ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜDÜMLÜ SİSTEMLER İÇİN 1064 NM DALGABOYUNDA ÇALIŞAN DÖRT DİLİM ALGILAYICILI LAZER SPOT İZLEYİCİ TASARIMI

Göktuğ Gencehan ARTAN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2014

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Göktuğ Gencehan ARTAN tarafından hazırlanan "**Güdümlü Sistemler için 1064 nm Dalgaboyunda Çalışan Dört Dilim Algılayıcılı Lazer Spot İzleyici Tasarımı**" adlı tez çalışması 24 / 03 / 2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin SARI

Jüri Üyeleri:

Başkan **:** Prof. Dr. Ziya TELATAR
Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

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

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

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

24.03.2014

Göktuğ Gencehan ARTAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜDÜMLÜ SİSTEMLER İÇİN 1064 NM DALGA BOYUNDA ÇALIŞAN DÖRT DİLİM ALGILAYICILI LAZER SPOT İZLEYİCİ TASARIMI

Göktuğ Gencehan ARTAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin SARI

Güdümlü sistemlerin temelini algılama, karar verme ve kontrollü eyletim (tahrik) oluşturmaktadır. Bu tip sistemlerin algılama hassasiyeti tüm sistemin başarımını belirlemektedir. Birim maliyet de göz önüne alındığında, hassasiyet bakımından en uygun algılama lazer spot izleyiciler ile yapılabilmektedir. Bu tezde güdümlü bir sistem için maliyet etkin, yüksek başarımlı ve askeri sistemlerde kullanılabilir bir lazer spot izleyicinin tasarımı ele alınmıştır. Görüş açısı ve algılama menzili parametrelerinin tasarım kıstası olarak belirlendiği çalışmada, 3 kilometreden 1064 nm dalgaboyundaki Nd:YAG lazer tarafından işaretlenen bir hedefi en az 3 kilometreden ±15° görüş açısı aralığında algılayıp oransal olarak çözümleyerek hedefin açısal bilgisini çıktı olarak verebilen bir sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, temelde; ele alınan sistemin bilgisayar ortamında modellenmesi, çözümlenmesi (analizi), üretimi ve sistem halinde başarım testlerinin incelenmesini kapsamaktadır.

Mart 2014, 49 sayfa

Anahtar Kelimeler: Lazer spot izleyici, dört dilimli algılayıcı, güdümlü sistemler

ABSTRACT

Master Thesis

DESIGN OF A 1064 NM WAVELENGTH LASER SPOT TRACKER FOR GUIDED SYSTEMS WITH A FOUR QUADRANT DETECTOR

Göktuğ Gencehan ARTAN

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin SARI

The basis of guided systems consists of detection, decision making and controlled actuation. The sensitivity of the detection affects the whole system performance. Taking into account the price per unit, the most convenient detection in the sense of precision can be achieved with laser spot trackers. This study deals with a military grade, high performance and cost effective laser spot tracker for a guided system. The aim is to develop a system with a field of view of ±15° that will detect proportionally at a distance of 3 kilometers from the target and give the line-of-sight angle of the target as an output, in which the target is designated with a 1064 nm wavelength Nd: YAG laser from 3 kilometers and where the field of view and detection range parameters are set as the design criteria of the study. The study basically consists of the system modeling and analyzing on a computer environment, producing and the conducting performance tests of the whole system.

March 2014, 49 pages

Key Words: Laser spot tracker, four quadrant detector, guided systems

ÖNSÖZ

Çalışmalarıma bilgisi, önerileri ve eleştirileriyle katkıda bulunan, çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin SARI'ya, çalışmalarım sırasında çok önemli katkılarda bulunan Sayın Utku TÜRER'e, bana her aşamada yol gösteren ve destek olan Sayın Dr. Bülent ÖZKAN'a ve çalışmalarımda değerli emekleri olan çalışma arkadaşlarım Kutlu Demir KANDEMİR, Ümit BOZYİĞİT ve Tayfun ÇELİK'e teşekkür ederim.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu – Savunma Sanayii Araştırma Geliştirme Enstitüsü tarafından desteklenmiştir.

Göktuğ Gencehan ARTAN
Ankara, Mart 2014

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK ..... **i**

ÖZET ..... **ii**

ABSTRACT ..... **iii**

ÖNSÖZ ..... **iv**

ŞİMGELER DİZİNİ ..... **vii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xi**

1. GİRİŞ **1**

1.1 Genel Bilgi **1**

1.2 Kullanım Alanları **3**

1.3 Tezin Amacı **3**

1.3.1 Kaynak taraması **3**

1.3.2 Süreç **4**

1.3.3 Sistem ve isterler **6**

1.3.3.1 Koruyucu pencere **7**

1.3.3.2 Filtre **7**

1.3.3.3 Mercek **8**

1.3.3.4 Dört dilim algılayıcı **8**

2. RADYOMETRİK HESAPLAR **10**

2.1 Atmosferik Geçirgenlik **10**

2.2 Hesaplamalar **12**

2.2.1 Lazer güç hesabı **13**

2.2.1.1 Hedefte güç yoğunluğu **13**

2.2.1.2 Hedef ışınımı **14**

2.2.1.3 Hedef parlaklığı **15**

2.2.1.4 Alıcıya ulaşan enerji **15**

3. OPTİK TASARIM **18**

3.1 Mercek Tasarımı ve Seçimi 18
3.2 Koruyucu Pencere Tasarımı 24
3.3 Filtre Seçimi 28
3.4 Sıcaklık Analizleri 30
3.5 Sistem Tasarım Analizi 37
4. BAŞARIM TESTLERİ 40
4.1 Deney Düzeneği 40
4.2 Çizgisellik Düzeltmeleri 41
5. SONUÇ 44
ÖZGEÇMİŞ 49

SİMGELER DİZİNİ

FOV	Görüş Alanı (Field of View)
FWHM	Tam Genişlik Yarı Maksimum (Full Width Half Maximum)
LFOV	Doğrusal Görüş Alanı (Linear Field of View)
LWIR	Uzun dalgaboyu kızılötesi bandı
MWIR	Orta dalgaboyu kızılötesi bandı
Nd:YAG	Neodimyum katkılanmış itriyum alüminyum garnet
SWIR	Kısa dalgaboyu kızılötesi bandı
XFOV	Genişletilmiş Görüş Alanı (Extended Field of View)

kısaltmalar dizini

A_b	Hedefteki lazer spotunun alanı
A_R	Alıcı açıklık alanı
A_S	Alıcının görüş açısına dik düzlemde aydınlatılan nokta alanı
α_T	Çıkan lazerin demet saçılım açısı
B	Hedef parlaklığı
β	Kontra halka katsayısı
β_{Hr}	Sönüm katsayısı
D	Çap
D_L	Çıkan lazerin demet çapı
D_R	Alıcı açıklık çapı
E_A	Algılayıcıya gelen güç
E_D	Her dilime gelen güç
E_R	Alıcıya ulaşan enerji
F	Güç yoğunluğu
G	Lazer demetinin gücü
γ_r	Alıcı görüş açısı
I	Alıcı açıklığında güç yoğunluğu
λ	Dalgaboyu
λ_{Merkez}	Merkez dalgaboyu

μm	Mikrometre
θ_r	Hedef yüzeyinin normali ile gelen ışın arasındaki açı
θ_t	Hedef yüzeyinin normali ile gönderilen ışın arasındaki açı
P_{ATM}	Atmosferik dış basınç
ρ_T	Hedef yansıtıcılığı
R_R	Hedef ile alıcı arası mesafe
R_T	Hedef ile işaretleyici arası mesafe
S_{MEAN}	Mukavemet
U	Yayılan güç
t	Kalınlık
τo_F	Filtre geçirgenliği
τ_h	Yatay atmosferik geçirgenliği
τo_K	Koruyucu pencere geçirgenliği
τo_M	Mercek geçirgenliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Elektromanyetik spektrum 2
Şekil 1.2 Kızılötesi bölgede atmosferik geçirgenlik 2
Şekil 1.3 Lazer demetinin dört dilim algılayıcı üzerine odaklanması 4
Şekil 1.4 Bang-bang ve oransal kontrol için görüş açıları 5
Şekil 1.5 Oransal çözümleme 6
Şekil 1.6 Lazer spot izleyici elemanları 7
Şekil 1.7 Dört dilim algılayıcı 8
Şekil 2.1 Atmosferik geçirgenlik grafiği 10
Şekil 2.2 Geçirgenlik-mesafe grafiği 11
Şekil 2.3 Farklı ortam şartlarında yatay düzlemde geçirgenlik-mesafe eğrileri 12
Şekil 2.4 Akış şeması 13
Şekil 3.1 Işınların farklı açılarda kırılması 18
Şekil 3.2 Optik tasarım gereksinimlerinin grafiksel gösterimi 19
Şekil 3.3 Mercek tasarımı 1 20
Şekil 3.4 Mercek tasarımı 2 21
Şekil 3.5 Mercek tasarımı 3 21
Şekil 3.6 Mercek tasarımı 4 22
Şekil 3.7 Mercek tasarımı 5 22
Şekil 3.8 Edmund Optics® 66020 ZEMAX modeli 24
Şekil 3.9 Koruyucu pencere tasarım programından bir ekran görüntüsü 27
Şekil 3.10 Koruyucu pencere teknik resmi 28
Şekil 3.11 Borofloat malzemesinin bant genişliği-görüş açısı grafiği 29
Şekil 3.12 Edmund Optics® 85905 filtre geçirgenliği 30
Şekil 3.13 Koruyucu pencere kırılma indisi-sıcaklık grafiği 32
Şekil 3.14 Koruyucu pencere geometrik boyutlar-sıcaklık grafiği 32
Şekil 3.15 Mercek kırılma indisi-sıcaklık grafiği 34
Şekil 3.16 Mercek geometrik boyutlar-sıcaklık grafiği 34
Şekil 3.17 Sistem boyu yüzde sapma-sıcaklık eğrisi 36
Şekil 3.18 Spot çapı yüzde sapma-sıcaklık eğrisi 37
Şekil 3.19 Optik sistemin dizilimi 38

Şekil 3.20 0° ve 15° görüş açılarında algılayıcıya gelen ışınlar.....38
Şekil 3.21 15° görüş açısında tek dilime gelen optik güç – mesafe grafiği 39
Şekil 4.1 SBIR Infinity darbeli lazer üreteci ve kolimatör.....41
Şekil 4.2 ±30° görüş açısında 1° aralıklarla alınan deneysel veri 42
Şekil 4.3 ±18 derece görüş açısında oturtulmuş eğri 43
Şekil 5.1 50 nm FWHM'a sahip 1064 nm filtre 45
Şekil 5.2 100 nm FWHM' sahip 1075 nm filtre 46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Görüş açısı tanımları ve gereksinimleri 5
Çizelge 1.2 Analog Modules 742DP algılayıcısının teknik özellikleri 9
Çizelge 1.3 Sistem gereksinimleri 9
Çizelge 3.1 Mercek Gereksinimleri 19
Çizelge 3.2 Edmund Optics® 66020 model numaralı merceğin teknik özellikleri 23
Çizelge 3.3 Koruyucu pencere gereksinimleri 24
Çizelge 3.4 Çeşitli optik malzemelerin kıyaslaması 26
Çizelge 3.5 Filtre gereksinimleri 28
Çizelge 3.6 Koruyucu pencere sıcaklık analizi 31
Çizelge 3.7 Mercek sıcaklık analizi 33
Çizelge 3.8 Sistem uzunluğu sıcaklık analizi 35
Çizelge 3.9 Spot yarıçapı-sıcaklık analizi 36
Çizelge 3.10 Sistem tasarım gereksinim ve sonuç karşılaştırma çizelgesi 39
Çizelge 5.1 Sistem gereksinimleri ve sonuçların kıyaslaması 44

1. GİRİŞ

Teknoloji her geçen gün "akıllı" sistemler üzerinde çalışmalara yönelirken, algılama, karar verme ve kontrollü eyletim önem kazanmaktadır. Lazer spot izleyiciler genel olarak bu tip "akıllı" takip sistemlerin algılama kısmını oluşturmaktadır. Örneğin, üretim cihazlarında hassas konumlama veya mühimmatlarda hedef takibi ve vuruş hassasiyetini artırmak için kullanılmaktadır.

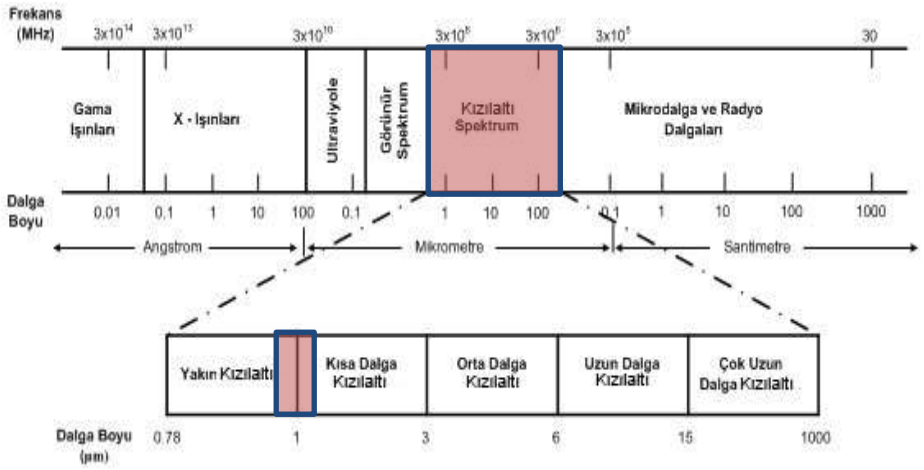
Lazer spot izleyici temel olarak optik elemanlar, bir algılayıcı ve elektronik kartlardan oluşur. Lazer ışını, aydınlatılmış bir hedeften veya bazı uygulamalarda doğrudan izleyiciye gelmekte ve algılayıcı üzerinde odaklanmamış bir spot oluşturmaktadır.

Lazer spot izleyiciler, merceklerin üretim toleranslarını doğrulama ve güdümlü mühimmatlar gibi hassas merkezleme gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Bunun temel sebebi istenilen hassasiyete maliyet ve uygulanabilirlik açısından en uygun çözüm olmasıdır.

Bu tez, atmosfer etkilerine açık ve sahada kullanılacak bir güdümlü sistem için maliyet etkin, yüksek görüş açılı, yüksek menzilden algılama yapabilen ve askeri sistemlerde kullanılabilir ve literatürdeki mevcut sistemlerden daha yüksek başarıma sahip bir lazer spot izleyici tasarımı ile ilgilenmektedir.

1.1 Genel Bilgi

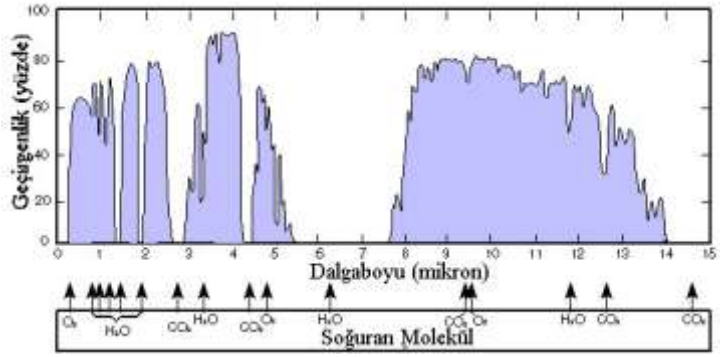
Elektromanyetik spektrumun 0,78 mikrometre ile 1000 mikrometre arasındaki bölgeye kızılötesi veya kızılaltı spektrum adı verilir. Bu dalgaboyu aralığındaki ışınım görünür bölgenin hemen üst kısmında olduğundan dolayı göz ile algılanamaz. Silisyum (Si), İndiyum Antimon (InSb) ve Civa-Kadmiyum-Tellür (MCT) gibi algılayıcılar ile bu dalgaboyu aralığında algılama yapılabilmektedir.



Şekil 1.1 Elektromanyetik spektrum (http://www.wikipedia.org, 2013)

Kızılötesi bandı Şekil 1.1'de görüldüğü gibi 0,78-1000 μm dalgaboyu aralığındadır ama bu bantta çalışan sistemler Şekil 1.2'de görüldüğü gibi 1-14 μm dalgaboyu aralığını kullanılmaktadır. Ancak bu aralıkta gerçekleşen kızılötesi ışımanın büyük bir bölümü atmosferik soğurmalardan dolayı belirli ara bantlarda çalışılabilmektedir ve bu bantlar temel olarak üçe ayrılır: Kısa, orta ve uzun dalgaboyu bantları.

Kısa dalgaboyu kızılötesi bandı (1-3 μm) genellikle aktif görüntüleme, lazer işaretleme ve algılama sistemlerinde kullanılır. Orta dalgaboyu kızılötesi bandı (3-5 μm) yaygın olarak arayıcı başlıklarda kullanılır. Uzun dalgaboyu kızılötesi bandı (8-12 μm) ise seyrüsefer sistemlerinde, görüntüleme podlarında ve yine arayıcı başlıklarda kullanılmaktadır.



Şekil 1.2 Kızılötesi bölgede atmosferik geçirgenlik (http://www.wikipedia.org, 2013)

1.2 Kullanım Alanları

Lazer spot izleyiciler yaygın olarak mercek üretimlerinde merkezleme hatasını en aza indirmek için, lazerlerin kalite kontrolünde, lazer mesafe ölçerlerde ve lazer güdümlü sistemlerde kullanılır. Bu tez kapsamında lazer spot izleyici bir güdümlü sistem için tasarlanacaktır.

1.3 Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında, 3 kilometreden 1064 nm dalgaboyundaki bir Nd:YAG lazer tarafından işaretlenen bir hedefi, en az 3 kilometreden ±15° görüş açısı aralığında algılayıp oransal olarak çözümleyerek hedefin açısal bilgisini çıktı olarak verebilen bir sistem tasarımı amaçlanmaktadır.

Bu sistemin tasarımında maliyeti düşük tutmak da öncelikli amaçlardan biridir. Lazer spot izleyici bir kardanın üzerine takılarak hareketli bir sistem haline getirilerek görüş açısı artırılabilir, fakat bu tip bir sistemin maliyeti yüksek olacağından bu çalışma kapsamında tercih edilmemiştir.

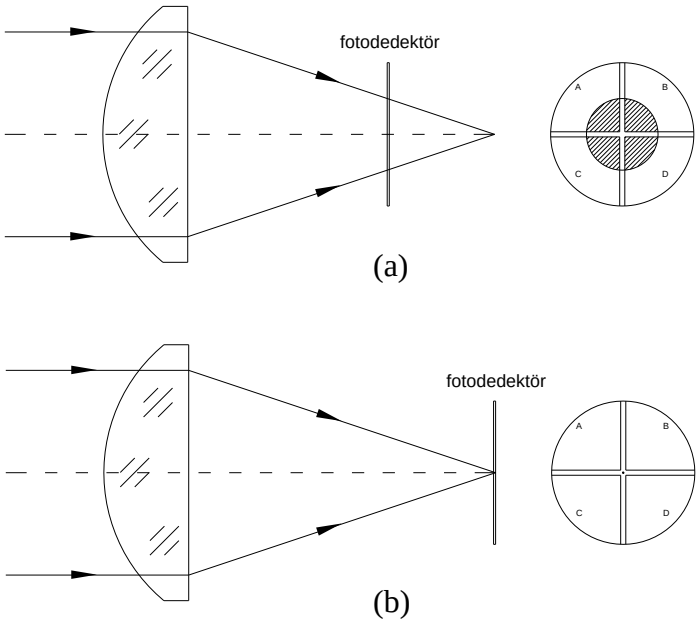
Ayrıca, kullanılacak optik elemanların sayısının maliyete katkısının yüksek olacağı öngörülmektedir. Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulursa lazer spot algılayıcı sabit ve tek mercekli bir sistem olacaktır.

1.3.1 Kaynak taraması

Bu çalışma kapsamında tasarlanması amaçlanan lazer spot izleyicinin gereksinimleri askeri sistemlerde kullanılan lazer spot izleyiciler ile benzer olduğundan dolayı bu konuda kaynakların sınırlı olduğu görülmektedir. Yurtdışında yapılan bazı çalışmalar göz önüne alındığında yüksek görüş açısı ve menzile sahip lazer spot izleyiciler ortaya çıkmaktadır. ,

1.3.2 Süreç

Öncelikle takip edilecek olan hedef 1064 nm dalgaboyundaki darbeli bir Nd:YAG lazer kaynağı tarafından işaretlenmektedir. Hedeften yansıyan ışın optik bir sistem ile toplanmakta ve algılayıcı sistem, hedefin açısal konumunu vermektedir.



Şekil 1.3 Lazer demetinin dört dilim algılayıcı üzerine odaklanması

Lazer spot algılayıcılarda, algılayıcı eleman klasik sistemler gibi merceğin odak noktasına değil (Şekil 1.3.a), odak noktası ile mercek arasına (Şekil 1.3.b) konumlandırılarak lazerin algılayıcı üzerinde noktasal değil, 4 dilimin üzerine düşerek dairesel ışık oluşturması gerekmesidir. Böylece Hedeften yansıyan lazer ışınlarını sistemin tüm görüş açılarını, dört dilim algılayıcının üzerine konumlandırmak amaçlanmaktadır.

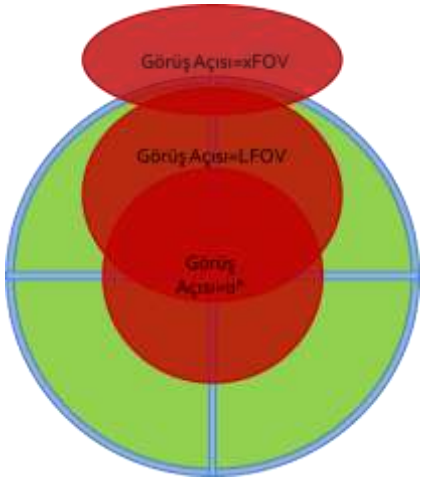
Çizelge 1.1 Görüş açısı tanımları ve gereksinimleri

Görüş Açısı	İsimlendirme	Durum
0° - 25°	FOV [Görüş Alanı (Field of View)]	Algılama
0° - 15°	LFOV [Doğrusal Görüş Alanı (Linear Field of View)]	İki eksende açı bilgisi (Oransal Kontrol)
15° - 25°	XFOV [Genişletilmiş Görüş Alanı (Extended Field of View)]	İki eksende de yönelim bilgisi ("Bang-Bang" Kontrol)

Lazer demetinin oluşturduğu spot algılayıcının 4 dilimine birden düştüğü sürece 2 eksende oransal bir çözümleme yapılabilir, dolayısıyla hedef açı bilgisi bulunabilir.

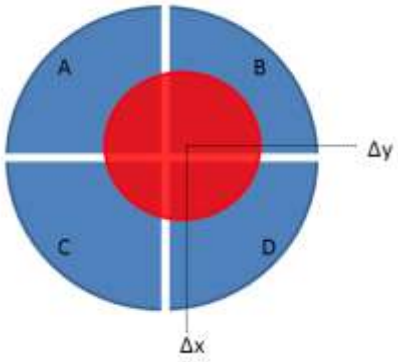
Öte yandan, görüş açısı arttıkça spot 4 dilime birden düşmeyebilir. İki dilime düşerse bir eksende oransal çözümleme, diğer eksende "bang-bang" adı verilen tek bir yöne eğilim bilgisi verilebilir. Tek bir dilime düşerse, her iki eksende de yine "bang-bang" adı verilen sadece tek bir yöne eğilim bilgisi veren veri sunabilir.

Lazer demetinin bir kısmı dört dilim algılayıcının dışına çıkarsa oransal algılama verisi gerçek bir açısal bilgi sunamaz ve yine ancak "bang-bang" tipi bilgi sağlanabilir.



Şekil 1.4 Bang-bang ve oransal kontrol için görüş açıları

Dilimler arası sinyal farkı Şekil 1.5'te görüldüğü gibi hesaplanarak lazer dairesinin konumu, bu konum hesaplanarak hedefin açı bilgisi elde edilir. Lazer dairesi tüm dilimlere odaklanmayınca hedefin bir eksendeki yönelimi bilinir fakat oranlama yapılamadığından açısal bilgi elde edilemez. Her dilime odaklanınca açısal bilgi, dilimler arası orandan bulunabilir.



Şekil 1.5 Oransal çözümleme (Bupp 2010)

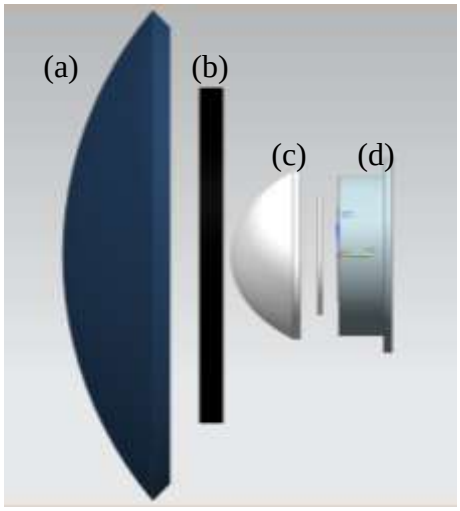
$$\Delta x = \frac{V_B + V_D \ - (V_A + V_C)}{(V_A + V_B + V_C + V_D)} \qquad \Delta y = \frac{V_A + V_B \ - (V_C + V_D)}{(V_A + V_B + V_C + V_D)} \tag{1.1}$$

Burada Δx ve Δy sırası ile x ve y koordinatlarını; V_A, V_B, V_C ve V_D ise indislere karşı gelen algılayıcı dilimlerinden elde edilen gerilim değerlerini göstermektedir. Lazer dairesi tüm dilimlere odaklanmayınca hedefin bir eksendeki yönelimi bilinir fakat oranlama yapılamadığından açısal bilgi elde edilemez. Her dilime odaklanınca açısal bilgi, dilimler arası orandan bulunabilir.

1.3.3 Sistem ve isterler

Lazer spot izleyici sistem temel olarak 4 optik elemandan oluşmaktadır (Şekil 1.6). Sistemin en dışında bir koruyucu pencere bulunmaktadır(a). Ardından istenmeyen ışınları bloke eden bir filtre(b), odaklayıcı mercek(c) ve son olarak bir dört dilim algılayıcı(d) bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 1.6'da algılayıcı ile mercek arasında bir eleman daha görülmektedir. Bu eleman algılayıcının koruyucu camıdır; optik

performansa etkisi en düşük olduğundan bu elemanın tasarımı ile ilgili hususlarla ilgilenilmemiştir.



Şekil 1.6 Lazer spot izleyici elemanları

1.3.3.1 Koruyucu pencere

Koruyucu pencerenin amacı sistemi dış etkenlerden korumak ve yalıtmaktır. Optik sistemin içerisinde toz veya nemli hava bulunmaması gerekir çünkü nemli hava hem geçirgenliği azaltır, hem de düşük sıcaklıklarda donma meydana gelebilir.

1.3.3.2 Filtre

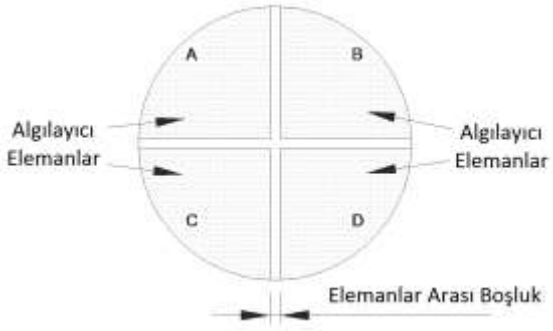
Sadece istenen dalgaboyundaki ışınların algılayıcıya düşmesi için belirli bir dalgaboyu aralığını geçiren, bandın dışında kalan dalgaboylarını soğuran ve yansıtan bir malzeme kullanılır. Filtrenin bu sistemdeki en büyük amacı sistemin güneşten etkilenmemesini sağlamaktır. Güneşten algılayıcının algılayabileceği her dalgaboyunda ışın gelmektedir. Bu ışınların istenmeyen dalgaboylarındaki kısmı filtrelenerek sinyal-gürültü oranı olabildiğince yüksek tutulmuş olur.

1.3.3.3 Mercek

Merceğin işlevi gelen ışınları, açılarına göre uygun konumlara yönlendirmesidir. Böylece algılayıcı üzerinde bu tezde anlatılacak yöntemlerle gelen ışınların hangi açılardan geldikleri tespit edilebilir.

1.3.3.4 Dört dilim algılayıcı

Algılayıcı temel olarak Şekil 1.7'de görüldüğü gibi 4 adet foto-algılayıcı elemanın diziliminden oluşmaktadır.



Şekil 1.7 Dört dilim algılayıcı

Kızılötesi algılama uygulamalarında (genellikle 1064 nm Nd:YAG lazer) tipik olarak Şekil 1.7'de gösterildiği gibi çok elemanlı bir silikon algılayıcı kullanılmaktadır. Dört dilim algılayıcı, 4 tane yüksek dirençli p-tipi silikondan oluşmaktadır. Yüksek dirençli olması 1064 nm'de daha yüksek hassasiyet sağlar ve düşük sığa değeri de yükselme zamanı (rise time) geliştirir. Yaklaşık 200 V'luk bir ters besleme gerilimi uygulanarak hassasiyet ve hız daha da artırılabilir (Stotlar 2004).

Elemanlar arası boşluk ne kadar fazla olursa kaçak akım o kadar az olacaktır. Kaçak akımın az olması gürültüyü azaltacaktır, fakat boşluğun artması sistemin toplayacağı enerjiyi azaltacağından, uygulamaya göre optimum bir değer seçilmelidir. Algılayıcının kaçak akımı ve hassasiyeti bu tezdeki amaca göre en kritik özelliklerdir. Bu durum göz önünde bulundurularak Analog Modules firmasının 742DP model numaralı dört dilim algılayıcısı seçilmiştir. Bu algılayıcının özellikleri Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2 Analog Modules 742DP algılayıcısının teknik özellikleri

Algılayıcı Çapı	14 mm
Elemanlar Arası Boşluk	76 μm
Hassasiyet (Responsivity)	0,4 A/W
Ters Besleme Voltajı	180 V
Dilim Başına Kaçak Akım	200 nA
Algılanabilir En Düşük Sinyal	400 nW
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-40...85°C

Sistemin tüm başarımının temelini oluşturan algılayıcının özelliklerinin belirlenmesinin sonucunda sistem gereksinimleri tanımlanmıştır. Lazer spot izleyici sisteminin gereksinimleri çizelge 1.3'de verilmiştir.

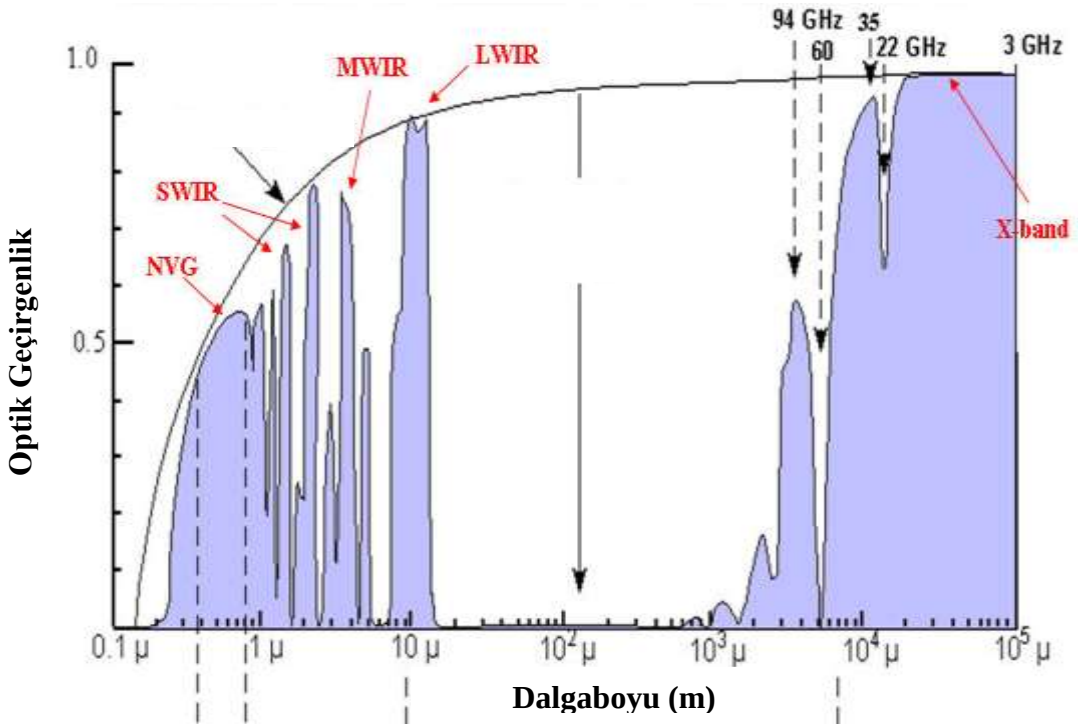
Çizelge 1.3 Sistem gereksinimleri

Algılama Menzili	≥ 3 km
Doğrusal Görüş Açısı	≥ ± 15°
Genişletilmiş Görüş Açısı	≥ ± 25°
Dalgaboyu	1064 nm
Optik Sistem Boyu	≤ 50 mm
Mercek Sayısı	1
Geçirgenlik	≥ % 50

2. RADYOMETRİK HESAPLAR

2.1 Atmosferik Geçirgenlik

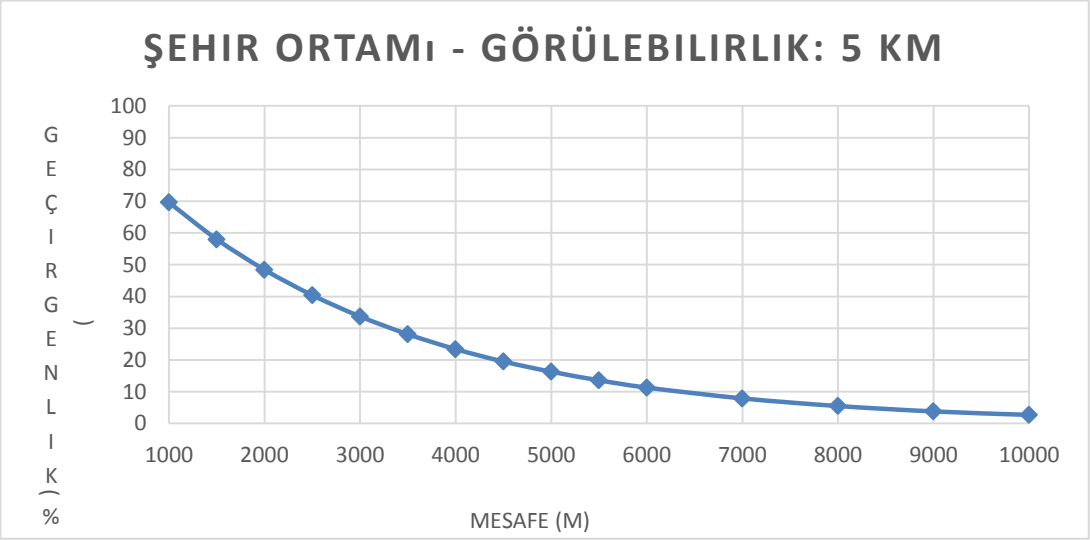
Kızılötesi ışınım belirli dalgaboylarında atmosferdeki gazlardan dolayı soğurulmaktadır. Soğurmanın az olduğu belirli bölgeler (pencereler) vardır. Kızılötesi sistemler Şekil 2.1'de gösterilen bu pencerelerde çalışacak şekilde eniyileştirilir. 1064 nm bu pencerelerden birine denk gelmekte olup, soğurma az olsa bile mesafe uzunsa kızılötesi ışınım şiddeti azalmakta hatta tükenebilmektedir.



Şekil 2.1 Atmosferik geçirgenlik grafiği (http://www.iisicorporation.com, 2014)

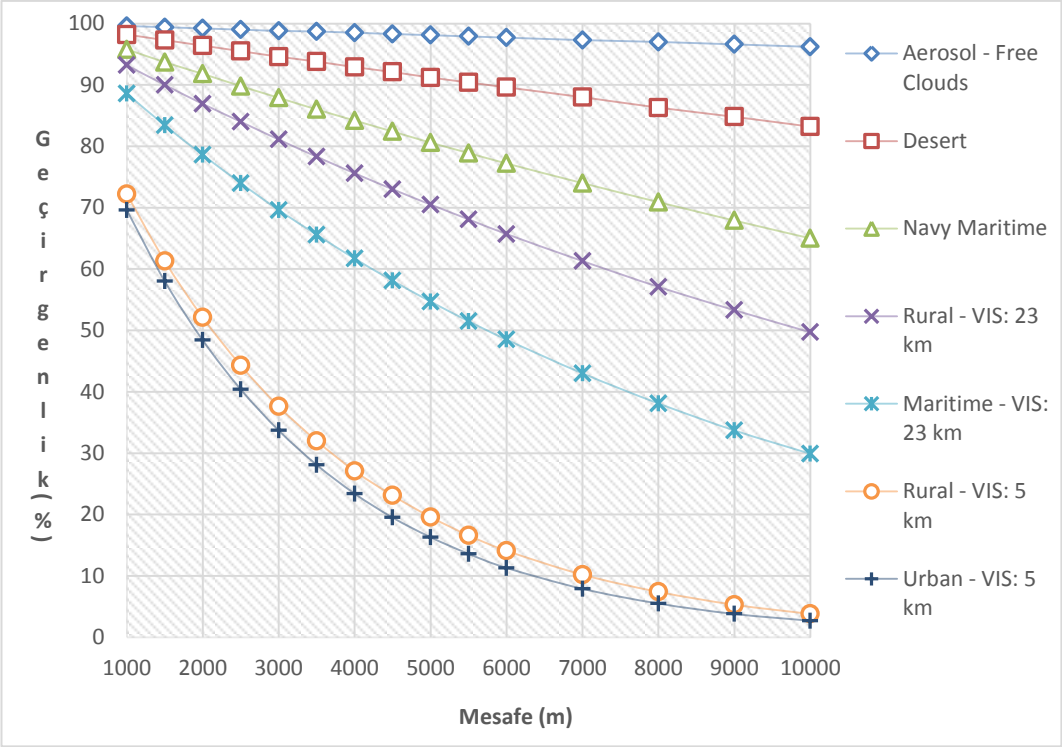
Geçirgenlik iki şekilde hesaplanmaktadır; Tükenme katsayısı (Extinction coefficient) kullanılarak mesafe değişimine bağlı bir geçirgenlik hesaplanabilmektedir. Bir diğer yöntem ise MODTRAN veri tabanı kullanılarak belirli mesafelerdeki ve irtifalardaki bilinen geçirgenlik değerlerini kullanmaktır.

Bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda işaretleyici ile hedef arasındaki geçirgenliği modellemek için MODTRAN; hedef ile lazer spot izleyici arasındaki geçirgenliği modellemek için ise tükenme katsayıları kullanılmıştır.



Şekil 2.2 Geçirgenlik-mesafe grafiği

MODTRAN veri tabanı kullanarak, tipik bir şehir ortamında, deniz seviyesinde 1064 nm ışınımın geçirgenliği modellenmiştir. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere geçirgenlik 1 km'de % 69,6, 2 km'de % 48,4 gibi makul değerlerde iken, 10 km'de % 2,7'ye kadar inebilmektedir.

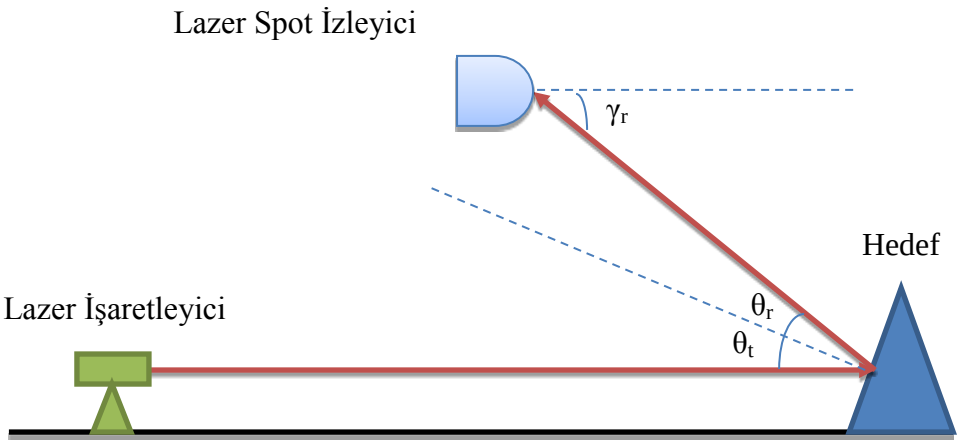


Şekil 2.3 Farklı ortam şartlarında yatay düzlemde geçirgenlik-mesafe eğrileri

Atmosferik geçirgenlik hava ve ortam şartlarından çok etkilenmektedir. Görülebilirlik (Visibility) arttıkça 1064 nm dalgaboyundaki geçirgenlik de artmaktadır. Şekil 2.3'te farklı hava ve ortam şartlarında geçirgenlik görülmektedir. Bulutsuz havada, yüksek irtifada geçirgenlik yüksek olurken, şehir ortamında ve düşük görülebilirlikte geçirgenlik azalmaktadır.

2.2 Hesaplamalar

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi lazer işaretleyiciden α_T saçılım açısı ile çıkan D_L çapında lazer ışını, hedefe ulaştığında A_b alanında bir lazer spotu oluşturacaktır (Jelalian 1992) Bu alandaki güç yoğunluğu lazerin gücüne ve işaretleyici ile hedef arasındaki atmosferik geçirgenliğe bağlıdır. Sonrasında hedefin özelliklerine bağlı olarak bu spot yansıtılacaktır. Lazer spot izleyici, hedefin normali ile arasındaki açıya ve atmosferik geçirgenliğe bağlı olarak bir enerjiye maruz kalacaktır. Lazer spot izleyici optik bileşenlerinin ve algılayıcısının özelliklerine göre algılama yapabilecektir.



Şekil 2.4 Akış şeması

2.2.1 Lazer güç hesabı

Bu hesaplamalarda işaretlemeyi gerçekleştiren lazerin gücünün 6,5 MW'lık olduğu ve işaretlemeyi 3000 metreden yaptığı göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca 0,2 mrad saçılım açısına sahip olduğu hesaba katılarak, hedefte oluşan lazer spotunun çapının hedefin çapından küçük olduğu varsayılmıştır.

2.2.1.1 Hedefte güç yoğunluğu

Lazer işaretleyiciden gönderilen lazer demetinin hedefte ne kadar büyüklükte bir spot oluşturduğu ve bu spotun güç yoğunluğu hesaplanacaktır.

R_T uzaklığında lazer demeti alanı:

$$A_b = \frac{\pi \ D_L + \alpha_T . R_T \ ^2}{4} \qquad (2.1)$$

D_L : Çıkan lazer demeti çapı = 0,008 m

α_T : Çıkan lazer demet saçılım açısı = 0,0002 rad

R_T = 3000 m

A_b: Hedefteki lazer spotunun alanı = 0,29033 m^2

Yayılan güç U cinsinden hedefteki güç yoğunluğu F :

$$F = \frac{U}{A_b} . \tau_h \tag{2.2}$$

U = 6.500.000 Watt

R_T uzaklığında lazer demetinin güç yoğunluğu (F) :

$$F = \frac{4.U}{\pi \ D_L + \alpha_T . R_T \ ^2} \ \tau_h \tag{2.3}$$

τ_h : Yatay atmosferik geçirgenlik = 0,811

F = 18.156.711 W/m^2

Bu hesaplama ile lazer demetinin hedefte ne kadarlık bir güç yoğunluğu olduğu hesaplanır. Bu hesap lazer demetinin yayılımı ve mesafeye bağlı olarak atmosferik sönümünü hesaba katar.

2.2.1.2 Hedef ışınımı

Öncelikle hedefteki güç yoğunluğu hedef yüzey alanının lazerin geliş doğrultusuna dik düzleme (Şekil 2.4) izdüşümü ile çarpılır (Denklem (2.6)). Daha sonra 2.2.1.1'deki denklemler toparlanarak bu hesaba dahil edilir.

$$G = F.\frac{A_N}{A} \tag{2.4}$$

$$A_N = A.\cos\theta_t \tag{2.5}$$

$$G = F.\cos\theta_t \tag{2.6}$$

Bu ifadede F değeri yazılırsa:

$$G = \frac{U.A_N}{A_b.A} e^{-(\sigma_w.\alpha_{Ht}.R_t)} \tag{2.7}$$

Ve bu ifadede de A_b değeri yazılırsa:

$$G = \frac{4.U.A_N}{A.\pi\ D_L + \alpha_T.R_T\ ^2} e^{-(\sigma_w.\alpha_{Ht}.R_t)} \quad (2.8)$$

θ_t : Hedef yüzeyinin normali ile gönderilen ışın arasındaki açı = 9,59°

$$G = \cos\theta_t \frac{4.U}{\pi\ D_L + \alpha_T.R_T\ ^2} e^{-(\sigma_w.\alpha_{Ht}.R_t)} \quad (2.9)$$

G: Lazer demetinin gücü = 17.902.973 W/m^2

2.2.1.3 Hedef parlaklığı

Hedefin parlaklığı ışıma seviyesine ve hedefin yansıma özelliklerine bağlıdır. Lazer enerjisinin hedefe ulaşan miktarının bir kısmı soğurulur, bir kısmı da düzgün (specular) veya yayılarak (diffuse) yansır. Bu durumların olma olasılıkları toplamı 1'e eşit olacak şekilde normalize edilmiştir. Hedefin Lambertian tipi ideal bir yayıcı yansıtıcı olduğunu varsayarsak, parlaklık (B) şu şekilde ifade edilir:

$$B = \frac{\rho_T.G}{\pi} \quad (2.10)$$

ρ_T : Hedef yansıtıcılığı: 0,3

B : Parlaklık = 1.709.608 W/m^2

2.2.1.4 Alıcıya ulaşan enerji

Hedeften alıcı açıklığına gelen güç E_R miktarı şu şekilde ifade edilir:

$$E_R = \frac{B.A_R.A_S}{R_R\ ^2} e^{-(\sigma_w.\beta_{Hr}.R_R)} \quad (2.11)$$

$$A_R = \frac{\pi\ D_R\ ^2}{4} \quad (2.12)$$

D_R : Alıcı açıklık çapı = 23 mm

A_R Alıcı açıklık alanı $= 415{,}48\ mm^2$

$R_R = 3000\ m$

$\frac{A_R}{{R_R}^2}$: Alıcı açıklığına gelen katı açı.

$$A_S = A_b . \cos\theta_r \tag{2.13}$$

θ_r : Hedef yüzeyinin normali ile gelen ışın arasındaki açı $(\theta_t) = 9{,}59°$

γ_r : Alıcı görüş açısı $= 0$ kabul edilir.

A_S : Alıcının görüş açısına dik düzlemde aydınlatılan nokta alanı $= 0{,}29\ m^2$

β_{Hr} : Deniz seviyesinden ölçülen yüksekliğe bağlı sönüm katsayısı $= 0{,}09$

$E_R = 17247\ nW$

τo_K : Koruyucu pencere geçirgenliği $= 0{,}85$

τo_F : Filtre geçirgenliği $= 0{,}7$

τo_M : Mercek geçirgenliği $= 0{,}95$

τo : Optik geçirgenlik $= \tau o_K . \tau o_F . \tau o_M = 0{,}56$

E_A : Algılayıcıya gelen güç $= E_R . \tau o = 9749\ nW$

E_D : Her dilimine gelen güç $= E_A/4 = 2437\ nW$

Ayrıca tüm denklemler bir araya getirilerek daha yaygın olarak bilinen güç yoğunluğu da hesaplanabilir:

Alıcı açıklığında güç yoğunluğu I :

$$I = \frac{E_R}{A_R}\ (W/m^2) \tag{2.14}$$

E_R yerine yazılırsa:

$$I = \frac{BA_R A_S e^{-\sigma_w \beta_{Hr} R_T}}{{R_R}^2} \cdot \frac{1}{A_R} \tag{2.15}$$

B yerine yazılırsa:

$$I = \frac{G\rho_t A_S e^{-\sigma_w \beta_{Hr} R_T}}{\pi {R_R}^2} \tag{2.16}$$

G yerine yazılırsa:

$$I = \frac{\cos\theta_t 4U\rho_t A_S e^{-\sigma_w \beta_{Hr} R_T} e^{-(\sigma_w \alpha_{Hr} R_R)}}{\pi {R_R}^2 \pi \left(D_L + \alpha_T R_T\right)^2} \tag{2.17}$$

A_S yerine yazılırsa:

$$I = \frac{4\rho_t UA \cos\theta_t \cos\theta_r e^{-\sigma_w (\beta_{Hr} R_T + \alpha_{Hr} R_R}}{\pi^2 \left(D_L + \alpha_T R_T\right)^2 {R_R}^2} \tag{2.18}$$

elde edilir.

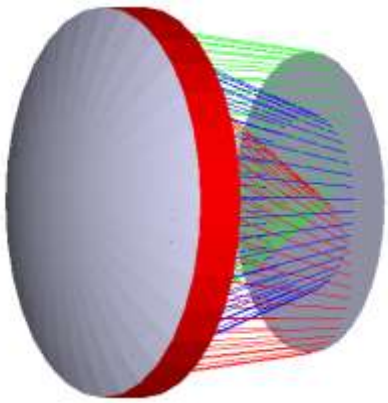
3. OPTİK TASARIM

Bu bölümde lazer spot izleyici sisteminde kullanılacak optik bileşenlerin sistem gereksinimlerine bağlı tasarımı ve seçimi anlatılmaktadır. Lazer demetini odaklayacak merceğin tasarımı ve seçimi, sistemi dış etkilere karşı koruyan koruyucu pencerenin tasarımı ve teknik çizimi, sistemde istenen dalgaboyu dışındaki ışınları geçirmeyecek bir filtre tasarımı ve seçimi anlatılıp, sistem bazında yapılan sıcaklık analizi anlatılacaktır. Son olarak sistem gereksinimleri ile ortaya çıkan tasarım karşılaştırılıp değerlendirilecektir.

3.1 Mercek Tasarımı ve Seçimi

İsterler

Mercek tasarımında dikkat edilecek en önemli husus doğrusal görüş açısı içerisinde Şekil 3.1'de görüldüğü gibi algılayıcının tüm dilimlerine yeterli optik gücü düşürebilmek ve genişletilmiş görüş açısı değerini sağlayabilmektir.

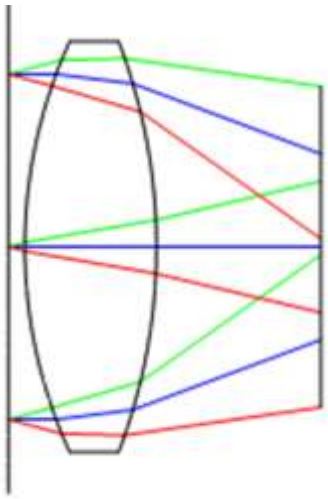


Şekil 3.1 Işınların farklı açılarda kırılması

Bu sistemde kullanılacak merceğin gereksinimleri çizelge 3.1'de verilmiştir:

Çizelge 3.1 Mercek gereksinimleri

Özellik	**İster**
Mercek Çapı	≤ 25,4 mm
Giriş Açıklığı	≥ 20 mm
Odak Uzunluğu	≤ 25 mm
Doğrusal Görüş Açısı	≥ 15°
Genişletilmiş Görüş Açısı	≥ 25°



Şekil 3.2 Optik tasarım gereksinimlerinin grafiksel gösterimi

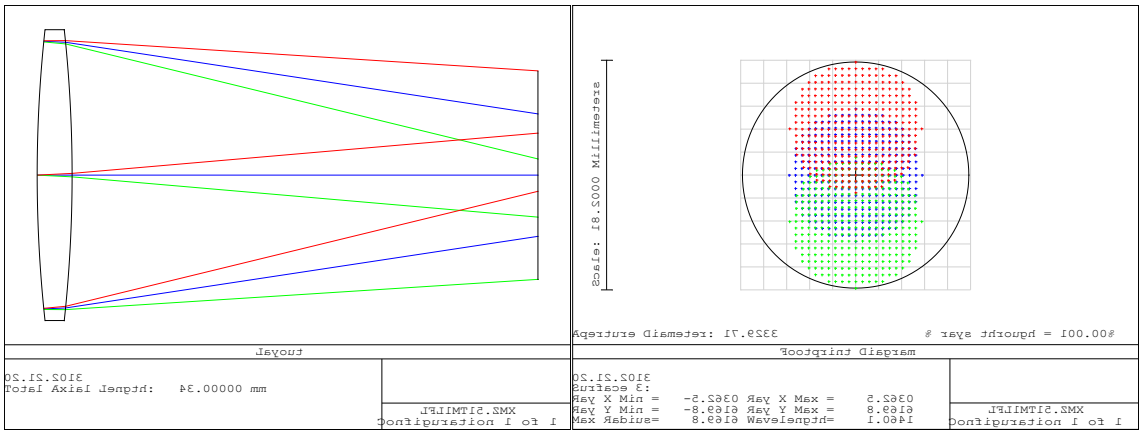
Doğrusal görüş açısının tanımı gereği; Şekil 3.2'de gösterildiği gibi +15° ve -15°'de spot sadece bir dilime değil, tüm dilimlere düşecek ve aynı zamanda algılayıcının yarıçapı kadar çapta bir daire oluşturacaktır.

Mercek yeterince kırıcı olmayınca ışınlar tüm dilimlere düşmemektedir. Bu durumda orantısal merkezleme yapılamamakta, sadece bang bang merkezleme yapılabilmektedir. Mercek yeterince kırıcı olmayınca ışınların oluşturduğu daire algılayıcıdan büyük kalmaktadır. Algılayıcı mercekten uzaklaştırılarak lazer dairesinin algılayıcının içine düşmesi sağlanabilir. Fakat bu durumda oransal kontrol bölgesi kaybolmuş olur. Bu sorunu bir arada çözmenin yolu merceğin kenarlara doğru daha az kırıcı, ortalara doğru daha fazla kırıcı davranmasıdır.

Tasarım süreci

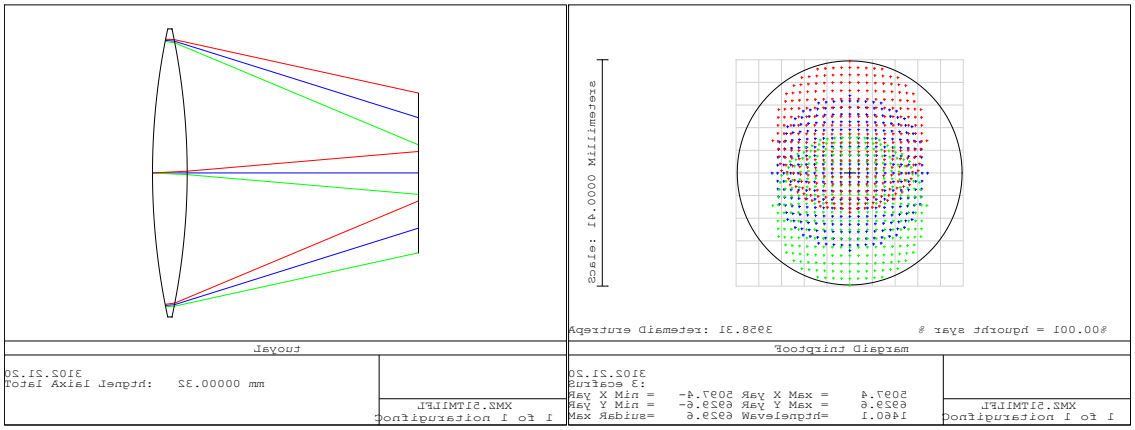
Tasarıma başlarken sistem gereksinimleri geniş tutulup merceğin temel görevi olan farklı açılardaki spotları farklı dilimlere odaklamaya önem verilmektedir.

İki eş eğrilik yarıçaplı küresel yüzey kullanarak yapılan tasarımda en büyük sorun mercek sonrası mesafe artırılırsa algılayıcı boyut gereksinimi sağlanır, fakat arka odak uzunluğu artar. Şekil 3.3'te gösterilen tasarımda arka odak uzaklığı 40 mm olmasına karşın algılayıcı boyu 18,2 mm olarak görülmektedir.



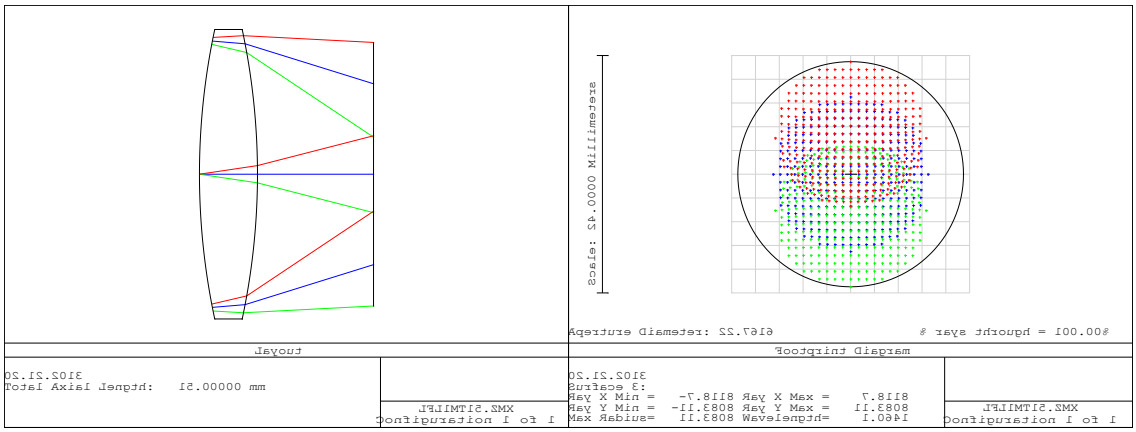
Şekil 3.3 Mercek tasarımı 1

Mercek yüzeylerinin eğrilik yarıçapı artırılarak ışınları daha çok kırması sağlanabilmektedir. Şekil 3.4'te gösterilen tasarımda arka odak uzaklığı 20 mm ve ışınlar 14 mm'lik algılayıcıya düşmektedir. Fakat bu tasarımda görüş açısı ± 5°'dir.



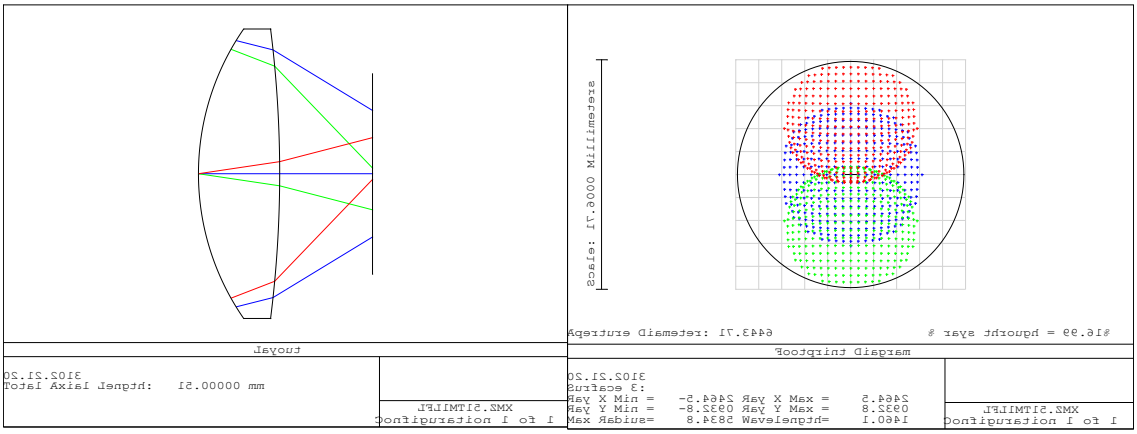
Şekil 3.4 Mercek tasarımı 2

Aynı tasarımda mercek kalınlığı biraz artırılıp, görüş açısı ±15°'e çıkarılıp, sistem boyu 15 mm'ye düşürülünce gerekli algılayıcı boyutu 24 mm'yi bulmaktadır. Şekil 3.5'te gösterilen tasarımdaki merceğin kırıcılığı artırılmalıdır.



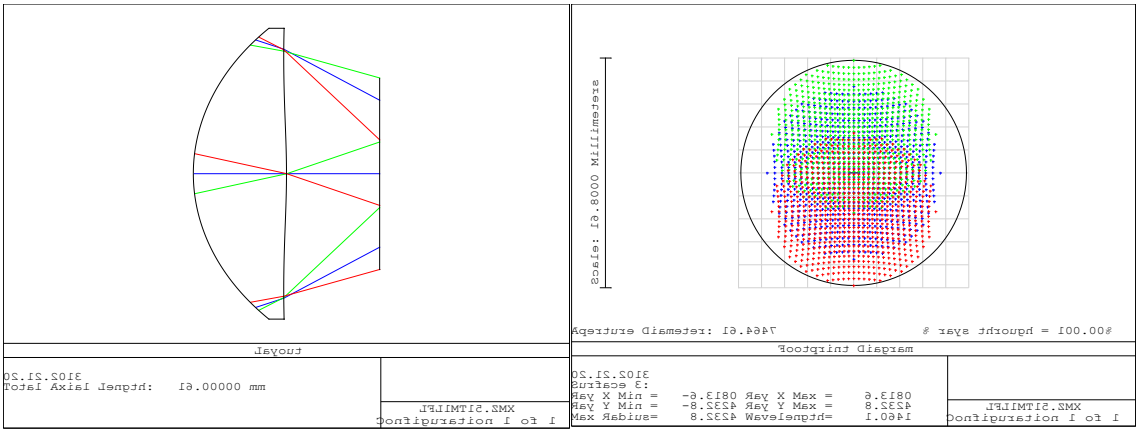
Şekil 3.5 Mercek tasarımı 3

Eş eğrilik yarıçapı olan yüzeyler yerine değişken eğrilik yarıçapı olan yüzeyleri daha kırıcı hale getirilerek arka odak uzaklığı küçültülebilmekle beraber spot boyutları da düşürülebilmektedir. Şekil 3.6'da gösterilen tasarımda kullanılabilir algılayıcı boyu 17,6 mm'ye kadar düşürülmüştür.



Şekil 3.6 Mercek tasarımı 4

Yüksek görüş açısındaki ışınlar, düşük görüş açısındaki ışınlardan farklı kırılmaktadır. Bunun sebeplerinden biri merceğin kenarlarına gelen ışınlarının mercek yüzeyinin normali ile yaptığı açının çok büyük olmasıdır. Ayrıca kenarlardaki ışınlar merkezdeki ışınlara oranla mercekte daha az yol kat ettiği için bu ışınları istenen algılayıcı boyuna odaklamak küresel (spheric) yüzeylerle mümkün değildir. Merkezdeki ışınların kenardaki ışınlara oranla farklı odaklanması için küresel olmayan (nonspherical) yüzeyler kullanılınırsa Şekil 3.7'de görüldüğü gibi ışınlar 16,8 mm'lik bir algılayıcı çapına düşebilmektedir.



Şekil 3.7 Mercek tasarımı 5

Bu durumda etkin odak uzaklığı çapından daha düşük olan ve küresel olmayan toplayıcı (Aspheric Condenser) tipi bir mercek bulmak gerekmektedir.

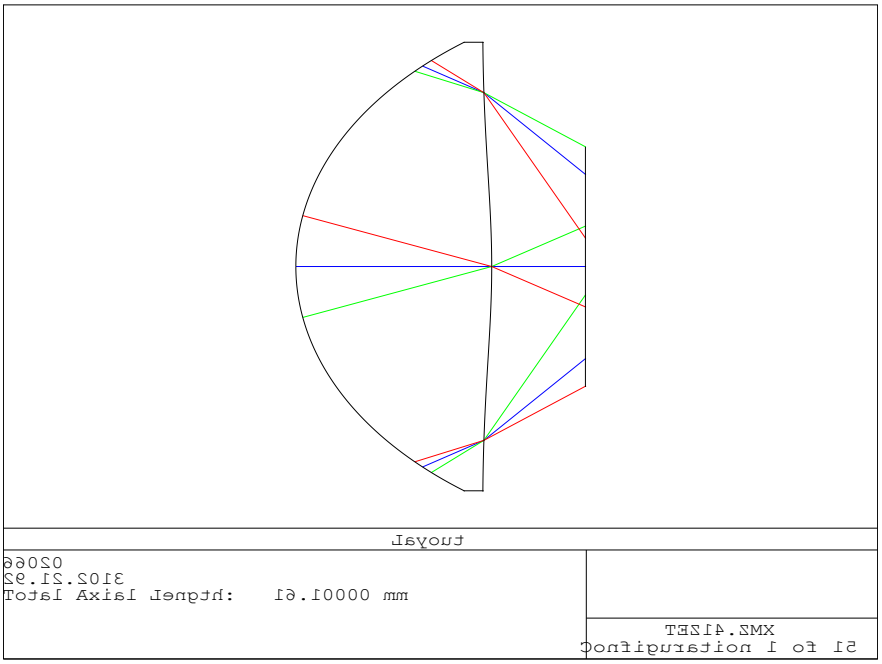
Mercek seçimi ve sonuçları

Yapılan tasarımlar doğrultusunda küresel olmayan toplayıcı tipi bir mercek seçilmesine karar verilmiştir. Bu doğrultuda Edmund Optics firmasının 66020 kodlu ürününün uygun olacağı değerlendirilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 Edmund Optics® 66020 model numaralı merceğin teknik özellikleri (Anonymous 2013)

Çap	25,00 mm
Çap Toleransı	+0,0/-0,15 mm
Optik Açıklık	23,00 mm
Etkin Odak Uzaklığı	17,50 mm
Arka Odak Uzaklığı	11,22 mm
Orta Kalınlığı (mm)	10,80 mm
Kenar Kalınlığı	1,05 mm
Yüzey Pürüzlülüğü	60-40
Merkezleme	3,00 arc dak
Tasarım Dalga Boyu	587,60 nm
Kaplama	NIR I
Malzeme	Zeonex® E48R
Çalışma Sıcaklığı Aralığı (°C)	-30...70°C

Bu mercek 14. dereceden asiferiklik katsayısına sahip ve ZEMAX'ta modellenmiştir. Şekil 3.8'te görüldüğü üzere bu mercek oldukça kırıcı bir mercektir. Mercek kalınlığı artmasına karşın toplam optik yol 16,1 mm olmuştur ve ±15°'de gereksinimleri sağlamaktadır.



Şekil 3.8 Edmund Optics® 66020 ZEMAX modeli

3.2 Koruyucu Pencere Tasarımı

Koruyucu pencerenin, optik sistemi dış etkilerden koruyacak ve optik başarımı etkilemeyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Koruyucu pencere isterleri

Çizelge 3.3'te sistemin koruyucu penceresi için gereksinimler verilmiştir.

Çizelge 3.3 Koruyucu pencere gereksinimleri

Kalınlık	≤ 4 mm
Çap	≤ 75 mm
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-40°C +80°C
Basınç Dayanımı	320 kPa
Geçirgenlik	≥ %85
Geometri	Küresel

Koruyucu pencere malzemeleri

Sistemin çalışacağı dalgaboyunda geçirgenlik, istenen basınç dayanımı ve kalınlık gereksinimlerini karşılayabileceği öngörülen dört çeşit malzeme belirlenmiştir. Bunlar safir, BK7, ZnS ve ZnSe'dır.

Tek kristalden büyütülerek üretilen safir, mekanik ve ısıl özellikleri açısından en iyi koruyucu pencere malzemelerinden biridir. Optik açıdan geçirgenliği yeterli olmasına karşın çift kırıcıdır (Daniels 2011). Bu durum görüntüleme sistemlerinde sorun teşkil etse de lazer uygulamalarında sorun teşkil etmemektedir. Mukavemeti ve sertliği en yüksek malzemelerden biri olmasına karşın maliyeti çok yüksektir (Harris 2013).

BK7 özellikle görünür bölge mercek üretiminde sıkça kullanılan bir malzemedir. 1064 nm dalgaboyunda kaplamasız halde % 90 geçirgenliğe sahiptir.

ZnS'ın optik geçirgenliği düşük olmasına karşın sıcaklığa karşı dayanımı çok iyi olan bir malzemedir. Çeşitli lazer dalgaboylarında çok düşük soğurma katsayısına sahip olan ZnSe bu sebepten ötürü pek çok lazer uygulamasında kullanılmaktadır (Daniels 2011). Geçirgenliği düşük olmasına karşın yansıtmaz kaplamalar ile yükseltilebilmektedir. Mekanik ve ısıl açıdan diğer malzemelerden daha düşük özelliklere sahiptir.

Koruyucu pencere tasarımı

Koruyucu pencerenin lazer spot izleyiciyi 2,8 bar (280 kPa)'lık bir dış basınçtan koruması gerekmektedir. Bunun için seçilecek malzemenin gerekli kalınlığı;

$$t = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta \cdot P_{ATM}}{\sigma_{MAKS}}} \qquad (3.1)$$

Çapın 75 mm'den düşük olduğu varsayılarak tasarlanan mekaniğe uygun çap belirlenmiştir:

$D: \text{Çap} = 72{,}6 \text{ mm}$

Koruyucu pencere, bütünleme yönteminde kontra halka kullanılıp kullanılmayacağı uygulamaya göre değişmektedir. Bu durumu esnek bırakmak açısından kontra halkasız yönteme göre tasarım kriteri belirlenmiştir:

$$\beta = \begin{matrix} 0{,}75, & \text{Kontra halkalı} \\ 1{,}125, & \text{Kontra halkasız} \end{matrix} = 1{,}125 \tag{3.2}$$

Atmosferik dış basıncın tasarımdaki uygulamasındaki değeri belirlenmiştir:

P_{ATM}: Atmosferik dış basınç MPa $= 0{,}28$ MPa

$$\sigma_{MAKS} = \frac{S_{MEAN}}{G.F.} \tag{3.3}$$

Örnek olarak safir malzemesinin mukavemeti girilmiştir:

S_{MEAN}: Mukavemet MPa $= 400$ MPa

Güvenlik faktörü seçilmiştir:

G. F. : Güvenlik Faktörü $= 12$

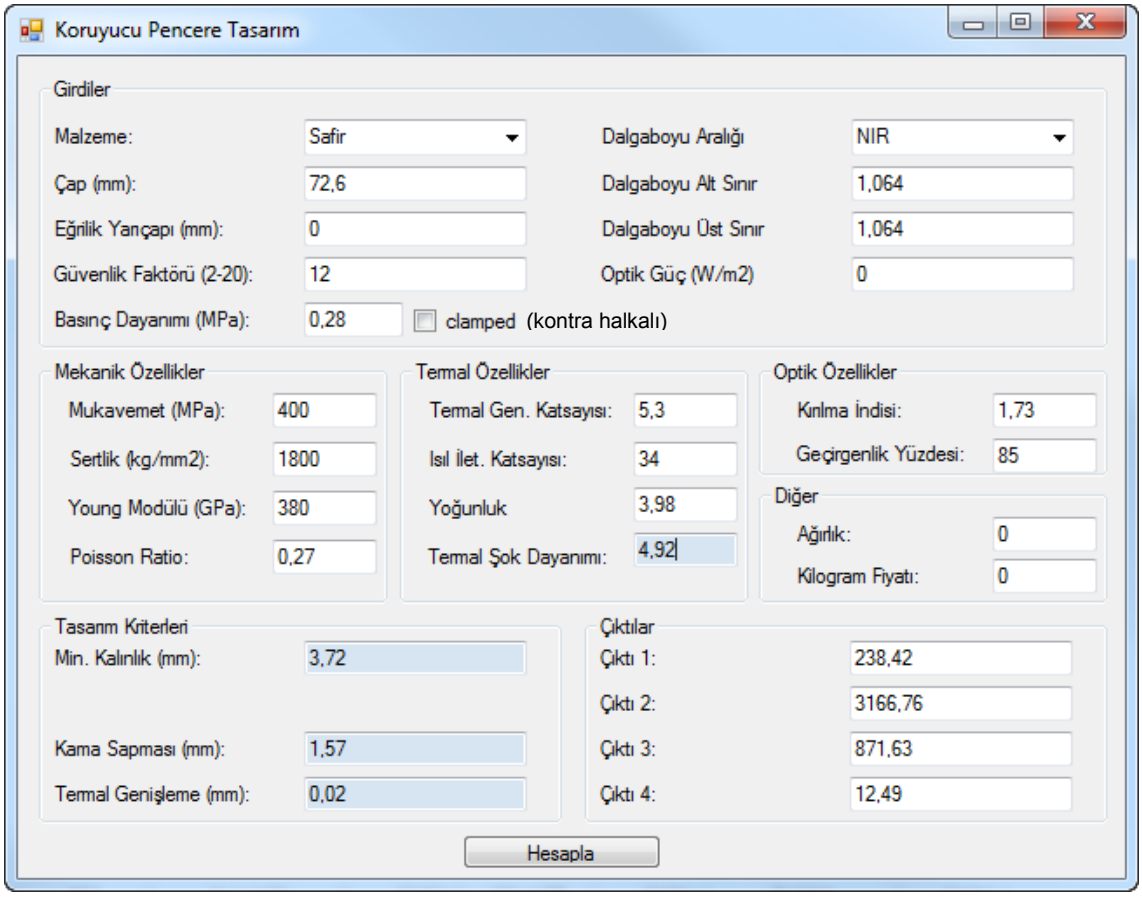
t: Minimum kalınlık $= 3{,}72$ mm olarak hesaplanmıştır.

Tüm malzemeler için gerekli kalınlık Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Çeşitli optik malzemelerin kıyaslaması

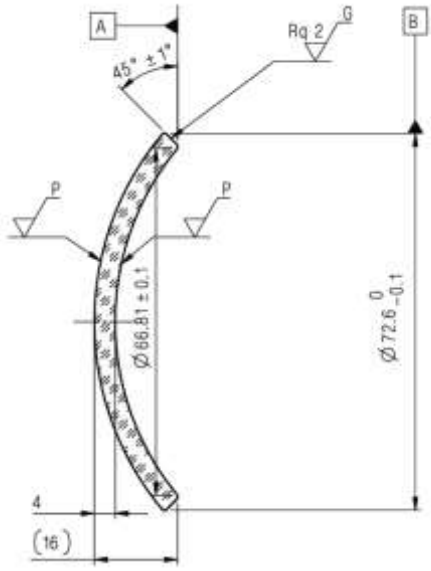
Malzeme	Safir	BK7	ZnS	ZnSe
Minimum Kalınlık (mm)	3,72	7,06	7,59	9,02
Geçirgenlik	% 85	% 90	% 65	% 60

Hem basınç dayanımı, hem de kalınlık gereksinimini sağlayan tek malzeme safir olduğu için koruyucu pencere malzemesi olarak safir seçilmiştir. Kalınlık arttıkça mukavemet arttığından dolayı kalınlığı 4 mm olarak alınmıştır.



Şekil 3.9 Koruyucu pencere tasarım programından bir ekran görüntüsü

Tasarlanacak koruyucu pencerede kullanılacak malzemenin mekanik, ısıl ve optik özelliklerini ve koruyucu pencere tasarım kıstaslarını hızlıca görebilmek için bir program yazılmıştır. Şekil 3.9'de bu programın arayüz görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.10 Koruyucu pencere teknik resmi

Bu hesaplar göz önünde bulundurularak pencerenin ISO 10110'a uygun teknik resmi çizilmiş olup Şekil 3.10'te gösterilmiştir.

3.3 Filtre Seçimi

Filtre isterleri

Silikon algılayıcılar görünür bölgeden yakın kızılötesi bölgeye kadar geniş bir aralıktaki elektromanyetik dalgalara karşı duyarlıdır. Dolayısıyla istenmeyen ışınları engellemek için bir filtre kullanmak gerekmektedir. Bu filtre olabildiğince dar bir dalgaboyu aralığında, olabildiğince yüksek bir geçirgenliğe sahip olmalıdır. Çizelge 3.5'te bu sistemde kullanılacak filtrenin gereksinimleri verilmektedir.

Çizelge 3.5 Filtre gereksinimleri

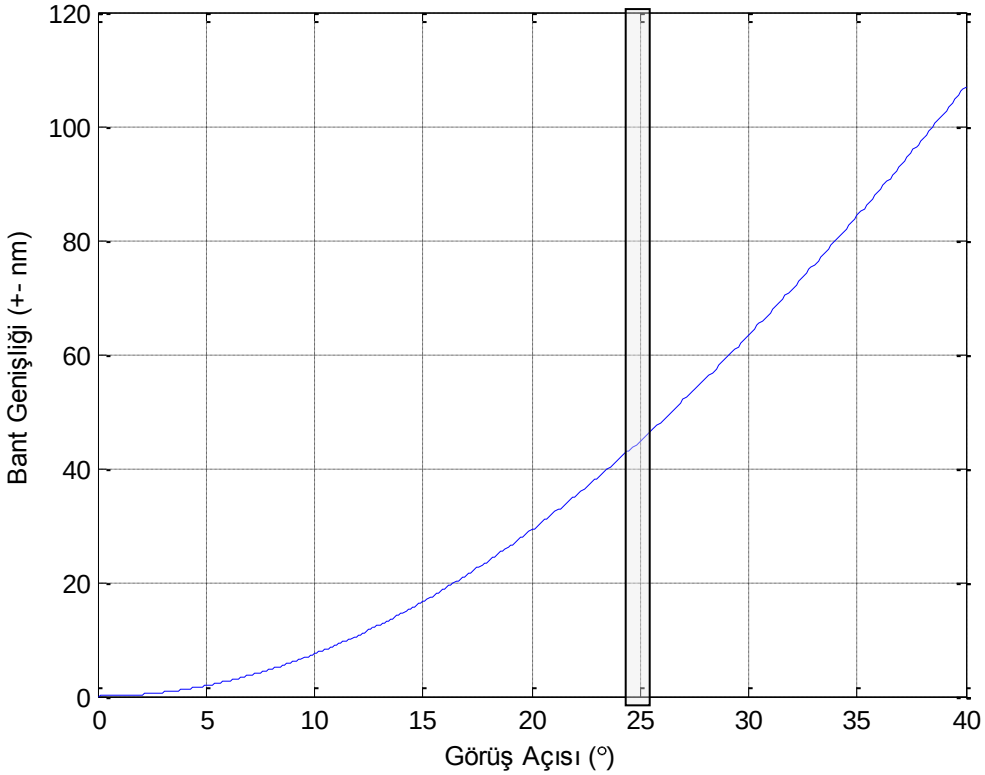
Dalgaboyu	1064 nm
Bant Genişliği	≤ 50 nm
Geliş Açısı	≥ ±25°
Geçirgenlik	≥ % 70

Bant genişliği ve geliş açısı arası bir denge bulunmalıdır.

Filtre tasarımı

$$\lambda = \lambda_{Merkez} \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_e}\right)^2 sin^2 \emptyset\varphi} \tag{3.4}$$

Borofloat malzemesinin kırılma indisi kullanılarak yapılan hesaplamanın sonucu Şekil 3.11'de verilmektedir.

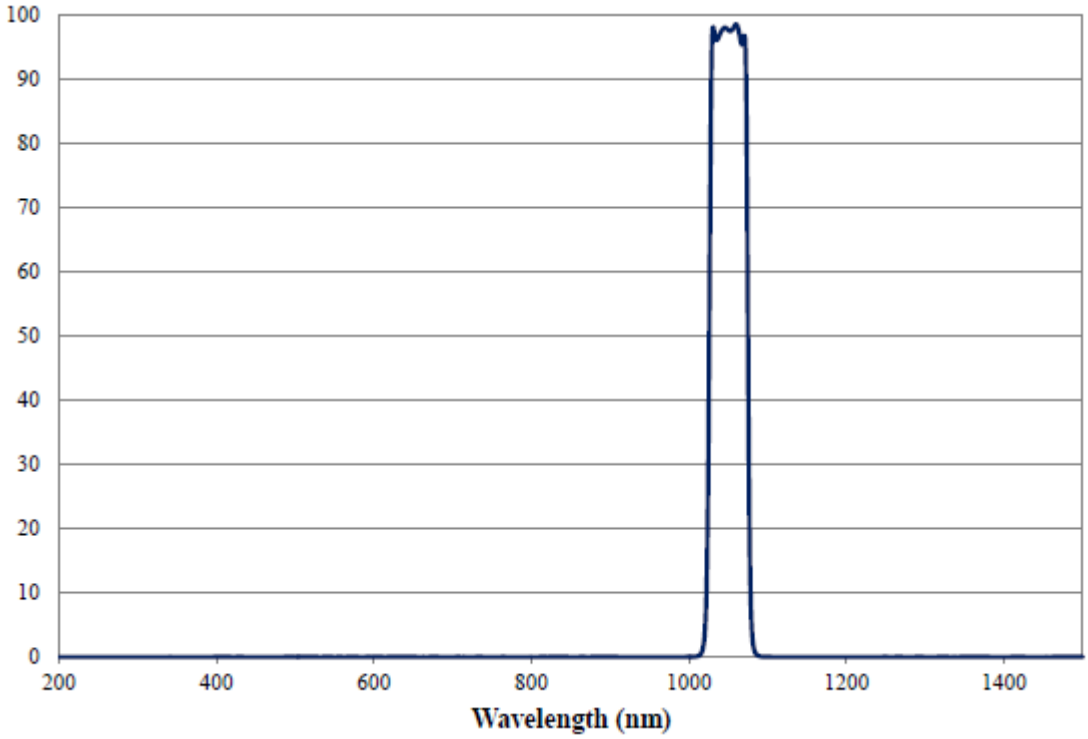


Şekil 3.11 Borofloat malzemesinin bant genişliği-görüş açısı grafiği

Bu grafiğe göre 25 derecelik görüş açısı için en az 46 nm'lik bant genişliği gerekmektedir. Kullanılacak filtrenin 50 nm bant genişliğinde olması uygundur.

Filtre seçimi

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda görüş açısı yüksek, dalgaboyu aralığı mümkün oldukça dar bir filtre seçilmesine karar verilmiştir. Bu doğrultuda Edmund Optics® firmasının 85905 kodlu ürününün uygun olacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 3.12 Edmund Optics® 85905 filtre geçirgenliği (Anonymous 2013)

3.4 Sıcaklık Analizleri

Tasarlanan sistemin optik performansının sıcaklık ile değişimi ZEMAX® programında modellenebilir. Bu analizde tüm optik ve mekanik elemanların sıcaklığa bağlı genleşmesi ve bunun doğuracağı sonuçlar hesaba katılmıştır. Optik elemanların genleşmesi sonucunda bu elemanlara giren ve çıkan ışınların açıları değişir. Mekanik elemanların ısıl genleşmesi sonucunda optik elemanlar arası mesafeler değişir ve bunun sonucu olarak sistemin genel performansı değişir. Son olarak kırılma indisi sıcaklığa bağlı olarak değişmesi sonucunda optik elemanların kırıcılıklarının değişeceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Sıcaklık analizi, sistemin çalışma sıcaklığı gereksinimlerine uygun olarak -40 ile 90°C arasında yapılmıştır. Bu bantta 10°C aralıklarla analiz yapılmıştır. Ayrıca, sistemin tasarımının yapıldığı sıcaklık olan 25°C'de de sistemin istenen değerleri çizelge 3.6-3.9'da görülmektedir.

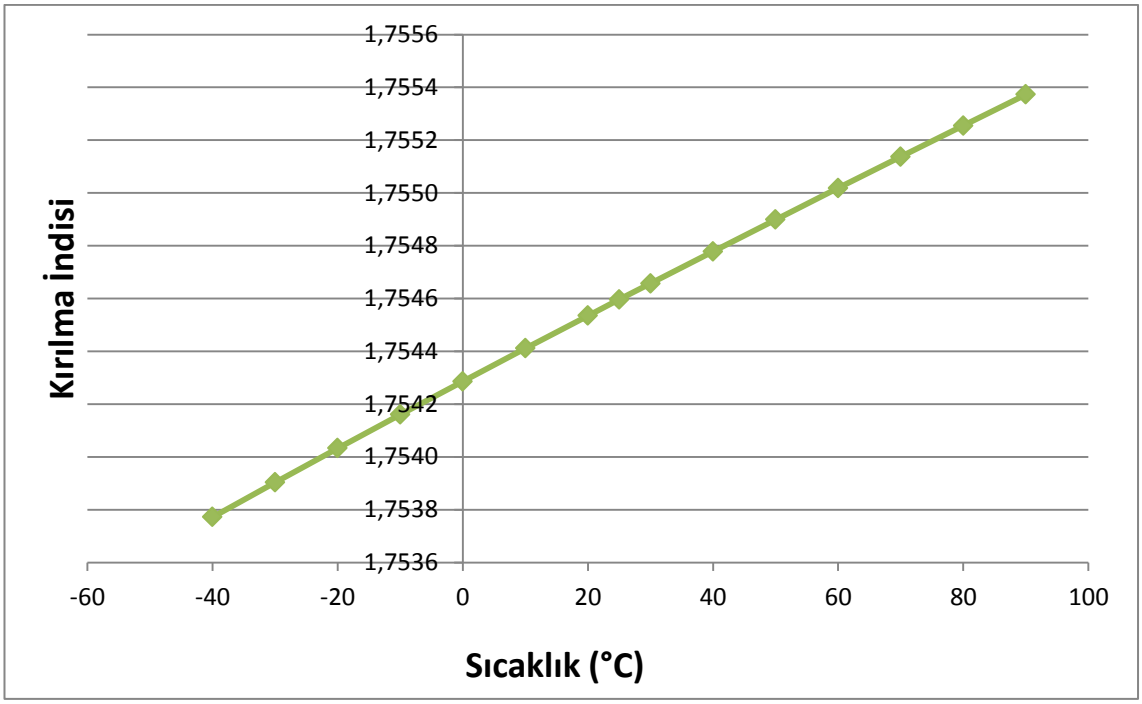
Bu analizlerde sıcaklığın, koruyucu pencerenin ve merceğin kırılma indisleri ve yarıçaplarına olan etkisi, sistemin tümünün uzunluğuna olan etkisi ve son olarak algılayıcıda oluşan spotun yarıçapına olan etkisi incelenmiştir.

Koruyucu pencere sıcaklık Analizi

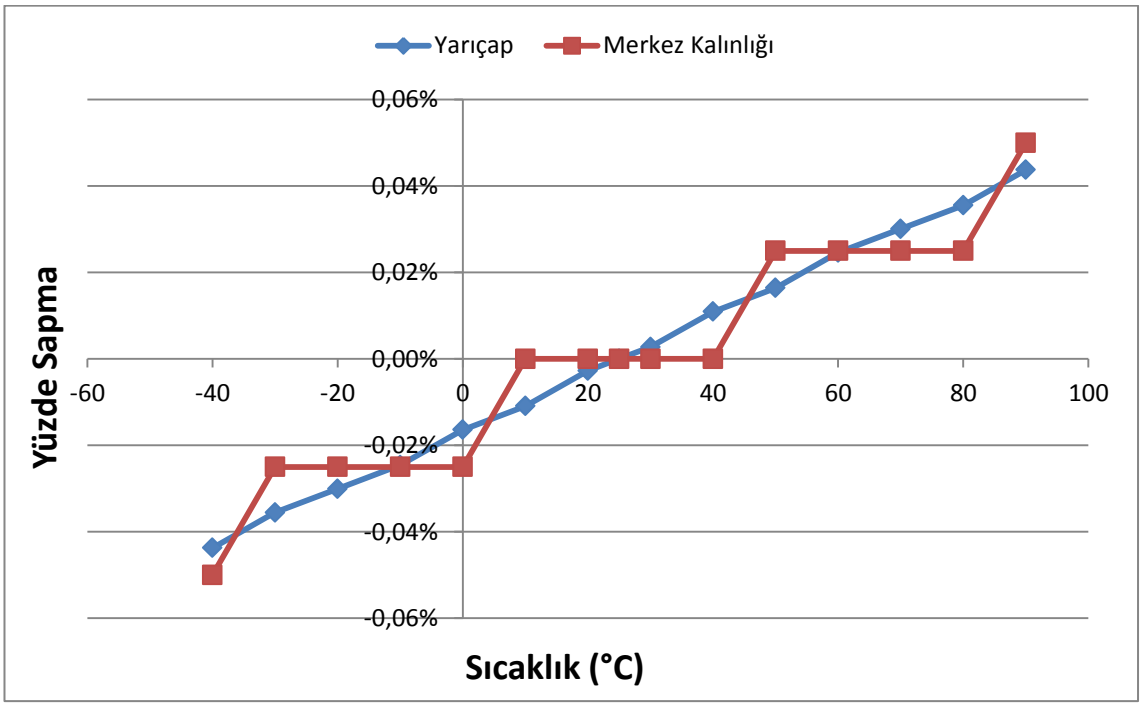
Çizelge 3.6 Koruyucu pencere sıcaklık analizi

Koruyucu Pencere						
Sıcaklık (°C)	**Kırılma İndisi**		**Yarıçap (mm)**		**Merkez Kalınlığı (mm)**	**% Fark**
	Kırılma İndisi	**%Fark**	**Yarıçap**	**%Fark**		
-40	1,7538	-0,05	36,569	-0,04	3,998	-0,05
-30	1,7539	-0,04	36,572	-0,04	3,999	-0,02
-20	1,7540	-0,03	36,574	-0,03	3,999	-0,02
-10	1,7542	-0,02	36,576	-0,02	3,999	-0,02
0	1,7543	-0,02	36,579	-0,02	3,999	-0,02
10	1,7544	-0,01	36,581	-0,01	4,000	0,00
20	1,7545	0,00	36,584	0,00	4,000	0,00
25	**1,7546**	**0,00**	**36,585**	**0,00**	**4,000**	**0,00**
30	1,7547	0,00	36,586	0,00	4,000	0,00
40	1,7548	0,01	36,589	0,01	4,000	0,00
50	1,7549	0,02	36,591	0,02	4,001	0,03
60	1,7550	0,02	36,594	0,02	4,001	0,03
70	1,7551	0,03	36,596	0,03	4,001	0,03
80	1,7553	0,04	36,598	0,04	4,001	0,03
90	1,7554	0,04	36,601	0,04	4,002	0,05

Koruyucu pencerenin kırılma indisindeki değişim % 0,05'i aşmamaktadır (Şekil 3.13). Bu değişimin yaratacağı etki çok düşük olup sistemin genel performansını tek başına etkilemese de, sistem geneline küçük bir etkisi olacaktır. Yarıçaptaki değişim de ±0.02 mm olup, mekanik tasarım toleranslarını karşılayabilecek şekildedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.13 Koruyucu pencere kırılma indisi-sıcaklık grafiği



Şekil 3.14 Koruyucu pencere geometrik boyutlar-sıcaklık grafiği

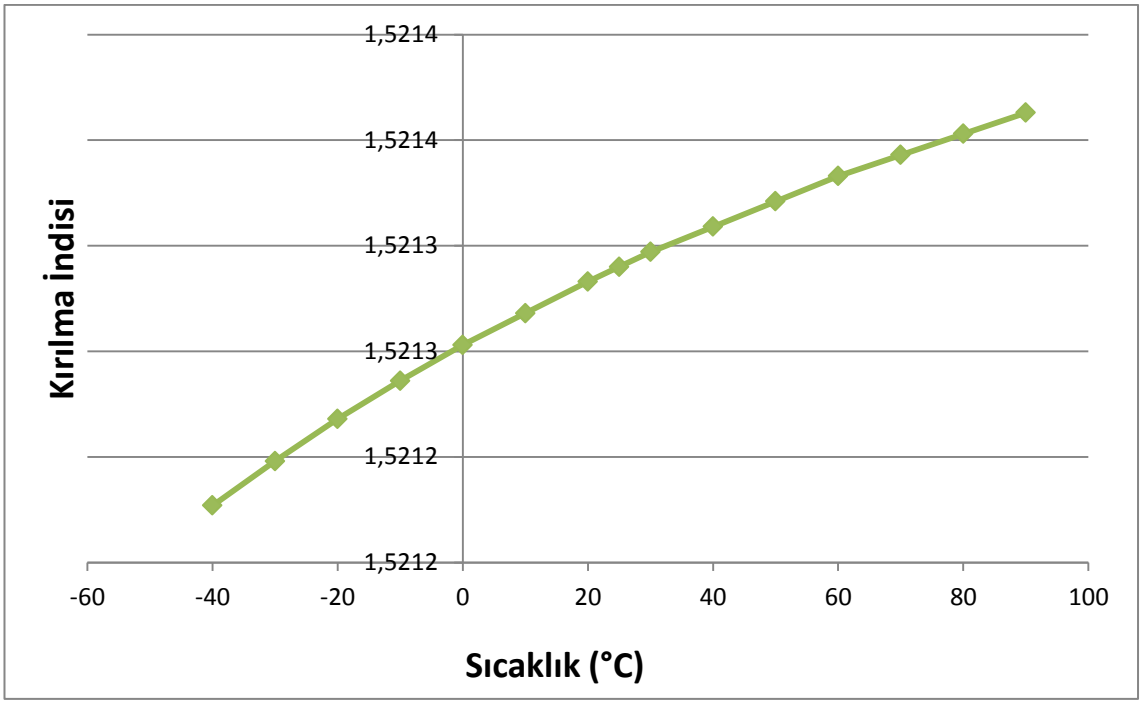
Mercek sıcaklık analizi

Sistemdeki tek odaklayıcı optik eleman mercek olduğundan kırılma indisinde büyük bir değişim olmaması gerekmektedir. Mercek malzemesinin plastik olmasından ötürü genleşmeden dolayı uzama ve kısalma miktarının yüksek olabileceği öngörülmektedir.

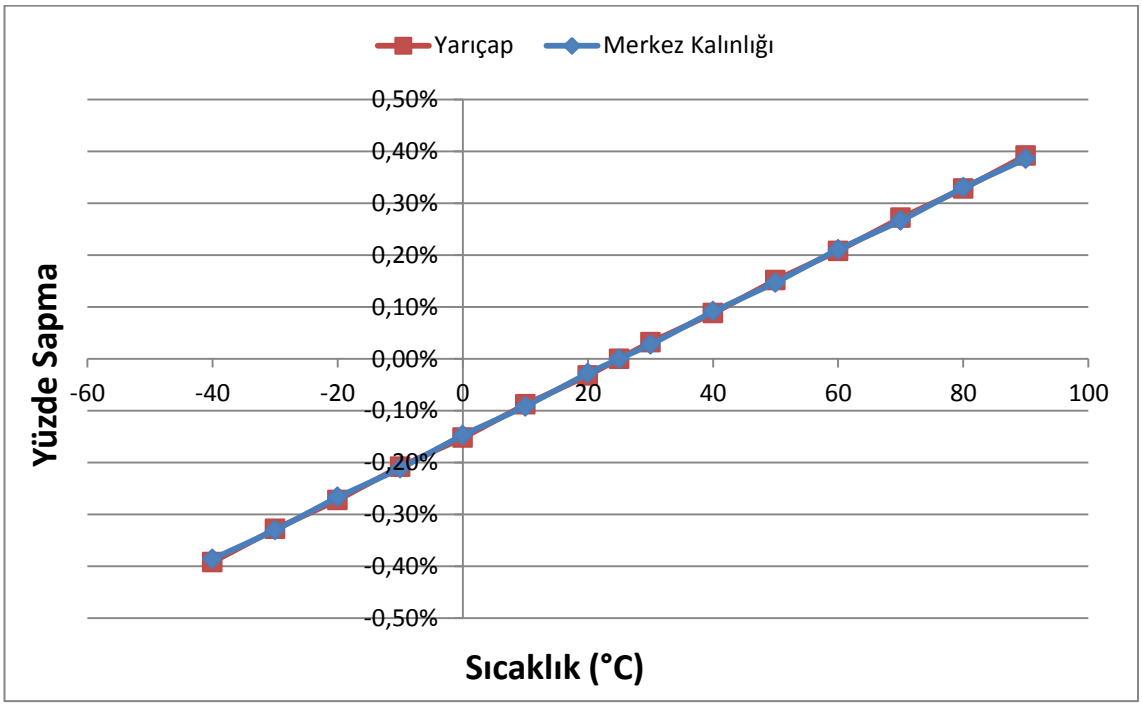
Çizelge 3.7 Mercek sıcaklık analizi

Mercek						
Sıcaklık (°C)	**Kırılma İndisi**		**Yarıçap (mm)**		**Merkez Kalınlığı(mm)**	**% Fark**
	Kırılma İndisi	**%Fark**	**Yarıçap**	**%Fark**		
-40	1,5212	-0,01	12,451	-0,39	10,848	-0,39
-30	1,5212	-0,01	12,459	-0,33	10,854	-0,33
-20	1,5212	0,00	12,466	-0,27	10,861	-0,27
-10	1,5212	0,00	12,474	-0,21	10,867	-0,21
0	1,5213	0,00	12,481	-0,15	10,874	-0,15
10	1,5213	0,00	12,489	-0,09	10,880	-0,09
20	1,5213	0,00	12,496	-0,03	10,887	-0,03
25	**1,5213**	**0,00**	**12,500**	**0,00**	**10,890**	**0,00**
30	1,5213	0,00	12,504	0,03	10,893	0,03
40	1,5213	0,00	12,511	0,09	10,900	0,09
50	1,5213	0,00	12,519	0,15	10,906	0,15
60	1,5213	0,00	12,526	0,21	10,913	0,21
70	1,5213	0,00	12,534	0,27	10,919	0,27
80	1,5214	0,00	12,541	0,33	10,926	0,33
90	1,5214	0,00	12,549	0,39	10,932	0,39

Merceğin kırılma indisindeki değişim % 0,01'i aşmamaktadır (Şekil 3.15). Yarıçaptaki değişim de ±0.05 mm olup, mekanik tasarım toleranslarını karşılayabilecek şekildedir (Şekil 3.16). Yüzde olarak yarıçap çok etkilense de merceğin boyutunun düşük olması genleşme miktarının etkisini azaltmaktadır.



Şekil 3.15 Mercek kırılma indisi-sıcaklık grafiği



Şekil 3.16 Mercek geometrik boyutlar-sıcaklık grafiği

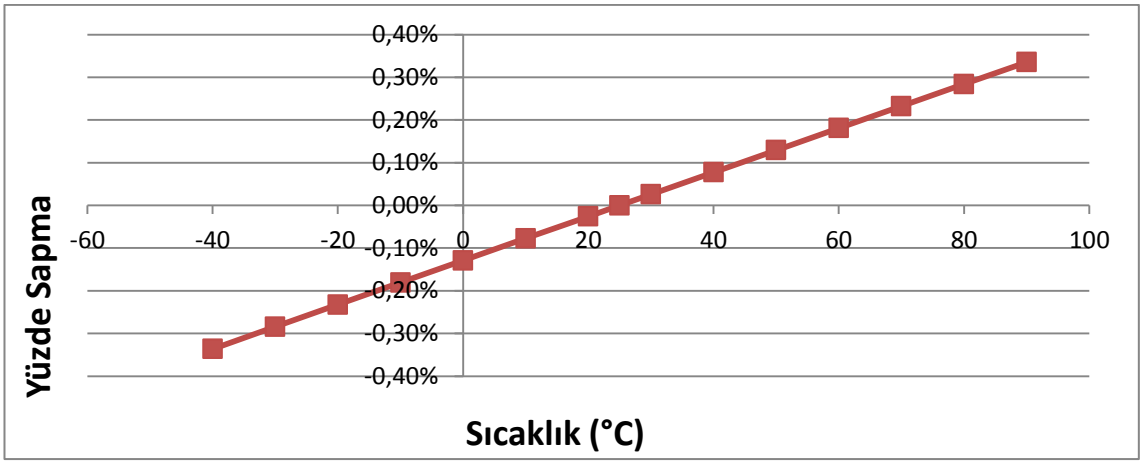
Optomekanik yapının sıcaklık analizi

Optomekanik yapının malzemesi alüminyum olarak seçilmiştir. Bu malzemenin de aynı sıcaklığa maruz kaldığı göz önüne alındığında ve tüm optik bileşenlerin genleşmeleri ve kırılma indisi değişimleri de hesaba katılınca sistemin uzunluğu Çizelge 3.8'deki gibi verilmektedir.

Çizelge 3.8 Sistem uzunluğu sıcaklık analizi

Sıcaklık (°C)	**Sistem Uzunluğu (mm)**	**% Fark**
-40	40,9419	-0,34
-30	40,9632	-0,28
-20	40,9844	-0,23
-10	41,0057	-0,18
0	41,0269	-0,13
10	41,0482	-0,08
20	41,0694	-0,03
25	**41,0800**	**0,00**
30	41,0906	0,03
40	41,1118	0,08
50	41,1330	0,13
60	41,1543	0,18
70	41,1755	0,23
80	41,1966	0,28
90	41,2178	0,34

Sistemin uzunluğundaki değişim yüksek sıcaklıklarda yaklaşık 0,2 mm ve düşük sıcaklıklarda ise – 0,1 mm'dir.



Şekil 3.17 Sistem boyu yüzde sapma-sıcaklık eğrisi

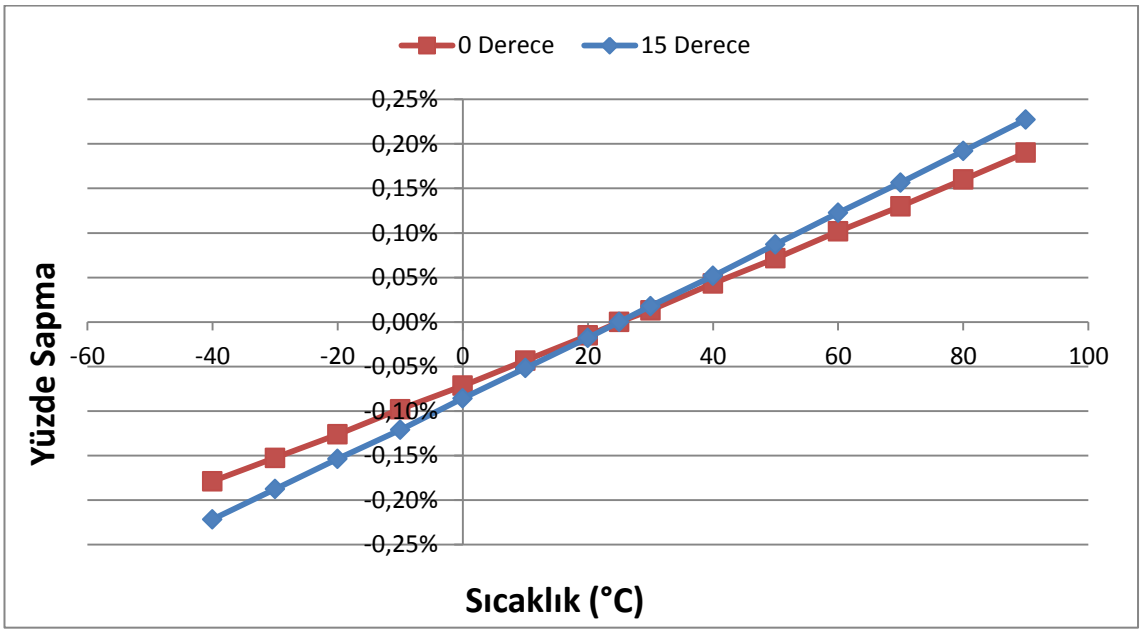
Spot yarıçapı sıcaklık analizi

Spot yarıçapının, sıcaklığın optik bileşenler üzerinde etkisi ile değişiminin sistem başarımını etkilememesi için yarıçapının fazla değişmemesi gerekmektedir. Dört dilim algılayıcının dilimleri arasındaki boşluk 76 mikrometre olduğu göz önünde bulundurulursa spot yarıçapındaki değişimin bu boşluktan az olması beklenmektedir.

Çizelge 3.9 Spot yarıçapı-sıcaklık analizi

Sıcaklık (°C)	**0°'de Spot Yarıçapı**		**15°'de Spot Yarıçapı**	
	Yarıçap (mm)	**% Fark**	**Yarıçap (mm)**	**% Fark**
-40	5,3019	-0,18	6,7563	-0,22
-30	5,3033	-0,15	6,7586	-0,19
-20	5,3047	-0,13	6,7609	-0,15
-10	5,3062	-0,10	6,7631	-0,12
0	5,3076	-0,07	6,7655	-0,09
10	5,3091	-0,04	6,7678	-0,05
20	5,3106	-0,02	6,7701	-0,02
25	**5,3114**	**0,00**	**6,7713**	**0,00**
30	5,3121	0,01	6,7725	0,02
40	5,3137	0,04	6,7748	0,05
50	5,3152	0,07	6,7772	0,09
60	5,3168	0,10	6,7796	0,12
70	5,3183	0,13	6,7819	0,16
80	5,3199	0,16	6,7843	0,19
90	5,3215	0,19	6,7867	0,23

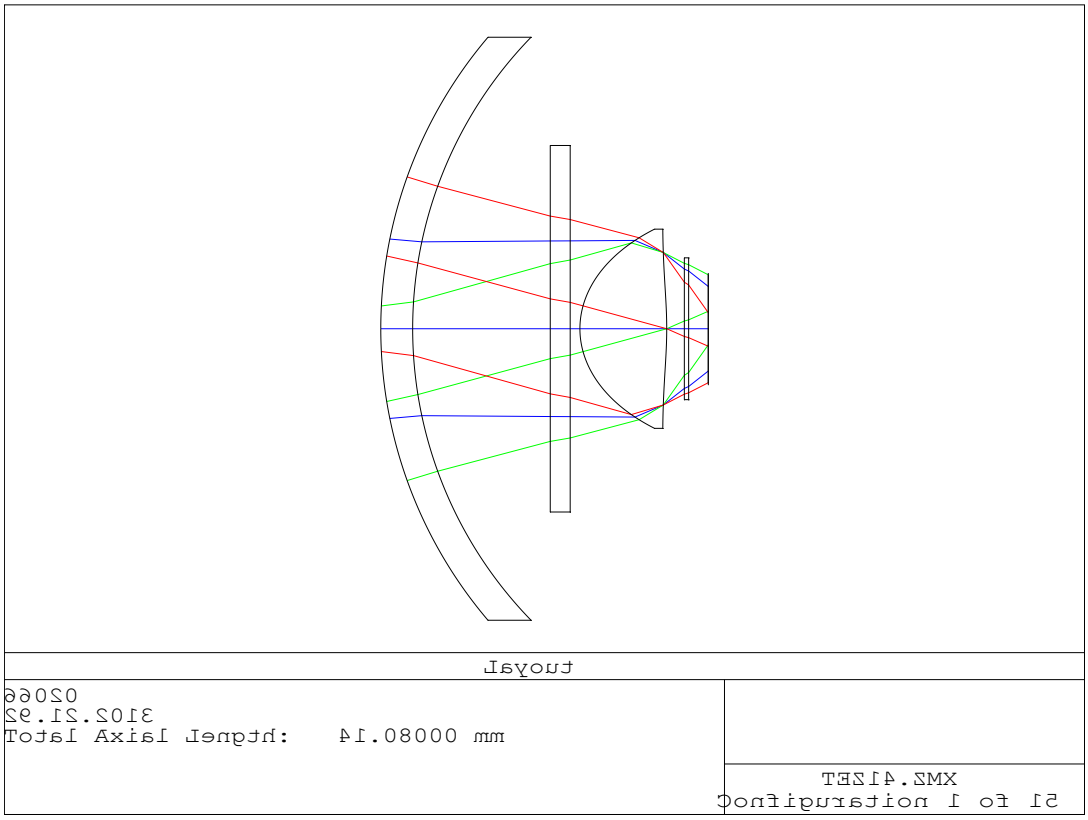
Spot yarıçapında 0 derecede en fazla 10 mikrometre civarında, 15 derecede ise en fazla 15 mikrometre civarında bir değişiklik gözlenmiştir. Çizelge 3.9'da görüldüğü üzere spot yarıçapının bu değişimi kabul edilebilir bir değerdir.



Şekil 3.18 Spot çapı yüzde sapma-sıcaklık eğrisi

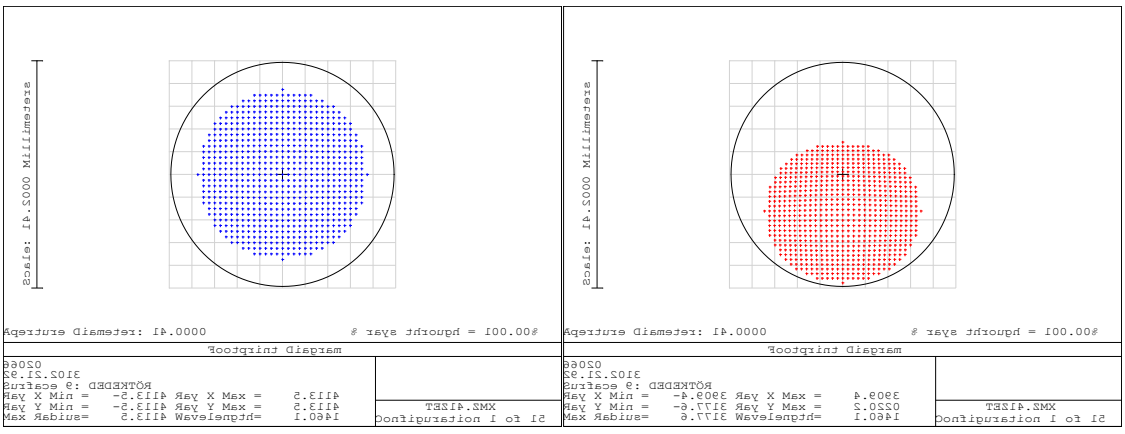
3.5 Sistem Tasarım Analizi

Gereksinimler göz önünde bulundurularak yapılan optik tasarımın sonucunda uygun görülen bileşenler Zemax programında modellenmiştir. Bu modellemenin sonucunda optik sistem dizilimi Şekil 3.19'da verilmiştir.



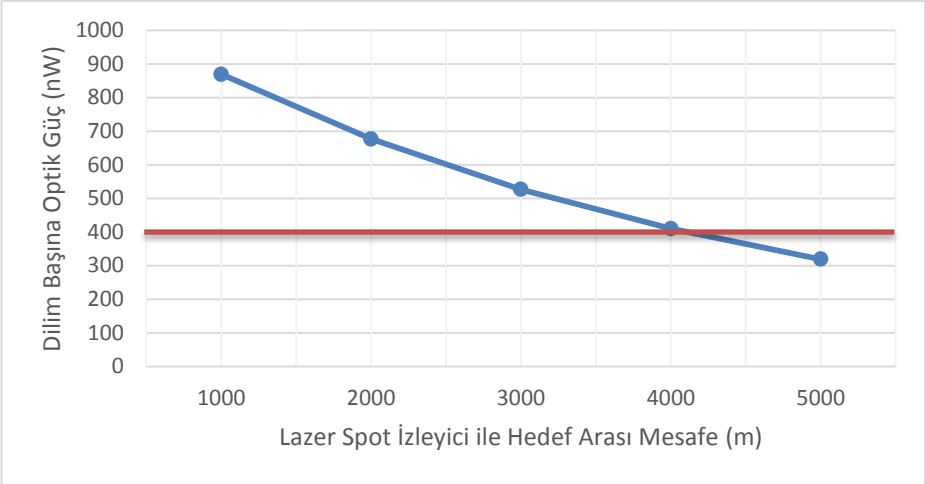
Şekil 3.19 Optik sistemin dizilimi

Şekil 3.19'da görüldüğü gibi sistem boyut gereksinimlerini karşılamaktadır. Lazer spot izleyicinin 0° ve 15° görüş açılarındaki spot şekilleri Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20 0° ve 15° görüş açılarında algılayıcıya gelen ışınlar

Şekil 3.20'de görülüğü gibi spot 0°'de tüm dilimlere düzgün bir şekilde yayılmakta olup, 15°'de algılayıcının dışına çıkmaksızın tüm dilimlere düşmektedir.



Şekil 3.21 15° görüş açısında tek dilime gelen optik güç – mesafe grafiği

Bölüm 2.2.1'de yapılan enerji hesabında görüş açısı 0 derece alınmıştır. Yüksek görüş açılarında Şekil 1.4'te gösterildiği gibi dilimlere spotun küçük bir alanı düşmektedir. Lazer spotunun maruz kaldığı optik güç, üzerine düşen alanla doğru orantılıdır. 15 derece görüş açısında en az sinyal alan dilime düşen optik güç Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Bölüm 1.3.2.4'te seçilen algılayıcının algılayabildiği en düşük sinyal seviyesi 400 nW'tır. Şekil 3.21'deki grafiğe göre sistemin istenen görüş açısında algılama menzili yaklaşık 4 km'dir.

Çizelge 3.10 Sistem tasarım gereksinim ve sonuç karşılaştırma çizelgesi

	Gereksinim	Sonuç
Algılama Menzili	≥ 3 km	4 km
Doğrusal Görüş Açısı	≥ ± 15°	± 18°
Genişletilmiş Görüş Açısı	≥ ± 25°	± 30°
Dalgaboyu	1064 nm	1064 nm
Optik Sistem Boyu	≤ 50 mm	41.08
Mercek Sayısı	1	1
Geçirgenlik	≥ % 50	% 56

Çizelge 3.10'de görüldüğü gibi tasarım sonuçları tüm sistem gereksinimlerini karşılamakta hatta aşmaktadır.

4. BAŞARIM TESTLERİ

4.1 Deney Düzeneği

Tüm tasarım ve analizler TÜBİTAK SAGE'nin Optomekatronik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Tüm test cihazlarının seçimi ve alımı bu sisteme uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Yazılımlar

- Microsoft Visual Studio: Koruyucu pencere tasarım programının derlemesinde kullanılmıştır.
- MATLAB: Lazer benzetim ve güç hesap programı, veri analiz ve kalibrasyon yazılımlarının derlenmesinde kullanılmıştır.
- ZEMAX: Optik sistem tasarımı ve analizleri ve opto-mekanik tolerans ve termal performans testleri için kullanılmıştır.
- Unigraphics NX: Tüm optik ve mekanik elemanların katı modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

İki Eksenli Motorlu Döner Tabla Sistemi

Motorlu döner tablalar lazer spot izleyiciyi bağlayıp çeşitli açılara getirerek hedef ışının görüş açısının benzetimi için kullanılmaktadır. Newport firmasından alınan motorlar bilgisayar kontrolü ile istenen açı komutlarını 0,002 derece hassasiyette gerçekleştirebilmektedir. Bu tablalar üst üste takılarak iki eksende hareket sağlanmaktadır. Bu sistem sayesinde her iki eksende de istenen açılara hassas bir şekilde ulaşılıp test yapma imkanı mümkün olmaktadır.

Darbeli Lazer Üreteci ve Lazer Kolimatör

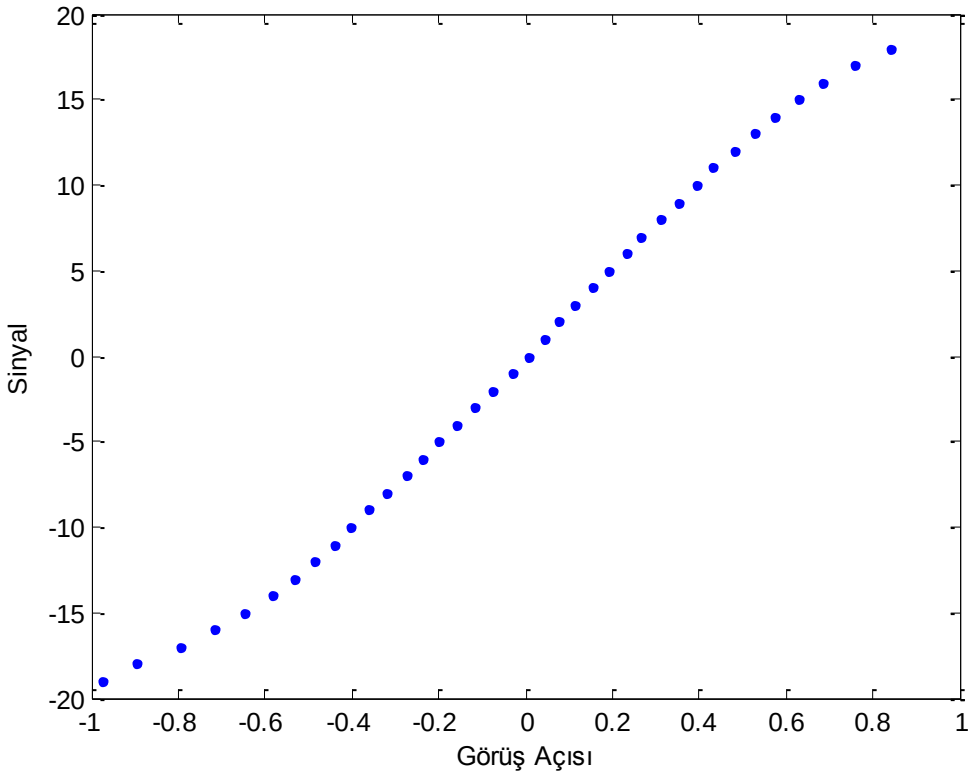
SBIR firmasından darbeli lazer üreteci temin edilmiştir. Test sistemi içerisinde darbe genişliği, sıklığı ve çıkış enerjisi ayarlanabilir bir fiber lazer ve bir kolimatörden oluşmaktadır.



Şekil 4.1 SBIR Infinity darbeli lazer üreteci ve kolimatör

4.2 Çizgisellik Düzeltmeleri

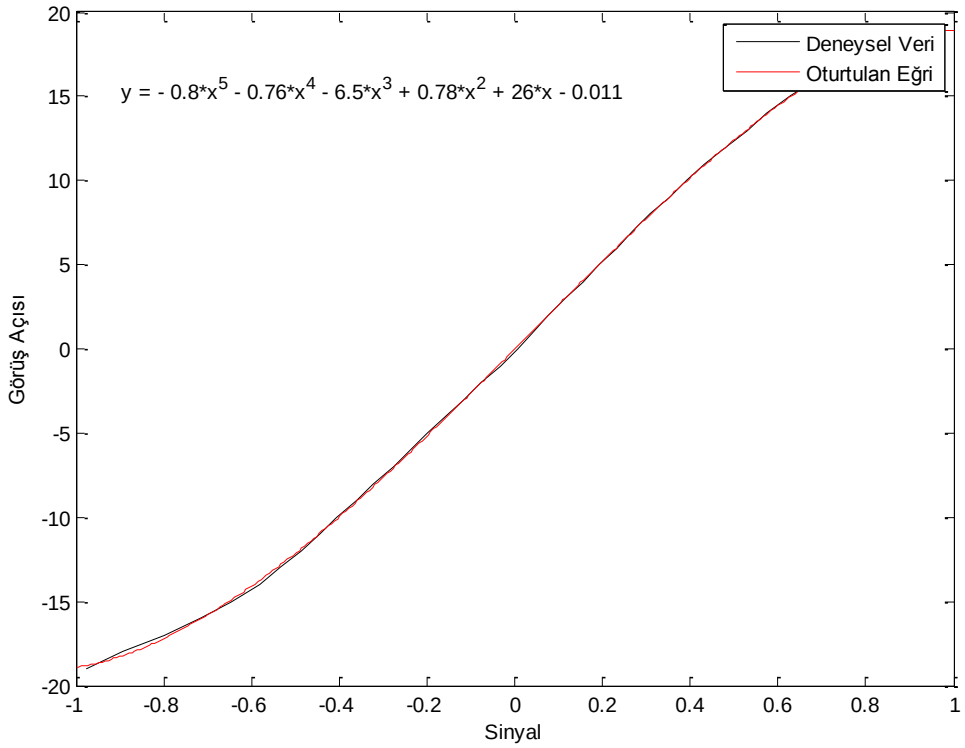
Laboratuvar ortamında görüş açısına göre elde edilen veriler doğrultusunda bir kalibrasyon yöntemi oluşturularak sisteme çeşitli düzeltme fonksiyonları yüklenmiştir. Bu fonksiyonların amacı sistem üzerinde alınan veriye göre bu fonksiyonlar kullanılarak açı bilgisi elde etmektir.



Şekil 4.2 ±30° görüş açısında 1° aralıklarla alınan deneysel veri

Tek eksende ±30 derecede tarama yapılarak 1 derece aralıklarla veri alınmıştır (Şekil 4.2). Bu veriye göre ±18°'de oransal olarak algılama yapılabilmektedir. ±18° ve üstündeki açılarda "bang bang" algılama yapılmaktadır. Bu durumda "bang bang" algılama yapılan bölgedeki verileri sabit almak mümkündür, yani –1 veya 1 alınır. Aradaki oransal bölgede ise açı bilgisi gerekmektedir.

Bu test düzeneğinde açıyı sisteme girdi olarak verdiğimizden dolayı bu bilgileri işleyerek daha sonra tersine, gelen veriye göre hangi açıda olduğu bilgisini çıktı olarak almak gerekmektedir. Bunu yapabilmek için ±18°'lik bölgedeki grafiğe uygun bir polinom oturtarak bu polinomun katsayıları daha sonra sisteme yüklenecektir. Gelen veriden açı bilgisini çıkarmak için de bu katsayılar kullanılacaktır.



Şekil 4.3 ±18 derece görüş açısında oturtulmuş eğri

Test sonucunda ortaya çıkan Şekil 4.3'teki grafiğe Matlab'daki eğri uydurma aracı kullanılarak 5. dereceden bir polinom oturtulmuştur. Bu grafikte x ekseni sinyal, y ekseni görüş açısıdır. Oturtulan polinom ve katsayıları aşağıda verilmiştir:

$$y = p_1 \cdot x^5 + p_2 \cdot x^4 + p_3 \cdot x^3 + p_4 \cdot x^2 + p_5 \cdot x + p_6 \tag{4.1}$$

$$p_1 = -0{,}7974$$

$$p_2 = -0{,}7634$$

$$p_3 = -6{,}5028$$

$$p_4 = -0{,}7842$$

$$p_5 = 26{,}2350$$

$$p_6 = -0{,}0115$$

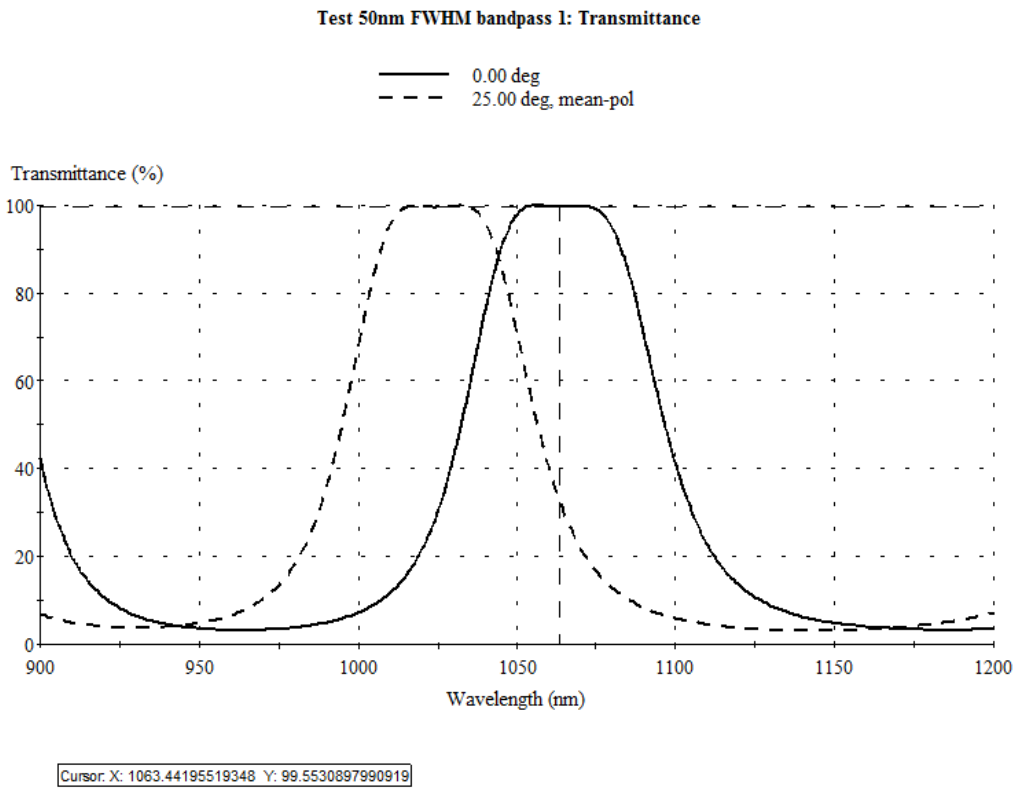
5. SONUÇ

Yapılan testler sonucunda tasarım gereksinimlerinden algılama menzili, optik sistem boyu, mercek sayısı ve geçirgenlik gereksinimleri karşılanmış olup görüş açıları veya dalgaboyu aralığı gereksinimlerinin ikisi birden sağlanamamıştır. Bu tasarımın 2 farklı sonucu çıkmıştır. Bu sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Sistem gereksinimleri ve sonuçların kıyaslaması

	Gereksinim	Sonuç 1	Sonuç 2
Algılama Menzili	≥ 3 km	4 km	4 km
Doğrusal Görüş Açısı	≥ ± 15°	± 9°	± 15°
Genişletilmiş Görüş Açısı	≥ ± 25°	± 9°	± 30°
Dalgaboyu Aralığı	1064 nm	1064 nm	600-1100 nm
Optik Sistem Boyu	≤ 50 mm	41.08	41.08
Mercek Sayısı	1	1	1
Geçirgenlik	≥ % 50	% 56	% 56

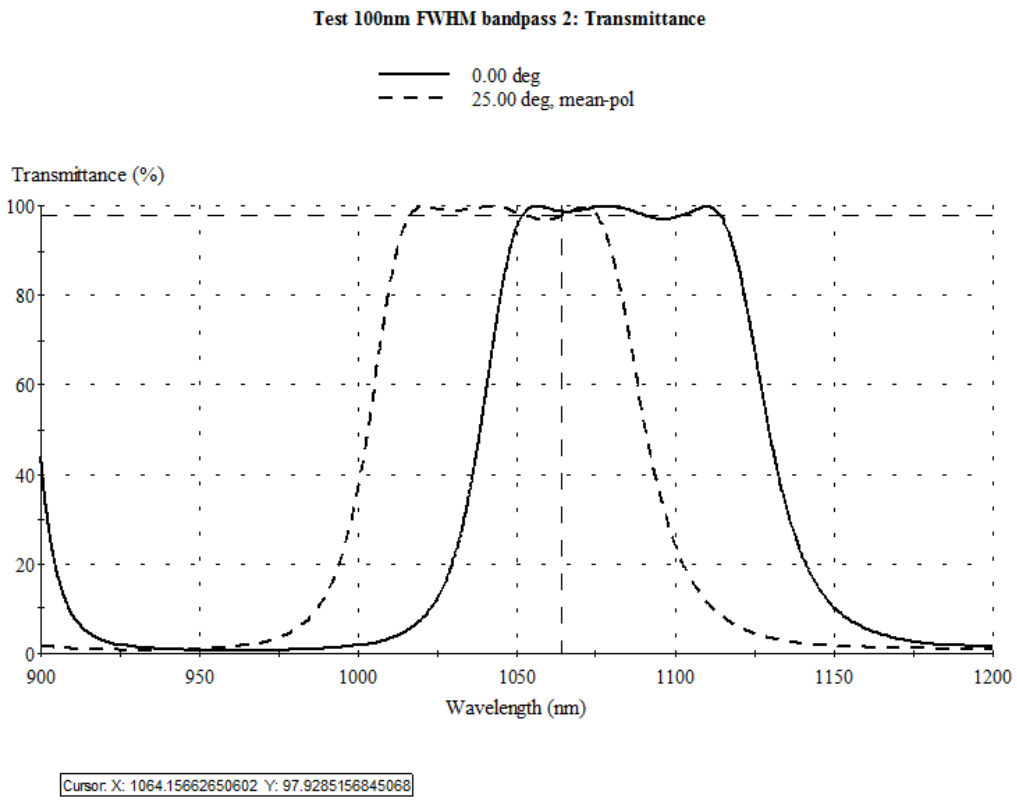
Sistemde kullanılmak üzere seçilen filtre istenen görüş açısında geçirgenliğini yitirmektedir. Bunun temel sebebi farklı görüş açılarında ışınlar filtrenin içinde farklı mesafeler kat ettiğinden dolayı filtre bu ışınlara karşı istenen etkiyi sağlayamamaktadır.



Şekil 5.1 50 nm FWHM'a sahip 1064 nm filtre

Şekil 5.1'de bir filtre üreticisinden 50 nm FWHM (Full Width Half Maximum)'a sahip bir 1064 nm filtrenin 0 ve 25 derece açılarındaki geçirgenlik grafiği görülmektedir. Görüldüğü üzere görüş açısı arttıkça, filtrenin çalışma dalgaboyu kaymakta, dolayısıyla geçirgenliği azalmaktadır.

Bu sorunu gidermenin bir yolu çalışma dalgaboyunu ötelemek ve FWHM'u biraz genişletmektir. Bu sayede sistem hem yüksek görüş açılarında gelen ışınları algılayabilecek, hem de dalgaboyu aralığı daraltılabilecektir.



Şekil 5.2 100 nm FWHM' sahip 1075 nm filtre

Şekil 5.2'de 100 nm FWHM'a sahip bir 1075 nm filtrenin 0 ve 25 derece açılarındaki geçirgenlik grafiği görülmektedir. Hem 0 hem de 25 derecede yüksek bir geçirgenliğe sahip olmakla beraber dalgaboyu aralığı da 1000 nm ile 1150 nm arasındadır. Bu tip özel bir filtre ürettirilerek bu çalışma kapsamında ulaşılamayan görüş açısı ve dalgaboyu aralığı gereksinimlerinin sağlanması öngörülmektedir.

Algılama menzilini artırmak için giriş açıklığını artırmak gerekmektedir. Fakat mevcut optik tasarımda giriş açıklığı artırılırsa aynı şekilde algılayıcının da boyutunun artırılması gerekecek ve tüm sistem boyutları artacaktır. Sistem boyunu artırmadan algılama menzili artırılmak istenirse mevcut mercek optik tasarımı zorlayan bir mercek olduğundan dolayı birden fazla mercek gerekecektir. Bu durumda yine sistemin boyu uzayacaktır.

Algılama menzilini artırmanın bir diğer yolu da algılayıcı hassasiyetinin artırılmasıdır. Fakat silikon algılayıcı geliştirmesi şu anda teknolojinin sınırındadır ve hassasiyetin

kayda değer bir oranda artması beklenmemektedir. Tüm bu seçenekler göz önünde bulundurulursa algılama menzilini artırmanın tek yolu görüş açısı değerini azaltıp, giriş açıklığını artırmaktır.

Görüş açısını artırmanın yaygın bir yolu optik sistemi hareketli bir kardan üzerine yerleştirerek kardan dönüş açılarından faydalanmaktır. Bu durumda görüş alanı kardanın dönüş sınırlarına kadar artabilecektir. Fakat kardanlı sistemler gerek maliyetlerinin yüksekliği, gerek güvenilirliklerinin sabit sistemlere göre düşük olmasından dolayı lazer spot algılayıcı sistemlerinde tercih edilmemektedir.

Lazer spot izleyiciler maliyet etkin çözüm özelliklerinden dolayı bu sistemlerin başarımını etkileyen en büyük etkenlerden birisi maliyet olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tip sistemlerin maliyetlerini en aza indirmek için çeşitli yöntemler düşünülebilir; Basınç dayanımı gereksinimini düşürmek kaydıyla koruyucu pencere safir yerine plastik malzemeler veya daha ucuz optik malzemeler kullanılabilir. Dalga boyu aralığı veya görüş açısı gereksinimlerini düşürmek kaydıyla özel üretim filtre yerine hazır filtre kullanılabilir. Algılama menzilinin düşük olduğu durumlar için hassasiyeti düşük bir algılayıcı tercih edilebilir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan lazer spot izleyicinin benzer sistemlere kıyasla en büyük avantajı gereksinimleridir. Tasarlanan lazer spot izleyici, maliyeti etkin, güvenirliği yüksek, yüksek algılama menzili ve yüksek görüş açısına sahiptir. Özellikle doğrusal görüş açısı değeri ± 15°, genişletilmiş görüş açısı değeri ± 25° ve raf ürünü bir mercek ile tasarlanmış bir lazer spot izleyici bilgimiz dahilinde bulunmamaktadır.

Bu lazer spot izleyici, gereksinimleri sağlayacak şekilde sorunları giderildikten sonra maliyeti etkin bir çözüm geliştirilip yeniden tasarlanacaktır. Bu yeni tasarım çeşitli saha ve çevresel testleri geçmesi durumunda güdümlü bir sisteme entegre edilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Anonymous. 2013. Web Sitesi: http://www.wikipedia.org Erişim tarihi: 15/06/2013

Anonymous. 2011. ZEMAX-EE. http://www.radiantzemax.com, Erişim tarihi: 14/03/2011

Anonymous. 2013. Web sitesi: http://www.edmundoptics.com/techsupport/resource_center/product_docs/curv_85905.pdf, Erişim tarihi: 28/07/2013

Anonymous. 2013. Web sitesi: http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-aspheric-lenses/66-020, Erişim tarihi: 13/06/2013

Anonymous. 2014. Web Sitesi: http://www.iisicorporation.com Erişim tarihi: 27/01/2014

Bupp, W.H., Frye, P.C., Galleo III, J.A. and Letter, B.E. 2010. Design and Implementation of Hardware-in-the-Loop Simulation for Laser-Guided Control of Spinning Munitions, Drexel University.

Daniels, A. 2013 Infrared Systems – Technology and Design, SPIE DSS, Orlando, ABD.

Harris, D. 2011. Infrared Window and Dome Materials, SPIE DSS, Baltimore, ABD.

Jelalian, A. V. 1992. Laser Radar Systems, Artech House.

Sabatini, R. and Richardson, M. A. 2010. Airborne Laser System Testing and Analysis, NATO RTO.

Stotlar. S.C. 2004. Electro-Optics Handbook, McGraw-Hill.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Göktuğ Gencehan ARTAN

Doğum Yeri : ANKARA

Doğum Tarihi : 01.01.1989

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Gazi Anadolu Lisesi (2006)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Fizik Mühendisliği Bölümü (2010)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2010 – Nisan 2014)

Çalıştığı Kurum

TÜBİTAK SAGE (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu
Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü) 2010 - …