

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORTAK AÇIKLIKLI GÜÇLÜ LAZER İLETİMİ VE
GÖRÜNTÜLEME OPTİK SİSTEM TASARIMI**

**KADİR GÜRSES
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2021**

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTAK AÇIKLIKLI GÜÇLÜ LAZER
İLETİMİ VE GÖRÜNTÜLEME OPTİK
SİSTEM TASARIMI

KADİR GÜRSES
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. F. NECATİ ECEVİT

GEBZE
2021

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**SHARED APERTURE OPTICAL SYSTEM
DESIGN WITH HIGH POWER LASER
TRANSMISSION AND IMAGING**

KADİR GÜRSES

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS**

**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. F. NECATİ ECEVİT**

**GEBZE
2021**



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 18/11/2021 tarih ve 2021/55 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 02/12/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Kadir GÜRSES'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. F. Necati Ecevit

ÜYE : Prof. Dr. Sait Eren San

ÜYE : Dr. Öğr. Üy. Kamil Çınar

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Lazer iletimi ve görüntüleme, optik sistemlerin temelidir. Her iki sistemde de performansın istenilen seviyede olabilmesi için optik parçanın tasarımına önemli miktarda iş düşmektedir. Optik bileşen (ayna, lens vb.) seçimleri, kullanılacak malzemeler ve hizalama işlemleri performansı doğrudan etkileyen faktörlerdir. Lazer iletimi ve görüntülemesi olan iki ayrı sistem yerine, her iki kabiliyete sahip tek bir sistem tasarlamak mümkündür. Aynı optik yol üzerinde hem lazer iletimi hem de görüntüleme kabiliyetine sahip bir optik sistemde paylaşılan bir açıklık tasarımı bu tezin kapsamını oluşturmaktadır. Termal, görüntüleme ve MTF analizinin yanı sıra sonuçlar görüntü simülasyonları ile de desteklenmektedir. Yüksek lazer gücünün optik bileşenlerle etkileşiminden sonra analizde faz bozulmaları görülmüştür. Gözlenen faz bozulmalarına karşılık gelen Zernike Polinomlarının görüntü kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dalga Cephesi Bozulmaları, Teleskop Tasarımı, MTF Analizleri, Zernike Polinomları, Fiber Lazerler.

SUMMARY

Laser transmission and imaging are the fundamentals of optical systems. In order for the performance to be at the desired level for both systems, a significant amount of work falls on the design of the optical part. Optical component (mirror, lens, etc.) selections, materials to be used, and alignment procedures are the factors that directly affect the performance. Instead of having two separate systems, which have laser transmission and imaging, it is possible to design a single system with both capabilities. A shared aperture design in an optical system which has both a laser transmission and imaging capability over the same optical path is the scope of this thesis. Besides thermal, imaging, and MTF analysis, the results are also supported by image simulations. After the interaction of high laser power with optical components, phase distortions have been seen in the analysis. The effect of Zernike Polynomials on image quality, corresponding to the observed phase distortions, was investigated.

Key Words: Wavefront Aberrations, Telescope Design, MTF Analysis, Zernike Polynomials, Fiber Lasers.

TEŞEKKÜR

Gerek bu alıőmamda, gerekse yüksek lisans eğitim dnemim boyunca bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danıőmanım Sn. Prof. Dr. F. Necati ECEVİT hocama, profesyonel ve akademik yönleri ile bana yol gösterici olan Sn. Doç. Dr. Aydın YENİAY ve Sn. Doç. Dr. Aslı UĞUR KATMIŐ hocalarım, bu çalıőmamda desteği ve tecrübelerinden faydalandığım Sn. Dr. E. Yasemen KAYA ÇEKİN hocama, çalıőmalarımda karŐılaŐtıđım problemlerde yardımına baŐvurduđum çalışma arkadaŐım Sn. Eray ARPA'ya, bu süreçteki manevi desteğinden ötürü sevgili eŐım Gizem GÜRSES'e ve son olarak sağladığı teknik altyapı ve sayısız imknlar dolayısı ile kurumum TÜBİTAK ailesine sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2 KURAMSAL TEMELLER	3
2.1 Lazer	3
2.2 Işık-Malzeme Etkileşimi	5
2.2.1 Snell Yasası ve Tam Yansıma	6
2.2.2 Beer-Lambert Yasası	7
2.3 Gauss Hüzmesi ve Lazer Işın Kalitesi	8
2.3.1 Işın Kalite Parametresi M^2	10
2.4 Kırınım Limitli Görüntüleme Sistemi	10
2.4.1 Airy Disk	12
2.5 Zernike Polinomları	12
2.6 Optik Aberasyonlar	15
2.6.1 Kromatik Aberasyon	16
2.6.2 Küresel Aberasyon	16
2.6.3 Koma	17
2.6.4 Astigmatizma	17
3 MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1 Materyal	19
3.1.1 Ortak Açıklık Yöntemi	19
3.2 Yöntem	20
4 TASARIM VE ANALİZ	22
4.1 Cassegrain Teleskop	22

4.1.1	Dall Kirkham Teleskop	23
4.2	Görüntüleme Analizi, MTF	23
4.3	POP Analizi	25
4.4	Aberasyonların ZEMAX Ortamında Doğrulanması	26
4.4.1	Küresel Aberasyon	27
4.4.2	Kromatik Aberasyon	28
4.4.3	Koma	29
4.5	Teleskop Tasarımı	30
4.6	Analiz	33
4.6.1	COMSOL Multiphysics® M2 Yüzey Termo-Mekanik Analizleri	36
4.6.2	Zernike Polinomları Eldesi	39
4.6.3	Isıl Etki Sebepi Yüzey Bozulmalarının Görüntüleme ve Lazer Hüzmesi Üzerindeki Etkisi	41
5	SONUÇLAR	42
5.1	Fused Silika Analiz Çıktıları	43
5.1.1	Fused Silika Görüntü Simülasyonu	45
5.2	N-BK7 Analiz Çıktıları	45
5.2.1	N-BK7 Görüntü Simülasyonu	47
5.3	Zerodür Analiz Çıktıları	47
5.3.1	Zerodür Görüntü Simülasyonu	49
6	YORUMLAR	51
	KAYNAKLAR	52
	ÖZGEÇMİŞ	56

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
n	: Kırılma İndisi
g	: Gram
λ	: Dalgaboyu
F#	: F Number
DK	: Dall-Kirkham
GPa	: Giga Pascal
K	: Kelvin
kW	: KiloWatt
mm	: Milimetre
MTF	: Modulation Transfer Function
nm	: Nanometre
rad	: Radyan
RMS	: Root Mean Square
μm	: Mikrometre

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Uyarılmış Işıma.	3
2.2: Lazer Kavitesi.	4
2.3: Işığın a) İletimi, b) Yansıması c) Soğurulması.	6
2.4: Işığın Kırılması ve Yansıması.	7
2.5: Gauss Hüzmesinin Odaklanması a) Uzak Mesafede, b) Rayleigh Mesafesinde, c) Odak Pozisyonunda.	8
2.6: Gauss Hüzme Yoğunluk Profili, a) Üstten Görünüm, b)Yandan Görünüm.	9
2.7: CCD Dedektör Üzerinde Kırınım Etkisi.	11
2.8: a) Rayleigh Kriteri, b) Kararsız, c) Kararlı.	12
2.9: Zernike Polinomlarının Dalga Cephesi Üzerindeki Etkisi.	15
2.10: Kromatik Aberasyon.	16
2.11: Küresel Aberasyon, a) Küresel mercek, b) Küresel Olmayan Mercek.	17
2.12: Koma.	17
2.13: Astigmatizma.	18
3.1: Çalışma Akış Diyagramı.	20
4.1: Cassegrain Teleskop.	22
4.2: Konik Sabit Değerleri	23
4.3: MTF Eğrisi.	24
4.4: Modülasyon.	24
4.5: POP Analizi.	25
4.6: Küresel Aberasyon.	27
4.7: Küresel Aberasyon Giderilmiş.	28
4.8: Kromatik Aberasyon.	28
4.9: Akromat Mercek ile Kromatik Aberasyon Minimize Edilmesi.	29
4.10: Koma.	30
4.11: a) Birincil Ayna (M1) ve b) İkincil Ayna (M2) Üzerindeki Lazer Hüzmeleri.	31
4.12: Teleskop Lazer İletimi Konfigürasyonu.	32

4.13:	Teleskop Görüntüleme Konfigürasyonu a) Köşeden Görünüm b) Yandan Görünüm.	33
4.14:	MTF, Referans.	34
4.15:	Görüntüleme Dalga Cephesi Haritası, Referans.	34
4.16:	Airy Disk ve Hüzme Spotu, Referans.	35
4.17:	Lazer Hüzme Spotu, Referans.	35
4.18:	Lazer Dalga Cephesi Haritası, Referans.	35
4.19:	a) İdeal Görüntü, b) Kırınım Limitli Görüntü.	36
4.20:	a) M2 Geometrisi, b) M2 Yüzeyinde Lazer Hüzmeleri.	37
4.21:	3D Yüzey Yer Değiştirme, a) Zerodür, b) Fused Silika, c) N- BK7.	40
4.22:	Zernike Polinomlarının Yüze Tanıtılması.	43
5.1:	Dalga Cephesi Haritası, Fused Silika, 3 kW.	44
5.2:	MTF, Fused Silika.	45
5.3:	Spot Diyagram, Fused Silika, a) 1kW, b) 3kW.	46
5.4:	Lazer Hüzme Spotu, Fused Silika, a) 1kW, b) 3kW.	46
5.5:	Fused Silika, a) 1kW, b) 2kW, c) 3kW.	47
5.6:	MTF, N-BK7.	48
5.7:	Spot Diyagram, N-BK7, a) 1kW, b) 3kW.	49
5.8:	Lazer Hüzme Spotu, N-BK7, a) 1kW, b) 3kW.	49
5.9:	N-BK7, a) 1kW, b) 2kW, c) 3kW.	50
5.10:	MTF, Zerodür.	51
5.11:	Spot Diyagram, Zerodür, a) 1kW, b) 3kW.	52
5.12:	Lazer Hüzme Spotu, Zerodür, a) 1kW, b) 3kW.	52
5.13:	Zerodür, a) 1kW, b) 2kW, c) 3kW.	53

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Radyal Polinomlar.	13
2.2: Zernike Polinomları.	14
4.1: Tasarım Parametreleri.	31
4.2: Teleskop Ayna Geometrisi Parametreleri.	32
4.3: Malzemelerin Termal ve Mekanik Özellikleri.	39
4.4: Zernike Polinom Katsayıları.	41
5.1: Yüzey Sıcaklık Değişimleri.	44
5.2: Airy Disk ve Hüzme Spotu, Fused Silika.	45
5.3: Airy Disk ve Hüzme Spotu, N-BK7.	47
5.4: Airy Disk ve Hüzme Spotu, Zerodür.	50

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun gökyüzüne olan ilgisi tarih öncesine dayanır. Tarih boyunca da gözünü hiç gökyüzünden ayırmamıştır. Belki de bu heves ve merakın bu kadar eskiye dayanması, bugün görüntüleme teknolojilerinin geldiği büyüleyici noktanın temel bir sebebidir. Görüntüleme sistemi dendiğinde akla ilk gelecek icat tartışılmaz teleskop olacaktır. Teleskop, 1608 yılında gözlük üreticileri Hans Lippershey & Zacharias Janssen ve Jacob Metius Hollandalı tarafından Hollanda'da icat edilmiştir [1]. Teleskobu ilk defa gökyüzü gözlemlerinde kullanan kişi Galileo Galilei'dir. Bu yüzden Galilei modern astronominin babası olarak anılır. Bir teleskobun görüntüleme kalitesini etkileyecek birçok parametre vardır. Böyle bir sisteminin tasarlanmasında çap ölçüsü, optik alıtış seçimi, tasarım tipinin belirlenmesi gibi etkenler görüntüleme kabiliyetini doğrudan etkiler.

Geçtiğimiz son 100 yılın en gelişmiş elektro-optik teknolojisi lazer teknolojisidir. Günümüzde lazer teknolojisinin kullanılmadığı sektör veya alan neredeyse kalmamıştır. Basit bir barkod cihazından, uydulara kadar geniş bir yelpazede gerek askeri gerekse endüstriyel birçok alanda lazerler çok aktif bir biçimde kullanılır. Yüksek lazer gücü iletimindeki kısıtlar optik bileşenlerin ısınmasıyla oluşan dalga cephesi bozulmalarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden optik alıtış seçimi ve kaplama seçimi gibi farklı parametreler lazer iletimindeki önemli ölçütlerdir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu tez kapsamında ortak açıklık yöntemiyle tasarlanan, aynı optik açıklıktan hem lazer iletimi hem de görüntüleme yapabilen bir Dall Kirkham (DK) tipi teleskobun Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) analizleri, lazer hüzmeleri analizleri, dalga cephesi bozulma analizleri, görüntü simülasyon ve spot diyagram analizleri ile desteklenen performans karşılaştırmaları, ve görüntüleme performans limitleri belirleme çalışmaları yapılmıştır.

Bir optik sistemde ışık hüzmelerinin ideal görüntü oluşturmaktan sapmasına aberasyon denir [2]. Farklı aberasyon tipleri mevcuttur. Her aberasyon görüntü

üzerinde kendine özgü bir karakteristiğe sahiptir. Bu etkiler matematiksel olarak zernike polinomları kullanılarak modellenir.

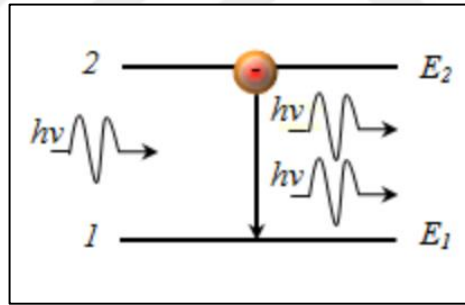
Yüksek performanslı optik sistemlerde, optik bileşenler üzerindeki termal yükler sistem performansına doğrudan etkiler (Doyle ve Gengberg 2002). Lazer ışınımının aynalar üzerindeki ısıl kaynaklı etkisi sebebiyle ayna yüzeyinde deformasyonlar oluşmaktadır. Bu deformasyonlar dalga cephesi bozulmalarına sebebiyet vereceğinden sistemin hem lazer iletim performansını hem de görüntüleme performansını etkilemektedir. Yüzey bozulmaları Zernike Polinomları ile ifade edilir. Tez kapsamında farklı altaşlar ile tasarlanan teleskop aynaları üzerinde yapılmış termo-mekanik analiz çıktıları, optik tasarıma Zernike Polinomları cinsinden tanıtılarak dalga cephesi bozulmaları ve optik sistem performansına etkileri gösterilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Lazer

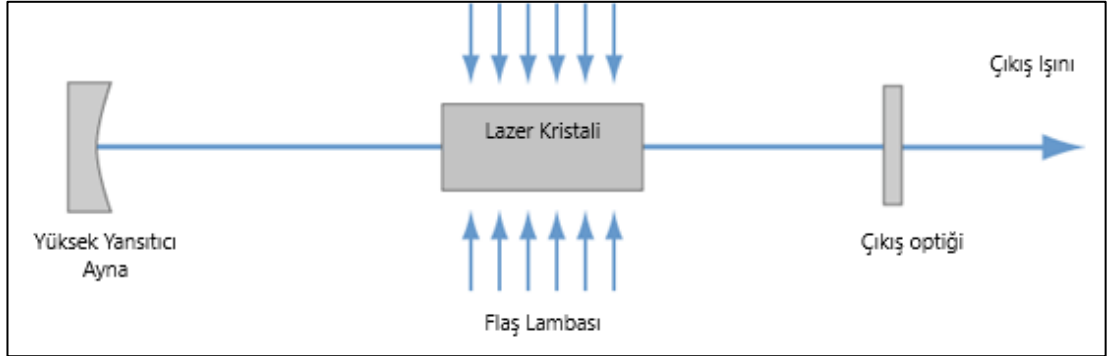
Lazer (LASER) ifadesi orijinal adıyla “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ifadesinin kısaltmasından meydana gelmektedir. Kelime anlamı olarak “Işığın Uyarılmış Işıma ile Yükseltgenmesi” anlamına gelir. Lazer temelde atom enerji düzeyleri arasındaki elektron geçişleri ile oluşan ışık fotonlarına dayanır. Uyarılmış elektronlar daha düşük enerji seviyesine inerken aradaki enerji farkını enerjinin korunumu yasası gereğince radyasyon olarak yayarlar [3]. Yani foton üretirler. Buna “foton salımı” denir. Eğer E_3 enerjisinde uyarılmış bir atom E_3-E_2 enerjisinde bir foton ile tekrar uyarılırsa ve E_2 seviyesine inerse E_3-E_2 enerjili iki foton salınım yapar. Bu oluşan fotonlar eş dalga boylu ve eş fazlı olacaktır. Bu işleme uyarılmış ışıma denir. Albert Einstein’ın temellerini ortaya attığı bu fenomen lazerin temel çalışma prensibini oluşturur. Şekil 2.1’de uyarılmış ışıma gösterilmiştir [4].



Şekil 2.1: Uyarılmış Işıma.

Lazeri oluşturacak aktif kazanç ortamı kovuk veya kavite (cavity) olarak isimlendirilir. Şekil 2.2’de temel bir kavite gösterimi bulunmaktadır [5]. Kavitedeki kazanç ortamı sıvı, gaz veya katı halde bir madde olabilir. Bu ortam ışıma yapabilmesi için dışarıdan bir uyarana ihtiyaç duymaktadır. Gerilim farkı, flaş lambası veya farklı bir lazer kaynağı örnek olarak verilebilir. Bu aktif ortamının iki tarafında birer ayna bulunur. Bu aynalar yardımıyla yükseltgenen atomlar kavite içerisinde hapsedilir. Normal şartlarda bir atomun tüm elektronlar temel enerji seviyesinde bulunmak isteyeceklerdir. Fakat bu özel durumda devamlı bir uyarılma söz konusu olduğundan atom popülasyonunun çoğunluğu yükseltgenmiş olarak üst enerji seviyesinde bulunur.

Bu durumun özel adı nüfus terslenmesi (population inversion) dir. Aktif kazanç ortamındaki bu fotonlar bir araya gelerek eş fazlı lazer ışın hüzmelerini oluştururlar.



Şekil 2.2: Lazer Kavitesi.

Lazer ışınımı 3 temel özelliğe sahiptir:

- Dar bant dalgaboyu, tek renklilik (Monochromatic)
- Eş fazlılık (Coherence)
- Tek yönlülük (Directionality)

Uyarılmış ışınım prensibi sayesinde oluşan fotonların hepsi eş dalga boyunda olacağından lazerler çok dar bir optik bant genişliğine sahiptir. Yine aynı prensip sayesinde tüm fotonlar eş fazlı oluşmaktadır. Bu da yıkıcı girişim etkisini minimize etmektedir. Kavite içerisinde yalnızca kavite ekseninin çok yakınında salınım yapan dalgalar dışarıya ışınım olarak yayılacağından, lazerlerin saçılma açıları çok düşüktür [6]. Saçılma açılarının düşük olması uzak mesafelerde küçük çaplarda lazer ışınımını elde edilebilmesine olanak verir. Bu sayede yüksek enerji yoğunluklarının elde edilebilmesini sağlar ve sağlık uygulamalarında, metal kaynak ve kesim uygulamalarında, mesafe ölçme veya askeri uygulamalar gibi alanlarda sıklıkla kullanılır [7].

Tarihteki ilk lazer 1960 yılında pembe renkli yakut kristali ile yapılan, 694.3nm dalgaboyunda ışınım yapan Ruby lazeridir [8]. Sonrasında pompalanmaya uygun her malzemeden lazer olabileceği düşüncesi hakim oldu. 1960 yılından günümüze kadar farklı dalga boylarında ve farklı özelliklerde pek çok lazer ışını elde edilmiştir.

Lazerler kazanç ortamlarındaki maddenin fiziksel özelliğine göre 4 temel çeşitte incelenebilir.

- Katı Hal Lazerler
- Sıvı Lazerler
- Gaz Lazerler
- Yarı İletken Lazerler

Her bir lazer çeşidine popüler birer örnek olarak sırasıyla, Nd-YAG Lazer, Boya Lazerleri, He-Ne Lazeri ve Diyot Lazerler verilebilir.

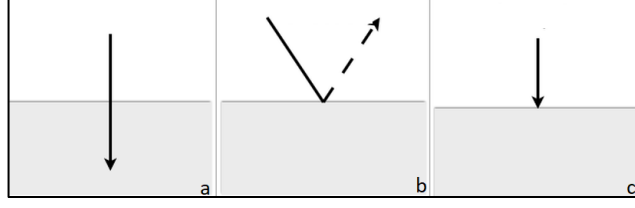
Son zamanlarda çok gelişen ve sık kullanılan fiber lazerler de temelde bir katı hal lazerdir. Farklı olarak aktif kazanç ortamı bir kaviteden değil direkt olarak katkılılandırılmış fiberden oluşur. Katkılılandırılmış fiber aktif fiber olarak da isimlendirilir. Örneğin aktif fiber, bir diyot lazer ile pompalanır. Diyot lazer burada uyaran olarak görev yapar. Sonrasında aktif fiber kazanç ortamından lazer emisyonu sağlanır. Sonrasında pasif (katkılılandırılmamış) fiberler ile taşınımı sağlanabilir.

2.2. Işık-Malzeme Etkileşimi

Işık, foton denilen enerji paketlerinden oluşur. Işık herhangi bir ortamda hareket ederken bir malzemeye karşılaşırsa, oluşabilecek üç temel etkileşim söz konusudur;

- Yansıma
- Soğurulma
- Geçirgenlik

Her malzemenin, yansıma katsayısı veya iletim katsayısı gibi belirli optik özellikleri vardır. Bu özellikler, gelen ışığın dalga boyu ile bağıntılıdır. Yani bir malzeme bir dalga boyundaki ışık için geçirgen özellik gösterirken farklı bir dalga boyundaki ışık için yansıtıcı özellik gösterebilir. Bu durum tamamen malzemenin doğasıyla ilgilidir. Şekil 2.3'de bu etkileşimler incelenebilir [9].

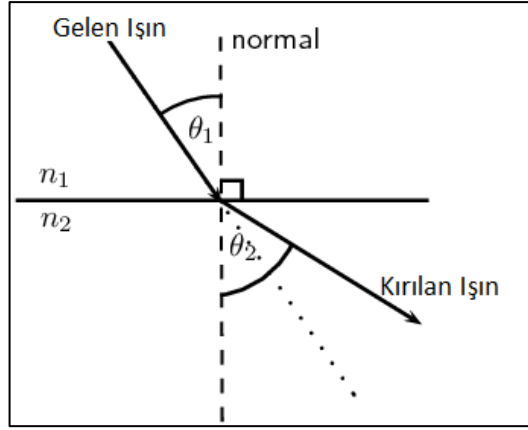


Şekil 2.3: Işığın a) İletimi, b) Yansımaları c) Soğurulması.

Gelen ışığın yüzey normali ile yaptığı açıya “gelme açısı” denir. Bu açıyla aynı açıda geri yansıma yapar ise buna “ışığın yansımaları” denir. Yansıyan ışığın normal ile yaptığı açıya ise “yansıma açısı” denir. Gelme açısı ve yansıma açısı birbirine eşittir. Eğer ışın bir malzemenin içerisinde enerjisini aktarıp yok oluyor ise bu duruma “ışığın soğurulması” denir. Eğer ışın bir malzemenin direkt olarak içinden geçip gidiyorsa bu duruma ise “ışığın iletimi” denir. Gündelik hayattan örnek verilecek olunursa; dikiz aynadan arkadaki aracın görülmesi ışığın yansımalarına, güneş ışığının evin penceresinden geçerek odaları aydınlatması ışığın iletimine, siyah renge sahip cisimlerin sıcak yaz günlerinde diğer renkteki cisimlere göre daha fazla ısınması da ışığın soğurulmasına örnek verilebilir.

2.2.1. Snell Yasası ve Tam Yansıma

Işık bir ortam değiştirdiğinde belirli yasalar çerçevesinde hareket eder. Gelen ışın ile yansıyan ışının normal ile yaptığı açılar birbirine eşittir. Eğer ışık, kırılma indisi düşük bir ortamdan kırılma indisi yüksek bir ortama geçerse yüzey normaline yaklaşarak kırılır. Tam tersi durumda ise yüzey normalinden uzaklaşarak kırılır. Bu kırılma açıları Snell Yasası çerçevesinde belirlenir. Şekil 2.4’de ışığın Snell Yasası’na uygun bir biçimde hareketi gösterilmiştir [10].



Şekil 2.4: Işığın Kırılması ve Yansımaları.

Snell Yasası; θ_1 gelme açısı, θ_2 kırılma açısı, n_1 ve n_2 ortam kırılma indisleri olmak üzere aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

θ_1 'in 90 dereceye eşit olduğu özel durumda gelme açısı “kritik açı” olarak isimlendirilir. Bu açının üzerinde gelen ışınlar tam yansıma yaparlar. Lazer ışığının fiber optik kablo içerisinde iletimi tam yansıma ile olur.

2.2.2. Beer-Lambert Yasası

Işığın malzeme içerisinde soğurulması Beer-Lambert Yasası çerçevesinde açıklanabilir. Işık malzemeye girdikten sonra arka yüzeyden çıkış yapana kadar malzeme içerisinde yol alır. Malzemenin içerisindeki ışığın ne kadarının soğurulacağı malzemenin kalınlığına ve soğurma katsayısına bağlıdır. Beer-Lambert Yasası, I_0 malzemeye gelen ışık şiddeti, I malzemedan çıkan ışık şiddeti, α malzemenin soğurma katsayısı, l malzeme kalınlığı olmak üzere denklem (2.2) ile hesaplanabilir.

$$A(l) = -\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = \alpha \cdot l \quad (2.2)$$

2.3. Gauss Hüzmesi ve Lazer Işın Kalitesi

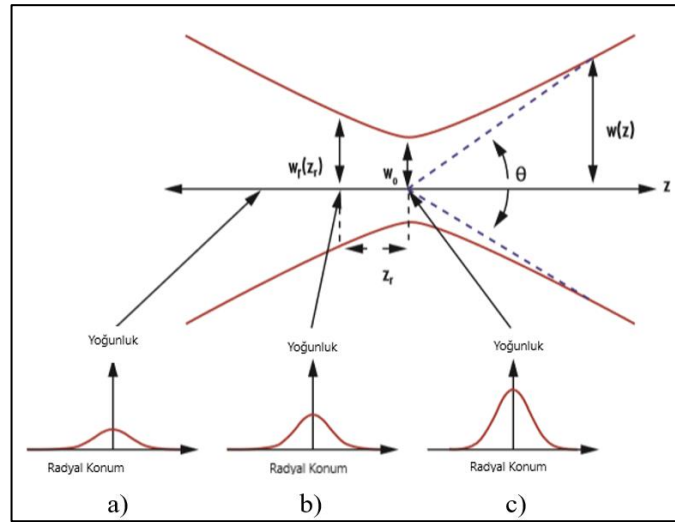
Lazeler genellikle Gauss hüzmeleri üretirler. Işın elektrik alan profili, bir Gauss fonksiyonu ile tanımlanabilir [11]. E elektrik alan dağılımı, z hüzme yayılım yönü boyunca olan mesafe, r hüzme ekseninden olan mesafe, $\omega(z)$ hüzme yarıçapı olmak üzere;

$$E(r, z) \propto \exp\left(-\frac{r^2}{\omega(z)^2}\right) \exp[i\varphi(z, r)] \quad (2.3)$$

$k = 2\pi/\lambda$ dalga sayısı, $R(z)$ dalga cephesi eğriliği, $\varphi(z, r)$ hüzme boyunca faz gelişimi olmak üzere;

$$\varphi(z, r) = kz - \arctan \frac{z}{z_R} + \frac{kr^2}{2R(z)} \quad (2.4)$$

Şekil 2.5 Gauss hüzmesinin odaklanmasını göstermektedir [12]. Maksimum güç yoğunluğu odak noktasında olacaktır. Lazer ışığı açıldıkça güç yoğunluğu düşecektir.



Şekil 2.5: Gauss Hüzmesinin Odaklanması a) Uzak Mesafede, b) Rayleigh Mesafesinde, c) Odak Pozisyonunda.

η ortam empedansı, z hüzme yayılma yönü boyunca olan mesafe, ω_0 hüzme odak yarıçapı ve $\omega(z)$ hüzme yarıçapı, z_R Rayleigh mesafesi olmak üzere Gauss hüzmesinin güç yoğunluk dağılımı matematiksel olarak aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$I(r, z) = \frac{[E(r, z)]^2}{2\eta} = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right) \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega(z)^2}\right) \quad (2.5)$$

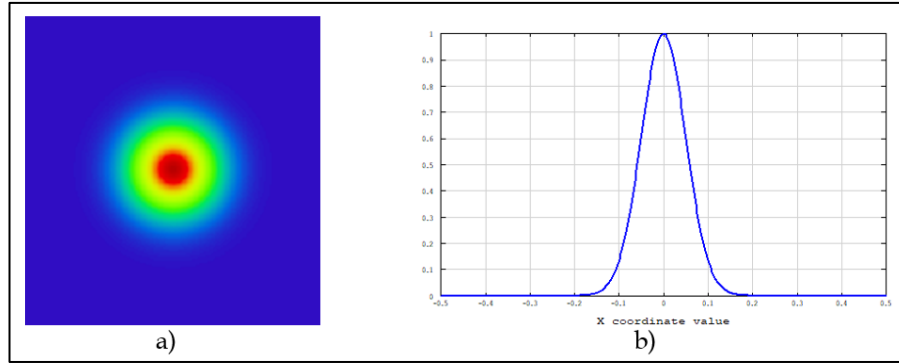
$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2.6)$$

$$z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (2.7)$$

Rayleigh mesafesi; hüzme yarıçapının, hüzme belinin $\sqrt{2}$ katına çıktığı, yani güç yoğunluğunun yarıya düştüğü mesafedir. Bir lazer optik sisteminde Rayleigh Mesafesi ne kadar uzun ise o kadar iyi kolimasyon yapılmış demektir. Bu da uzak mesafelerde daha yüksek lazer güç yoğunlukları elde edebilmek anlamına gelir.

θ Gauss hüzmesi saçılma açısı olmak üzere aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \quad (2.8)$$



Şekil 2.6: Gauss Hüzme Yoğunluk Profili, a) Üstten Görünüm, b) Yandan Görünüm

Şekil 2.6 Gauss hüzme profilinin ZEMAX OpticStudio® ortamında modellenmesiyle oluşturulmuştur.

2.3.1. Işın Kalite Parametresi M^2

M^2 , ışın kalitesini nümerik olarak ifade edebilmeye yarayan bir parametredir. 1'e eşit veya 1'den büyük olabilir. İdeal durumda bir gausiyen hüzme için $M^2=1$ 'dir [13]. Bir hüzme ne kadar gausiyen profilden saparsa M^2 parametresi büyür. θ saçılma açısı, ω_0 hüzme yarıçapı, λ dalga boyu olmak üzere;

$$M^2 = \frac{\theta\pi\omega_0}{\lambda} \quad (2.9)$$

Bir lazer hüzmesi ideal formundan M^2 değeri ile doğru orantılı olarak sapar. Verilen bir saçılma açısı için, hüzme yarıçapı kırınım limitinin M^2 katı kadar büyük olacaktır [11]. Tek modlu (Single mode) fiber lazerlerin M^2 değerleri 1'e oldukça yakındır. Bu tip lazerlerin serbest uzayda uzak mesafelerde daha küçük yarıçaplarda odaklanmaları daha mümkündür.

2.4. Kırınım Limitli Görüntüleme Sistemi

Bir görüntüleme sisteminin çözünürlük hassasiyeti birçok parametreye bağlıdır. Optik bileşen ve alttaş malzeme seçimleri, kaplama özellikleri bunlardan bazılarıdır. Fakat bütün bu etkenler en ideal durumda tasarlansa dahi bir görüntüleme sisteminin çözünürlük hassasiyeti fiziksel bir fenomen olan kırınım tarafından limitlenir. En yüksek seviye açısal çözünürlük hassasiyetine sahip sisteme "Kırınım Limitli Sistem" adı verilir [14]. Görüntüleme sistemi optik bileşenlerinin üretimi, kaplanması veya hizalaması konularından bağımsız olarak bu limit göz önüne alınarak optik tasarım yapılır.

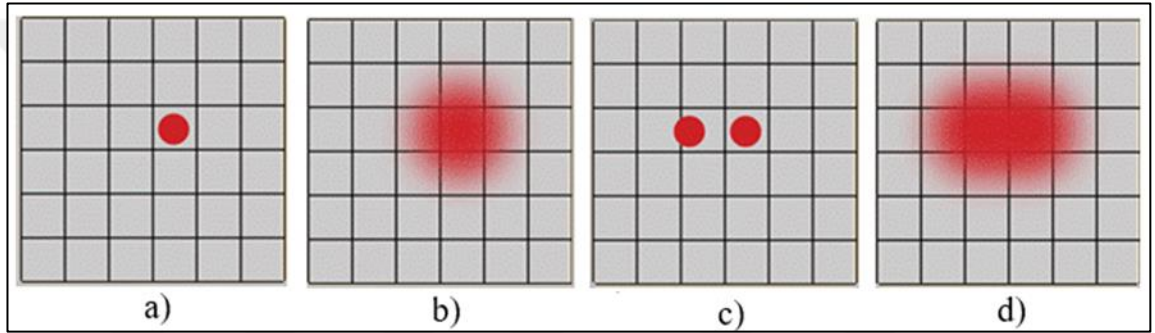
θ açısal çözünürlük limiti, λ dalga boyu, D optik açıklık olmak üzere; bir görüntüleme sisteminin açısal çözünürlük limiti aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.10)$$

Bir örnek olarak; 100 mm optik açıklığa sahip bir sistem için, dalga boyu 532 nm olarak seçilecek olursa açısal çözünürlük limiti yaklaşık olarak;

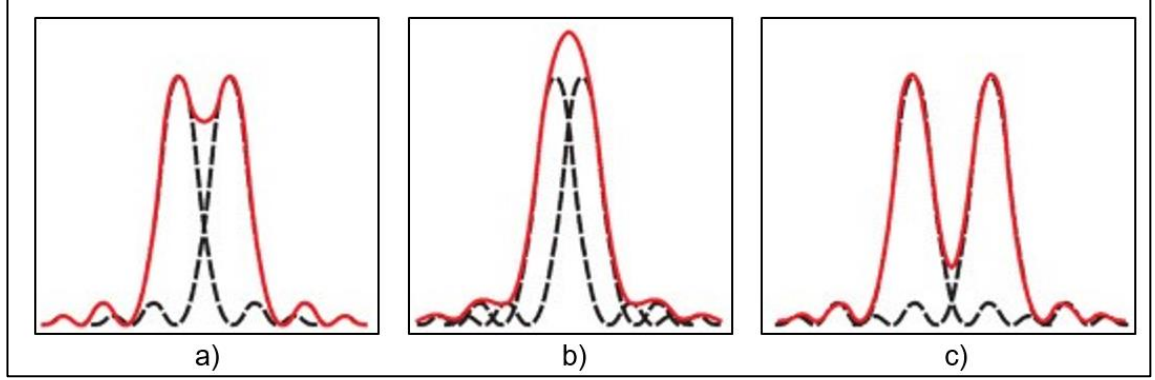
$$\theta = 1.22 * \frac{532 * 10^{-9}}{100 * 10^{-3}} = 6.49 \mu rad$$

Şekil 2.7’de a) CCD dedektörü üzerinde küçük dairesel bir görüntünün ideal çözünürlüğünü, b) kırınım etkisinin görüntü üzerine simülasyonunu, c) iki noktasal görüntünün ideal çözünürlüğünü ve d) henüz çözülüş görüntü için Rayleigh kriterinin simülasyonunu göstermektedir [15].



Şekil 2.7: CCD Dedektör Üzerinde Kırınım Etkisi.

Minimum çözülebilir detay için genel olarak kabul edilen kritere Rayleigh kriteri denir [16]. Bir kaynak noktasının görüntüsünün ilk kırınım minimumu diğerinin maksimumu ile çakıştığında görüntüleme işleminin kırınım sınırlı olduğu söylenir. Rayleigh kriteri Şekil 2.8’de gösterilmiştir [15].



Şekil 2.8: a) Rayleigh Kriteri, b) Kararsız, c) Kararlı.

2.4.1. Airy Disk

r Airy disk yarıçapı, λ dalga boyu, F odak uzaklığı, D optik açıklık olmak üzere;

$$F\# = \frac{F}{D} \quad (2.11)$$

$$r = 1.22 * \lambda * F\# \quad (2.12)$$

Eğer odak düzlemindeki hüzmelerin RMS çapı Airy Disk çapından büyük ise sistem kırınım limitinden çıkmış yani bozulmalar meydana gelmeye başlamış anlamına gelir [17]. Aradaki fark ne kadar artarsa görüntüdeki bozulma o kadar artacaktır.

2.5. Zernike Polinomları

Adını Nobel Fizik Ödülü sahibi Frits Zernike'den alan Zernike Polinomları birim disk üzerinde ortogonal olan bir dizi kutupsal koordinatlı polinomdur [18]. Geometrik optik ve görüntüleme sistemlerinde önemli bir yere sahiptir.

Zernike polinomları dalga cephesinin ideal durumdan ne kadar saptığını matematiksel olarak modellemek için için kullanılır [19], [20].

Zernike polinomları $R_n^m(\rho)$ radyal polinom, n derecesi, m sinüzoidal bileşenin açısız frekansı olmak üzere denklem 2.13'deki gibi ifade edilir [21].

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \sqrt{(n+1)}R_n^0(\rho) \quad m = 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (2.13)$$

$$= \sqrt{2(n+1)}R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta) \quad m > 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (2.14)$$

$$= \sqrt{(n+1)}R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta) \quad m > 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (2.15)$$

Bu radyal polinom şu şekilde hesaplanır:

$$R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [0.5(n+|m|)-s]! [0.5(n-|m|)-s]!} \rho^{n-2s} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16 yardımı ile oluşturulan ilk 16 polinom Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Radyal Polinomlar.

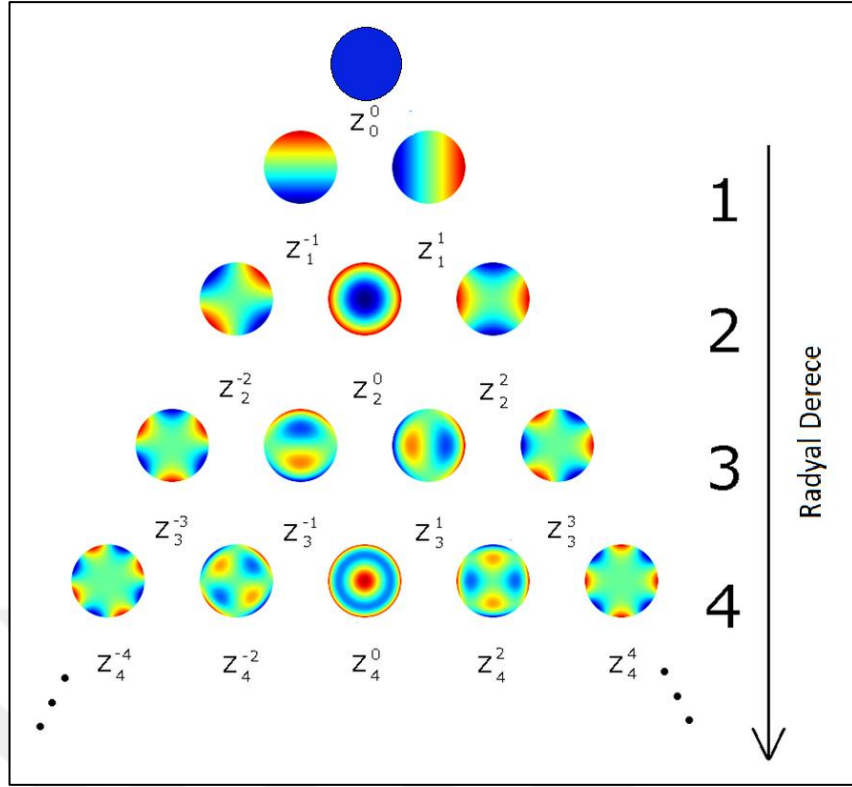
n	m	$R_n^{ m }(\rho)$
0	0	1
1	1	R
2	0	$2\rho^2 - 1$
2	2	ρ^2
3	1	$3\rho^3 - 2\rho$
3	3	ρ^3
4	0	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$
4	2	$4\rho^4 - 3\rho^2$
4	4	ρ^4
5	1	$10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho$
5	3	$5\rho^5 - 4\rho^3$
5	5	ρ^5
6	0	$20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$
6	2	$15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2$
6	4	$6\rho^6 - 5\rho^4$
6	6	ρ^6

Tablo 2.1’de yer alan polinomlar kullanılarak hesaplanan Zernike Polinomları Tablo 2.2’de Zernike Polinomları sütununda verilmiştir.

Tablo 2.2: Zernike Polinomları.

Mod	Derece	Frekans	Zernike Polinomları	Aberasyon
j	n	m	$Z_n^m(\rho, \theta)(Z(n, \mp m))$	
0	0	0	1	Sabit Terim/Piston
1	1	-1	$2\rho\sin(\theta)$	y yönünde tilt
2	1	1	$2\rho\cos(\theta)$	x yönünde tilt
3	2	-2	$\sqrt{6}\rho^2\sin(2\theta)$	$\pm 45^\circ$ ekseninde astigmatizma
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Alan eğriliği, bulanıklık (defocus)
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2\cos(2\theta)$	0° veya 90° olan astigmatizma
6	3	-3	$\sqrt{8}\rho^3\sin(3\theta)$	y yönünde yonca
7	3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(\theta)$	y yönünde koma
8	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(\theta)$	x yönünde koma
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3\cos(3\theta)$	x yönünde yonca
10	4	-4	$\sqrt{10}\rho^4\sin(4\theta)$	Eğik dörtgen
11	4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	İkincil astigmatizm
12	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Küresel aberasyon
13	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	İkincil astigmatizm
14	4	4	$\sqrt{10}\rho^4\cos(4\theta)$	y yönünde dörtgen

Tablo 2.2’de her bir polinoma karşılık gelen aberasyon tipi gösterilmiştir. Bu aberasyonların dalga cephesi üzerindeki fiziksel etkisi Şekil 2.9’da incelenebilir [22]. Z_2^0 polinomu görüntü bulanıklığını temsil etmektedir. Örneğin optik bileşenler yeterince iyi pozisyonlanmadığı takdirde odak düzleminde bulanık bir görüntü elde edilecektir. Z_4^0 polinomu ise küresel aberasyonu temsil etmektedir. Standart küresel bir mercek ile odaklama yapıldığında odak düzleminde bu etki görülecektir. Dalga cephesi matematik modelinde Z_4^0 polinomunun değeri baskın olacaktır. Bu etkinin giderilmesi için eliptik mercek veya aynalar seçilebilir.



Şekil 2.9: Zernike Polinomlarının Dalga Cephesi Üzerindeki Etkisi.

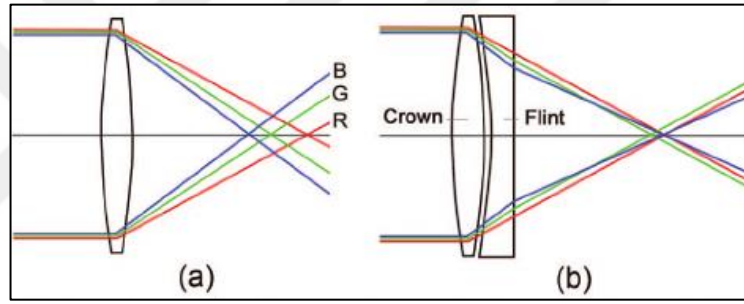
Bazı aberasyonların görüntü üzerindeki etkisini görebilmek adına, optik tasarım programı ZEMAX OpticStudio® üzerinde yapılmış birkaç analiz ile doğrulama çalışmaları, tezin “SONUÇLAR” kısmında incelenebilir.

2.6. Optik Aberasyonlar

Aberasyon kelime anlamı olarak sapınç demektir. Dalga cephesi ideal durumdan saptığı durumlarda görüntüde bozulmalar meydana gelir. Bu bozulmaların farklı sebepleri ve çözümleri bulunmaktadır. Kromatik aberasyon, küresel aberasyon, koma optik aberasyonlara örnek verilebilir [23].

2.6.1. Kromatik Aberasyon

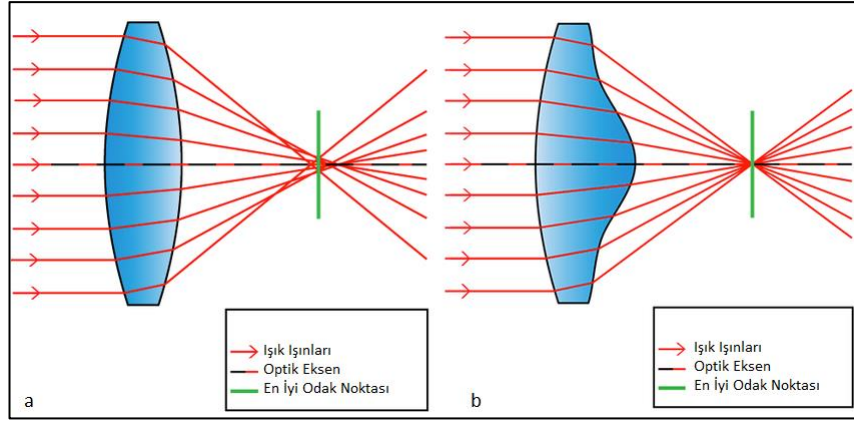
Farklı dalga boyundaki ışıkların bir mercekten geçtikten sonra Şekil 2.10'de gösterildiği gibi, optik ekseninde farklı fiziksel noktalara odaklanmasına kromatik aberasyon denir [24]. Bir merceğin odak uzaklığı kırılma indisine bağlıdır. Kırılma indisi de dalga boyunun bir fonksiyonudur. Yani bir malzeme farklı dalga boyundaki ışıkları farklı açılar ile kırar. Bu da farklı dalga boyundaki ışıkların farklı yerlere odaklanmasına sebep olur. Bu kusur teleskop veya mikroskop gibi sistemlerde görüntüleme güçlüğüne sebep olur. Bu bozulma akromatik mercekler ile giderilir [25]. Akromatik mercekler birleştirilmiş bir ince kenarlı ve bir kalın kenarlı mercekten oluşan ikili veya üçlü mercek setlerine verilen isimdir. Birisi "crown", diğeri "flint" camından yapılır.



Şekil 2.10: Kromatik Aberasyon.

2.6.2. Küresel Aberasyon

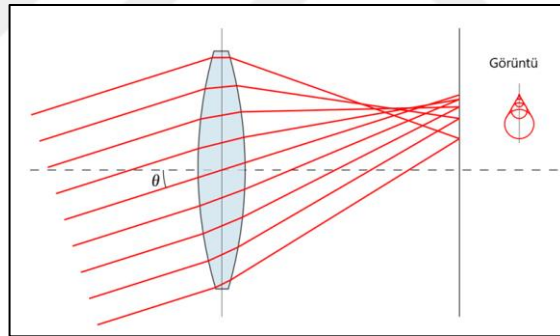
İnce kenarlı merceklerin kenar kısımları ortalarına göre daha incedir. Işığın mercek içerisinde aldığı yol mercek ortasında fazla iken kenarlarda daha azdır. Dolayısı ile kırıcılık farkı ortaya çıkar. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi mercek kenarlarına gelen ışınlar daha yakına odaklanırken, optik eksene yakın gelen (paraxial rays) ışınlar daha uzağa odaklanır [26]. Buna küresel aberasyon veya küresel sapınç denir. Bu durumda ekrandaki görüntünün odaklanmasında problemler yaşanır. Bu durumu gidermek için küresel yüzeylerden kaçınıp küresel olmayan (aspheric) parabolik yüzeyli optikler kullanılabilir. Fakat parabolik yüzeylerin işlenmesi daha fazla zaman aldığı için maliyeti arttıracaktır.



Şekil 2.11: Küresel Aberasyon, a) Küresel Mercek, b) Küresel Olmayan Mercek.

2.6.3. Koma

Koma, obje düzleminde eksen dışı bir ışık noktasından gelen ışınların, optik eksenin uzağına yönlendirilmiş bir kuyruklu yıldız gibi bulanıklık yaratmasına neden olan bir sapmadır [27]. Parabolik yüzeyler kullanılarak giderilebilir. Şekil 2.12’de gösterilmiştir.

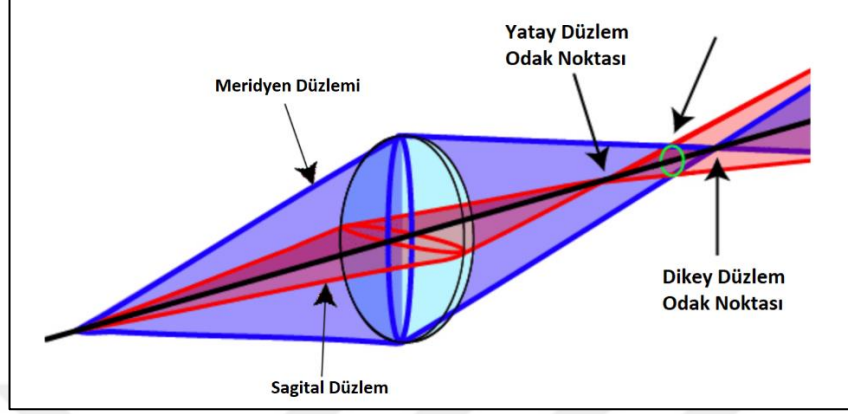


Şekil 2.12: Koma.

2.6.4. Astigmatizma

Astigmatizma, küresel sapma ve komadan farklı olarak, bir merceğin tek bir bölgesinin, eksen dışı bir noktanın görüntüsünü tek bir noktaya odaklayamamasından kaynaklanır. Şekil 2.13’de gösterildiği gibi, optik eksenin dışına geçen birbirine dik açılardaki iki düzlem, meridyen düzlemi ve sagittal düzlemdir. Meridyen düzlemi eksen dışı nesne noktasını içeren düzlemdir. Eğik ışınlar olarak adlandırılan meridyen düzleminde olmayan ışınlar, düzlemde bulunan ışıklardan daha uzağına odaklanır. Her

iki durumda da ışınlar bir nokta odakta değil, birbirine dik çizgiler olarak buluşur. Bu iki konum arasında, görüntüler elips şeklindedir [27]. Optik üretim kaynaklı bir bozulmadır. Hizalamayla giderilemez. Astigmatizma Şekil 2.13'te incelenebilir [27].



Şekil 2.13: Astigmatizma.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tezde temel olarak, paylaşımlı açıklık kullanarak, yüksek güçlü lazer iletimi ve görüntüleme kabiliyetine sahip bir teleskop tasarımı üzerine çalışılmıştır. Lazer ışınımının optik yüzeyler üzerindeki ısıl etkileri sebebiyle dalga cephesinde bozulmalar meydana gelmektedir. Bu termal etkiler COMSOL MultiPhysics® programı yardımı ile analiz edilip sonrasında oluşturulan çıktılar optik tasarım programı ZEMAX® programının girdileri olarak kullanılmıştır.

Yüksek performanslı optik sistemlerde lazer kaynaklı dalga cephesi bozulmalarını minimize edebilmek için, tasarım adımı yapılmaması gereken bazı hususlar söz konusudur. Lazer gücü, kullanılacak optik alttaş malzeme seçimi, kaplama özellikleri gibi birçok parametre doğrudan sistemin kalitesini etkilemektedir. Yüzeyi bozulmuş bir ayna hem görüntüleme kalitesini hem de iletilen lazer kalitesini olumsuz etkileyecektir.

3.1. Materyal

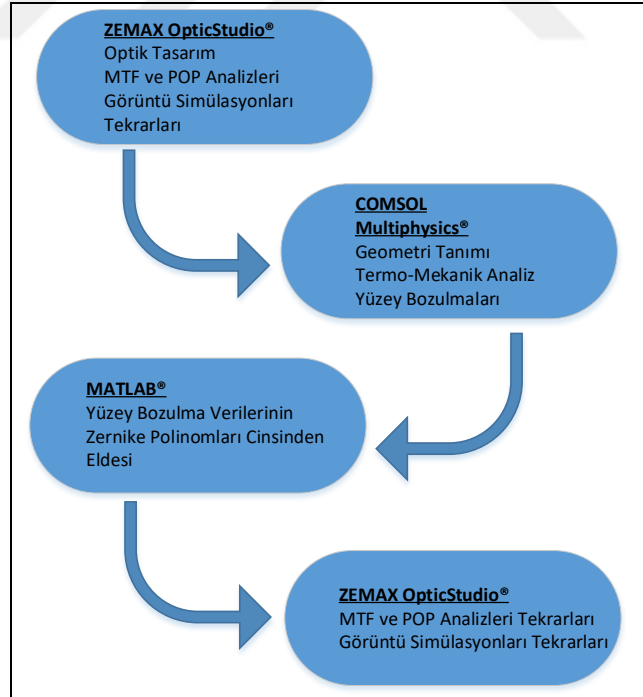
3.1.1. Ortak Açıklık Yöntemi

Paylaşımlı açıklık yöntemi ile tasarlanan sistemlerde, lazer iletimi ve görüntüleme sistemi için farklı iki sisteme ihtiyaç duyulmamaktadır. Dikroik (çift renkli) ayna kullanılarak tasarlanmış bu sistemler her iki kabiliyeti de içerisinde barındırmaktadır [28]-[30]. Bu tür sistemler iki dalga boyunda yüksek performans ile çalışmaktadır. Birincisi iletilen lazerin dalga boyu, ikincisi ise aydınlatma yapılan lazerin dalga boyudur. Bu çalışmada tasarlanan sistem için yüksek güçlü lazer dalga boyu 1075 nm, aydınlatma lazeri dalga boyu 950 nm olarak seçilmiştir. Dalga boyu seçimleri ile ilgili detaylar “Tasarım” kısmında yer almaktadır. Teleskop birincil ve ikincil aynaları her iki dalga boyu için yüksek yansıtıcılık özelliğine sahiptir.

3.2. Yöntem

Tasarım için, en yaygın optik tasarım aracı olan ZEMAX OpticStudio® programı kullanılmıştır. Termal analizler için de COMSOL Multiphysics® programı tercih edilmiştir. COMSOL Multiphysics®, modelleme iş akışındaki tüm adımları kapsayan bir simülasyon platformudur. Geometrileri, malzeme özelliklerini ve belirli fizik fenomenlerini tanımlamaktan, modelleri çözme ve işleme sonrası işlemlerine kadar kullanılabilir [31].

COMSOL® programındaki termal analiz çıktıları bir MATLAB® kodu ile yüzey bozulmalarına yani Zernike Polinomları'na dönüştürülmektedir. Zernike Polinomları ZEMAX OpticStudio® üzerinde yüzeye tanımlanarak MTF analizi ve lazer spot çapı analizleri yapılmıştır. Bu sayede lazer ışınının ayna üzerindeki termal etkisinin görüntü kalitesi ve lazer spot çapına etkisi incelenmiştir. Ayna malzemesi için, termal genişleme katsayıları farklı ve lazer uygulamalarında sıkça kullanılan BK7, Fused Silika ve Zerodür malzemeleri tanımlanarak analizler tekrarlanmıştır. Çalışma akışı şekil 3.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.1: Çalışma Akış Diyagramı.

Ortak açıklık ile tasarlanan optik sistemlerde, lazer iletimi ve görüntüleme için farklı açıklıklı iki sisteme gerek duyulmamaktadır. Dikroik (çift renkli) ayna kullanılarak tasarlanmış bu sistemler her iki kabiliyeti de içerisinde barındırabilir. Bu tür sistemler iki dalga boyunda yüksek performans ile çalışmaktadır. Birincisi iletilen lazerin dalga boyu, ikincisi ise aydınlatma yapılan lazerin dalga boyudur. Bu çalışma kapsamında ortak açıklıklı bir teleskop tasarımı yapılmıştır.

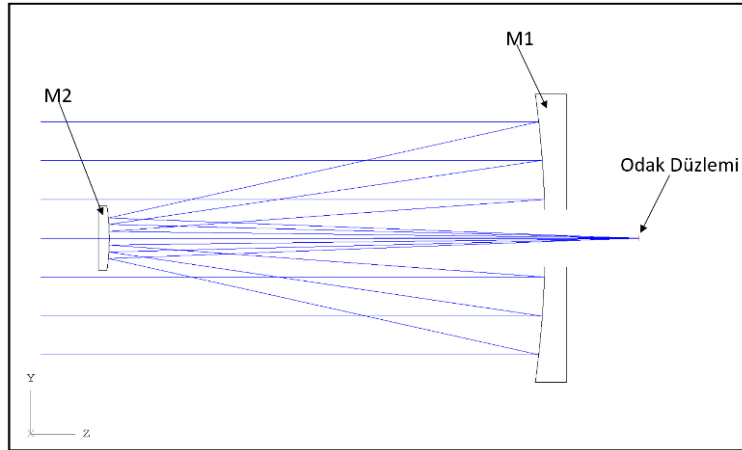


4. TASARIM VE ANALİZ

Bu çalışmada lazer iletimi ve görüntüleme yapabilecek, Dall Kirkham tipi teleskop üzerinden tasarım yapılmıştır. Dall Kirkham Teleskobu, Cassegrain tipi teleskopların özel bir halidir. Birincil ayna eliptik ikincil ayna küresel aynadır. Bu sayede küresel aberasyonu düşüktür.

4.1. Cassegrain Teleskop

Cassegrain tipi teleskop 1672’de Laurent Cassegrain tarafından önerilmiştir. Bir adet iç bükey birincil ayna (M1) ve bir adet dış bükey ikincil aynadan (M2) oluşur. Teleskoba giren paralel ışık ışınları iç bükey M1 aynası tarafından yansıtılarak ayna odak noktasına doğru odaklanarak ilerler. Odak noktasına ulaşmadan önce dış bükey M2 aynası tarafından ikinci kez yansıtılarak M1 aynasının ortasındaki delikten geçerek arkasında odaklanır [32]. Kısa bir optik tüp düzeni içinde uzun bir odak uzaklığı sağlar. Kullanılabilir alan küçüktür ve eksen dışı sapmalar sınırlıdır. Şekil 4.1’de Cassegrain Reflektörü olarak da isimlendirilen Cassegrain Teleskobu incelenebilir.



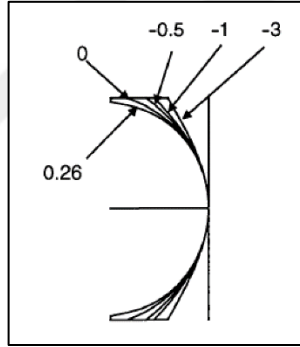
Şekil 4.1: Cassegrain Teleskop.

4.1.1. Dall Kirkham Teleskop

Dall Kirkham Cassegrain tipi teleskopların özel bir halidir. Eliptik bir birincil ayna ve küresel bir ikincil aynadan oluşur. İki aynası da küresel olmayan Cassegrain teleskoplara nazaran daha fazla koma aberasyonuna sahiptir. Fakat düşük maliyetli olması yaygın kullanımını sağlamaktadır.

Herhangi bir yüzeyin küresel mi eliptik mi ya da hiperbolik mi olduğu matematiksel olarak “konik sabiti” ile ifade edilir. Şekil 4.2’de konik sabitlere karşılık gelen geometrik yüzeyler gösterilmiştir [33]. “e” değeri, konik kesitin dışmerkezliği olmak üzere Konik sabiti (K) denklem 4.1’deki gibi ifade edilir. Yüzey, $K>0$ ise basık elipsoid, $K=0$ ise küresel, $-1<K<0$ ise uzamış elipsoid, $K=-1$ ise parabolik ve $K<-1$ ise hiperbolik olarak isimlendirilir.

$$K = -e^2 \quad (4.1)$$

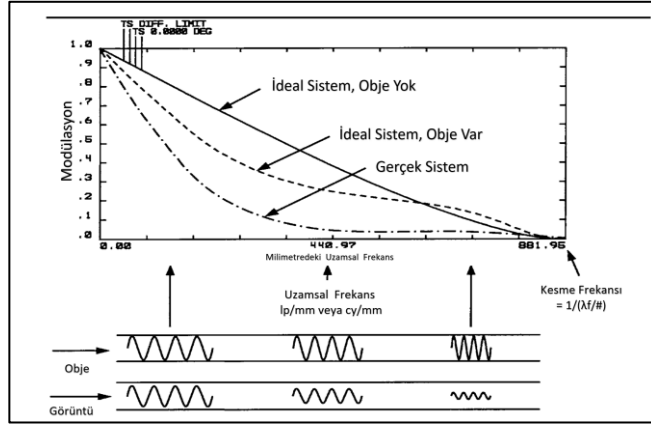


Şekil 4.2: Konik Sabit Değerleri.

4.2. Görüntüleme Analizi, MTF

MTF, bir görüntüleme sisteminin veya bir bileşenin uzaysal frekans yanıtıdır [33]. Düşük frekanslara göre belirli bir uzaysal frekanstaki kontrasttır. Radyogramda farklı boyut ve opaklığa sahip nesnelere farklı gri skala değerleriyle gösterilir. MTF, farklı büyüklükteki nesnelere (nesne kontrastı) kontrast değerlerini görüntüdeki kontrast yoğunluk seviyelerine (görüntü kontrastı) dönüştürmekten sorumludur. MTF, bir dizi uzaysal frekans üzerindeki bulanıklık ve kontrast miktarını hesaba kattığı için, çözünürlüğün yararlı bir ölçüsüdür. MTF, optik sistemin mm başına düşen siyah-beyaz

çizgi çiftlerini ne oranda çözebildiğinin bir göstergesidir. Tipik bir MTF eğrisi şekil 4.3’de gösterildiği gibidir [33].

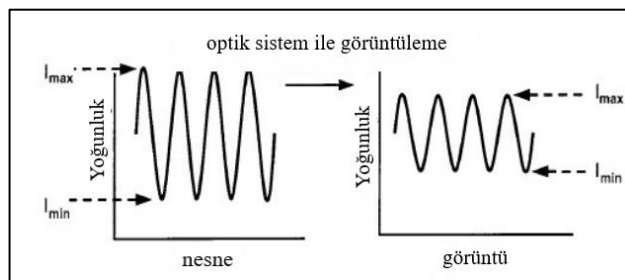


Şekil 4.3: MTF Eğrisi.

$$Modülasyon = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4.2)$$

$$MTF = \frac{Görüntüdeki\ modülasyon}{Objedeki\ modülasyon} \quad (4.3)$$

Şekil 4.4’de, bir hedef objenin optik sistemden geçtikten sonra yoğunluk maksimum ve minimumlarındaki değişim gösterilmiştir [33]. Maksimum ve minimumların farklarının toplamına bölümü modülasyonu verir (bkz. denklem 4.2).

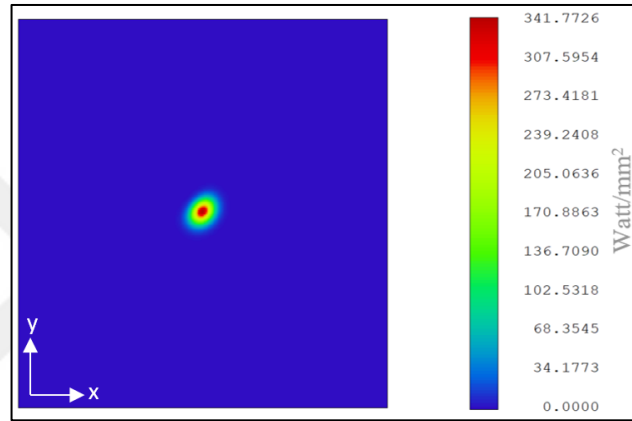


Şekil 4.4: Modülasyon.

MTF, denklem 4.3’de de belirtildiği gibi görüntüdeki modülasyonun obje modülasyonuna bölümüdür. Diğer bir tanımla objenin modülasyonunun görüntüye aktarımının uzamsal frekans cinsinden fonksiyonudur [23].

4.3. POP Analizi

Tez kapsamında tasarlanan optik sistem optimize edilirken görüntüleme analizlerinin yanı sıra, lazer hüzme analizleri de göz önünde bulundurulmuştur. POP (Physical Optics Propagation) Analizi, lazer hüzme çapı veya güç yoğunlukları gibi analizler yapabilmeyi sağlayan ZEMAX® aracıdır [17]. Bu çalışmada MTF analizlerinin yanı sıra sistemin optimizasyon çalışmalarını yönlendiren bir etken olarak sıklıkla kullanılmıştır. POP Analiz arayüzü şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: POP Analizi.

Fermat prensibine göre ışık ışınları iki nokta arasındaki yolu en kısa sürede alacak şekilde hareket ederler [34]. Geometrik optik, ışığın yayılımını ışınlar cinsinden modelleyen bir yaklaşımdır. Işık ışınları dalga cephesine dik olarak yayılan vektörlerdir. Işın modeli yaklaşımı ve dalga cephesi modeli yaklaşımı ışın yayılım yaparken farklı temsiller verirler. Işın modeli herhangi bir optik sistemi modellerken oldukça hızlı ve pratik sonuçlar verir. Ancak girişim, kırınım gibi önemli etkilerin analizlerini yapmakta yetersiz kalır. ZEMAX® programı, MTF veya PSF (Nokta Dağılım Fonksiyonu) gibi kırınım hesaplamaları yapabilir. PSF bir optik sistemin, ideal noktasal bir ışık kaynağına olan cevabını ifade eden matematiksel ifadedir. Kırınım ve mercek aberasyonlarının etkisi ile PSF, Gauss fonksiyonu gibidir. σ disk yarıçapı olmak üzere,

$$PSF(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.4)$$

Evrişim (konvolüsyon) bir fonksiyonun diğere bir fonksiyon üzerine kaydırılırken üst üste gelme miktarını ifade eden bir integraldir. Bir g fonksiyonunun bir f fonksiyonu üzerine konvolüsyonu;

$$(f * g)(t) \equiv \int f(\tau)g(t - \tau)d\tau \quad (4.5)$$

Görüntü Obje ile PSF'in konvolüsyonu ile elde edilir (Görüntü= Obje*PSF).

Optik Transfer Fonksiyonu (OTF) bir optik sistemin uzaysal frekans tepkisinin bir fonksiyonudur. OTF PSF'nin Fourier Transformu ile elde edilir. OTF iki parçadan oluşur: MTF ve PTF (Faz Transfer Fonksiyonu) [35].

$$OTF(v) = \int PSF(x)e^{-ivx} \quad (4.6)$$

$$OTF = MTF \cdot e^{iPTF(v)} \quad (4.7)$$

$$MTF(v) = |OTF(v)| \quad (4.8)$$

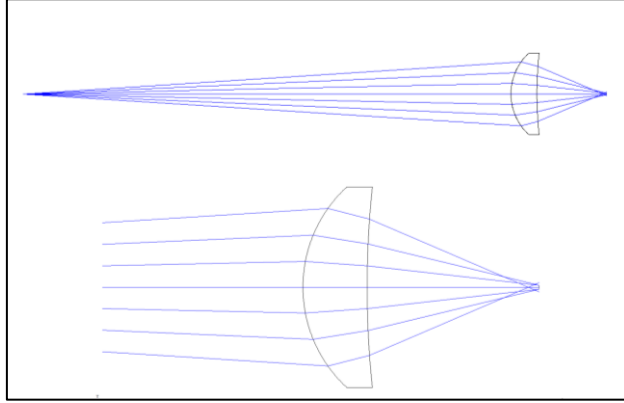
$$PTF(v) = \arg(OTF(v)) \quad (4.9)$$

$$MTF(\rho) = \begin{cases} \frac{2}{\rho} \left[\cos^{-1} \frac{\rho}{2\rho_0} - \frac{\rho}{2\rho_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{2\rho_0}\right)^2} \right] & , \rho \leq \rho_0 \\ 0 & , \text{diğere} \end{cases} \quad (4.10)$$

4.4. Aberasyonların ZEMAX Ortamında Doğrulanması

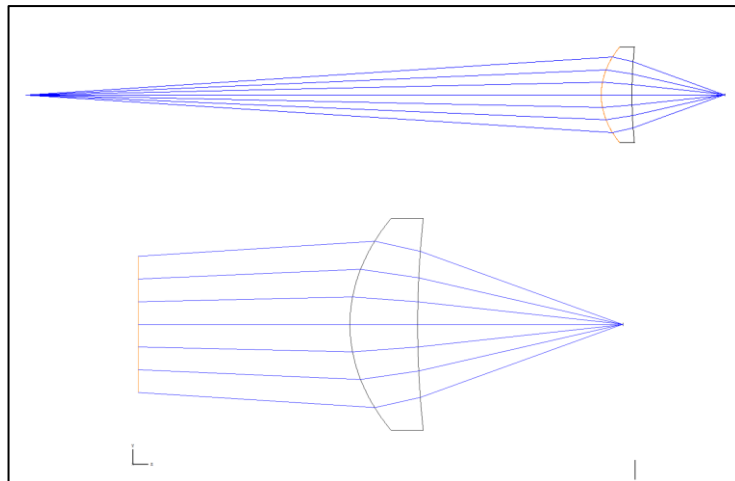
Çalışmanın bu bölümünde bazı temel aberasyon tipleri ZEMAX OpticStudio® ortamında modellenerek gösterimleri sağlanmıştır.

4.4.1. Küresel Aberasyon



Şekil 4.6: Küresel Aberasyon.

Küresel aberasyon (küresel sapınç) özetle merceğin kenarlarına gelen ışınların merkezine gelen ışınlara göre daha yakına odaklanmasıdır. Şekil 4.6’da standart bir küresel merceğin odak düzlemi incelenecek olursa, küresel aberasyon rahatlıkla gözlemlenebilir. Küresel olmayan optik yüzeyler kullanılarak giderilir. Küresel merceklerin yüzeylerinin konik sabitleri $K=0$ ’a eşittir (bkz. Şekil 4.2). ZEMAX® ortamında yapılan bir optimizasyon çalışması ile aynı merceğin konveks yüzeyinin konik sabiti değiştirilmiştir. Bu değer -0.594 ’e eşitlenerek küresel aberasyon minimize edilmiştir. Eliptik yüzeyli merceğin küresel aberasyonu minimize etmesi şekil 4.7’de incelenebilir.

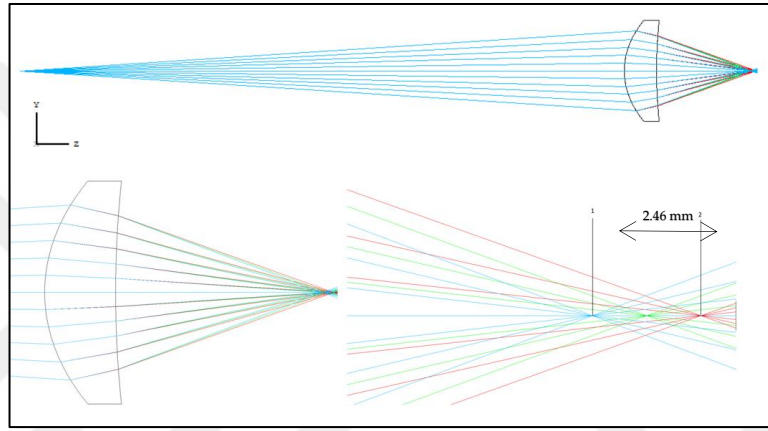


Şekil 4.7: Küresel Aberasyon Giderilmiş.

4.4.2. Kromatik Aberasyon

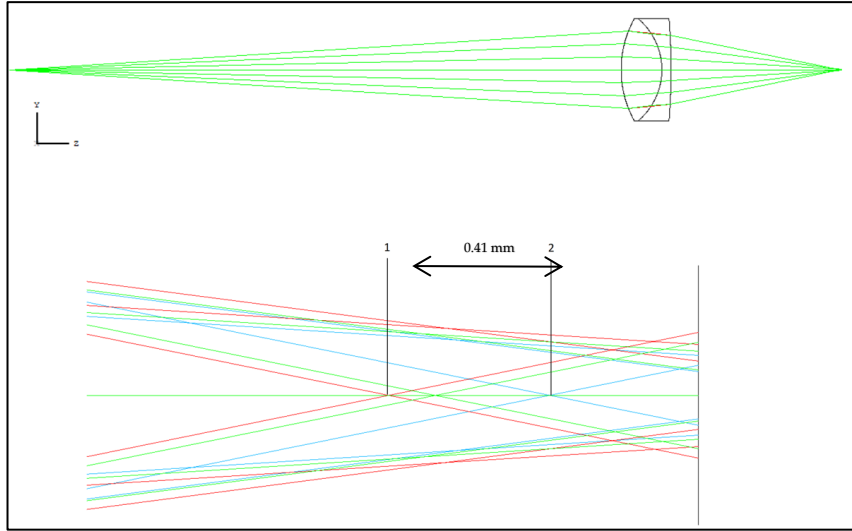
Kromatik aberasyon merceğin farklı dalga boyundaki ışıkları farklı yerlere odaklamasıdır. Bunun sebebi kırılma indisinin dalga boyuna bağlı değişmesidir. Aşağıdaki şekilde kromatik aberasyon ZEMAX® ortamında modellenmiştir. 3 farklı dalga boyu seçilmiştir: Kırmızı (656 nm), Yeşil (587 nm) ve Mavi (486 nm).

Şekil 4.8'deki 1 ve 2 olarak isimlendirilmiş noktalar mavi ve kırmızı renkteki ışınların odak noktalarıdır ve aralarındaki mesafe 2.46 mm'dir. Kromatik aberasyonlar akromat diye isimlendirilen mercek çiftleri kullanılarak minimize edilebilir.



Şekil 4.8: Kromatik Aberasyon.

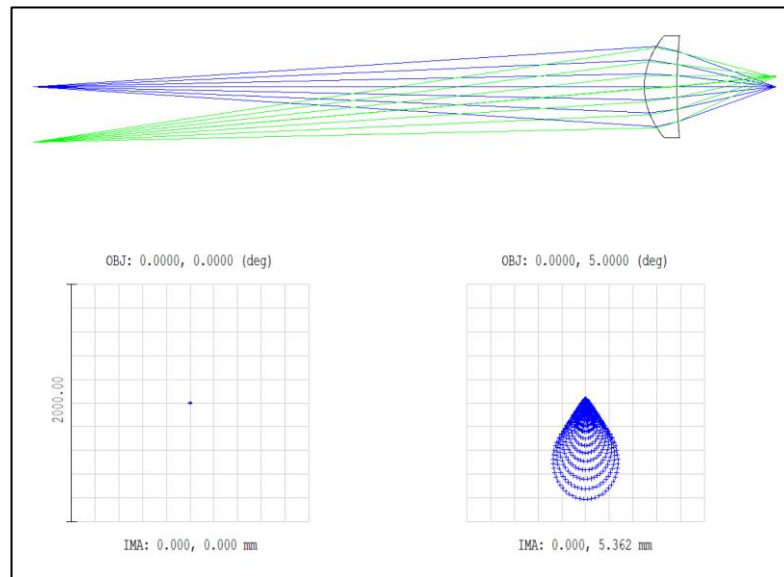
Şekil 4.9'da bir krown bir de flint cam ile tasarlanmış bir akromatik merceğin 3 farklı renkteki ışığı odaklaması modellenmiştir. Kırmızı ile mavi ışığın odakları arası mesafe 0.41 mm'dir. Odaklar arası mesafe, akromat kullanılarak 2.46 mm'den 0.41 mm'ye düşürülmüştür. Simüle edilmiş bu örnekte akromat merceklerin kromatik aberasyonları minimize etmek için oldukça verimli olduğu görülmektedir. Standart objektiflerin en dışında sıklıkla akromatlar kullanılır.



Şekil 4.9: Akromat Mercek ile Kromatik Aberasyon Minimize Edilmesi.

4.4.3. Koma

Koma, obje düzleminde eksen dışı bir ışık noktasından gelen ışınların, optik eksenenden uzağa yönlendirilmiş bir kuyruklu yıldız gibi bulanıklık yaratmasına neden olan bir sapmadır. Şekil 4.10'da ZEMAX® üzerinde obje düzlemine 5 derece açı verilerek basit bir sistem ile koma aberasyonu modellenmiştir. Merceğe açıyla gelen hüzme görüntü düzleminde virgüle benzeyen bir şekil oluşturur. Sistem içerisindeki optik bileşenlerdeki hizalama hataları da yine koma sapması verebilmektedir.



Şekil 4.10: Koma.

4.5. Teleskop Tasarımı

Uzak mesafe lazer iletimi söz konusu olduğunda M^2 parametresi önem arz etmektedir. T_{nm} rezonatör modu olmak üzere Hermite-Gauss ışını x yönünde $(2n+1)M^2$ ve y yönünde $(2m+1)M^2$ faktörüne sahiptir [36]. TEM_{00} Gauss lazer hüzmelerinin M^2 değeri 1'e eşittir. Fiber lazerler son yıllarda tek modda yüksek güç üretimi yapabilmek konusunda kayda değer ilerlemeler elde etmiştir [37]. Bu sebeple tasarımda kullanılacak lazer, tek modlu bir fiber lazer olarak seçilmiştir.

Çalışma kapsamında tasarlanan sistem için yüksek güçlü lazer dalga boyu 1075 nm seçilmiştir. Yüksek lazer gücü sebebiyle termal yükler ayna yüzey deformasyonlarına sebep olmaktadır. Bundan dolayı ayna yansıtıcılık değeri $R=0.99$ (%99) olarak kabul edilmiştir.

Aydınlatma lazeri için 950 nm diyot lazer seçilmiştir. Diyot lazerler %60 gibi verimlilik değerleri ile kapladıkları hacim ve maliyetleri bakımından lazer aydınlatma sistemlerinde en çok tercih edilen türdür [38]. Sistemde görüntülenmek istenen bölgeye aydınlatma lazerinin harici bir açıklıktan gönderildiği varsayılmıştır.

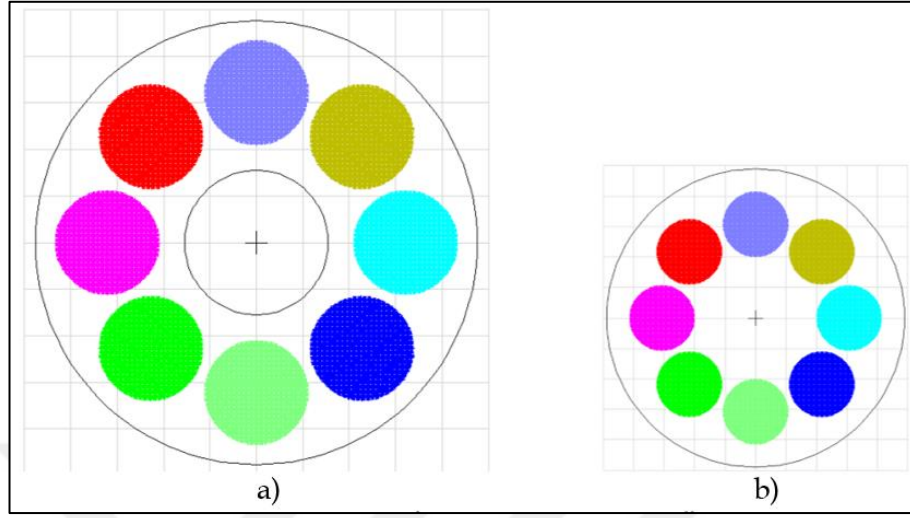
Sistemde kullanılan dikroik ayna, 1075 nm için $R=0.99$, 950 nm için $T>0.7$ kabul edilmiştir. Dikroik ayna görüntüyü arkasına geçirirken, lazer ışınımını yansıtacaktır. Tasarıma başlarken bazı parametrelerin sabitlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada tasarımı yönlendirecek olan parametreler, Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1: Tasarım Parametreleri.

Lazer dalgaboyu	1075 nm
Aydınlatma lazeri dalga boyu	950 nm
Lazer hüzmeye çapı ($1/e^2$)	½ inç
Lazer gücü	1kW - 3kW
Kullanılan lazer kaynağı sayısı	8
Birincil ayna çapı	400 mm
İkincil ayna çapı	90 mm
Ayna yansıtıcılık değeri: R	0.99
Lazer maruziyet süresi	60 sn

Teleskop ayna yüzey alanlarına maksimum sayıda lazer hüzmeleri düşürebilmek adına toplamda 8 adet lazer kaynağı kullanılması uygun görülmüştür. Lazerlerin $1/e^2$

çapları 12.7 mm olduğundan, (%99) çapları yaklaşık 19 mm'ye eşit olacaktır. 8 adet lazerin birincil ve ikincil ayna üzerindeki görüntüsü şekil 4.11'deki gibidir.

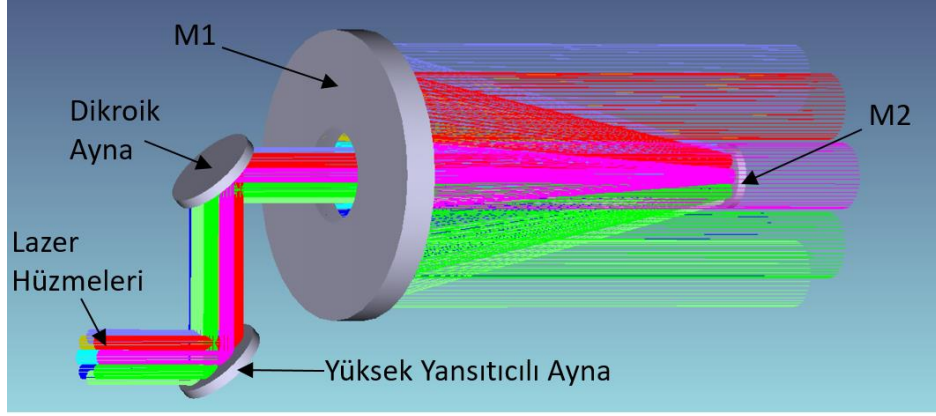


Şekil 4.11: a) Birincil Ayna (M1) ve b) İkincil Ayna (M2) Üzerindeki Lazer Hüzmeleri.

Tablo 4.2: Teleskop Ayna Geometrisi Parametreleri.

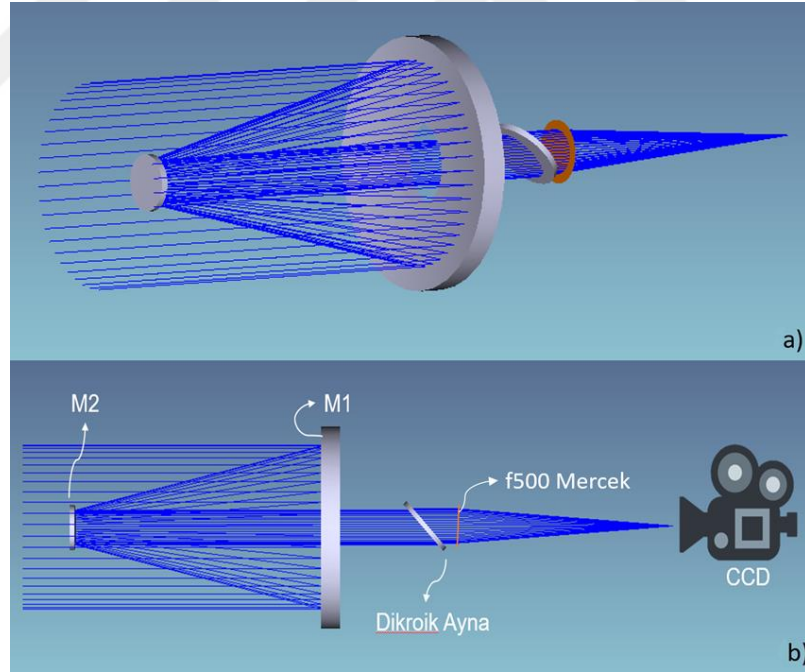
	Eğrilik yarıçapı (mm)	Çap (mm)	Konik sabiti
Birincil ayna	1050.327	400	-0.776
İkincil ayna	238.733	90	0

DK tipi teleskop tasarlanmıştır. Birincil ayna eliptik, ikincil ayna küreseldir [39]. Tablo 4.2'de ayna geometrik ölçüleri verilmiştir. Teleskop lazer iletim konfigürasyonu üç boyutlu görünümü Şekil 4.12'de verilmiştir. Lazer yönlendirmesi için teleskop aynalarından önce iki adet 45 derecelik iki adet ayna kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi 950 nm'de geçirgen, 1075 nm'de yüksek yansıtıcı olan dikroik ayna diğeri her iki dalga boyu için yüksek yansıtıcılı kaplamaya sahip yüksek yansıtıcılı aynadır. Lazer hüzmeleri kolimatörden çıktıktan sonra yüksek yansıtıcılı aynaya, daha sonra dikroik aynaya, sonrasında ise sırasıyla M2 ve M1'den yansiyarak teleskoptan çıkış yapmaktadır.



Şekil 4.12: Teleskop Lazer İletimi Konfigürasyonu.

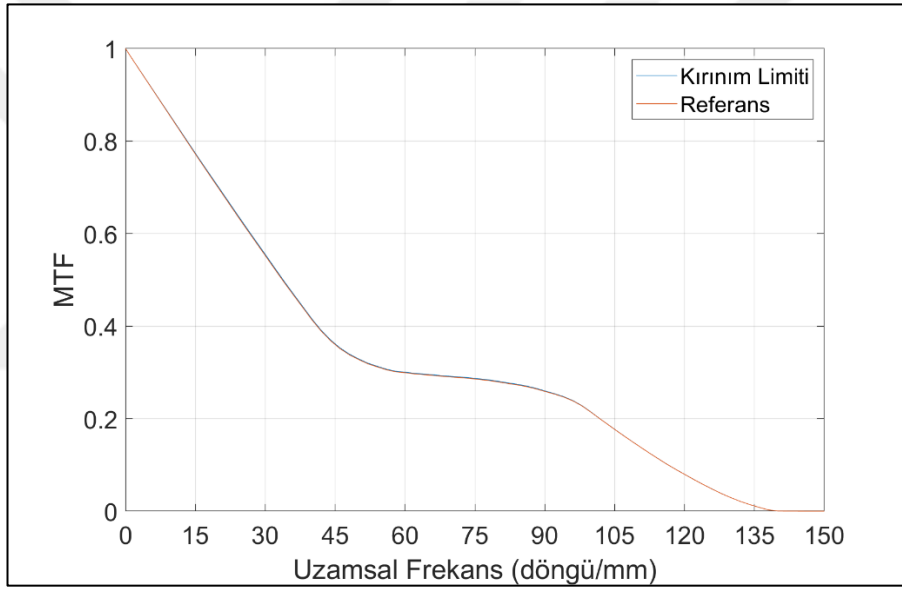
Görüntünün izlediği yol ise şu şekildedir; teleskoba giriş yapan görüntü hüzmeleri sırasıyla M1 ve M2'den yansyarak dikroik aynaya ulaşır. 950 nm'de geçirgen özellikli dikroik aynadan geçerek, bir objektif yardımı (Şekil 4.13'de "f-500 mercek" ismiyle gösterilmiştir) ile odaklanıp CCD sensör üzerine düşürülmüştür. Şekil 4.13'de teleskop görüntüleme konfigürasyonu incelenebilir.



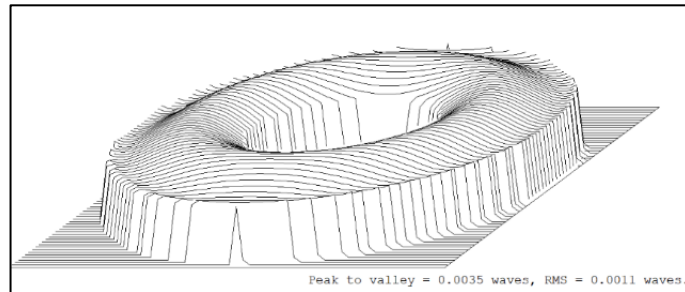
Şekil 4.13: Teleskop Görüntüleme Konfigürasyonu a) Köşeden Görünüm b) Yandan Görünüm.

4.6. Analiz

Bu bölümde teleskop sisteminin termal analizleri, Dalga Cephesi Haritası Analizi, MTF analizi, görüntü simülasyonları, lazer hüzme analizleri yer almaktadır. İkincil ayna üzerindeki lazer hüzmeleri kaynaktan çıktığı çap ile aynı ölçüdedir. Büyük aynaya geldiğinde teleskop büyütmesi sebebiyle lazer hüzme çapı büyüyeceğinden, lazer güç yoğunluğu, hüzme yarıçapının karesi ile ters orantılı olarak düşecektir. Bu sebeple yüzey termal analizlerinin ikincil ayna üzerinde yapılması daha uygun görülmüştür. Lazer maruziyet süresi 60 saniye olarak kabul edilmiş ve tüm analizlerde bu süre sabit tutulmuştur.

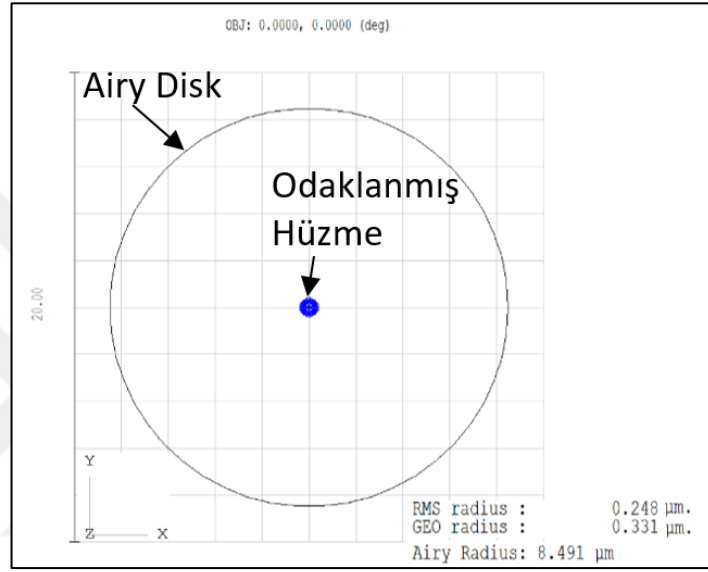


Şekil 4.14: MTF, Referans.

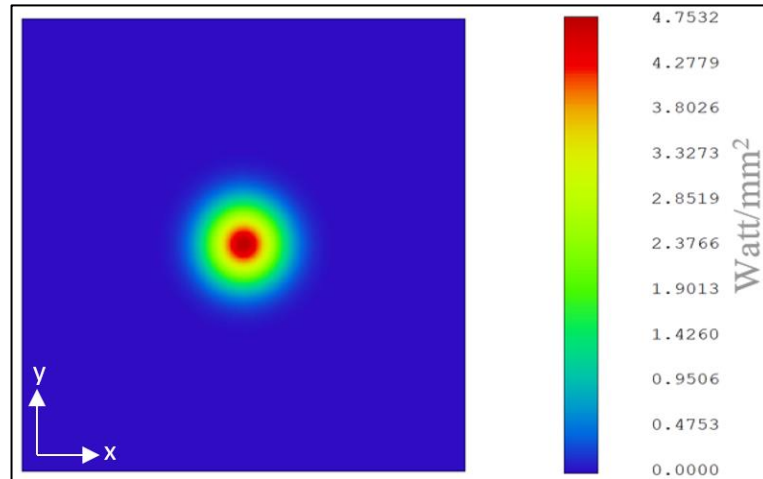


Şekil 4.15: Görüntüleme Dalga Cephesi Haritası, Referans.

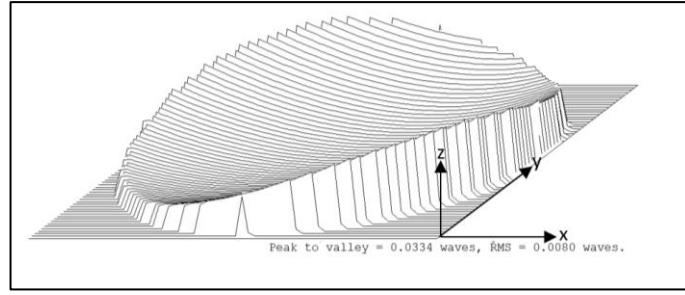
Sisteme henüz lazer gönderilmemiş durumda, MTF eğrisi, hüzme spot diyagramı ve dalga cephesi haritası şekil 4.14, 4.15 ve 4.16'da incelenebilir. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere sistem kırınım limitli bir sistem olup Airy disk yarıçapı 8.491 μm iken görüntü düzlemindeki hüzme çapının RMS değeri 0.248 μm 'dir. Sistemdeki termal yükün oluşturduğu yüzey bozulmaları etkisi, bu değerler referans olarak karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4.16: Airy Disk ve Hüzme Spotu, Referans.



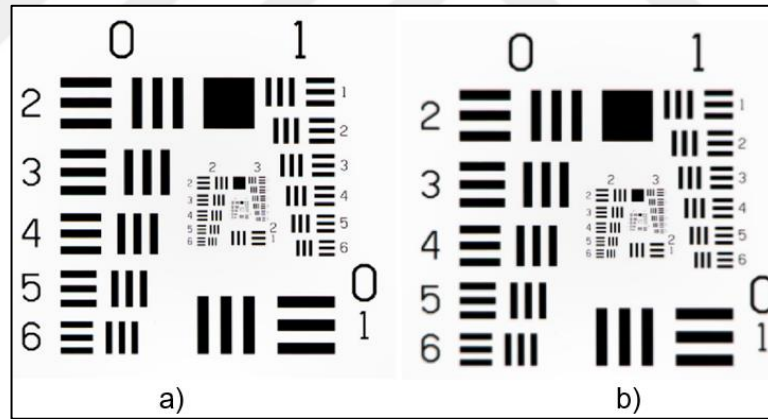
Şekil 4.17: Lazer Hüzme Spotu, Referans.



Şekil 4.18: Lazer Dalga Cephesi Haritası, Referans.

Sistemin lazer odaklama performansı Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir. 1000 m mesafedeki lazer hüzmeye yarıçapı 11.5 mm’dir. Bu değerler lazer iletim performansında referans olarak kabul edilmiştir.

Görüntü simülasyonları için kullanılan çözünürlük tablosu şekil 4.19’da verilmiştir. Hiçbir aberasyon ve kırınım etkisi olmadan görüntü şekil 4.19 (a) ve kırınım etkisi altındaki görüntü şekil 4.19 (b)’de verilmiştir.



Şekil 4.19: a) İdeal Görüntü, b) Kırınım Limitli Görüntü.

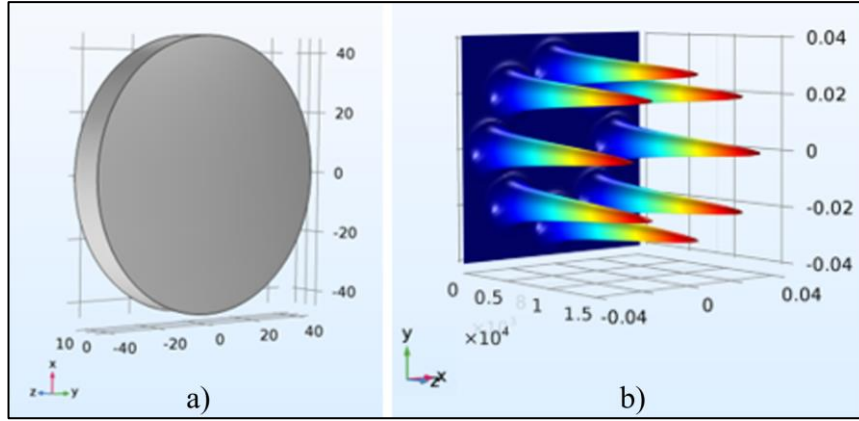
RMS spot çapımız kırınım limitinin altında olsa dahi sistemin görüntüleme kalitesi kırınım ile limitli olacağından, gözlemlenebilecek en iyi görüntü, şekil 4.19 (b) gibi olacaktır. Bu çalışmada tasarlanan teleskobun görüntüleme kalitesi kırınım limitli olduğundan, şekil 4.19 (b) referans görüntü olarak kabul edilmiştir.

4.6.1. COMSOL Multiphysics® M2 Yüzey Termo-Mekanik Analizleri

M2 geometrisi (bkz. Şekil 4.20 (a)), lazer hüzmelerinin M2 üzerindeki pozisyonları ile birlikte COMSOL Multiphysics® ortamında modellenmiştir. Dört yüzüzlü ağ (tetra-hedral mesh) ile modellenen bu geometriye malzeme ataması yapılmıştır. Lazer kaynakları M2 yüzeyine Şekil 4.20'deki gibi tanımlanmıştır. Malzeme olarak lazer uygulamalarında sıkça kullanılan N-BK7, Fused Silika ve Zerodür seçilmiştir ve bu üç alt taşın termal genişleme katsayıları sırasıyla $7.1 * 10^{-6} K^{-1}$, $0.55 * 10^{-6} K^{-1}$ ve $0.05 * 10^{-6} K^{-1}$ 'dir [40], [41]. Seçilen alttaş malzemelerin termal etki altındaki davranışlarını gösterebilmek adına bu seçimler yapılmıştır. Sonrasında katı mekanik ve ısı transferi modülleri ile yüzeyin termal genişlemeye bağlı geometri değişimi analizi yapılmıştır. Bu analizler, üç boyutlu ısı dağılım ve yer değiştirme çıktılarını sağlamıştır. Bu işlemlerde lazer etkisi altındaki ısı değişiminin yüzey deformasyonu etkisini gösterirken ısı transferi ve hareket denklemleri çözdürülmüştür. Sekiz adet lazer hüzmesi, ayna üzerine, r çevre yarıçaplı bir düzgün sekizgenin köşelerini merkez alacak şekilde konumlandırılmıştır. Lazer kaynaklı soğurulan güç, yüzey soğurma katsayısı ve lazer çıkış gücü ile çarpılarak hesaplanmıştır. Lazer hüzmeye profili Gauss dağılımına sahip şekilde tanımlanmıştır ve bu yüzden toplam lazer gücü, (a_i, b_i) noktalarına merkezlenmiş sekiz lazer kaynağının toplamı şeklinde hesaplanmıştır:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = AP \frac{2}{\pi \omega^2} \sum_{i=1}^8 e^{-\frac{2((x-a_i)^2+(y-b_i)^2)}{\omega^2}} \quad (4.11)$$

Burada; k termal iletkenlik, T sıcaklık, A soğurma katsayısı, P hüzmeye gücü, ω ayna yüzeyi üzerindeki hüzmeye bel yarıçapıdır ($1/e^2$).



Şekil 4.20: a) M2 Geometrisi, b) M2 Yüzeyinde Lazer Hüzmeleri

Termal genişleme, termal gerinim tensörüne implemente edilmiştir. Isı transferi ve hareket denklemleri 4.11, 4.12 ve 4.13 denklemlerinde gösterilmiştir. Burada ρ yoğunluk, C_p ısı kapasitesi, \mathbf{u} yer değiştirme, g yer çekim ivmesi, σ Cauchy stres tensörü, ϵ gerinim tensörü, ϵ_{th} termal gerinim tensörü, α termal genişleme katsayısı, T_0 referans sıcaklık değeri, \mathbf{C} esneklik tensörü, E Young modülü, ν Poisson oranı ve son olarak da G Shear modülüdür [42].

$$\rho C_p \dot{T} + \nabla(-k\nabla T) = 0 \quad (4.12)$$

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} - \nabla \sigma = \rho g, \sigma = \mathbf{C} : (\epsilon - \epsilon_{th}) \quad (4.13)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}], \epsilon_{th} = \alpha(T - T_0), \quad (4.14)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}(E, \nu) \quad (4.15)$$

Hooke kanununa göre ($F=-kx$) yay gibi esnek bir cisimi gerdirmek için gereken kuvvet yayın uzunluğundaki değişimle doğru orantılıdır. Katı mekaniği teorisi, Hooke kanununu genelleştirir ve bir objenin geriniminin, üzerine uygulanan stresle doğru orantılı olduğunu söyler. Bu genelleme ile, farklı yönlerdeki stresin (stres tensörü), farklı yönlerdeki gerinimle (gerinim tensörü) orantısının miktarını belirleyen faktör artık tek bir sayıdan ibaret değildir ve malzemenin fiziksel özelliklerine (Young modülü ve Poisson oranı) bağlı faktörlerden oluşan bir elastik tensördür. Simetri

nedeniyle stres ve gerinim tensörleri 3x3 matrislerle ifade edilebilirken, elastik tensör de 6x6 diyagonal bir matris ile ifade edilebilir [43]. Bu matrisi D ile ifade edersek,

$$D_{ii} = \left[\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right] * (1 - \nu) \quad i = 1,2,3 \quad (4.16)$$

$$D_{ii} = \left[\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right] * \frac{(1-2\nu)}{2} \quad i = 4,5,6 \quad (4.17)$$

$$D_{ij} = 0 \quad i \neq j \quad (4.18)$$

Aynanın dış yüzeylerine ışınım kaynaklı ısı akısı uygulanmıştır. Ayna çerperinde yer değiştirme ($\mathbf{u}=0$) sıfır, $T_0=20^\circ\text{C}$ kabul edilmiştir. Bu sınır koşulları çerçevesinde h ısı transfer katsayısı olmak üzere;

$$-n \cdot (-k\nabla T) = h(T_0 - T) \quad (4.19)$$

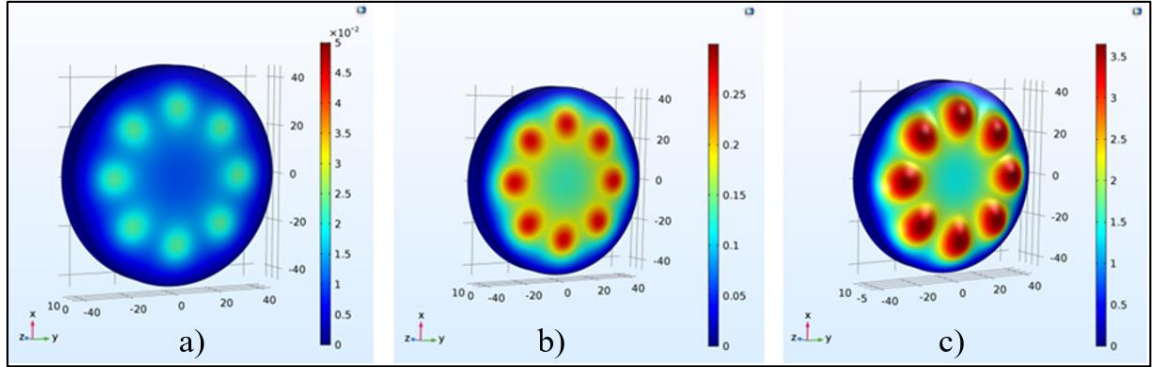
Şekil 4.21'de üç farklı malzemenin 2kW lazer gücü altındaki yüzey yer değiştirme gösterimi bulunmaktadır. Renk dağılımı maviden kırmızıya doğru yer değiştirme miktarlarını (μm cinsinden) temsil etmektedir. Kırmızı bölgeler z ekseninde daha fazla yer değiştiren noktalaradır.

Bu analiz kapsamında üç farklı lazer gücü kullanılmıştır. Tüm analizler 1075 nm'de 1, 2 ve 3kW lazer gücü ile tekrarlanmıştır. Bu sayede malzeme farkının yanında, lazer gücünün de görüntüleme performansına etkisi gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Malzemelerin Termal ve Mekanik Özellikleri.

	N-BK7	Fused Silika	Zerodür
Termal genleşme katsayısı	$7.1 * 10^{-6} K^{-1}$	$0.55 * 10^{-6} K^{-1}$	$0.05 * 10^{-6} K^{-1}$
Isı kapasitesi	$0.858 J/(g * K)$	$0.703 J/(g * K)$	$0.800 J/(g * K)$
Termal İletkenlik	$1.114 W.m^{-1}.K^{-1}$	$1.38 W.m^{-1}.K^{-1}$	$1.46 W.m^{-1}.K^{-1}$
Young Modulus	$82 GPa$	$73.1 GPa$	$90.3 GPa$
Poisson Ratio	0.206	0.17	0.24
Yoğunluk	$2.51 g/cm^3$	$2.2 g/cm^3$	$2.53 g/cm^3$

Tablo 4.3’de kullanılan malzemelerin termal ve mekanik özellikleri yer almaktadır [40], [41], [44].



Şekil 4.21: 3D Yüzey Yer Değişirme, a) Zerodür, b) Fused Silika, c) N-BK7.

4.6.2. Zernike Polinomları Eldesi

Deforme olmuş ayna yüzeyinin optik aberasyonları, Zernike polinomları cinsinden analiz edilmiştir. Bu polinomlar sarkma deformasyonlarını (sag deformations) ayna yüzeyine pertürbasyonlar olarak fit etmek için kullanılmıştır.

$$s'(r, \theta) = s(r, \theta) + \sum_{n=0}^M \sum_{m=-n}^n c_{nm} Z_n^m(r, \theta) \quad (4.20)$$

s' ve s sırasıyla deforme olmuş ve referans yüzey konfigürasyonların sarkmasını (sag) temsil etmektedir. c_{nm} ortonormal $Z_n^m(r, \theta)$ Zernike polinomlarının katsayılarını göstermektedir. Modelde referans yüzey s konik bir yüzeydir ve κ konik sabit, c eğrilik olmak üzere şu şekilde tanımlanır;

$$s(r, \theta) = s(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2 r^2}} \quad (4.21)$$

Sarkma deformasyonlarının Zernike polinomlarına fit etmek için termomekanik analizler sonucu elde edilen yer değiştirme verileri MATLAB® programına aktarılmıştır [42], [45]. Programa tanımlanan model sonucunda elde edilen yüzey yer değiştirme verileri her bir noktanın üç boyutlu kartezyen uzayda ne kadar saptığını belirtir. Karşılık gelen Zernike polinomlarının katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan

Zernike polinom katsayıları, .txt dosyasından .dat uzantı formatında yeni bir dosyaya kaydedilip, ZEMAX OpticStudio® yazılımının girdisi olarak kullanılmıştır. Örnek gösterim amaçlı Fused Silika camının 2 kW analizlerinden elde edilen Zernike polinom katsayıları Tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4.4: Zernike Polinom Katsayıları.

Terim Say.	136	Zernike 45	2.86862E-07	Zernike 91	-8.37464E-08
Yarıçap	42.5	Zernike 46	7.15973E-07	Zernike 92	-6.92783E-07
Zernike 1	0.00208632	Zernike 47	8.42611E-07	Zernike 93	-1.64603E-06
Zernike 2	1.0218E-06	Zernike 48	7.4166E-09	Zernike 94	4.84896E-07
Zernike 3	-4.96503E-07	Zernike 49	5.57024E-08	Zernike 95	-2.75176E-08
Zernike 4	-0.000812592	Zernike 50	-6.3652E-07	Zernike 96	-4.22459E-07
Zernike 5	-3.44442E-07	Zernike 51	3.45165E-07	Zernike 97	5.85258E-07
Zernike 6	9.1642E-08	Zernike 52	-3.87974E-07	Zernike 98	1.01972E-08
Zernike 7	9.13906E-07	Zernike 53	6.96382E-07	Zernike 99	-2.6168E-06
Zernike 8	-2.50781E-07	Zernike 54	2.50939E-07	Zernike 100	8.7253E-07
Zernike 9	7.5564E-07	Zernike 55	2.13716E-07	Zernike 101	-2.28557E-07
Zernike 10	2.08541E-07	Zernike 56	-0.000108344	Zernike 102	5.14242E-07
Zernike 11	-0.000588082	Zernike 57	1.23074E-06	Zernike 103	-7.45105E-07
Zernike 12	1.6866E-07	Zernike 58	-7.02566E-07	Zernike 104	-1.02271E-07
Zernike 13	1.1584E-06	Zernike 59	-6.46365E-08	Zernike 105	5.03402E-08
Zernike 14	-2.06992E-07	Zernike 60	1.11826E-06	Zernike 106	3.93023E-05
Zernike 15	4.33919E-07	Zernike 61	1.87282E-06	Zernike 107	-1.42254E-06
Zernike 16	-4.88588E-07	Zernike 62	-2.7553E-07	Zernike 108	1.03739E-06
Zernike 17	-3.76872E-07	Zernike 63	3.08853E-08	Zernike 109	-2.37984E-07
Zernike 18	-6.3452E-07	Zernike 64	-0.000193751	Zernike 110	-5.88584E-08
Zernike 19	-1.38556E-06	Zernike 65	-2.23691E-07	Zernike 111	-1.04517E-07
Zernike 20	-5.38289E-07	Zernike 66	-2.50492E-07	Zernike 112	-2.11825E-07
Zernike 21	5.78714E-07	Zernike 67	1.60786E-06	Zernike 113	1.11696E-06
Zernike 22	0.000274732	Zernike 68	-1.52732E-07	Zernike 114	-0.000147482
Zernike 23	7.01837E-07	Zernike 69	-9.40899E-07	Zernike 115	-8.47558E-07
Zernike 24	8.52185E-07	Zernike 70	-9.32416E-07	Zernike 116	-9.74137E-07
Zernike 25	-4.6687E-07	Zernike 71	2.97331E-07	Zernike 117	5.93809E-07
Zernike 26	8.46183E-07	Zernike 72	3.5404E-07	Zernike 118	-2.75611E-07
Zernike 27	2.27248E-07	Zernike 73	2.11161E-07	Zernike 119	-1.01023E-07
Zernike 28	1.28162E-08	Zernike 74	-4.15679E-07	Zernike 120	6.75944E-07
Zernike 29	-1.42366E-06	Zernike 75	4.22041E-07	Zernike 121	-1.52138E-06
Zernike 30	-2.88863E-07	Zernike 76	-9.8168E-07	Zernike 122	8.69321E-07

Tablo 4.4:Devam.

Zernike 31	1.68121E-06	Zernike 77	2.04234E-07	Zernike 123	7.47228E-07
Zernike 32	4.87595E-07	Zernike 78	1.28662E-08	Zernike 124	7.66602E-07
Zernike 33	-4.26096E-07	Zernike 79	-2.57291E-05	Zernike 125	1.74295E-07
Zernike 34	1.05232E-07	Zernike 80	9.49845E-07	Zernike 126	9.78576E-08
Zernike 35	-7.17228E-07	Zernike 81	1.52391E-06	Zernike 127	8.51752E-07
Zernike 36	-1.40388E-07	Zernike 82	1.22509E-06	Zernike 128	-5.09163E-07
Zernike 37	0.000148741	Zernike 83	-1.45443E-06	Zernike 129	1.09976E-06
Zernike 38	7.27436E-07	Zernike 84	2.97466E-07	Zernike 130	-1.07906E-06
Zernike 39	-2.89933E-06	Zernike 85	-1.85863E-07	Zernike 131	8.38378E-07
Zernike 40	-1.55311E-06	Zernike 86	0.000210702	Zernike 132	-5.23067E-08
Zernike 41	-1.55831E-07	Zernike 87	-9.00258E-08	Zernike 133	-3.29158E-07
Zernike 42	2.56892E-08	Zernike 88	7.51974E-07	Zernike 134	3.77928E-07
Zernike 43	-5.61965E-07	Zernike 89	1.88544E-07	Zernike 135	2.36351E-07
Zernike 44	8.5727E-05	Zernike 90	6.99586E-07	Zernike 136	-1.20887E-07

4.6.3. Isıl Etki Sebepi Yüzey Bozulmalarının Görüntüleme ve Lazer Hüzmesi Üzerindeki Etkisi

Elde edilen Zernike Polinomları, ZEMAX OpticStudio® ortamında teleskop ikincil ayna yüzey geometrisine girdi olarak verilerek, görüntü simülasyonu, MTF analizleri, dalga cephesi harita analizleri ve POP lazer hüzme analizleri tekrarlanmıştır.

ZEMAX® üzerinde yüzeye Zernike Polinomlarını tanıtabilmek için kullanılan arayüz Şekil 4.22’de verilmiştir. ZEMAX® Zernike polinomlarını “mm” cinsinden tanıdığı için katsayılar “mm” cinsinden üretilmiş ve yüzeye girdi olarak verilmiştir [17]. Sonrasında ısıl yük kaynaklı yüzey bozulmalarının etkisi incelenmiştir. Tüm malzemeler için ayrı lazer güçlerinde elde edilen tüm simülasyon ve analiz çıktıları “SONUÇLAR” kısmında gösterilmiştir.

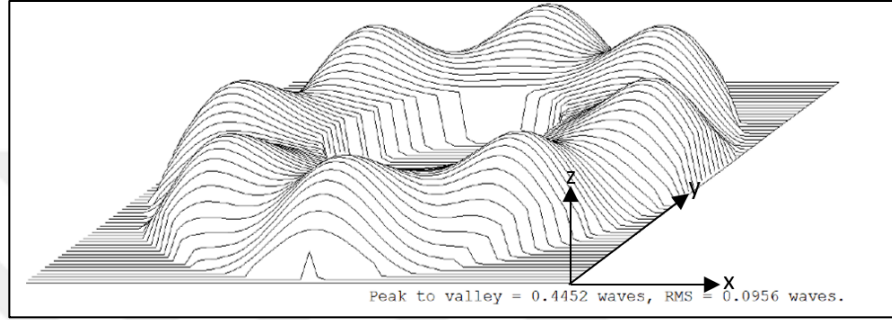
Zemax Extra Data Editor: Config 1/7					
Edit Solves Tools View Help					
Surf:	Type	Maximum Term #	Norm Radius	Zernike 1	Zernike 2
OBJ	Standard				
1	Standard				
2*	Standard				
*	Zernike S..	136	42.500	1.440E-005	7.339E-009
4	Coordinat..				
5*	Standard				

Şekil 4.22: Zernike Polinomlarının Yüzeye Tanıtılması.

5. SONUÇLAR

1, 2 ve 3 kW lazer güçleri için ayrı ayrı koşturulan tüm analizlerin sonuçları, farklı malzeme türleri için gerçekleştirilmiş analiz ve simülasyon çıktıları bu kısımda gösterilmektedir.

Bölüm 4.5’de belirtildiği üzere, lazer açılmamış haldeki dalga cephesi formu ve MTF değerleri karşılaştırma için referans olarak alınacaktır.



Şekil 5.1 Dalga Cephesi Haritası, Fused Silika, 3 kW.

Dalga cephesi haritaları tüm malzemeler ve tüm lazer güçleri için tekrarlanmıştır. Değerler her malzeme için kendi başlıkları altında tabloda gösterilmiştir. Örnek olarak Şekil 5.1’de Fused Silika 3kW analizi için dalga cephesi haritası verilmiştir.

60 saniye boyunca lazer ışınımı altındaki ayna yüzeylerinin sıcaklık değişimleri tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Yüzey Sıcaklık Değişimleri

	1 kW	2kW	3 kW
N-BK7	67 °C	105 °C	146 °C
Fused Silika	58 °C	95 °C	132 °C
Zerodür	54 °C	88 °C	122 °C

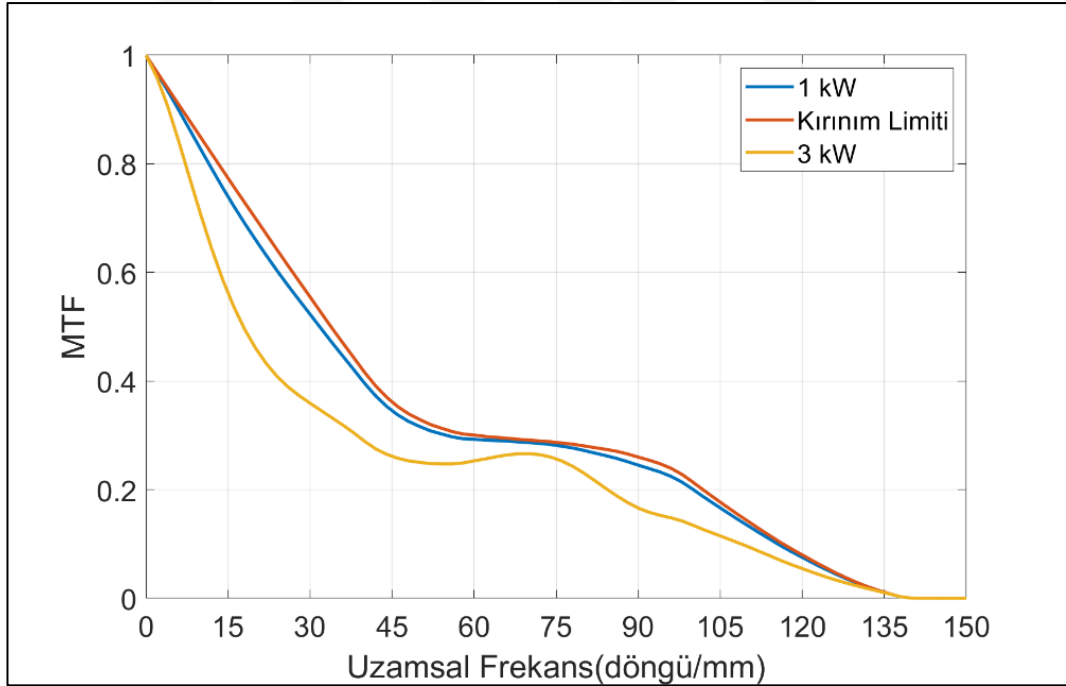
5.1. Fused Silika Analiz Çıktıları

Tablo 5.2’de lazer güç değerlerine göre RMS spot yarıçapının değişimleri ve Airy Disk yarıçapı bulunmaktadır.

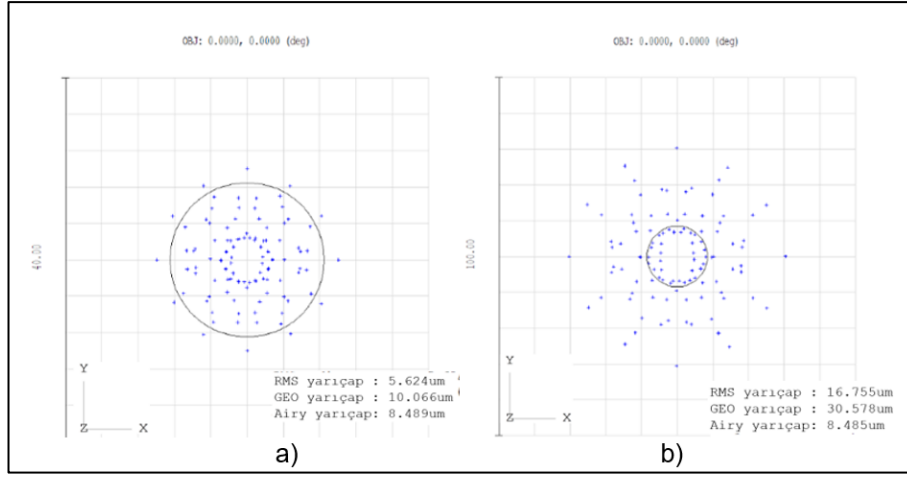
Tablo 5.2: Airy Disk ve Hüzme Spotu, Fused Silika.

Airy Disk =8.485 μm	1kW	2kW	3kW
RMS Hüzme Yarıçapı (μm)	5.624	11.177	16.755
Lazer Hüzme Yarıçapı (mm)	12.47	14.69	17.67
Dalga Cephesi RMS (λ)	0.0343	0.0642	0.0956

Şekil 5.2’ de en düşük ve en yüksek lazer gücü olan 1 kW ve 3 kW lazer güçlerinin MTF grafiği sonuçları gösterilmiştir. Lazer gücü kaynaklı bozulma etkisinin MTF eğrisindeki değişimi gözlemlenebilir.

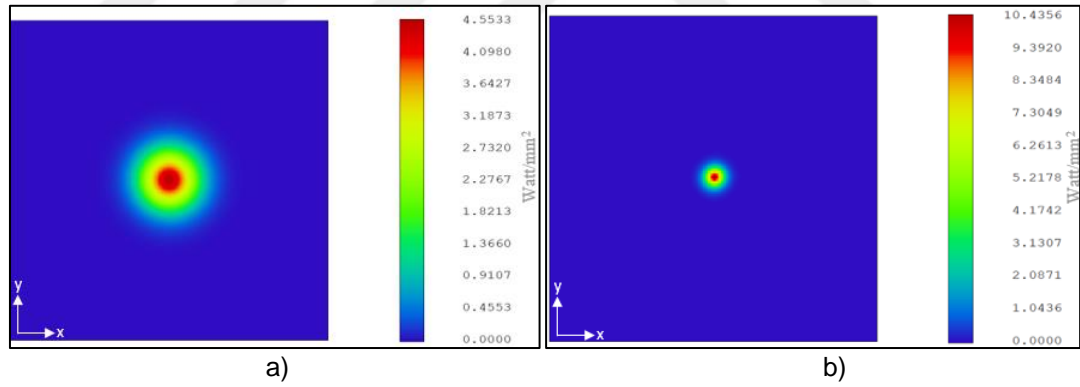


Şekil 5.2: MTF, Fused Silika.



Şekil 5.3: Spot Diyagram, Fused Silika, a) 1kW, b) 3kW.

Şekil 5.3’de görüntü düzlemindeki spot diyagramı verilmiştir. Şekil üzerinde RMS spot yarıçapı ve Airy disk yarıçapı değeri belirtilmiştir. Airy disk diyagram üzerinde gösterilmektedir. Hüzme spotu 3 kW lazer gücü altında Airy diskin dışına taşmaktadır. 3 kW altında Airy disk yarıçapı 8.485 μm ve hüzme spot yarıçapı 16.755 μm ’dir

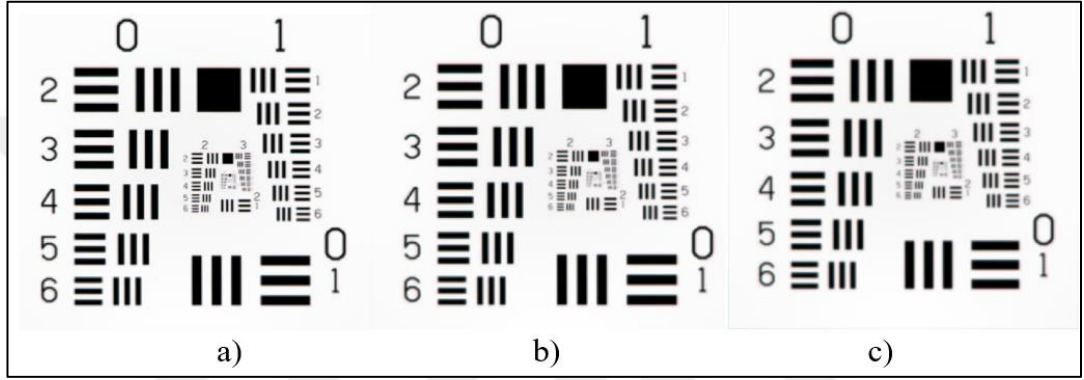


Şekil 5.4: Lazer Hüzme Spotu, Fused Silika, a) 1kW, b) 3kW.

1000 m mesafeye odaklanan lazer hüzmesinin güç yoğunluk dağılımı Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Orta kısımdan kenarlara doğru hüzme güç yoğunluğu, kırmızıdan maviye doğru renk tayfı ile gösterilmiştir. Kırmızı renk en yüksek güç yoğunluğunu temsil ederken mavi renk en az güç yoğunluğunu belirtmektedir. Hüzme ($1/e^2$) yarıçapı 1 kW için 12.47 mm iken 3 kW altında 17.67 mm’ye çıkmıştır.

5.1.1. Fused Silika Görüntü Simülasyonu

Lazer kaynaklı yüzey deformasyonlarının görüntü üzerindeki etkisini görebilmek için ZEMAX® programının bir analiz aracı olan “Görüntü Simülasyonu” kullanılmıştır. Bu bölümde Fused Silika camına ait olan görüntü bozulmaları gösterilmiştir. Şekil 5.5’de Fused Silika camı için üç farklı lazer gücü altında, görüntüdeki bozulmalar simüle edilmiştir. 3 kW altında görüntünün daha çok bozulduğu gözlemlenmiştir



Şekil 5.5: Fused Silika, a) 1kW, b) 2kW, c) 3kW.

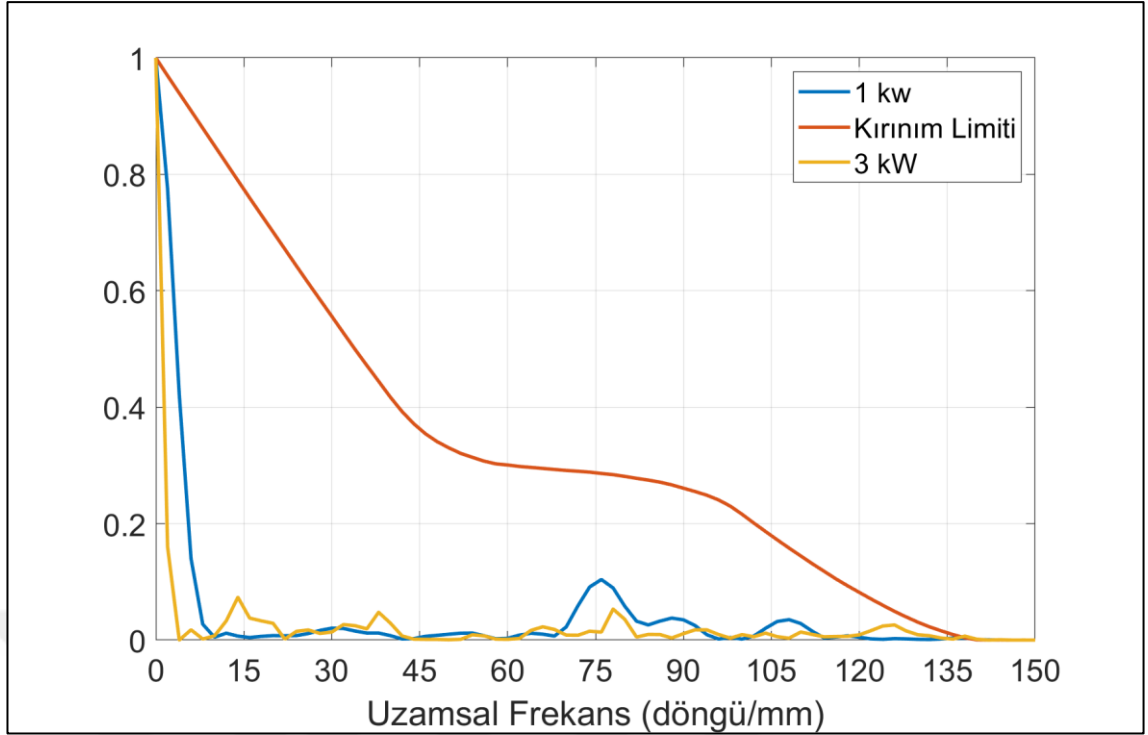
5.2. N-BK7 Analiz Çıktıları

Tablo 5.3’de lazer güç değerlerine göre RMS spot yarıçapının değişimleri ve Airy Disk yarıçapı bulunmaktadır.

Tablo 5.3: Airy Disk ve Hüzme Spotu, N-BK7.

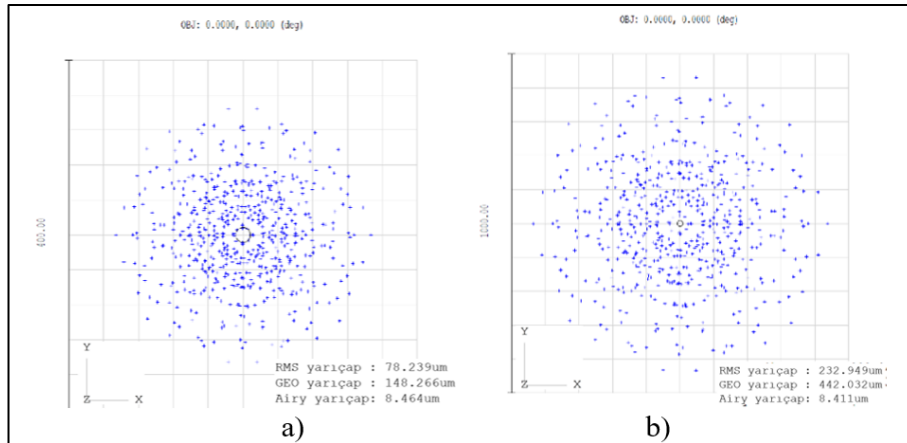
Airy Disk =8.411 μm	1kW	2kW	3kW
RMS Hüzme Yarıçapı (μm)	78.239	156.574	232.949
Lazer Hüzme Yarıçapı (mm)	68.99	136.02	201.65
Dalga Cephesi RMS (λ)	0.44	0.89	1.33

Şekil 5.6’ de en düşük ve en yüksek lazer gücü olan 1 kW ve 3 kW lazer güçlerinin MTF grafiği sonuçları gösterilmiştir. Lazer gücü kaynaklı bozulma etkisinin MTF eğrisindeki değişimi gözlemlenebilir.



Şekil 5.6: MTF, N-BK7.

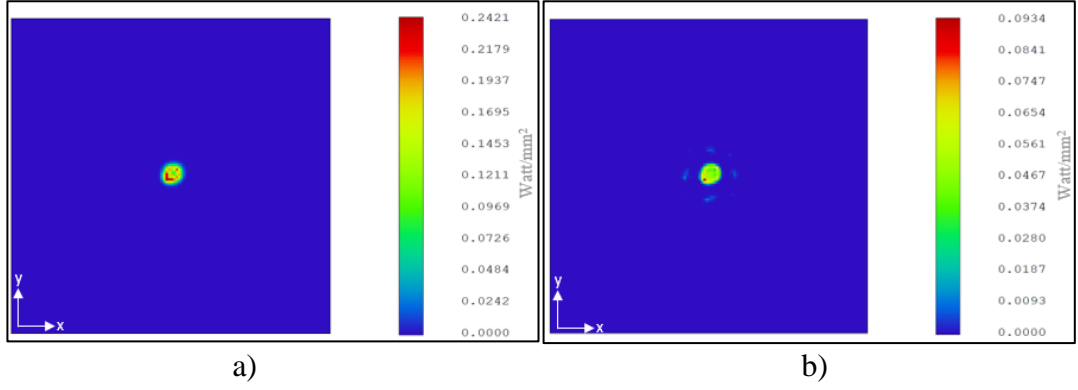
Şekil 5.7’de görüntü düzlemindeki spot diyagramı verilmiştir. Şekil üzerinde RMS spot yarıçapı ve Airy disk yarıçapı değeri belirtilmiştir. Airy disk diyagram üzerinde görülmektedir. 1 kW altında spot yarıçapı Airy disk yarıçapının yaklaşık 9 katı büyüklüğe ulaşmışken bu değer 3 kW lazer gücü altında 29’a ulaşmaktadır.



Şekil 5.7: Spot Diyagram, N-BK7, a) 1kW, b) 3kW.

N-BK7 malzemesi için yapılan lazer hüzmeye analizi kapsamında 1000 m mesafeye odaklanan lazer hüzmelerinin güç yoğunluk dağılımı Şekil 5.8’de

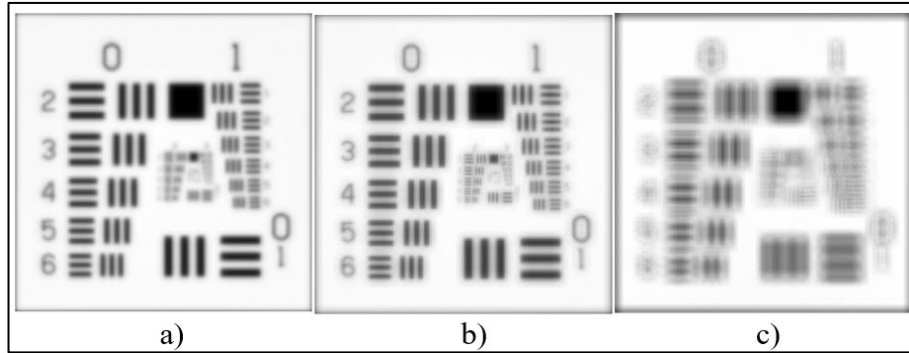
gösterilmiştir. Hüzme ($1/e^2$) yarıçapı 1 kW için 68.99 mm iken 3 kW altında 201.65 mm'ye çıkmıştır.



Şekil 5.8: Lazer Hüzme Spotu, N-BK7, a) 1kW, b) 3kW.

5.2.1. N-BK7 Görüntü Simülasyonu

Bu bölümde N-BK7 malzemesi üzerinden yapılan görüntü simülasyonuna ait çıktılar gösterilmektedir. Şekil 5.9'da üç farklı lazer gücü için görüntüdeki bozulmalar gösterilmektedir. Lazer gücü arttıkça görüntüdeki bozulmaların da arttığı gözlemlenmiştir. Referans görüntüye kıyasla 1 kW lazer gücü altında dahi görüntüdeki bozulma Fused Silika ve Zerodür malzemesine göre daha fazladır.



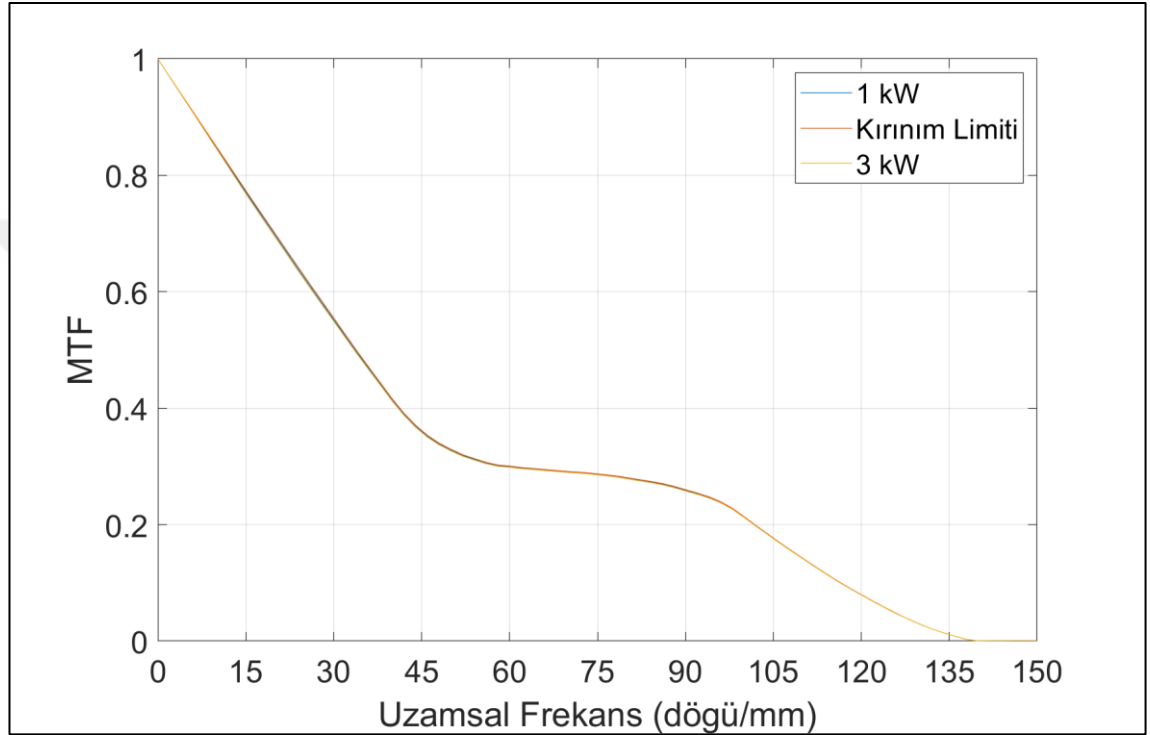
Şekil 5.9: N-BK7, a) 1kW, b) 2kW, c) 3kW.

5.3. Zerodür Analiz Çıktıları

Tablo 5.4'de lazer güç değerlerine göre RMS spot yarıçapının değişimleri ve Airy Disk yarıçapı bulunmaktadır.

Tablo 5.4: Airy Disk ve Hüzme Spotu, Zerodür.

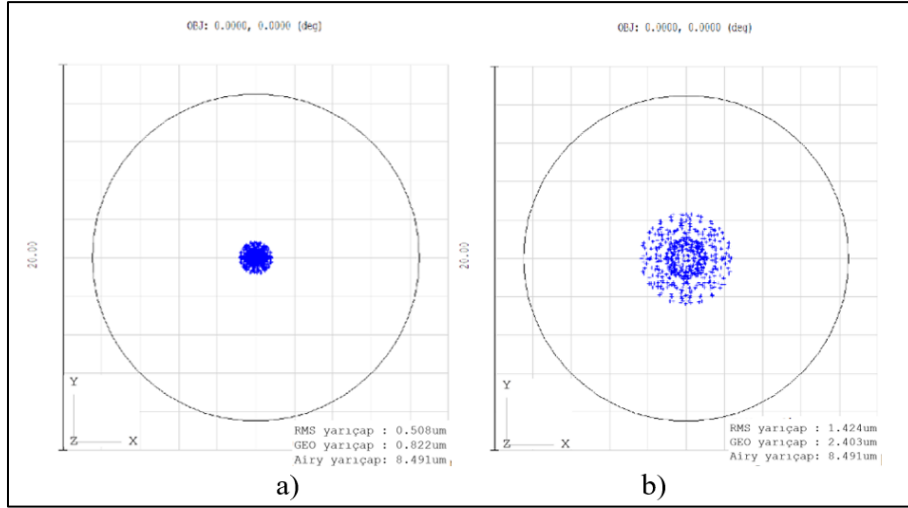
Airy Disk =8.491 μm	1kW	2kW	3kW
RMS Hüzme Yarıçapı (μm)	0.508	0.961	1.424
Lazer Hüzme Yarıçapı (mm)	11.55	11.59	11.63
Dalga Cephesi RMS (λ)	0.0035	0.0062	0.0088



Şekil 5.10: MTF, Zerodür.

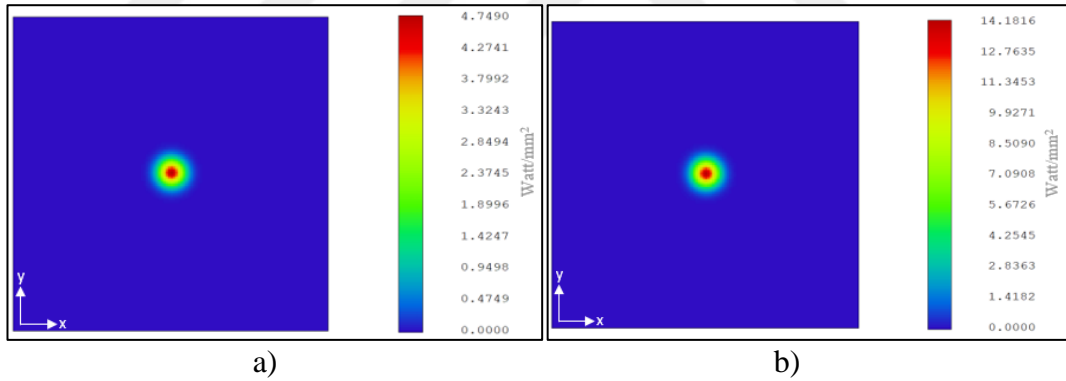
Şekil 5.10' de en düşük ve en yüksek lazer gücü olan 1 kW ve 3 kW lazer güçlerinin MTF grafiği sonuçları gösterilmiştir. Lazer gücü kaynaklı bozulma etkisinin MTF eğrisindeki değişimi gözlemlenebilir.

Şekil 5.11'de görüntü düzlemindeki spot diyagramı verilmiştir. Şekil üzerinde RMS spot yarıçapı ve Airy disk yarıçapı 8.491 μm 'dir ve Şekil 5.11'de gösterilmektedir. 1 kW ve 3 kW lazer güçleri altında hüzmeler Airy diskin içerisinde kalmaktadır. Sistem 3 kW lazer altında dahi kırınım limitli kalmaya devam etmektedir.



Şekil 5.11: Spot Diyagram, Zerodür, a) 1kW, b) 3kW.

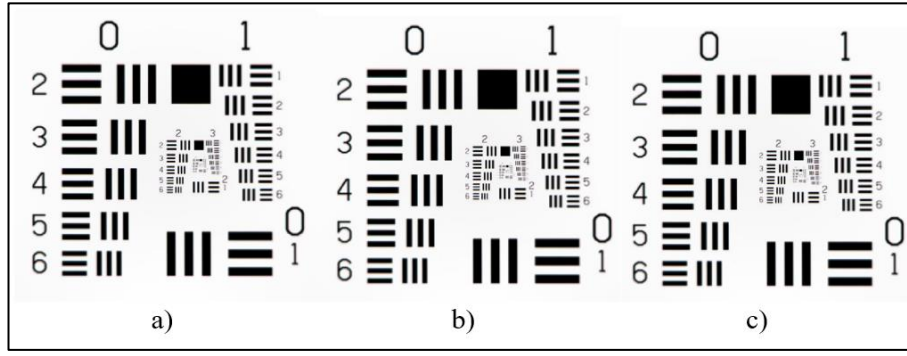
Zerodür malzemesi için yapılan lazer hüzmeye analizi kapsamında 1000 m mesafeye odaklanan lazer hüzmeye güç yoğunluk dağılımı Şekil 5.12’de verilmektedir. Hüzmeye ($1/e^2$) yarıçapı 1 kW için 11.55 mm iken 3 kW altında 11.63 mm’ye çıkmıştır.



Şekil 5.12: Lazer Hüzmeye Spotu, Zerodür, a) 1kW, b) 3kW.

5.3.1. Zerodür Görüntü Simülasyonu

Bu bölümde Zerodür malzemesine ait görüntü bozulmaları gösterilmektedir. Şekil 5.13’de üç farklı lazer gücü için görüntüdeki bozulmalar simüle edilmiştir. Zerodür için lazer gücünün görüntüleme performansı için etkilemediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi Fused Silika ve N-BK7 malzemelerine kıyasla düşük termal genişleme performansıdır.



Şekil 5.13: Zerodür, a) 1kW, b) 2kW, c) 3kW.



6. YORUMLAR

Bu çalışmada farklı malzemeler ile tasarlanmış aynalar ile tasarlanan kırınım limitli DK tipi teleskobun, farklı lazer güçleri altında, termal yüklerin bir sonucu olan yüzey deformasyonlarının görüntüleme ve lazer iletim kalitesi analizleri yapılmıştır. Ayna alttaşı olarak, termal genleşme katsayıları birbirinden oldukça farklı olan malzemeler seçilmiştir. Sonuç olarak lazer uygulamalarında sıkça kullanılan Fused Silika, N-BK7 ve Zerodür camlarının performans çıktıları gösterilmiştir. SONUÇLAR kısmındaki MTF grafikleri, dalga cephesi haritaları, RMS spot çapları/Airy Disk çapı kıyasları ve görüntü simülasyonları kıyasları incelendiği takdirde açık bir şekilde görülmektedir ki yüksek güç lazer iletimi söz konusu olduğunda N-BK7 tipi Borasilikat malzemeler yüksek termal genleşme katsayıları kaynaklı bu tür uygulamalar için uygun değildir. Belirli lazer güçleri için, Fused Silika malzemesinin kabul edilebilir seviyede performans sergilediği söylenilebilir fakat lazer gücü arttıkça Fused Silika malzemesinin de termal yük karşısındaki yüzey geometri değişimi sebebi ile görüntüleme performansını kırınım limitinin üzerine çıkardığı gözlemlenmiştir. Termal genleşme katsayısı diğerlerine göre çok daha küçük olan Zerodür ise aralarındaki en iyi performansı gösteren malzeme olmuştur. Zerodürün ısıl stres altındaki yüksek performansı, yüksek güç lazer aynaları için oldukça verimli bir malzeme olduğunu göstermiştir. 3 kW lazer gücü altında dahi, görüntüleme kalitesi kırınım limiti içerisinde kalmıştır.

Termal etkilerle meydana gelen deformasyonu ifade eden termal gerinim miktarı termal genleşme katsayısı ile doğru (lineer) orantılıdır. Diğer taraftan katı mekaniğini modelleyen denklemler de lineer elastik teoriye dayanmaktadır. Bu nedenle hem uygulanan lazer gücünün artışıyla sıcaklık artışı hem de bu artıştan kaynaklı deformasyon doğru orantılı ve lineerdir. Spot hüzme hesaplamaları geometrik optik ile yapıldığı için sonuçta beklenen durum lazer gücü ile RMS spot çapının doğru orantılı olmasıdır. Analiz sonuçlarında RMS hüzme çaplarında lazer gücüne bağlı lineer bir değişim gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2021), <https://www.loc.gov/collections/finding-our-place-in-the-cosmos-with-carl-sagan/articles-and-essays/modeling-the-cosmos/galileo-and-the-telescope> (Erişim Tarihi: 06/12/2021)
- [2] Sasian J., (2013), “Introduction to Aberrations in Optical Imaging Systems”, 1st Edition, Cambridge University Press.
- [3] Web 2, (2021), <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work>, (Erişim Tarihi 08/12/2021).
- [4] Web 3, (2021), http://bog5.in.ua/lection/quantum_optics_lect/lect7_quant_eng.html, (Erişim Tarihi: 05/12/2021).
- [5] Web 4, (2021), <https://www.rp-photonics.com/lasers.html>, (Erişim Tarihi: 05/12/2021).
- [6] Web 5, (2021), <https://www.lkouniv.ac.in/site/writereaddata/siteContent/202006151236284892/NK-Properties%20of%20Laser%20Beam.pdf>, (Erişim Tarihi: 08/12/2021).
- [7] Web 6, (2021), <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/lasapp.html#c0> (Erişim Tarihi: 08/12/2021).
- [8] Maiman T. H., (1960), “Stimulated optical radiation in ruby”, Nature 187, 493.
- [9] Web 7, (2021), <https://clarkscience8.weebly.com/behavior-of-waves.html>, (Erişim Tarihi: 05/12/2021).
- [10] Web 8, (2021), <https://intl.siyavula.com/read/science/grade-11/geometrical-optics/05-geometrical-optics-06>, (Erişim Tarihi: 11/12/2021).
- [11] Paschotta R., (2007), “Lasers”, FG12, Spie Press.
- [12] Web 9, (2021), <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>, (Erişim Tarihi: 05/12/2021).
- [13] Web 10, (2021), <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/14036821/beam-propagation-and-quality-factors-a-primer>, (Erişim Tarihi: 20/05/2021).
- [14] Web 11, (2021), <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/limitations-on-resolution-and-contrast-the-airy-disk/>, (Erişim Tarihi: 11/12/2021).

- [15] Web 12, (2021), <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/diflim.html>, (Erişim Tarihi: 05/12/2021).
- [16] Web 13, (2021), <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/r/rayleigh+criterion>, (Erişim Tarihi: 11/12/2021).
- [17] Web 14, (2021), <https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Zemax/ZemaxManual.pdf>, (Erişim Tarihi: 14/05/2021).
- [18] Born M., Wolf E., (1999), "Principles of Optics", 7th Edition, Cambridge University Press.
- [19] Alkhalidi W., Iskander, D.R., Zoubir, A. M., (2010), "Model-Order Selection in Zernike Polynomial Expansion of Corneal Surfaces Using the Efficient Detection Criterion", IEEE Transactions On Biomedical Engineering, 57 (10).
- [20] Oliveira C. M., Ferreira A., Franco S., (2012), "Wavefront analysis and Zernike polynomial decomposition for evaluation of corneal optical quality", Journal of Cataract and Refractive Surgery, 38 (2), 343-356.
- [21] Koyuncu B., Kocabasoglu P., (2012), "Identification of Corneal Aberrations by using Computer Techniques", International Journal of Computer Engineering Science (IJCES), 2 (3).
- [22] Miyagawa S., Mihashi T., Kanda H., Hirohara Y., Endo T., Morimoto T., Miyoshi T., Fujikado T., (2014), "Asymmetric Wavefront Aberrations and Pupillary Shapes Induced by Electrical Stimulation of Ciliary Nerve in Cats Measured with Compact Wavefront Aberrometer," PloS one 9.
- [23] Hecht E., (2017), "Optics", 5th Edition, Pearson.
- [24] Brady M., Legge G., (2009), "Camera calibration for natural image studies and vision research," Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision, (26), 30-42.
- [25] Malacara D., Malacara Z., (1994), "Handbook of Lens Design", 1st Edition, Marcel Dekker Inc.
- [26] Menacho S. M., Planells A., Sevillano A. B, Garcia J. S., Serrano M. C., Giménez A., (2016), "Development of a HMD for Virtual Acoustics. Application in a World Heritage (UNESCO) Building from the Valencian Civil Gothic," 241-250.
- [27] Web 15, (2021), http://www.physics.purdue.edu/~jones105/phys42200_Spring2013/notes/Phys42200_Lecture33.pdf, (Erişim Tarihi: 02/05/2021).

- [28] Mahmoud A., Xu D., Xu L., (2016), "Optical design of high resolution and shared aperture electro-optical/infrared sensor for UAV remote sensing applications," 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, 2921-2924.
- [29] Ming G., Yang C., Jun L., Hong L., (2014), "Design of dual-band shared-aperture Co-zoom optical system", *Infrared Physics & Technology*, (64), 40-46.
- [30] Jeong D., Lee J. H., Jeong H., Ok C. M., Park H., (2018), "Infrared Dual-field-of-view Optical System Design with Electro-Optic/Laser Common-aperture Optics", *Current Optics and Photonics*, (2), 241-249
- [31] Web 16, (2021),
<https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>,
(Erişim Tarihi: 05/05/2021).
- [32] Web 17, (2021), <https://www.britannica.com/science/Cassegrain-reflector>,
(Erişim Tarihi: 11/12/2021).
- [33] Fischer R. E., (2008), "Optical System Design", 2nd Edition, Spie Press.
- [34] Schuster A., (1924), "An Introduction to the Theory Of Optics", 3rd Edition, Edward Arnold.
- [35] Boreman G. D., (2021), "Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems", 2nd Edition, Spie Press.
- [36] Siegman A. E., (1990), "New developments in laser resonators", *Proc. SPIE* 1224, Optical Resonators.
- [37] Galvanauskas A., (2004), "High Power Fiber Lasers", *Optics & Photonics News* 15 (7), 42-47.
- [38] Remillard, J. T., Weber W. H., Fohl T., (2001), "Diode laser illuminators for night-vision applications." *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4285.
- [39] Park S. J., Sim S. H., Chung C. S., Kang E. C., Kim J. K., (2006), "Design of primary mirror for laser beam director," *Proc. SPIE* 6034, ICO20: Optical Design and Fabrication, 60340F.
- [40] Schott, (2011), "ZERODUR® zero expansion glass ceramic catalogue".
- [41] Schott, (2018), "BOROFLOAT® 33—thermal properties datasheet".
- [42] Kaya Cekin E. Y., Ozturk Y., Arpa E., Yeniay A., (2021), "High-power laser-induced optical aberrations on beam director mirrors", *Opt. Eng.* 60(6) 065102.
- [43] COMSOL Multiphysics®, "Reference Manuel".

[44] Schott, (2018), “BOROFLOAT® 33—mechanical properties datasheet”.

[45] Mahajan V. N., (1981), “Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils”, *Journal of the Optical Society of America*, 71 (1), 75–85.



ÖZGEÇMİŞ

Kadir GÜRSES 2012-2017 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Fizik Mühendisliği bölümünü 3.'lük derecesiyle tamamladı. 2018 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Profesyonel kariyerine 2017 yılında TÜBİTAK BİLGEM'de Elektro-Optik ve Lazer biriminde Araştırmacı ünvanı ile başladı ve devam etmektedir.

