

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER ETKİSİ ALTINDA OPTİK YÜZEY
BOZULMALARININ PERFORMANSA ETKİSİNİN ANALİZİ VE
DENEYSEL GERÇEKLEMESİ

ERAY ARPA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER ETKİSİ ALTINDA OPTİK YÜZEY
BOZULMALARININ PERFORMANSA
ETKİSİNİN ANALİZİ VE DENEYSEL
GERÇEKLEMESİ

ERAY ARPA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ SERKAN BÜYÜKKÖSE

GEBZE
2020

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

**ANALYSIS AND EXPERIMENTS ON THE
EFFECTS OF HIGH POWER LASER BEAM
ON OPTICAL PERFORMANCE**

ERAY ARPA

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

**THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. SERKAN BÜYÜKKÖSE**

GEBZE

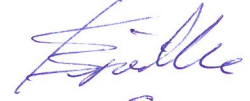
2020

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/01/2020 tarih ve 15299898/770 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/02/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Eray ARPA'nın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

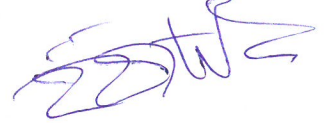
ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Serkan BÜYÜKKÖSE



ÜYE

: Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK



ÜYE

: Prof. Dr. Lütfi ARDA



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

	DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU
---	--------------------------------

GTÜ Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından/...../..... tarihinde tez savunma sınavı yapılan'ın tez çalışmasıAnabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :

ÜYE :

ÜYE :

ÜYE :

ÜYE :

ONAY

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

İMZA/MÜHÜR

Prof. Dr. Ümit DEMİR
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada lazer etkisi sonucu optik elemanların yüzeylerinde oluşan bozulmalar ve bu bozulmaların optik performansa etkisi incelenmiştir. Optik yüzeylere uygulanan lazer hüzmesi yüzeyler üzerinde bir termal yük oluşturur ve bu termal yük sonucu yüzeylerde termal genişleme sebebiyle bozulmalar meydana gelir. Optik yüzey bozulmaları sonucu aberasyonlar ve bu aberasyonlardan kaynaklı optik performans, lazer hüzme çapı ve dalgaçepesi bağlamında analiz yazılımları vasıtası ile hesaplanmış ve bir deneysel düzenek ile sonuçlar teyit edilmiştir. Benzer lazer ışınması etkisi altında farklı kaplama değerlerine sahip çeşitli ayna altaşları (Fused Silica, Soda Lime, BK7 ve Zerodur©) için optik bozulmalar ve bu bozulmaların optik performansa etkisi detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer, Altaş, Ayna, Zernike Polinomları, Optik Bozulma.

SUMMARY

In this study, we investigate laser induced optical aberrations and their effects on optical performance for various optics. Here, laser power applied to the mirror surface loads heat and, surface deformations, as a result various aberrations take place. Optical surface deformations and, aberrations as well as their effects on optical performance in terms of laser spot size and wavefront map have been computed via analysis softwares and an experimental set up has been built to verify the results. A detailed comparison of optical aberrations and their implications on the performance were studied for various optical substrates such as Fused Silica, Soda Lime, BK7, and Zerodur© having different reflective coating under similar high power laser exposure.

Key Words: Laser, Substrate, Lens, Mirror, Zernike Polynomials, Optical Abberations.

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın yűrűtűlmesinde yakın ilgisi ve yardımlarından dolayı deęerli danıőmanım Dr. Őęr. Ŭyesi Serkan Bűyűkkűse'ye, alıőmanın yűrűtűlmesinde fikirleri ile beni yűnlendiren, yolumu aydınlatan Do. Dr. Aydın YENİAY'a, tecrűbeleri ile alıőmalarımnda sayısız yardımı olan Do. Dr. Aslı UęUR KATMIŐ'a, alıőmalarımnda yardımlarından dolayı Dr. E. Yasemen KAYA EKİN'e, Elif Tűrkan AKŐİT KAYA'ya, Mustafa DOęAN'a, Kadir GŪRSES'e, ve saęladıęı imkanlar ve desteklerinden dolayı kurumum TŪBİTAK ailesine teőekkűr ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
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	4
2.1. Lazerler	4
2.2 Optik Altaşlar ve Kaplamalar	6
2.2.1 AR (Anti Reflection) Kaplama	8
2.2.1.1 Tek Katmanlı AR Kaplama	8
2.2.1.2 Çok Katmanlı AR Kaplama	9
2.2.2 HR (High Reflection) Kaplama	9
2.2.3 Filtreler	10
2.2 Lazer-Optik Etkileşimi	10
2.4 Optik Analiz/Zernike Polinomları	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1. Materyal	19
3.2. Yöntem	22
4. BENZETİM MODELİ	24
4.1. Parametreler, Değişkenler	26
4.2. Geometri	27
4.3. Malzeme	29
4.4. Isı Transfer Modülü	29
4.5. Katı Mekanik Modülü	30
4.6. Örgü Yapısı	31

4.7. Çözümleme	32
4.8. Zernike Polinom Katsayıları Hesaplama	33
4.9. Optik Analiz	33
5. SONUÇLAR	35
5.1 Soda Lime Çalışması	35
5.2 Zerodur/Fused Silica Çalışması	38
5.3 BK7 Çalışması	42
6. YORUMLAR	46
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	49
EKLER	50

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
--	--------------------

LASER	: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LP	: Long Pass
BP	: Band Pass
SP	: Short Pass
SP	: Short Pass
kW	: KiloWatt

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Zernike Polinomları.	2
1.2: Entegre Analizler.	2
1.3: Deneysel Düzenek.	3
2.1: Işığın Kırınımı ve Yansıması.	7
2.2: Yansıma Yüzdesi vs Geliş Açısı.	7
2.3: Kaplamada Işık Girişimi.	8
2.4: Gauss Dağılım Profili.	11
2.5: Optik Üzerinde Lazer Soğrulması.	12
2.6: Zernike Polinomları.	16
2.7: Zernike Polinomlarının 3-Boyutlu Gösterimleri.	16
2.8: Sapmış Noktada Yüzey Dikine Değişimin Çıkarımı.	17
3.1: a) Zerodur, b) Fused Silica, c) Soda Lime, d) BK7.	19
3.2: Çalışmada Kullanılan Lazerin Ölçüm Sonucu.	21
3.3: Deneysel Düzenek.	22
3.4: Profil Ölçüm Deneyi Şematik Gösterimi.	23
3.5: Profil Ölçüm Sonucu.	23
4.1: COMSOL Multiphysics Kullanıcı Arayüzü.	24
4.2: COMSOL Multiphysics Çözüm Döngüsü.	25
4.3: Çalışmada Kullanılan Analiz Döngüsü.	26
4.4: COMSOL Multiphysics ile Oluşturulan Katı Model.	28
4.5: COMSOL Multiphysics Malzeme Tanımlama Arayüzü.	29
4.6: COMSOL Multiphysics Isı Transfer Arayüzü.	30
4.7: COMSOL Multiphysics Katı Mekanik Arayüzü.	31
4.8: COMSOL Multiphysics Örgü Yapısı Arayüzü.	32
4.9: COMSOL Multiphysics Çözümleme Arayüzü.	32
4.10: Zemax Yüzey Tanımlama Arayüzü.	33
4.11: Zemax Optik Analizler Arayüzü.	34
5.1: Soda Lime Deneysel Sıcaklık Ölçüm Sonucu.	36
5.2: Soda Lime Lazer Etkisi Sonucu Kırılma.	36
5.3: Soda Lime Analiz Sıcaklık Grafiği.	37

5.4:	Soda Lime Analiz Sonucu Gerilim Grafiği.	37
5.5:	Soda Lime Analiz Sonucu Gerilim Profili.	38
5.6:	Zerodur 1kw 20sn Termal Grafik.	39
5.7:	Zerodur 1kw 20sn Dalgacephesi Ölçüm Sonucu.	39
5.8:	Zerodur 1kw 20sn Analiz Sonucu Termal Grafik.	40
5.9:	Zerodur 1kw 20sn Optik Analiz Sonucu Dalgacephesi Hatası.	40
5.10:	Zerodur 1kw 20sn Optik Analiz Sonucu Strehl Oranı.	41
5.11:	BK7 Alttaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Deneysel Sonuçları.	43
5.12:	BK7 Alttaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Analiz Sonucu Isıl Grafik.	44
5.13:	BK7 Alttaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Analiz Sonucu Dalgacephesi.	44
5.14:	BK7 Alttaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Analiz Sonucu Strehl Oranı.	45



TABLolar DİZİNİ

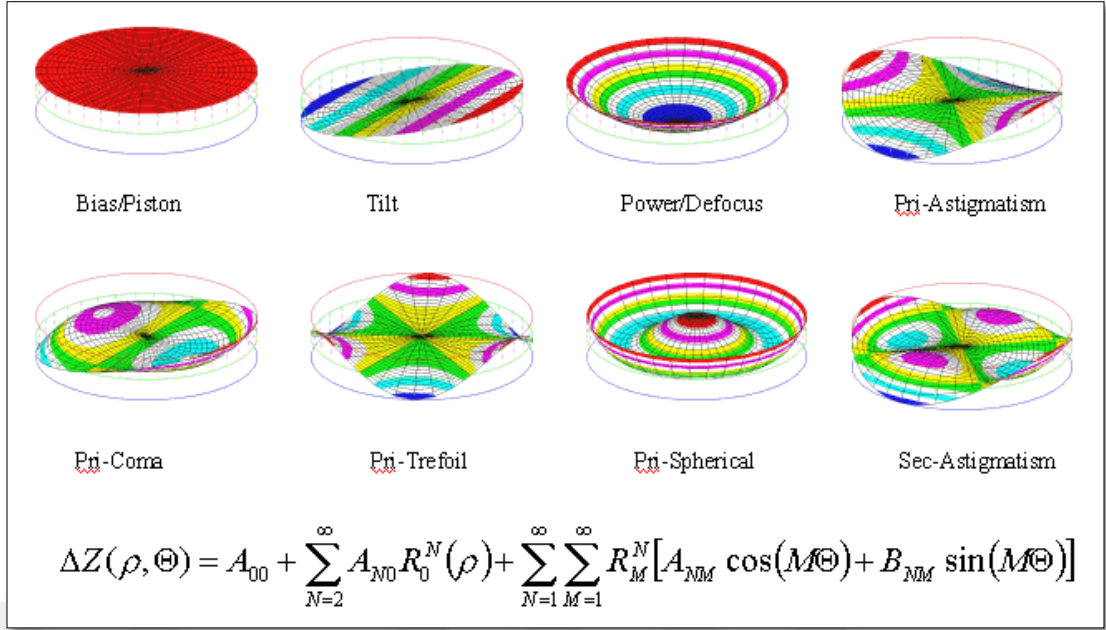
<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Radyal Polinomlar.	14
3.1: Çalışmada Kullanılan Optik Alttaşların Özellikleri.	20
3.2: Dalgacephesi Ölçüm Sensörü Özellikleri.	21
4.1: Soda Lime Parametreleri.	26
4.2: Çalışmada Kullanılan Optiklerin Boyutları.	28
5.1: Zerodur Ayna Deney Senaryoları ve Analiz Sonuçları.	41
5.2: Fused Silica Ayna Deney Senaryoları ve Analiz Sonuçları.	42
5.3: BK7 Ayna Deney Senaryoları ve Analiz Sonuçları.	45

1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişen optik ve lazer teknolojileri ile birlikte lazer/optik sistem uygulamaları hayatın her alanında karşımıza sıklıkla çıkmaya başlamıştır. Günümüzde savunmadan sağlığa, sanayiden bilime pek çok alanda lazer uygulamaları yaygın olarak etkin şekilde kullanılmaktadır. Lazer/Optik sistemlerini etkileyen performansındaki darboğazlar optik elemanların tolerans hataları ve optik elemanların ısınması ile ortaya çıkan dalga cephesi bozulmalarıdır. Bu bozulmalar lazer dalga cephesi ölçümleri ile analiz edilip, gerekli düzeltmeler analiz sonuçlarına göre yapılabilmektedir. Kullanılacak optikler için hem alttaş hem kaplama çeşidi olarak oldukça fazla seçenek bulunduğundan, hangi seçeneğin istenilen uygulamaya daha elverişli olduğu analizler ve deneysel çalışmalarla belirlenmektedir. Çeşitli ayna yüzeylerine uygulanan lazerin, optik elemanın yüzeyinde yaratacağı bozuklukların incelenmesi herhangi bir sistemde kullanılacak ayna türünde bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır.

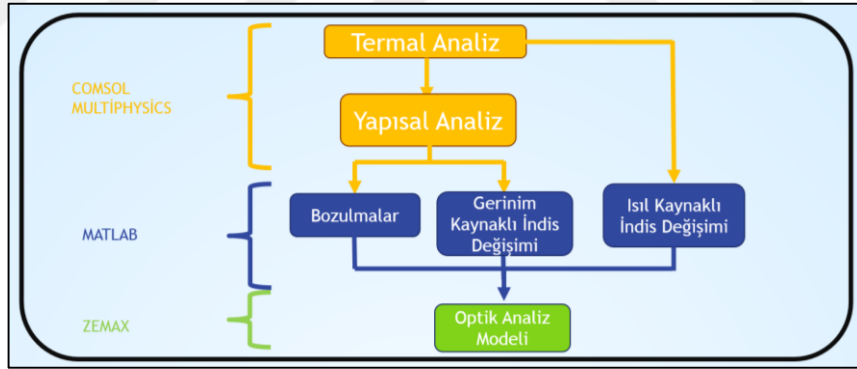
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Yüksek performanslı optik sistemler için entegre opto-mekanik ve termal analizler oldukça önem taşımaktadır [Doyle ve Gengberg, 2002b]. Bu analizleri yapabilmenin yöntemi de uygulanan sonlu eleman analizlerin sonucunda ortaya çıkan değerlerin optik analiz programlarına aktarılmasıdır. Optik analiz programları oldukça sınırlı girdi formatını destekledikleri için sonlu eleman analiz sonuçlarını direkt olarak bu programlara verme imkanı yoktur. Optik analiz programlarına sonlu eleman analiz sonuçları Zernike polinomları kullanılarak tanımlanabilmektedir. Zernike polinomları yüzey bozulmalarını tanımlamakta kullanılabilen koordinat katsayısı, polinom katsayısı (sinüs, kosinüs) ve polar açı bağıntısı bulunan sonsuz polinom setleridir [Gengberg ve Michels, 2002] Şekil 1.1’de zernike polinomları gösterilmiştir [Web 3, 2017].



Şekil 1.1: Zernike Polinomları.

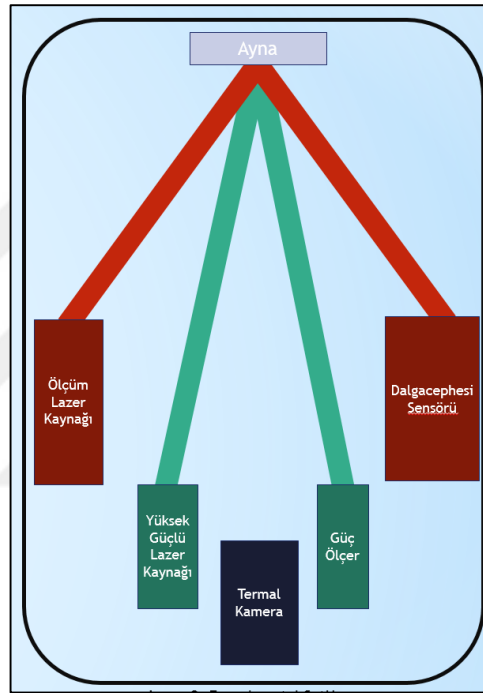
Bahsi geçen opto-mekanik/termal analiz çalışmasının şematigi aşağıdaki Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: Entegre Analizler.

Bu çalışmada da ayna yüzeylerinde farklı yöntemlerle uygulanan kaplama türlerinin yüzeye uygulanan lazer ile dalga cephesinin ne kadar bozulduğu önce analiz yöntemleriyle yukarıdaki yol haritası izlenerek bulunmuştur. Analiz çalışması sonrası analizleri gerçekleştirme amaçlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yine aynı şekilde ayna yüzeylerinde farklı yöntemlerle uygulanan kaplama türlerinin yüzeye gönderilen lazer ile dalgacephelerinin ne kadar bozulduğu aşağıda şematize edilen düzenek ile ölçülerek analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 1.3). Bu düzenekte

yüksek güçlü lazer hüzmesi kolime olarak, ölçülecek ayna yüzeyine gönderilir ve aynadan yansıyan lazer hüzmesi lazer güç ölçere, hem ölçüm hem de hüzmeyi sönmölemek amaçlı yönlendirilir. Yüksek güçlü lazer hüzmesinden farklı bir açıda, ölçüm lazeri ayna yüzeyinde yüksek güçlü hüzmeyle eş merkezli olacak şekilde hizalanır ve yansıyan düşük güçlü hüzme Shack-Hartmann sensörüne yönlendirilir. Yüksek güçlü lazer hüzmesi kapalı konumdayken yüzey kalitesi ölçölür ve kademeli olarak lazer gücü artırılarak yüzeydeki dalga cephesi bozulmaları, ölçüm lazerinin shack hartmann sensörü üzerinde yaptığı değışiklikler ile ölçölür.



Şekil 1.3: Deneysel Düzenek.

Çalışmalar tamamlandıktan sonra analiz ve deney sonuçları karşılaştırılarak uyumlulukları tartışılmış ve kullanılan alttaş kaliteleri, kaplama türleri ve aynı zamanda yöntemlerinin elverişliliği hakkında detaylı bilgi sahibi olunmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bazı optik bileşenlerin yüksek güçlü lazer etkisine dayanıklılığı ve bu optiklerin ısı ile performanslarını kaybetmemeleri bunların yüksek güçlü lazer optik sistemlerinde tercih edilen bileşenler olmasını sağlamıştır. Serbest uzayda lazer etkisi ile ısınan optik yüzeylerin genişmesi ile yüzey profilinin değişmesi sonucu performans kaybı ve hatta fazla genişleme sonucu kırılmaya kadar ulaşabilen sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Yüksek güçlü lazer etkisi altında çalışabilecek optik bileşenlerin seçimi malzeme türüne, kaplama oranına ve lazer parametrelerine dayanır.

2.1 Lazerler

LAZER kelimesi Türkçe' ye İngilizce LASER kelimesinden geçmiştir. LASER, "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" kelimelerinin baş harfleri ile türetilmiş kısaltma bir kelimedir. [Web 4, 2017].

Uyarıldıktan sonra yüksek enerji seviyesine çıkan bir elektron daha düşük veya kararlı enerji seviyesine tekrar inerken seviyeler arasındaki enerji farkına eşit enerjide, ışınım, foton salma ya da emisyon olarak adlandırılan bir salınım olur. [Orazio, 2010].

Uyarılmış enerji seviyesindeki bir atomun uyarılarak foton soğurmasından dolayı ışınım yapmasına uyarılmış ışınım denir. Uyarılmış ışınım ile salınan fotonların aynı frekans, doğrultu ve fazda olmasından dolayı elde edilen ışık demetinin ışık şiddeti yüksek olur. Uyarılmış ışınım ile elde edilmiş aynı yönlü, eş fazlı ve eşit frekanslı ışığa lazer denir [Orazio, 2010].

Lazer cihazları, fotonların önemli bir bölümünün kararlı bir durumda bulunduğu ışık ışını elde etmek amaçlı kuantum mekaniği prensiplerinden faydalanarak oluşturulmuş cihazlardır. Lazer cihazları özetle, eş fazlı ve dar bant dalgaboylu (tek renk) ışık oluşturmaya yarayan optik düzeneklerdir. Lazer teorisi, Albert Einstein'ın 1916'da teorik temellerini oluşturduğu uyarılmış ışınım önerisi ile ilerleyen dönemde Rudolph W. Landenburg (1928) uyarılmış ışınımın varlığını ispatlamıştır.[Web 4, 2017].

Lazer üzerindeki çalışmalar 1939 yılında Valentin A. Fabrikantin kısa dalga boyuna sahip ışığın yükseltimi için uyarma ile ışınmayı önermesi ve Willis Lamb ve R. C. Retherford'un (1947) zorlama emisyonun ilk gösterimini başarması sonucu hız kazanmıştır [Mensah, 2009]. 1960 yılında Theodore Maiman aktif madde olarak yakutu kullanarak ilk lazeri geliştirmiştir. 1960 yılından bu güne kadar farklı dalga boylarında pek çok lazer ışını elde edilmiştir. Bu ışınlar kullanım alanlarına göre farklı öneme sahiptirler [Mensah, 2009].

Lazerlerin özellikleri şöyledir;

- Lazer ışınlarının önemli bir kısmı dar bantlı dalga boyuna sahiptir yani tek renklidir.
- Lazer ışınları, uyarılmış emisyon ile elde edilen, eş faz ve enerjide fotondan oluşan güçlendirilmiş ışınlardır.
- Lazer ışını tek yönlüdür ve çoğunlukla küçük dağılım açılarıyla ilerler.

Lazerin çalışma prensibi gereği ışının oluşması için çeşitli aktif ortamlar kullanılır. Bu aktif ortamdaki atomlarının zorlanması sonucu elektronlar temel enerji seviyesinden yüksek enerji seviyelerine geçerler. Fakat bu elektronlar çıktıkları yüksek enerji seviyesinde uzun kalamaz ve ait oldukları enerjili yörüngeye geri dönerek temel enerji seviyesine ulaşırlar. Yüksek enerji seviyesinden tekrar temel enerji seviyesine geçen elektronlar yüksek enerji seviyeleri arasındaki enerji farkını foton olarak salınım yaparlar. Dış ortama salınan bu fotonlar da diğer atomları uyarır ve döngü bu biçimde devam eder. Aktif ortam malzemelerinin uçlarına yerleştirilen ve farklı geçirgenliklere sahip iki ayna sayesinde fotonlar kontrollü biçimde aktif ortam içinde hapsedilerek daha fazla atomu uyarılmaları sağlanır. Fotonlar ışın demeti haline getirilir, eş faz ve aynı dalga boyunda düşük geçirgenlikli aynadan dışarıya geçer ve bu sayede lazer ışını oluşturulur [Orazio, 2010].

Lazerler, aktif ortamına göre temelde 4 çeşide ayrılır;

- Katı-Hal Lazerler
- Sıvı Lazerler
- Gaz Lazerler
- Yarıiletken Lazerler

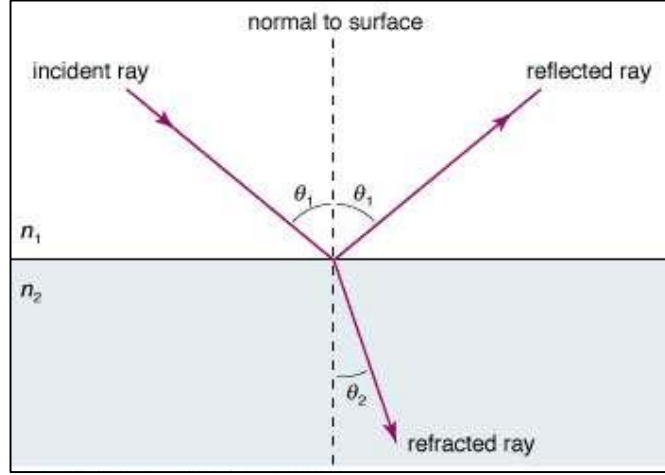
Lazerin kullanım alanları 1960 yılında ilk pratik lazerin icadının ardından hızla artmıştır. Günümüzde sanayide malzeme üretimi, ölçüm, analiz, temassız kontrol, tıp, savunma sanayi, iletişim ve haberleşme gibi pek çok alanda lazer sıklıkla kullanılmaktadır [Web 4, 2017].

2.2 Optik Altaşlar ve Kaplamalar

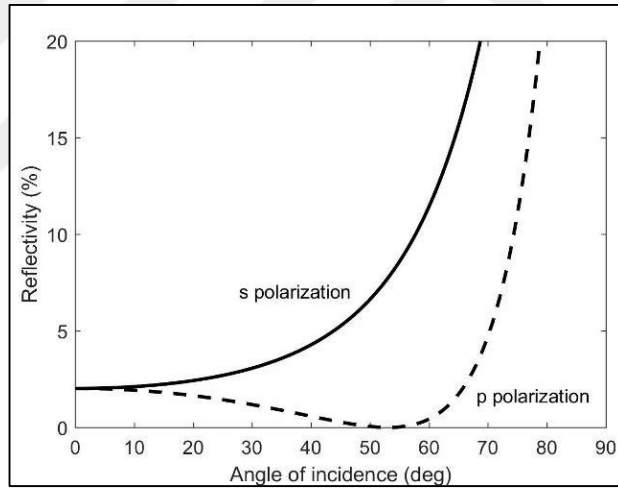
Optik eleman üretiminde camdan metale, silkondan polimerlere kadar birçok altaş malzemesi parlatılarak ve kaplanarak sıklıkla kullanılabilir. Optik elemanın kullanım alanına göre altaş seçimi oldukça önem taşımaktadır. Günümüz teknolojisinde BK7, SF11, Borosilikat, Zerodur, ZnSe, SiC, Fused Silica, Safir, Alüminyum, Germanyum, Silikon gibi altaşlar sıkça tercih edilmektedir. Bir optik sistemde kullanılacak altaş belirlemede kırma indisi, zayıflatma katsayısı, Sellmeier eşitliği, V-numarası, Fresnel yansıtma ve geçirgenlik oranları gibi optiksel özelliklerin yanı sıra Young modülü, elastik modül, Poisson oranı, kesme modülü gibi mekanik özellikler ve termal genişleme katsayısı, ısıl kırınım indeksi farkı gibi termal özellikler belirleyici rol almaktadır.

Optik sistemlerde kullanılan optik bileşenlerin büyük bir kısmı farklı malzemelerle kaplanmaktadır. Genel olarak bir ışık, herhangi bir ortamdan farklı optik özelliklere (özellikle kırıcılık indisi) sahip başka bir ortama geçtiğinde aradaki bu optik özellik farklılıklarından dolayı gelen ışığın bir kısmı yansırken bir kısmı yansımaya uğramadan direkt olarak geçmektedir. Bu davranış göz önünde bulundurularak optik elemanlar farklı malzemelerle kaplanarak istenen yansıtma ve geçirme oranlarını elde etmek amaçlanır. Optik uygulamanın amacına göre gerektiği zaman yansıtma oranı yüksek kaplama teknikleri kullanılabilirken, başka uygulamalarda geçirgenliği yüksek kaplama işlemleri uygulanabilir. Bazı uygulamalarda belli oranlarda geçirgenlik ve yansıtma durumları ayarlanabilir. Bahsedilen yansıtma/geçme oranı ortamlar arası kırıcılık indisi farkına, gelen ışığın dalgaboyuna ve geliş açısına bağlı değişen bir parametredir. Günümüzde kullanılan camların büyük bir kısmı herhangi bir kaplama işlemi görmeksizin gelen ışığın %4-5'i civarında bir miktarını yansıtılmaktadır. Hava ortamından cam ortamına gelen ışığın yansıtma oranını Fresnel kurallarıyla doğru bir biçimde ifade etmek

mümkündür bu kuralı kısaca aşağıdaki Şekil 2.1 [Web 2, 2020], Şekil 2.2 [Shaw ve Michel, 2017] ve denklemlerden anlayabiliriz.



Şekil 2.1: Işığın Kırınımı ve Yansıması.



Şekil 2.2: Yansımaya Yüzdesi vs Geliş Açısı.

$$r_s = \left[\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 \quad (2.1)$$

$$r_p = \left[\frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 \quad (2.2)$$

Bu formüllerde yer alan r_s ve r_p terimleri s ve p polarize ışıklar için yansımaya oranını vermektedir. Bu temel prensiplere dayanarak optik yüzeyler farklı

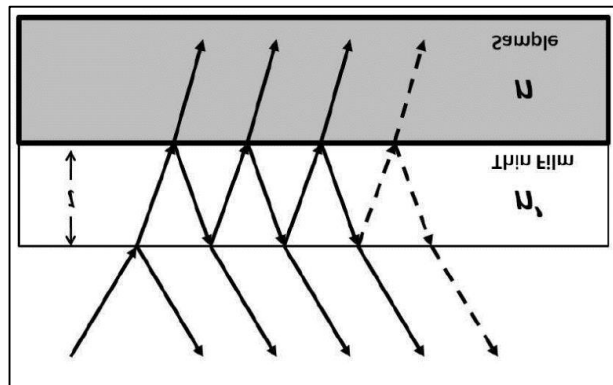
malzemelerle farklı kombinasyonlarla kaplanarak istenen yansıtma ve geçirme oranları elde edilmeye çalışılır. Bazı kaplama çeşitlerini inceleyecek olursak:

2.2.1 AR(Anti-Reflection) Kaplama

AR kaplama bir optik yüzeyin belirli bir dalgaboyunda ya da dalgaboyu aralığında yansıtma oranını minimuma indirme amaçlı uygulanan kaplama çeşididir. Genel olarak çalışma prensibi farklı optik yüzeylerden yansıyan ışınların söndürücü girişime uğrayarak birbirini yok etmesiyle yansıyan ışın oranının azaltılması yönündedir. Bu kaplama çeşidini iki başlıkta inceleyebiliriz:

2.2.1.1 Tek Katmanlı AR Kaplama

Optik malzemeyi ince bir malzemeye kapladığımızda havadan filme gelip yansıyan ve filmi geçip optik yüzeyden yansıyan ışın arasında 180 derecelik bir faz farkı oluşuyorsa bu iki ışın birbirini söndürüme uğratacak şekilde girişime uğrar ve sonuç olarak yansıyan ışık oranı azalır. Bu tip kaplama tek dalgaboyunda ya da çok dar dalgaboyu aralıklarında belli ışın geliş açısına sahip sistemlerde oldukça iyi sonuçlar vermekte ve yansıtma oranını oldukça azaltmaktadır. Sistemin çalışma prensibini aşağıdaki Şekil 2.3'de [Khan ve Salahuddin, 2012] kolaylıkla anlayabiliriz.



Şekil 2.3: Kaplamada Işık Girişimi.

Kaplamayı uyguladığımız optik yüzeyden ve direkt kaplama yüzeyinde yansıyan iki ışının birbirini söndürebilmesi için aralarında 180 derecelik bir faz farkının oluşması gerekir bu durumun sağlanabilmesi için kaplamanın kalınlığının optimum sonuç istediğimiz dalgaboyunun çeyreğinin tek katları uzunluğunda ve kırıcılık indisinin yaklaşık olarak havanın ve optiğin kırıcılık indislerinin geometrik ortalaması olması gerekir.

$$n_f = (n_0 n_s)^{1/2} \quad (2.3)$$

2.2.1.2 Çok Katmanlı AR Kaplama

Tek katmanlı AR kaplamayla yansımayı minimuma indirmek oldukça zordur çünkü bunu sağlayacak kırıcılık indisine sahip malzemelerin sayısı oldukça azdır. Ayrıca elde edilen kaplama sonucu yansıma önleme durumu yalnız tek bir dalgaboyuna veya dar bir dalgaboyu aralığına uygunluk göstermektedir. Böyle tek dalgaboyu ya da dar dalgaboyu aralıklarında değil de farklı dalgaboylarında veya geniş dalgaboyu aralıklarında yansıtmayı azaltmak için farklı kombinasyonlarda birden çok malzeme kaplaması yapılabilir. Bu işlem farklı kırıcılık indislerine sahip malzemelerin farklı kalınlıklarda kaplanmasıyla elde edilir. Bu şekilde farklı birkaç dalgaboyunda yansıma önleme özellikli yüzeyler elde edebileceğimiz gibi geniş dalgaboyu aralıklarında veya tek bir dalgaboyunda tek katmanlı AR kaplamaya göre daha iyi sonuçlar veren yüzeyler elde etmek de mümkündür.

2.2.2 HR (High-Reflection) Kaplama

HR kaplama yöntemi çalışma mantığı olarak AR kaplamanın tam tersi olarak düşünülebilir. AR kaplamanın tersine HR kaplamada, kaplama katmanları ve optikten oluşan farklı yüzeylerden yansıyan ışınların birbirinin üstüne binerek yapıcı girişime uğraması sonucu yansıyan ışın oranının artırılması amaçlanır. Bu kaplama tipinde de maksimum yansıma istenen dalgaboyunun çeyreği boyunda kaplama malzemeleri farklı yüksek-düşük kırınım indisi kombinasyonlarıyla bir araya getirilerek yansıyan ışınların üst üste toplanması sağlanır. Yansıyan ışığın miktarı

malzemeler arası kırıcılık indisi oranına ve katman sayısına bağlıdır. Bu iki parametrenin de artması yansımaya oranını artırır. Ayrıca yüksek yansımaya elde edileceği dalga boyu aralığı da kaplamaların kırıcılık indisleri oranına bağlı değişir; oran ne kadar artarsa yüksek yansımaya elde edileceği dalga boyu aralığı da artar. AR kaplamadan farklı olarak yüksek yansımaya aralığı grafiğinin şekli farklı yöntemlerle değiştirilebilir. Bunun için en etkili iki yöntem; farklı dalga boyları için optimize edilmiş farklı kaplama katman yığınlarının bir araya getirilmesi veya bir kaplamada bulunan katmanlarının kalınlıklarının değiştirilmesidir. HR kaplamada en önemli etkenlerden birisi de kaplamada kullanılacak malzemenin dielektrik mi yoksa metalik mi olacağına karar verilmesidir.

2.2.3 Filtreler

Optik filtre kaplamaları farklı dalga boylarında yüksek geçirgenliğe, yüksek yansıtma veya emilime sahip kaplamalardır. Sıkça kullanılmakta olan üç çeşit optik filtre vardır:

Long Pass Filters: Long Pass (LP) filtreler kısa dalga boylarında gelen ışınları azaltırken uzun dalga boylarında gelen ışınları yüksek seviyede geçirme özelliğine sahiptir.

Short Pass Filters: Short Pass (SP) filtreler LP filtrelerin tersine uzun dalga boylarında gelen ışınları azaltırken kısa dalga boylarında gelen ışınları yüksek seviyede geçirme özelliğine sahiptir.

Band Pass Filters: Band Pass (BP) filtreler belli bir dalga boyu aralığında gelen ışınları yüksek seviyede geçirme özelliğine sahipken bu aralıktan uzun ya da kısa dalga boyunda gelen tüm ışınları azaltmaktadır.

2.3 Lazer-Optik Etkileşimi

Optik malzemeye gelen lazer hüzmelerinin bir kısmı optik malzemenin yüzeyi tarafından geri yansıtılırken yansımaya kısmı malzeme içerisinde ilerler. Malzemenin arka iç yüzeyine ulaşan lazer ışınının küçük bir kısmı tekrardan malzeme içerisine geri yansır ve geriye kalan kısım malzemenin üzerinden çıkar. Bu geçiş

esnasında lazer ışını malzeme içerisinde Beer-Lambert yasasında ifade edildiği şekilde soğrulur [Malyshev ve Bityurin, 2006]:

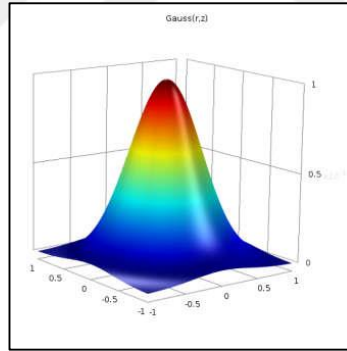
$$A(z) = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = z\alpha \quad (2.4)$$

Denklem 2.1’de A , soğurulma, I_0 , optiğe gelen ışının şiddeti, I , polimerden çıkan ışının şiddeti, z malzeme kalınlığı, α , soğurma katsayısıdır.

Gauss biçimli demet profiline (Şekil 2.2) sahip lazer ışını kullanıldığı zaman lazer ışınının çapsal şiddet dağılımı:

$$g(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{r-r_0}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.5)$$

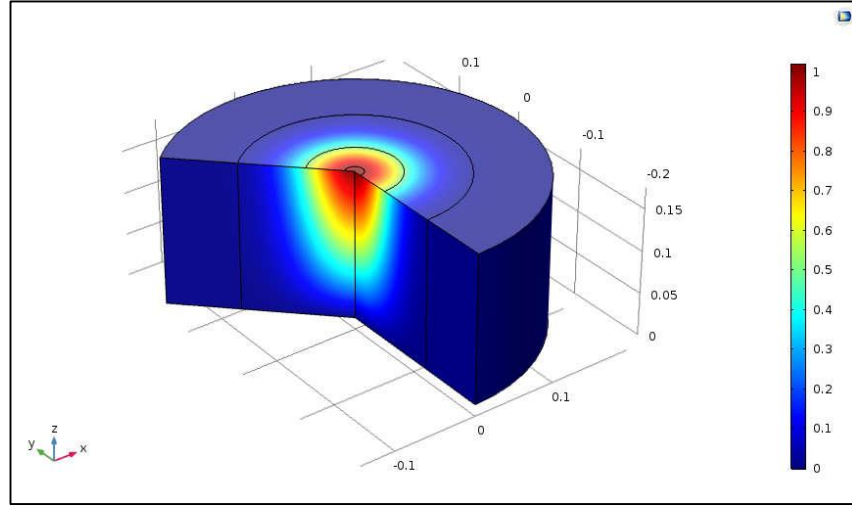
Formülü ile verilir. Burada σ , hüzmeye çapı, r , çapsal değişken, r_0 ise $z=0$ noktasındaki yarıçaptır.



Şekil 2.4: Gauss Dağılım Profili.

$$I(r, z) = A(z) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{r-r_0}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.6)$$

Denklem 2.4 ve 2.5 kullanılarak elde edilen 2.6 Gauss tipi hüzmeye profilinde lazer, hüzmeyin malzeme içerisindeki soğurulma davranışı radyal olarak Gauss eğrisine benzer olarak merkezden kenarlara gidildikçe azalır. Yine bu duruma benzer olarak lazer hüzmeyinin malzeme içerisine girdiği bölgeden derinliklere doğru soğurulma miktarı ve buna bağlı olarak ışık şiddeti azalmaktadır.



Şekil 2.5: Optik Üzerinde Lazer Soğurulması.

Optik yüzeyde soğrulan lazer hüzmesi malzeme içerisinde ısı enerjisine dönüşür. Soğrulan ışının malzeme içindeki yayılımı ısı kaynağı olarak tanımlanabilir ve bu kaynağın enerji dağılımı soğrulan lazer dağılımı ile aynıdır.

$$q_{lazer} = I(r, z)P_{lazer}t_{lazer} \quad (2.7)$$

Elde edilen bu ısı, optik içerisinde ısı iletimi ile yayılır.

Hacimsel ısı iletiminin zamana bağlı ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + q_{lazer}; \quad (2.8)$$

$$\nabla(k\nabla T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

Formüllerde ρ , yoğunluk (kg/m^3), t , zaman (s), T , sıcaklık (K), c_p , öz ısı (j/kgK), k , ısıl iletkenlik (W/mK) ve q_{lazer} lazer tarafından üretilen ısı kaynağıdır (j/m^3).

Malzeme içerisinde yayılan ısı, serbest konveksiyon ve ışınma yoluyla da malzeme yüzeyinden dış ortama aktarılır. Yüzey ısı akısı:

$$k\nabla T = q_0 + h(T_{ortam} - T) + \sigma\varepsilon(T_{ortam}^4 - T^4) \quad (2.10)$$

Formülde q_0 , yüzey ısı akısı, k , ısıl iletkenlik (W/mK), h , ısıl iletim katsayısı (J/m²K), σ geri ışınma oranı, ε , Stefan-Boltzmann sabiti (W/m²K⁴), T_{ortam} , ortam sıcaklığı (K), T , Yüzey sıcaklığıdır (K). [Tresansky vd., 2014]

Isınan optikler sıcaklık ve termal genişleme katsayısı ile orantılı şekilde genişir. Hacimsel genişme:

$$\nabla V = \alpha_v(T)V\nabla T \quad (2.11)$$

Bu formülde α_v (1/K), sıcaklığa bağlı hacimsel ısıl genişleme katsayısı, V , hacim (m³), ΔV hacim değişimi (m³), ΔT sıcaklık değişimi (T) [Tresansky vd., 2014]

Malzemelerin yüksek elastiklik sıcaklık değerinden daha düşük sıcaklıklarda oluşan termal genişmeler geçici genişmelerdir. Soğuma gerçekleştikten sonra malzeme tekrar büzüşerek eski haline dönmektedir. Kalıcı olmayan bu deformasyon elastik olarak adlandırılır.

Oluşan sıcaklığın, yüksek elastik sıcaklığından daha yüksek olduğu zaman kalıcı şekil değişiklikleri gözlenir. Bu kalıcı değişime ise plastik deformasyon denilir. [Malyshev vd., 2006].

Bu çalışmada çeşitli optik yüzeyler üzerine etki eden lazer hüzmesinden kaynaklı ısınma sonucu oluşan deformasyonlar sonlu eleman metodu ile bilgisayar destekli nümerik benzetim yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

2.4 Optik Analiz / Zernike Polinomları

Deforme olmuş optik yüzeyin performansının analiz edilmesi bu yüzeyin optik analiz yazılımı içerisinde tanımlanması ile mümkün hale gelebilmektedir. Ancak optik sistem tasarım ve analizinde kullanılan yazılımlarda yüzey tanımlamak için kısıtlı parametreler değiştirilebilmektedir. Deforme olmuş bir yüzeyin bu tip yazılımlara tanımlanabilmesinin en yaygın yolu Zernike polinomlarıdır.

Zernike polinomları birim çember bölgesinde dikey biçimde tanımlanan tam bir polinom dizisidir. [McAlinden vd., 2011].

Zernike polinomları tanımlanırken polar (kutupsal) koordinat sistemi kullanılır. Optik sistem hataları dalgacephesi matematiksel olarak Zernike polinomlarına dönüştürülerek tanımlanabilir [Alkhalidi vd., 2010], [Oliveira vd., 2012]. Bozulmaya uğramamış ideal dalgacephesi düzlemsel olarak kabul edilirken Zernike polinomları ideal dalgacephesinden sapmaları tanımlamak için kullanılır.

Zernike polinomları aşağıdaki gibi hesaplanabilir [Koyuncu ve Kocabasoglu, 2009] :

$$\begin{aligned}
Z_n^m(\rho, \theta) &= Z(n, \pm m) \\
&= \sqrt{(n+1)}R_n^0(\rho) && m = 0, 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi \text{ için} \\
&= \sqrt{2(n+1)}R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta) && m > 0, 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi \text{ için} \\
&= -\sqrt{2(n+1)}R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta) && m > 0, 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi \text{ için}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Formüllerde n, radyal dereceyi, m de açısal frekansı göstermektedir. $R_n^{|m|}(\rho)$ ise radyal polinomdur. Bu polinomun hesaplanması ise aşağıda gösterilmiştir:

$$R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [0.5(n+|m|-s)]! [0.5(n-|m|-s)]!} \rho^{n-2s} \tag{2.13}$$

Yukarıdaki formül kullanılarak elde edilen ilk 16 polinom değeri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Radyal Polinomları.

n	m	$R_n^{ m }(\rho)$
0	0	1
1	1	R

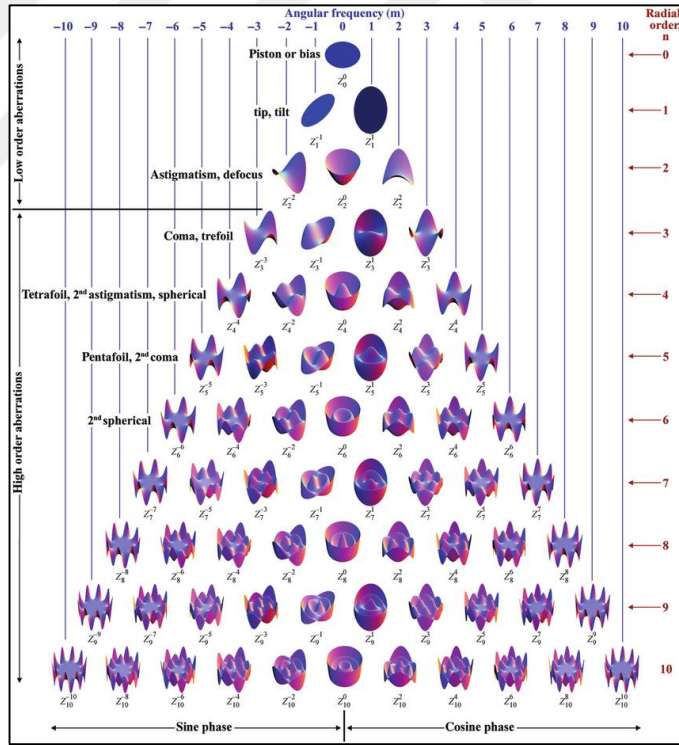
Tablo 2.1: Devam.

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

Hesaplanarak Tabloda belirtilen radyal polinomlar kullanılarak hesaplanan Zernike polinomları aşağıdaki Şekil 2.6'da [Wojtanowski vd., 2015] gösterilmiştir. Bu polinomların üç boyutlu gösterimleri ise şekil 2.7'de [Lakshminarayanan, 2011] verilmiştir.

Mode j	Order n	Frequency m	Z_n^m	Interpretation
0	0	0	1	Piston
1	1	-1	$2\rho\sin(\theta)$	Tilt in y - direction. Distortion
2	1	1	$2\rho\cos(\theta)$	Tilt in x - direction. Distortion
3	2	-2	$6^{1/2}\rho^2\sin(2\theta)$	Astigmatism ($\pm 45^\circ$)
4	2	0	$3^{1/2}(2\rho^2 - 1)$	Field curvature. Defocus
5	2	2	$6^{1/2}\rho^2\cos(2\theta)$	Astigmatism (0°)
6	3	-3	$8^{1/2}\rho^3\sin(3\theta)$	
7	3	-1	$8^{1/2}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(\theta)$	Coma (y-axis)
8	3	1	$8^{1/2}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(\theta)$	Coma (x-axis)
9	3	3	$8^{1/2}\rho^3\cos(3\theta)$	
10	4	-4	$10^{1/2}\rho^4\sin(4\theta)$	
11	4	-2	$10^{1/2}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	Secondary astigmatism
12	4	0	$5^{1/2}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Spherical aberration. Defocus
13	4	2	$10^{1/2}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	Secondary astigmatism
14	4	4	$10^{1/2}\rho^4\cos(4\theta)$	
...				
22	6	0	$7^{1/2}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)$	
...				
37	8	0	$9^{1/2}(70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1)$	

Şekil 2.6: Zernike Polinomları.



Şekil 2.7: Zernike Polinomlarının 3-Boyutlu Gösterimleri.

Sonlu eleman analizi yöntemi sonucu elde edilen deformasyon verilerini Zernike polinomlarına eşleştirmek için bu deformasyon verilerini Matlab programında işleme sokmamız gerekmektedir. Doyle tarafından yapılan çalışma şunu

göstermiştir ki eğer hesaplanan nokta radyal ekseninde de sapmaya uğramışsa yüzeyin dikine oluşan deformasyonlar sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen z eksenine sapmasına direkt eşit olmamaktadır. Bu sebeple yüzeyin dikine oluşan bozulmalar şu şekilde hesaplanmaktadır: [Doyle, Genberg ve Michels, 2002a]

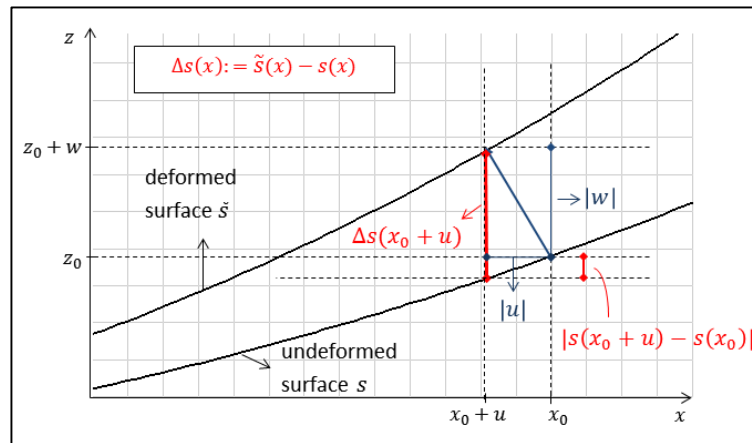
$$\begin{aligned} \Delta s(r_0, \theta_0) &= \tilde{s}(r_0, \theta_0) - s(r_0) \\ &= w(r_0, \theta_0) - \frac{\partial s(r_0)}{\partial r} \sqrt{u^2(r_0, \theta_0) + v^2(r_0, \theta_0)}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

Formülde $\langle u, v, w \rangle$ bir noktanın dörtgenel koordinatlarda sapma vektörleridir. Bu denklem bozulmaya uğramamış yüzey üzerindeki bir noktanın (r_0, θ_0) yüzeye dik olarak bozulma bilgisini vermektedir. Diğer yandan radyal olarak sapmış bir noktanın $(\tilde{r}, \tilde{\theta})$ yüzey dikine değişimi şu şekilde formüle edilebilir:

$$\Delta s(\tilde{r}, \tilde{\theta}) = \tilde{s}(\tilde{r}, \tilde{\theta}) - s(\tilde{r}) = w(r_0, \theta_0) - [s(\tilde{r}) - s(r_0)] \quad (2.15)$$

Burada, $\tilde{r} = r_0 + \sqrt{u^2 + v^2}$

Denklem aşağıdaki Şekil 2.8’de [Doyle, Genberg ve Michels, 2002c] şematize edilmiştir.



Şekil 2.8: Sapmış Noktada Yüzey Dikine Değişimin Çıkarımı.

Denklemin sağ tarafındaki ikinci terim basitçe sapmış noktada oluşturulmuş baz yüzeyin sapmamış noktadan farkıdır. Hesaplamalarda yukarıdaki formül zernike polinomlarına benzetilerek en küçük kareler yöntemi ile Matlab’da Zernike

katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayılar ardından Zemax optik tasarım ve analiz yazılımına girdi olarak sağlanarak bozulmuş yüzeyler tanımlanmış ve bu yüzeylerin optik performansı analiz edilmiştir.

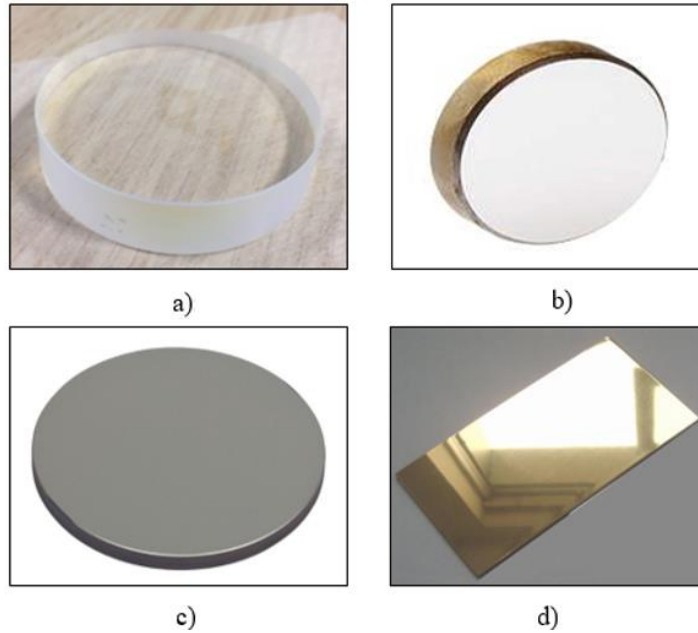


3. MATERYAL ve YÖNTEM

Optik yüzeylerin lazer etkisi altında performansı optik alttaşa ve kaplamanın yansıtma/geçirgenlik oranına direkt olarak bağlı bir parametredir. Bu çalışmada farklı yansıtma oranlarına sahip kaplamalı çeşitli alttaşlar farklı lazer güçlerine değişken etki süreleri boyunca maruz bırakılarak ölçümler alınmıştır. Çalışmada lazer uygulamaların sıklıkla kullanılan Fused Silica, Zerodur alttaşlarının yanı sıra tedariki daha kolay az maliyetli Alüminyum ve Soda Lime camları test edilmiştir. Test edilen alttaşların yansıtma oranları 0.90-0.99 seviyesinde kaplamaları bulunmaktadır. İlgili kaplama grafikleri ek olarak verilmiştir.

3.1 Materyal

Deneysel çalışmalarda optik alttaş olarak düşük ısıl genleşme katsayılarına sahip oldukları için lazer uygulamalarında tercih edilen Fused Silica ve Zerodur malzemeleri ile bunlarla mukayese edildiğinde oldukça yüksek ısıl genleşme katsayılarına sahip Soda Lime ve Alüminyum maddeleri test edilmiştir. İlgili malzemelerin mekanik ve yansıtma/geçirgenlik oranları dâhil optik özellikleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.



Şekil 3.1: a) Zerodur, b) Fused Silica, c) Soda Lime, d) BK7.

Tablo 3.1: Çalışmada Kullanılan Optik Altaşların Özellikleri.

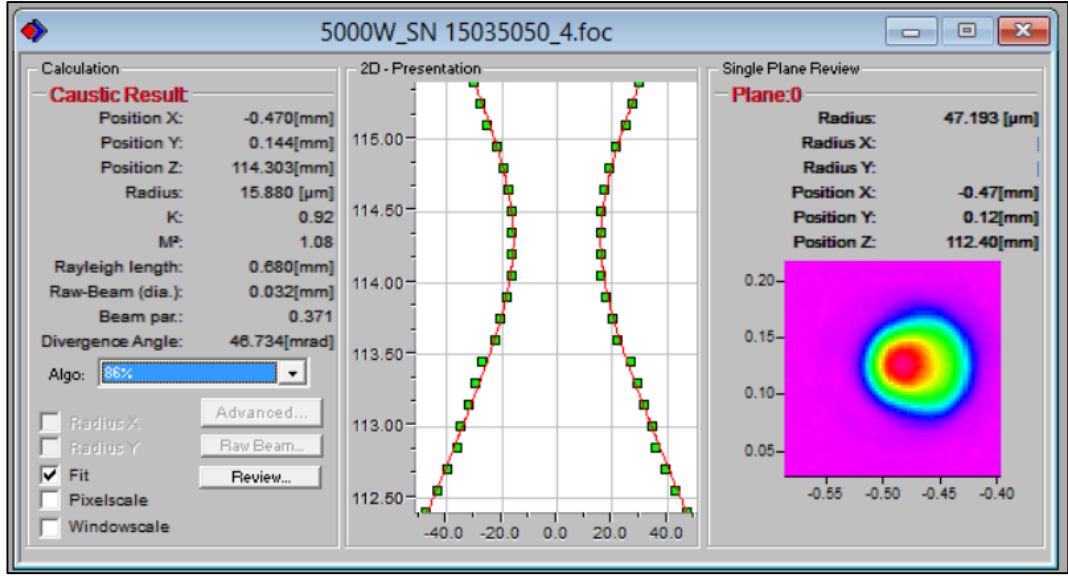
Fused Silica Mekanik Özellikleri		
Elastik Modül	73GPa	
Kesme Modülü	31GPa	
Kopma Modülü	52.4MPa	
Poisson Oranı	0.16	
Yoğunluk	2.20 g/cm ³	
Gerilme Direnci	54 MPa	
Fused Silica Termal Özellikleri		
Öz Isı	0.770 J/(gK)	
Termal İletkenlik	1.38 W(mK)	
Termal Genleşme(ppm/C)	0°C-200°C	0.57x10 ⁻⁵
Fused Silica Optik Özellikleri		
Geçirgenlik	0	
Yansıtma	99.9/100	
Soğurma	0.1/100	

Zerodur Mekanik Özellikleri		
Young Modülü	90.3 GPa	
Elastik Modül	89.6 GPa	
Kesme Modülü	36.4 GPa	
Poisson Oranı	0.24	
Yoğunluk	2.53 g/cm ³	
Topuz Sertliği	620 kg/mm ²	
Zerodur Termal Özellikleri		
Öz Isı	0.800 J/(gK)	
Termal İletkenlik	1.46 W(mK)	
Termal Genleşme(ppm/C)	0°C-50°C	0.042x10 ⁻⁵
Zerodur Optik Özellikleri		
Geçirgenlik	0	
Yansıtma	99.65/100	
Soğurma	0.35/100	

Soda Lime Mekanik Özellikleri		
Elastik Modül	72 GPa	
Kesme Modülü	30 GPa	
Sıkıştırma Direnci	330 MPa	
Poisson Oranı	0.22	
Yoğunluk	2.44 g/cm ³	
Gerilme Direnci	100 MPa	
Soda Lime Termal Özellikleri		
Öz Isı	0.800 J/(gK)	
Termal İletkenlik	1 W(mK)	
Termal Genleşme(µm/mK)	0°C-200°C	8.8
Soda Lime Optik Özellikleri		
Geçirgenlik	0 – 62/100	
Yansıtma	86/100 - 8/100	
Soğurma	14/100 – 30/100	

BK7 Mekanik Özellikleri		
Elastik Modül	82 GPa	
Kesme Modülü	34 GPa	
Knoop Mikrosertliği	610	
Poisson Oranı	0.206	
Yoğunluk	2.51 g/cm ³	
Toplu Modül	46.5 GPa	
BK7 Termal Özellikleri		
Öz Isı	0.858 J/(gK)	
Termal İletkenlik	1.114 W(mK)	
Termal Genleşme(µm/mK)	-30°C-70°C	7.10
BK7 Optik Özellikleri		
Geçirgenlik	0	
Yansıtma	89.6/100	
Soğurma	11.4/100	

Deneyisel çalışmalarda kullanılan lazerler 100W-5kW ayarlanabilir 1075nm dalgaboyunda tekil modlu lazerlerdir. İlgili lazerlerin ölçümleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 3.2: Çalışmada Kullanılan Lazerin Ölçüm Sonucu.

Lazerle önlerinde kullanılan kolimatörler vasıtası ile 1cm çapında lazer hüzmeleri halinde optik elemanlara yönlendirilmiştir.

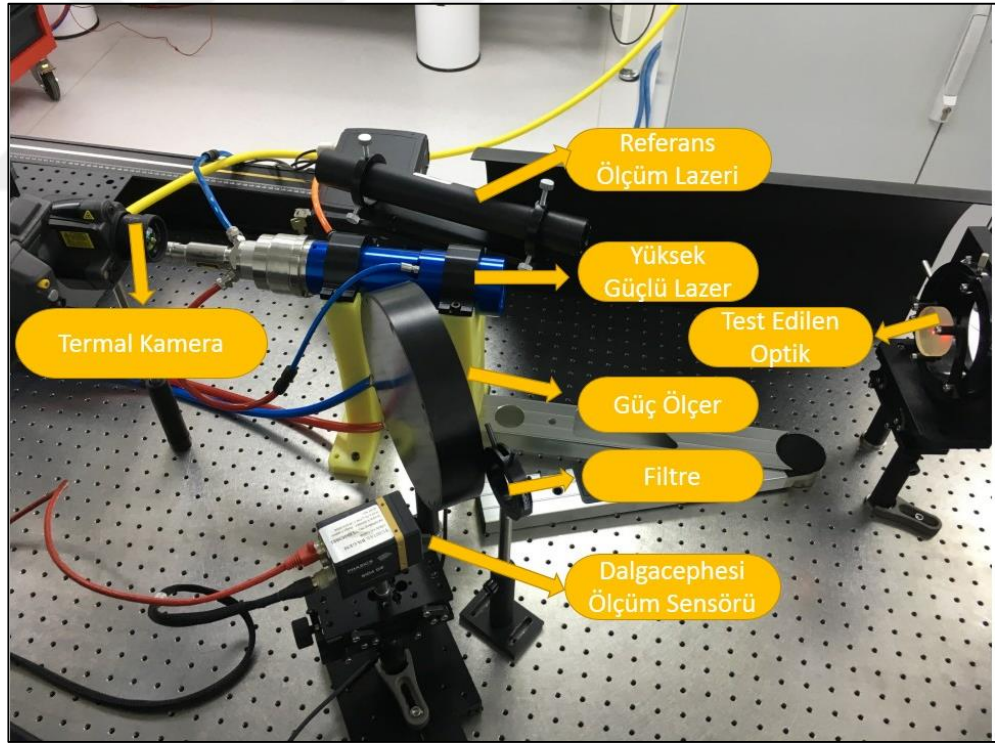
Lazer etkisi altında bulunan optikler aynı zamanda dalgacephesi ölçüm sensörü ile eş zamanlı olarak ölçülmektedir. Çalışmada kullanılan Shack-Hartmann dalgacephesi ölçüm sensörünün özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.2: Dalgacephesi Ölçüm Sensörü Özellikleri.

Dalgaboyu Bandı	400-1100 nm
Ölçüm Açıklığı	4.8x3.6 mm ²
Çözünürlük	< 2nm RMS
Keskinlik	10 nm RMS
Dinamik Aralık	>100 μm PtV
Ölçüm Oranı	>100 fps
Analiz Oranı	10 fps

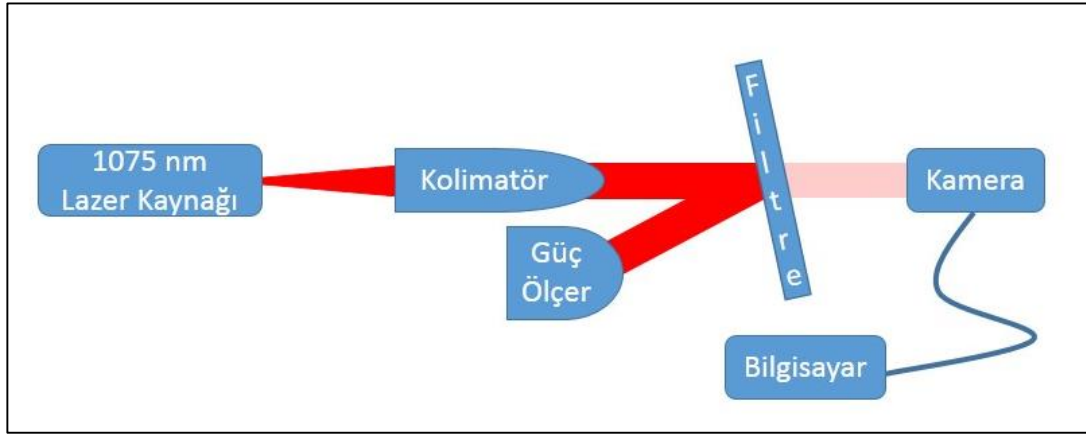
3.2 Yöntem

Çalışmanın deneysel kısmı için aşağıdaki şekilde gösterilen deney düzeneği kurulmuştur. Burada yüksek güçlü lazer kaynağından çıkan lazer test edilen optik üzerinden yansıtılarak güç ölçer üzerine düşürülmüştür bu sayede hem yansıyan güç ölçülmüş hem de yüksek güçlü lazer burada soğutulurak sönmülmüştür. Eş zamanlı olarak da referans ölçüm lazer de yine aynı optiğin yüksek güçlü lazere maruz kalan kısmından yansıtılarak dalgacephesi ölçüm sensörüne düşürülmüştür ve dalgacephesi ölçümü alınmıştır. Deneylerde ilk olarak yüksek güçlü lazer henüz açılmadan optiğin başlangıç dalgacephesi referans ölçüm lazeri yardımıyla ölçülüp alınan değer referans dalgacephesi olarak kaydedilmiştir. Ardından yüksek güçlü lazer uygulanarak güce ve zamana bağlı olarak elde edilen dalgacephesi değişimleri kaydedilmiştir. Bu sırada eş zamanlı olarak da optik üzerinde oluşan sıcaklık değişimi termal kamera yardımıyla ölçülmüştür.



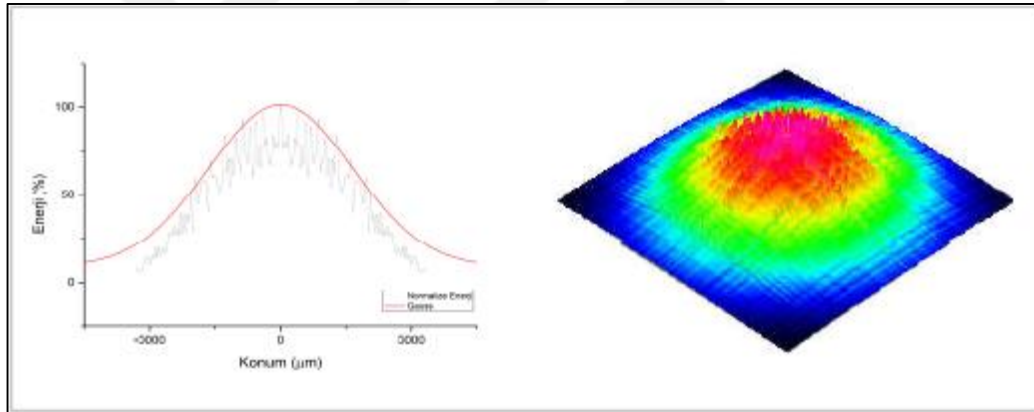
Şekil3.3: Deneysel Düzenek.

Deney çalışmalarında kullanılan lazer kolimatörün ardından belli bir çapta açılmadan veya odaklanmadan uzun bir mesafe devam etmektedir. Bu lazer hüzmelerinin profili aşağıda şematize edilen deneysel düzenek ile görüntülenmiş ve analiz çalışmalarında kullanılmak üzere profil hesaplanmıştır.



Şekil 3.4: Profil Ölçüm Deneyi Şematik Gösterimi.

1075nm Dalga boyuna sahip olan lazerin hüzme çapı ($1/e^2$) 11 mm ölçülmüştür ve hüzme güç dağılım profili Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



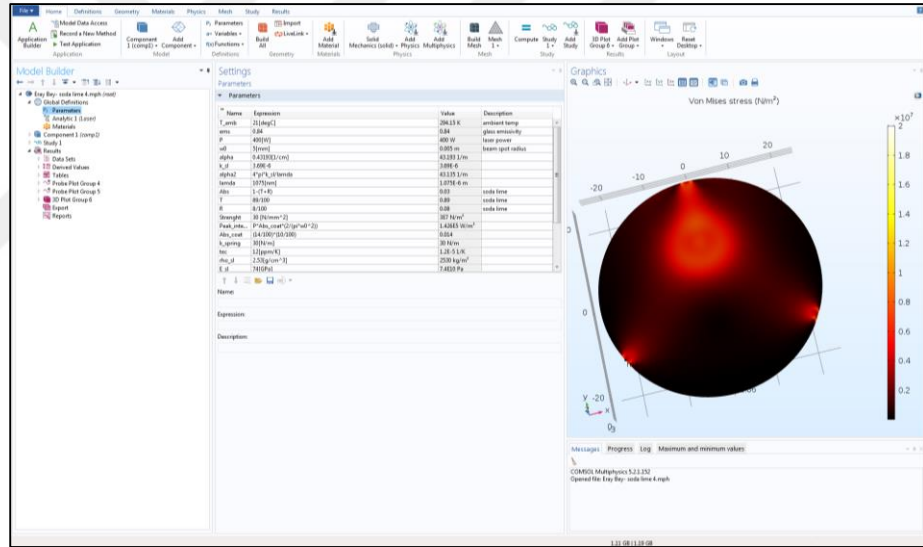
Şekil 3.5: Profil Ölçüm Sonucu.

Deneyisel çalışmalarda farklı optik yüzeylere 100W-2kW arası ayarlanmış lazer güçlerinde hüzmeler 5sn-10sn-20sn sürelerde etki edip ölçümler alınmıştır. Yüksek güce ve yüksek etkileşim süresine rağmen değişim görülmeyen optiklere farklı geliş açılarında da lazerler uygulanmış ve ölçümler alınmıştır.

4. BENZETİM MODELİ

Optik elemanlar üzerinde lazerin oluşturacağı termal yük sonucu oluşan bozulmaların oluşumu, bilgisayar destekli bir sayısal (nümerik) hesaplama yazılımı olarak kullanılan COMSOL Multiphysics ile modellenmiştir (Şekil 4.1).

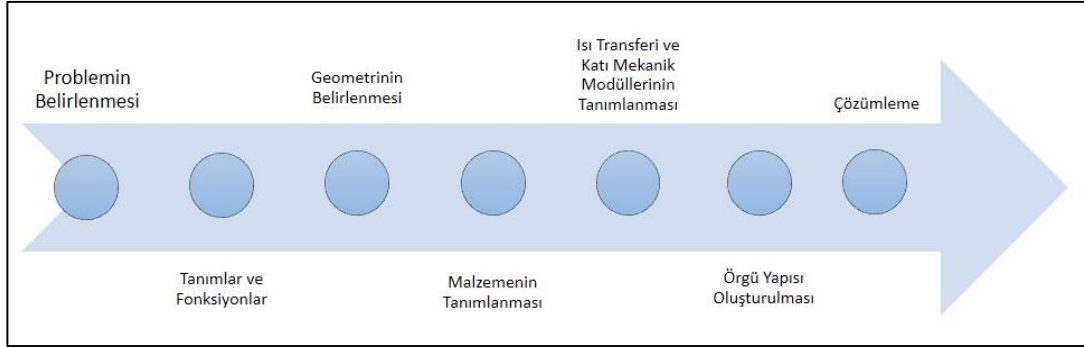
COMSOL Multiphysics, çeşitli mühendislik ve bilim problemlerini benzetimleyip çözüm sunabilen sonlu eleman analizi yöntemine dayalı bir benzetim yazılımıdır. COMSOL Multiphysics yazılımının diğer sonlu elemanlar yazılımlarından ayrılan önemli bir yetkinliği bir ya da birden fazla, çeşitli, farklı ve aralarında ilişki kurulabilir fizik kuramlarını birlikte çözümleyebilmesidir. [Web 1, 2016].



Şekil 4.1: COMSOL Multiphysics Kullanıcı Arayüzü.

COMSOL Multiphysics yazılımının geometri modülünde boyutları girilerek oluşturulan optik katı modeller, ardından literatür taraması sonucu veya yazılımın kendi kütüphanesi yardımı ile elde edilen malzeme bilgileri ile donatılıp tanımlanmıştır. Ardından lazer kaynağının matematiksel tanımı çıkarılmış, modellemesi yapılmış ve analiz çalışmasının ısı kaynağı olarak lazer tanımlanmıştır. Yazılımın ısı transferi ve katı mekanik modüllerinde çalışmanın sınır koşulları deneysel koşullar göz önünde bulundurularak tanımlanmış ve bu iki modül (ısı transfer modülü ve katı mekanik modülü) eşleştirilmiştir. Oluşturulan model örgü

yapısı modülünde oluşturularak model tamamlanmıştır. Son olarak zamana bağlı sayısal (nümerik) öteleme yöntemi ile model çözümlenmiştir.



Şekil 4.2: COMSOL Multiphysics Çözüm Döngüsü.

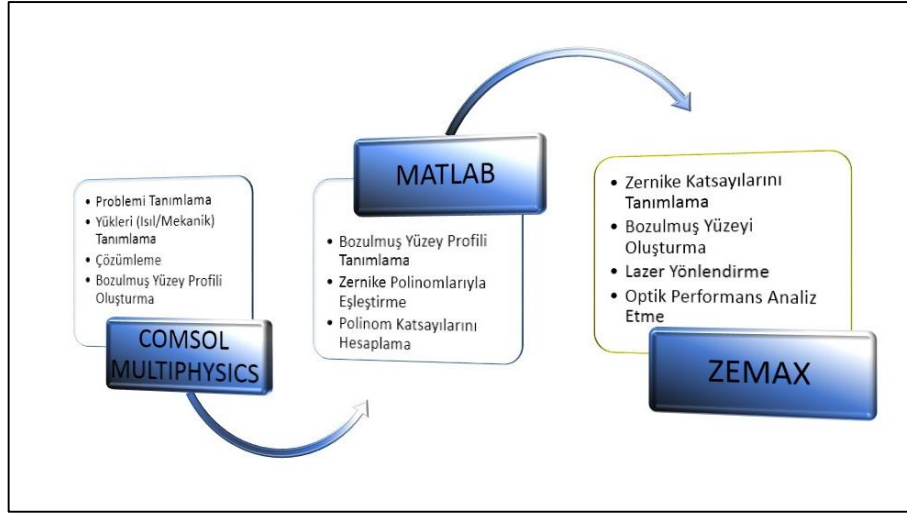
Çözümlenen çalışma sonucu ortaya çıkan bozulmuş yüzey geometrisi çıktı olarak alınıp yüzey profili tanımlanması amaçlı MATLAB programında işlenmiştir.

MATLAB özellikle matematiksel problemlerin çözümü ve analizi çalışmalarını yapmak için tasarlanmış bir yazılım geliştirme programıdır. Program sayısal görüntü işleme, optimizasyon, sinyal işleme, yapay sinir ağları gibi geniş yelpazede araçları bulunan kapsamlı bir yazılımdır.

Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen yüzey profilinde her bir noktanın konumu matematiksel olarak ifade edilmiş ve profilin karşılık geldiği zernike polinomları katsayıları hesap edilmiştir.

Hesap edilen bu katsayılar Zemax optik tasarım ve analiz yazılımına girdi olarak verilerek yüzey bu programda tanımlanmıştır. Ardından tanımlanan bu yüzey üzerinde deneysel şartlar göz önünde bulundurularak aynı bölgeye aynı dalgaboyunda aynı çapta ve aynı geliş açısında lazer hüzmesi yönlendirilerek yansıyan lazerin dalgacephesi analiz edilmiştir ve RMS değeri hesaplanmıştır.

Aşağıya analiz döngüsü şematize edilmiş ve takip eden bölümde analizin her bir aşaması detaylandırılmıştır.



Şekil 4.3: Çalışmada Kullanılan Analiz Döngüsü.

4.1. Parametreler, Değişkenler

COMSOL Multiphysics yazılımında benzetim modellemesi yapılırken problem koşullarına göre fiziksel modüllere ek olarak işlem sırasında, işleme alınması istenen sabit değerler, değişkenler vb. bu kısımda tanımlanmıştır.

Parametreler alanında tanımlanan değerler, yazılımın işlem yapması sırasında sabit kalan değerlerdir. Girilen bu değerler modelin geometrisi, çevre ve sınır koşulları gibi pek çok kısımda kullanılır. Çalışmada kullanılan parametreler aşağıda listelenmiştir. Bu parametreler her bir optik için Bölüm3.1’de verilen değerler şeklinde girilmiştir.

Tablo 4.1: Soda Lime Parametreleri.

Soda Lime Parametreleri		
İsim	İfade	Açıklama
Abs	$1-(T+R)$	Malzeme Soğurması
Abs_coat	$(14/100)*(10/100)$	Kaplama Soğurması
alpha	$0.43193[1/cm]$	Soğurma Katsayısı
Cp_sl	$850[J/(kg*K)]$	Isı Sığası
E_sl	$74[GPa]$	Young Modülü
ems	0.84	Emisivite
G_sl	$29.8[GPa]$	Kesme Modülü
k_spring	$30[N/m]$	Tutucu Yay sabiti
lamda	$1075[nm]$	Lazer Dalgaboyu
nu_sl	$(E_sl/(2*G_sl))-1$	Poisson Oranı

Tablo 4.1: Devam.

Peak_intensity	$P \cdot \text{Abs_coat} \cdot (2 / (\pi \cdot w_0^2))$	Maksimum Güç
P	400[W]	Lazer Gücü
R	8/100	Malzeme Yansıtması
rho_sl	2.53[g/cm ³]	Özkütle
Strenght	30 [N/mm ²]	Dayanım
T	89/100	Malzeme Geçirgenliği
T_amb	21[degC]	Ortam Sıcaklığı
tec	12[ppm/K]	Termal Genleşme Katsayısı
tk_sl	0.8[W/(m ² *K)]	Termal İletkenlik
w0	5[mm]	Lazer Yarıçapı
y0	10[mm]	Lazer Konumu

Yazılımın fonksiyonlar alanında ön tanımlı veya parametrik çeşitli fonksiyonlar tanımlanabilmektedir. Bu fonksiyonlar COMSOL Multiphysics programının fizik modüllerine veya direkt olarak çözüm alanına dahil edilerek çalışma geliştirilerek özelleştirilebilir.

Bir lazer hüzmesinin güç yoğunluğu dağılımı denklem 4.1 Gauss dağılım fonksiyonu ile ifade edilebilmektedir. Bu ifade lazerin malzeme içerisinde soğurulması ve maksimum güç yoğunluğu hesaba katılarak denklem 4.2 elde edilmiştir.

$$g(r) = e^{(-2r^2/w_0^2)} \quad (4.1)$$

Burada r, çapsal koordinat w_0 , hüzme yarıçapıdır.

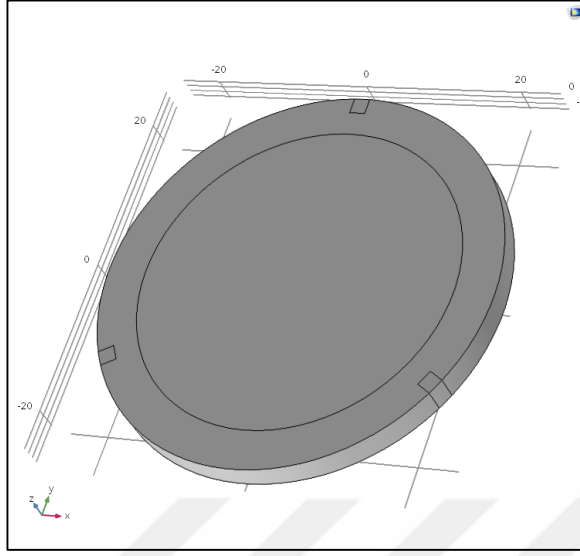
$$G(r, z) = \alpha e^{((- \alpha)(-z))} (2 / \pi w_0^2) e^{-2(x^2+y^2)/w_0^2} \quad (4.2)$$

Burada, α hacimsel soğurma katsayısı, z ilerleme mesafesi, x ve y ise eksenel koordinatlarıdır.

4.2 Geometri

Oluşturulan modelde optiklerin katı modeli COMSOL Multiphysics programının geometri modülünde şekillendirilmiştir. Farklı kalınlık ve çaplarda

optiklerin oluşturulduğu modülde deneysel düzenek göz önünde bulundurularak tutucu temas alanları ve lazer hüzmesi etki bölgesi de oluşturulmuştur.



Şekil 4.4: COMSOL Multiphysics ile Oluşturulan Katı Model.

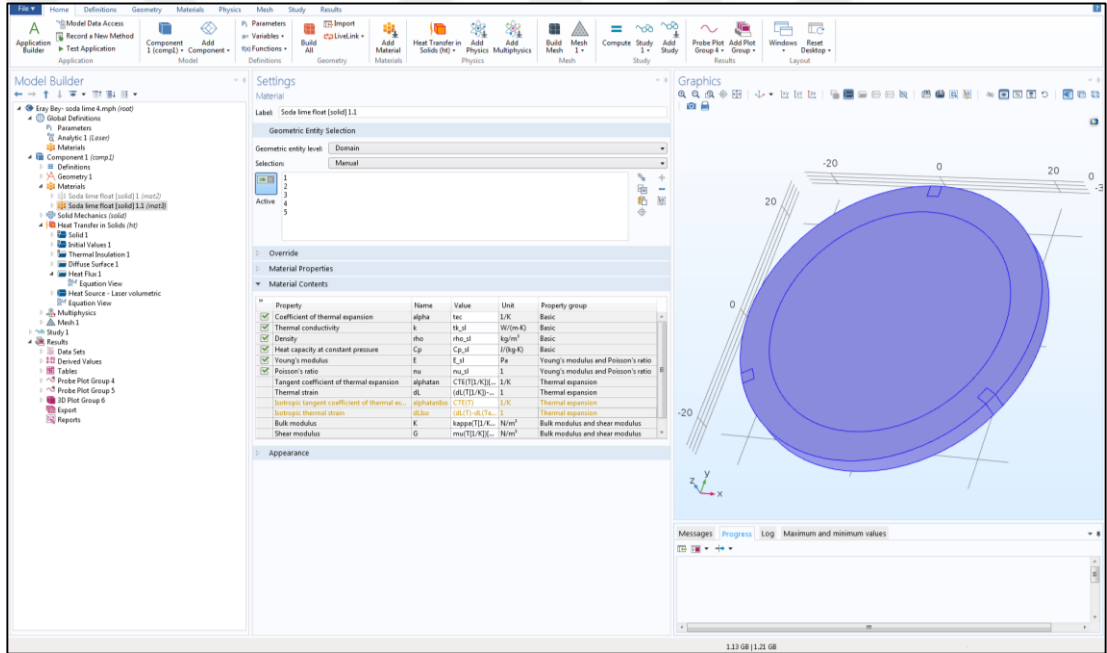
Şekilde gösterilen geometri modelinde, optiğin kenarlarında gözüken üç bölge tutucunun temas ettiği yüzeylerken orta kısımda görülen gölge ise lazer hüzmesinin etki ettiği alandır. Benzetim modelinde deneysel çalışmalar sırasında kullanılan optikleri modellemek amaçlı çeşitli geometriler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometrilerin boyutları (çap, kalınlık) aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.2: Çalışmada Kullanılan Optiklerin Boyutları.

Optik	Çap	Kalınlık
Zerodur	50.8mm	12.7mm
Fused Silica	50mm	9.5mm
Soda Lime	50.8mm	3.2mm
BK7	25.4mm	2mm

4.3 Malzeme

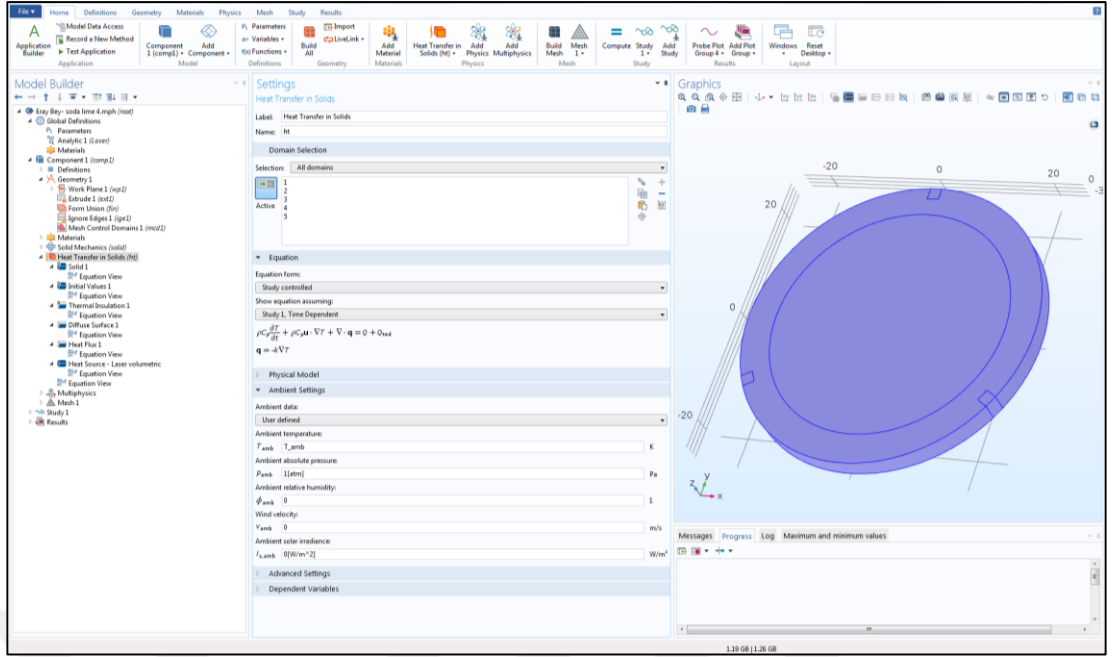
COMSOL Multiphysics yazılımının geometri modülünde oluşturulan katı modellerin işleme alınıp ilgili problemde nasıl bir çözüm uygulayacağını belirleyen ana etmenlerden birisi katı modele tanımlanan malzeme bilgisidir. Malzeme bilgileri katı modele tanımlanırken yazılımın kütüphanesi kullanılabileceği gibi firmaların sağladığı veya literatür taramaları sonucu elde edilen parametreler de modele tanımlanabilmektedir. Çalışmada tanımlanan parametreler Bölüm 3.1’ de verilen tablolar esas alınarak girilmiş ve katı modellere malzeme bilgisi olarak eklenmiştir.



Şekil 4.5: COMSOL Multiphysics Malzeme Tanımlama Arayüzü.

4.4 Isı Transfer Modülü

Yazılımın ısı transfer modülünde modelin ısı kaynakları tanımlanabilmektedir. Daha önce tanımlar ve fonksiyonlar alanında matematiksel ifadeler ile tanımlanan ısı kaynakları ile geometri bölümünde oluşturulup malzemesi tanımlanan katı modelin, kendi içerisinde ve dış ortam ile ısı etkileşiminin hesaplandığı kısımdır.

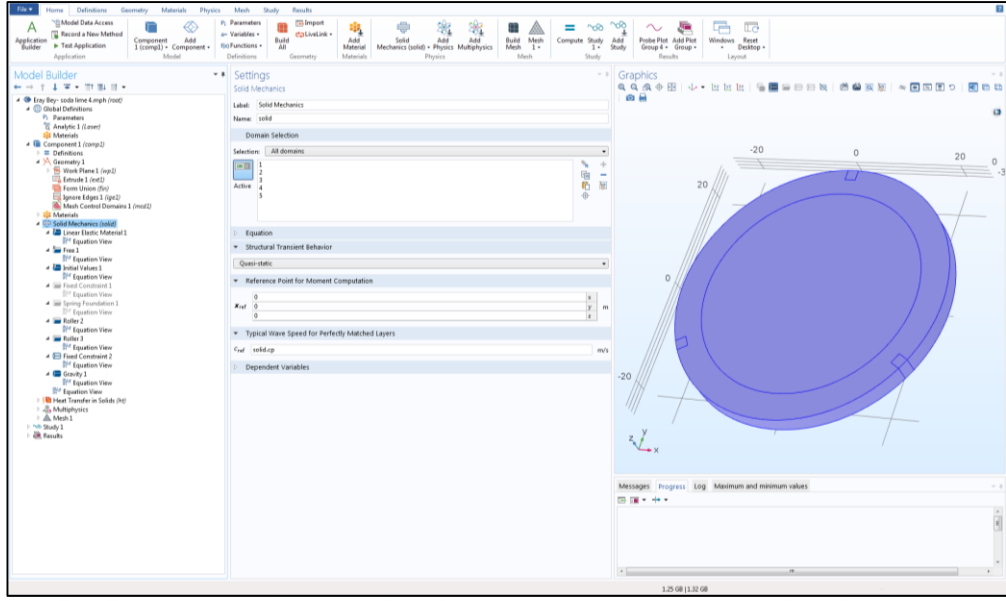


Şekil 4.6: COMSOL Multiphysics Isı Transfer Arayüzü.

Isı transfer modülünde, ısı kaynağı daha önce tanımlanan lazer dağılımı ve güç fonksiyonları ile malzemenin soğurma katsayısı hesaba katılarak tanımlanmıştır. Modelde, ısı transferi ise katı içerisinde iletim, serbest konveksiyon ve ayrıca ışıma yolu ile olacak şekilde tanımlanmıştır. Dış ortam ile serbest konveksiyon yoluyla ısı iletimi geometrik modelin tüm dış yüzeyleri aracılığı ile ele alınmıştır.

4.5 Katı Mekanik Modülü

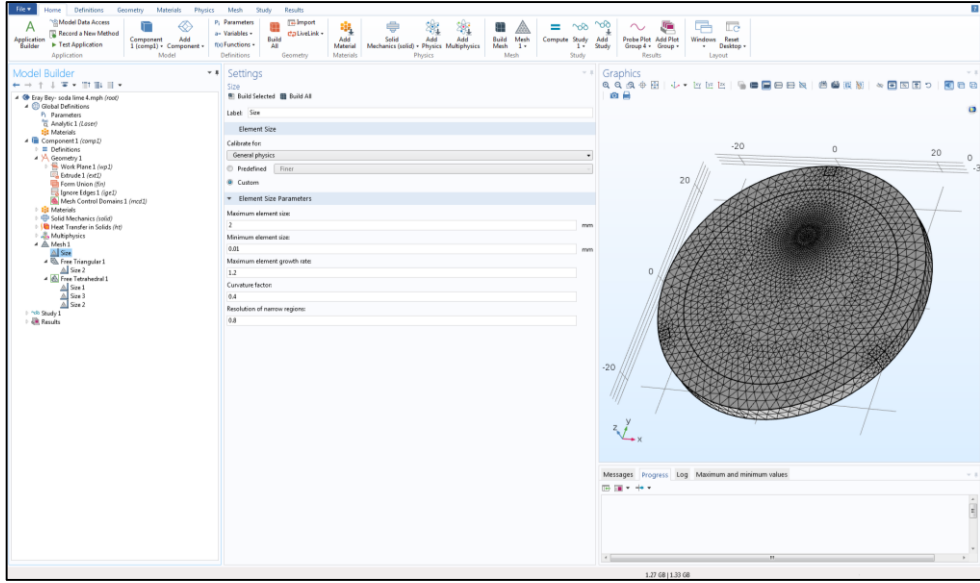
Çalışmadaki optiklerin mekanik yapısı, tutucu ile fiziksel bağlantı noktaları ve modelin sınır şartları bu kısımda tanımlanmıştır. Silindirik geometriye sahip optikler kenarlarından üç noktadan tutucu ile tutulmuştur. Mekanik yapı olarak ise doğrusal elastik malzeme olarak tanımlanmışlardır. Çalışmada ayrıca yerçekimi ve tutucunun yaylı yapısı da hesaplamalarda ele alınmıştır.



Şekil 4.7: COMSOL Multiphysics Katı Mekanik Arayüzü.

4.6 Örgü Yapısı

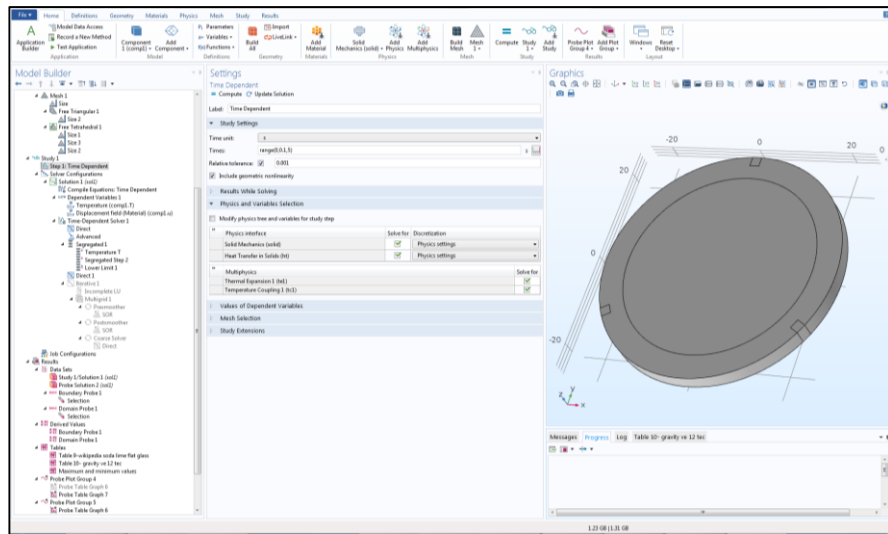
Sonlu eleman analizi yönteminde, modellenen problemlere çözüm, tüm modelin sonlu sayıda küçük parçalara ayrılması ve ayrılan bu parçaların çözümleri ile gerçekleştirilmektedir. Örgü modeli bütün bir yapıya sahip katı modelin küçük parçalara ayrılması ve her bir küçük parçanın çözülmesi ve birbiri ile olan etkileşimini sağlamaktadır. Çalışmada uygulanan örgü modelinin parametreleri Şekilde verilmiştir. Bu modelde lazerin etki ettiği (bozulmaların gözleneceği) ve tutucu temasının olduğu alanlarda oldukça küçük eleman boyutlu örgü yapısı tercih edilmişken, etkileşimin daha az olduğu, lazer etkisi sonucu ısı transferinin bozulmaya sebep olmayacağı bölgelerde ise daha kaba bir örgü modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.8: COMSOL Multiphysics Örgü Yapısı Arayüzü.

4.7 Çözümleme

Tanımlanan modelin çözülmesi uygulanan tanımlar, sınır şartları dahilinde zamana bağlı sayısal öteleme ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme süresi deneysel düzeneğe uygun olarak 5sn-10sn-20sn, çözüm adım süreleri ise yakınsamaya bağlı olarak yazılım kontrolünde ve her 100ms de bir çözüm kaydedecek şekilde uygulanmıştır (Şekil 4.11).



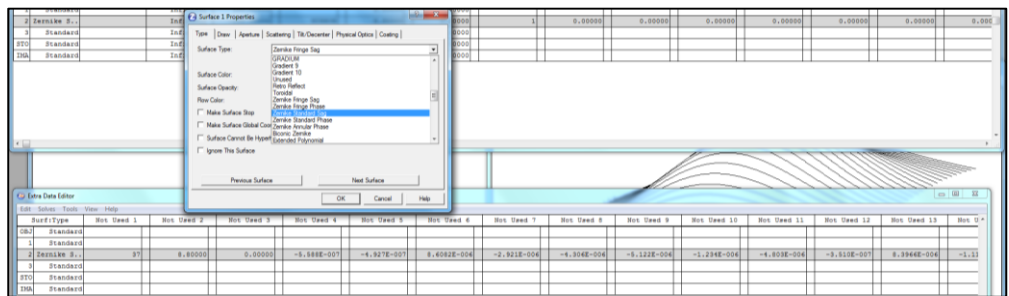
Şekil 4.9: COMSOL Multiphysics Çözümleme Arayüzü.

4.8 Zernike Polinom Katsayıları Hesaplama

Comsol Multiphysics programında koşturulan model sonucu ortaya çıkan deformasyonlar, örgü yapısı sonucu ortaya çıkan her bir noktanın x, y ve z koordinatlarının herbirinde ne kadar saptığı hesaplanarak bir dosyaya kaydedilir. Bu saptmalar bölüm 2.4'de anlatılan matematiksel yöntem uygulanarak her bir noktanın yüzey dikine sapma miktarı hesaplanır. İlgili alanı dışından elde edilen verilen çıkarılarak yüzey çapına göre normalizasyon uygulanır. Ardından elde edilen noktanın koordinatları polar koordinat sistemine çevirilmiştir ve elde edilen açı ile yarıçap değerleri ile uyumlu Zernike polinomuna eşleme yapılmıştır. Son olarak her bir polinomun katsayısı hesaplanıp elde edilen katsayılar Zemax yazılımının kabul edeceği sıralama ile çıktı olarak alınmıştır.

4.9 Optik Analiz

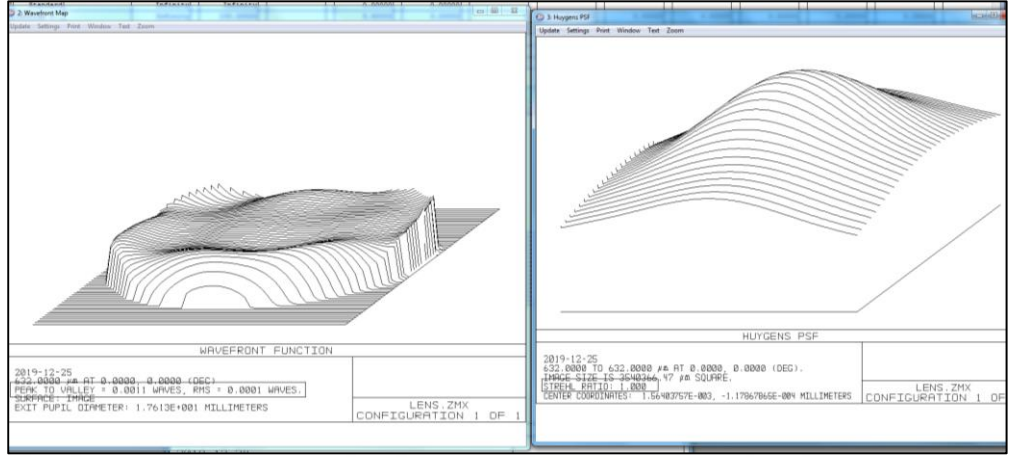
Benzetim modeli sonucu elde edilen Zernike polinomları katsayıları, Zemax optik tasarım ve analiz yazılımına girdi olarak tanımlanmıştır. Zemax yazılımında bir yüzey tanımlamanın çeşitli yolları varken çalışmada bozulmuş bir yüzey tanımlama amaçlı Standart Zernike Sag yüzey tipi tanımı seçilmiş ve daha önce hesaplanan katsayılar burada girilerek istenen yüzey tanımlanmıştır (Şekil 4-10).



Şekil 4.10: Zemax Yüzey Tanımlama Arayüzü.

Yüzey tanımlanmasının ardından deneysel düzeneğe uygun olarak geliş açısı, ölçüm lazeri dalgaboyu (632nm) ve yine ölçüm lazeri hüzmeye çapı (1mm) alınarak yüzeyden yansıyan lazerin dalgacephesi analiz edilmiş ve RMS değeri ve Strehl Oranı hesaplanmıştır (Şekil4-11). Ayrıca yeni oluşan dalgacephesinin Zernike

polinomları da hesaplanıp hangi polinomun baskın olduğu incelenmiş ve elde edilen bozulmaların hangi hatalara sebep olduğu incelenmiştir.



Şekil 4.11: Zemax Optik Analizler Arayüzü.

5. SONUÇLAR

Çalışmada modelleme ve deneysel doğrulama çalışmaları beraber yürütülmüş ve benzetim modeli, deneysel çalışmalarda ele alınan malzeme özellikleri, uygulanan lazer güçleri/süreleri ve deney düzeneği göz önüne alınarak eşdeğer tanımlamalar uygulanarak modellenmiştir.

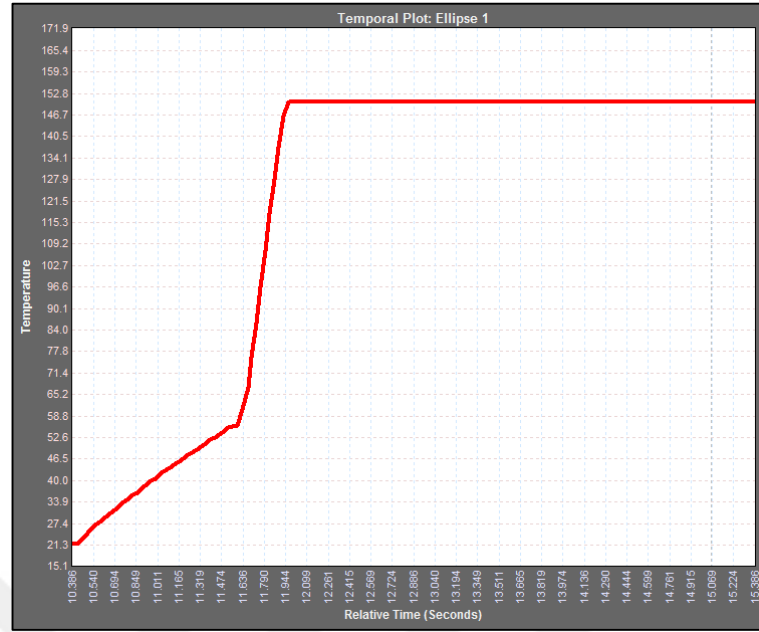
Modelde, deneysel çalışmalarda ele alınan optiklere benzer boyutlarda geometriler tanımlanmıştır. Lazer hüzmesinin yönelimi ve soğurulması matematiksel fonksiyonlar olarak tanımlanmıştır ve deneysel çalışmalarda uygulanan güç ve süre ölçütlerine göre analizler koşturulmuştur. Benzetim modelinin çözümü sonucunda elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucu elde edilen veriler 3 ana kategoride incelenebilir. Bunlardan ikisi aynanın kırılma durumuna kadar giden veya hiçbir etkinin gözlenmediği uç durumlar, üçüncü senaryo ise lazer gücüne ve çapına bağlı olarak küçük bozulmaların görüldüğü durumdur.

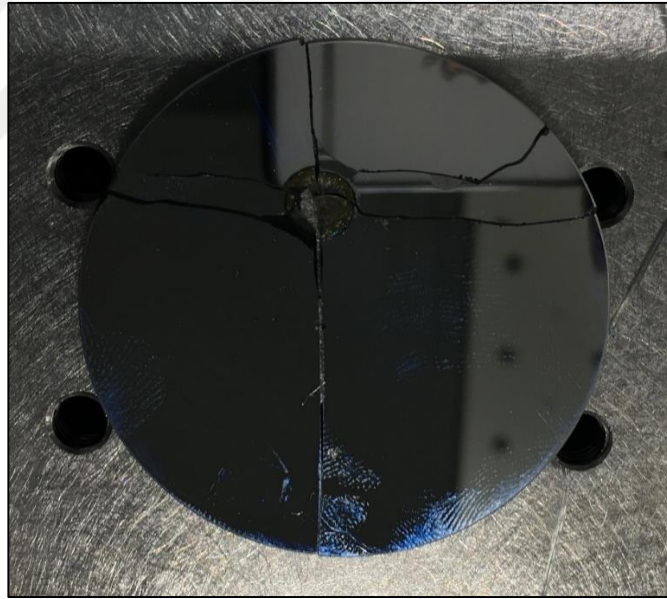
5.1 Soda Lime Çalışması

Çalışmanın bu kısmında firmaların rafında hazır olarak kolaylıkla bulunabilen standart kaplamalı sıradan ucuz bir alltaş olan Soda Lime ayna üzerinde deneysel ve analiz çalışmaları uygulanmıştır.

Deneysel düzenekte, yüksek güçlü lazere küçük açıyla konumlandırılan aynanın üzerine, merkezinden yaklaşık 1cm yukarıdan olacak şekilde lazer uygulanmıştır. Hüzme çapı 1cm olan lazerin gücü 400 Watt olarak ve 5sn sürekli ışımaya yapacak şekilde ayarlanmıştır. Sonuç olarak yaklaşık 2 saniye sonunda ayna yüzeyinin sıcaklığı termal kameranın maksimum okuma sıcaklığının üzerine (150 °C) çıkmış ve yaklaşık 4 sn süre sonunda dalgacephesi ölçümü alınmadan ayna kırılmıştır. Sıcaklık grafiği incelendiğinde kaplamanın dayanım eşiğine kadar ayna yüzeyinde yavaş bir ısınma söz konusuken kaplamanın dayanım eşiği aşıldıktan sonra kaplamanın zarar görmesi ile birlikte ayna yüzeyinin ısınması hızlanmıştır. Kısa sürede yüksek sıcaklıklara ulaşan ayna lazerin etki ettiği bölgeden kırılmıştır ve tutucu mekaniğinin temas ettiği bölgelere doğru kırılma ilerlemiştir (Şekil 5.3).



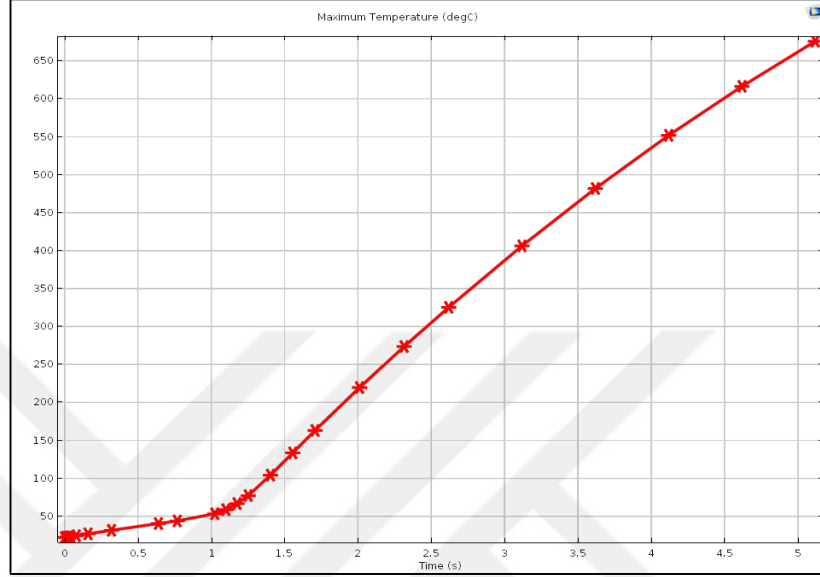
Şekil 5.1: Soda Lime Deneysel Sıcaklık Ölçüm Sonucu.



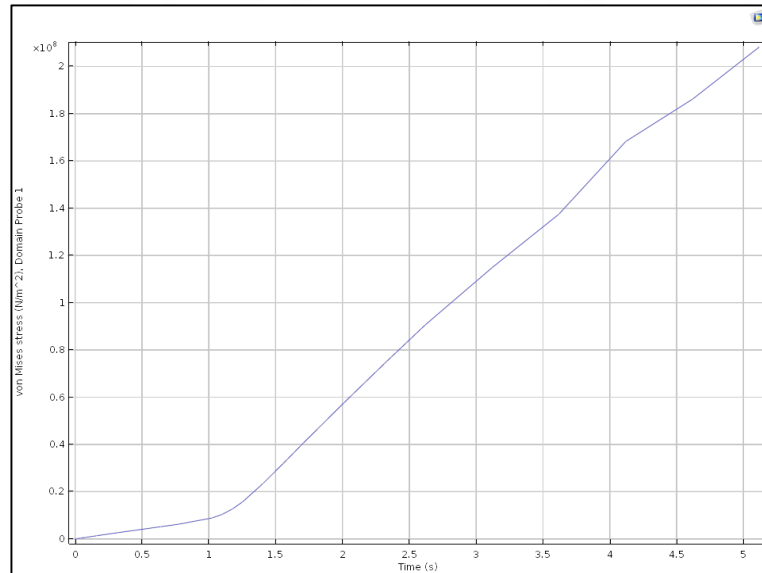
Şekil 5.2: Soda Lime Lazer Etkisi Sonucu Kırılma.

Analiz çalışmasında deneysel düzenekte kullanılan senaryo birebir tanımlanmış ve soda lime camının malzeme özellikleri ve geometrisi ile birlikte 5sn süreli zamana bağlı çözüm koşturulmuştur. Analiz sonucunda da dayanım eşiği tanımlanan kaplamanın bozulmasının ardından ısınma hızlanmış ve 5 saniye sonunda ayna yüzeyi yaklaşık 650 °C'ye ulaşmıştır. Oluşan ısıl yük sebebiyle ayna yüzeyinde

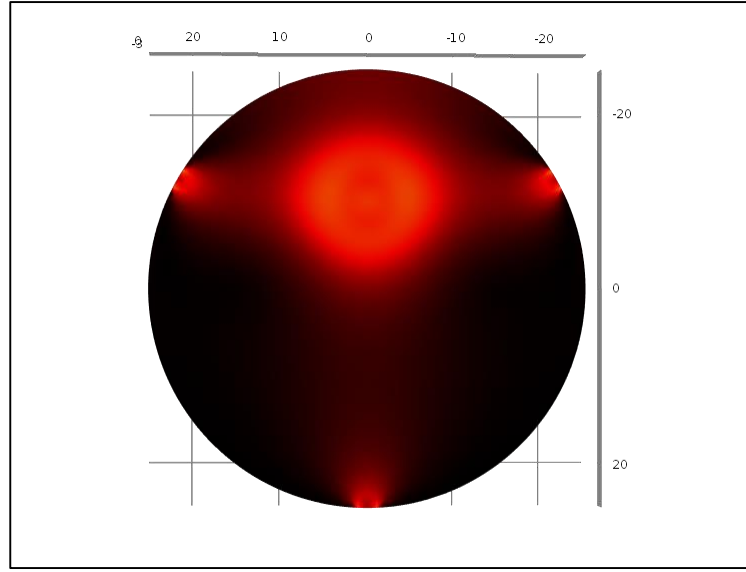
lazerin temas ettiği bölgede gerinim değeri oldukça yükselerek yaklaşık 3,5 saniye sonunda malzemenin gerinim dayanım eğiği olan 100MPa değeri ağarak kırılma olacağı sonucuna varılmıştır. Yine sonuçlarda elde edilen gerilim profili incelendiğinde kırılmanın tutucu temas yüzeylerine doğru ilerleyeceği tahmin edilmiştir.



şekil 5.3: Soda Lime Analiz Sıcaklık Grafiği.



şekil 5.4: Soda Lime Analiz Sonucu Gerilim Grafiği.



Şekil 5.5: Soda Lime Analiz Sonucu Gerilim Profili.

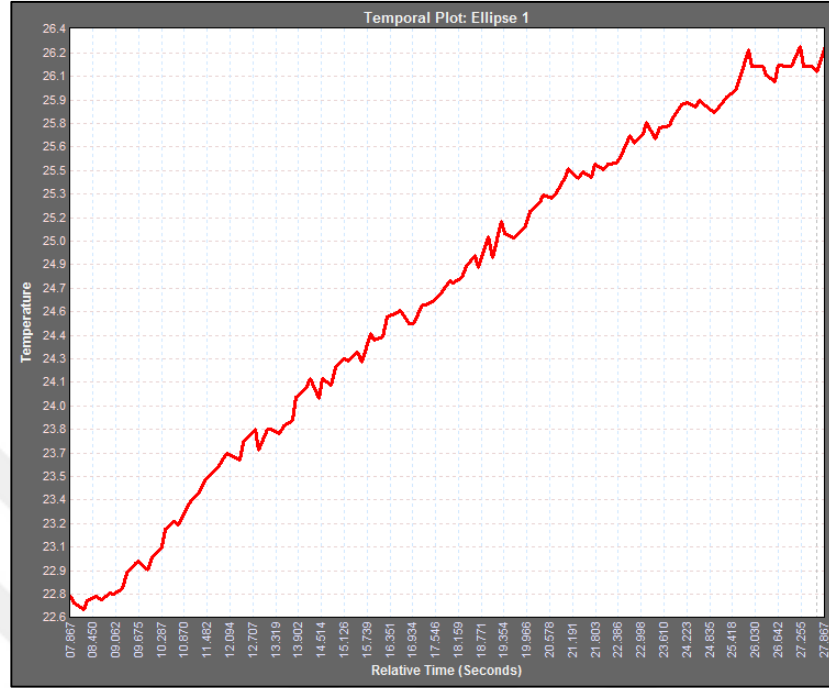
Deney sonucunda ayna kırılması ile birlikte dalgacephesi ölçümü alınmadığı için analiz çalışmasında da Zernike eşleştirme ve optik analiz bölümlerine devam edilmemiştir.

5.2 Zerodur, Fused Silica Çalışması

Çalışmanın bu kısmında düşük hacimsel ısı genleşme katsayıları sebebiyle lazer uygulamalarında sıklıkla kullanılan Fused Silica ve Zerodur alttaşlar üzerine, yüksek güçlü lazer dalgaboyunda oldukça yüksek yansıtma değerine sahip kaplamalar uygulanmış aynalar ele alınmıştır.

Deneysel düzenekte, ilk olarak aynaların ilk durumdaki (üretimden kaynaklı) dalgacephesi hataları görmezden gelinerek ilk hali referans alınmış ve RMS dalgacephesi 0 olarak ölçülerek kaydedilmiştir. Ardından yüksek güçlü lazer küçük açılarla konumlandırılan aynanın merkezine uygulanmıştır. Hüzme çapı 1cm olan lazerin gücü 400-1000Watt olarak ve 5sn-20sn sürekli ışımaya yapacak şekilde ayarlanmıştır. Sonuç olarak denenen her durum için iki aynada da çok düşük (maksimum 4-5⁰C) sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Eş zamanlı olarak alınan dalgacephesi ölçümlerinde ise düşük sıcaklık değişiminden kaynaklı olarak beklendiği gibi bir değişim gözlenmemiştir veya dalgacephesi sensörünün ölçüm hassasiyetinin altında kalacak kadar küçük değişimler gözlenmiştir. Şekil 5-8'de

görüleceği gibi yaklaşık 1mm çaplı ölçüm lazerinden alınan sonuçlara göre, RMS Dalgacephesi hatası değeri 0.005 iken Strehl Oranı 0.998 olarak ölçülmüştür.

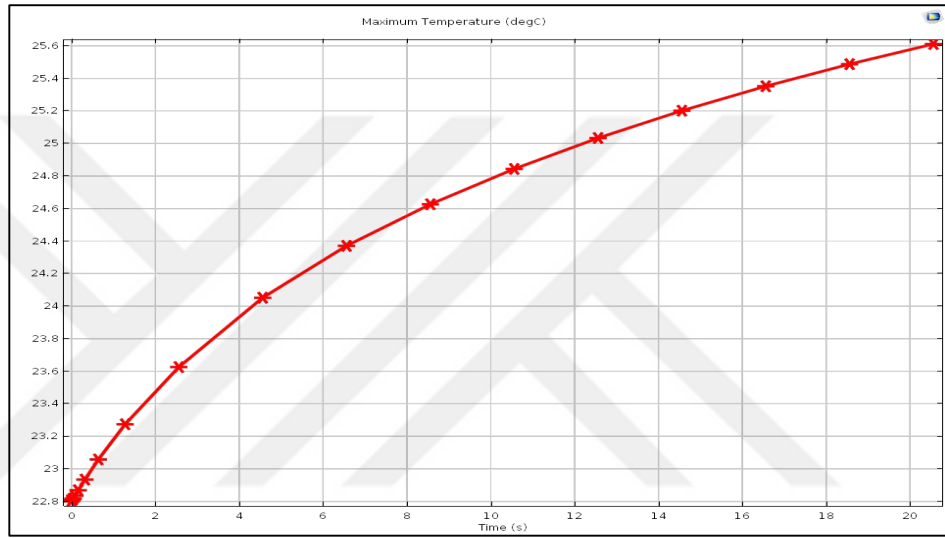


Şekil 5.6: Zerodur 1kw 20sn Termal Grafik.

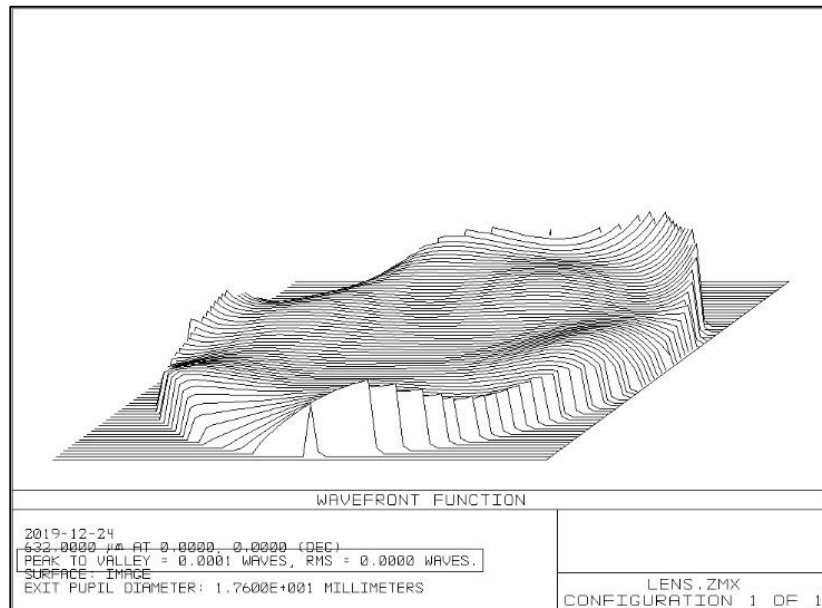
```
<PhasicsData xmlns="http://www.phasics.com/PhasicsData.xsd">
  <DocumentProperties>
  <UserProfileProperties>
  <SavedFiles>
  <DataInfo>
  <Data>
    <DataType>Phase</DataType>
    <Index />
    <Label>PTV Phase</Label>
    <Value>0.028</Value>
  </Data>
  <Data>
    <DataType>Phase</DataType>
    <Index />
    <Label>RMS Phase</Label>
    <Value>0.005</Value>
  </Data>
  <DataInfo>
  <Data>
  <DataInfo>
  <Data>
  <Data>
  <Data>
  <Data>
  <DataInfo>
  <Data>
  <DataInfo>
  <Data>
  <DataInfo>
  <Data>
    <DataType>FarField</DataType>
    <Index />
    <Label>Strehl ratio</Label>
    <Value>0.998</Value>
  </Data>
  <DataInfo>
  <Data>
  <Data>
  <Data>
  <Data>
    <DataType>Projection</DataType>
    <Index />
    <Label>PupilSize (mm)</Label>
    <Value>8.806E-1</Value>
  </Data>
</PhasicsData>
```

Şekil 5.7: Zerodur 1kw 20sn Dalgacephesi Ölçüm Sonucu.

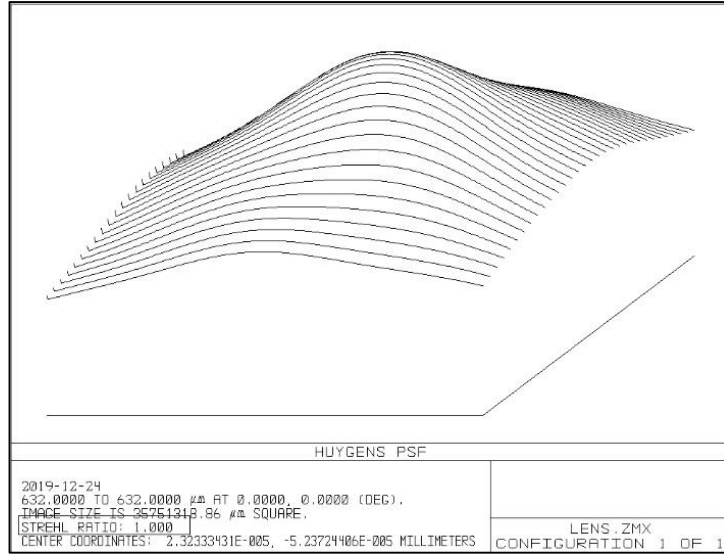
Analiz çalışmasında deneysel düzenekte kullanılan senaryo birebir tanımlanmış ve Zerodur/Fused Silica camlarının malzeme özellikleri ve geometrisi ile birlikte 5-20sn süreli zamana bağlı çözüm koşturulmuştur. Analiz sonucunda da oldukça düşük sıcaklık değişimi değerleri elde edilmiştir. Oluşan küçük ısıl yükler sebebiyle ayna yüzeyinde lazerin temas ettiği bölgede gerinim değeri oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Ardından elde edilen deformasyon verileri işlenerek optik analiz çalışmasına geçilmiş ve deneysel verilerde elde edildiği gibi ölçülebilir dalgacephesi bozulmaları görülmemiştir.



Şekil 5.8: Zerodur 1kw 20sn Analiz Sonucu Termal Grafik.



Şekil 5.9: Zerodur 1kw 20sn Optik Analiz Sonucu Dalgacephesi Hatası.



Şekil 5.10: Zerodur 1kw 20sn Optik Analiz Sonucu Strehl Oranı.

Her iki ayna için farklı deney senaryoları için yapılan analizler ile çıkan sonuçların karşılaştırılması aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.1: Zerodur Ayna Deney Senaryoları ve Analiz Sonuçları.

ZERODUR AYNA							
Lazer Gücü	Süre	ΔT Deney	ΔT Analiz	Dalgacephesi Hatası Deney	Dalgacephesi Hatası Analiz	Strehl Oranı Deney	Strehl Oranı Analiz
400W	5sn	0.3°C	0.5°C	0.003 λ	0.0001 λ	0.999	1
400W	10sn	0.6°C	0.8°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.999	1
400W	20sn	1.1°C	1.1°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.999	1
750W	5sn	0.8°C	0.9°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.999	1
750W	10sn	1.5°C	1.5°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.998	1
750W	20sn	2.8°C	1.9°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.999	1
1000W	5sn	1.0°C	1.3°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.998	1
1000W	10sn	1.85°C	2.0°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.998	1
1000W	20sn	3.3°C	2.8°C	0.005 λ	0.0001 λ	0.998	1

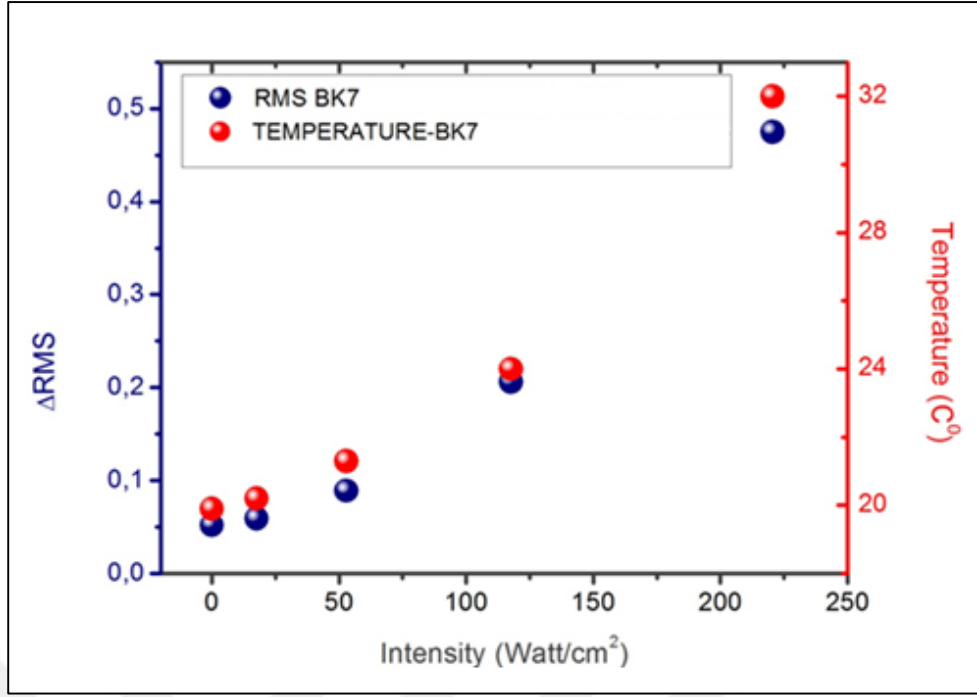
Tablo 5.2: Fused Silica Ayna Deney Senaryoları ve Analiz Sonuçları.

FUSED SILICA AYNA							
Lazer Gücü	Süre	ΔT Deney	ΔT Analiz	Dalgacephesi Hatası Deney	Dalgacephesi Hatası Analiz	Strehl Oranı Deney	Strehl Oranı Analiz
400W	5sn	0.55 ⁰ C	0.65 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
400W	10sn	1.0 ⁰ C	1.09 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
400W	20sn	1.5 ⁰ C	1.43 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
750W	5sn	0.8 ⁰ C	1.2 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
750W	10sn	2.0 ⁰ C	1.9 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
750W	20sn	3.5 ⁰ C	2.6 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
1000W	5sn	1.5 ⁰ C	2.0 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
1000W	10sn	2.8 ⁰ C	3.0 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1
1000W	20sn	4.7 ⁰ C	3.9 ⁰ C	0.002 λ	0.0001 λ	1	1

5.3 BK7 Çalışması

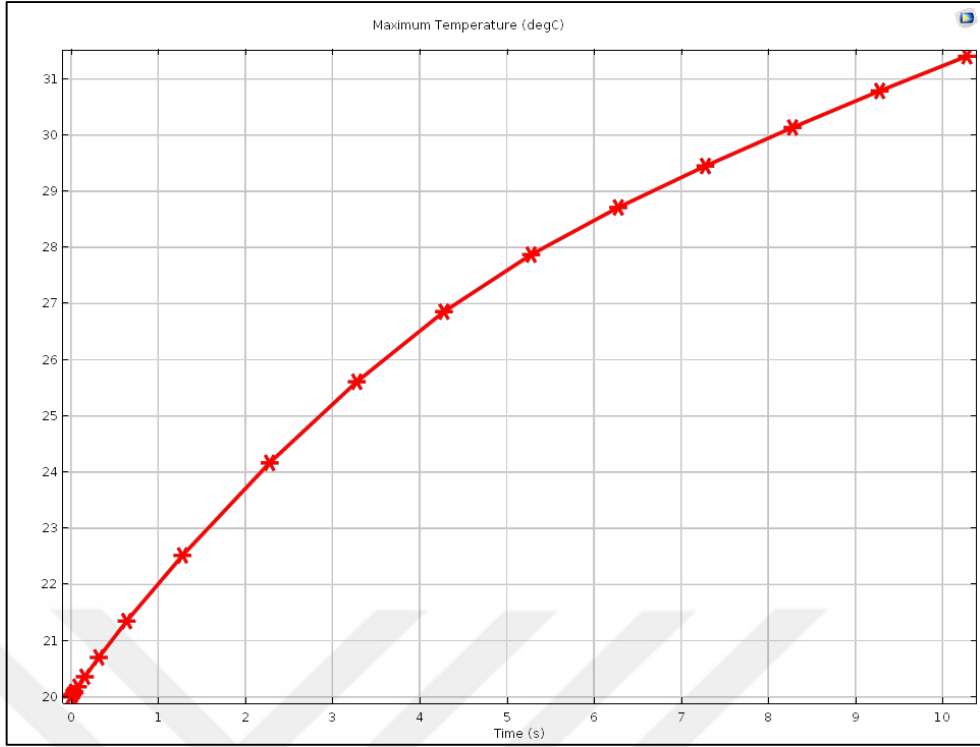
Çalışmanın bu kısmında yine firmaların raflarında hazır rahatlıkla bulunabilen ucuz bir alttaş olan BK7 camının üzerine, yüksek güçlü lazerin dalgaboyunda oldukça yüksek yansıtma değerine sahip bir kaplama uygulanmış aynalar ele alınmıştır. Aynı alttaş malzemesine benzer kaplamaların uygulandığı iki farklı kalınlıktaki aynalar test edilerek karşılaştırılmıştır.

Deneyisel düzenekte, yine ilk olarak aynaların ilk durumdaki (üretimden kaynaklı) dalgacephesi hataları görmezden gelinerek ilk hali referans alınmış ve RMS dalgacephesi 0 olarak ölçülerek kaydedilmiştir. Ardından yüksek güçlü lazer küçük açılarla konumlandırılan aynanın merkezine uygulanmıştır. Hüzme çapı 1cm olan lazerin gücü 10-80Watt olarak ve 10sn sürekli ışımaya yapacak şekilde ayarlanmıştır. Sonuç olarak denenen her durum için iki aynada da kayda değer sıcaklık değişimleri gözlenmiştir. Eş zamanlı olarak alınan dalgacephesi ölçümlerinde ise bu sıcaklık değişimlerinden kaynaklı olarak küçük değişimler gözlenmemiştir. Aşağıdaki şekillerde her iki ayna için farklı lazer güç yoğunlukları için elde edilen sıcaklık ve dalgacephesi hatası değişimleri görülebilmektedir.

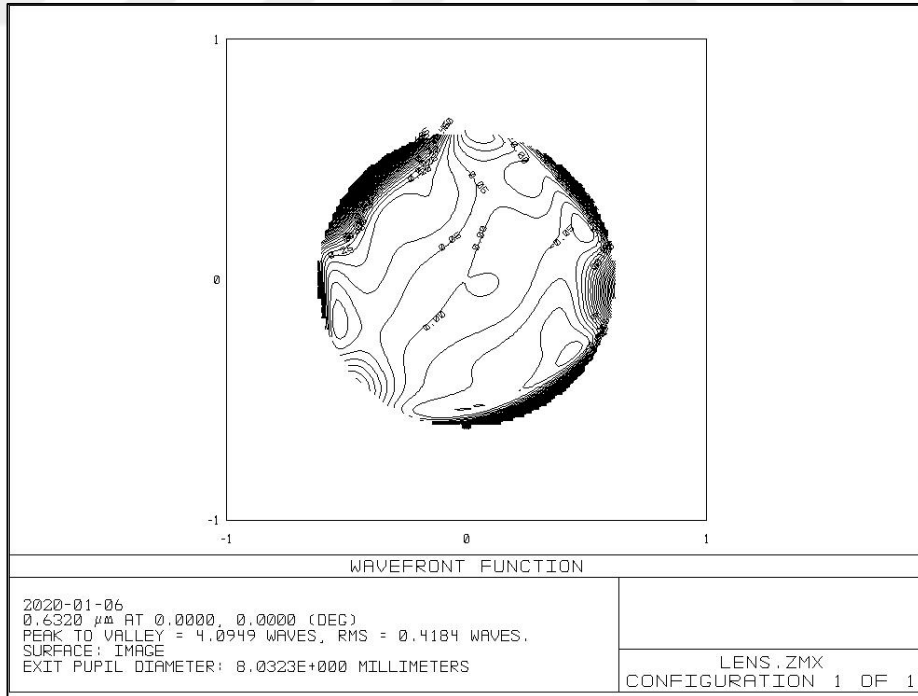


Şekil 5.11: BK7 Altaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Deneysel Sonuçları.

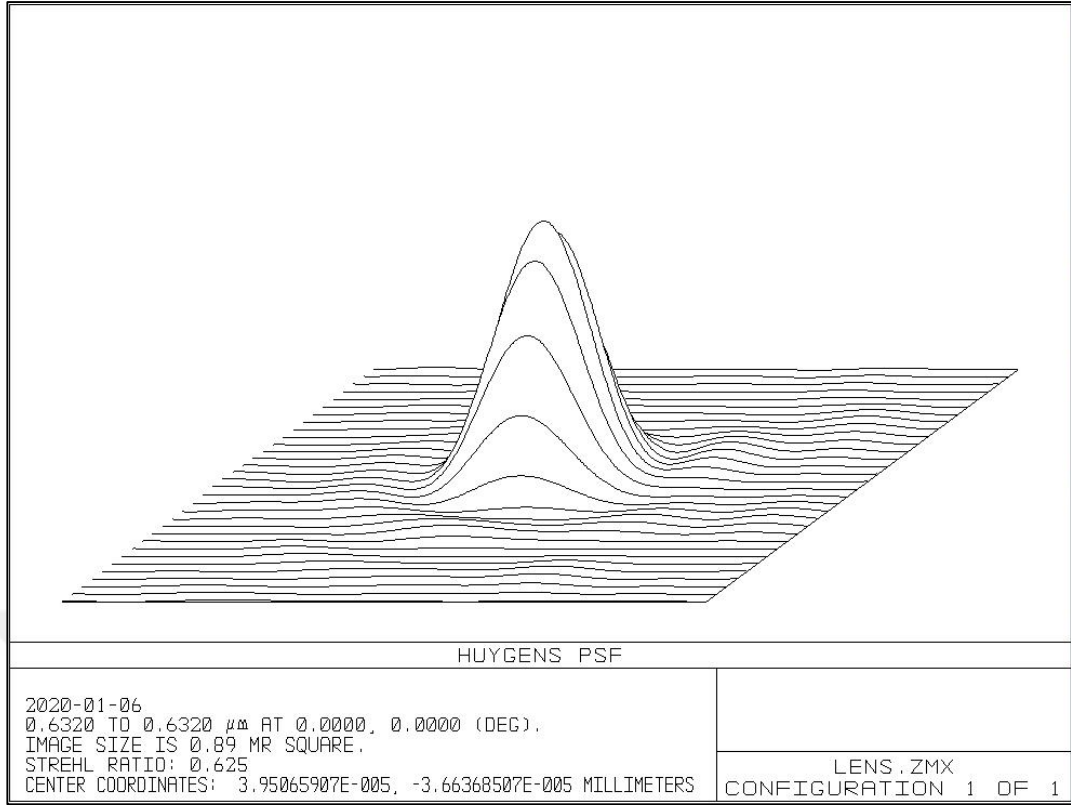
Analiz çalışmasında deneysel düzenekte kullanılan senaryo birebir tanımlanmış ve BK7 camının malzeme özellikleri ve geometrisi ile birlikte 10sn süreli zamana bağlı çözüm koşturulmuştur. Analiz sonucunda da deneysel değerlere yakın sıcaklık değişimi değerleri elde edilmiştir. Oluşan ısı yükleri sebebiyle ayna yüzeyinde lazerin temas ettiği bölgede gerinim değeri dalgaçephesini değiştirebilecek seviyelerde gözlenmiştir. Ardından elde edilen deformasyon verileri işlenerek optik analiz çalışmasına geçilmiş ve deneysel verilerde elde edildiği gibi kayda değer dalgaçephesi bozulmaları görülmüştür. Aşağıdaki şekillerde en fazla dalgaçephesi bozulması görülen durumun analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.12: BK7 Altaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Analiz Sonucu Isıl Grafik.



Şekil 5.13: BK7 Altaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Analiz Sonucu Dalgacephesi.



Şekil 5.14: BK7 Alttaş %89.6 Yansıtıcı Ayna Analiz Sonucu Strehl Oranı.

Aşağıdaki tabloda BK7 alttaşı için elde edilen deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının karşılaştırması görülebilmektedir.

Tablo 5.3: BK7 Ayna Deneysel Senaryoları ve Analiz Sonuçları.

BK7 AYNA							
Lazer Güç Yoğunluğu	Süre	ΔT Deneysel	ΔT Analiz	Dalgacephesi Hatası Deneysel	Dalgacephesi Hatası Analiz	Strehl Oranı Deneysel	Strehl Oranı Analiz
20W/cm ²	10sn	0.7°C	0.8°C	0.04 λ	0.03 λ	0.965	0.944
55W/cm ²	10sn	1.7°C	1.5°C	0.09 λ	0.06 λ	0.868	0.881
125W/cm ²	10sn	4.2°C	5.2°C	0.22 λ	0.25 λ	0.704	0.697
220W/cm ²	10sn	12°C	11.5°C	0.46 λ	0.42 λ	0.616	0.625

6. YORUMLAR

Yapılan çalışmalarda lazer-optik etkileşimi incelenmiş, benzetim modeli oluşturulmuş, çeşitli özellik ve boyutlarda optikler üzerinde performans incelemesi yapılmıştır. Lazerin optik elemanların üzerinde oluşturduğu etki konusunda belirleyici unsurlar olan soğurulan lazer gücü miktarı, hammadde kalınlığı ve özellikleri ve lazerin uygulandığı süre arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Lazer-Optik etkileşiminin iki uç örneği incelenmiştir. İlk örnekte lazer uygulamalarında kullanıma uygun olmayan Soda-Lime camı üzerinde standart kaplama ile denenmiştir. Deneysel çalışmalarda ve analiz çalışmalarında elde edilen sonuçlara bakıldığında kaplamanın dayanım eşiğine ulaşmaya kadar kaplamanın 14/100 soğurma değeri sebebiyle yavaş bir ısınma gözükürken dayanım eşiği aşıldıktan sonra hammaddenin 30/100 soğurma oranı sebebiyle daha hızlı bir ısınma gözlenmiştir. Deneysel sonuçlarda ısı kameranın ölçüm sınırı olan 150⁰C'nin üzerine çıktığı gözlemlenen sıcaklık değeri analiz sonucu 5 saniye sonunda yaklaşık 650⁰C' ye çıktığı görülmüştür. Bu ısınmanın sonucu optik yüzeyinde oluşan gerilim malzemenin dayanım eşiği olan 100MPa değerini aştığı için kırılma gözlemlenmiştir. İkinci örnekte ise lazer uygulamalarında sıklıkla kullanılan iki cam türü olan Zerodur ve Fused Silica malzemeleri üzerlerinde oldukça yüksek yansıtma oranına sahip kaplamalar ile incelenmiştir. Ayna yüzeylerinde bulunan kaplamaların yansıtma değerleri çok yüksek (Zerodur için 99.65/100 Fused Silica için 99.9/100) olduğu için soğurma oranları çok düşüktür. Bu sebeple her iki ayna da uygulanan yüksek lazer güçlerine rağmen en fazla 3-4⁰C'lik ısınma değerlerine ulaşmışlardır. Bu kadar düşük sıcaklık farkları sebebiyle her iki aynada da dalgacephesi sensörünün ölçüm hassasiyetinin yetersiz kalacağı seviyede düşük bozulmalar meydana gelmiştir.

Başka bir örnekte ise yine lazer uygulamalarında kullanımı tercih edilmeyen bir cam türü olan BK7 üzerinde kısmen yüksek yansıtma değerine sahip (89.6/100) kaplama ile incelenmiştir. Ayna üzerine farklı güç yoğunluğunda lazerler (20-220W/cm²) 10 saniye süre ile uygulanmış ve ölçümler alınmıştır. Bu çalışmada lazer güç yoğunluğu arttıkça performans düşüşü net olarak gözlemlenmiştir. Özellikle 50W/cm² güç yoğunluğunun aşıldığı durumların sonucunda performansın kırınım limitinden yüksek olduğu yani optik performansı ciddi şekilde etkilediği görülmüştür.

KAYNAKLAR

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), 2429 - 2437.

Doyle K., Genberg V., Michels G., (2002a), "Numerical methods to compute optical errors due to stress birefringence", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 57, 2429-2437.

Doyle K., Genberg V., & Michels G. J., (2002b), "Integrated Optomechanical Analysis", 2nd Edition, SPIE PRESS.

Genberg V., Michels G., Doyle K., (2002c), "Making Mechanical FEA Results Useful in Optical Desing", Proc. SPIE, 4769, 24-33.

Khan, Salahuddin & Chari, Rama, Jayabalan & Pal, Suparna & Sharma, Tarun & Sagar A. & Ansari M., Kush, Pradeep, (2012), "Origin of Periodic Modulations in the Transient Reflectivity Signal at Cryogenic Temperatures", Doktora Tezi, Cornell University.

Koyuncu B. ve Kocabasoglu P., (2012), "Identification of Corneal Aberrations by using Computer Techniques", International Journal of Computer Engineering Science (IJCES), 2 (3), 9-16.

Lakshminarayanan, Vasudevan & Fleck, Andre, (2011), "Zernike polynomials: A guide", Journal of Modern Optics, 58, 1678-1678.

Malyshev A. Yu., Bityurin N. M., (2006), "Laser Swelling of Polymer-like Materials by Nanosecond Pulses: Modeling", Proc. SPIE, 61610G, 1-8.

McAlinden, C., McCartney M., and Moore J., (2011), "Mathematics of Zernike Polynomials: A Review", Clinical And Experimental Ophthalmology, 39(8), 820-827.

Mensah F., (2009), "Lidar Techniques and Remote Sensing in the Atmosphere: Understanding the use of laser light in the atmosphere", First Edition, Author House.

Orazio S., (2010), "Principles of Lasers", 5th Edition, Springer.

Oliveira C. M., Ferreira A., ve 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.

Shaw, Joseph & Vollmer, Michael, (2017), "Blue sun reflected from water", Proc. SPIE, 10452B, 1-9.

Tresansky A.C., Joyce P., Radice J., ve Watkins J., (2014), “Numerical Modeling of High-Energy Laser Effects in Polymer and Composite Materials”, Journal of Directed Energy, 5, 137–158.

Web 1, (2016), <http://cdn.comsol.com/documentation/5.2.1.152/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>, (Eriřim Tarihi: 24/07/2019).

Web 2, (2020), <https://www.britannica.com/science/light/images-videos>, (Eriřim Tarihi: 03/02/2020).

Web 3, (2017), https://www.researchgate.net/publication/322011863_Integrated_Optomechanical_STOP_Analysis_linking_ABAQUS_to_Zemax_CODEV_and_OS_LO_with_SigFit, (Eriřim Tarihi: 15/07/2019).

Web 4, (2017), https://www.researchgate.net/publication/324279756_Laser_and_its_applications, (Eriřim Tarihi: 20/09/2019).

Wojtanowski, Jacek, Zygmunt, Marek, Traczyk, Maciej, Mierczyk Z., & Jakubaszek, (2014). “Beam forming optic aberrations’ impact on maximum range of semiconductor laser based rangefinders”, Opto-Electronics Review, 22, 152-161.

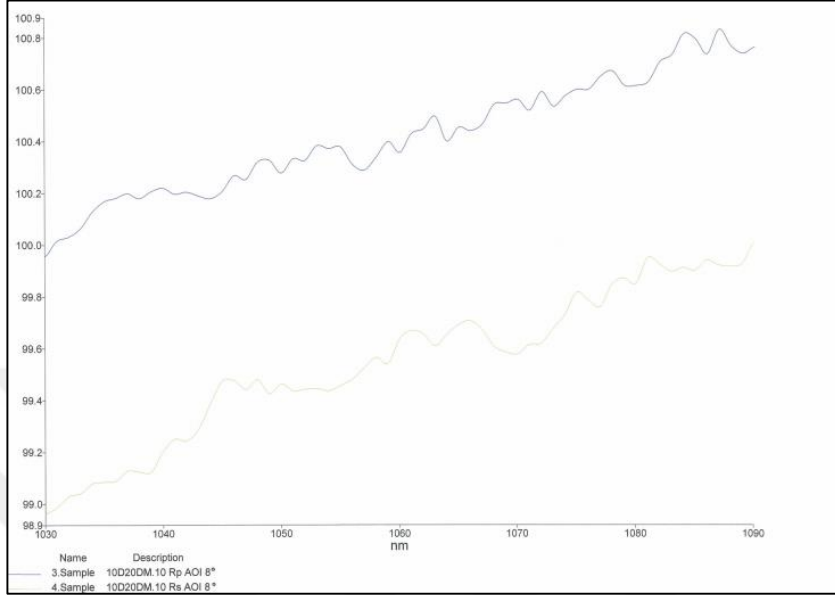
ÖZGEÇMİŞ

Eray ARPA 1991 yılında İstanbul'da doğdu. 2009 yılında başladığı Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü 2014 yılında başarıyla tamamlayarak 2018 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başladı. 2015-2020 yılları arasında TÜBİTAK BİLGEM'de Lazer/Elektrooptik konularında araştırmacı olarak çalıştı. Şuan TÜBİTAK UZAY'da optik sistemler ve üretim konularında uzman araştırmacı olarak çalışmaktadır.

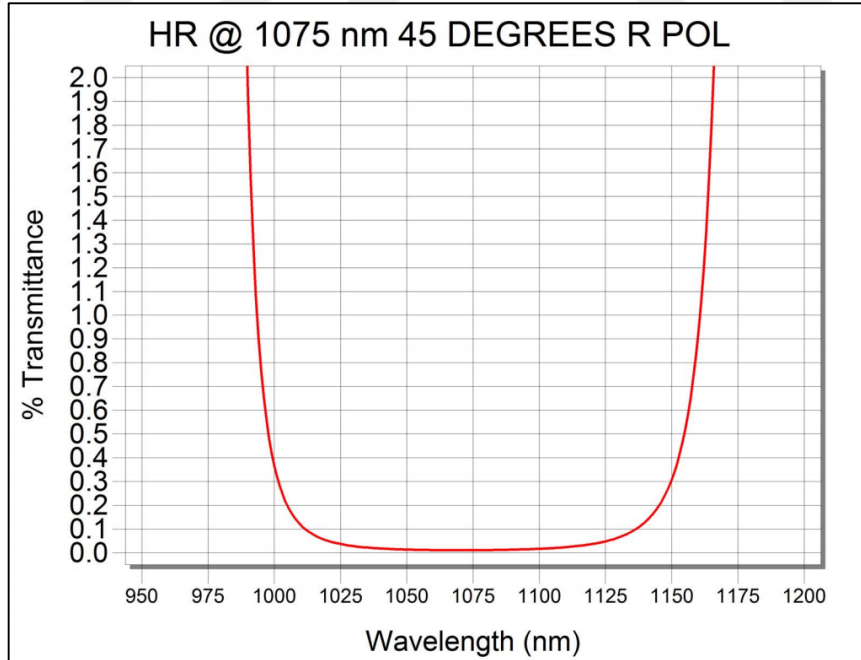


EKLER

Ek A: Optiklerin Yansıtma Grafikleri



Şekil A1.1: Zerodur Örnek Yansıtma Grafiği.



Şekil A1.2: Fused Silica Örnek Geçirgenlik Grafiği.