



**KATADIOPTRİK GÖRÜNÜR, YAKIN KIZILÖTESİ VE ORTA
KIZILÖTESİ DALGA BOYUNDA ALGILAMA YAPAN OPTİK TASARIM**

Mehmet Berke IŞIK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Mehmet Berke IŞIK

21/07/2022

KATADIOPTRİK GÖRÜNÜR, YAKIN KIZILÖTESİ VE ORTA KIZILÖTESİ DALGA BOYUNDA ALGILAMA YAPAN OPTİK TASARIM

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Berke IŞIK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Optik bir sistemin parametrelerinin doğru belirlenmesi hem tasarımın doğru noktaya ulaşmasını hem de daha ucuz ve güvenli bir sistemin ortaya çıkmasını sağlar. Bu tezin temel amacı, hava aracından altı kilometre uzaklıktaki hareketli bir nesnenin insan olup olmadığını tanımlayabilmektir. Hareketli bir nesnenin insan olduğunu tanımlayabilmek için, kullanılacak optik sistemin hava şartlarına, hedef imzasına ve farklı dalga boylarındaki ışığa uygun olarak çalışabilmesi gereklidir. Bu amaca göre, tez çalışması kapsamında optik ve sistem tasarımları görünür dalga boyu, yakın kızılötesi dalga boyu ve orta kızılötesi dalga boyunda çalışacak şekilde tamamlanmıştır. Farklı dalga boylarının söz konusu olması farklı sistemlerin tasarlanmasını gerektirmektedir. Farklı dalga boyları için farklı dedektör boyutları, farklı odak uzunlukları ve farklı görüş açıları sistem parametreleri olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler Gece Görüş Entegre Performans Modeli programında kullanılarak, yer çözümlenmiş mesafe, görüntü yorumlanabilirlik derecelendirme ölçeği, menzil performansları ve modülasyon transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Sistem tasarımının tamamlanması ile optik tasarımına geçilmiş ve tasarım için Zemax OpticStudio programı kullanılmıştır. Optik tasarımda özel bir konu olarak ele alınan katadioptrik tasarımın önemli unsurlarından biri olan ve çalışılan üç dalga boyunun da sisteme dahil edilmesini sağlayan ortak optik açıklık, aynalar ve mercekler kullanılarak tasarlanmaktadır. Farklı dalga boylarındaki ışığın kullanımı, üç parçalı tümleşik optik açıklık tasarımının tamamlanmasını gerektirmiştir. Tasarım sonucunda her dalga boyu için nokta diyagramı, çarpıtma ve optik yerleşim sonuçları elde edilmiştir. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar birçok gelişmiş ve yarışabilir özelliklerinin yanı sıra tasarlanan sistem, boyutlarının savunma sanayi sektöründe satışı yapılan katadioptrik ortak açıklıklı sistemlerin boyutlarından daha küçük olması ile ön plana çıkmaktadır. Böylece, tez kapsamında elde edilen sonuçlar kullanılarak üretilen bir katadioptrik ortak açıklıklı sistemin diğer sistemlere göre daha hafif ve dolayısıyla daha kullanışlı olabileceği düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 93008
Anahtar Kelimeler : Optik tasarım, Performans tasarımı, Katadioptrik, Ortak açıklık
Sayfa Adedi : 61
Danışman : Doç. Dr. Tarık ASAR

CATADIOPTRIC VISIBLE, NEAR INFRARED AND MID INFRARED DETECTION

OPTICAL DESIGN

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Berke IŞIK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

The correct determination of the parameters of an optical system ensures that the design reaches the right point and a cheaper and safer system emerges. The main purpose of this thesis is to be able to identify whether a moving object six kilometers from the aircraft is human or not. To be able to identify that a moving object is a person, it is necessary that the optical system to be used can work in accordance with weather conditions, the target signature, and light of different wavelengths. For this purpose, optical and system designs have been completed within the scope of the thesis study to operate at visible wavelengths, near infrared wavelengths and mid-infrared wavelengths. The fact that different wavelengths are involved requires the design of different systems. Different detector sizes, different focal lengths and different field of views were determined as system parameters for different wavelengths. By using these determined values in the Night Vision Integrated Performance Model program, ground resolved distance, image interpretability rating scale, range performances and modulation transfer function were obtained. After the system design was completed, optical design was started and Zemax OpticStudio program was used for the design. A common optical aperture, which is one of the important elements of catadioptric design, which is considered as a special issue in optical design, and which allows all three wavelengths studied to be included in the system, is designed using mirrors and lenses. The use of light of different wavelengths required the completion of the three-part integrated optical design. As a result of the design, spot diagram, distortion and optical layout results were obtained for each wavelength. The results obtained in the thesis study stand out with its many advanced and competitive features, as well as the designed system, the dimensions of which are smaller than the dimensions of catadioptric common aperture systems sold in the defense industry sector. Thus, it is thought that a catadioptric common aperture system produced using the results obtained within the scope of the thesis may be lighter and therefore more useful than other systems.

Science Code : 93008

Key Words : Optical design, Performance design, Catadioptric, Common aperture

Page Number : 61

Supervisor : Assist. Prof. Tarık ASAR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her konuda destek olan, tez çalışmalarım için bana her türlü fırsatı sağlayarak rehberlik eden değerli danışman hocam Doç. Dr. Tarık ASAR'a ve sevgili eşi Doç. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında bana motivasyon sağlayan, düştüğüm yerden kalkmamı sağlayan ve mutluluğumu sağlayan canım sevgilim Tuğçe ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Beni bugüne getirip büyüten, yetiştiren muhteşem insanlar olan babam, annem ve abime teşekkür ederim.

Ailemizin yeni üyesi ASLAN'a, bana amcalığı tattırıp motivasyon sağladığı için teşekkür ederim.

Uzaktan bir telefonum ile desteğini saat fark etmeksizin hissettiren kuzenlerime teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan huysuz ve tatlı kadın olan Emel ALTIPARMAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Katadioptrik Sistemler	5
2.2. Temel Sistem Parametreleri	6
2.2.1. Ulusal görüntü yorumlanabilirlik derecelendirme ölçeği	7
2.2.2. Yer çözümlenmiş mesafe.....	9
2.2.3. Hedef ayrımı	9
2.3. Temel Optik Parametreler	11
2.3.1. Snell yasası	12
2.3.2. Görüş açısı	14
2.3.3. F/#.....	14
2.3.4. Nokta diyagramı	14
2.3.5. Optik sapmalar.....	15
2.3.6. Airy Disk	19
2.3.7. İnce mercek.....	20
2.3.8. Modülasyon transfer fonksiyonu	20

	Sayfa
3. KATADIOPTRİK PERFORMANS VE MERCEK TASARIMI.....	23
3.1. Gece Görüşü Entegre Performans Modeli	23
3.2. Zemax OpticStudio	24
3.3. Temel Tasarım Parametreleri	24
4. BULGULAR VE SONUÇLAR.....	27
4.1. Görünür Dalga Boyu	27
4.2. NIR Dalga Boyu.....	37
4.3. MWIR Dalga Boyu	43
5. YORUMLAR.....	53
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Engelleme oranının odak uzaklığına etkisi.....	2
Çizelge 2.1. Görünür Dalga Boyu için NIIRS örnekleri.....	8
Çizelge 2.2. MWIR Dalga Boyu için NIIRS örnekleri.....	8
Çizelge 2.3 Johnson Kriterine göre döngü örnekleri	10
Çizelge 2.4. V50 döngü değerleri	11
Çizelge 3.1. Dedektör parametreleri	24
Çizelge 3.2. Görünür dalga boyu temel tasarım parametreleri	25
Çizelge 3.3. NIR temel tasarım parametreleri	25
Çizelge 3.4. MWIR temel tasarım parametreleri	25

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Elektro optik sistemin temel çalışma prensibi	2
Şekil 2.1 Işın kırınımı	12
Şekil 2.2. Kırıcı ve yansıtıcı yüzeylerin kırınım hareketi	13
Şekil 2.3. İnce mercekte ışın kırınımı	13
Şekil 2.4. Görüş alanının gösterimi.....	14
Şekil 2.5. Nokta Diyagramı dağılımı	15
Şekil 2.6. Renk sapmaları görseli	16
Şekil 2.7. Küresel sapmanın oluşumu.....	17
Şekil 2.8. Koma görseli.....	17
Şekil 2.9. Çarpıtma görseli.....	18
Şekil 2.10. Airy disk görseli	20
Şekil 2.11. MTF grafiği	21
Şekil 2.12. Sagital ve Teğetsel MTF	22
Şekil 4.1. Görünür Dalga Boyu NIIRS-menzil grafiği	28
Şekil 4.2. Görünür Dalga Boyu GSD-Menzil grafiği	28
Şekil 4.3. Görünür Dalga Boyu Sistem MTF grafiği.....	29
Şekil 4.4. Görünür dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (Dar görüş)	29
Şekil 4.5. Görünür dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (Geniş görüş)	30
Şekil 4.6. Görünür dalga boyu mercek dizilimi dar görüş açısı.....	31
Şekil 4.7. Görünür dalga boyu dar görüş açısı nokta diyagramı.....	32
Şekil 4.8. Görünür dalga boyu dar görüş açısı çarpıtma diyagramı.....	33
Şekil 4.9. Görünür dalga boyu mercek dizilimi geniş görüş açısı	34
Şekil 4.10. Görünür dalga boyu mercek dizilimi dar görüş açısı ve geniş görüş açısı mercek pozisyonları	34

Şekil 4.11. Görünür dalga boyu geniş görüş açısı nokta diyagramı	35
Şekil 4.12. Görünür dalga boyu dar görüş açısı çarpıtma diyagramı.....	36
Şekil 4.13. Görünür dalga boyu dar görüş açısı ve geniş görüş açısı MTF grafiği	36
Şekil 4.14. NIR dalga Boyu NIIRS-Menzil grafiği	37
Şekil 4.15. NIR Dalga Boyu GSD-Menzil grafiği	38
Şekil 4.16. NIR Dalga Boyu MTF grafiği	38
Şekil 4.17. NIR dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı.....	39
Şekil 4.18. NIR dalga boyu mercek konumu	39
Şekil 4.19. NIR dalga boyu ile görünür dalga boyunda kullanılan merceklerin konumu.....	40
Şekil 4.20. NIR dalga boyu nokta diyagramı.....	41
Şekil 4.21. NIR dalga boyu çarpıtma diyagramı.....	42
Şekil 4.22. NIR dalga boyu MTF optik tasarım.....	42
Şekil 4.23. MWIR Dalga Boyu NIIRS-Menzil grafiği	43
Şekil 4.24. MWIR Dalga Boyu GSD-Menzil grafiği	44
Şekil 4.25. MWIR Dalga Boyu MTF grafiği	44
Şekil 4.26. MWIR Dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (dar görüş açısı)	45
Şekil 4.27. MWIR Dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (geniş görüş açısı)	45
Şekil 4.28. MWIR dalga boyu dar görüş açısının mercek dizilimi.....	46
Şekil 4.29. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı nokta diyagramı	47
Şekil 4.30. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı çarpıtma diyagramı	48
Şekil 4.31. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı mercek konumları	49
Şekil 4.32. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı ve geniş görüş açısı mercek konumları	49
Şekil 4.33. MWIR Dalga boyu geniş görüş açısı nokta diyagramı.....	50
Şekil 4.34 MWIR Dalga boyu geniş görüş açısı çarpıtma diyagramı.....	51
Şekil 4.35. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı ve geniş görüş açısı MTF grafiği.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Kısaltmalar	Açıklamalar
D	Tespit
FPA	Odak düzlem alanı
FOV	Görüş alanı
F/#	F sayısı
GSD	Yer çözülmemiş mesafesi
I	Tanımlama
IIRS	Görüntü yorumlanabilirlik derecelendirme ölçeği
MTF	Modülasyon transfer fonksiyonu
MWIR	Orta kızılötesi dalga boyu
NIIRS	Ulusal görüntü yorumlanabilirlik derecelendirme ölçeği
NIR	Yakın kızılötesi dalga boyu
OTF	Optik transfer fonksiyonu
PTF	Faz transfer fonksiyonu
RER	Göreceli kenar tepkisi
R	Tanıma
SWIR	Kısa kızılötesi dalga boyu
TTP	Hedef görev performansı
V	Abbe Sayısı

1. GİRİŞ

Elektro optik sistemlerde temel sistem parametrelerinin belirlenmesi en önemli kısımdır. Optik tasarım için planlanan sistemin hangi mesafeden çalışacağına göre hangi dalga boyunda çalışacağı, odak uzaklığı, optik açıklığı gibi parametrelerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında menzile bağlı olarak optik sistem tasarımı için gerekli parametrelerin belirlenmesine ve belirlenen parametrelere göre optik tasarımın yapılmasına ışık tutulmaktadır. Sistem parametrelerin tasarıma başlanmadan doğru bir şekilde belirlenmesi, tasarımın sınırlandırılması maliyet ve zaman için önem arz etmektedir. Belirlenen parametrelere göre optik tasarımın tamamlanmasına giden süreçte ilk olarak ince mercek tasarım ardından ise gerçek tasarım yapılmıştır. İnce kenarlı mercek tasarımında merceklerin hareketleri, konumları belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonrasında gerçek mercekler ile optik tasarım yapılmıştır ve bu tasarımda oluşan optik sapmaların azaltılması amaçlanmıştır. Elde edilen nihai tasarım hava araçlarında kullanılarak yer hedeflerindeki farkındalığı arttırmak amaçlanmıştır.

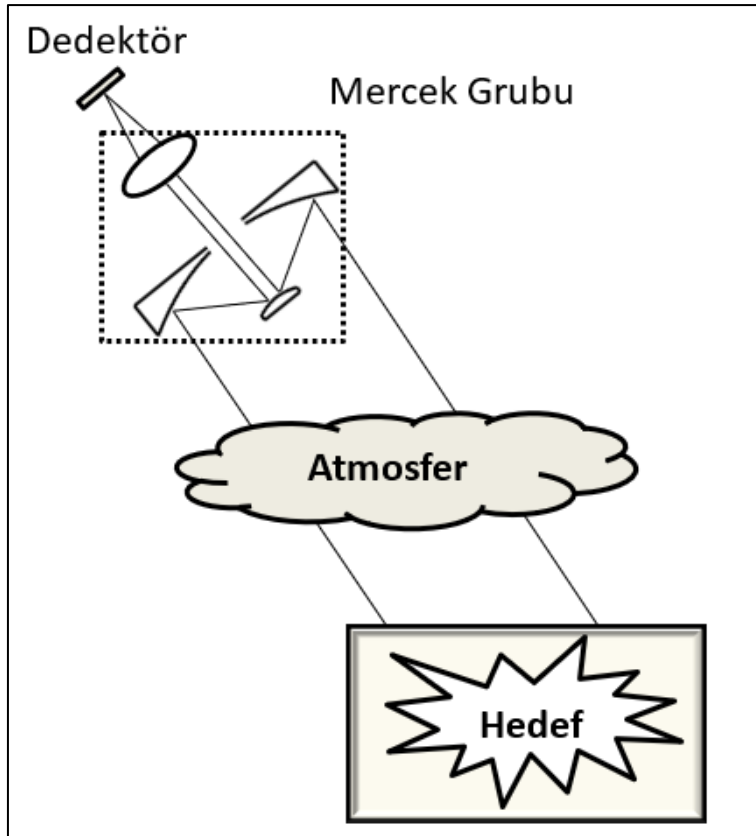
Yüksek irtifa gözetleme ihtiyaçlarının karşılanması, yalnızca geniş optik açıklığına sahip optiklerle mümkündür ve optik tasarıma doğrudan uygulanması çoğu zaman hava araçlarında ağırlığın artmasına sebep olur. Bu durumda büyük optik sistemlere kullanılması gerekir ve hava araçları için tercih edilmeyen bir durumdur. Bu geniş açıklık gereksinimleri için ortak açıklığa sahip katadioptrik tasarım yaklaşımı kullanılır (Coughlin, 1980).

Literatür çalışmaları sonrasında ortaya kaçak ışınların sisteme girmemesi için ve ikinci aynaya bağlı olan engelleme boyutunun artarak enerjinin azalmaması için optik açıklık toplam dairesel açıklığın %20'sinden az olmaması, %30'u ise geçmemesi gerekmektedir. Mercek ve aynalardan oluşan ve optik açıklığın ikincil ayna tarafından engellemesi ile oluşan sistemler katadioptrik sistemleri temsil etmektedir (Huang, 1997). Buna bağlı olarak yapılan hesaplamalarda Çizelge 1.1 verileri elde edilmiştir ve engelleme oranı %21 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 1.1. Engelleme oranının odak uzaklığına etkisi

İkinci Ayna (mm)	Engelleme	Katadioptrik Ayna F/#	Optik Açıklık (mm)	Odak Uzaklığı (mm)
40	20%	2,24	200	447,2
42	21%	2,18	200	436,4
44	22%	2,13	200	426,4
46	23%	2,09	200	417
48	24%	2,04	200	408,2
50	25%	2,00	200	400

Elektro optik sistemler kullanılan dalga boyuna göre gece, gündüz ve hatta tüm değişken hava koşulunda çalışabilmektedir. Tüm hava koşullarına ve ortamdaki ışık miktarı değişimine rağmen performansın sabit kalması istenirse, mevcut sistemde birden fazla dalga boyu kullanılması gerekmektedir. Durumsal farkındalığı arttırmak için hedefin ortam sıcaklık farkına Orta Kızılötesi Dalga Boyu (Mid Wave Infrared (MWIR)), bazı durumlarda ise hedeften yansıyan ışımaların gözlemlenmesine bağlı olarak Görünür, Yakın Kızılötesi (Near Infrared(NIR)) ve kısa kızılötesi (Short Wave Infrared(SWIR)) gibi farklı dalga boyu kullanılabilir (Lloyd, 2013). Bir elektro optik sistemin çalışmasının temel prensibi Şekil 1.1’de özetlenmektedir.



Şekil 1.1. Elektro optik sistemin temel çalışma prensibi

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi ilk olarak, hedeften yansıyan enerji atmosferden geçmektedir. Sonrasında atmosferden geçen ışınlar havada bulunan moleküllerden dolayı saçılıma uğrar ve enerjisi azalarak optik sistemin açıklığına ulaşır. Merceklerden geçen ışınların optik sapmaları giderilmiş olarak odak düzlem alanına (FPA(focal plane area)) odaklanır ve ekran yardımıyla kullanıcıya görüntü gösterilir (Holst, 2008).

Temel sistem parametrelerinin ve sensör performansının anlaşılması için bazı tanımlamalar yapılması gerekmektedir. Bu tanımlar, tespit (Detection(D)), tanıma (Recognition(R)) ve tanımlama (Identification(I)) olarak üçe ayrılır. DRI performansı ilk önce Johnson Kriterlerine göre yapılmıştır. Test ortamında N50 değerleri belirlenmiştir (Lloyd, 2013). N50 değerleri yıllar içinde gelişerek Hedef Görev Performans Metrik (Targeting Task Performance(TTP)) olarak güncellenmiştir ve N50 değerlerinin 2,7 katına eşit olarak ayarlanmış ve yeni adına V50 olarak karar verilmiştir (Holst, 2018). Görüntüleme performans sonucunun herkes için anlaşılır bir şekilde ölçeklendirilmesi için Ulusal Görüntü Yorumlanabilirlik Derecelendirme Ölçeği (National Imagery Interpretability Rating Scale(NIIRS)) adı verilen metrik geliştirilmiştir (Driggers et al., 1996). NIIRS istihbarat ve görüntü analistleri tarafından görüntü gereksinimlerini tanımlamak için yaygın olarak kullanılan, aynı zamanda sensör görüntü kalitesinin anlaşılması için kullanılan 10 seviyeli bir ölçektir (Riehl Jr, 1996).

Performans metrikleri belirlenen Elektro Optik sistemlerin diğer aşaması olan optik tasarımda nokta diyagramı, Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF), çarpıtma, odak uzaklığına bağlı olarak yakınlaştırma, görüş açısının değişimi gibi çıktıların tasarımı Zemax OpticStudio kullanılarak yapılması hedeflenmiştir. Bu tez çalışmasında optik tasarımda merceklerin konumları her dalga boyu ve her görüş açısı için ayrı tasarımlar yapılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanacak olan optik sistemin amacı, hava aracında, 1,8 metre uzunluğunda 0,6 metre genişliğindeki bir insanın 6 km mesafeden tanımlanmasıdır. Hedef performansının sağlanması için ilk olarak temel sistem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir (Maurer et al., 2002). Temel sistem parametreleri Çizelge 3.2, 3.3 ve 3.4'te belirlenmiştir. Belirlenen parametrelere göre yapılan analizlerde görünür dalga boyunun görev performans sonucu Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te, NIR dalga boyu Şekil 4.17'de ve MWIR dalga boyu için ise Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak tasarlanan optik tasarımda mercek konumları görünür dalga boyu için Şekil 4.6 ve Şekil 4.9'da, NIR dalga boyu için Şekil 4.18'de ve MWIR dalga boyu için Şekil 4.28 ve Şekil 4.31'de gösterilmektedir.

Katadioptrik ortak optik açıklığı bulunan sistemlerin birden fazla dalga boyunu aynı sistemde kullanmasının sonucunda ağırlık ve boyutun azalması hava araçlarında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bir diğer avantajı ise oluşan görüntüde çarpıtma oranının düşük olması sayesinde görüntüye bakıldığında hedefin net anlaşılması sağlanmaktadır. Buna ek olarak, bu tez kapsamında, NIIRS ile çıkan görüntünün tespit, tanıma ve tanımlama yapılırken yorumlanabilirliğini sağlanmaktadır (Gliatti, 1978; Vollmerhausen & Driggers, 2000).

Bu tez çalışmasında katadioptrik ortak açıklıklı bir sistem performans analizi ve optik tasarımı yapılmıştır. Yapılan performans analizinde NV-IPM kullanılmıştır. Optik tasarım için ise Zemax OpticStudio programı kullanılmıştır. Optik tasarımda $F/\#$ ve görüş açısı odak uzunluğuna bağlı olarak hesaplanmıştır.

2.1. Katadioptrik Sistemler

Katadioptrik sistemler tüm dalga boyunda kullanılabilmektedir. Bazı sistemlerde tek dalga boyu için de kullanılabılırken, bazı sistemlerde birden fazla dalga boyu ortak açıklık sonrasında ışın ayırıcılar yardımıyla veya optik kaplama ile dalga boylarına ayrılarak kullanılabilmektedir (Baker & Nayar, 1999; Ming et al., 2012). Kırılma elemanları optik cam türünden yapılmış olan bir katadioptrik yakınlaştırmalı teleskop, spektrum genişliğindeki tüm dalga boylarını ortak bir odak düzlemine odaklar (Sigler, 1992). Bir

katadioptrik yakınlaştırma mercek düzeneği, birincil aynanın ilerisinde bir ara görüntü oluşturmak için ışınların optik sisteme girmesini sağlayan ikinci aynaya yansıtarak merceklerle doğru ışınların hareketini sağlamaktadır. Katadioptrik objektif mercek grubu ara görüntünün optik olarak arkasına yerleştirilmiştir. Katadioptrik sistemler sabit bir mercek grubuna ve hareketli mercek alt grubuna sahiptir (Sinclair & Hudyma, 1999). Katadioptrik sistemlerde literatür araştırması sonucunda çıkan en büyük farklılık birbirine bakan aynaların oluşturduğu odak düzleminin giriş aynasının arkasına düşürülerek ve düşürüldüğü yerden sonrasında aynalar yardımıyla birden fazla dalga boyuna ayrılması sağlanmaktadır.

Hava araçlarında kullanılan görev sistemlerinin hafif ve küçük olması gerekmektedir. Hafif ve küçük sistemler ile hava aracının görev süresi uzatılması ve çok fonksiyonlu bir sistem kullanılması hedeflenmektedir (Yu et al., 2013). Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemin ortak açıklığa sahip bu optik sistemin üç dalga boyunu geçirmesinin avantajları sayesinde sisli havada, güneşli havada, gün ışığında ve karanlıkta da hava aracının operasyon yapabilmesini sağlamaktadır (Driggers et al., 2013; Pascal et al., 2021; Shu & Henson, 1996).

2.2. Temel Sistem Parametreleri

Optik sistemlerin kullanıcıya bağlı kalmadan matematiksel olarak herkes için anlaşılır olması için sayısallaştırılarak sınıflara ayrılması gerekmektedir. Yapılan analizlerin detaylandırılması için bazı metrikler türetilmiştir. Bunların başında NIIRS, yer çözümlenmiş mesafesi (ground sampling distance(GSD)), Johnson kriterleri ve TTP gibi menzil hedef tespit için değerler türetilmiştir (Holst, 2008; Vollmerhausen et al., 2004).

Havadan keşif ve ilgili görüntünün yorumlaması için çözünürlük, GSD ile ölçülür. Yer çözünürlüğü, incelenecek nesnelerin sınırlayıcı özelliklerinin sayısal bir terimidir (Holst, 2007; Vollmerhausen & Jacobs, 2004). Elektro optik sistemler amacına bağlı olarak yerde bulunan hedefin özelliklerini çözebilecek kapasitede olmalıdır. Bir otoyolun beyaz merkez çizgisini ayırt etmek için 10 cm'lik bir zemin çözünürlüğü gerektirebilir (Howe, 1993). Aynı otoyolun yanında uzanan granit kayaları incelerken, sistemin sadece 1m'yi çözmesi yeterlidir. GSD, hedefe olan mesafeye bağlı olduğu için laboratuvarında ölçülemez, ancak uygun bir çözünürlük ölçüsünden hesaplanabilmektedir (Holst, 2008).

Belirli bir ayırım düzeyine ulaşma olasılığının %50'si, Johnson modelleri için N50 ve TTP modelleri için V50 olarak etiketlenmiştir. Zamanla N50 değerleri için tespit, tanıma ve tanımlamada kullanılacak bir dizi standart değer geliştirilmiştir (Vollmerhausen & Jacobs, 2004). Her elektro optik sistemin tespit, tanıma ve tanımlama özelliği için aynı N50'yi kullanarak sistem performansını karşılaştırma işleminde model tahminleri kullanılabilir (Riehl Jr, 1996).

2.2.1. Ulusal görüntü yorumlanabilirlik derecelendirme ölçeği

Görüntü yorumlanabilirlik derecelendirme ölçeği (Image interpretability rating scale (IIRS)) görüntülerin potansiyel yorumlanabilirliğini ölçen sayısal bir ölçek olarak geliştirilmiştir. İstihbarat amacıyla potansiyel bilgi olarak kabul edilmektedir (Riehl Jr & Maver, 1996). Fiziksel olarak tanımlanmış bir yorumlanabilirlik ölçeğinde eşit aralıklarla yerleştirilmiş, yararlanılabilir görevler kümesidir (Burt, 2013).

Derecelendirme değeri arttıkça görüntüden daha fazla ayrıntı çıkarılabilmektedir (Gliatti, 1978). IIRS 1991'de önemli ölçüde güncellenmiştir ve 1994'te yenilenerek Ulusal Görüntü Yorumlanabilirlik Derecelendirme Ölçeği (NIIRS) oluşturulmuştur (Riehl Jr, 1996). NIIRS keşif ve gözetleme yapanlar tarafından kullanılan başlıca görüntü kalitesi metriği haline getirilmiştir (Seong et al., 2009). NIIRS görüntü gereksinimlerini tanımlamak, görüntüleme sistemlerini seçmek ve yeni sistemlerin performansını belirlemek için önemli bir araç haline gelmiştir. Farklı sensörlerin farklı hedef özellikleri için görünür ve kızılötesi sensörler için farklı NIIRS değerleri mevcuttur (Holst, 2008). Örnek olarak, altı kilometre yükseklikte bulunan hava aracının yerde bulunan hedefin tank, insan, sivil araç olmasını ayırt etmesini sağlar ve eğer tespit edilirse NIIRS değeri 7 olarak kabul edilir. Çizelge 2.1 görünür dalga boyu için Çizelge 2.2 ise kızılötesi dalga boyu için NIIRS değerleri verilmektedir (Holst, 2008).

Çizelge 2.1. Görünür Dalga Boyu için NIIRS örnekleri

Puanlama	Örnekler Görünür
0	Karartma, bozulma veya çok düşük çözünürlük nedeniyle engellenen görüntülerin yorumlanabilirliği
1	Orta ölçekli liman tesisini tespiti Büyük havaalanındaki pistleri ayırtı
2	Hava alanlarındaki büyük hangarları tespiti Büyük binaları (hastaneler, fabrikalar) tespiti
3	Trenleri tespiti Limandaki büyük yüzey gemisini tanımlanması
4	Büyük savaş uçaklarını tanımlanması Bireysel demiryolu raylarını tanımlanması
5	Radarı araca veya römorka monteli olarak tanımlanması Tek tek vagonları tanımlanması (ör. gondol, düz, kutu)
6	Orta boy kamyonunda yedek lastiği tanımlanması Otomobilleri sedan veya istasyon vagonu olarak tanımlanması
7	Elektronik minibüslerdeki portları, merdivenleri ve havalandırmaları tanımlanması Bireysel demiryolu bağlarını tanımlanması
8	Bombardıman uçağındaki perçin hatlarını tanımlanması Bir araçta ön cam sileceklerini tanımlanması
9	Kamyonlardaki araç kayıt numaralarını tanımlanması Bireysel demiryolu artışlarını tespiti

Çizelge 2.2. MWIR Dalga Boyu için NIIRS örnekleri

Puanlama	Örnekler IR
0	Karartma tarafından engellenen görüntülerin yorumlana bilirliliği, Bozulma veya çok zayıf çözünürlük
1	Büyük bir havaalanındaki uçak park alanlarını belirlenmesi Endüstriyel alanı tespiti
2	Büyük ve küçük uçakları ayırt edilmesi Orta büyüklükteki yüzey gemilerinde aktif yığınları tespiti
3	Büyük uçaklarda etkin olmayan motorların yerini tespiti Asfalt bir alanda bireysel (etkin olmayan) araçları tespiti
4	Orta büyüklükteki helikopterde rotor kanatlarını tespiti Bir trende tek tek arabaları ayırt edilmesi
5	Bir radyo röle kulesindeki anten çanaklarını tanımlanması
6	Küçük ve orta helikopterler arasında ayırım yapılması Otomobilleri sedan veya istasyon vagonu olarak tanımlanması
7	Bir SA-5 füzesinde egzoz nozülünü tanımlanması Bireysel bir kişiyi tanımlanması
8	Cip boyutunda bir araçtaki antenin tanımlanması Açık yataklı, hafif hizmet kamyonundaki ekipmanın tanımlaması
9	Küçük ve orta ölçekli araçlarda kapı kollarını tanımlaması Bir kişinin elindeki parmakları ayırt edilmesi

2.2.2. Yer çözümlenmiş mesafe

Havadan yer hedeflerinin görüntüleri görüntülenirken yerdeki fark edilebilir en küçük döngünün belirlenmesi gerekmektedir (Ungar et al., 2003). Bu döngü genişliği zeminin çözümlenmiş mesafedir (Vollmerhausen & Jacobs, 2004). GSD dedektör alanının zemine yansıması olarak kabul edilmektedir (Holst, 2008). GSD dikey (GSD_D) ve GSD (GSD_Y) yatay hesaplamaları dedektörün dikey ve yatay bileşenlerine göre ayrı ayrı 2.1 ve 2.2. denklemlerinde hesaplanmaktadır. Denklemden M ölçüm yapılan mesafeyi, f sistemin odak uzunluğunu, d ise dedektörün eksenel uzunluğunu ifade etmektedir (Driggers et al., 1996; Holst, 2008). Denklem 2.3'te bulunan k_1 ve k_2 sabit sayıları, RER göreceli kenar tepkisini, G gürültü kazancını, SNR sinyalin gürültüye oranını, H ise kenar aşma faktörünü ifade etmektedir (Holst, 2008). Denklem 2.6'da GM, GSD'nin geometrik ortalamasıdır (Holst, 2008).

$$GSD_D = d_D * \frac{M}{f} \quad (2.1)$$

$$GSD_Y = d_Y * \frac{M}{f} \quad (2.2)$$

$$NIIRS = 10.751 - k_1 \log_{10} GSD_{GM} + k_2 \log_{10} RER_{GM} - 0.656 H_{GM} - 0.344 \frac{G}{SNR} \quad (2.3)$$

Katsayılar;

$$k_1 = 3,32 \text{ ve } k_2 = 1,559 \quad RER \geq 0.9 \quad (2.4)$$

$$k_1 = 3,16 \text{ ve } k_2 = 2,817 \quad RER < 0.9 \quad (2.5)$$

$$GSD_{GM} = \sqrt{GSD_H * GSD_V} \quad (2.6)$$

2.2.3. Hedef ayrımı

Elektro optik sistemlerde performans analizleri için hedeflerin sınıflandırılması oldukça önemlidir. Askeri ve sivil amaçlarda kullanılan sistemlerde gelen bir cismin tespit, tanıma ve tanımlaması yapılması gerekmektedir (Vollmerhausen & Jacobs, 2004).

Tespit: Gözlemcinin daha yakından bakmak için harekete geçmesini sağlayacak şekilde görüş alanındaki bir nesnenin veya konumun olabileceğinin belirlenmesi durumudur (Holst, 2008; Ratches, 1976).

Tanıma: Tespit edilen cismin bir insan, araç, taş vb. ayrımı için kullanılır. Belirlendiği ölçüde ayırt edilebilen bireysel unsurların, teçhizatın, elde tutulan nesnelerin ve/veya duruşun farkındalığını sağlar (Holst, 2008; Ratches, 1976).

Tanımlama: Tanınması yapılan cismin ne olduğunu tam olarak anlaşılmasını sağlar. Kişinin silahlı veya potansiyel olarak düşman olduğunun belirlendiği ölçüde ayırt edilebilen giysi, ekipman, elde taşınan nesneler, duruş ve/veya cinsiyet gibi tek tek öğelerin veya öğelerin bir kombinasyonunun algılanmasını sağlar (Holst, 2008).

Tüm performans modelleri MTF tabanlıdır (Guirao et al., 1999). Bu nedenle, kazanım aralığının tahmin edilebilmesi için hedefteki döngüleri modele dâhil etmek gerekmektedir. 1958'de Johnson üç eşdeğer çubuk modeli yaklaşımını geliştirilmiştir ve gürültüsüz bir arka plana karşı askeri araçlı bir model kullanmıştır (Vollmerhausen & Jacobs, 2004). Hedefler görüntü yoğunlaştırıcılar aracılığıyla incelenerek hedeflerin tespiti, tanımları ve tanımlamaları yapılmıştır. Ölçekli modellerle aynı kontrasta sahip çubuklara çözülebilir maksimum çubuk frekansı belirlenmiştir (Vollmerhausen & Jacobs, 2004). Bu şekilde, algılanabilirlik, sensörün eşik çubuğu desen çözünürlüğü ile ilişkilendirilmiştir. Sonrasında bu metriklere yazılımsal olarak birçok iyileştirme ve model güncelleme yapılmıştır. Bunların bazıları; (1975) modeli, FLIR92 ve NVtherm olmasına rağmen, yine de Johnson kriterleri olarak adlandırılmış ve hedefteki döngüler N50 olarak gösterilmektedir. Karakteristik boyut ise hedefin boyunun ve enin çarpımının köküne eşittir. Örnek N50 değerleri çizelge 2.3'te tespit, tanıma ve tanımlama için verilmiştir.

Çizelge 2.3 Johnson Kriterine göre döngü örnekleri

Görev	Örnek	N50
Tespit	Ekranla parlak bir nokta bir ağaç, tank veya kaya olabilir	0.5-1.5
	Yoldaki sabit bir damlanın bir araç olma olasılığı oldukça yüksektir, ancak aynı zamanda bir su birikintisi veya ağaç gölgesi de olabilir.	1-2
	Yolda hareket eden bir damla muhtemelen bir araçtır	1-2.5
Tanıma	Binek araç, kamyonet, kamyonet, tank, zırhlı personel taşıyıcı	2-10
Tanımlama	M-60, T-52, belirli bir kişi vb.	4.5-15

N50 kriterleri doğruluğunu arttırmak amacıyla V50 kriterlerine dönüştürülüp yıllar içinde geliştirilerek Hedef Görev Performans Metrik (TTP) olarak güncellendi ve Çizelge 2.4'te V50 dönüşümü gösterilmektedir (Vollmerhausen & Jacobs, 2004).

Çizelge 2.4. V50 döngü değerleri

Görev	N50	Tavsiye edilen V50 değerleri
Tespit	1	2,7
Tanıma	3,0	8
Tanımlama	6,0	16,2

2.3. Temel Optik Parametreler

Geometrik optik, kırınım veya girişim olmaksızın ışığın incelenmesidir. Birinci dereceden optik ise, kusursuz optik sistemlerin incelenmesidir (Fischer et al., 2000). Analiz yöntemleri Gauss optiklerini ve ince mercek optikleri içerir. İnce kenarlı mercek optikler kalınlığı olmayan, aberasyona sebep olmayan mercek olarak kabul edilir. Optik sistemlerde mercek kalınlıkları olduğu zaman optik sapmalar olmaktadır. Bu sapmalar tüm optik sistemlerde kendi özgü kusurlar oluşturur. Ek sapmalar üretim hatalarından kaynaklanabilir (Charman, 1995). Üçüncü dereceden optikler, sapmaların sistem performansı üzerindeki etkilerini içerir (Greivenkamp, 2004). Kırılma indisi denklem 2.7 ve 2.8'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır (Greivenkamp, 2004). c vakum ortamındaki ışık hızını, v ortamdaki ışık hızını ifade etmektedir. Dalga boyu denklem 2.9'da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Burada λ dalga boyunun v ise frekansı ifade etmektedir (Greivenkamp, 2004).

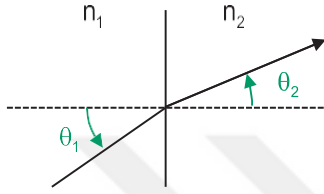
$$n = \frac{\text{Vakum ortamındaki Işık hızı}}{\text{Ortamdaki Işık Hızı}} = \frac{c}{v} \quad (2.7)$$

$$v = \frac{c}{n} \quad c = 2,99 * 10^8 \frac{m}{s} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{c}{v} \quad (2.9)$$

2.3.1. Snell yasası

Snell yasası gelen ve yansıyan ışının bir ortamdan geçmesiyle ışının davranışını inceler. Gelen ışın, kırılan ışın ve yüzey normali eş düzlemlidir Şekil 2.1’de gösterilmektedir (Greivenkamp, 2004). Denklem 2.10’da Snell yasasının formülü gösterilmektedir. Denklemde n kırılma indisini θ ise gelen ve yansıyan ışının açısını göstermektedir (Greivenkamp, 2004).



Şekil 2.1 Işın kırınımı

$$n_1 * \sin\theta_1 = n_2 * \sin\theta_2 \quad (2.10)$$

Bir yüzeyin eğrilik yarıçapı R , tepe noktasından eğrilik merkezine olan CC mesafesi olarak tanımlanır. Şekil 2.2’de bir optik yüzeyin ön ve arka ana düzlemleri (P ve P') çakışmıştır ve yüzey tepe noktası V ’de bulunur (Fischer et al., 2000; Greivenkamp, 2004). Optik yüzeyin gücü denklem 2.11’de hesaplanmaktadır. Denklemde bulunan $\emptyset$ optik gücü, C eğriliği, R ise eğrilik yarıçapını göstermektedir (Greivenkamp, 2004). Denklem 2.12’de eğriliğin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir. Denklem 2.13 ise odak uzunluğu f ile gösterilip nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

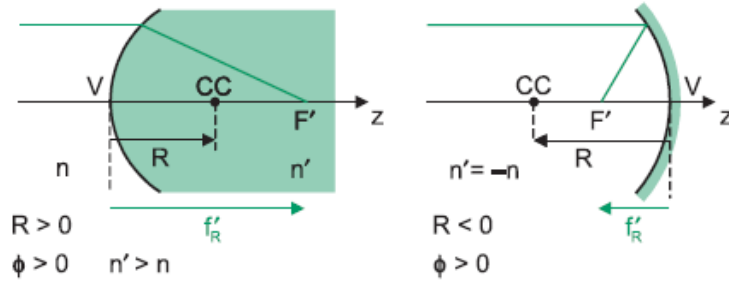
$$\emptyset = (n' - n) * C = \frac{n' - n}{R} \quad (2.11)$$

$$C = \frac{1}{R} \quad (2.12)$$

$$f = \frac{1}{\emptyset} \quad (2.13)$$

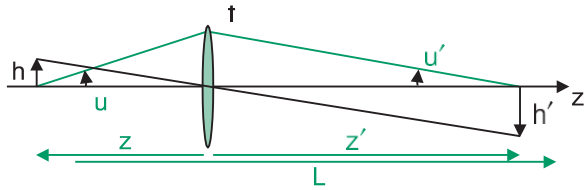
Hava ortamında iki ayrı ince mercek hesaplanması denklem 2.14’te gösterilmektedir. t iki mercek arasındaki mesafeyi ifade etmektedir (Greivenkamp, 2004).

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \phi_1 * \phi_2 * t \quad (2.14)$$



Şekil 2.2. Kırıcı ve yansıtıcı yüzeylerin kırınım hareketi (Greivenkamp, 2004)

Şekil 2.3'te ince kenarlı bir mercek ışık kırınımı gösterilmektedir. Bu idealize edilmiş mercek grubunun optik gücü vardır, ancak kalınlığı bulunmamaktadır. Aynı indekse (genellikle hava) sahip iki alanı ayıran tek bir kırılma yüzeyi olarak düşünülür (Fischer et al., 2000; Greivenkamp, 2004). Denklem 2.15 görüntünün odak uzunluğu ile ilişkisini göstermektedir ve z objenin uzunluğunu, z' görüntünün uzunluğunu ifade etmektedir. Denklem 2.16 ve 2.17'de büyütme oranı ifade edilmektedir. m ise büyütmeyi göstermektedir. Denklem 2.18 büyütme oranının görüntü ve objenin büyüklüğe oranı olan h ve h' ile ifade edilmektedir (Greivenkamp, 2004). Denklem 2.19'da ise sistemin toplam boyu L ile ifade ederek hesaplanmasını göstermektedir (Greivenkamp, 2004).



Şekil 2.3. İnce mercekte ışın kırınımı (Greivenkamp, 2004)

$$\frac{1}{z'} = \frac{1}{z} + \frac{1}{f} \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{m} = 1 + \frac{z}{f} \quad (2.16)$$

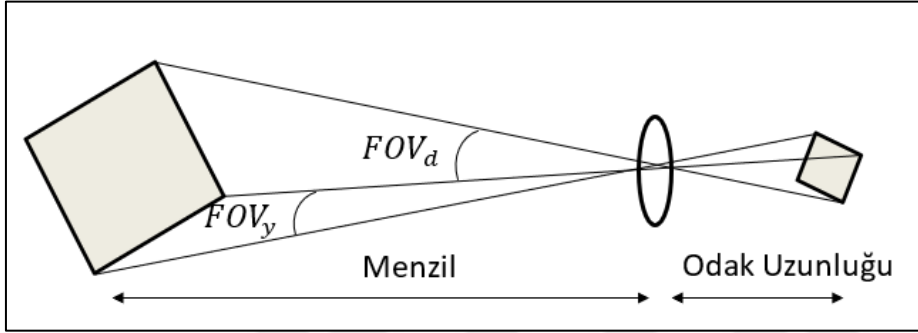
$$m = 1 - \frac{z'}{f} \quad (2.17)$$

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{z'}{z} = \frac{u}{u'} \quad (2.18)$$

$$L = z' - z = \frac{(1 - m)^2}{m} f_E \quad (2.19)$$

2.3.2. Görüş açısı

Bir optik sistemin görüş alanı (Field of View(FOV)), hedefin belirli bir mesafedeki maksimum açısal boyutu olarak ifade edilmektedir (Walker, 2008).



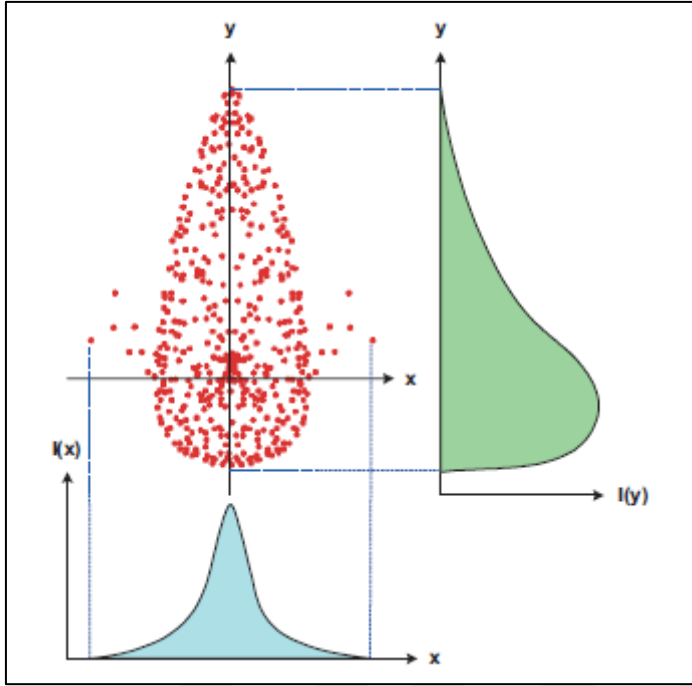
Şekil 2.4. Görüş alanının gösterimi

2.3.3. F/#

F/# sonsuzdaki bir nesne için görüntü-uzay ışık konisini tanımlar ve F/# sistemin kalitesini belirlemede önemli bir parametredir (Fischer et al., 2000). F/#, optiğin odak uzunluğunun optik açıklığa oranı ile ifade edilmektedir (Green et al., 2007). Düşük F/#'a sahip olan sistemler daha fazla ışık toplayacağı için daha aydınlık bir görüntü sağlamaktadır fakat F/#'ın azalmasıyla birlikte optik sisteme giren ışık miktarının artması sonucunda optik sapmalar artmaktadır (Gross et al., 2007).

2.3.4. Nokta diyagramı

Tek bir nesne noktasından gelen ve göz bebeği alanını dolduran çok sayıda ışın bir optik sistem aracılığıyla izlenirse, x ve y bileşenlerine sahip her ışın için görüntü düzleminde enine bir sapma elde edilir (Mouroulis et al., 1997). Şekil 2.5'de görüntü düzlemi ile tüm bu kesişme noktaları bir nokta diyagramında gösterilmektedir ve geometrik yaklaşımda görüntü noktasının geometrik uzantısının bir izlenimi elde edilir (Gross et al., 2007).



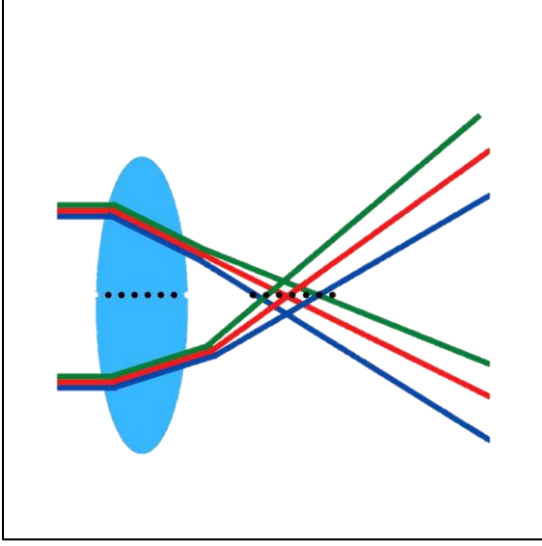
Şekil 2.5. Nokta Diyagramı dağılımı (Gross et al., 2007)

2.3.5. Optik sapmalar

Elektro optik sisteme ulaşan ışınların odaklanarak görüntü düzlemine ışınları mükemmel bir şekilde düşürmek merceğin görevidir. Işınların mercekten geçerken kırılması ve odaklanması sırasında görüntüde hatalar olacaktır (Walker, 2008). Odak noktasında oluşması beklenen bir nokta iken, optik sapmalardan dolayı hatalar oluşması beklenmektedir (Walker, 2008). Optik tasarımcının işi, oluşacak bu hataları minimize ederek görüntü kalitesini arttırmaktır. Merceğin mükemmel bir görüntü oluşturma yeteneğindeki bu hatalara optik sapmalar denir (Walker, 2008). Bir mercek sistemi tasarlanırken veya değerlendirilirken göz önünde bulundurulması gereken yedi ana sapma vardır. Optik tasarımın amacı, bu yedi sapmanın temel özelliklerini anlayarak, bir merceğin veya optik sistemin görüntü kalitesini belirlemektir (Walker, 2008).

Renk Sapmaları

Odak uzunluğu dalga boyuna bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Uzun dalga boyları daha düşük bir kırılma indisine sahipken, daha kısa dalga boyları Şekil 2.6'da görüldüğü gibi biraz daha yüksek kırılma indeksine sahiptir (Walker, 2008).

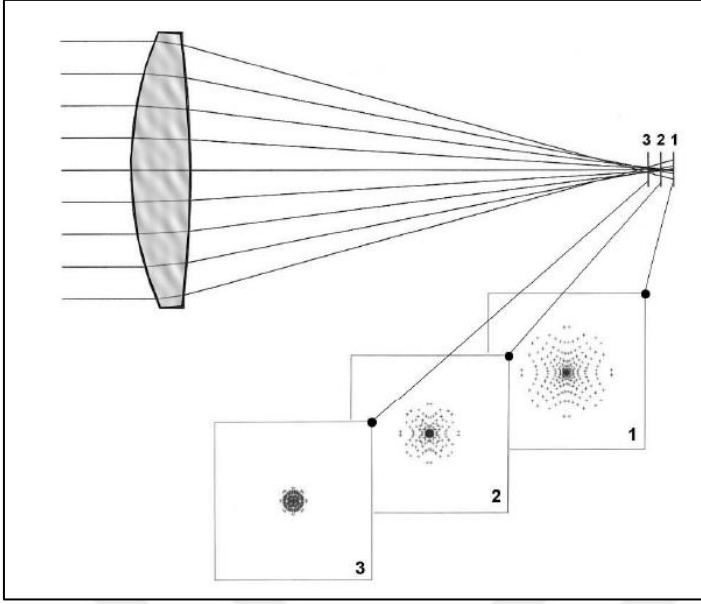


Şekil 2.6. Renk sapmaları görseli (Walker, 2008)

Merceğin kırılma özelliği Abbe numarası (V) ile tanımlanır. Abbe numarasının yükselmesi ile dalga boyuna bağlı ışınların mercekten geçerken kırınımı azalır ve daha az renk sapması gözlemlenir (Walker, 2008). Boyuna renk sapması, mercek gücüyle orantılıdır ve farklı kırılma ve abbe numaralarına sahip mercekler kullanılarak renk sapmasının azaltılması sağlanır (Walker, 2008).

Küresel Sapma

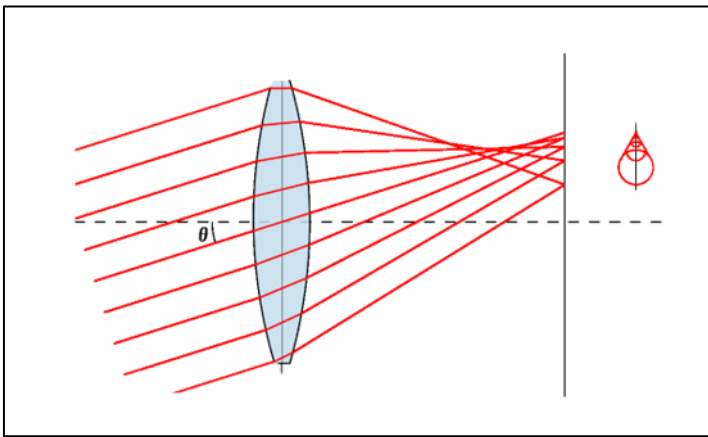
Küresel sapma, monokromatik bir ışık demetinin odak düzleminde tek bir noktaya odaklanamaması sonucunda ortaya çıkan bir hatadır (Walker, 2008). Mercekte küresel sapmanın varlığını gösteren Şekil 2.7'de görülebilir. Şekil 2.6'da üç ayrı odak konumunda nokta diyagramları olduğu görülmektedir. Odak noktası (1), eksen dışı odağı temsil eder. Mercek merkezinden daha uzaktaki bölgelerden geçen ışınlar, küresel sapma nedeniyle daha uzak noktalara odaklanarak daha büyük hatalara neden olur (Walker, 2008).



Şekil 2.7. Küresel sapmanın oluşumu (Walker, 2008)

Koma

Koma, görüntü düzleminde odaklanan ışık demetlerini etkileyen bir sapmadır (Walker, 2008). Koma ışık demetinin mercekten belirli bir açıyla geçtikten sonra dairesel bir nokta yerine, eksen dışı görüntü noktaları için üçgen şeklinde bir nokta Şekil 2.8'deki gibi oluşur(Walker, 2008).



Şekil 2.8. Koma görseli (Walker, 2008)

Alan Eğriliği

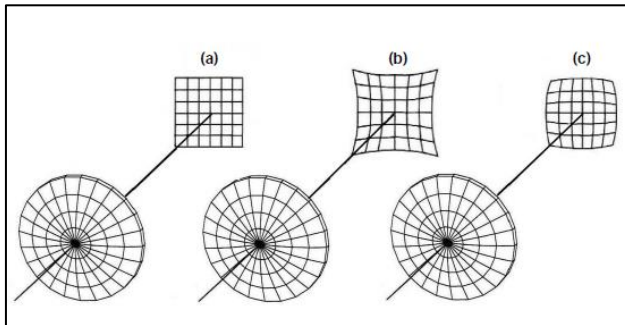
Elektro optik sistemlerde merceklerden geçen ışınlar düz bir ortama odaklanmaktadır. Tasarımın sonucunda ise sistemin doğal eğilimi görüntü düzleminin kavisli bir yapıya dönmek istemesiyle sonuçlanır (Walker, 2008). Bu oluşan eğriliğe alan eğriliği denir (Walker, 2008).. Oluşan görüntüde diğer tüm sapmalar giderildiğinde arındırıldığında, alan eğriliğinden kaynaklı bu kavisli yüzeyde mükemmel bir görüntü oluşur (Walker, 2008).

Astigmat

Mercek açıklığında teğetsel ve sagital olarak yönlendirilen eksen dışı ışınların, belirgin şekilde ayrı iki kavisli yüzeye odaklanması durumu astigmatizmdir (Walker, 2008).

Çarpıtma

Çarpıtma, odak kabiliyeti ve çözünürlüğü etkilemediği için benzersiz bir sapmadır (Walker, 2008). Çarpıtma ile ortaya çıkan görüntü olması beklenen görüntünün şeklinde deformasyona sebep olur (Walker, 2008). Şekil 2.9'da üç görüntü gösterilmektedir. İlki (a) tamamen çarpıtmasızdır ve sonuç olarak gerçek ile görüntü arasında bir fark bulunmamaktadır ve “dama tahtası” olarak adlandırılır (Walker, 2008). Görüntü pozitif çarpıtmadan etkilenirse görüntü düzleminde eksen dışına doğru ışınlar hareket edecektir ve Şekil 2.9 (b)'de görülen iğne yastığı etkisi görülecektir. Öte yandan, eğer mercek negatif çarpıtmadan etkileniyorsa, görüntü düzleminde eksen içine doğru ışınlar hareket edecektir ve Şekil 2.9(c)'de görülen fıçı şekli ile sonuçlanır (Walker, 2008).



Şekil 2.9. Çarpıtma görseli (Walker, 2008)

Eksenel Renk

Eksenel renk, ışın demetlerinin mercekten geçerek, dalga boyuna bağlı olarak optik eksen boyunca farklı noktalara odaklanmasıdır (Walker, 2008).

Yanal Renk

İkinci renk sapması yanal renktir (Walker, 2008). Görüntünün boyutu görüntü düzlemi ile belirlenir (Walker, 2008). Yanal renk optik sapması olduğu zaman mercek sisteminde ışının kırılması dalga boyunun bir fonksiyonu olarak değişir ve her dalga boyu görüntü düzleminde farklı bir yükseklikte odaklanmasına neden olur (Walker, 2008) Bu eksen dışı görüntü noktaları görüntüde kromatik bir bulanıklık oluşturur (Walker, 2008).

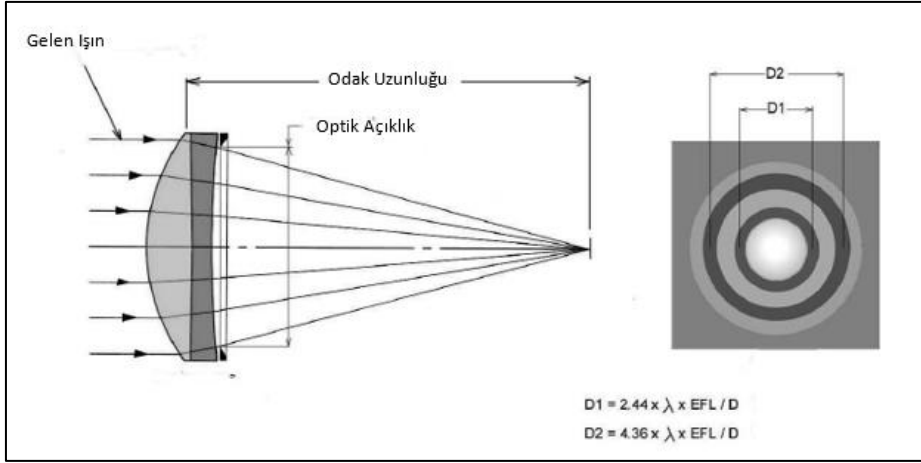
2.3.6. Airy Disk

Optik tasarım performans metriğinin en önemli parametrelerinden bir tanesi airy disk'tir. Airy disk oluşturulan görüntünün optik sapmasız bir şekilde noktasal olarak odaklandığında oluşan enerjinin çapını belirlememizi sağlar (Walker, 2008). Şekil 2.10'da gösterilen kırınım halkaları ile çevrili parlak bir merkezi çekirdeğe sahip bir Airy disk üretilir (Walker, 2008). Airy diskin çapı denklem 2.20'de gösterilmektedir.

$$D = 2,44\lambda F/\# \quad (2.20)$$

Rayleigh çözünürlük kriteri, birinin tepe noktası diğerinin ilk sıfırına denk geliyorsa iki nokta nesnesinin çözülebileceğini belirtir ve denklem 2.21'deki gibi hesaplanır (Walker, 2008).

$$D = 1,22\lambda F/\# \quad (2.21)$$



Şekil 2.10. Airy disk görseli (Walker, 2008)

2.3.7. İnce mercek

İnce mercek, kalınlığı sıfır olarak kabul edilen ve bu nedenle ince mercek hesaplamaları sırasında optik sapmaları ihmal edilebilecek teorik bir mercektir. İnce mercek, optik sistem tasarımı ve analizinin ön aşamalarında gerçek bir merceği simüle etmek için kullanılan bir tasarım aracıdır (Walker, 2008). Konsept tasarım yapılırken bir mercek veya optik sistem tasarımının birçok temel özelliğini hızla oluşturmasını sağlar. Kalınlığın sıfır olduğu bir mercek formu varsayılarak, nesne ve görüntü ilişkilerini hesaplamak için kullanılan formüller büyük ölçüde basitleştirilir. İnce mercek yaklaşımında mercek kalınlığı sıfır kabul edildiği için optik bozunum hesaplara dahil edilemez ve görüntü kalitesini belirlemek mümkün olamaz (Walker, 2008). Sonuç olarak, ince mercek teorisi ve formüllerinin uygulanmasıyla bir optik sistem hakkında birçok değerli gerçeği tespit etmek mümkün olsa da, nihai görüntünün kalitesi, en iyi ihtimalle ancak tahmin edilebilir (Walker, 2008).

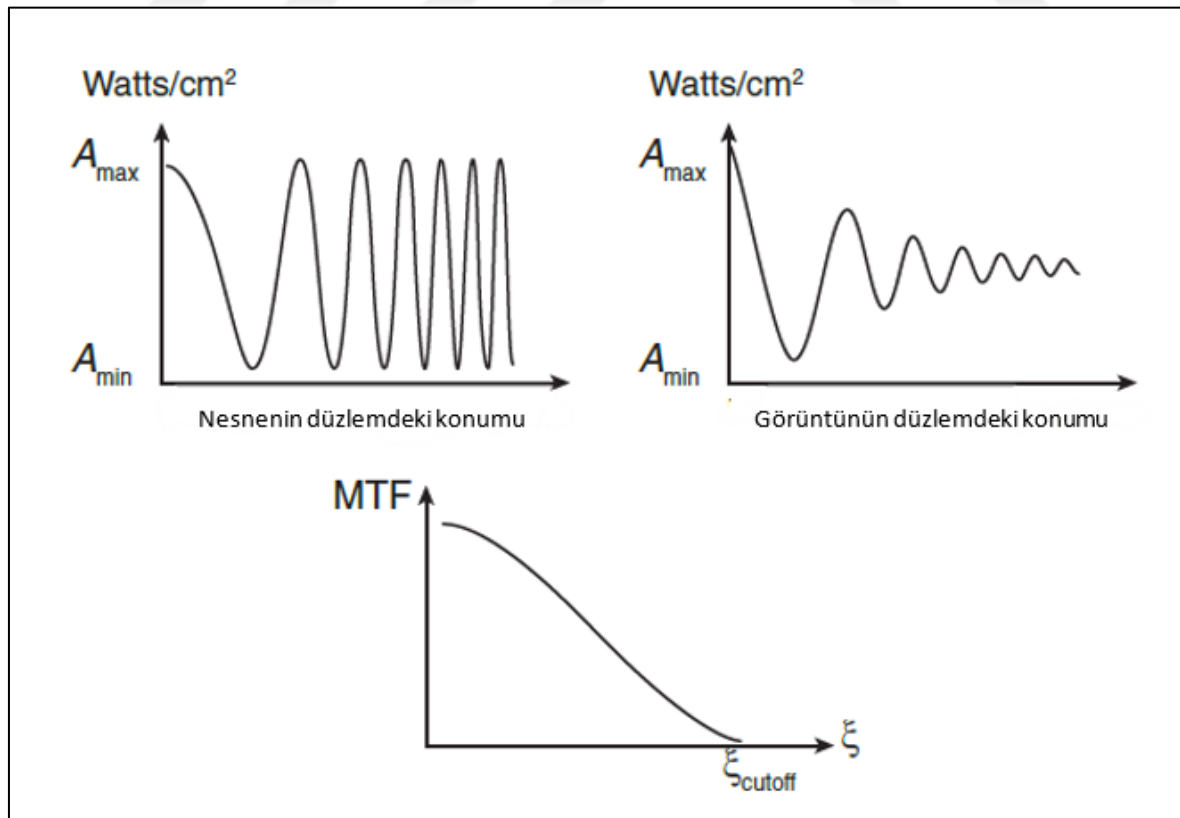
2.3.8. Modülasyon transfer fonksiyonu

Uzamsal frekans, bir nesnenin veya görüntünün Fourier analizinde temel bir işlev olarak kullanılan sinüzoidal bir dalga cephesinin karşılıklı tepe-sırt mesafesi olarak tanımlanır (Driggers et al., 2012). Görüntü düzleminde devir/mm olarak ve nesne uzayında açısal uzaysal frekansta devir/miliradyan (cycle/miliradyan) belirtilir. Sonsuzda bulunan bir nesne için, bu iki temsil, görüntü oluşturan optik sistemin odak uzaklığı ile ilişkilidir (Holst, 2008).

Transfer fonksiyonu $H(\xi, \eta)$ uzaysal frekansta bir birim değerine sahip olacak şekilde normalize edilir (Holst, 2008). Bu normalleştirme iki boyutlu oto korelasyonu ile orantılıdır ve oto korelasyon, başlangıç noktasında gerekli maksimum değerdir (Holst, 2008). Normalleştirilmiş haliyle, transfer fonksiyonu $H(\xi, \eta)$ optik transfer fonksiyonu (Optical Transfer Function(OTF)) olarak adlandırılır ve optik bir sistemin teorik olarak değerlendirilmesinde ve optimizasyonunda kilit bir rol oynar (Genberg et al., 2011; Vollmerhausen & Driggers, 2000).

$$OTF(\xi, \eta) = H(\xi, \eta) = |H(\xi, \eta)| * e^{j\theta H(\xi, \eta)} \quad (2.22)$$

OTF'nin mutlak değeri veya büyüklüğü modülasyon transfer fonksiyonudur (MTF), OTF'nin faz kısmına ise faz transfer fonksiyonu (Phase Transfer Function (PTF)) denir (Holst, 2008). Sistemin MTF ve PTF'si, sistemden geçen görüntüyü değiştirir (Hadar et al., 1997). MTF, yüksek uzaysal frekanslarda küçük olduğundan, doğrusal faz kayması etkisi azalır ve görüntüleme sisteminin farklı uzaysal frekansların sinüzoidlerine verdiği tepki Şekil 2.11'de gösterilmektedir (Holst, 2008).



Şekil 2.11. MTF grafiği (Holst, 2008)

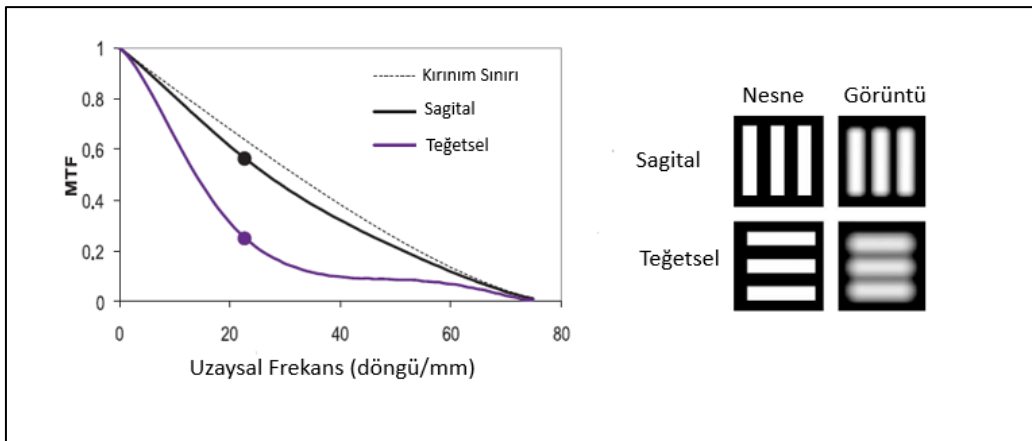
Oluşan görüntünün kesme(cutoff) frekansı denklem 2.23'te gösterilmektedir.

$$\xi_{\text{kesme}} = 1/(\lambda F/\#) \quad (2.23)$$

$$\text{MTF}(\xi) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1}(\xi/\xi_{\text{cutoff}}) - \xi/\xi_{\text{cutoff}} \left[1 - (\xi/\xi_{\text{cutoff}})^2 \right]^{1/2} \right\} & \text{for } \xi \leq \xi_{\text{cutoff}} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (2.24)$$

MTF tüm uzaysal frekanslar için geçerlidir, tipik olarak kesme frekanslarına kadar çizilir. Örtüşme etkilerini önlemek için dedektör dizisinin uzaysal Nyquist frekansı (ξ_{Ny}) dikkate alınmalıdır. Genel olarak $\xi_{\text{Ny}} \ll \xi_{\text{cutoff}}$ olduğundan, dedektör MTF genellikle elektro-optik sistemin sınırlayıcı faktörü olmasına rağmen, genel sistem MTF'sini üreten optik ve elektronik tepkilerin birleşimidir (Bentley, 2012).

Eksiksiz bir MTF grafiği, birkaç farklı alan noktası için performans eğrileri ve kırınım sınırlı bir referans çizgisi içerir. Eksen dışı alan noktaları için, MTF nesnedeki "çizgilerin" oryantasyonuna bağlıdır ve bu nedenle hem jant teli benzeri radyal modülasyon (sagital S) hem de tekerlek benzeri azimut modülasyonu (teğetsel T) için çizilir; burada modülasyon yön, özellik yönüne diktir. Ana düzlemde MTF tipik olarak tek bir eğridir ancak merkezi olmayan veya eğik elemanlara sahip mercekler sagital ve teğetsel bileşenlere ayrılması Şekil 2.12'de gösterilmektedir (Bentley, 2012).



Şekil 2.12. Sagital ve Teğetsel MTF (Bentley, 2012)

3. KATADIOPTRİK PERFORMANS VE MERCEK TASARIMI

Bu tezin amacı bir insanın katadioptrik çoklu dalga boyu ile çalışan bir elektro optik sistem ile tespit, tanıma ve tanımlanmasını sağlamaktır. Amaca uygun tasarımın yapılması için, optik açıklık, $F/\#$, odak uzunluğu gibi temel optik parametreleri hesaplanmıştır. Bu tezde yapılan tasarımda hesaplanan parametrelere göre performans analizleri yapılmıştır. Performans analizinde NV-IPM programı kullanılmıştır. Performansı belirlenen sistemde ilk olarak optik tasarım da merceklerin konumu, görüntü düzlemi belirlenmesi adına ince mercek tasarım tamamlanmıştır. Konumları belli olan merceklerin ardından da optik bozulmaları önlemek için merceklere kalınlık ve malzeme bilgileri girilerek tasarım Zemax OpticStudio kullanılarak tamamlanmıştır.

Hava araçlarına takılan görev sistemlerinde parametreler göreve göre değişiklik gösterebilmektedir. Seçilen dalga boyuna ve odak uzunluğuna bağlı olarak değişen sistem boyutu ve ağırlığı göreve göre değişen önemli parametrelerdendir. “Catadioptric Zoom Lens Assemblies” patentinde tek dalga boyu kullanılarak katadioptrik bir sistem tasarlanmıştır (Sinclair & Hudyma, 1999). “Catadioptric Zoom Lens Assemblies” patentinden farklı olarak bu tezde, düşük ışıktaki görev yapılmasını sağlamak için NIR dalga boyu ve yer ve hedef arasında sıcaklık farkın anlaşılabilmesi adına MWIR dalga boyu kullanılarak gece görev yapılmasını kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Görünür dalga boyunda ise gündüz uçuşlarında veya tahribat analizinde kullanıcının görevi yerine getirmesine yardımcı olması hedeflenmiştir. Bu nedenle bu tezde birden fazla dalga boyu kullanılarak daha kompakt, daha hafif, daha çok göreve hizmet eden, 6 km mesafeden bir insanın tanımlanmasını yapabilen optik sistemin performans analizi ve optik tasarımı yapılmıştır.

3.1. Gece Görüşü Entegre Performans Modeli

Gece Görüşü Entegre Performans Modeli (NV-IPM), C5ISR Merkezi'nin Gece Görüşü ve Elektronik Sensörler Müdürlüğü tarafından, görüntüleme sistemi geliştirme için esnek ve genişletilebilir bir mühendislik tasarım ortamı sağlamak üzere oluşturulmuş bir yazılım paketidir.

3.2. Zemax OpticStudio

Zemax OpticStudio, kamera mercekleri gibi görüntüleme sistemlerinin yanı sıra aydınlatma sistemlerini tasarlamak ve analiz etmek için kullanılan bir optik tasarım programıdır. Basit mercekler, küresel olmayan mercekler ve aynalar gibi optik elemanların etkisini modellenenbilmekte ve nokta diyagramları ve ışın-fan çizimleri gibi standart analiz diyagramları üretebilmektedir. OpticStudio, optik kaplamaların bileşenlerin yüzeyleri üzerindeki etkisini de modellenenbilmektedir.

3.3. Temel Tasarım Parametreleri

Optik sistemin dalga boyuna bağlı olarak dedektör çözünürlükleri, piksel adımları değişmektedir. Çizelge 3.1’de verilen parametreler görünür dalga boyuna ($0,4\ \mu\text{m} - 0,7\ \mu\text{m}$), NIR dalga boyuna ($0,7\ \mu\text{m} - 0,9\ \mu\text{m}$) ve MWIR ($3\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$) dalga boyunda kullanılacak olan dedektör parametrelerini içermektedir.

Çizelge 3.1. Dedektör parametreleri

	0.4 μm - 0.7 μm Dedektör Parametreleri	0.7 μm - 0.9 μm Dedektör Parametreleri	3 μm - 5 μm Dedektör Parametreleri
Dedektör Dikey (μm)	1920	640	640
Dedektör Yatay (μm)	1080	512	512
Piksel Adımı (μm)	3,45	15	15
Dedektör Çapraz Uzunluk (mm)	7,6	9,6	9,6

Çizelge 3.2’de görünür dalga boyu için optik parametreler verilmiştir. Dar açılı konfigürasyon için odak uzaklığı 870 mm, geniş açılı konfigürasyon için ise 482 mm olarak hesaplanmıştır. Optik sistemin içine kaçak ışın girmesini önlemek amacıyla optik açıklığının geniş açılı ve dar açılı konfigürasyon için 200 mm’dir.

Çizelge 3.2. Görünür dalga boyu temel tasarım parametreleri

	0,4 μm – 0,7 μm Dar görüş açısı parametreleri	0,4 μm – 0,7 μm Geniş görüş açısı parametreleri
FOV Dikey ($^\circ$)	0,43	0,78
FOV Yatay ($^\circ$)	0,24	0,74
FOV Çapraz ($^\circ$)	0,5	0,9
Odak Uzunluğu (mm)	870	482
Optik Açıklık (mm)	200	200
F/#	4,35	2,41

NIR dalga boyunda sistem tek görüş açısına sahip olarak tasarlanmıştır ve bu tasarımın sonucunda hesaplanan değerler Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. NIR dalga boyu içinde kaçak ışın olmaması için ortak açıklığın tamamı kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. NIR temel tasarım parametreleri

	0,7 μm - 0,9 μm Görüş açısı parametreleri
FOV Dikey ($^\circ$)	0,62
FOV Yatay ($^\circ$)	0,5
FOV Çapraz ($^\circ$)	0,8
Odak Uzunluğu (mm)	880
Optik Açıklık (mm)	200
F/#	4,4

Soğutmalı dedektör yapısına sahip olan MWIR dalga boyundaki sistemin hesaplanan FOV, odak uzunluğu, giriş açıklığının çapı ve F/# değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Soğutmalı dedektörlerde, dedektörün F/# değeri sabit olduğu için, geniş açılı konfigürasyon ve dar açılı konfigürasyonda aynı optik açıklık kullanılamamıştır. Buna bağlı olarak hesaplanan değerler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. MWIR temel tasarım parametreleri

	3 μm – 5 μm Dar Görüş açısı parametreleri	3 μm – 5 μm Geniş Görüş açısı parametreleri
FOV Dikey ($^\circ$)	0,5	0,62
FOV Yatay ($^\circ$)	0,4	0,5
FOV Çapraz ($^\circ$)	0,65	0,8
Odak Uzunluğu (mm)	1100	880
Optik Açıklık (mm)	200	160
F/#	5,5	5,5

Hesaplanan temel tasarım parametreleri ve dedektör parametreleri kullanılarak, NV-IPM programına girdiler yapılmıştır. Yapılan analizlerin çıktıları olan Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4'te verilen NIIRS, GSD, Performans değerleri hesaplanarak sistemin optik tasarımın yapılmadan önceki performans değerleri hesaplanması sağlanmıştır.



4. BULGULAR VE SONUÇLAR

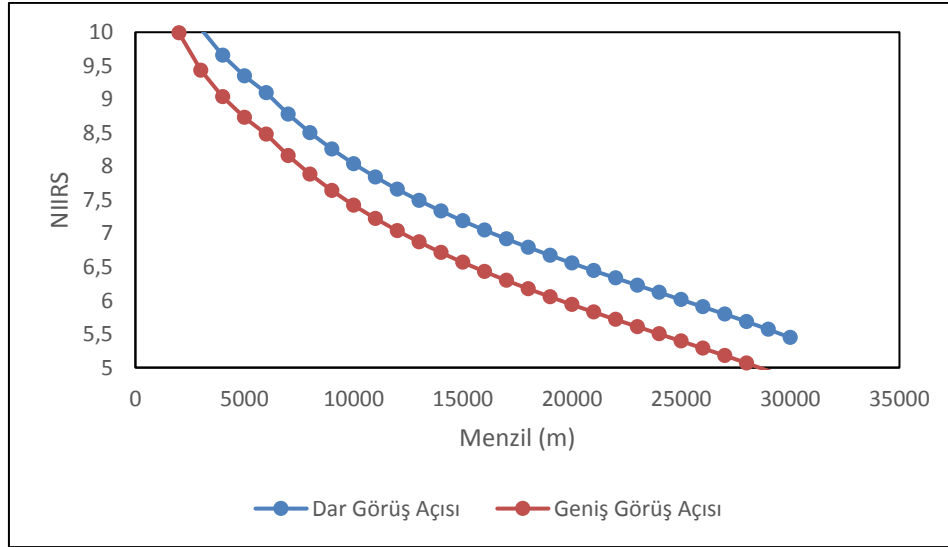
Bu tezde, 1,8 m boyunda, 0,5 m genişliğindeki bir insanın 6 km mesafeden tanımlanması için yapılan analizler ve hesaplamaların sonuçları görünür dalga boyunda, NIR dalga boyunda ve MWIR dalga boyunda istenilen hedefi sağlamıştır. Buna bağlı yapılan tasarımın total uzunluğu 230 mm, ağırlığı ise 600 gram olmuştur.

Dalga boyu seçimleri, sistemin her hava koşulunda, her ortamda çalışabilmesi adına seçilen dalga boylarından oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan tasarımın başlıca görevi, üç dalga boyunun da ortak bir optik açıklıktan ışınların girmesi sağlamaktır. Buna bağlı yapılan optik tasarım ile optik bozunumların en az olması sağlanmıştır.

Yapılan analizlerde, her dalga boyu için ayrı ayrı sistem performansının sonuçları olan NIIRS, GSD, sistem MTF'i ve görev performansının menzile karşı olasılığı hesaplanmıştır. Optik tasarımın çıktıları olarak ise, merceklerin pozisyonları, nokta diyagramı, çarpıtma ve MTF sonuçları sunulmuştur.

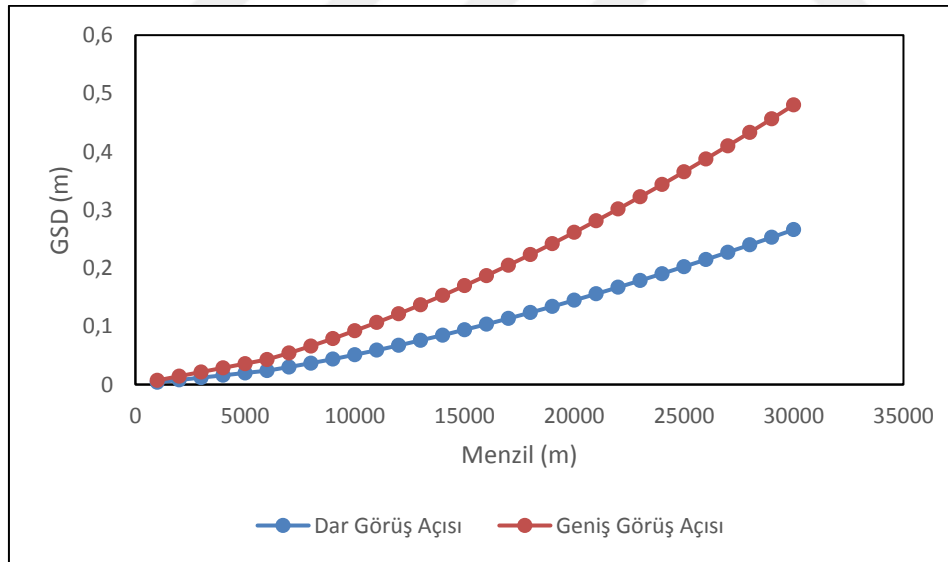
4.1. Görünür Dalga Boyu

Görünür dalga boyu için yapılan analizlerde kullanılan parametreler Çizelge 4.1'de belirtilmiştir. Çizelge 2.1'e göre bir kişiyi tanımlamak için gereken NIIRS değeri 7 ve üzeri olmalıdır. Şekil 4.1'de dar görüş açısına sahip sistemde 6 km mesafede NIIRS değeri 9, geniş görüş açısına sahip sistemde ise 8,4 olarak hesaplanmıştır.



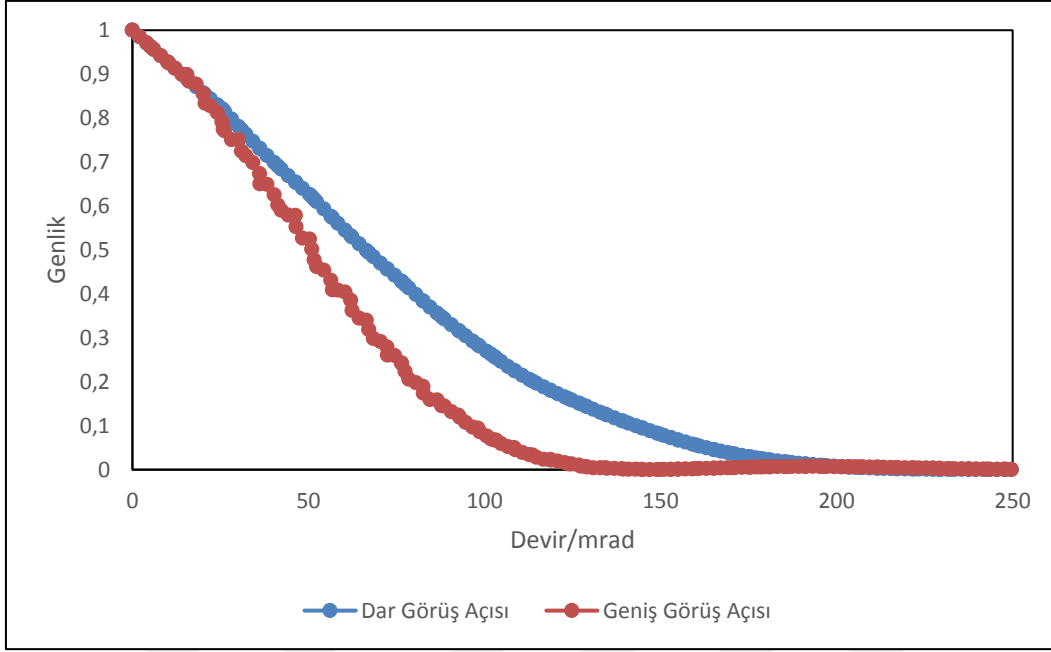
Şekil 4.1. Görünür Dalga Boyu NIIRS-menzil grafiği

Şekil 4.2’de verilen GSD değerleri mesafeye bağlı olarak çözebildiği mesafe- artmaktadır. Bu tez çalışmasında yapılan tasarım sonucu olarak, dar görüş açısı için 6 km mesafede 0,023 m çözebilirken geniş görüş açısında ise 0,054 m çözebilmektedir.



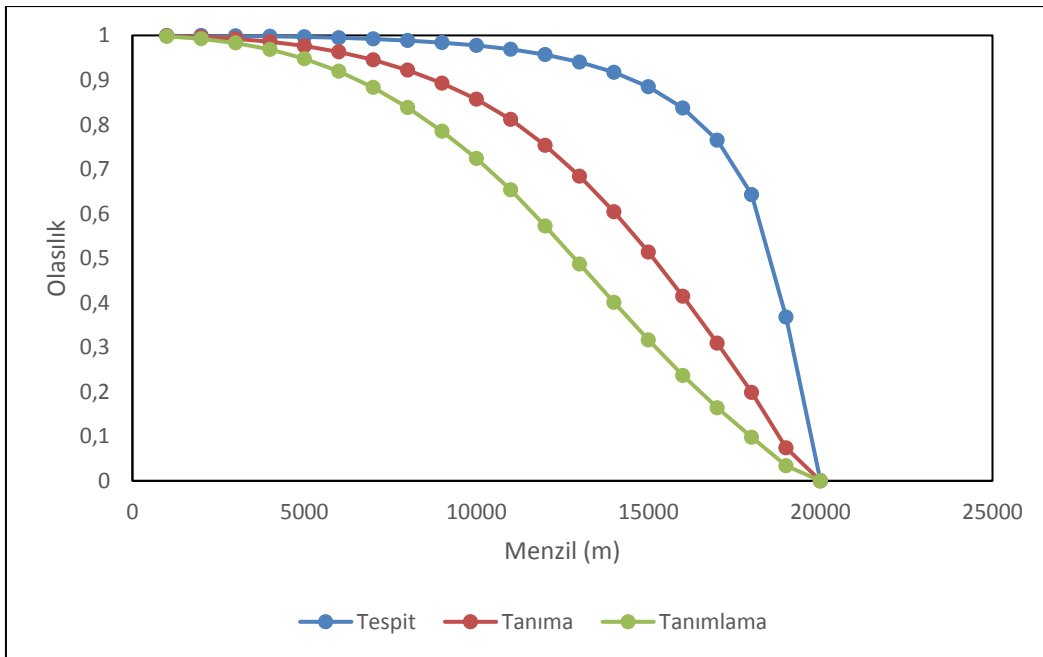
Şekil 4.2. Görünür Dalga Boyu GSD-Menzil grafiği

Tasarım sonuçlarını görmeden sistemin MTF değeri hesaplanarak menzil isterinin karşılanıp karşılanmadığına bakılması gerekmektedir. Şekil 4.3’te verilen MTF değeri optik tasarım olmadan, görünür dalga boyu için parametrik olarak hesaplanan teorik MTF değerlerini göstermektedir.



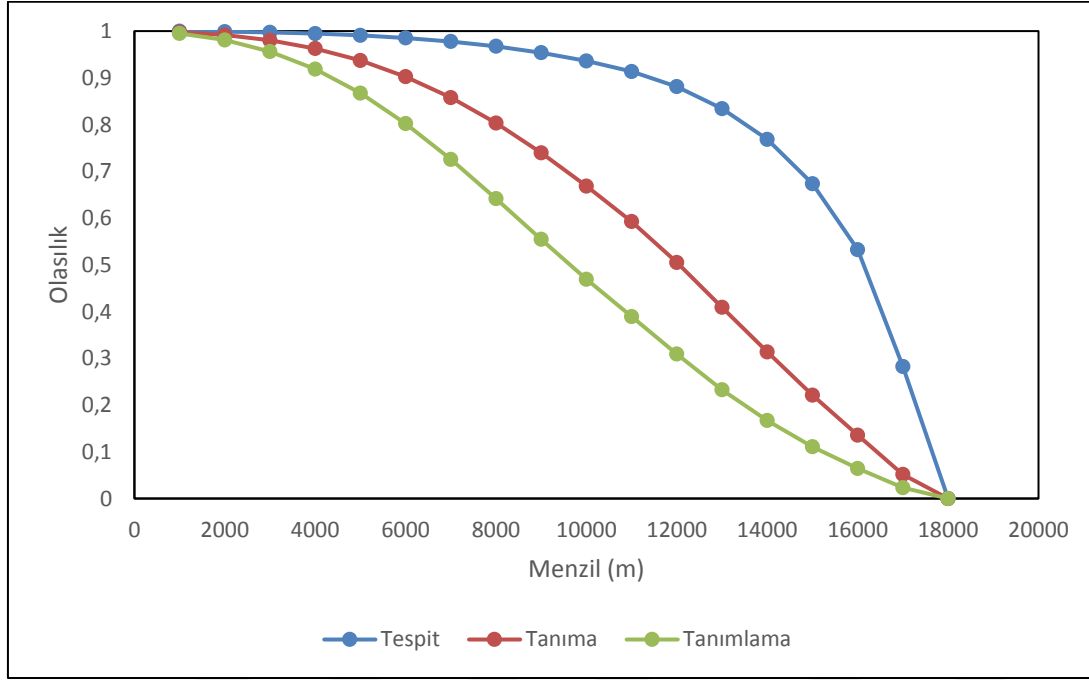
Şekil 4.3. Görünür Dalga Boyu Sistem MTF grafiği

Şekil 4.4'te verilen dar görüş açısı için görev performansının menzile karşı olasılığı grafiğinde 1,8m boyunda 0,6m enine sahip bir hedefin 6 km mesafeden tespit, tanıma ve tanımla sonuçlarını içermektedir. Bu tez çalışmasının performans çıktısı olarak, %50 olasılıkla hedefi 18 km'de tespit, 15 km'de tanıma ve 12,5 km'de tanımlayabilmektedir.



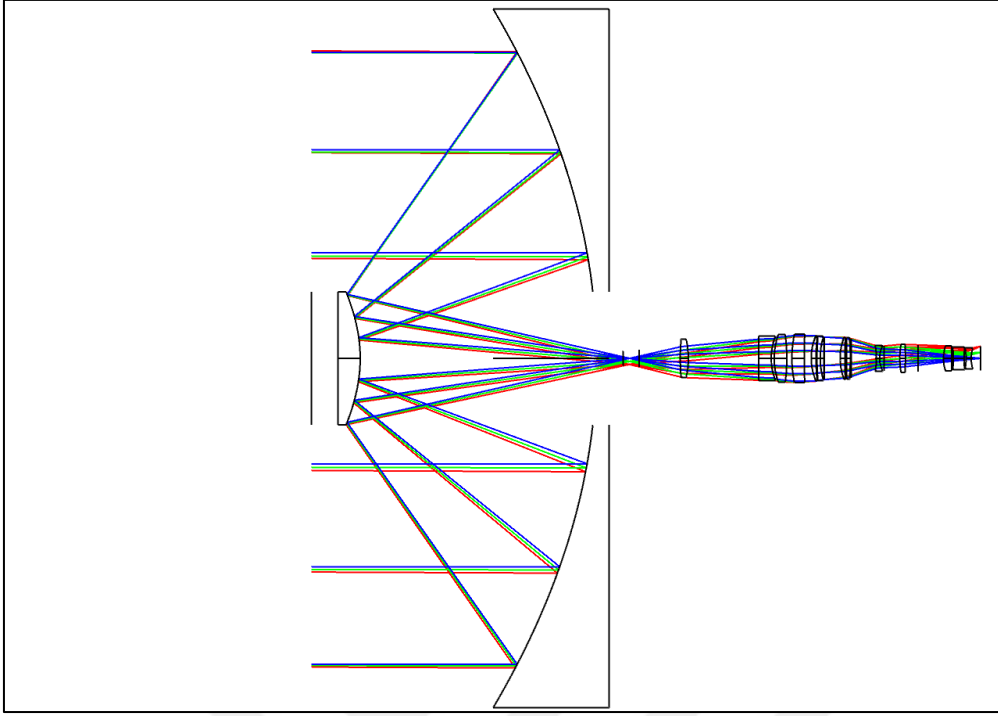
Şekil 4.4. Görünür dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (Dar görüş)

Geniş görüş açılı konfigürasyonunun görev performansının menzile karşı olasılığı Şekil 4.5'te verilen değerlere göre %50 olasılıkla hedefi 16 km'de tespit, 12 km'de tanıma ve 95 km'de tanımlayabilmektedir.



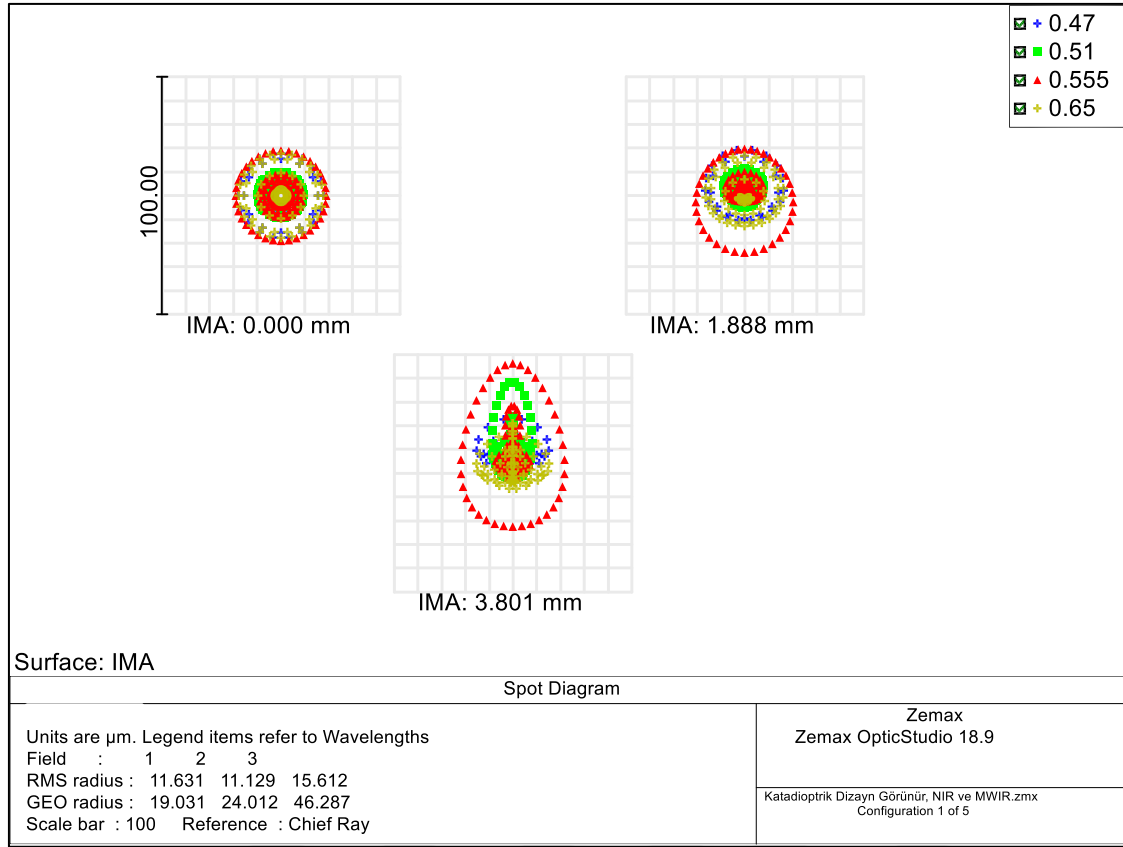
Şekil 4.5. Görünür dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (Geniş görüş)

6 km mesafeden bir insanın tanımlanması için yapılan optik tasarım sonucunda ortaya çıkan Şekil 4.6'da görünür dalga boyu dar görüş açısı konfigürasyonu için merceklerin pozisyonu gösterilmektedir.



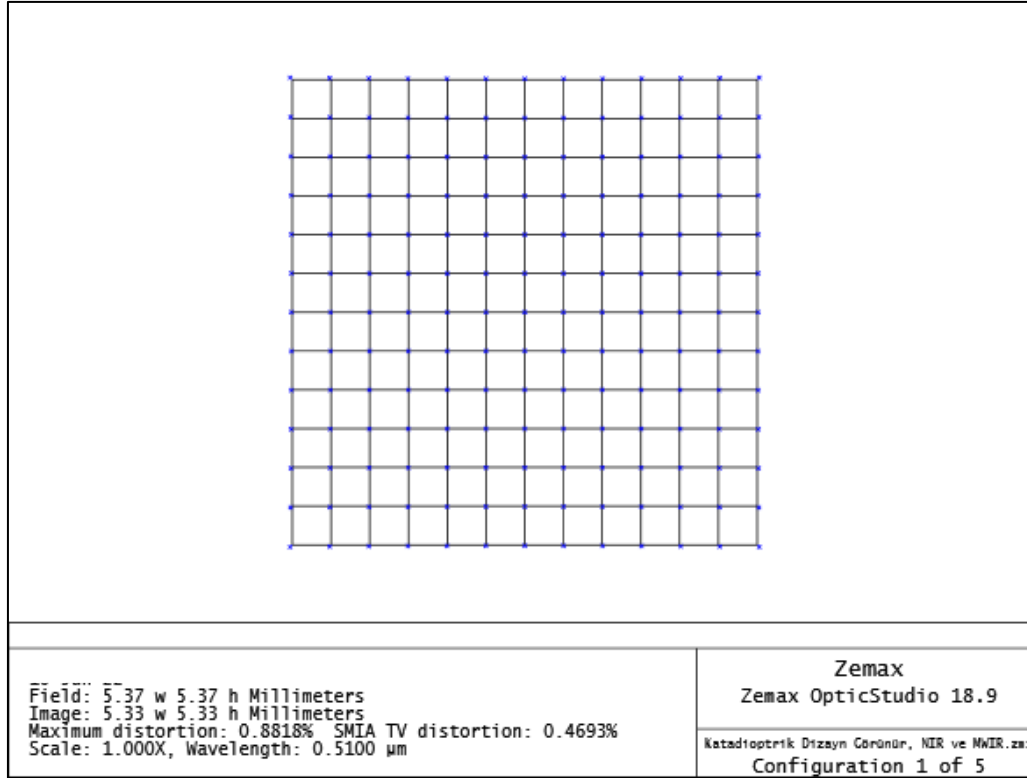
Şekil 4.6. Görünür dalga boyu mercek dizilimi dar görüş açısı

Görünür dalga boyunda sistem konfigürasyonunda optik tasarımın önemli bir çıktısı olan Şekil 4.7’de dar görüşe sahip sistemde merkez açıda sistemin nokta diyagramı $11,63 \mu\text{m}$ ölçülmektedir.



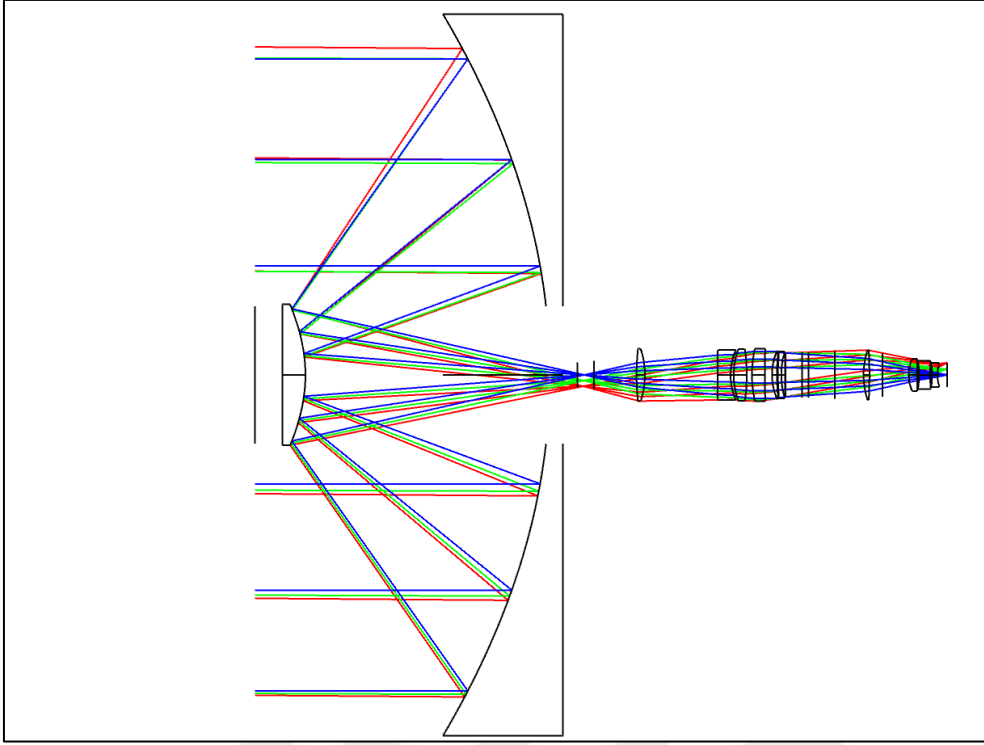
Şekil 4.7. Görünür dalga boyu dar görüş açısı nokta diyagramı

Dar görüş açısı için yapılan tasarımda Şekil 4.8’de görülen Çarpıtma yüzdesi grafiğinde ise dar görüş açısı için %0,88’dir.



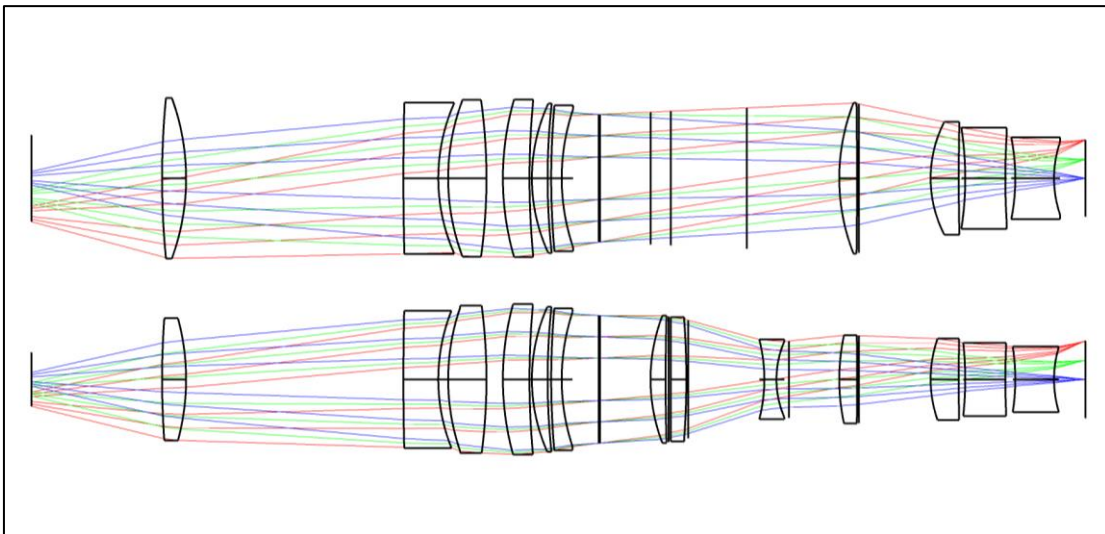
Şekil 4.8. Görünür dalga boyu dar görüş açısı çarpıtma diyagramı

Şekil 4.9’da ise görünür dalga boyunun geniş açılı mercek pozisyonları gösterilmektedir. Dar görüş açısı ve geniş görüş açısı için 200 mm optik açıklık kullanılarak istenmeyen ışınların optik sistemin içine girmemesi sağlanmıştır. Görünür dalga boyunda yapılan tasarımın üç adet merceğin yer değiştirmesi ile odak uzunluğu ve FOV değişmektedir.



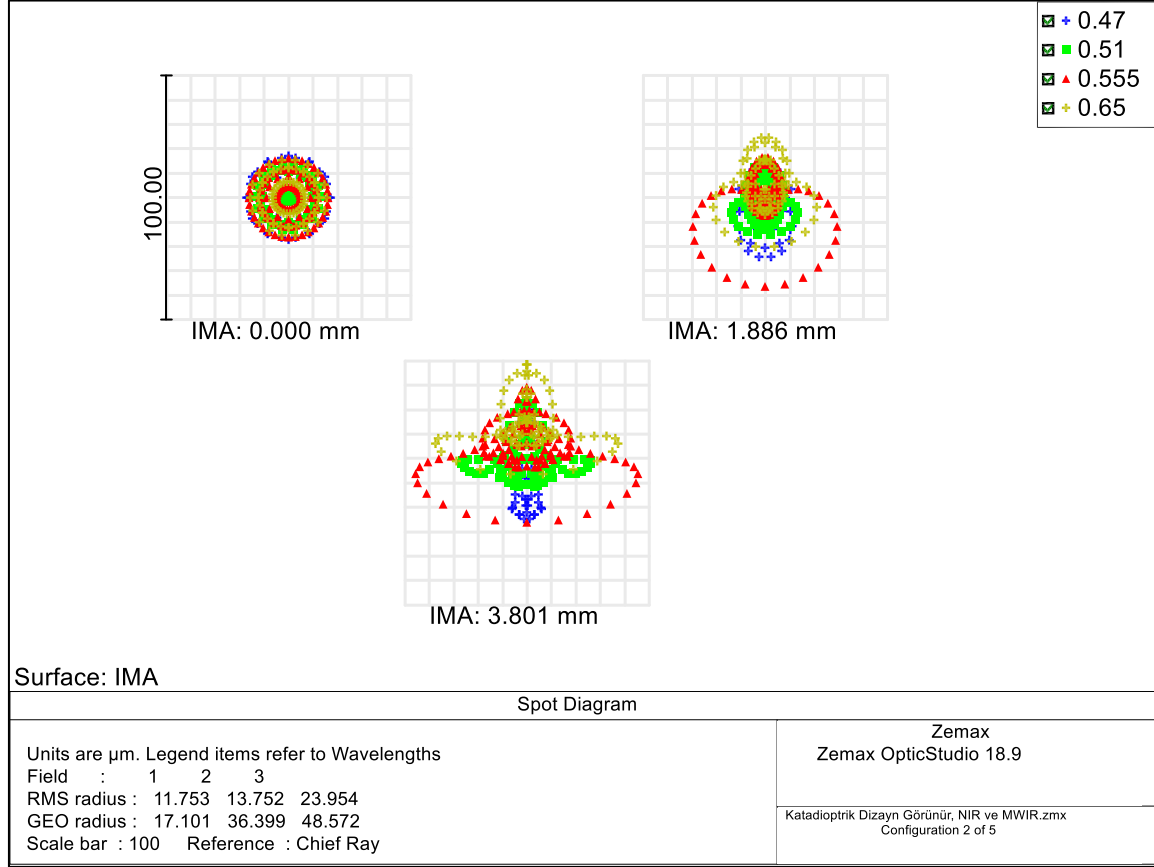
Şekil 4.9. Görünür dalga boyu mercek dizilimi geniş görüş açısı

Dar görüş açısı ile geniş görüş açısında açı ve odak uzunluğu değişimi Şekil 4.10'da görülen üç hareketli mercek yardımıyla yapılmıştır. Optik tasarımın çıktılarından olan nokta diyagramı, çarpıtma ve MTF değerleri arasında dar görüş açısı ile geniş görüş açısı arasında fark minimum olması hedeflenmektedir.



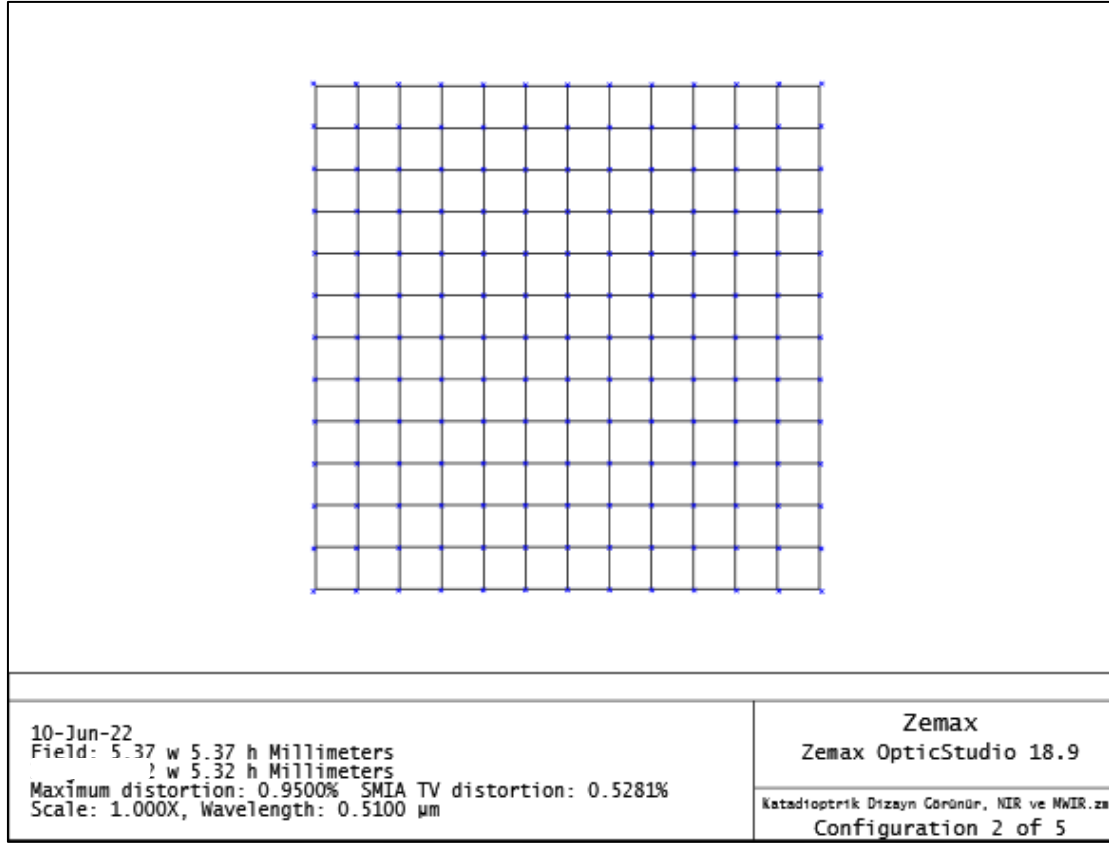
Şekil 4.10. Görünür dalga boyu mercek dizilimi dar görüş açısı ve geniş görüş açısı mercek pozisyonları

Geniş açılı görünür dalga boyuna sahip bu konfigürasyonun Şekil 4.11’de bulunan nokta diyagramı ise 11,75 μm ölçülmüştür.



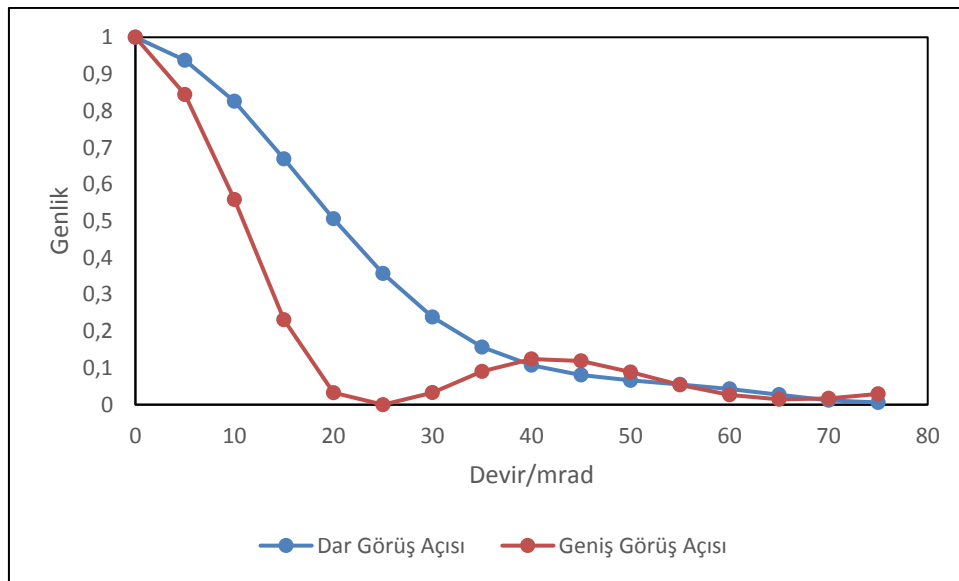
Şekil 4.11. Görünür dalga boyu geniş görüş açısı nokta diyagramı

Geniş görüş açısının Şekil 4.12’de gösterilen sonucunda ise çarpıtma yüzdesi ise %0,95 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.12. Görünür dalga boyu dar görüş açısı çarpıtma diyagramı

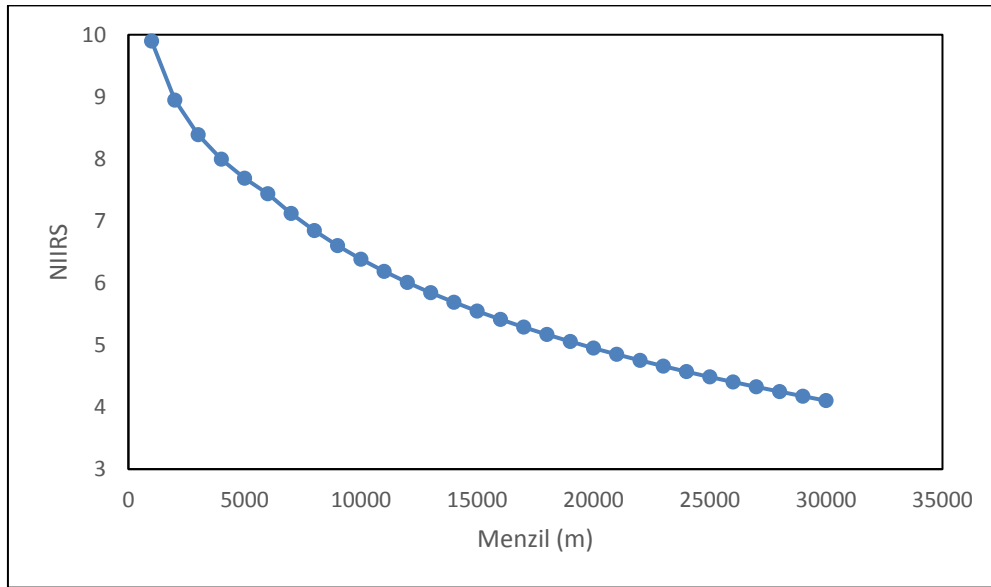
Optik bir tasarımın önemli çıktılarından biri MTF'dir. Şekil 4.13'te verilen MTF değeri dar görüş açısını ve geniş görüş açısının optik tasarım sonucunda çıkan sonucunu gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Görünür dalga boyu dar görüş açısı ve geniş görüş açısı MTF grafiği

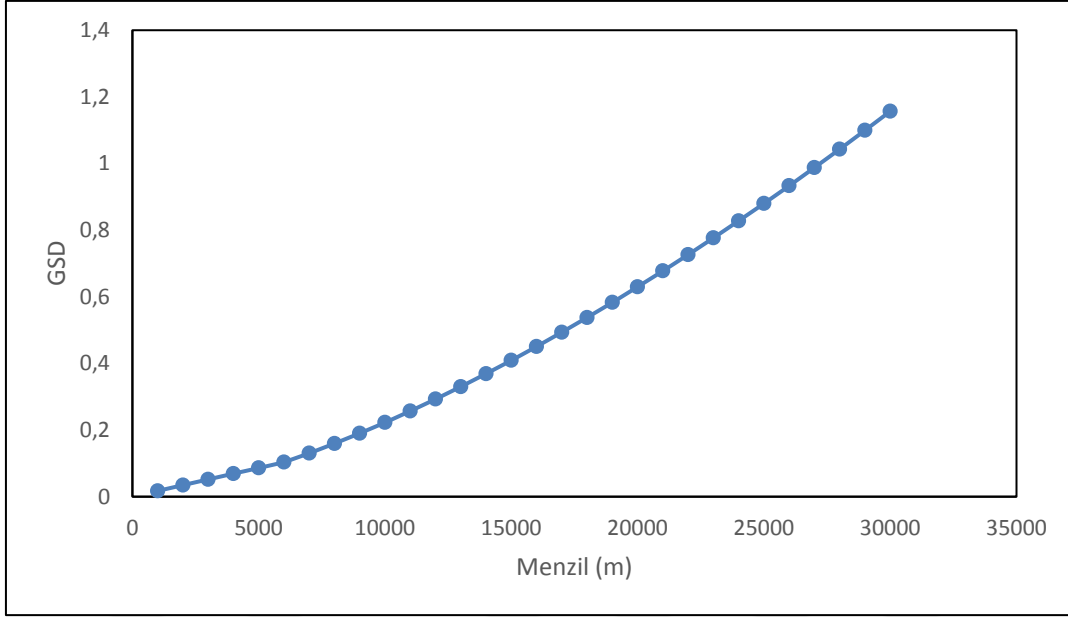
4.2. NIR Dalga Boyu

Bir kişiyi tanımlamak için gereken NIIRS değeri 7 ve üzeri olması gerektiği Çizelge 2.1’de te tanımlanmıştır. 6 km mesafede bulunan bir insanın tanımlanmasını sağlayacak ve sisli ortamlarda bu hedefin görülmesini sağlayacak olan NIR dalga boyunda bulunan bu konfigürasyonda Şekil 4.14’te NIIRS değeri 7,4 olarak hesaplanmıştır.



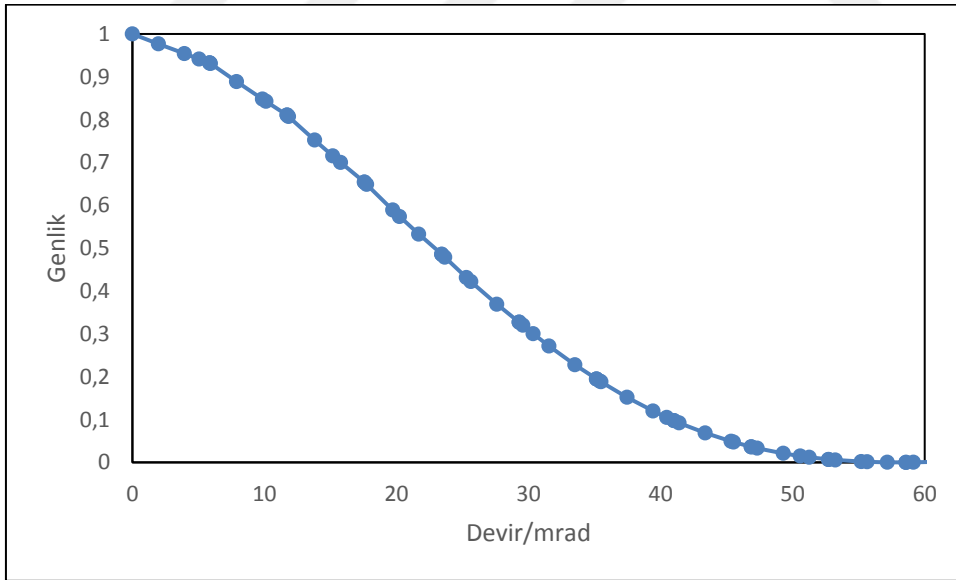
Şekil 4.14. NIR dalga Boyu NIIRS-Menzil grafiği

Mesafeye bağlı olarak değişen GSD değeri ise Şekil 4.15’te gösterilmektedir. Buna bağlı olarak 6’km yükseklikteki bir hava platformundan yerde bulunan hedeflere bakıldığında çözülebilirlik mesafesi 0,1m olarak hesaplanmaktadır.



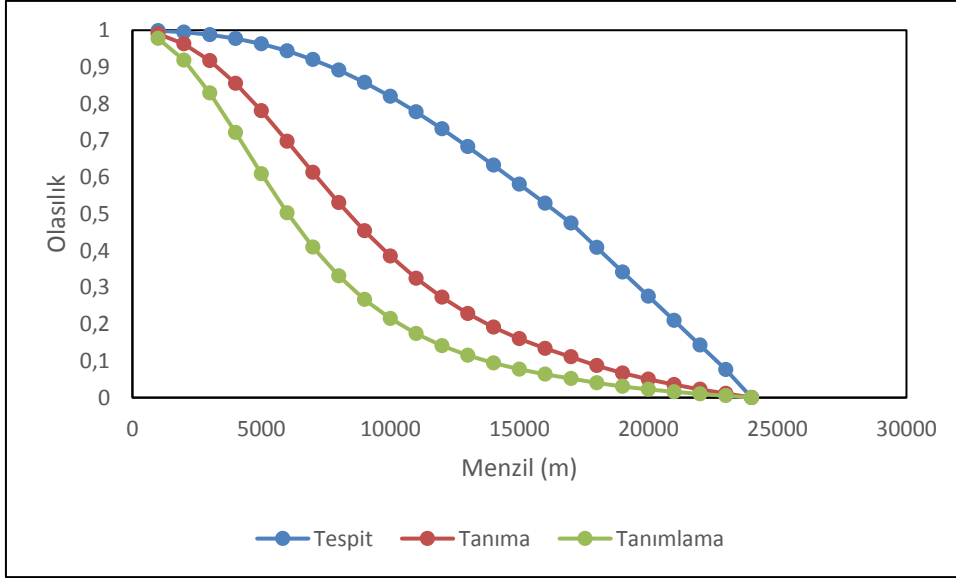
Şekil 4.15. NIR Dalga Boyu GSD-Menzil grafiği

Optik tasarım çıktıları hesaplanmadan sistemin MTF değeri hesaplanması gerekmektedir. Şekil 4.16’da verilen NIR dalga boyu için MTF grafiğinin değerleri gösterilmektedir.



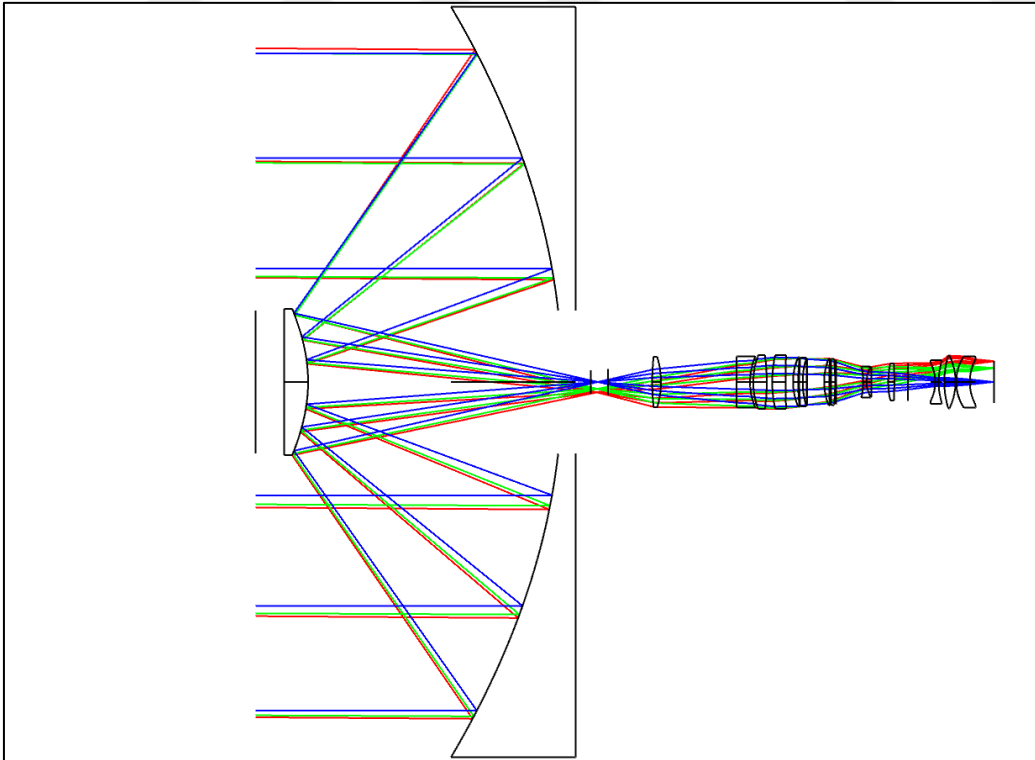
Şekil 4.16. NIR Dalga Boyu MTF grafiği

NIR dalga boyu konfigürasyonu için Şekil 4.17’de verilen görev performansının menzile karşı olasılığı grafiğinde verilen değerlere göre %50 olasılıkla bir insanın, 16,5 km’de tespit, 8,3 km’de tanıma ve 6 km’de görevi başarıyla yerine getirerek tanımlayabilmektedir.



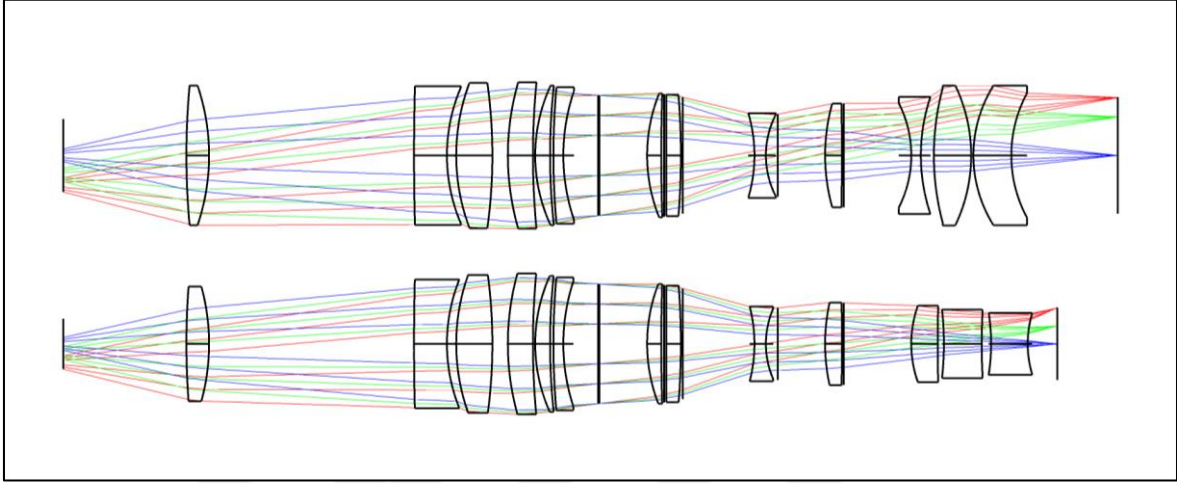
Şekil 4.17. NIR dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı

Bu tez çalışmasında yapılan NIR dalga boyu optik tasarımı için Şekil 4.18’de merceklerin pozisyonu gösterilmektedir. NIR dalga boyunda çalışan bu sistemin 200 mm optik açıklığı ve 880 mm odak uzunluğu vardır.



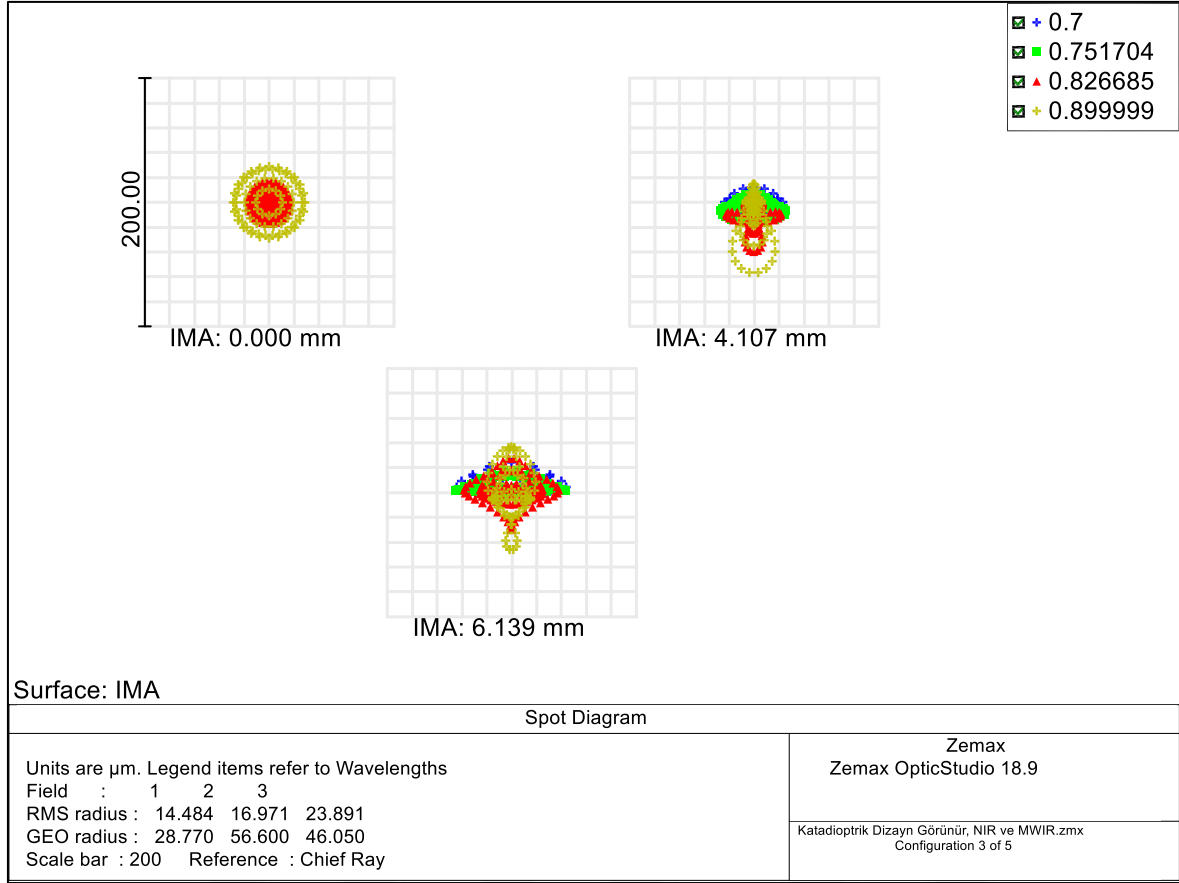
Şekil 4.18. NIR dalga boyu mercek konumu

Bu tez çalışmasının havacılık sektörünün en önemli problemlerinden biri olan ağırlığa çözüm olarak görünür dalga boyunun dar konfigürasyonu ile NIR dalga boyunun konfigürasyonunda Şekil 4.19’da gösterildiği gibi sadece son üç mercek farklıdır.



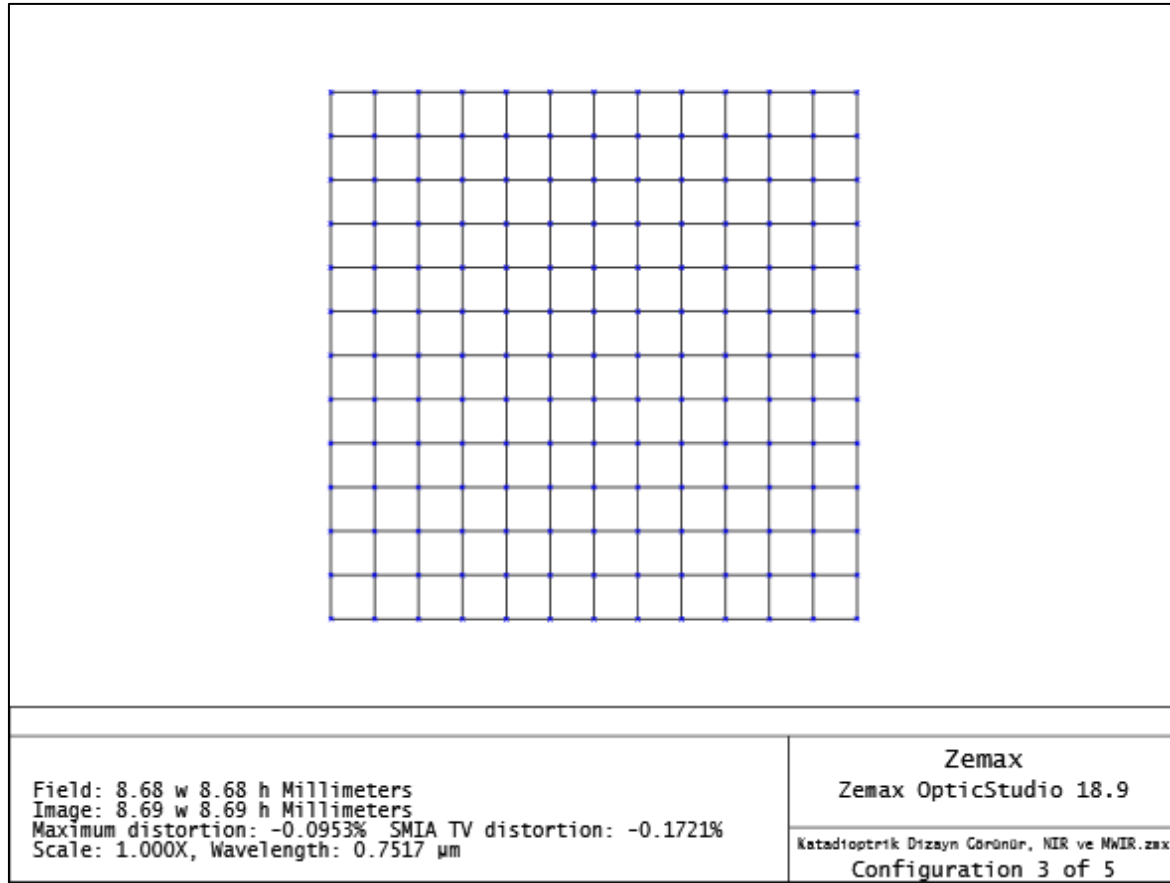
Şekil 4.19. NIR dalga boyu ile görünür dalga boyunda kullanılan merceklerin konumu

NIR dalga boyunda ise tek görüş açısından oluşan bu sistemin Şekil 4.20’de verilen nokta diyagramında merkez açıda ölçülen değer 14,48 μm çıkmaktadır.



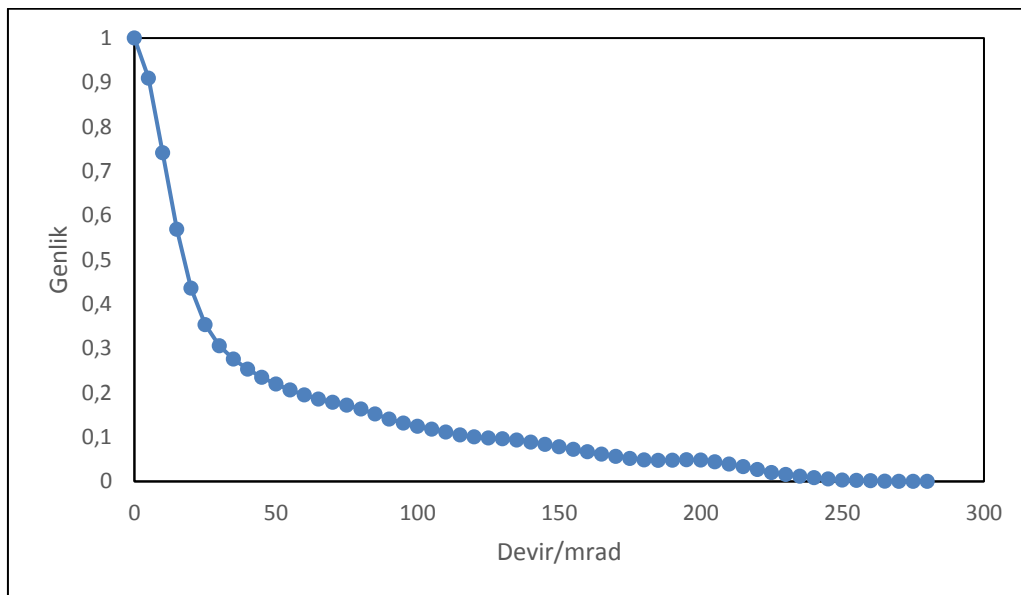
Şekil 4.20. NIR dalga boyu nokta diyagramı

Katadioptrik mercek tasarımıda çarpıtma oranının olabildiğince düşük olması hedeflenir. Bu tez kapsamında yapılan tasarımıda Şekil 4.21’de verilen çarpıtma grafiğinde de ölçülmüş olan değer %-0,095’tir.



Şekil 4.21. NIR dalga boyu çarpıtma diyagramı

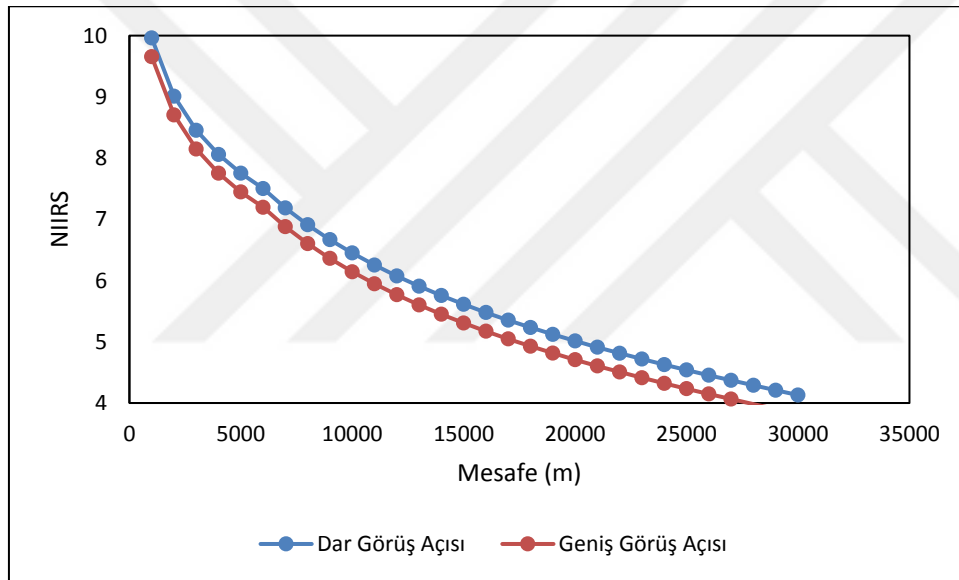
Şekil 4.22’de ise NIR dalga boyuna sahip bu sistemin MTF grafiği ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.22. NIR dalga boyu MTF optik tasarım

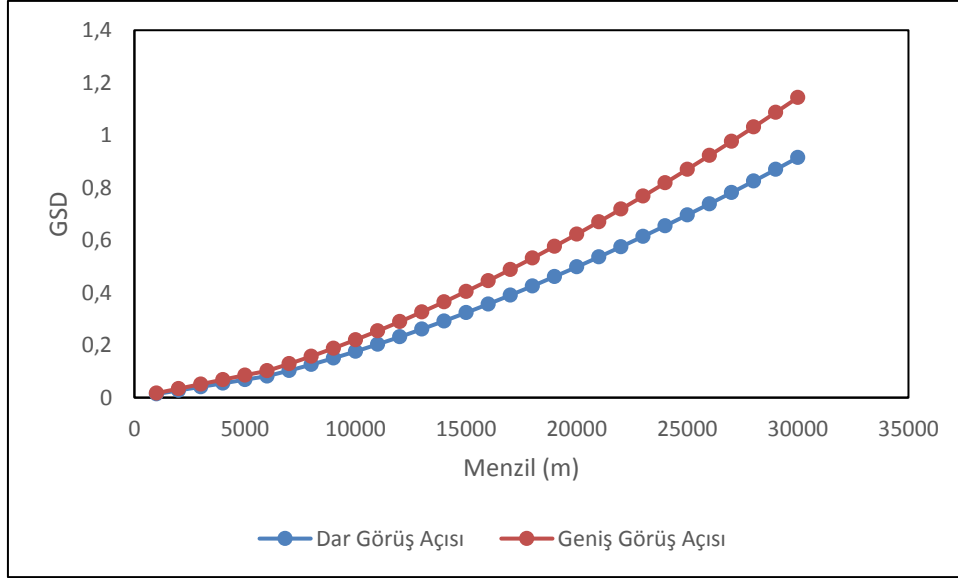
4.3. MWIR Dalga Boyu

Çizelge 2.2’te verilen NIIRS değerlerinde belirtildiği gibi bireysel bir kişinin tanımlanması yapılabilmesi NIIRS değerinin 7 ve üzeri olması gerekmektedir. Şekil 4.23’te görülen NIIRS – Menzil grafiğinde mesafenin artmasıyla NIIRS değeri azalmaktadır. Bu tez çalışmasında temel sistem parametrelerine göre yapılan hesaplamalarda 6 km mesafeden NIIRS değeri 7,5’ e denk gelmektedir. Geniş görüş açısı için ise, Şekil 4.23’te NIIRS değeri 5 km uzaklıkta 6,6’dır. Bu, sistemin Çizelge 2.2’ye göre “Küçük ve orta helikopterler arasında ayırma veya Arabaları sedan veya istasyon vagonu olarak tanımlama” olarak tanımlanabileceği anlamına gelmektedir.



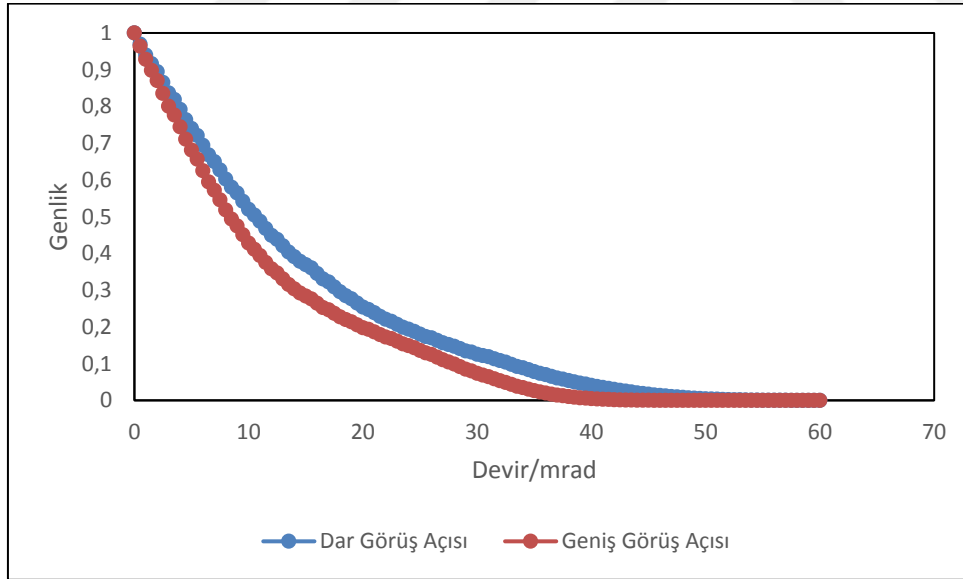
Şekil 4.23. MWIR Dalga Boyu NIIRS-Menzil grafiği

Şekil 4.24’te verilen GSD değerleri mesafeye bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir. Dar görüş açısı için 6 km mesafeden yerdeki hedefi 0,081 m çözebilirken geniş görüş açısında ise 0,10 m çözebilmektedir.



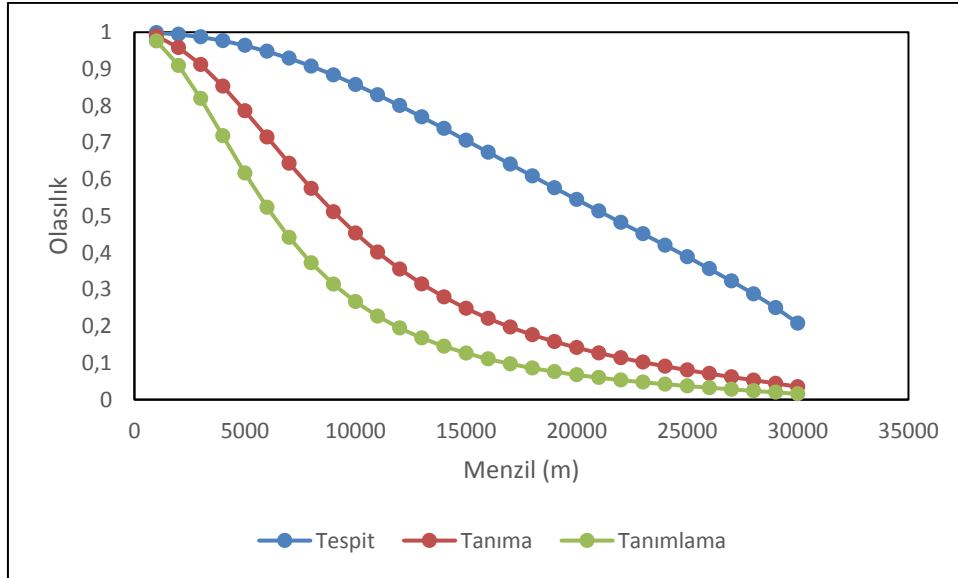
Şekil 4.24. MWIR Dalga Boyu GSD-Menzil grafiği

Temel tasarım parametrelerinde hesaplanan değerlere göre NV-IPM programına girdiler yapılmıştır. Bu girdilerin sonucuna göre Şekil 4.25'te sistemin MTF verileri hesaplanmıştır.



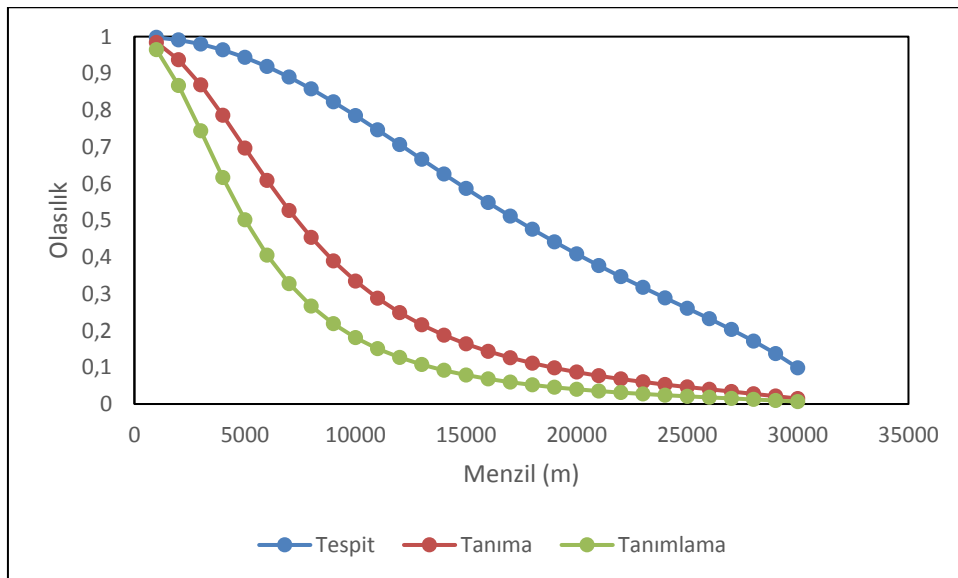
Şekil 4.25. MWIR Dalga Boyu MTF grafiği

200mm optik açıklığa sahip bu sistemin Şekil 4.26'da verilen dar görüş açısı için görev performansının menzile karşı olasılığı grafiğinde 1,8m boyunda 0,6 m genişliğine sahip bir hedefin 6 km mesafeden tespit, tanıma ve tanımla sonuçlarını içermektedir. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.4'te hesaplanan temel tasarım parametrelerine göre, %50 olasılıkla hedefi 21 km'de tespit, 9 km'de tanıma ve 6,5 km'de tanımlayabilmektedir.



Şekil 4.26. MWIR Dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (dar görüş açısı)

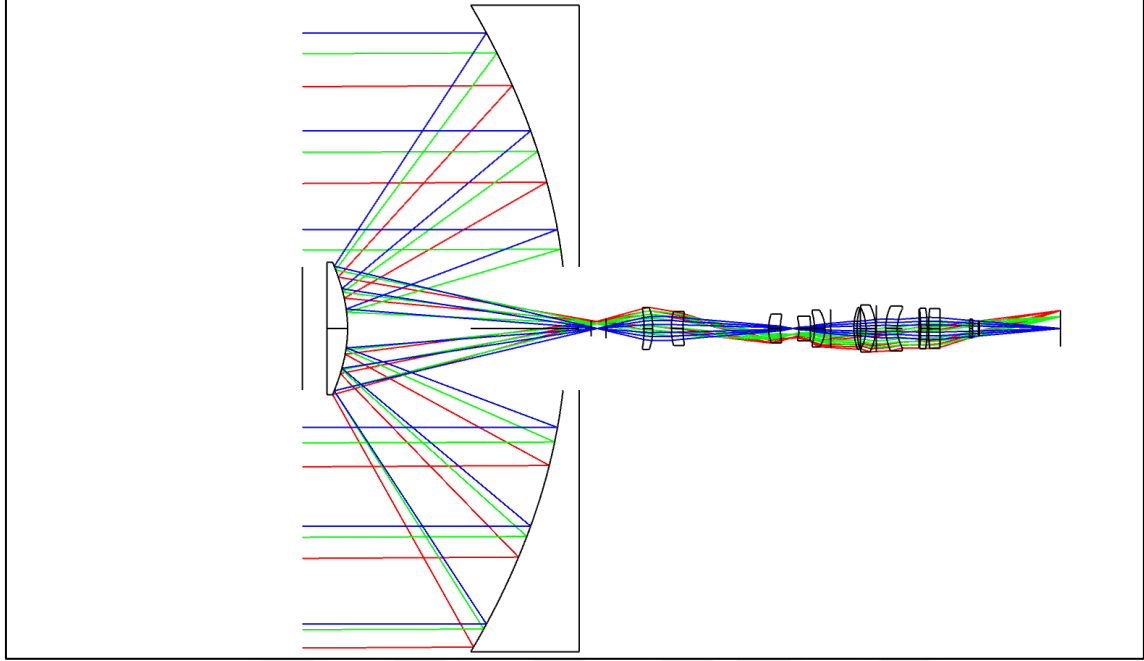
Çizelge 3.4’te verilen parametrelere yapılan menzil analizi sonucunda Şekil 4.27’de geniş görüş açısı için görev performansının menzile karşı olasılığı grafiğinde 1,8m boyunda 0,6 m genişliğine sahip bir hedefin tespit, tanıma ve tanımla sonuçları gösterilmektedir. Tez çalışmasının çıktısı olarak, %50 olasılıkla hedefi 17 km’de tespit, 7,5 km’de tanıma ve 5 km’de tanımlayabilmektedir.



Şekil 4.27. MWIR Dalga boyu görev performansının menzile karşı olasılığı (geniş görüş açısı)

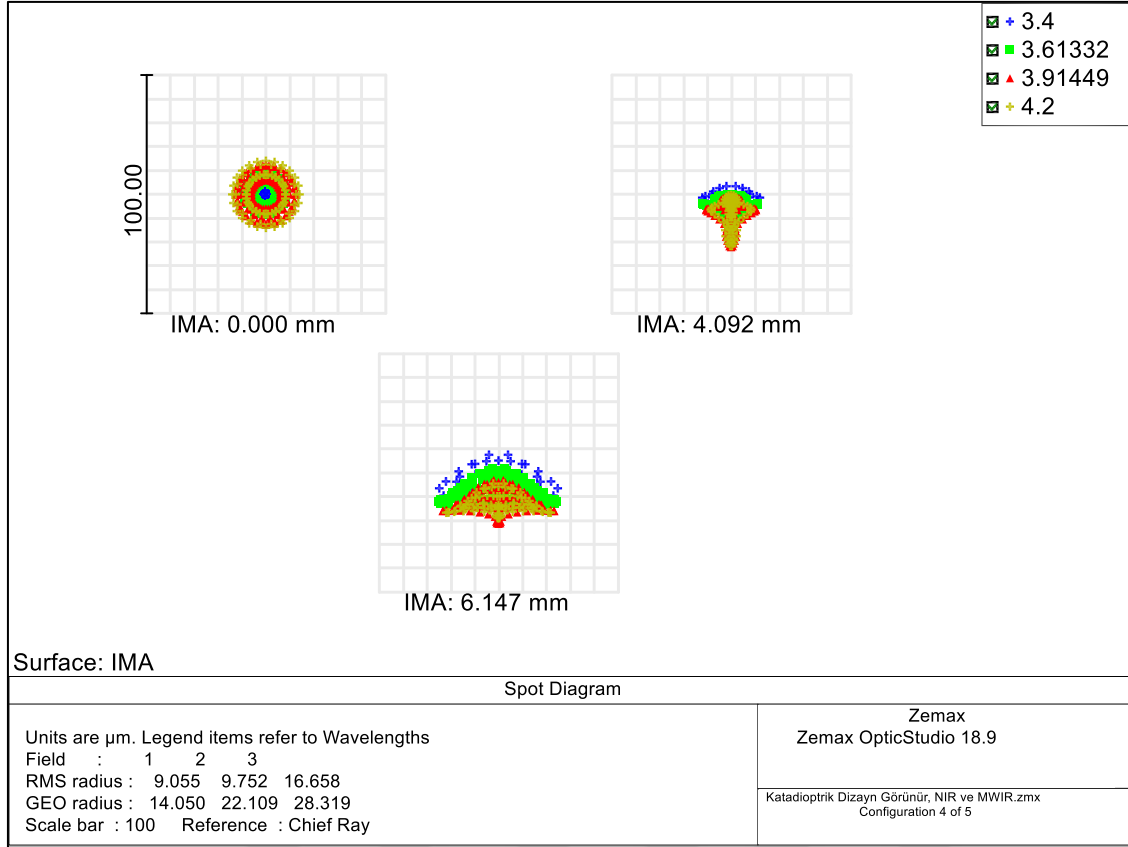
MWIR dalga boyu dar görüş açısının mercek dizilimi Şekil 4.28’de gösterilmektedir.

Soğutmalı dedektör kullanılan bu sistemde $F/\#$ değeri 5,5 olmuş ve odak uzunluğu ise 1100 mm olarak tasarım tamamlanmıştır.



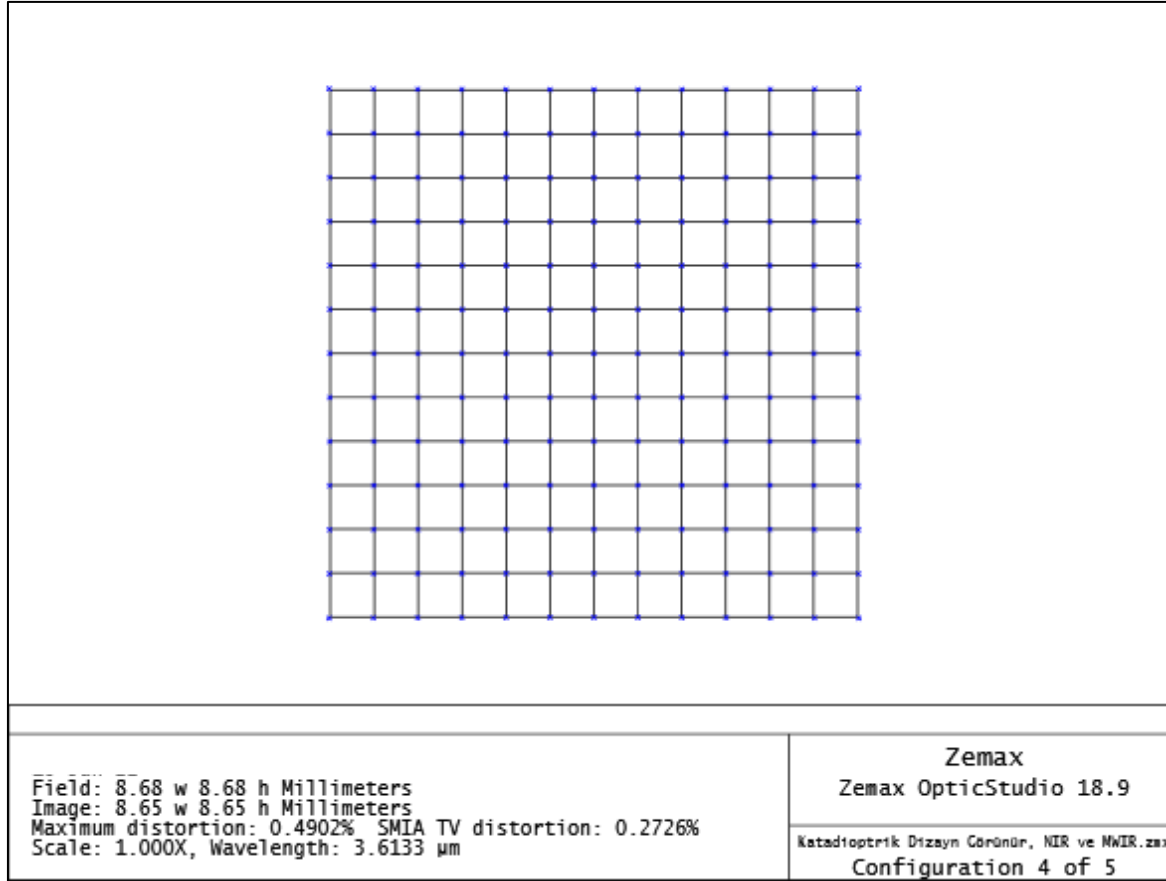
Şekil 4.28. MWIR dalga boyu dar görüş açısının mercek dizilimi

Dar görüş açılı MWIR dalga boyundaki sistemin bu konfigürasyonunun merkez açıda ölçülen nokta diyagramı Şekil 4.29’de gösterilmektedir ve $9,05 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Airy disk değeri formül 2.22’ye göre $26 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Tasarımın nokta diyagramının $26 \mu\text{m}$ ’den az olması hedeflenmiştir.



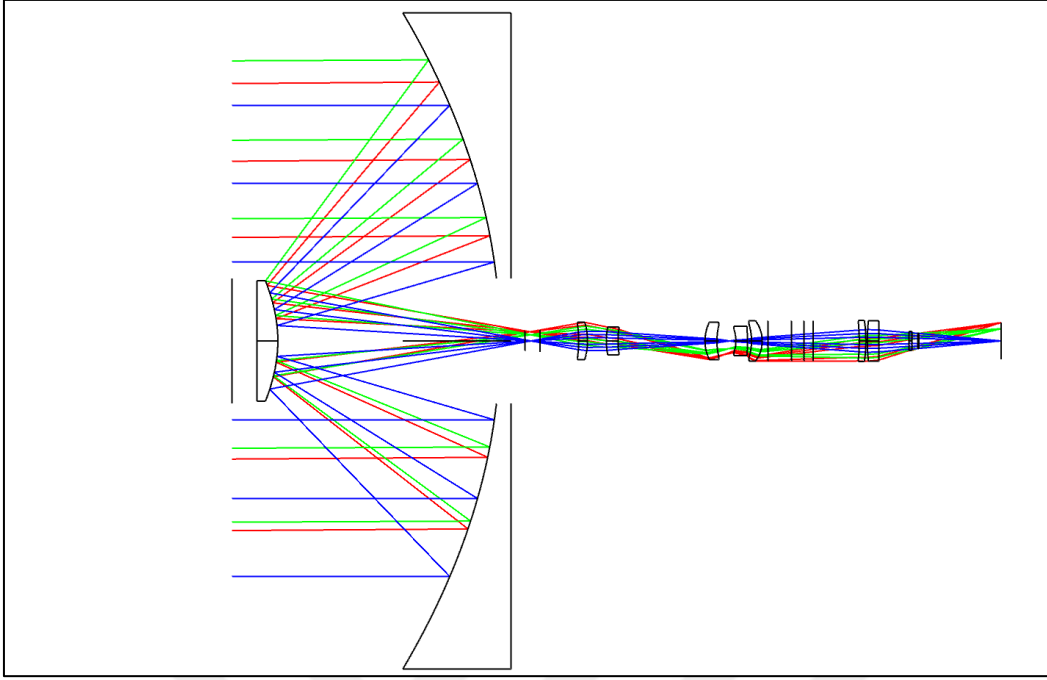
Şekil 4.29. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı nokta diyagramı

Katadioptrik sistemlerin çarpıtma yüzdesinin az olması gerekmektedir ve dar görüş açısı için çarpıtma değeri Şekil 4.30'de %0,49 olarak gösterilmektedir.



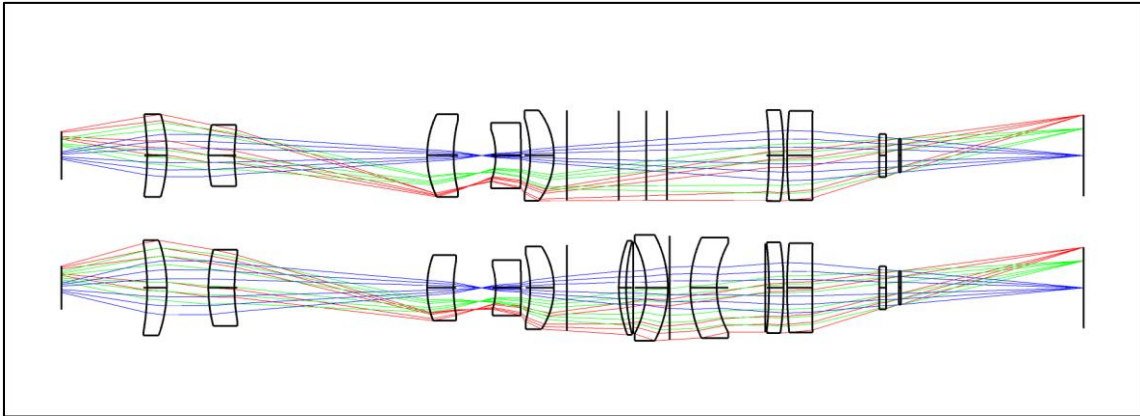
Şekil 4.30. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı çarpıtma diyagramı

MWIR dalga boyunda çalışan bu sistemin geniş görüş açısı için mercek konumları ise Şekil 4.31’de gösterilmektedir. Soğutmalı dedektör yapısından dolayı sistemin F/# değeri sabit kalması gerekmektedir. Geniş açılı bu konfigürasyonun FOV değerinin değişmesi için çizelge 3.4’te hesaplandığı gibi optik açıklığı 160mm, odak uzunluğu ise 880 mm olmuştur.



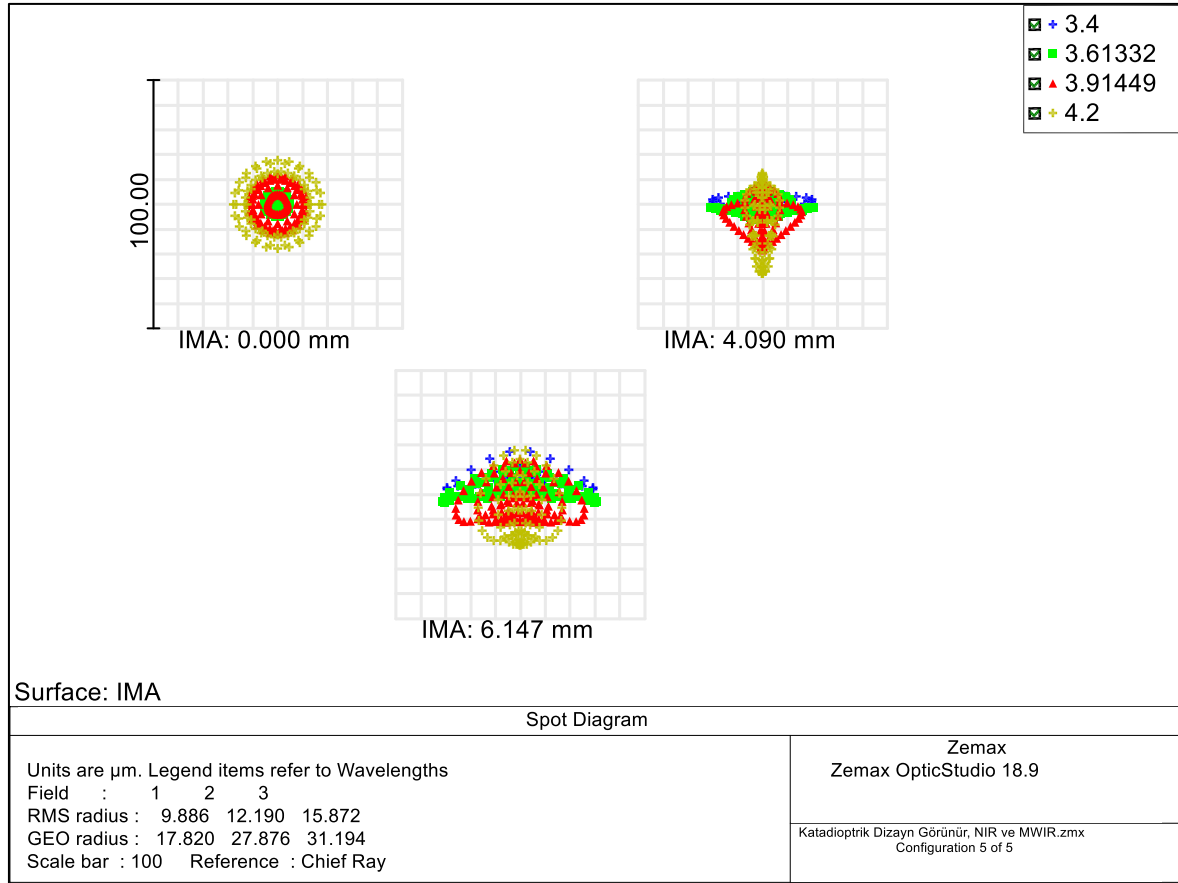
Şekil 4.31. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı mercek konumları

Dar görüş açısı ve geniş görüş açılı tasarımın odak uzunluğu ve görüş açısının değişmesi MWIR dalga boyunda da üç adet hareketli mercek yapılmaktadır. Şekil 4.32’de MWIR dalga boyu için kullanılan mercekler görülmektedir.



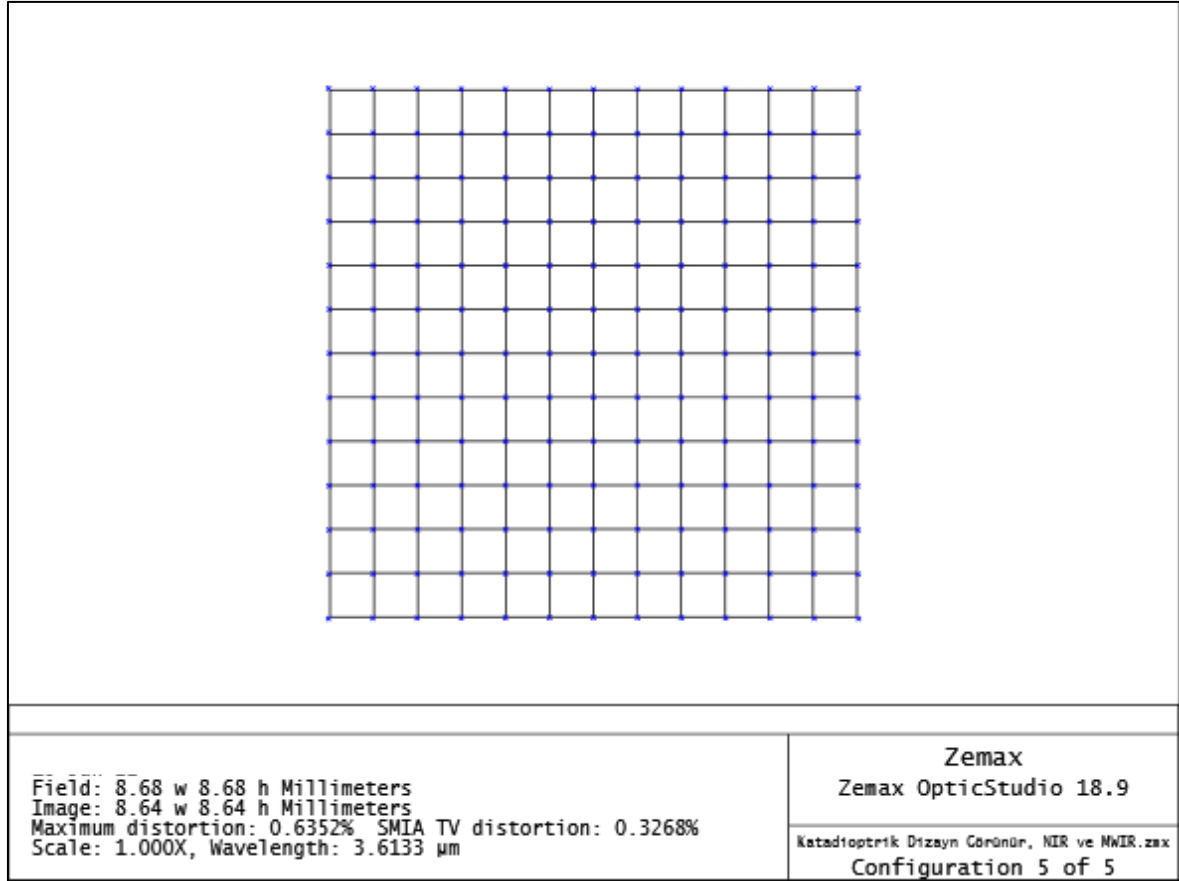
Şekil 4.32. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı ve geniş görüş açısı mercek konumları

Şekil 4.33’te geniş görüş açısına sahip konfigürasyonda ise $9,88 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. IR detektöre sahip olan bu sistemde merkez açıdaki nokta diyagramı değerinin $26 \mu\text{m}$ ’den az olması gerekmektedir.



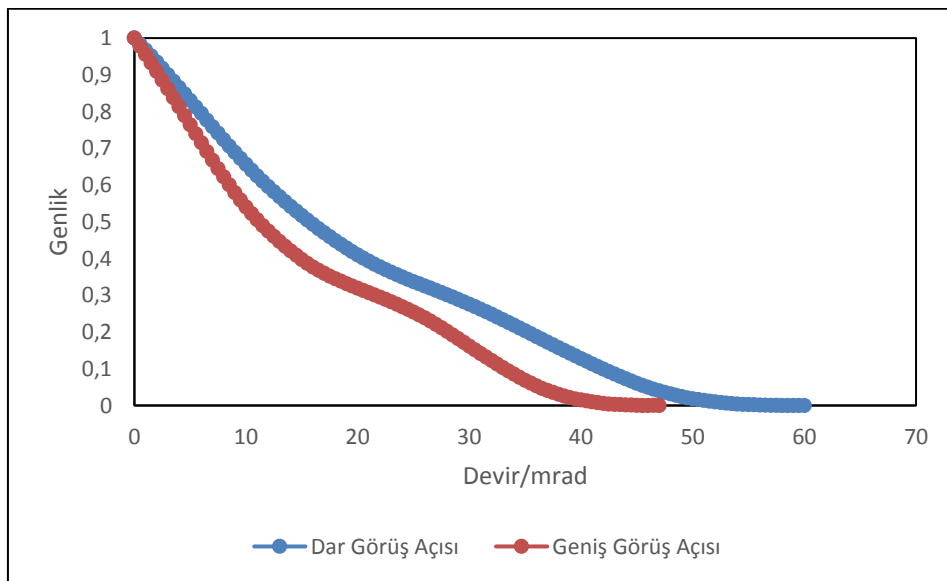
Şekil 4.33. MWIR Dalga boyu geniş görüş açısı nokta diyagramı

Çarpıtma değerinin minimum olması gereken bu sistemde, Şekil 4.34'te sunulan çarpıtma değeri %0,63 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.34 MWIR Dalga boyu geniş görüş açısı çarpıtma diyagramı

Optik tasarımın sonuç metriklerinden biri olan MTF Şekil 4.35'te dar görüş açısı ve geniş görüş açısı için gösterilmektedir.



Şekil 4.35. MWIR Dalga boyu dar görüş açısı ve geniş görüş açısı MTF grafiği



5. YORUMLAR

Bu tez çalışmasında ortak açıklığa sahip, hava araçlarında kullanılması planlanan bir optik sistem tasarlanmıştır. Optik sistemlerin hafif olması ve boyutunun küçük olması avantaj sağlamaktadır. Katadioptrik ortak açıklığa sahip bu sistemde görünür ve NIR dalga boyunda on adet mercek ortak kullanılmıştır. Işın ayırıcılar ile ayrılacak olan bu sistemde üç adet farklı mercek kullanılarak görüntü düzlemine odaklanan bir optik tasarım yapılmıştır. MWIR dalga boyu için ise ağırlığı azaltmak amaçlı olarak sürekli büyütme yapan bir sistem yerine 2 büyütmesi olan bir tasarım yapılmıştır. Bu sayede, bu tez çalışmasında yapılan tasarımın hafif ve küçük olması sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında, görünür dalga boyu, NIR dalga boyu ve MWIR dalga boyunda tasarım yapılmıştır. Görünür dalga boyu, gündüz görevlerinde pilota farkındalık yaratmak amacıyla kullanılmaktadır. NIR dalga boyu ise, düşük ışık altında görev yapmasına olanak sağlamaktadır. MWIR dalga boyunda ise, görev icra edilen bölgede bulunan sıcaklık farkı olan her şeyi algılamaya yönelik kullanılmaktadır. Bu üç dalga boyu da kullanılan bu tezde, her hava durumuna ve her saate uygun görev yapabilme kabiliyeti oluşturulması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak sistemin amacı olan, 6 km mesafeden bir insanın tanımlanması için gerekli olan parametreler belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, sistemin optik açıklığı, FOV değeri, $F/\#$, Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te değerleri belirlenmiştir. Çıkan sonuçlara göre görev performansının menzile karşı olasılığı görünür dalga boyu için Şekil 4.4, Şekil 4.5'te, NIR dalga boyu için Şekil 4.17'de ve MWIR dalga boyu için ise Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de sunulmuştur. Tez çalışmasında yapılan katadioptrik ortak açıklıklı bu sistemde, tezin amacı olan bir insanın 6 km uzaklıktan tanımlanmasının yapılabildiği görülmüştür.

Optik tasarımda merceklerin arasındaki mesafe, mercekten çıkan ışının ve diğer merceğe giren ışının yaptığı açı kontrol edilmek zorundadır. Eğer iki mercek birbirine fazla yaklaşacak olursa üretim sonrasında merceklerin birbirine değmesine ve merceklerin kırılmasına ve çizilmesine sebep olabilir. Merceklerin birbiri arasındaki boşluğu, merceğe giren ve çıkan ışının açısı, merceklerin üretilebilir olduğu gibi parametreler Zemax OpticStudio programında kontrol edilerek tasarlanmalıdır.

Merceklerin konumların doğru şekilde belirlenmesi için tez çalışmasında ince mercek

teoremi kullanarak tasarıma başlanmıştır. İnce mercek teorimi ile merceklerin konumları belirlenmiş ve aynaların birbirine göre konumları bulunarak orta görüntü düzleminde odaklanması sağlanmıştır. Orta görüntü düzlemi sonrasında dikroik ayna veya ışın ayırıcılar yardımıyla konfigürasyonlar dalga boylarına ayrılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan optik tasarımda, görünür dalga boyunda dar ve geniş görüş açısı için aynı optik açıklık kullanılmıştır. Bu ise sistemin kaçak ışınlarını önlenmesini sağlamıştır. Şekil 4.19’da gösterilen optik yerleşimde görünür dalga boyu ve NIR dalga boyu için son üç merceğe kadar ortak optik yol kullanılmıştır. Bu sayede ağırlık azaltılmış ve boyuttan yer kazanılmıştır. Bununla birlikte katadioptrik sistemlerde çarpıtma oranının minimum olması hedeflenmiş ve bu tez kapsamında yapılan tasarımda Çizelge 4.8, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.21’de gösterildiği gibi başarıya ulaşılmıştır. MWIR dalga boyunda ise soğutmalı bir dedektör kullanılmıştır. Soğutmalı dedektör kullanılan sistemlerde daha hassas sıcaklık farkına bakılması sağlanır. Buna ek olarak, tez çalışmasında yapılan tasarımda tüm mercekler küresel formdadır. Küresel üretilen merceklerin ucuz olması ise diğer bir avantajdır. Küresel olmayan mercekler ise üretildikten sonra, merceklerin sistem haline getirildiğinde, iç yansımalar, yanlış odaklamalara sebep olabilmektedir. Buna ek olarak üretim maliyetleri de artmaktadır.

Optik tasarım sonucunda kullanılan mercek sayısının artmasıyla birlikte dedektöre düşen enerji miktarı azalmaktadır. Uzun menzilli görev sistemlerde dedektöre düşen enerjinin öneminden dolayı bu tez çalışmasında minimum mercek sayısı ile tasarım tamamlanmıştır. Aküresel mercekler kullanarak daha az mercek kullanılabilecek olsa da üretim sırasında ortaya çıkabilecek problemlerden dolayı bu tez çalışmasında sadece küresel mercek kullanılmıştır. Enerji kaybının azaltılamadığı durumlarda dedektör devrelerinde entegrasyon süresi arttırılarak sisteme giren foton sayısı arttırılabilir. Enerji kaybını önleyecek diğer yöntem ise optik sistemin giriş açıklığının arttırılması olabilir. Optik açıklığının arttırılması sistemi ağırlaştıracağı için çok fazla tercih edilen bir yöntem değildir.

Bu tez çalışmasına ilk başlığında merceklerin arasında boşlukların hatalı planlanmasından dolayı birçok sorunla karşılaşmıştır. Bu hatalardan dolayı yanlış odak uzaklıkları hesaplanmış ve sistemin amaçlandığı menzil performansına ulaşamamıştır. Sistemin çarpıtma oranı, nokta diyagramı ve MTF değeri istenilen sonuca ulaşamamıştır. Bu sebeple sistem tüm parametrelerle beraber tezin amacı doğrultusunda tekrar tasarıma başlanmıştır.

Literatür araştırmaları sonucunda, bilgimiz dahilinde, katadioptrik ortak açıklıklı sistemlerde görünür dalga boyu, NIR dalga boyu ve SWIR dalga boyu kullanıldığı görülmüştür. Bu tezde yenilik olarak, MWIR dalga boyu da eklenmiştir. MWIR dalga boyunun verdiği avantaj ile, tek bir ortak açıklıklı optik sistem ile gece görev yapabilme kabiliyeti kazandırılmıştır. Bu tez çalışmasına örnek olarak başlanan tasarımı olan “Sinclair, R.L. and R.M. Hudyma, *Catadioptric zoom lens assemblies*. 1999, patentinde tek dalga boyu kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında ise üç ayrı bölgede dalga boyu ve birden fazla FOV değişimi sağlanan bir optik sistem tasarlanmıştır.

Tez çalışmasında yapılan tasarımlar ile savunma sanayi sektöründe satışı yapılan katadioptrik ortak açıklıklı sistemlerin hedef tanıma mesafeleri aynı olmasına rağmen, tez çalışmasında elde edilen sonuçlar tasarlanan sistemin boyutlarının daha küçük olduğunu göstermektedir (Cats, 2022; Wescam, 2022) Böylece, tez kapsamında elde edilen sonuçlar kullanarak üretilen bir katadioptrik ortak açıklıklı sistem diğer sistemlere göre daha hafif ve dolayısıyla daha kullanışlı olabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Baker, S., & Nayar, S. K. (1999). A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *International Journal Of Computer Vision*, 35(2), 175-196.
- Bentley, J. (2012). *Field guide to lens design*. (1st ed). Washington: SPIE press, 40-53.
- Burt, C. (2013). *Design, fabrication and test of an operationally responsive aircraft with niirs evaluated imager*. Master of Science, The Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 18-26.
- Charman, W. (1995). *Handbook of Optics*, vol. 1, M. Bass, EW Van Stryland, DR Williams, and W. L. Wolfe eds. New York In: McGraw-Hill, 144-155.
- Coughlin, J. F. (1980). *Introduction to long focal length catadioptric systems*. Long Focal Length, High Altitude Standoff Reconnaissance, San Diego, 84-90.
- Driggers, R. G., Friedman, M. H., & Nichols, J. (2012). *Introduction to infrared and electro-optical systems*. Washington: Artech House, 78-90.
- Driggers, R. G., Hodgkin, V., & Vollmerhausen, R. (2013). *What good is SWIR? Passive Day Comparison of VIS, NIR, and SWIR*. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIV, San Diego, 187-201.
- Driggers, R. G., Kelley, M., & Cox, P. G. (1996). *National imagery interpretation rating system (NIIRS) and the probabilities of detection, recognition, and identification*. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VII, Orlando, 349-360.
- Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R., Galeb, R., Kress, B. C., McClain, S. C., Baur, T., Plympton, R., Wiederhold, B., & J, B. G. A. (2000). *Optical system design* (Vol. 5). Orlando: Citeseer, 401-460.
- Genberg, V. L., Michels, G. J., & Doyle, K. B. (2011). *Integrated modeling of jitter MTF due to random loads*. Optical Modeling and Performance Predictions V, San Diego, 157-165.
- Gliatti, E. L. (1978). *Image evaluation methods*. Airborne Reconnaissance III, Washington, D.C., 6-12.
- Green, P., Sun, W., Matusik, W., & Durand, F. (2007). *Multi-aperture photography*. In Acm Siggraph 2007 Papers (pp. 68-es).
- Greivenkamp, J. E. (2004). *Field guide to geometrical optics (1St ed)*. Washington: SPIE press, 20-33.
- Gross, H., Hannfried, Z., Peschka, M., & Blechinger, F. (2007). *Handbook of optical systems, volume 3: aberration theory and correction of optical systems*. Munich: Wiley-Vch., 120-155.

- Guirao, A., Gonzalez, C., Redondo, M., Geraghty, E., Norrby, S., & Artal, P. (1999). *Average optical performance of the human eye as a function of age in a normal population*. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 40(1), 203-213.
- Hadar, O., Dogariu, A., & Boreman, G. (1997). *Angular dependence of sampling modulation transfer function*. *Applied Optics*, 36(28), 7210-7216.
- Holst, G. C. (2007). *An engineer's approach to system performance*. *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVIII*, Orlando, 84-91.
- Holst, G. C. (2008). *Electro-optical imaging system performance*. (6th ed). Washington: JCD Publishing, 87-140.
- Holst, G. C. (2018). *What is V50?*. *Infrared imaging systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX*, Bellingham, 78-83.
- Howe, J. (1993). *Electro-optical imaging system performance prediction*. *Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing*, 4, 92.
- Huang, K.-L. (1997). *Synthesis of first-order designs of optically compensated catadioptric zoom optical systems*. *Zoom Lenses II*, San Diego, 108-118.
- İnternet: Cats (common aperture targeting system). <https://www.aselsan.com.tr/tr/cozumlerimiz/elektro-optik-sistemler/hava-platformu-elektro-optik-sistemleri/cats-common-aperture-targeting-system>. adresinden ASELSAN. (n.d.). 25.06.2022 tarihinde erişilmiştir.
- İnternet: Wescam MX™-15, Air Surveillance and reconnaissance. L3Harris. (n.d.). web: <https://www.l3harris.com/all-capabilities/wescam-mx-15-air-surveillance-and-reconnaissance>. adresinden 25.06.2022 tarihinde erişilmiştir.
- Lloyd, J. M. (2013). *Thermal imaging systems*. San Diego: Springer Science & Business Media, 120-143.
- Maurer, T., Driggers, R. G., Vollmerhausen, R. H., & Friedman, M. H. (2002). *2002 NVTherm improvements*. *Infrared and Passive Millimeter-Wave Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, San Diego, 15-23.
- Ming, M., Fei, Y., Jin-Yu, Z., Li-Min, Z., & Xiao-Xia, W. (2012). Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband. *红外与激光工程*, 41(1), 149-154.
- Mouroulis, P., Macdonald, J., & Macdonald, J. (1997). *Geometrical optics and optical design (Vol. 39)*. Oxford: Oxford University Press Oxford, 41-55.
- Pascal, S., David, S., Andraud, C., & Maury, O. (2021). Near-infrared dyes for two-photon absorption in the short-wavelength infrared: strategies towards optical power limiting. *Chemical Society Reviews*, 50(11), 6613-6658.
- Ratches, J. A. (1976). Static performance model for thermal imaging systems. *Optical Engineering*, 15(6), 525-530.

- Riehl Jr, K. (1996). *Historical review of reconnaissance image evaluation techniques*. Airborne Reconnaissance XX, Denver, 322-334.
- Riehl Jr, K., & Maver, L. A. (1996). *Comparison of two common aerial reconnaissance image quality measures*. Airborne Reconnaissance XX, Denver, 242-254.
- Seong, S., Yu, J., Ryu, D., Hong, J., Yoon, J.-Y., Kim, S.-W., Lee, J.-H., & Shin, M.-J. (2009). *Imaging and radiometric performance simulation for a new high-performance dual-band airborne reconnaissance camera*. Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications VI, Denver, 26-38.
- Shu, K.-L., & Henson, T. D. (1996). *Optical design for a visible through thermal Infrared multiband imaging system*. Current Developments in Optical Design and Engineering VI, Denver, 301-310.
- Sigler, R. D. (1992). U.S. Patent No. 5,114,238. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Sinclair, R. L., & Hudyma, R. M. (1999). U.S. Patent No. 5,940,222. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ungar, S. G., Pearlman, J. S., Mendenhall, J. A., & Reuter, D. (2003). Overview of the earth observing one (EO-1) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1149-1159.
- Vollmerhausen, R. H., & Driggers, R. G. (2000). Analysis of sampled imaging systems (Vol. 39). Washington: Spie Press, 13-25.
- Vollmerhausen, R. H., & Jacobs, E. (2004). The targeting task performance (TTP) metric a new model for predicting target acquisition performance. *NVTerm Report*. Washington. 11-14.
- Vollmerhausen, R. H., Jacobs, E. L., & Driggers, R. G. (2004). New metric for predicting target acquisition performance. *Optical Engineering*, 43(11), 2806-2818.
- Walker, B. H. (2008). *Optical engineering fundamentals* (Vol. 82). Bellingham: Spie Press, 41.
- Yu, L. Y., Jia, H. G., Wei, Q., Jiang, H. H., Zhang, T. Y., & Wang, C. (2013). A design of mid-wave infrared integral catadioptric optical system with wide FOV. *Journal of the Optical Society of Korea*, 17(2), 142-147.





GAZİ GELECEKTİR..