun teşkil etmemektedir. Bunu bastırabilmek için lens şekli değiştirilebilir. Objektif iç yüzeyindeki yansıma da gözden kaçırılmamalıdır.

enerjisine oranlayarak hesaplamak iyi bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım dedektöre ulaşan kaçak ışın enerjisini normalize edebilmemize olanak sağlar.

4.1.4 Gizli parıldama

Geometrik görüş alanının dışından gelen ışınların bir mercek yüzeyine çarparak optik sistem içerisine saçılması ile oluşan optik yüzey saçılmalarıdır. Gizli parıldama genelde mekanik yapıdan kaynaklanmaz ve bu yüzden de odak düzlemi boyunca düzgün bir dağılım gösterir. Parıldamanın homojen dağılımına rağmen görüntü kalitesinde bir azalma gözlenir. Bu durum Denklem 4.2 ile verilen zıtlık eşitliği ile açıklanabilir. I_{max} algılanan en fazla ışıma ve I_{min} algılanan en düşük ışıma şiddeti olmak üzere;

$$Zıtlık = \frac{I_{\max} - I_{min}}{I_{\max} + I_{min}} \qquad 4.2$$

I_{max} ve I_{min}'in beraber arttırılmaları ile azaltılmış zıtlık elde edilir. Bunun sonucu olarak optik sistemdeki dedektör üzerinde elde edilen kaçak ışın dağılımı düzenli bir dağınım bile gösterse görüntü performansında bir azalma olacağı sonucuna ulaşılır.

Gizli parıldamaya örnek olarak ön yüzeyinde plastik bir asferik mercek kullanan genişgörüş açısına sahip prototip merceğin üretimi gösterilebilir; *"Yapılan bir tasarım çalışmasında kavramsal tasarımın makul üretim maliyetlerine sahip olduğunu gösterebilmek için asferik yüzeyin elmas uçlu cam tezgahı ile işlenerek pahalı kalıp maliyetlerinin önüne geçilebileceğini göstermek önem arzediyordu. Üretim gerçekleştirildikten sonra elde edilen görüntü zıtlığının beklenenden oldukça az olduğu görüldü. Yapılan testlerde problemin asferik yüzeyden kaynaklanan gizli parıldama olduğu saptandı. Merceğin üretiminde kalıp kullanımına geçildiğinde problemin giderildiği görüldü. Kalıpla elde edilen mercek yüzeyi tezgaha göre çok daha pürüzsüz bir yüzeye sahipti."* (Fischer 2008).

4.1.5 Temizlik

Gizli parıldama ön pencerelere ve açıklıkların kenarlarına bulaşan kirleticiler veya tozlardan kaynaklanabilir. Bu sorunun elde edilen görüntü üzerindeki etkisi Şekil 4.2'de verilen ticari kamera örneğinde görülebilir. Bu da bize optik tasarımı yaparken ön tarafa

sıkça temizlendiğinde görüntü performansını düşürmeyecek bir pencerenin konulmasının akıllıca olacağını gösterir. Örnek olarak iyi kalitedeki SLR *(Single Lens Reflex)* kameraların objektifleri çoğunlukla ek bir UV filtrenin objektifin önüne takılabilmesine izin verirler. Bu sadece UV koruma sağlamakla kalmaz aynı zamanda kirden koruyan ve gerektiğinde değiştirilebilir bir pencere görevini görür. Zorlu çalışma koşullarında değiştirilebilir bir pencere bileşeninin sisteme dahil edilebilmesi sistemin ömrünü uzatacaktır.



Şekil 4.2 Objektif üzerindeki tozlardan ötürü meydana gelen gizli parıldama

Odak düzlemine veya orta odak düzlemine yakın olan herbir yüzeyin temizliğini sağlayabilmek için özel çaba sarfedilmelidir. Bu şekilde toz zerreciklerinin odak düzlemi üzerinde görüntülenmesinin engellenmesi amaçlanmaktadır. Küçük açıklıklara sahip olan yavaş optik sistemlerde temizlik önceliklidir. Çünkü bu sistemlerde küçük bir toz parçası bile açıklık çapının önemli bir kısmını işgal edebilir. Yavaş bir sistemin alan derinliği fazladır, böylelikle herhangi bir alan noktasındaki parçacık kararmalarına birçok optik yüzey katkıda bulunuyor olabilir. Bu da görüntüde kararmaların oluşmasına neden olabilir.

4.2 Baskı Altına Alma Teknikleri

4.2.1 Üç sekme kuralı

Saçılmayı baskı altına almanın anahtar yöntemi saçılan ışınların odak düzlemine ulaşmadan önce çarpacağı yüzey sayısını mümkün olduğunca arttıracak opto-mekanik bir yapının tasarlanmasıdır. Eğer karartılmış iç yüzeyler, perdelemeler ve diş yuvaları doğru biçimde seçilirse etkin ve ucuz bir biçimde yapısal saçılmanın önüne geçmek mümkündür. Burada hatırlanması gereken bir kural varsa o da "üç sekme kuralı"dır. Karartılmış bir yüzeyden yaklaşık % 1 yansıma gerçekleşir. Bu % 1 yansımayı üç kere sektirebilirsek başlangıçtaki enerjinin milyonda birine inmiş oluruz. Bu, saçılma azaltma yöntemlerinin olmazsa olmaz kurallarından birisidir.

4.2.2 Dişler ve perdeler

Dişler, üç sekme kuralını etkili bir biçimde uygulamanın oldukça başarılı ve ucuz bir yoludur. Açılan dişlerin sıklığı da önemlidir. Bir dişin ucu hiçbir zaman mükemel bir biçimde açılamaz. Dişlerin üst tarafları genellikle düz bir kesime sahip olur ve gelen ışığı etkin bir biçimde optik hat boyunca yönlendirir. Genel uygulamalarımız için bir dişin üst kısmının hiçbir zaman 0.025 mm'den daha keskin olamayacağını kabul edebiliriz. Eğer diş sıklığı büyük ise o zaman optik alan boyunca düz alan frekansı azalacaktır. Sıklığın azaltılması ise tam tersi bir neticeye sebep olacak ve düz alanlar artarak optik hat boyunca doğrudan yansıma yapan alanları arttıracaktır.

Dişin yan yüzeylerinin açısı da saçılma baskılama performansı üzerinde bir miktar etkiye sahiptir. Eğer dişler yüzeysel açılmışlarsa yani yeterince derin değillerse o zaman ışık dişe ulaştığında üç yansımanın gerçekleşmesi düşük bir olasılıktır. Dahası özel üretim yöntemlerinden kaçınarak maliyetleri azaltabilmek için standart diş açma yöntemlerinden yararlanılması tercih edilmelidir. Uygun noktalara perdelerin yerleştirilerek engellerin oluşturulması da bir sonraki kesimde anlatılmaktadır.

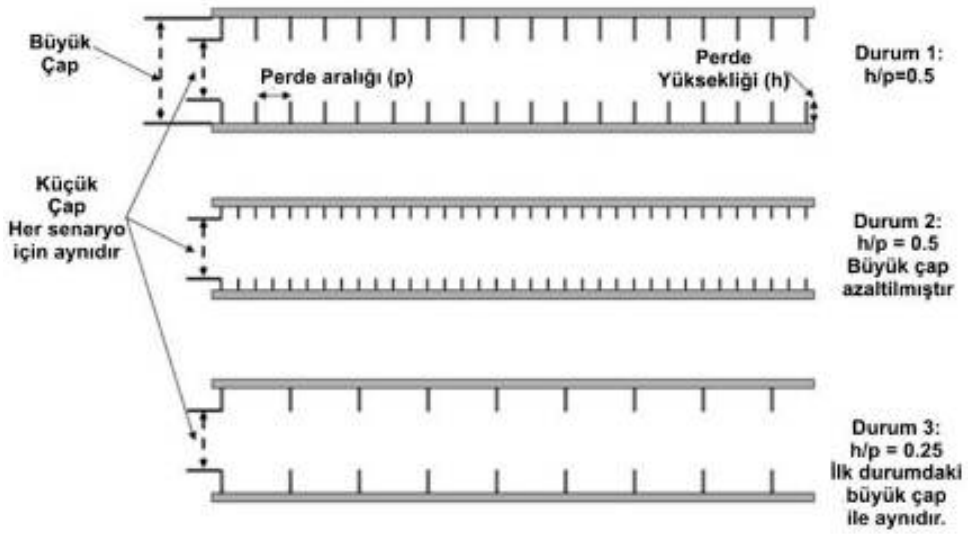
Perdeler sistem performansını önemli ölçüde arttırabilirler. Kesim 4.1.2'de bahsedilen doğrudan yön analizi yöntemi perde konumları için anahtar noktaların nasıl seçileceğini

anlatmaktadır. Bu yöntem ana saçılma yönlerinin tanımlanarak hata ayıklama süresinin azaltılmasına olanak sağlamaktadır.

Optik sistemlerde yaygın olarak kullanılan perdeleme yöntemlerinden birisi de alan engelidir. Alan engelinin konumu istenmeyen ışığın engellenebilmesi için doğal bir engel noktası teşkil etmektedir.

4.2.2.1 Perde tasarımında getiri-götürü hesabı

Bir objektif içerisine yerleştirilen perdelerin sayısı ve konumları perdelerin sağlayacakları saçılma azaltılmasını doğrudan belirler. Şekil 4.3'da bir objektif içerisinde yerleştirilecek perdelerin dizilimleri gösterilmektedir. Perdelerin sıklıkları ve objektif çapına oranla yükseklikleri de önem taşımaktadır. Örneğin, kabul edilebilir bir optik saçılma baskılaması için düşük bir perde yüksekliğinin (h) daha sık yerleştirilmiş perdeler (p) gerektireceği ortadadır. Yapı içerisine perdeler yerleştirirken h/p oranından faydalanmak pratik bir yöntemdir (Fischer, 2008).

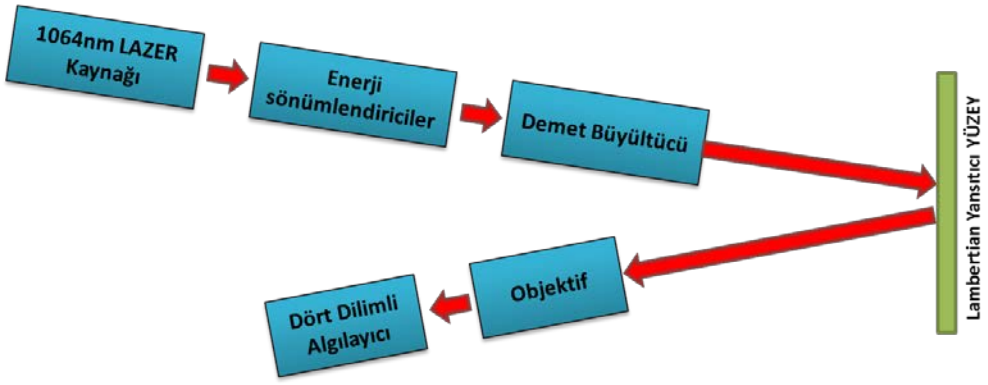


Şekil 4.3 Namlu içerisindeki perde yapısı örnekleri

Şekil 4.3 perde ayrımının perde yüksekliğinin iki katı olduğu yani h/p oranının 0,5 olduğu iki örneği göstermektedir. Üçüncü örnekte ise daha düşük bir perde sıklığı kullanılarak hazırlanmış h/p oranı 0,25 olan bir sistem gösterilmektedir. Düşük bir h/p oranının saçılmaları azaltmada daha başarısız olması beklenmektedir.

5. BİLGİSAYAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Test amacı ile oluşturulacak olan model Şekil 5.1.'de verilen bileşenlere sahip olacaktır. Model, optik tasarım ve analiz yazılımı olan Zemax yazılımı ortamında oluşturulmuştur. Modelde kullanılacak mekanik bileşenlerin tasarımları üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım yazılımı olan SOLIDWORKS yazılımı ortamında yapılmıştır.

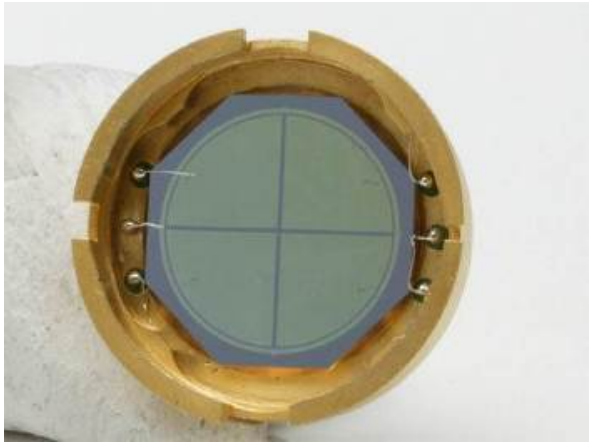


Şekil 5.1 Bilgisayar modeli oluşturulan sistem

5.1 Optik Tasarım

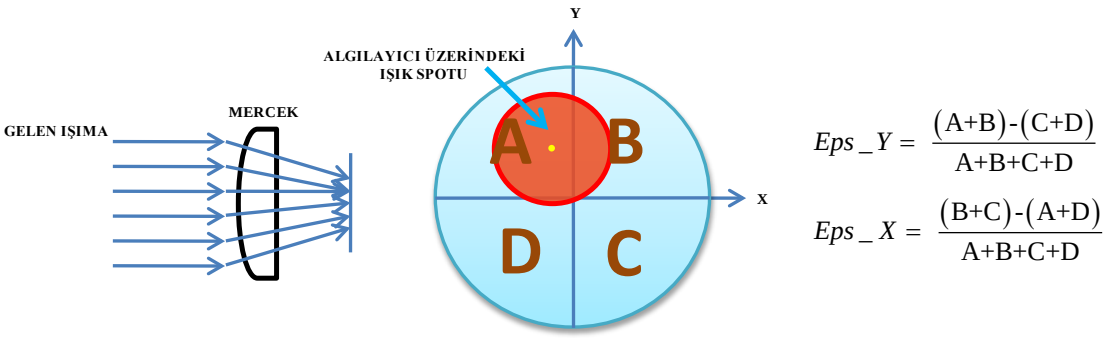
5.1.1 Pozisyon bulucu dört dilimli algılayıcılar

Üretilecek perde prototiplerinin kaçak ışınları zayıflatma performanslarını ölçmek için dört dilimli algılayıcı kullanılacaktır (Şekil 5.2). Dört dilimli algılayıcılar görüntü oluşturma amacı ile kullanılmayan algılayıcılardır *(non-imaging optics)*.



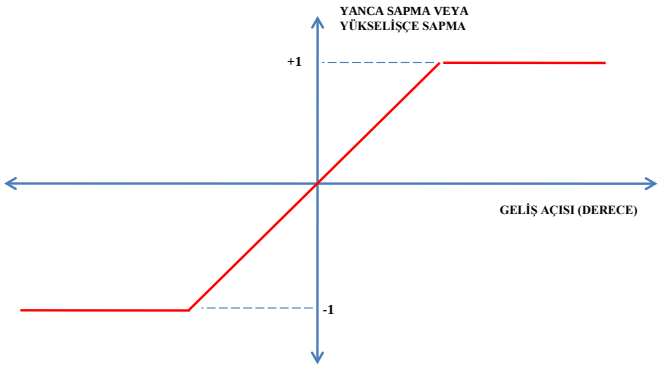
Şekil 5.2 Dört dilimli algılayıcı

Dört dilimli algılayıcılar kullanıldıkları optik sistemlerde odak düzlemi üzerine yerleştirilmezler. Optik bileşenler ile odak düzlemi arasında bulunurlar. Bu sayede, algılayıcı üzerine, algılayıcı yarıçapı ile orantılı ölçülere sahip bir lazer beneği düşürülmesi mümkün olur. Beneğin algılayıcı kadranları üzerinde fotoelektrik etki ile oluşturduğu akımlardan yararlanılarak gelen ışınların açısal pozisyonları Şekil 5.3'de verilen eşitlikler yardımı ile hesaplanır.



Şekil 5.3 Algılayıcı üzerindeki lazer beneğinden ışığın açısal konumunun bulunması

Eşitliklerden de görüldüğü gibi *x* ve *y* eksenlerindeki açısal konumlar ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Açısal pozisyonun hesaplanabilmesi için lazer beneğinin dört algılayıcı dilimi üzerine de düşmesi gerekir. Beneğin daha az sayıda kadrana düşmesi durmunda sadece sağ, sol, yukarı veya aşağı yönelim bilgileri elde edilmektedir. Şekilde verilen eşitliklerden elde edilen sinyal normalize edilmiş bir sinyaldir. Yani x ve y eksenleri için elde edilen sonuçlar -1 ile +1 arasında değerler alabilirler. Bu sonuçlara sapma sinyali denilir. Örneğin bu tip bir sistemde karşıdan gelen ışımanın geliş açısına karşı x veya y ekseni için elde edeceğimiz sapma sinyali eğrisi Şekil 5.4'deki gibi olacaktır.

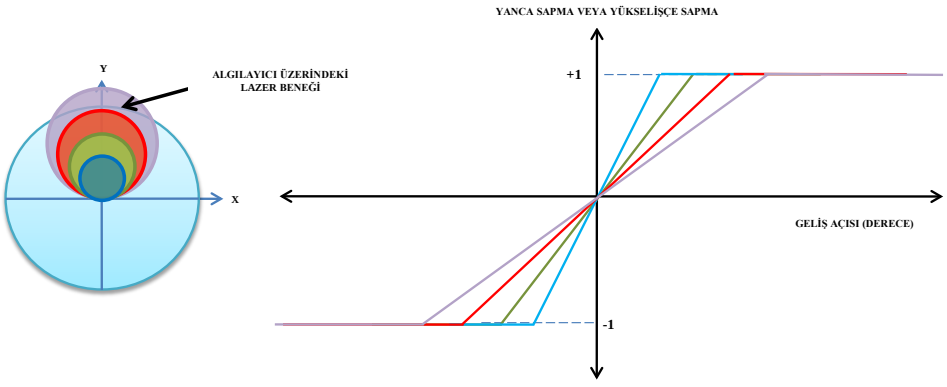


Şekil 5.4 Lazer geliş açısına karşı sapma sinyali grafiği

Şekil 5.4'de -1 ile +1 değerleri arasında kalan eğrinin olduğu kısım lazer beneğinin algılayıcının dört diliminine birden düştüğü bölümdür. Beneğin dörtten az sayıda dilim üzerine düşmesi durumunda sinyal -1 veya +1 değerini almaktadır.

Beneğin dört dilim üzerine düştüğü bölge içerisinde gelen ışımanın açısal konumunun belirlenebilmesi mümkün olduğu için bu bölge görüş alanı *(ing. Field Of View)* olarak isimlendirilir. Sinyalin -1 ile +1 değerlerini aldığı bölge ise toplam görüş alanı *(ing. Field of Regard)* olarak isimlendirilir. Bu bölgede ise gelen ışımanın sadece yönelim bilgisi söylenebilmektedir.

Optik tasarımlarda yapılan değişiklikler ile algılayıcı üzerine düşen lazer benek büyüklüğü değiştirilebilmektedir. Lazer benek büyüklüğünün değiştirilmesi de sistemin görüş alanının değişmesine neden olmaktadır. (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Lazer benek nüyüklüğüne bağlı olarak görüş alanı değişimi

Tasarımda modellenecek olan 4 dilimli algılayıcı OSI Optoelectronics firmasının PIN-100-YAG model numaralı ürünüdür. Algılayıcı 11,28 mm aktif alan çapına sahiptir.



Şekil 5.6 OSI Optoelectronics firmasının PIN-100-YAG model numaralı dört dilimli algılayıcısı

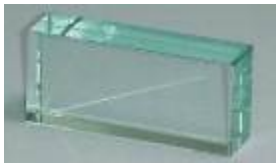
5.1.2 Geniş görüş açısına sahip arayıcı optik tasarımı

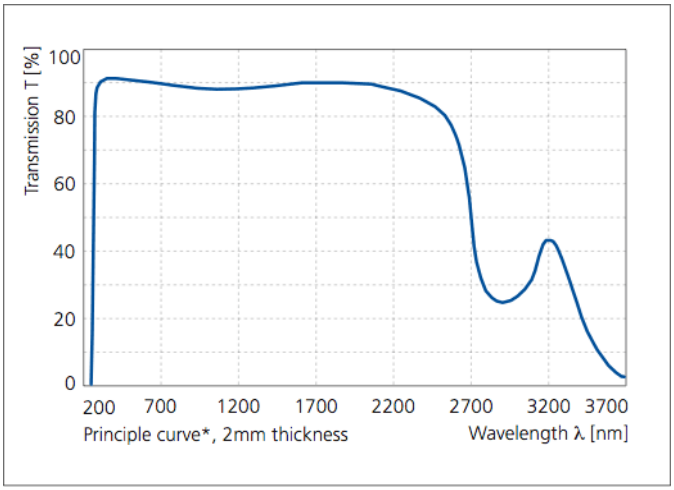
5.1.2.1 Kubbe malzemesi seçimi

Lazer güdümlü arayıcı başlıklarda kubbe malzemesi belirlenirken kullanılacağı mühimmatın teknik gereksinimlerine bakılmalıdır. Teknik gereksinimlerde bahsedilen titreşim, sıcaklık, ivme parametreleri kullanılacak malzemenin belirlenmesi açısından önemlidir.

Mevcut tasarım yapılırken mühimmatın aşırı zorlayıcı çevresel koşullara maruz kalmayacağı kabulu yapılmıştır. Aşırı zorlu koşullar kısaca; ses hızının çok üzerindeki hızlarda uzun saatler boyunca mühümmatın bağlı uçuşa maruz bırakıldıkları şartlar olarak tanımlanabilir. Helikopterden veya yerden atılan ve genellikle ses hızının çok üzerinde uçmayan bir mühimmat için safir gibi aşırı dayanıklı ve pahalı bir malzemenin seçilmesi maliyet etkin bir çözüm olmayacaktır. Bunun yerine *Pyrex* malzemenin kullanılması yeterlidir. Ticari bir marka ismi olan *Pyrex* aslında Bor madeni katkılı camdır. Borasilikat olarak da bilinir. Bor katkısı cama yüksek sertlik, çizilmeye karşı dayanıklılık ve düşük termal genleşme özelliklerini sağlarken ışık geçirgenlik değerlerinde ölçülebilir bir azalmaya neden olmaz.

Tablo 5.1 Pyrex camının özellikleri

	**Parametre**	**Büyüklük**
	Kırılma İndisi	1,474 (588nm)
	Yoğunluk	2,23 g/cm^3
	Termal Genleşme Katsayısı (0-300°C)	32,5x10^{-7}



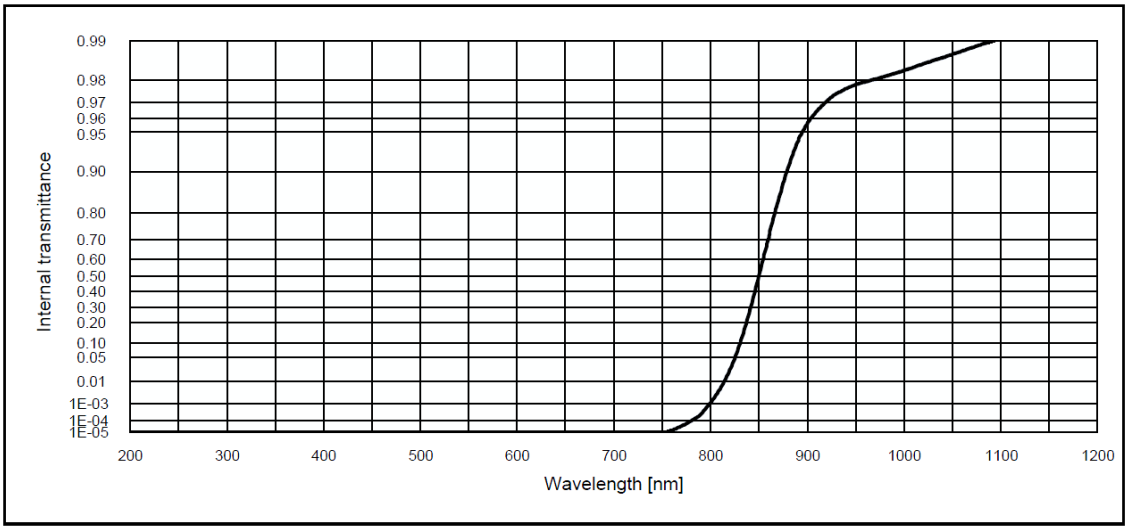
Şekil 5.7 Pyrex camının dalgaboyuna bağlı geçirgenlik değerleri

5.1.2.2 Filtre alttaşının seçimi

Filtre kaplamasının yapılacağı alttaş seçilirken malzeme özellikleri sayesinde kendiliğinden istenmeyen dalga boylarını geçirmeyen cam çeşitlerinin seçilmesi önemlidir. Bu sayede daha basit/az katmanlı kaplamalarla aynı performans gereksinimleri karşılanabilmekte ve filtre maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılacak olan dar bant geçirgen filtrede alttaş malzemesi olarak RG850 camı seçilmiştir. Bu malzeme görünür bölgede ışığı geçirmeyip yakın IR bölgede yüksek geçirgenlik göstermektedir.



Şekil 5.8 RG850 camı



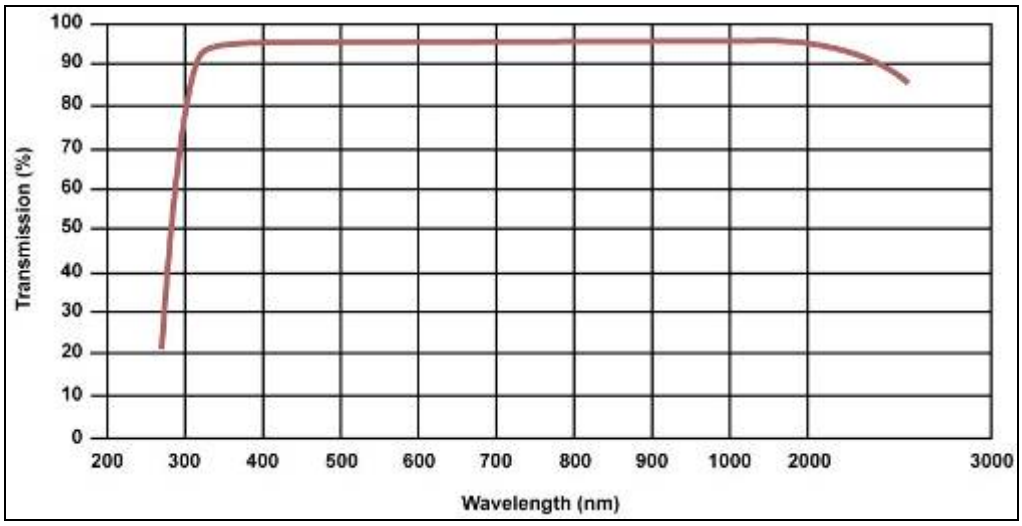
Şekil 5.9 RG850 camının dalgaboyuna karşı gerçirgenlik eğrisi

Çizelge 5.1 RG850 camının özellikleri

Parametre	**Büyüklük**
Kırılma İndisi	1,56
Yoğunluk	2,93 g/cm^3
Termal Genleşme Katsayısı (0-300°C)	10,5x10^{-6}

5.1.2.3 Mercek camlarının seçilmesi

Mercek camları seçilirken sadece çevresel koşul gereksinimlerine değil aynı zamanda mühimmatın görüş açısı gereksinimlerine ve hacim bütçesine (sistemin sığması gereken fiziksel ebatlar) de dikkat edilmesi gerekir. Örneğin küçük bir hacim bütçesi varsa ve geniş görüş açısı performansı isteniyorsa hem az sayıda mercek kullanılması hem de kırılma indisi değerleri yüksek olan camların mercek malzemesi olarak kullanılması gerekir. Bu çalışma kapsamında tasarımı yapılacak olan lazer arayıcı objektifinin orta seviye bir görüş açısına sahip olmasının yeterli olacağı varsayılmıştır. Bunun yanısıra, arayıcı başlık çevresel koşul gereksinimlerinin çok zorlayıcı olmayacağı varsayımı yapıldığı için en ucuz cam çeşitlerinden olan BK-7 camının kullanılmasının yeterli olacağı kabul edilmiştir.



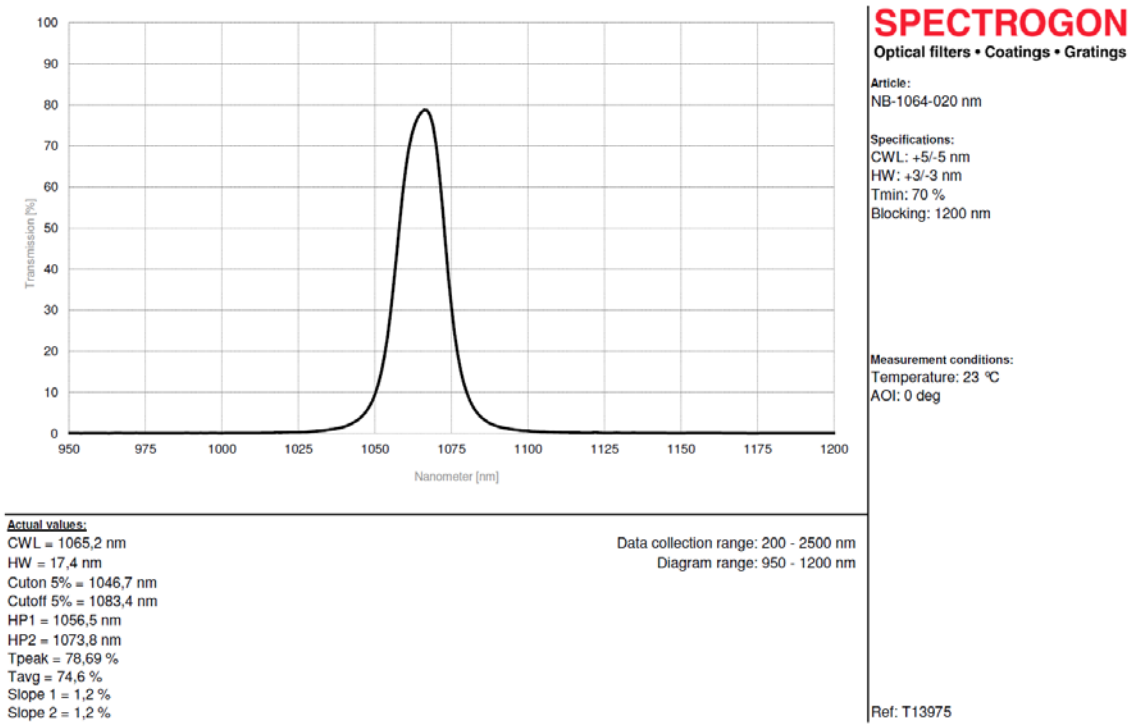
Şekil 5.10 BK7 camı dalgaboyuna karşı geçirgenlik grafiği

Çizelge 5.2 BK7 camının özellikleri

Parametre	**Büyüklük**
Kırılma İndisi	1,51 (@587nm)
Yoğunluk	2,51
Termal Genleşme Katsayısı (-30/+70°C)	$7{,}1 \times 10^{-6}$

5.1.3 Dar bant geçirgen filtrenin modellenmesi

Dar bant geçirgen filtreler optik sistemlerde, özellikle güdümlü mühimmatların lazer arayıcı başlıklarında istenmeyen dalgaboylarındaki ışımaları engellemek amacı ile kullanılmaktadırlar. Zemax yazılımı kullanılarak bu tip filtrelerin modellenebilmesi mümkündür. Filtrelerin en önemli özellikleri geçirgen oldukları dalgaboyları, bant genişliği ve geliş açısına bağlı geçirgenlik değerleridir. Yapılacak test çalışması için geniş ışıma geliş açılarında da 1064 nm geçirgenliği yüksek olan bir filtre kullanılacaktır. Spectrogon firmasının NB-1064-20 nm ürün numaralı dar bant geçirgen filtresinin teknik özelliklerinin bu amaca uygun olduğu değerlendirilmiş ve bu ürün tedarik edilmiştir.



Şekil 5.11 NB-1064-20 nm filtresi

Ürünün, 1064 nm dalgaboyundaki ışımanın filtre yüzeyi normaline göre geliş açısına karşı geçirgenlik değerlerinin ölçülmesi için Pelkin Elmer Marka Lambda 950 modeli Spektrofotometre cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.12).

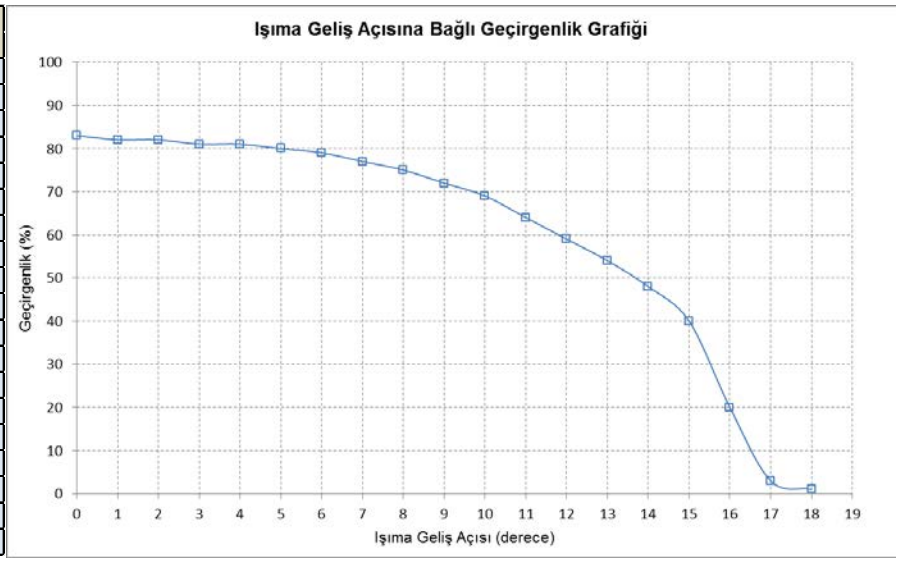


Şekil 5.12 Pelkin Elmer Lambda 950 spektrofotometre cihazı

Filtre üzerinden alınan ölçümlere göre 1064 nm dalgaboylu ışımanın geliş açısına bağlı geçirgenlik değerleri aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Çizelge 5.3 Dar bant geçirgen optik filtenin ışıma geliş açısına bağlı geçirgenliği

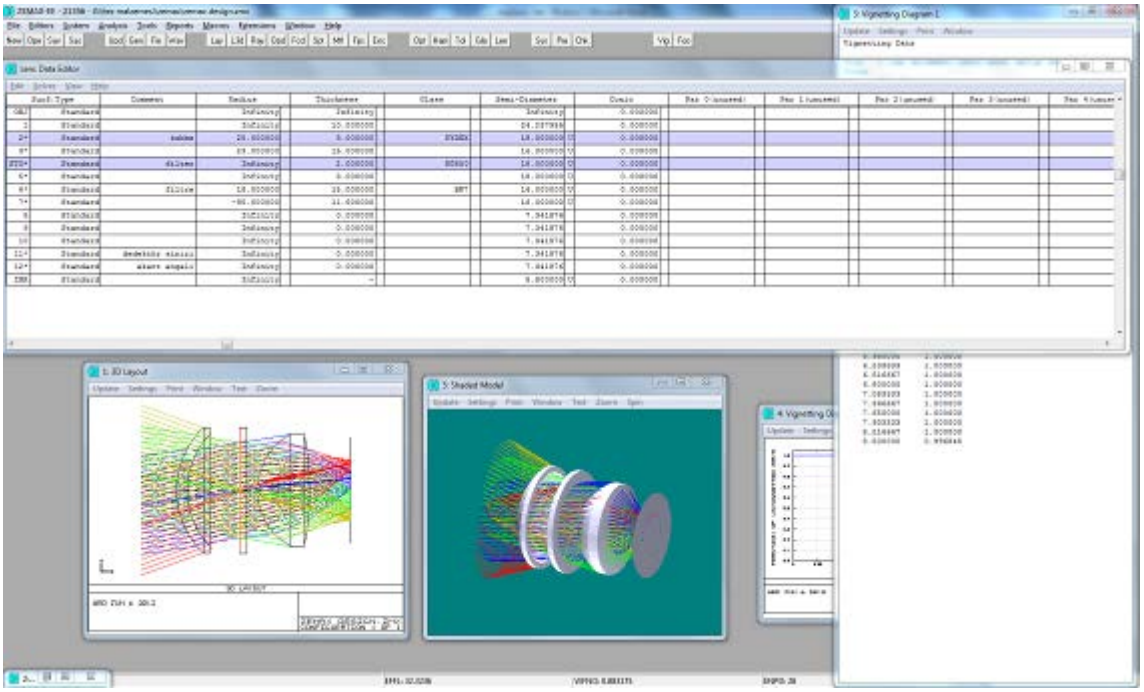
Işıma Geliş Açısı	Geçirgenlik (%)
0	83
1	82
2	82
3	81
4	81
5	80
6	79
7	77
8	75
9	72
10	69
11	64
12	59
13	54
14	48
15	40
16	20
17	3
18	1



Elde edilen bu veriler kullanılarak Zemax optik tasarım ve analiz programındaki filtrenin ışıma geliş açısına bağlı geçirgenlik değerleri tanımlanacaktır. Böylelikle filtrenin üzerine gelen 1064 nm dalgaboyundaki ışımaya verdiği tepki modellenebilecektir.

5.1.4 Optik tasarım

Objektifin optik tasarımı Zemax yazılımı ile yapılmıştır.

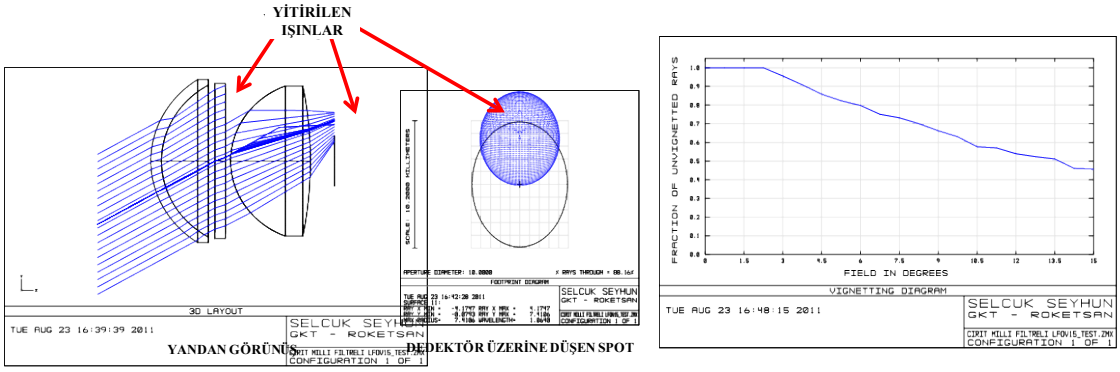


Şekil 5.13 Optik tasarım

Yapılan tasarımdaki optik bileşenlerin mekanik ebatları ve bu bileşenlerin yerleşim düzenine ait ayrıntı bilgileri **EK-3** 'de verilmektedir.

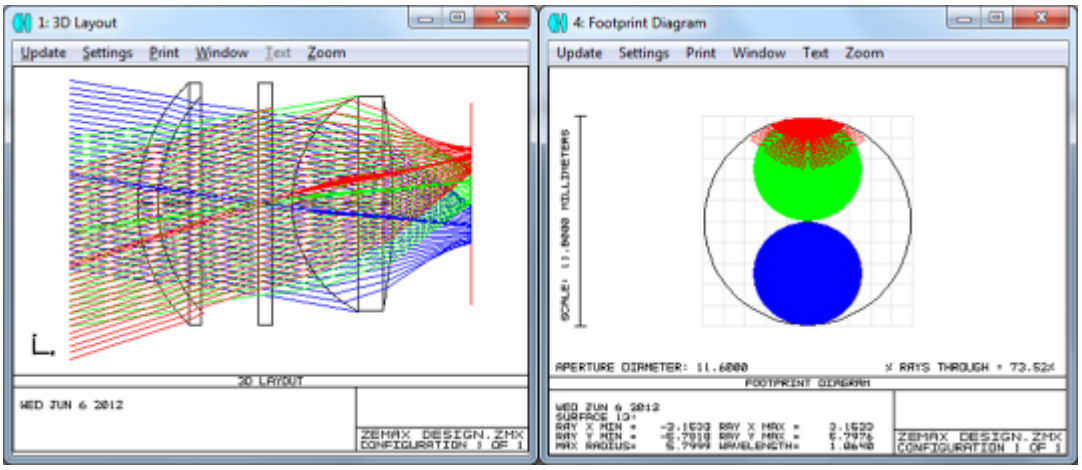
5.1.5 Optik tasarımın vignetting performansı

Büyük FOV değerleri elde edebilmek için dedektör üzerindeki lazer beneğinin büyütülmesi gerekir. Lazer beneği ne kadar büyük olursa, artan lazer geliş açılarında lazer beneği o kadar erken dedektör yüzeyinin dışına çıkmaya başlar. Geliş açısındaki artışa bağlı olarak, optik sistemin girişinden geçip algılayıcı üzerine aktarılabilen ışığın bir kısmı algılayıcı alanı dışına çıkmaya başlamakta ve algılayıcı üzerine aktarılan ışık miktarında azalma olmaktadır. Işığın geliş açısına bağlı bu etkisine *vignetting* (zayıflama, azalma, yitirilme) denilmektedir (Şekil 5.14) ve büyük geliş açılarında ışınların yitirilmesi kaçınılmazdır. Hangi seviyeye kadar ışınların yitirilmesinin kabul edilebileceği ile ilgili bir kısıtlama yoktur. Bu tamamen görüntüleme sisteminin teknik gereksinimleri ile ilgilidir.



Şekil 5.14 Yitirilen ışınlar

Yapılan tasarımda minimum yitirilen ışıma kaybına neden olacak mümkün olan en uygun benek çap değeri sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 5.15 Algılayıcı üzerinde görüş alanı ve toplam görüş alanı sınırlarında benek görünüşleri

Tasarımın görüş alanı ±8.5°, toplam görüş alanı ise ±18°'dir. Mevcut tasarımın 1064 nm ışıma geliş açısına bağlı olarak maruz kaldığı vignetting kayıpları Çizelge 5.4.'de verilmektedir.

Çizelge 5.4 Işıma geliş açısına bağlı algılayıcıya foton aktarılma yüzdesi

Işıma Geliş Açısı (°)	Algılayıcıya Aktarılan (%)
0	100
1	100
2	100
3	100
4	100
5	100
6	100
7	100
8	100
9	96
10	88
11	79
12	71
13	63
14	53
15	45
16	37
17	28
18	19

Burada algılayıcı yüzeye ulaşmayan ışınların oldukça önemli bir kısmı optik bileşenleri tutan objektif mekanik bütününün iç yapısı içerisinde saçılmakta ve kaçak ışınlara neden olmaktadır. Bu sebeple hem algılayıcı üzerine düşen kaçak ışınları azaltacak bir mekanik tasarım yapılması, hem de bu mekanik parçalar üretilirken 1064 nm dalgaboyundaki yansıtıcılıklarının düşük olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir.

5.2 Objektif Ham Maddesinin Belirlenmesi

Objektif ham maddesi olarak kullanılabilecek çeşitli malzemeler vardır. Bu malzemeler metal veya ametal olabilirler. Üzerinde çalışılacak perde ham maddesinin belirlenebilmesi için kolay işlenebilir malzemeler tercih edilecektir. Örneğin, çelik bu amaç için uygun bir ham madde değildir. Perde tasarımları detay seviyesi yüksek mekanik tasarımlara sahip olduğundan çelik gibi sert ham maddelerin işlenmesi çok uzun sürmekte, bu da ürün maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Perde üretimi için en maliyet etkin metal ham madde çözümü alüminyum olarak görülmektedir. Bunun yanısıra Delrin, Teflon, Kestamid, Polyamid gibi ametal malzemelerin de kullanılabileceği uygun görülmektedir. En uygun malzemenin belirlenebilmesi amacı ile

yukarıda bahsedilen ürünlerden küçük miktarda numuneler tedarik edilmiştir (Şekil 5.16).

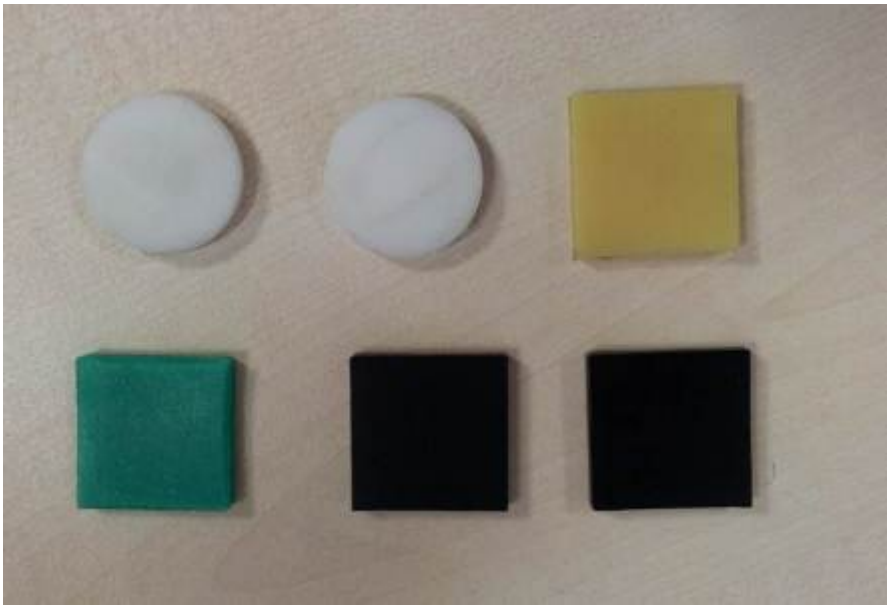


Şekil 5.16. Ametal numuneler

Alınan ürünlerin yansıtıcılıklarının belirlenebilmesi amacı ile eşit büyüklüklerde kare ve dairesel parçalar kestirilmiş ve Şekil 5.17'de gösterilen CAM tezgahında temizletilerek yüzey kaliteleri üretilecek perde numunelerinin sahip olacağı yüzey kalitesi seviyesine getirilmiştir (Şekil 5.18) .



Şekil 5.17 CAM tezgahı



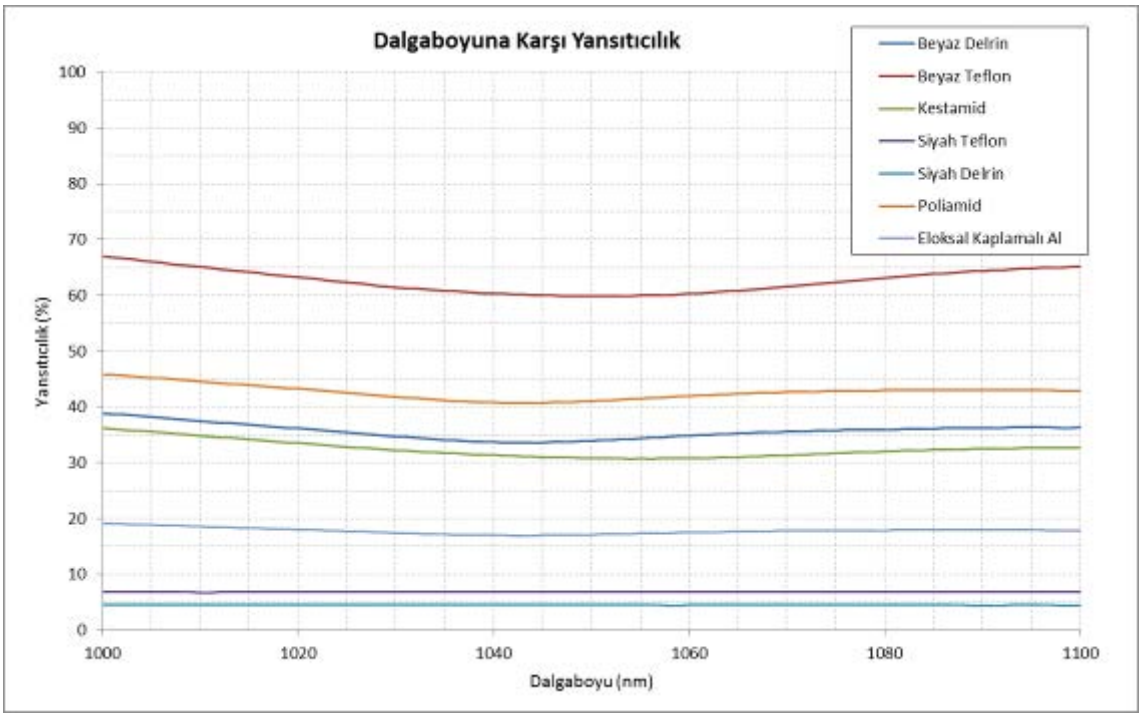
Şekil 5.18 Ürettirilen numuneler

Ürettirilen numunelerin dalgaboyuna bağlı yansıtıcılıkları Pelkin Elmer firmasının Lambda 950 spektrofotometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 Pelkin Elmer Lambda 950 spektrofotometre cihazı

Işıma dalgaboyuna karşı numunelerin % yansıtıcılık değerleri Şekil 5.20'de verilmektedir. Görüldüğü gibi en düşük yansıtıcılık değerine siyah Delrin malzemesi sahiptir. Siyah teflon malzeme de siyah Delrin gibi düşük yansıtıcılık değerleri göstermektedir.



Şekil 5.20 Ürettirilen numunelerin dalgaboyuna karşı yansıtıcılık değerleri

Ürettirilen numunelerin ham maddeleri ve özellikleri Çizelge 5.5'de verilmektedir.

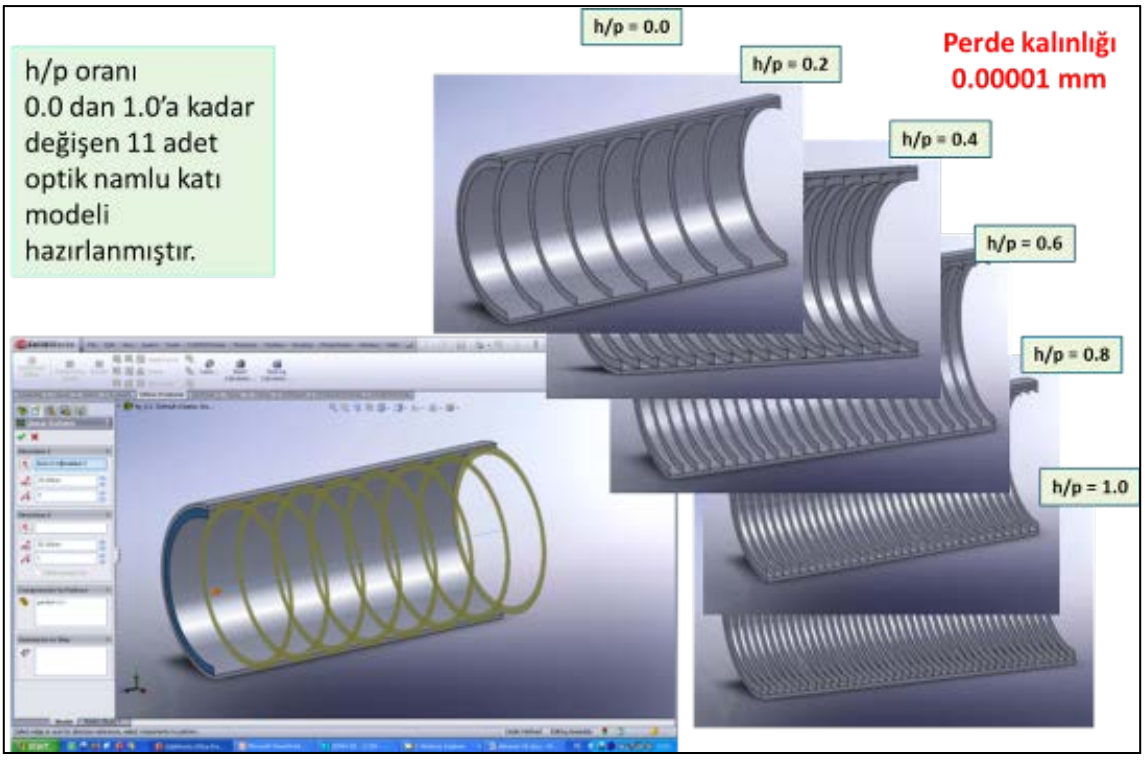
Çizelge 5.5 Kullanılan mühendislik plastiklerinin teknik özellikleri

Özellikler	Test Metodu	Malzeme					
		Beyaz Delrin	Beyaz Teflon	Kestamid	Siyah Delrin	Siyah Teflon	Polyamid
Özkütle (gr/m^3)	ISO 1183	1,42	2,15	1,15	1,42	2,15	1,14
Mekanik Özellikler							
Basma Dayanımı (Mpa)	ISO 604			1100	365		
Darbe Dayanımı (IZOD)	ASTM D-2240		15,5 - 16,5	85		8,5 - 9,0	3,0 - 15,0
Çekme Dayanımı (Mpa)	ISO 527		250-300	85		165-170	650
Kopma Uzaması (%)	ISO 527		250-300	>20		155-165	30-300
Dielektrik Dayanımı (KV/mm)	ASTM D-149	3,7	50-80	30	3,7	13-19	
Termal Özellikler							
Ergime Sıcaklığı (°C)	ISO 3146	175	325	220	172	315	210
Maksimum Sürekli Çalışma Sıcaklığı	ISO 3146	130		110			90
Kısa Sürekli Maks. Çalışma Sıcaklığı	ISO 3146	160		170			150
Isı Genleşme Katsayısı	ISO 11359	$1x10^{-4}$	0,035	$8x10^{-5}$		0,085	

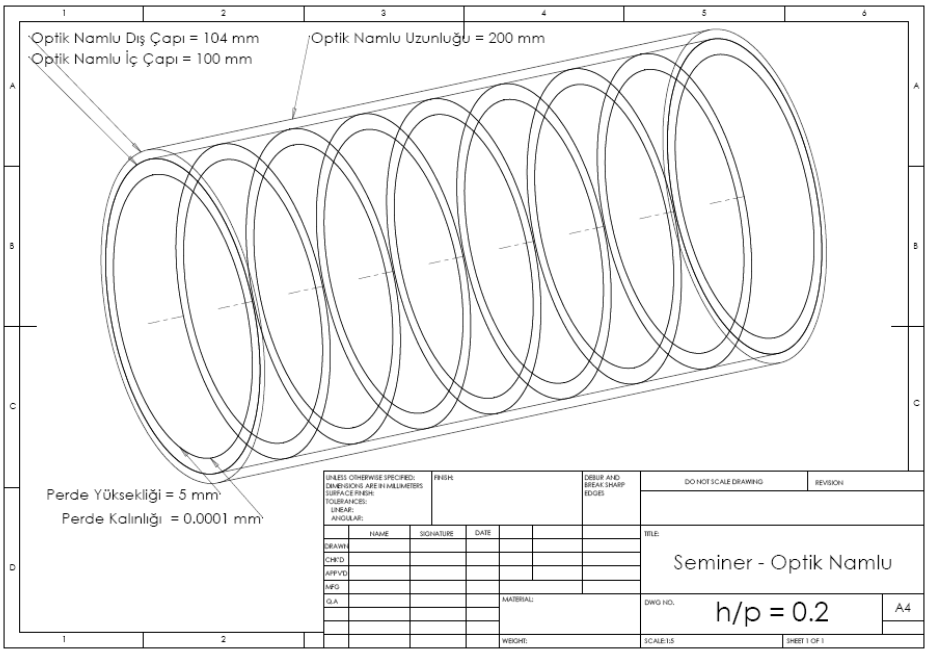
Yüksek sıcaklık gereksinimlerinin söz konusu olduğu koşullarda siyah teflonun kullanılması daha uygun görülmektedir. Yapılan tasarımın çevresel koşul gereksinimlerinin -40 ile +75 dereceleri arasında olacağı öngörüldüğünden bu tez çalışmasında perde üretim malzemesi olarak siyah Delrin seçilmiştir.

5.3 Objektif İçi Perde Tasarımının Yapılması

Perdelerin en verimli sıklıkta konumlandırılabilmesi için aşağıdaki kar/zarar hesabı yapılmıştır. Öncelikle hiçbir optik eleman içermeyen sadece perdeler içeren mekanik yapı modellenmiştir. Bir ucuna *Lambertian* ışıma kaynağı diğer ucuna da tek piksellik bir dedektör yerleştirilmiştir. Objektif içerisine iç yarıçapları sabit olan sadece aralarındaki uzaklık değişen perdeler yerleştirilmiştir. Objektifin her iki ucunda da birer perde sabit olarak tutulmaktadır. Perdelerin büyük ve küçük çapları sabittir. Perdelerin iç yarıçaplarındaki düz bölgelerden kaynaklanacak yansımaların ihmal edilebilmesi için perdeler sonsuz incelikte kabul edilmektedirler. Dağınık ve speküler saçılma perde profillerinin her ikisinde de incelenmiştir. Perdelerin etkinliği dedektör üzerine düşen saçılmış ışın miktarı ölçülerek incelenmiştir.

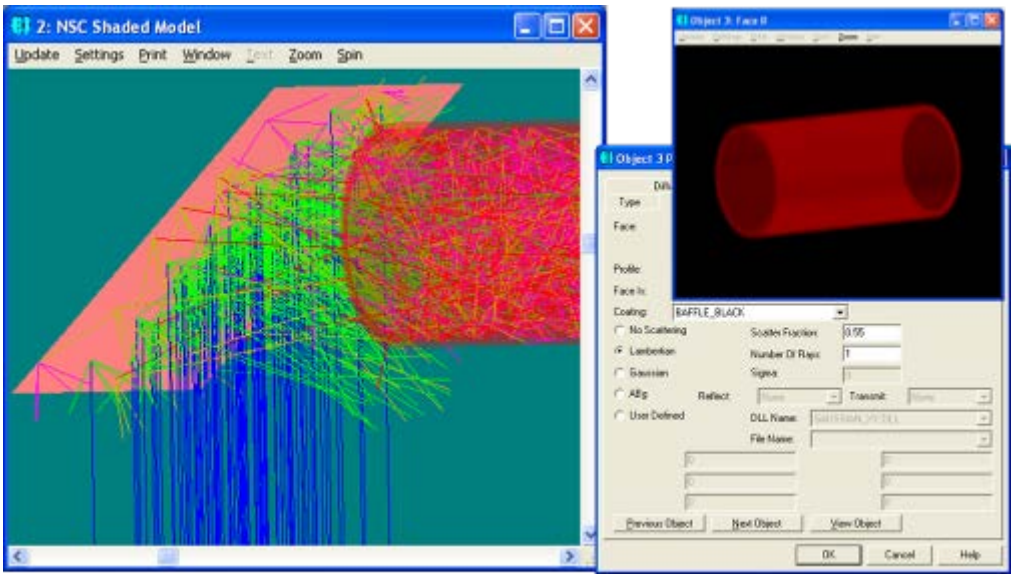


Şekil 5.21 Farklı perde konfigürasyonlarına ait katı modeller



Şekil 5.22 Objektif prototipi katı modeli

Sonuçlar objektifin her iki ucunda mükemmel speküler iki perdenin konumlandırıldığı duruma göre normalize edilmiştir. Doğrudan dedektör üzerine düşen ışıma saçılmış olmadığından hesaplamalara dahil edilmemektedir. Dedektöre gelene kadar 100 ve üzeri sekmeye uğrayan ışınlar çok zayıf şiddette olacaklarından ihmal edilmişlerdir. Perde test konfigürasyonunun bir örneği Şekil 5.23'de verilmektedir.

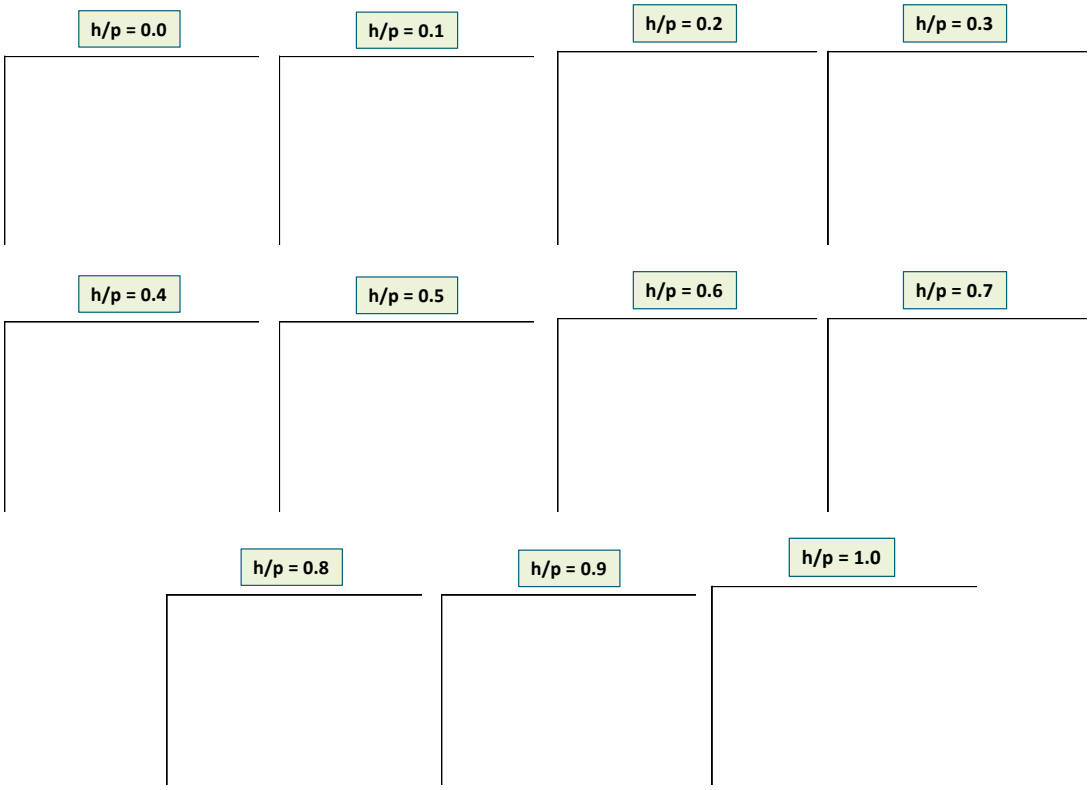


Şekil 5.23 Perde analizi Zemax modeli

Saçılan ışınları daha iyi görebilmek için 100 x 100 piksellik bir algılayıcı tanımlanmış ve optik namlunun arka tarafına konumlandırılmıştır. Perdelerin etkinliği dedektör üzerine düşen kaçak ışın miktarının ölçülmesi ile belirlenmektedir. Zemax yazılımı, uygun filtreler kullanıldığı takdirde algılayıcı üzerine düşen ışınların hangilerinin doğrudan Lambertian kaynaktan saçılarak, hangilerinin de optik namlu iç yüzeyinden saçılarak geldiğinin ayrımını yapabilmektedir.



Şekil 5.24 Farklı perde konfigürasyonlarında dedektör üzerine düşen kaçak ışınlar



Analiz sonuçları perde sayısı arttırıldıkça p değeri azalırken dedektöre ulaşan saçılmış ışık miktarının da azalmakta olduğunu göstermektedir (Çizelge 5.6). Perdenin yüksekliği (h) analizlerde sabittir (Gerçek bir sistemdeki perdelerin etkinliğinden emin olmak için kaçak ışın modeline gereksinim vardır. Bu örnekte hiç bir optik eleman içermeyen mekanik bir yapı modellenmiştir. Modeldeki mekanik ve perde yüzeyleri oldukça yüksek yansıtıcılığa sahiptir. Böylelikle basit bir soğuruculuğa sahip yüzeylerin bile daha etkili performans göstermesi beklenmektedir.).

Çizelge 5.6 Artan perde sayısına göre dedektöre düşen ışıma miktarındaki değişimin normalize edilmiş sonuçları

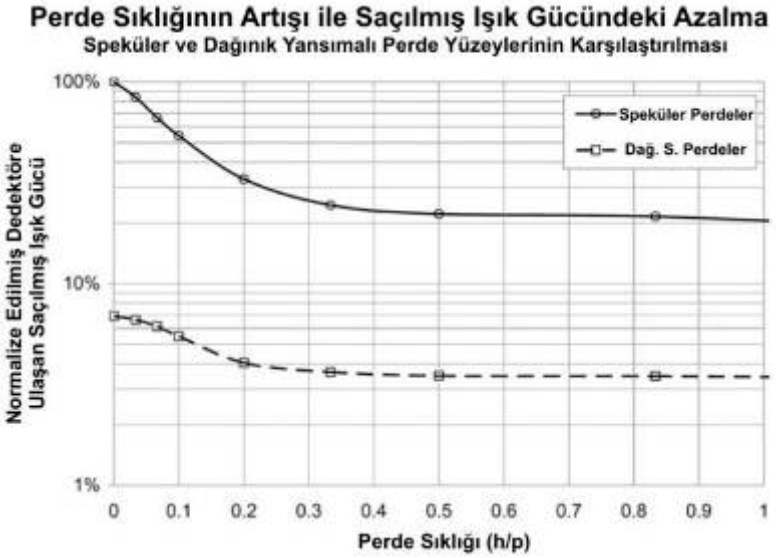
h/p Oranı (X)	Algılanan Saçılma (Y)	Normalize Sonuç (Y)
0	7445	1,0000
0,1	4034	0,5418
0,2	2444	0,3283
0,3	1939	0,2604
0,4	1711	0,2298
0,5	1650	0,2216
0,6	1621	0,2177
0,7	1615	0,2170
0,8	1601	0,2151
0,9	1577	0,2119
1	1518	0,2039

Sonuçlar perde yüksekliği ve perde aralığı oranının (h/p) dedektöre ulaşan saçılmış ışık cinsinden gösterildiği Şekil 5.25'de verilmektedir.



Şekil 5.25 Namlu içerisindeki perde sıklığının saçılma azaltılmasına etkisi

Burada modellenen speküler yansımaya sahip bir mekanik yapının gerçek bir optik sistemde kullanılması beklenmemektedir. Bu modellemede, perde konumlarının ve sıklığının perde malzemesinden bağımsız olarak saçılma baskılamasında nasıl etkin olabileceğini göstermek amacı ile speküler yansıtıcı yüzeyler seçilmiştir. Daha karmaşık ve yüzeylerinin saçılmış yansıma yaptığı bir sistemde saçılmış ışın baskılamasının daha başarılı olacağı ortadadır. Speküler ve dağınık yansımalı perdelerden oluşan iki sistemin karşılaştırılması Şekil 5.26'da yapılmaktadır. Dağınık yansıtıcı malzemeler ışımanın % 90'ını 90^0 lik bir koni içerisinde saçtırırlar ve her sekmede enerjinin % 10 kadarını soğururlar. Speküler saçtırıcı nesneler her sekmede enerjinin % 99 kadarını yansıtırlar. Enerjinin sadece % 1'i her sekmede soğurulmaktadır.



Şekil 5.26 Dağınık ve speküler yansımalı perdelerin karşılaştırılması

Saçılma baskılamasının perde aralıklarının azaltılması ile hangi hızda başarılı olduğu Şekil 5.26'da verilen grafiğin eğiminin incelenmesi ile anlaşılabilir. Şekil 5.26 incelendiğinde speküler ve dağınık yansımalı perdelerin benzer davranışlar gösterdiği görülür. h/p oranının 0,5'e ulaştığı noktadan sonra perde sayısının arttırılmasının saçılmış ışın baskılamasında olumlu yönde büyük bir etkisi olmamaktadır.

Bu noktadan sonra perde eklemek, mekanik tasarımda karmaşıklığa neden olurken çok az fayda sağlayacağından gereksizdir. h/p = 0.5 oranının optimum bir değer olduğu

kabul edildikten sonra perdelerin üzerlerinde düz tepelerin de dikkate alındığı başka bir senaryoya geçilmiştir. Üretimde kaçınılmaz olan düz kenarlar perdelerin verimliliklerini olumsuz etkilemektedirler. Bu konu kapsamlı olarak 5.3.3 Diş profilleri kesiminde incelenmektedir.

Bahsedildiği gibi bu analiz perdelerden mükemmel olmayan soğurmanın gerçekleştiği varsayımını yapmaktadır. Aslında perdeler genelde iyi soğuruculardır veya en azından öyle olacak şekilde tasarlanmalıdırlar. Eğer perdelerin % 100 soğurucu yüzeylere sahip olduklarını kabul edecek olursak o zaman en az sayıda perde kullanarak oluşturulabilecek bir perde geometrisini tasarlayabiliriz.

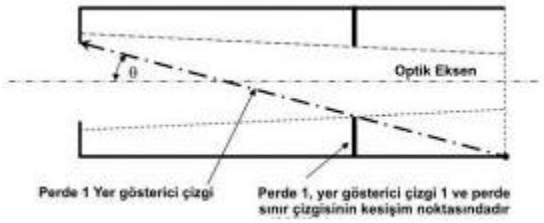
5.3.1 En verimli perde geometrisi

Yüzey pürüzlendirilmesi ve karartılması ile oldukça yüksek soğuruculuğa sahip olduğu kabul edilen perde yüzeyleri için verimin en yüksek seviyede olduğu bir perde ayrımı düzenlemesi yapmak mümkündür. Yapı, tekil yapısal yansımaları önleyebilmek için gereken minimum perde adedini kullanmaktadır.

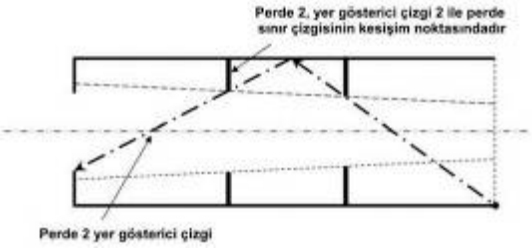
Şekil 5.27'de bir optik sistem namlusu ve bu sistemin marjinal ışın doğrultuları gösterilmektedir. Basitlik sağlamak amacı ile sisteme optik eleman eklenmemiştir. Opto-mekanik yüzeyler, giriş açıklığı ve marjinal ışınlar tanımlıdır. Odak düzlemi tanımlıdır ama bu optik sisteme minimum kaçak ışının girebileceği ortada bir nokta bile olabilir. Örneğin, bir Cassegrain teleskop sistemi için bu noktayı ana ayna olarak tanımlayabiliriz.



(a) Bir optik sistem namlusu



(b) Yer gösterici çizgi 1, ilk perde için ideal konumu göstermektedir



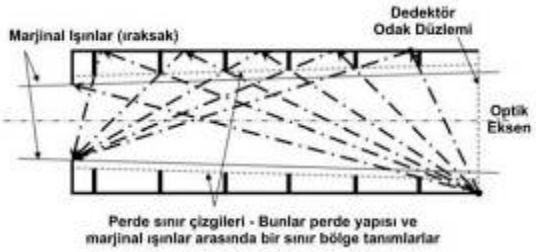
(c) Yer gösterici çizgi 2, ikinci perde için ideal konumu göstermektedir



(d) Yer gösterici çizgi 3, üçüncü perde için ideal konumu göstermektedir



(e) Yer gösterici çizgi 4, başka bir perdelemeye gerek olmadığını gösteriyor



(f) Iraksayan marjinal ışınlar çok sayıda perdeye ihtiyaç duymaktadırlar

Şekil 5.27 Bir optik sistemin namlusu ve marjinal ışın konumları

Şekil 5.27'de perde konumlarına bağlı olarak marjinal ışın konumlarını etkileyecek mekanik toleranslar tanımlanmıştır. Perdeler marjinal ışın çizgisinden itibaren yapılan eklerdir. Gerekli ek miktarı sistemin optik toleranslarına bağlı olarak değişecektir. Bu noktada perde çapını gereğinden küçük tutmak daha iyidir. Eğer perde çapı çok büyük tutulacak olursa marjinal ışınlar yitirilmeye (vignetting) maruz kalacağından baştan önlem almak yerinde olacaktır.

Perdelerin konumlarını belirleyebilmek için çalışmaya dedektör düzleminden başlanarak giriş açıklığına doğru ilerlenir. Bu yaklaşımda tüm odak düzlemi

kullanılmaktadır. Gerçekte bir dedektör odak düzleminin merkezindeki nispeten daha küçük bir bölgeyi kullanıyor olabilir. Odak düzlemindeki tüm çapın kullanılıyor olması perdeleyici yapının en yüksek performansı göstermesini sağlar. Odak düzleminden hemen önce son bir perdenin kullanılması yaygın bir uygulamadır. Bu sadece saçılmayı azaltmakla kalmaz aynı zamanda optik eksene oranla dedektörün yerleştirilmesine de yardımcı olur.

Dedektöre doğru, görüş çizgisi doğrultuları arkadan öne doğru sistemli bir biçimde yok edilmiştir. İlk perdenin konumunun saptanabilmesi için "Yer gösterici çizgi 1" (YÇ1) çizilmiştir (Şekil 5.27b). YÇ1 odak düzleminden giriş açıklığının karşı çaprazına doğru olan bir çizgidir. Yerleştirici çizgilerin iç yüzeylerden speküler yansımayı tanımlamak için çizilmediğine dikkat ediniz (Saçılmış ışımada yansıma açısının geliş açısına eşit olması gerekmektedir.). Örneğin, odak düzleminden giriş açıklığına doğru olan düz bir yönelim *Lambertian* saçılmasının bir bileşeni olabilir.Şekil 5.27b'de tanımlanan Perde 1, odak düzlemine optik eksenden ±θ açısı ile gelebilecek olan açı değerlerini belirler. Perde konumunun optik eksen boyunca yerleşim toleransları θ açısının dikliği ile alakalıdır ve *z* objektif uzunluğu, *h* perde yüksekliği olmak üzere $dz = dh / \tan(\theta)$ olarak tanımlanır. Marjinal ışın çizgilerinden perde sınır çizgilerine ekleme yapılırken dikkate alınması gerekir.

İkinci perde konumu "Yer gösterici çizgi 2" (YÇ2) ile perde sınır çizgisinin kesiştiği noktaya yerleştirilir (Şekil 5.27c). Aynı yöntem tekrarlanarak, YÇ3 aracılığı ile üçüncü perdenin konumu belirlenir (Şekil 5.27d). Şekil 5.27e bu tasarım için 4. perdeye gerek olmadığını göstermektedir.

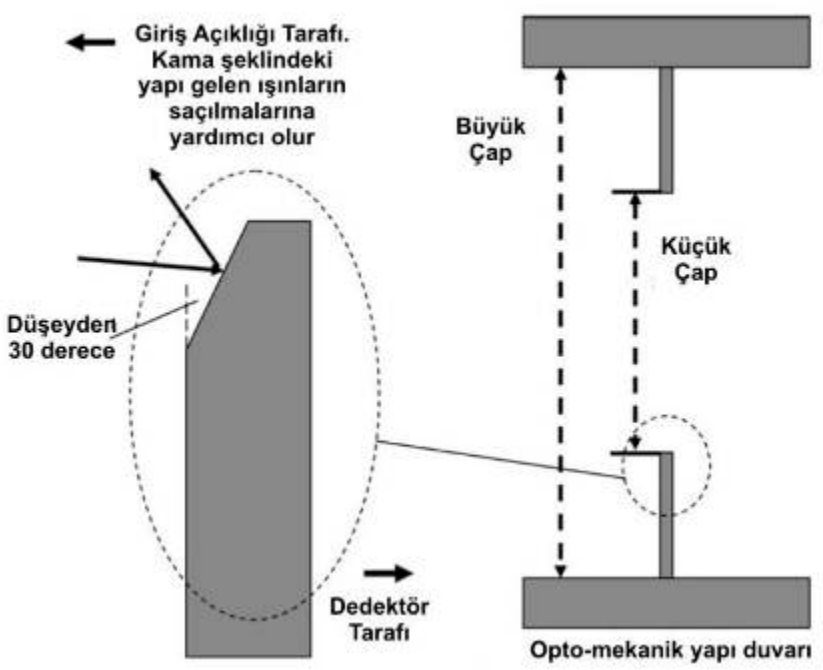
Eğer mekanik yapı içerisindeki marjinal ışın demeti ıraksıyorsa, o zaman daha fazla sayıda perde kullanımı gerekebilir. Bu,Şekil 5.27f'de görülebilir.

Son olarak, tasarlanan bu perdeli yapıya giren ve speküler yansımalara maruz kalan ışık geriye, giriş açıklığına doğru yansıyacaktır. Yapı en fazla 2 yüzey sekmesi kullanmaktadır. Işığın tekrar odak düzlemine doğru yönelebilmesi için üçüncü ve büyük

olasılıkla dördüncü sekmeye ihtiyaç duyacaktır. O zaman bu perde optimizasyonunun "Üç Yansıma Kuralı"nı sağladığını söyleyebiliriz.

5.3.2 Perde profili tasarımı

Tek bir perdenin bile profilini optimize etmek mümkündür. Şekil 5.28 tipik bir perde profilini göstermektedir. Perdeler minimum bir çapa sahip olan opto-mekanik yapı içerisinde belirli bir hacmi tanımlayan ince plakalardır. Objektif duvarının iç çapı perdenin maksimum çapını tanımlar.



Şekil 5.28 Tipik perde profili

Perdelemenin bazı fiziksel sınırlamaları vardır:

- Sonsuz incelikte olamazlar ve uçları da sonsuz keskinlikte olamaz.
- Bir perdenin kenarının kabul edilebilir inceliği 0,1mm ile 0,25 mm arasındadır.
- Keskin kenarlı perdeleri üretmek zordur ve dikkatlice ele alınmaları gerekir.

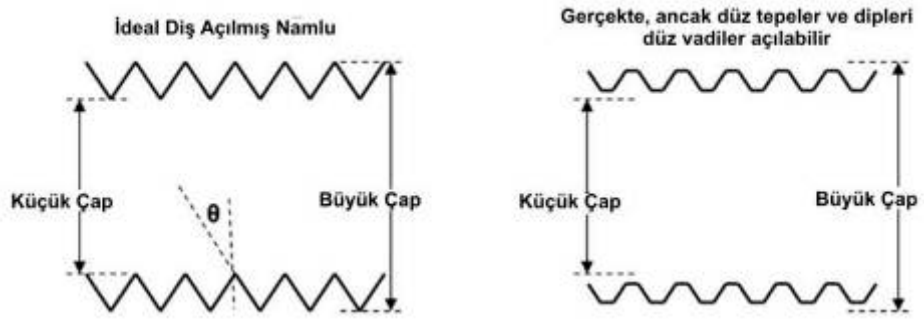
Bu zorluklardan kaçınmak için genellikle objektifin yarıçapına yakın bölgelerde kalın olan fakat kenarlara gelince incelen perde tasarımları kullanılmaktadır. Pah kırılarak ince kenarlı perdeler üretilebilir. Perdenin pah kırılan tarafı giriş açıklığına doğru bakar. Bu yerleşim diğer perdelere ve objektif içyüzeylerinde yer alan dişlere doğru gelen ışının yönlendirilmesini sağlar. Bu tasarım profilinin etkinliğinin sistem

gereksinimlerine göre ayrı ayrı modellenmesi gerekir. Bu yaklaşım birçok uygulama için başarılı bir tasarım yöntemidir.

5.3.3 Diş profilleri

Opto-mekanik yapının iç yüzeylerine diş açmak perdeleme performansını ucuz yolla elde etmenin bir diğer yoludur. Mekanik yapılara açılan dişler mm başına 1 ila 1,25 sıklığındadır. Tipik makine dişleri 45° ile 60° aralıklı yapıdadır. İdeal bir diş profili Şekil 5.29a'da gösterilmektedir. Uygulamada dişler mükemmel keskinlikte kenarlara sahip açılamazlar. Şekil 5.29b'de düz tepe ve çukurlara sahip olan tipik bir diş yapısı gösterilmektedir.

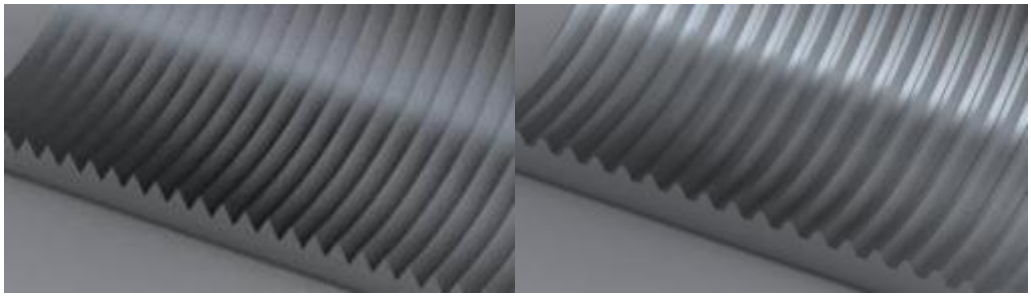
Düz kısımların genişliklerinin 0,1 mm ile 0,25 mm arasında bir değerde olmaları makul bir beklentidir. Dişlerin aralıklarının arttırılmamasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde düz alanlar artacak ve speküler yansıması daha fazla olan bir yüzey elde edilecektir.



Şekil 5.29 İdeal ve gerçek diş profilleri

45° kenar açısına sahip olan bir diş 0,5'lik bir yüksek/aralık oranı (h/p) sunar. Bu daha önce de değinildiği gibi uygun bir orandır. 45° eğimini koruyarak aynı 0,5 h/p oranına fakat daha geniş aralıklara sahip bir dişin daha derin olması gerekir. Arttırılmış aralık kullanılması daha büyük bir objektif çapını gerektirecektir. Bu nedenden ötürü diş sıklığı mm başına 1 ila 1,25 arasında olan dişler uzunluk ve hacimin sınırlı olduğu optik tasarımlarda tercih edilmelidir. Bu dişler teknik çizimlerde "Yansıma önleyici M28 diş aç" gibi uyarılarla belirtilir. Yansıma önleyici notu CAM tezgahı ile üretim yapan kişinin bu dişe herhangi başka parçanın vidalanmayacağı bilgisini verir. Bu tip bir dişin % 12,8 kadarı düz alandır. Bu düz alan tepe ve çukur kısımlardaki düzlüklerin

toplamıdır. Tepe kısımlarda kalan düzlükler sadece % 6,4 kadar olan bir kısımdır (Şekil 5.30). Çukurda kalan kısımlara ışık genelde 2'nci ve 3'üncü sekmelerden sonra ulaştığından tepedeki düzlükler kadar önemli değillerdir. Eğer tepedeki düzlükler de soğurucu kaplamaya sahip değillerse kaçak ışınlar bu düzlükler arayıcılığı ile optik hat boyunca ilerleyecektir.



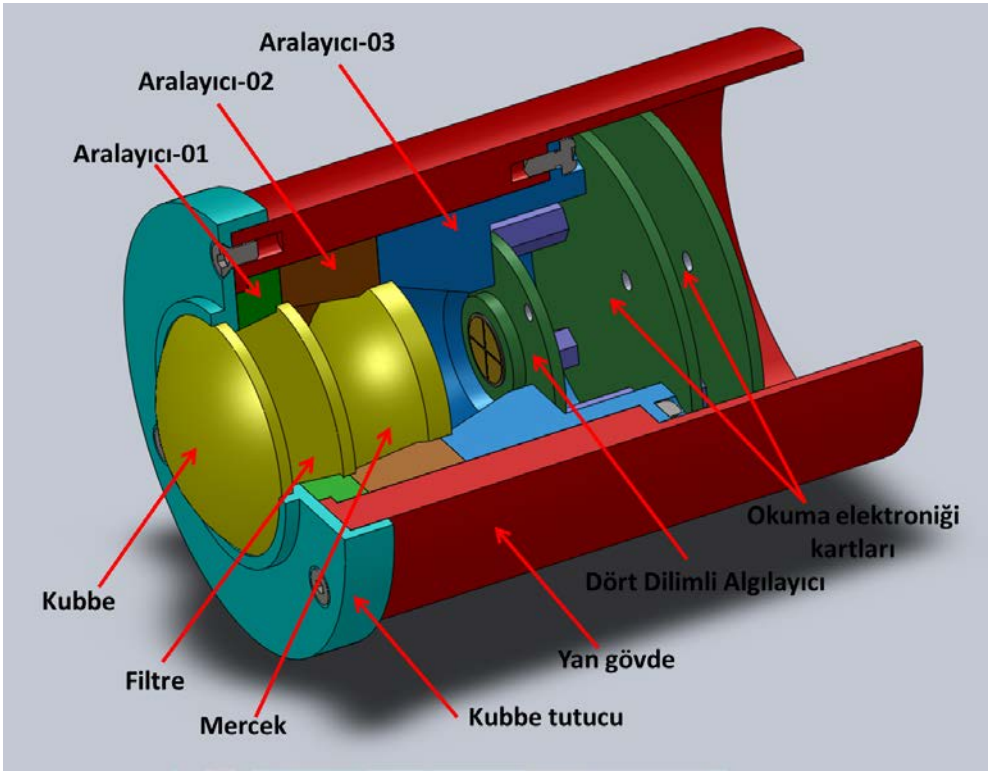
Şekil 5.30 İdeal ve gerçek dış katı modelleri

Daha sıkı diş açılması objektif uzunluğuna oranla tepe ve çukurların oranını kötüleştirecek, dişler birbirlerine yakınlaşırken düzlüklerin genişlikleri azalmayacaktır.

Dişler optik sistemlerde saçılma azaltılması amacı ile yaygın olarak kullanılır, fakat saçılma azaltılmasını verimli bir şekilde gerçekleştirebilmek için perde kullanılması gerekir. Dişler yardımcı olarak kabul edilir, fakat optik saçılma azaltılması için yeterli değillerdir.

5.4 Bilgisayar Modelinin Oluşturulması ve Değerlendirilmesi

Bölüm 5.3'de yapılan analizler sayesinde hiçbir optik bileşen kullanılmadan sadece bir boru içerisindeki perde konumlarının değiştirilmesi ile o tasarım için en uygun perde adedi/perde yüksekliği oranının belirlenebileceği görülmüştür. Buradan yola çıkarak Bölüm 5.1'de yapılan optik tasarım için gerçekçi bir optik eleman tutucu mekaniği yapılmıştır (Şekil 5.31).



Şekil 5.31 Optik tutucu mekanik bütünün katı modeli

Solidworks 3 boyutlu mekanik tasarım yazılımı kullanılarak yapılan tasarımda kubbenin kubbe tutucu olarak isimlendirilen parçaya yapıştırılarak tutturulduğu kabul edilmektedir.

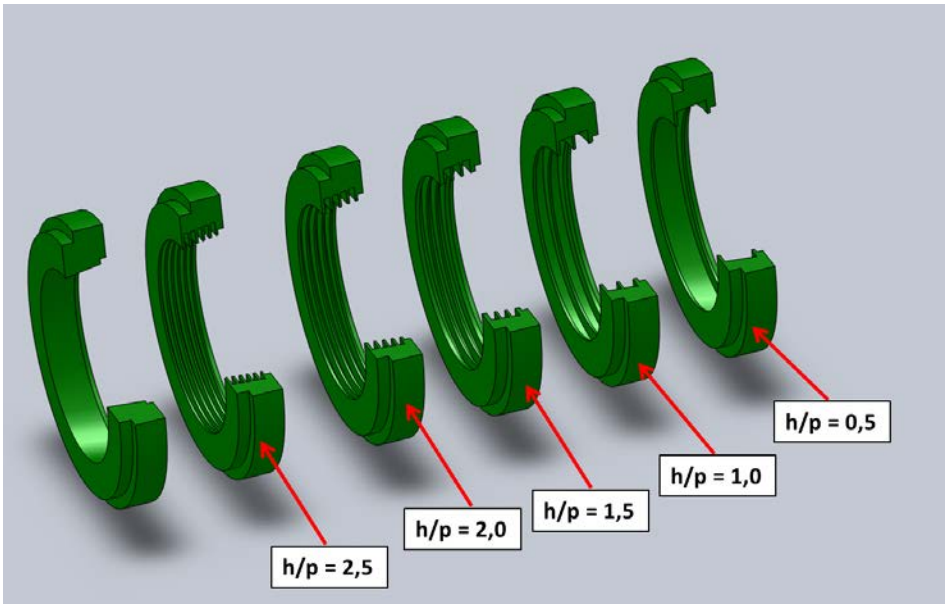
Kubbe tutucu ise yan gövde olarak isimlendirilen ana parçaya 3 eksenel havşa başlı alyen vida ile monte edilmektedir. Kubbe tutucu ve yan gövde alüminyumdan üretilmiştir.

Oluşan bütüne arka açık tarafından sırasıyla Aralayıcı-01, dar bant geçirgen optik filtre, Aralayıcı-02, mercek ve Aralayıcı-03 dizilerek mercimek başlı 4 vida ile vidalanmaktadır. Böylelikle opto-mekanik yapının montajı tamamlanmış olmaktadır. Aralayıcı-01, Aralayıcı-02 ve Aralayıcı-03 isimli parçalar siyah Delrinden üretilmiştir.

Dört dilimli algılayıcı, dört noktadan 14 mm uzunluğunda M3 aralayıcılar ile Aralayıcı-03'e monte edilmektedir. Arkasından 2 adet okuma elektroniği kartının monte edileceği varsayılmıştır.

Mekanik tasarımları yapılan bu parçalara ait teknik çizimler **EK-3**'de verilmektedir.

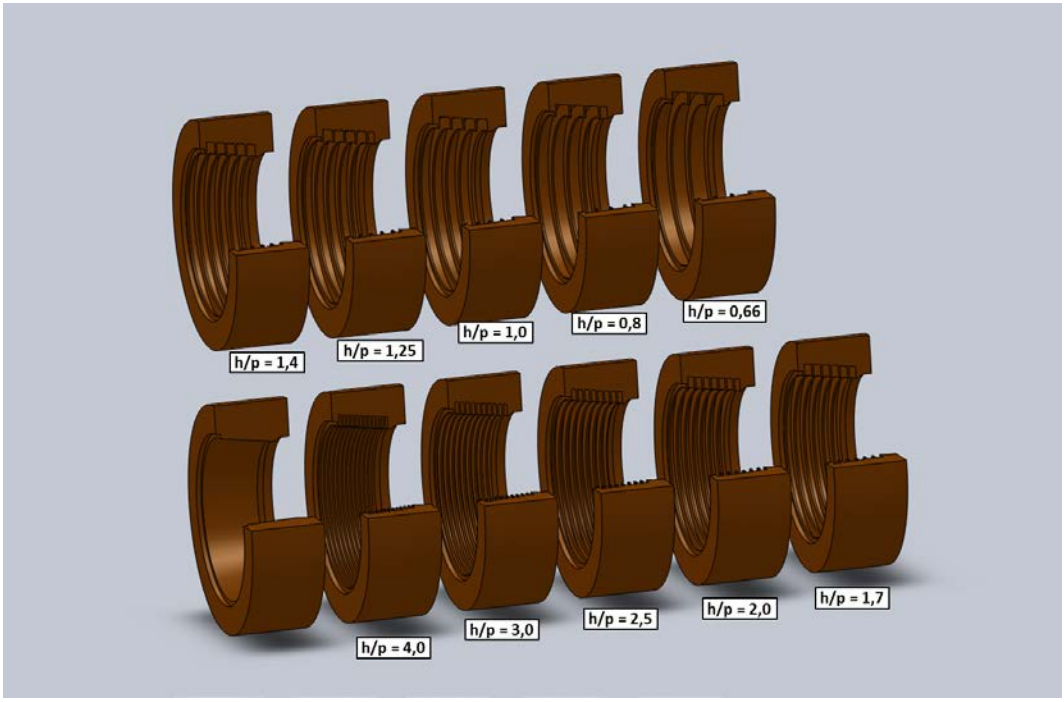
Farklı perde yüksekliği ve sıklığı oranlarına sahip mekanik tasarımlar yapılırken mekanik olarak üretilebilecek perde kalınlıklarının kullanılmasına dikkat edilmiştir. Optik aralayıcı malzemesi olarak mühendislik plastiklerinden Delrin malzeme kullanılmaktadır. Yapılan deneme üretimlerinde perde kalınlığının 0,4 mm'den daha az olması durumunda kusurlu ve fire oranı çok yüksek imalatlar gerçekleştiği görülmüştür. Benzer şekilde deneme imalatları ile perdeler arasındaki mesafenin 0,5 mm'den daha az olamayacağı tespit edilmiştir. Bu bilgiler dikkate alınarak Solidworks 3 boyutlu mekanik tasarım yazılımı ortamında farklı perde sıklıklarına sahip fakat hep aynı, 0,4 mm kalınlığa sahip olan perde tasarımları yapılmıştır. Kubbe ile filtre arasında yer alan Aralayıcı-01'in farklı perde/sıklık oranlarına sahip olan değişik tasarımları Şekil 5.32'de verilmektedir.



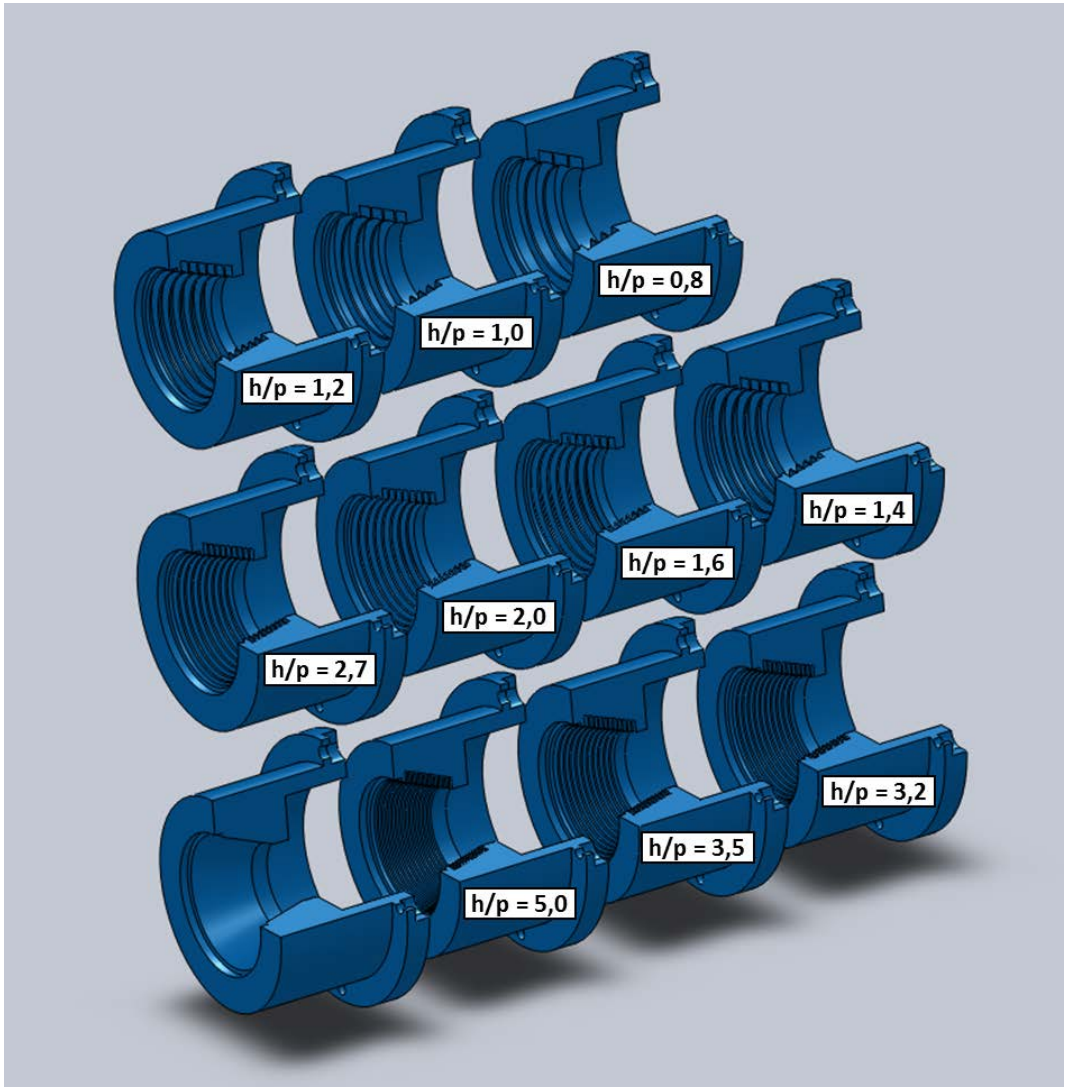
Şekil 5.32 Kubbe ile filtre arasındaki Aralayıcı-01'in farklı perde yükseklik/sıklık oranlarına sahip tasarımları

Aynı yöntem kullanılarak filtre ile mercek arasında yer alan Aralayıcı-02 ve Aralayıcı-03 için de farklı tasarımlar yapılmıştır. Bu aralayıcının daha uzun olması sayesinde daha

çok sayıda yükseklik/sıklık oranına sahip bileşen tasarımı yapılabilmiştir. Yapılan tasarımlar Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'da verilmektedir.



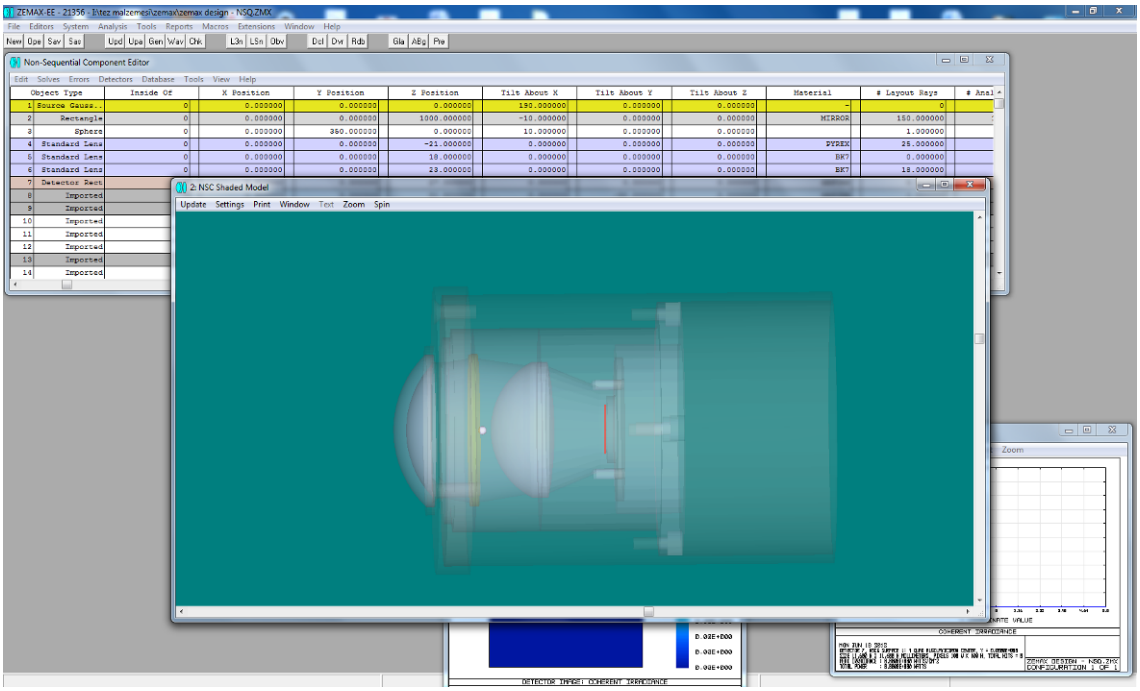
Şekil 5.33 Filtre ile mercek arasındaki Aralayıcı-02'in farklı perde yükseklik/sıklık oranlarına sahip tasarımları



Şekil 5.34 Mercek ile algılayıcı arasındaki Aralayıcı-03'ün farklı perde yükseklik/sıklık oranlarına sahip tasarımları

Mekanik tasarımların tamamlanmasının ardından bu bileşenler Bölüm 5.1'de yapılan optik tasarımla birleştirilmek amacı ile Zemax yazılımına aktarılmışlardır.

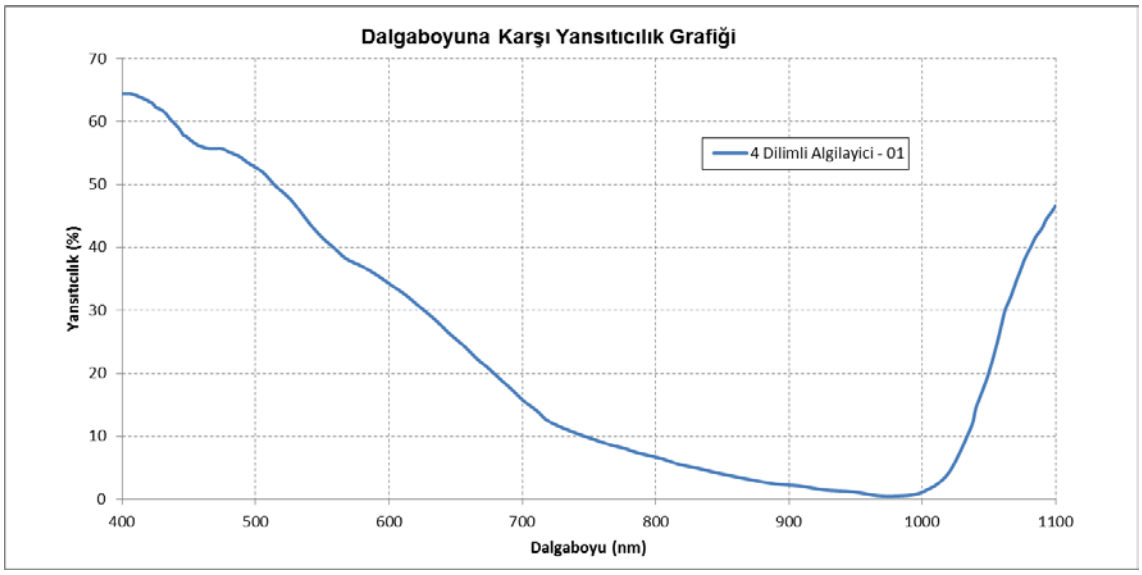
Zemax yazılımı sıralı kip *(sequential mode)* ve sıralı olmayan *(non-sequential mode)* olarak bilinen iki kipte kullanılabilmektedir. Sıralı kip, optik tasarımın oluşturulması ve çeşitli testlerinin gerçekleştirilmesi için; sıralı olmayan kip ise optik bileşenlerin mekanik bileşenlerle tümlenerek opto-mekanik yapının bir bütün halindeki performansının değerlendirilmesi için kullanılır. Modelleme yapılması kapsamında Zemax ortamında oluşturulan model Şekil 5.35'da gösterilmektedir.



Şekil 5.35 Zemax sıralı kipe aktarılan opto-mekanik tasarım

Objektifin dış metal gövdesinin saçılmalar üzerinde bir etkisi yoktur. Bu sebeple gövde ışık soğurucu olarak tanımlanmıştır. Optikleri tutan aralayıcılar Siyah Delrin'den üretilmiştir. Siyah Delrin'in 1.000 nm – 1.100 nm arası ortalama % 4,5 olan speküler yansıtıcılığı optik yazılımda tanımlanmıştır. Lazer arayıcı başlıkların çalışma prensibi bir lazer işaretleyici ile işaretlenen yüzeyden yansıyan ışımaları algılamak şeklinde olduğundan bu modelde Gaussiyen bir kaynak tanımlanmış ve bir hedef normaline 10 derece açı ile düşürülerek yansıyan ışımaların objektif üzerine düşürülmesi sağlanmıştır.

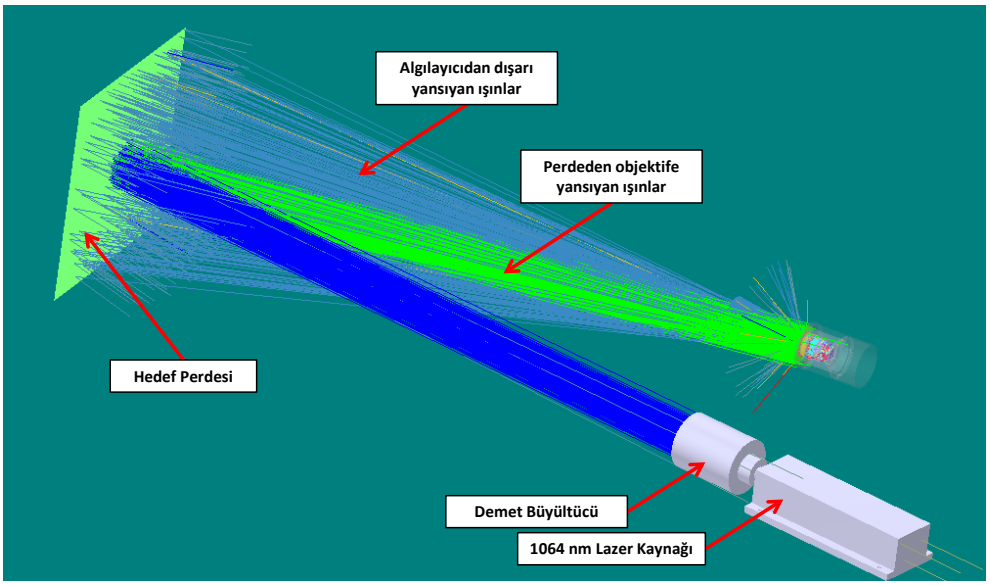
Kullanılan perdenin beyaz hedef perdesi olduğu ve deneysel çalışmalarda kullanılacak perde ile uyumlu olarak % 55 Lambertian yansımaya sahip olacağı kabul edilmiştir. Benzer şekilde kullanılan dört dilimli algılayıcının da yüzey yansıtıcılığı ölçtürülmüş ve 1064 nm dalgaboyunda % 31 yansıtıcılığa sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.36).



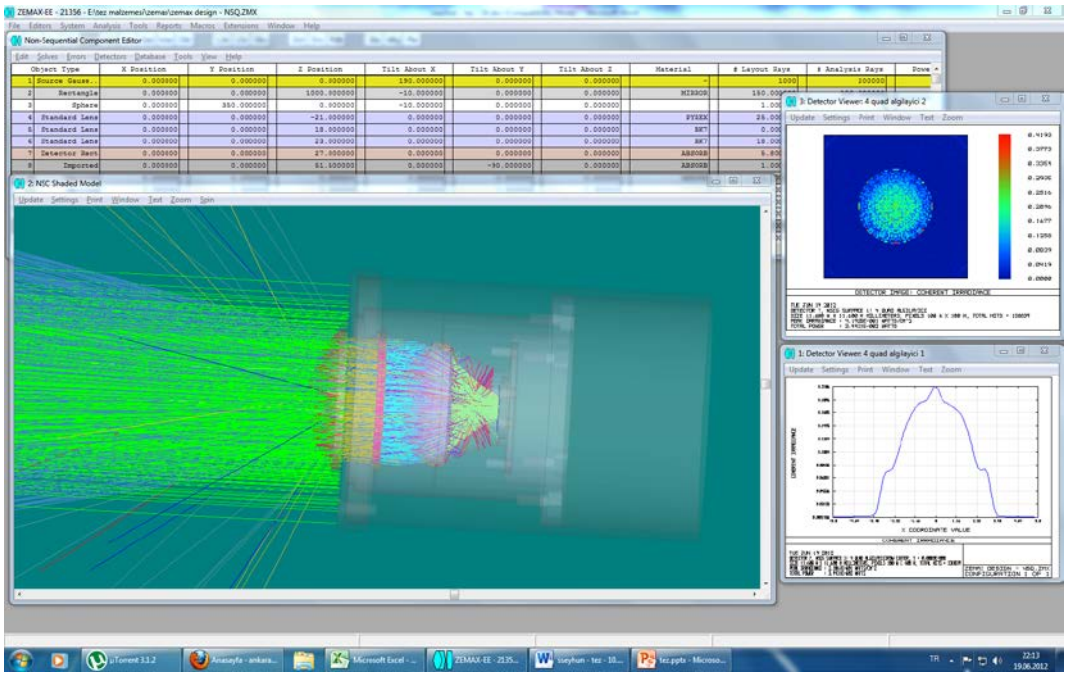
Şekil 5.36 Dört dilimli algılayıcının dalgaboyuna karşı yansıtıcılık grafiği

Dört dilimli algılayıcının yüksek speküler yansıtıcılığa sahip olması objektif içerisindeki kaçak ışınların önemli nedenlerinden birisidir. Zemax yazılımı içersinde algılayıcı parametreleri tanımlanırken algılayıcının yansıtıcı bir yüzeye sahip olduğu ve gelen ışığın ne kadarını yansıttığı da tanımlanmıştır.

Silikon algılayıcı ile kullanılan 1064 nm lazer kaynağının gücü optik sistemin performansının belirlenmesi için kritik bir parametre değildir. Bilgisayar modeli giriş açıklığından geçen ışınların yüzde kaçının algılayıcı yüzey üzerine ulaştığını dikkate almaktadır. Zemax yazılımının işleyebilmesi için bu parametrenin tanımlanması gerektiğinden, yazılımının bu parametre gereksinimini karşılamak amacı ile, lazer kaynağı ortalama gücü 1 Watt olarak tanımlanmıştır. Yazılım, CW lazer ile darbeli lazer arasındaki farkı da modelleme kabiliyetine sahip değildir. Zemax yazılımı objektifin lazer kaynağından gelen ışımalara olan tepkisini ışın takibi *(ray tracing)* yöntemi ile ölçmektedir. Görsel gösterimler 1.000 adet ışın ile yapılmakta analizlerde ise 1.000.000 ışın kullanılmaktadır. Zemax yazılımında, ışın takibi yönteminde ışınlar herhangi bir yüzeyle etkişime girdiklerinde renkleri değişmekte böylece görsel olarak takip edilmeleri önemli ölçüde kolaylaşmaktadır. Şekil 5.37'de sıralı olmayan kipte hazırlanan Zemax modeli gösterilmektedir. Görüldüğü gibi her yüzeyle etkileşmenin ardından ışınların renginde değişme olmaktadır.



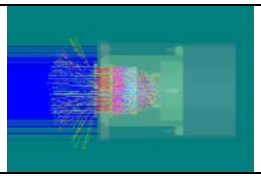
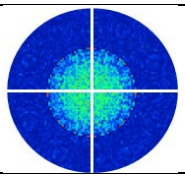
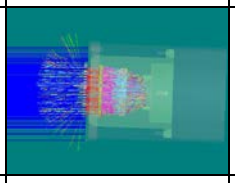
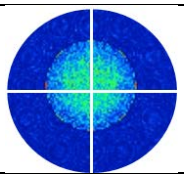
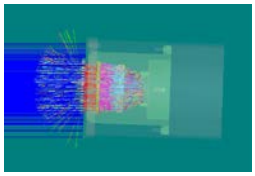
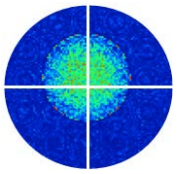
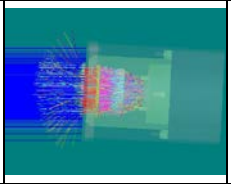
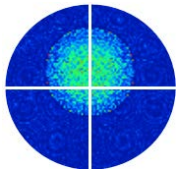
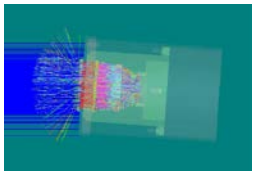
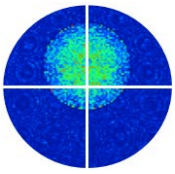
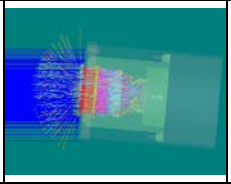
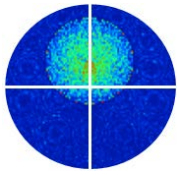
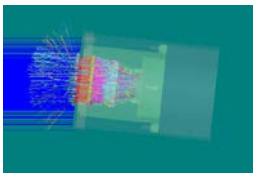
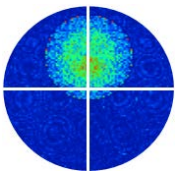
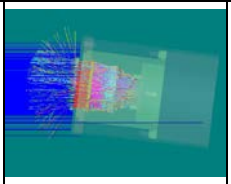
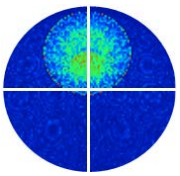
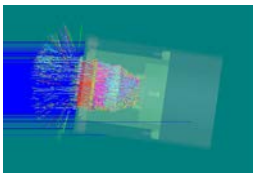
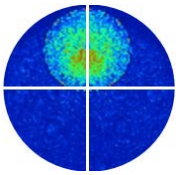
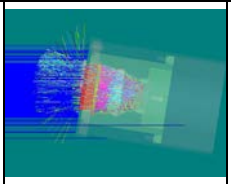
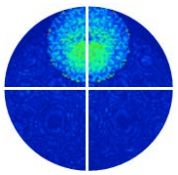
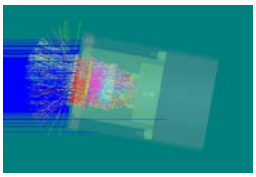
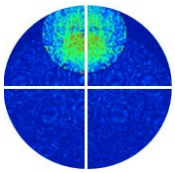
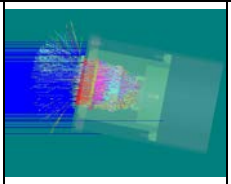
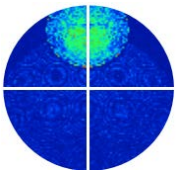
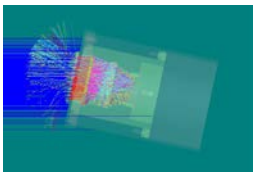
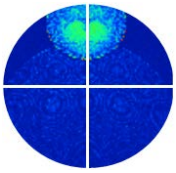
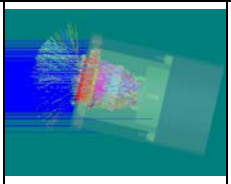
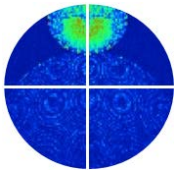
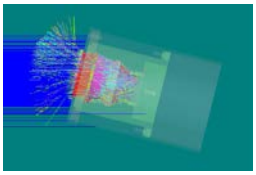
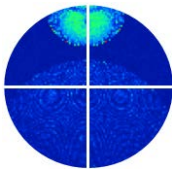
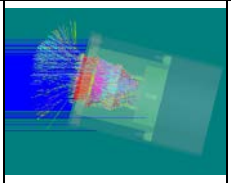
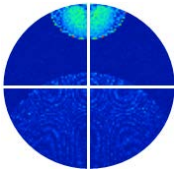
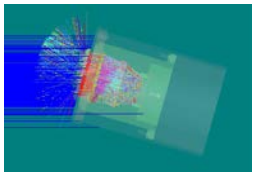
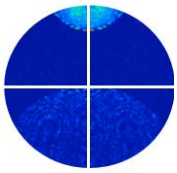
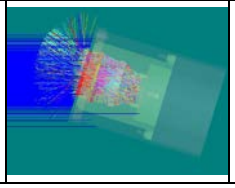
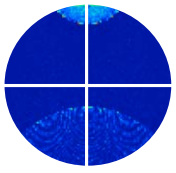
Şekil 5.37 Sıralı olmayan kipteki Zemax modeli

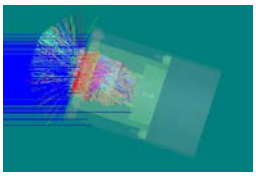
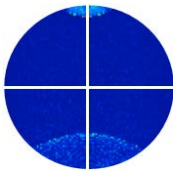


Şekil 5.38 Objektife karşıdan gelen ışınların üzerinde oluşturduğu lazer spotu

Oluşturulan ilk modelde üzerlerine hiç perde açılmamış olan aralayıcılar kullanılarak objektifin tasarım parametresi olan ±18° görüş alanı içerisinde sıfır dereceden başlayarak birer derece aralıklarla arayıcının başı yukarı doğru döndürülerek dedektör üzerinde oluşan lazer beneği görüntüleri toplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7'de verilmektedir.

Çizelge 5.7 Bilgisayar modelinin analiz sonuçları

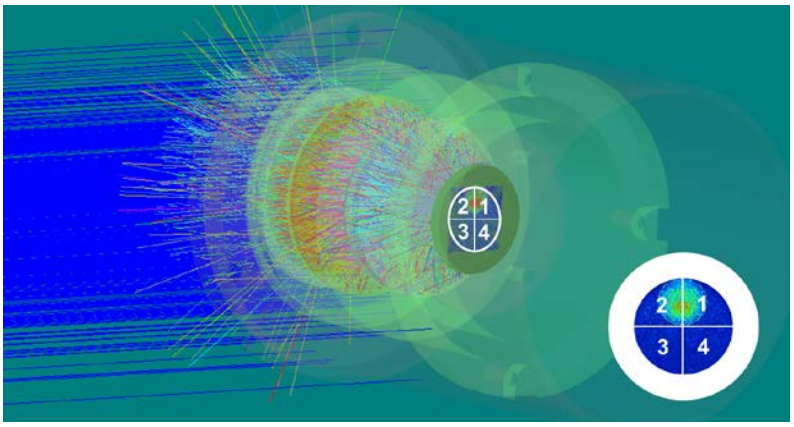
Işıma Geliş Açısı (°)	Objektif Modeli Yandan Görünüm	Dedektör Modeli	Işıma Geliş Açısı (°)	Objektif Modeli Yandan Görünüm	Dedektör Modeli
0			**1**		
2			**3**		
4			**5**		
6			**7**		
8			**9**		
10			**11**		
12			**13**		
14			**15**		
16			**17**		

18					

Görüldüğü gibi Delrin gibi düşük yansıtıcılığa sahip bir malzeme kullanılmasına rağmen kaçak ışınlar oluşmakta ve algılayıcı üzerine düşmektedir. Elde edilen sonuçların daha iyi analiz edilebilmesi için algılayıcı tarafından sıfır derece geliş açısında 4 algılayıcı dilimi tarafından toplanan ışıma 100'e normalize edilmiştir. Herbir geliş açısında algılayıcı dilimleri üzerine düşen lazer beneğinin yüzde cinsinden büyüklüğü ve elde edilen sapma sinyali değerleri Çizelge 5.8'de verilmektedir. Dört dilimli algılayıcıların dilim notasyonları da Şekil 5.39'de verilmektedir.

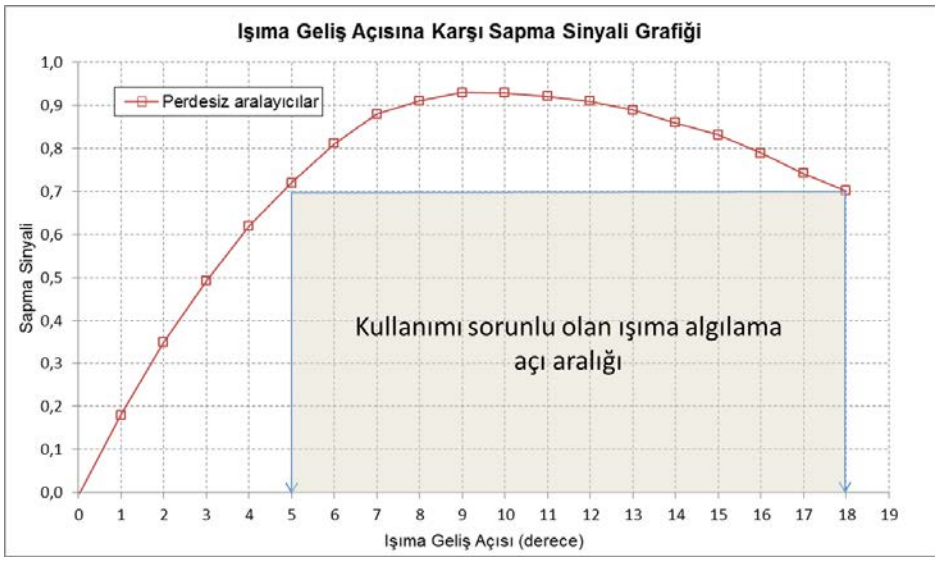
Çizelge 5.8 Işıma geliş açısına bağlı olarak algılayıcı üzerinde elde edilen ışıma

Işıma Geliş Açısı (°)	Algılayıcı Dilimlerine Düşen Işıma (%)				Sapma Sinyali
	Dilim 1	Dilim 2	Dilim 3	Dilim 4	
0	25,15	24,50	25,00	25,36	-0,01
1	29,30	29,65	20,55	20,38	0,18
2	32,72	32,65	15,77	15,75	0,35
3	35,31	35,70	11,90	12,35	0,49
4	38,53	38,77	8,90	9,27	0,62
5	40,94	40,77	6,61	6,72	0,72
6	42,52	42,24	4,47	4,39	0,81
7	42,87	43,07	2,87	2,65	0,88
8	42,82	43,16	2,12	1,95	0,91
9	42,21	42,46	1,73	1,37	0,93
10	42,05	42,33	1,50	1,63	0,93
11	40,94	40,94	1,62	1,77	0,92
12	38,97	39,00	2,05	1,68	0,91
13	35,75	35,65	2,29	1,91	0,89
14	32,14	32,15	2,36	2,52	0,86
15	27,76	27,79	2,63	2,51	0,83
16	23,72	23,81	2,77	2,84	0,79
17	17,50	17,37	2,66	2,53	0,74
18	17,10	16,97	3,06	2,93	0,70



Şekil 5.39 Dört dilimli algılayıcı dilim notasyonları

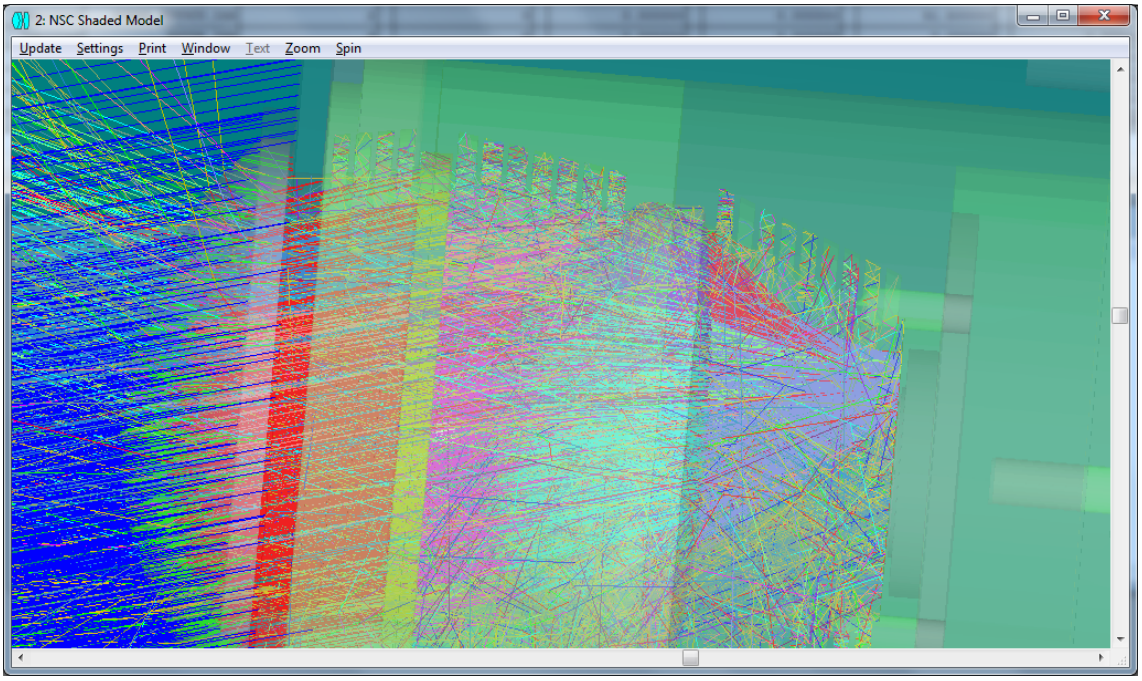
Yukarıdaki tabloda verilen değerler kullanılarak Şekil 5.40'deki ışıma geliş açısına karşı sapma sinyali grafiği çizdirilmiştir. Görüldüğü gibi optik tasarımı yapılan ±8.5°'lik görüş alanı boyunca sapma sinyali artan davranış sergilemektedir. Artışın sabit türevli bir eğri olmamasının nedeni kaçak ışınlardır. Perde yapısı oluşturulmamış aralayıcılar kullanılarak elde edilen sapma sinyali eğrisinin görüş alanı açısal değerinden sonra teorik olarak tepe değerine ulaşması ve toplam görüş alanı olan 18 dereceye kadar değerini muhafaza etmesi gerekmektedir. Aralayıcılardan ve optik bileşenlerden kaynaklanan kaçak ışınlar sebebi ile ışıma düşmemesi gereken algılayıcı dilimlerine de ışıma düşmektedir. Bunun sonucunda artan ışıma geliş açısı ile birlikte sapma sinyali büyüklüğünde bir azalma meydana gelmektedir.



Şekil 5.40 Işıma geliş açısına karşı sapma sinyali grafiği

Sapma sinyalindeki azalma farklı ışıma geliş açılarında aynı sapma sinyali elde edilmesi sonucunu doğurur. Örneğin yukarıdaki şekilde 5 derece ve 18 derece ışıma geliş açılarında aynı sapma sinyalleri elde edilmektedir. Bu yüzden 8.5 derece olan görüş alanı 5 derece seviyesine düşmektedir.

Takip eden modelleme adımlarında perdesiz aralayıcılar yerine farklı sıklıklarda perde açılmış olan aralayıcılar kullanılarak sapma sinyali eğrisindeki geriye bükülmeler engellenmeye çalışılmıştır.



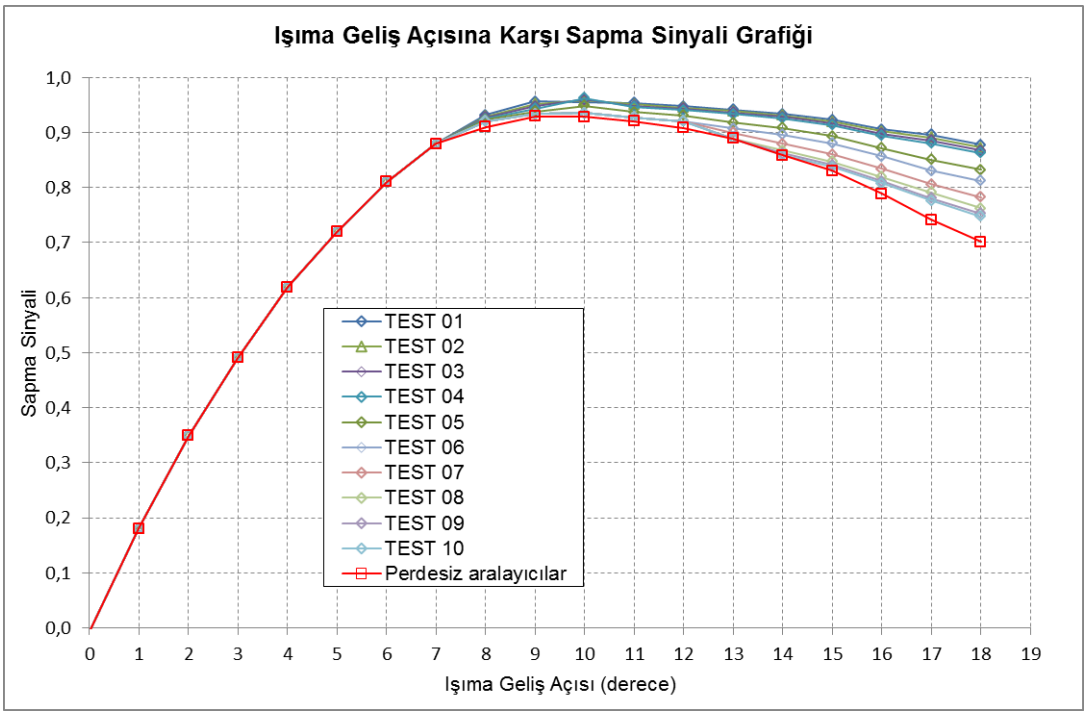
Şekil 5.41 Perdeli modellerin sıralı olmayan kip analizleri

Bilgisayar ortamında, farklı perde yükseklik/sıklık oranına sahip aralayıcıların kullanılması durumunda elde edilecek kaçak ışın baskılama performansının belirlenebilmesi için Çizelge 5.9'da verilen test senaryoları oluşturulmuştur.

Çizelge 5.9 Bilgisayar modeli test senaryoları

Test Senaryoları	Aralayıcı Perde Yüksekliği / Sıklık Oranları (h/p)		
	Aralayıcı-01	Aralayıcı-02	Aralayıcı-03
Test 01	2,5	4,0	5,0
Test 02	2,5	3,0	3,2
Test 03	2,0	2,5	2,7
Test 04	2,0	2,0	2,0
Test 05	1,5	1,7	1,6
Test 06	1,5	1,4	1,4
Test 07	1,0	1,3	1,2
Test 08	1,0	1,0	1,0
Test 09	0,5	0,8	0,8
Test 10	0,5	0,7	0,8

Her test için tabloda verilen aralayıcı derlemeleri kullanılarak Şekil 5.40'da grafiği çizilen sapma sinyali eğrisini elde etmek için yapılan test yöntemi tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.42'de verilmektedir.



Şekil 5.42 Bilgisayar modeli analiz sonuçları

Görüldüğü gibi farklı yükseklik/sıklık oranlarına sahip aralayıcıların kullanılması ile sapma sinyallerindeki geriye bükülmelerde azalma sağlanabilmektedir. En verimli

yükselik/sıklık oranına sahip aralayıcıların belirlenebilmesi için Şekil 5.40'da gösterildiği gibi her bir analiz modeli sonrasında elde edilen kullanılabilir açısal görüş alanları (FOV) hesaplanmıştır. Elde edilen FOV değerleri ve her bir testte kullanılan aralayıcılara ait ortalama h/p değerleri Çizelge 5.10'da ve Şekil 5.43'de verilmektedir.

Çizelge 5.10 Her test için elde edilen kullanılabilir FOV ve h/p oranları

TEST #	Kullanılabilir FOV (derece)	Ortalama h/p
TEST 01	7,42	3,8
TEST 02	7,35	2,9
TEST 03	7,28	2,4
TEST 04	7,20	2,0
TEST 05	6,77	1,6
TEST 06	6,50	1,4
TEST 07	6,09	1,2
TEST 08	5,82	1,0
TEST 09	5,69	0,7
TEST 10	5,63	0,7



Şekil 5.43 Artan perde sıklığına karşı görüş alanı grafiği

Elde edilen sonuçlara göre perde yüksekliği/perde aralığı oranının artması ile birlikte ±5 derece olan görüş alanında artma görülmektedir. Artma h/p oranının iki olduğu noktaya kadar hızlı bir şekilde devam etmekte ve ±7,20 derece seviyelerine kadar

gelmektedir. Bundan sonra h/p oranını 4 değerine kadar arttıran testlerin ardından görüş alanı en fazla ±7,42 derece yapılabilmiştir. Test 4 ile Test 1 arasında sadece ±0,22 derecelik bir görüş alanı artışı vardır. Bu sebepten ötürü iki misli perde üretimi anlamına gelen h/p=4 oranı yerine h/p=2 oranının maliyet etkin bir çözüm sağlayacağı görülmektedir.

6. DENEYSEL DOĞRULAMA TESTLERİ

Bilgisayar modeli ile belirlenen en verimli h/p oranı değerinin deneysel olarak doğrulanması amacı ile prototip üretimleri gerçekleştirilmiştir. Aralayıcı olarak kullanılan parçalar siyah delrin malzemeden ürettirilmiştir. Gövde üretiminde paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kubbe pyrex, mercek BK-7 ve filtre de RG850 camından ürettirilmiştir (Şekil 6.1).

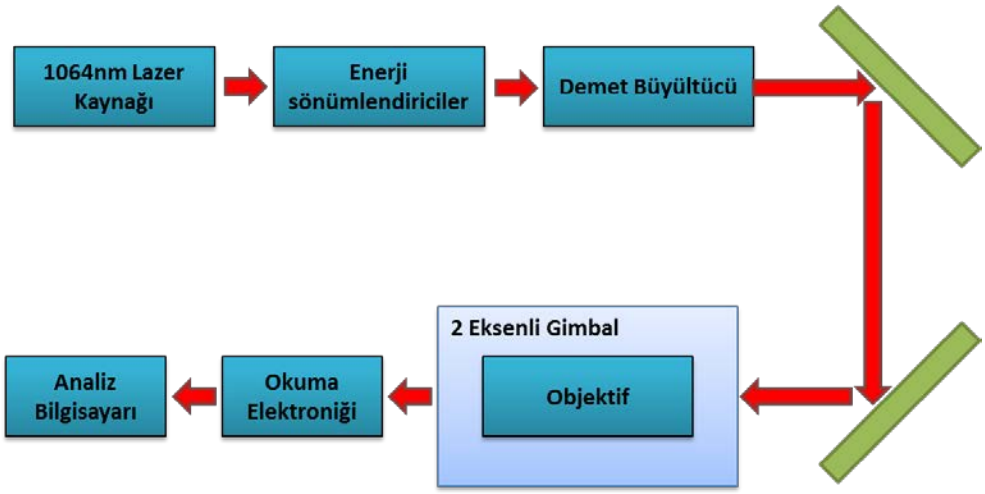
Dört dilimli silikon bir algılayıcı ve okuma elektroniğinden elde edilen sinyaller işlenerek aralayıcıların sapma sinyali eğrilerindeki performansları analiz edilmiştir.



Şekil 6.1 Deneysel testler için üretimi gerçekleştirilen parçalar

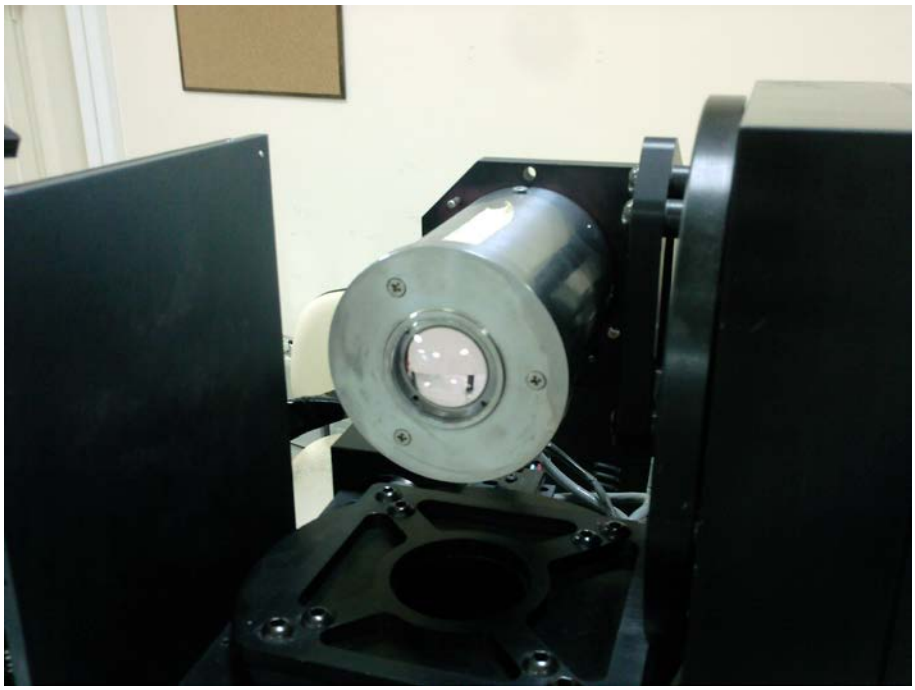
6.1 Test Düzeneği

Test düzeneği; ışıma kaynağı, demet şekillendirici optik elemanlar, 2 eksenli gimbal üzerine yerleştirilmiş objektif, algılayıcı ve okuma elektroniğinden oluşmaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Test düzeneği

Farklı ışıma geliş açılarında ölçüm alabilmek için test objektifinin bağlandığı iki eksenli motorize gimbal Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 İki eksenli gimbal üzerine takılı test objektifi

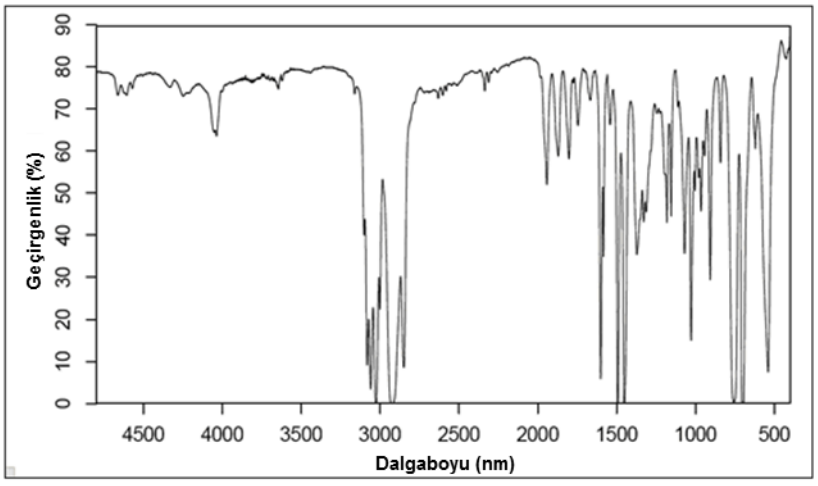
6.1.1 1064 nm lazer kaynağı

Işıma kaynağı olarak 1064 nm lazer kaynağı kullanılmıştır (Şekil 6.4). Kullanılan lazer kaynağının ayrıntılı teknik özellikleri **EK 1**'de verilmiştir.



Şekil 6.4. 1064 nm lazer kaynağı

1064 nm dalgaboyu iç saçılmaların analizlerinin yapılacağı dalgaboyu olarak belirlenmiştir. Bu dalgaboyu görünür bölgeye göre atmosferik sönüme daha az uğramaktadır. Bu sayede bu dalgaboyunda yapılan görüntülemelerde görünür bölgeye göre daha uzak mesafelerden görüntü alınabilmektedir.

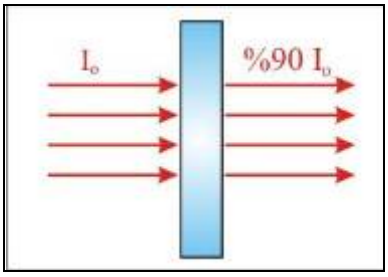


Şekil 6.5. Dalgaboyuna karşı atmosferik geçirgenlik

6.1.2 Enerji sönümlendiriciler

Lazer enerjisini zayıflatmak için çeşitli sönümlendirici *(attenuator)* kullanım yöntemleri mevcuttur. Bu test düzeneğinde soğurucu nötral yoğunluk filtreleri kullanılmaktır.

Nötral yoğunluk filtreleri *(neutral density filters)* mercekten geçen ışık miktarını yani enerjiyi azaltmak amacıyla kullanılırlar. Fotoğrafçılıkta da sıklıkla kullanılan optik elemanlardır. Örneğin, fotoğraf çekerken bir ND filtre eklendiyse ve poz süresi aynı tutulduysa o zaman aynı miktarda ışık girmesini sağlayabilmek için daha büyük bir açıklık *(aperture)* kullanılması gerekir. Benzer bir şekilde ND filtre varken, açıklık aynı ise o zaman da poz süresi arttırılarak aynı miktarda ışığa maruz kalma sağlanmalıdır.



Şekil 6.6. 0,1 Optik yoğunluklu ND Filtre

ND filtreler optik yoğunluk değerlerine göre sınıflandırılırlar. Optik yoğunluk seviyeleri 0,1 / 0,2 / 0,3 vb. biçiminde verilir. Buradaki ondalık kısım soğurulan ışık miktarını göstermektedir. Yani optik yoğunluğu 0,1 olan ve önceden belirtilmiş bir kalınlığa sahip bir malzemeden geçerken demetin enerjisinin % 10'u soğurulmakta % 90'ı iletilmektedir. İletilen ışının dalgaboyu gelen ışının dalgaboyu ile aynıdır.

Aynı camdan yapılmış ND filtrenin kalınlığı arttıkça optik geçirgenliği de ters orantılı olarak doğrusal bir biçimde azalır.

Test düzeneğinde ND filtre olarak *Thorlabs* firmasından alınan filtreler kullanılmıştır. Optik yoğunlukları 0,1 ile 0,6 arasında değişen bu optik filtrelerin hepsi 12,7 mm (1/2 inch) çapında olup NG11 ve NG4 camlarından üretilmişlerdir. Soğurucu yapıda olan bu filtrelerin listesi Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 EO-Kule'de kullanılan ND filtreler

Parça Numarası	Sistemdeki Adı	Optik Yoğunluk	Kalınlık (mm)	Cam
NE501B	ND1	0,1	1,26	NG11
NE502B	ND2	0,2	2,19	NG11
NE503B	ND3	0,3	2,26	NG11
NE504B	ND4	0,4	0,91	NG4
NE505B	ND5	0,5	1,11	NG4
NE505B	ND6	0,6	1,12	NG4

Çizelge 6.1'den de görüldüğü gibi aynı camın kullanıldığı durumda artan optik yoğunlukla birlikte mercek kalınlığı da artmaktadır.

6.1.3 Demet büyültücü

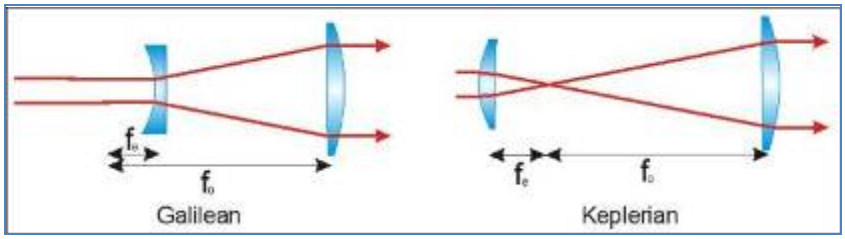
Lazer kaynağından elde edilen demetin çapı yaklaşık 2 mm'dir. Görüntüleme sisteminin merceği üzerinde istenilen sonucun elde edilebilmesi için demetin test edilen sistemin giriş açıklığı ile uyumlu boyutlara getirilmesi gerekir. Bunun için de bir demet büyültücü kullanılmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Demet büyültücü

Demet büyültücüler giriş demetinin çapını büyülten düzeneklerdir. Sonsuz/sonsuz eşlenikli *(infinite/infinite conjugate)* yapıdadırlar. Objenin ve görüntünün sonsuzda

olduğu kabul edilerek tasarlanırlar. Yaygın olarak kullanılan iki demet büyültücü yapısı vardır.



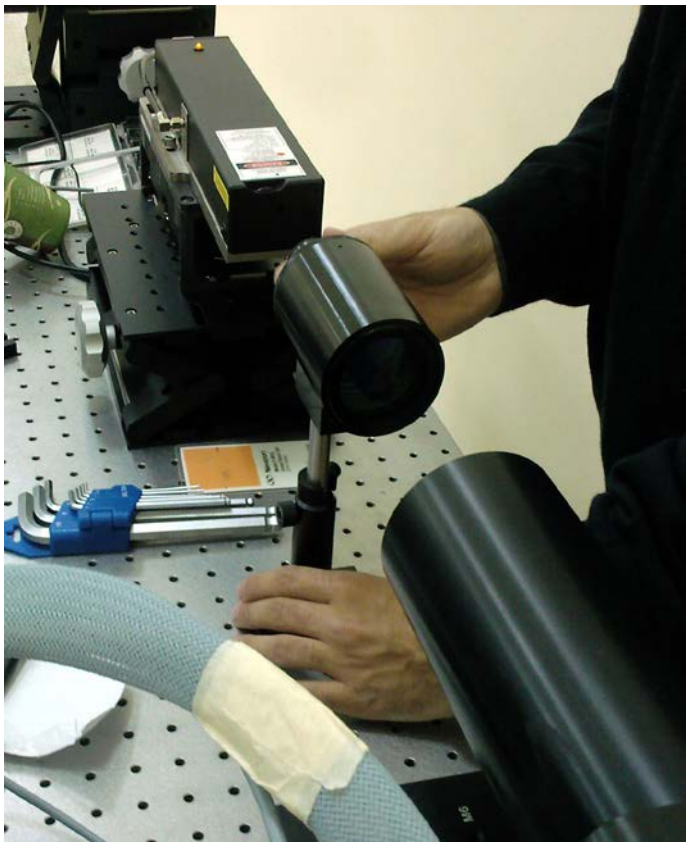
Şekil 6.8. Demet büyültücü çeşitleri

Güçlü lazer uygulamalarının büyük çoğunluğunda bir pozitif ve bir negatif mercekten oluşan yapılar kullanılır. *Galilean* olarak adlandırılan bu yapıların çift pozitif merceklere göre en önemli avantajı aynı büyültme oranının çok daha kısa bir yapı içerisinde sağlanabilmesidir. Büyültme miktarı,

$$m = \frac{f_o}{f_e} \qquad 6.1$$

eşitliği ile verilir.

Kullanılan lazer kaynağı, demet büyültücü ve test objektifinin birlikte yer aldığı, test düzeneğinin kurulum çalışmaları Şekil 6.9'da gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Lazer ışıma kaynağı ve demet büyültücü

6.2 Test Sonuçları

Perde açılmış aralayıcılarla yapılan testlere geçilmeden önce perde açılmamış aralayıcıların kullanıldığı testler gerçekleştirilmiştir. Algılayıcı objektifi üzerine sıfırdan on sekiz dereceye kadar birer derece aralıklarla 1064 nm lazer ışığı düşürülmüştür. Algılayıcı elektroniği herbir algılayıcı dilimi için sayısallaştırılmış çıktılar vermektedir (Çizelge 6.2).

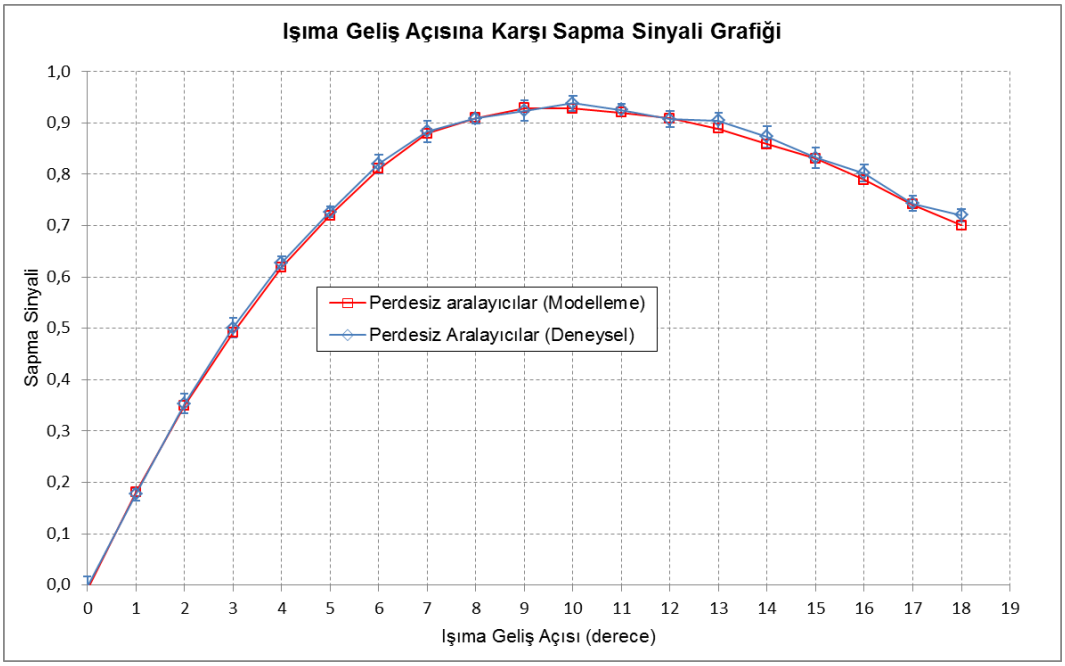
Çizelge 6.2 Perdesiz aralayıcıların kullanıldığı objektif ile elde edilen çıktılar

Işıma Geliş Açısı (°)	Algılayıcı Dilimlerine Düşen Işıma (Sayısallaştırılmış Çıktı)				Dilimlere Düşen Toplam Işıma	Sapma Sinyali	Standart Sapma
	Dilim 1	Dilim 2	Dilim 3	Dilim 4			
0	1033	1006	1016	1031	4086	-0,002	0,02
1	1193	1207	844	837	4081	0,176	0,02
2	1341	1338	640	639	3959	0,353	0,01
3	1453	1469	476	495	3893	0,501	0,01
4	1582	1592	356	371	3901	0,627	0,01
5	1680	1673	263	268	3883	0,727	0,02
6	1746	1735	174	170	3825	0,820	0,01
7	1756	1764	113	104	3737	0,883	0,01
8	1749	1762	87	81	3679	0,909	0,01
9	1720	1730	76	61	3586	0,924	0,02
10	1727	1738	52	58	3576	0,938	0,01
11	1677	1677	62	68	3484	0,925	0,02
12	1591	1593	85	70	3338	0,908	0,01
13	1473	1469	82	66	3089	0,904	0,01
14	1323	1324	86	93	2826	0,873	0,02
15	1135	1137	106	101	2480	0,832	0,02
16	976	980	106	109	2171	0,802	0,02
17	716	711	108	102	1637	0,743	0,01
18	707	701	117	112	1637	0,720	0,02

Çizelge 6.2'de görüldüğü gibi dört dilime düşen toplam ışıma miktarı geliş açısı büyüdükçe azalmaktadır. Bunun nedenleri; dar bant geçirgen filtrenin geçirgenliğinin ve algılayıcının verimliliğinin artan geliş açısı ile azalması ve lazer spotunun bir kısmının algılayıcı yüzeyinin dışına taşması olarak özetlenebilir.

Ölçüm süresi on saniyedir. Okuma sırasında elde edilen sayısal çıktılarda optik ve elektronik gürültüler sebebi ile küçük sapmalar olmaktadır. Bunlar da tablonun en son sütununda verilmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar ile modelleme sonuçlarının karşılaştırılması için her iki sapma sinyali verileri kullanılarak Şekil 6.10'de verilen grafik çizdirilmiştir.



Şekil 6.10 Deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması

Grafikten de görüldüğü gibi modelleme sonuçları deneysel sonuçlar ile oldukça uyumludur. Sadece 18 derecede elde edilen deneysel sonuç modelleme sonucundan biraz daha fazla çıkmıştır ki aslında bu ölçümde de aradaki fark % 2,8 gibi oldukça küçük bir büyüklüktedir. Objektifin görüş alanı sınırı olan 18 derecede gürültü seviyesinin yüksek olmasından dolayı art arda yapılan deneysel ölçümler arasında bile % 3-5 arası farklar olduğu görüldüğünden % 2,8 deneysel hata sınırları içerisinde bir büyüklüktür.

Çizelge 5.9'da verilen tüm test senaryoları için ölçümler alınmıştır. Elde edilen deneysel ölçüm sonuçlarının herbir ışıma geliş açısı için modelleme ile elde edilen sonuçlar

arasındaki fark % cinsinden Çizelge 6.3'de verilmektedir. Görüldüğü gibi modelleme sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları arasındaki fark yaklaşık % 1 mertebelerinde bulunmuştur.

Çizelge 6.3 Deneysel ölçüm ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması

Işıma Geliş Açısı (°)	Deneysel ölçüm sonuçları ile edilen sapma sinyalleri ile modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen sapma sinyalleri arasındaki ışıma geliş açısına bağlı % fark										
	Test 0	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	-2,3	-1,7	-1,1	2,7	2,2	0,6	1,1	4,8	0,6	1,6	-4,0
2	1,1	0,6	0,6	0,3	3,1	0,6	2,8	0,3	-0,9	-2,0	-2,0
3	2,2	-0,8	1,4	1,4	-1,2	2,0	1,6	-1,0	0,2	-1,2	0,4
4	1,3	0,2	-1,1	0,3	0,2	1,7	0,5	1,6	0,8	0,2	1,7
5	1,0	-0,3	0,0	1,1	-0,4	-0,7	1,1	1,5	-0,3	0,7	0,1
6	1,2	1,3	0,0	1,2	-0,1	0,9	-0,6	-0,4	-0,2	-0,7	1,3
7	0,5	-0,1	1,0	0,3	-0,8	1,1	0,6	-0,5	0,5	-0,5	0,3
8	-0,1	0,3	0,0	-0,9	0,3	1,1	0,9	-0,4	1,3	-0,1	1,0
9	-0,7	-0,2	1,1	1,3	-0,6	-0,5	0,4	1,0	-0,1	1,0	1,1
10	1,1	1,0	0,3	1,7	0,1	0,6	1,0	1,5	1,7	1,6	1,1
11	0,5	0,2	1,7	0,7	0,1	1,5	0,7	1,8	1,3	0,5	1,0
12	-0,1	1,1	0,6	0,0	0,2	-0,1	0,6	0,4	0,0	1,8	0,5
13	1,8	1,5	0,9	1,7	0,9	2,0	1,6	1,1	-0,1	1,4	1,4
14	1,7	1,6	0,1	0,5	0,0	1,0	2,3	2,0	1,3	1,0	1,4
15	0,2	1,5	0,3	0,0	1,5	2,4	0,3	0,7	0,0	0,4	1,2
16	1,6	2,2	0,0	2,9	0,2	3,1	2,2	1,1	1,3	0,5	2,9
17	0,3	2,9	2,7	0,0	1,5	4,0	4,0	0,6	3,3	1,0	1,0
18	2,8	0,6	0,6	0,0	1,1	0,8	0,4	0,6	0,0	1,1	0,7
Sapma:	**1,1**	**1,1**	**0,9**	**1,0**	**1,1**	**1,2**	**1,1**	**1,3**	**1,0**	**1,0**	**1,5**

Deneysel ölçüm sonuçlarından elde edilen ışıma geliş açısına bağlı sapma sinyali eğrileri kullanılarak kullanılabilir görüş alanlarının açısal büyüklükleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4 Deneysel ölçümlerle elde edilen kullanılabilir FOV ve h/p oranları

TEST #	Kullanılabilir FOV (derece)	Ortalama h/p
TEST 01 (Deneysel)	7,50	3,8
TEST 02 (Deneysel)	7,42	2,9
TEST 03 (Deneysel)	7,28	2,4
TEST 04 (Deneysel)	7,35	2,0
TEST 05 (Deneysel)	6,88	1,6
TEST 06 (Deneysel)	6,53	1,4
TEST 07 (Deneysel)	6,15	1,2
TEST 08 (Deneysel)	5,82	1,0
TEST 09 (Deneysel)	5,79	0,7
TEST 10 (Deneysel)	5,69	0,7



Şekil 6.11 Artan perde sıklığına karşı görüş alanı grafiği (deneysel)

Elde edilen sonuçlara göre perde yüksekliği/perde aralığı oranının artması ile birlikte ±5 derece olan görüş alanında artma görülmektedir. Artma h/p=2 değerine kadar hızlı bir şekilde devam etmekte ve ±7,35 derece seviyelerine kadar gelmektedir. Bundan sonra h/p oranını 4 değerine kadar arttıran testlerin ardından görüş alanı en fazla ±7,50 derece yapılabilmiştir. Test 4 ile Test 1 arasında sadece ±0,15 derecelik bir görüş alanı artışı vardır. Bu değer modelleme çalışmalarında elde edilen ±0,22 derece ile uyumludur.

Deneysel sonuçların da gösterdiği, modelleme çalışmaları ile daha önce de belirlenmiş olan ve iki misli perde üretimi anlamına gelen h/p=4 oranı yerine h/p=2 oranının maliyet etkin bir çözüm sağlayacağı görülmektedir.

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tasarımı yapılan optik sistemlerin üretilmelerinin ardından kağıt üzerindeki performanslarını göstermeleri nadir rastlanılan bir durumdur. Bu çalışmanın konusu olan kaçak ışınlar çoğu kez optik sistemlerden beklenilenin altında verim alınmasına neden olmaktadır. Kaçak ışınların optik elemanlardan, mekanik yapıdan, görüş açısının dışında kalan ışıma kaynaklarından kimi zaman da dedektör gürültüsünden kaynaklandığı bilinmektedir.

Bu çalışmada, kaçak ışınların engellenmesi için mekanik yapıda oluşturulan perdelemelerin nerede, ne yükseklikte(h) ve ne sıklıkta(p) yerleştirilmesinin uygun olacağına dair yazılım destekli bir modelleme yapılmıştır. Modellemenin doğrulanması amacı ile gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçları, bu tez çalışması kapsamında tasarımını yapılan optiğin algılayıcıya aktardığı kaçak ışınlarının azaltılmasında ,iki misli perde üretimi anlamına gelen h/p=4 oranı yerine h/p=2 oranının maliyet etkin bir çözüm sağlayacağını göstermektedir.

Optik sistemlerde yer alan bu perdeler üretilmeleri oldukça hassas ve uzun bir çalışma gerektiren yüksek maliyetli mekanik elemanlardır. Bunların gereğinden fazla sıklıkta açılmaları maliyetleri kat kat arttırmakta, daha özel üretim teknikleri gerektirmektedir. Bilgisayar ortamında geliştirilen simülasyonlar ile gereken optimum perde yüksekliği ve sıklığının hesaplanması üretim maliyetleri ve protip üretim sürelerine önemli katkılar sağlayacaktır.

Aşağıdaki listede optik sistemlerdeki saçılma problemlerinden kaçınmak için denenen ve test edilen teknikler özetlenmektedir;

- Üç sekme kuralını kullanın.
- Optik tasarımdaki tekil sekmeleri kontrol edin.
- IR sistemlerdeki *Narcissus* katkılarını görebilmek için tek sekme analizleri yapın.
- Optik toleransları ve mekanik montajı dikkate alarak optik elemanları gereğinden fazla büyültmeyin.

- Gereken yerlerde dişler, perdeler ve alan engelleri kullanın.
- Diş ve perde yerleşimleri için anahtar konumları tanımlayın.
  Anahtar kaçak ışın yönelimlerini bulmak için doğrudan modelleme kullanın.
  Kaçak ışın performansınızı görmek için prototip üreterek test edin. Deneysel testler tasarım doğrulamanın en önemli parçasıdır.
- Diş aralığı ve perde konumlarına dikkat edin. Aralık ve yükseklik için h/p 2:1 oranı bir çok uygulama için en verimli sonuçları sağlamaktadır.
- Doğrusal ışın gelişlerinden kaynaklanan kaçak ışınları en düşük seviyeye çekebilmek için perde konumlarını belirleyin.
- Mümkün olduğunca çok yüzeyi karartın.
- Metalik yüzeylerin en azından siyah eloksal *(black anodized)* kaplayın.
- Dökülmeyen malzeme kullanımını değerlendirin (Bunlar düşük maliyetlerle uygulanabilir ve oldukça etkilidir. Bu malzemelerin tutuculuklarının değerlendirilmesi kullanıldıkları çevreye bağlı olabilir.).
- Merceklerin kenarlarını ve giriş açıklığının dışında kalan düz yüzeyleri karartın.
- *Fresnel* yansımalarını en düşük seviyeye çekebilmek için AR kaplamalar kullanın. Özellikle yüksek kırılma indisli optik malzemelerin kullanıldığı IR sistemlerde bu bir zorunluluktur.

KAYNAKLAR

Breaut R. P., 1977. Problems and Techniques in Stray Radiation Suppression, SPIE Vol.107, pp. 2-23, Bellingham WA

Czajkowski, A., 2009. Controlling Veiling Glare in an Optical Imaging System

Fischer, R., 2008. Optical System Design, The McGraw-Hill Companies, 809 p., NewYork

Hecht, E., 2001. Optics, Addison Wesley Publishing Company, 694 p., London

Lau, A. S. , 1997, Stray-light problems in optical systems, SPIE Publications, 245 p. , Bellingham

Princeton Üniversitesi, 2011. Web sitesi. http://www.princeton.edu/ Erişim Tarihi: 05.08.2012

R. P. Heinisch., 1971. Light Baffle Attenuation Measurements in The Visible; Applied Optics, Vol. 10, No 9, pp. 2016, Washington

Smith, W., 2007. Modern Optical Engineering, McGraw-Hill Professional, 764 p., NewYork

Solidworks, 3D Computer Aided Design Software, Dassault Systemes, Massachusetts

Wyatt, C., 1987. Radiometric System Design, MacMillan Publishing Company, 315p. , New York.

Zemax, Optical and Illumination Design Software, Radiant Zemax Corporate, Washington

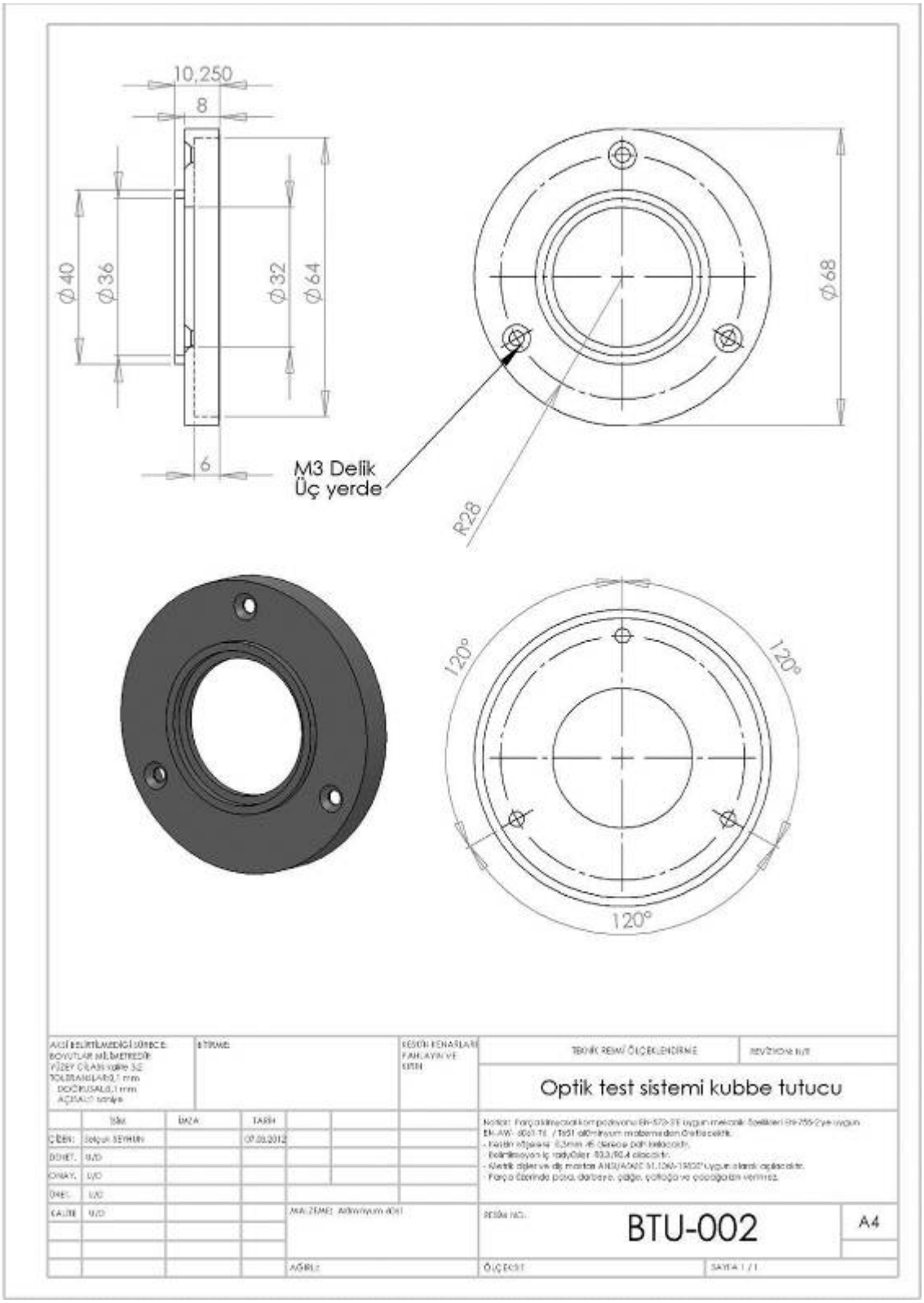
EKLER

EK 1

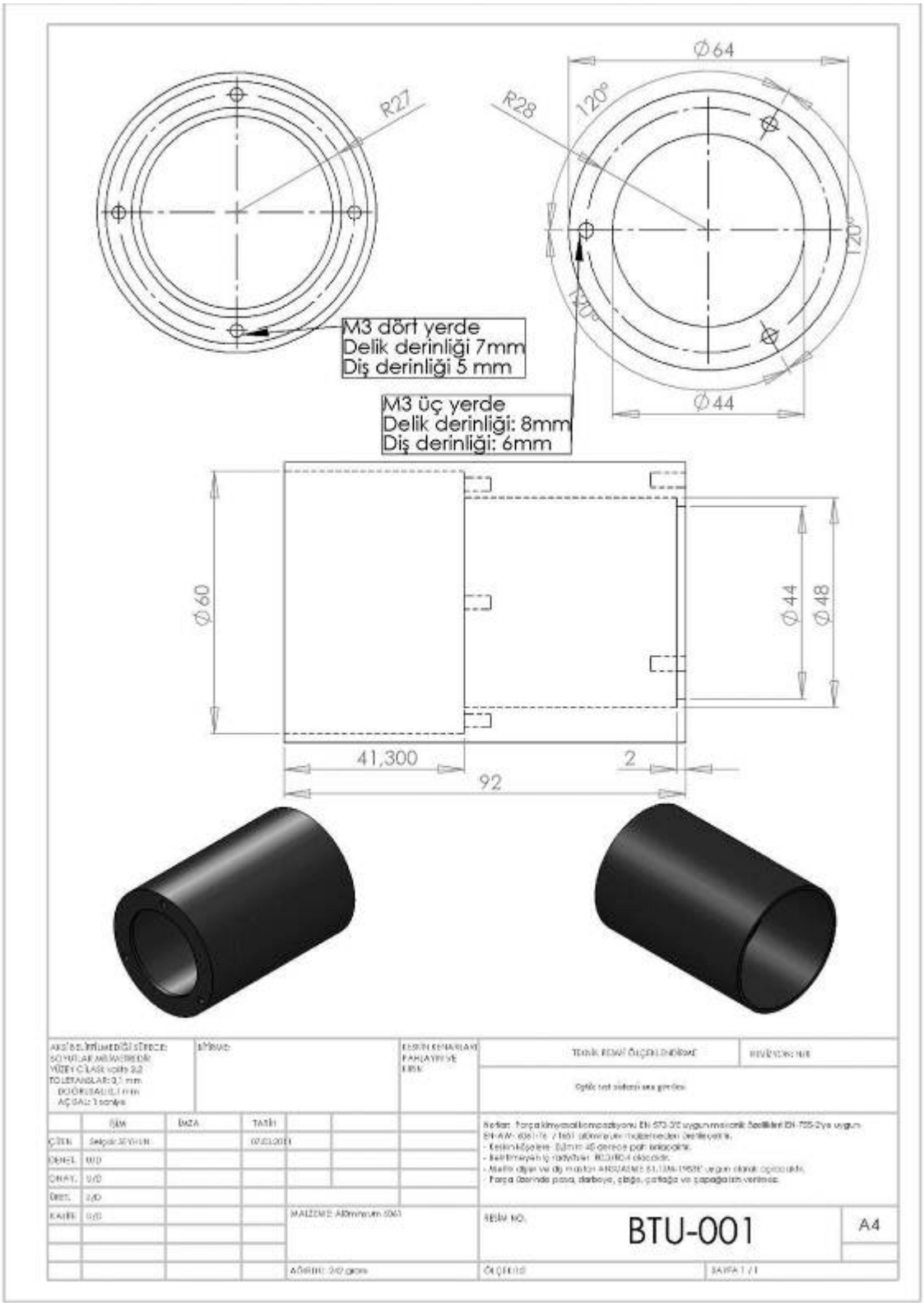


Wavelength (nm)	1064±1
Laser Type	Diode Pumped Solid State
Output Power (mW)	TEM00
Transverse Mode	Diode Pumped Solid State
Longitudinal Mode	Single
Operating Mode	CW
Power Stability (RMS over 4-hours)	<5 %, 3 %, 1 %
Warm-Up Time (minutes)	<15
M2 Factor	<1.5
Beam Divergence (mrad, full-angle)	<1.5
Beam Diameter (mm, at aperture)	~2.0
Spectral Linewidth (nm)	<0.0001
Beam Height (mm, from base plate)	24,8
Polarization Ratio	>100:1
Noise of Amplitude (1-20Mhz, RMS)	<0.5 %
Coherence Length (m)	>50
Pointing Stability (mrad, after warm-up)	<0.05
Operating Temperature (°C)	10-35
Power Supply (90-264VAC)	PSU-III FDA
Modulation	Not Available
Power Supply Dimensions (mm)	133 (L) ×130(W) ×65 (H)
Power Supply Weight (kg)	1,2
Laser Head Dimensions (mm)	140. 8(L)×73(W) ×46. 2(H)
Laser Head Weight (kg)	0.6
Expected Lifetime (hours)	>10,000
Warranty Period	1-Year Limited Warranty
FDA Compliance	FDA CDRH Title 21 CFR 1040.10/11 Class 4

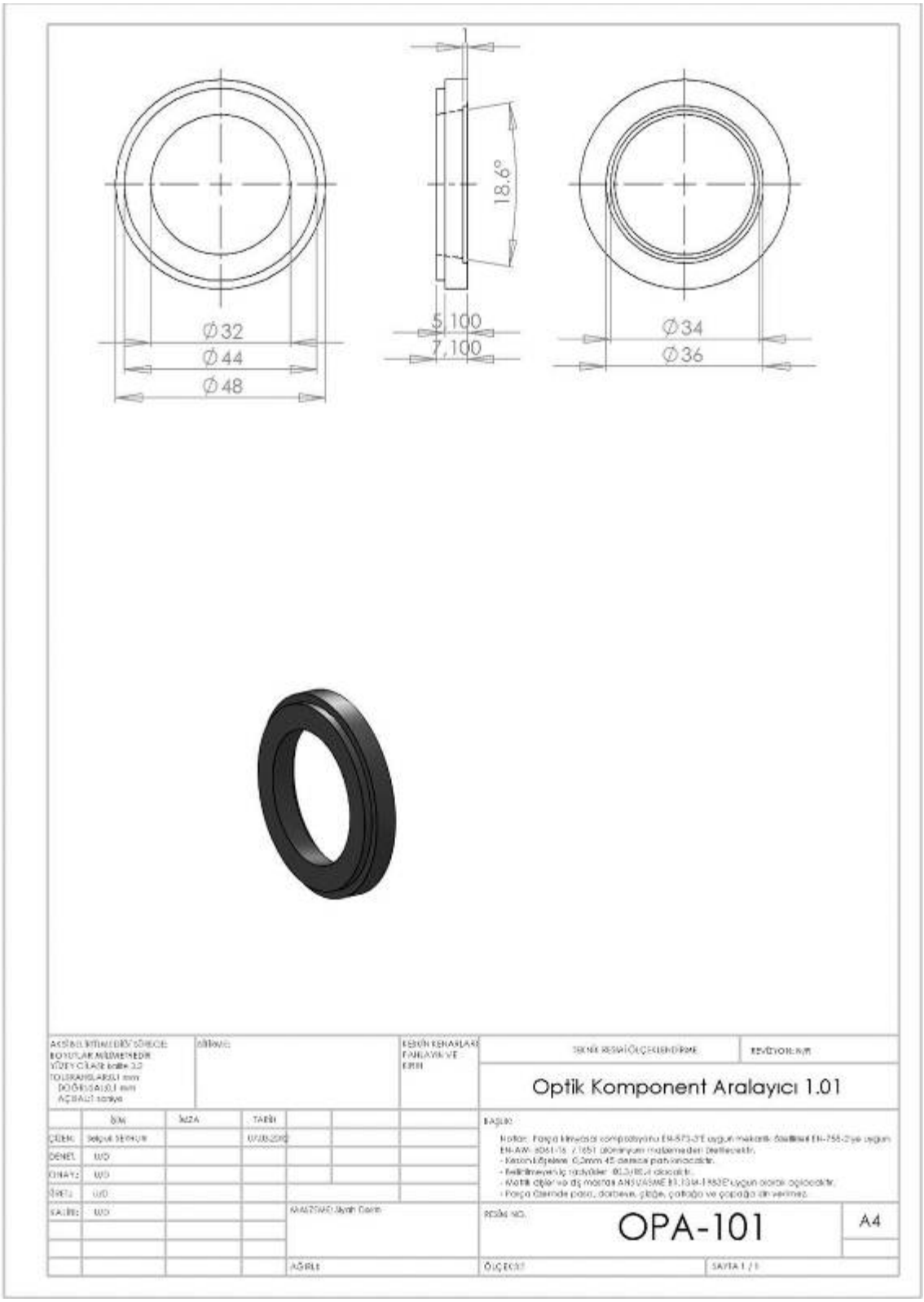
EK 2



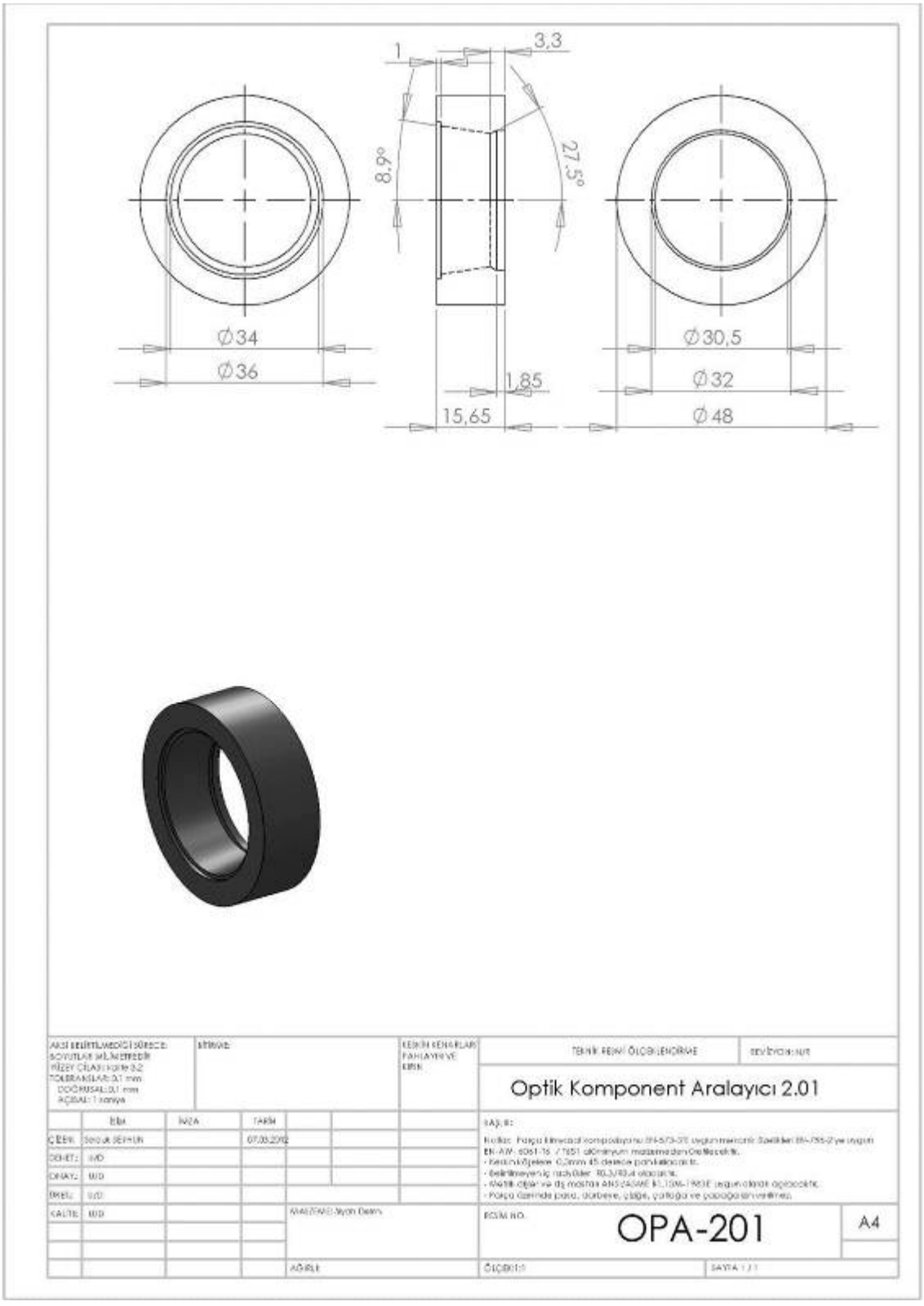
Şekil 7.1. Kubbe tutucu teknik çizimi



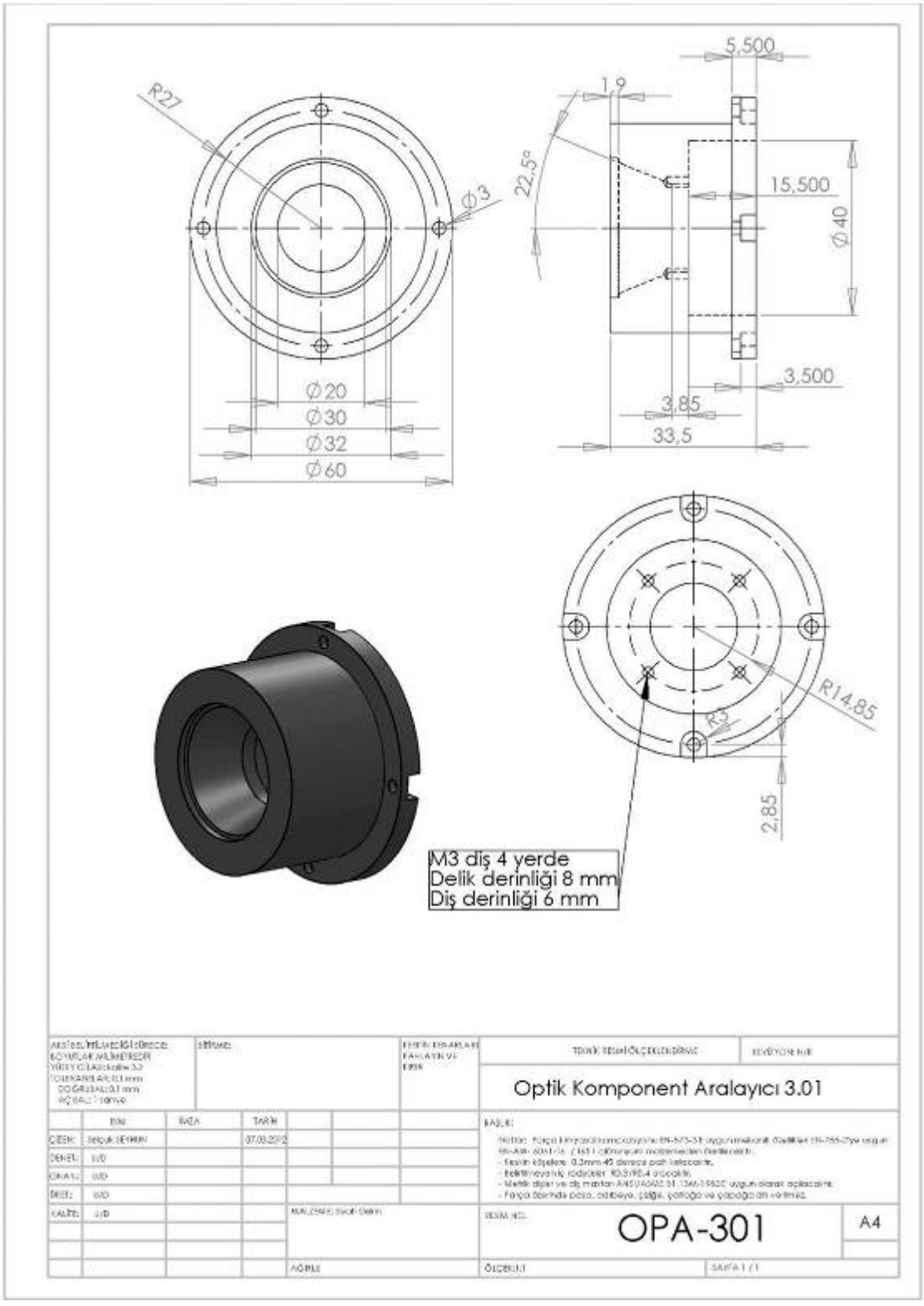
Şekil 7.2. Yan gövde teknik çizimi



Şekil 7.3. Kubbe ile filtre arasında kalan aralayıcı

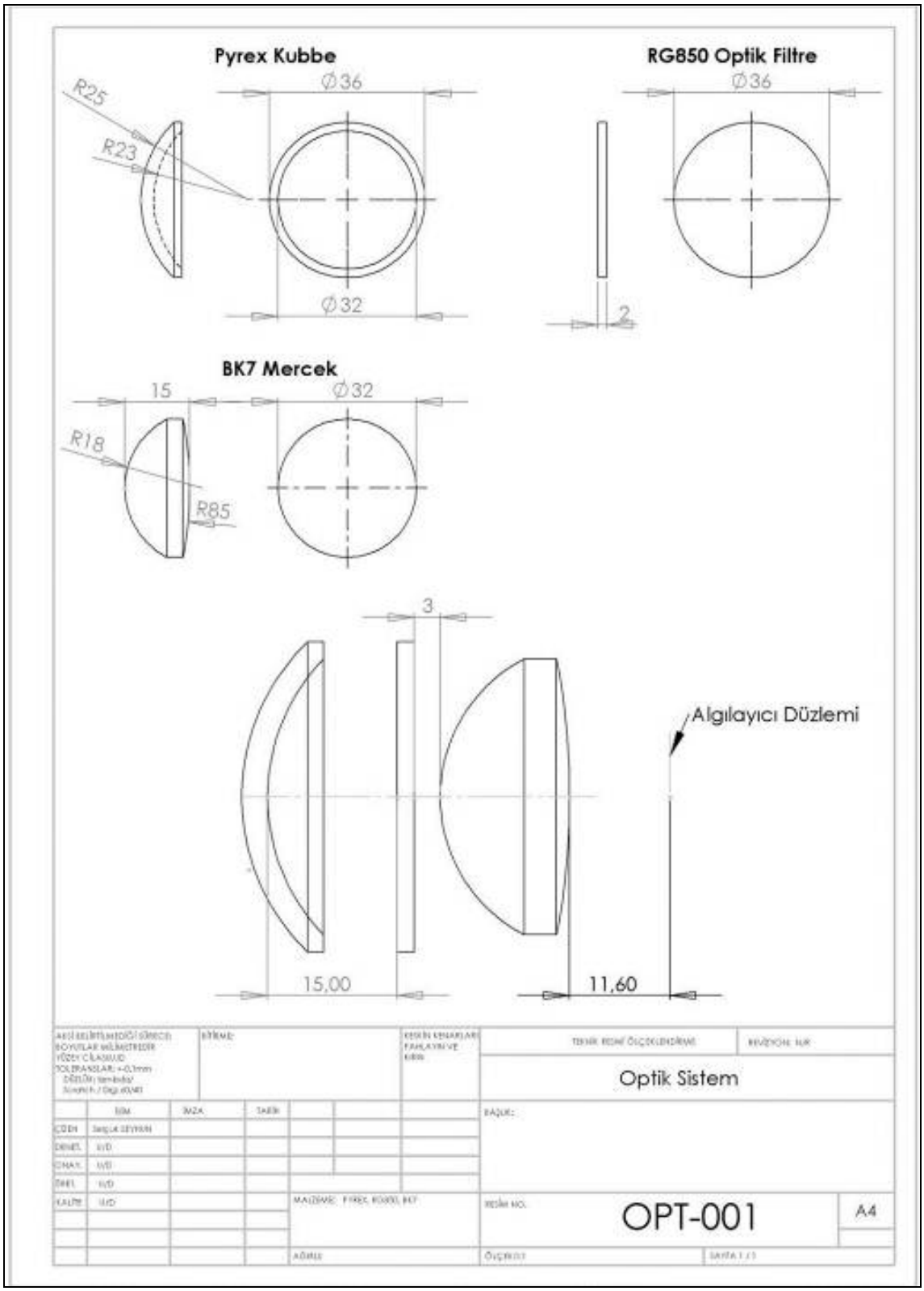


Şekil 7.4. Filtre ile mercek arasında kalan aralayıcı



Şekil 7.5. Mercek ile algılayıcı arasında kalan aralayıcı

EK 3



Şekil 7.6. Algılayıcı sistemin optik tasarımı

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Selçuk SEYHUN

Doğum Yeri : Adana

Doğum Tarihi : 27 Şubat 1974

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Özel Yükseliş Koleji, 1992

Lisans : Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü, 2008

Çalıştığı Kurum

Roketsan Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş. 2008 - …