



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

TEZİN ADI

**FARKLI KESİTLER VE KESİT TİTREŞİMLERİ İÇİN OPTİKSEL
KİRİNİM ANALİZİ
DOKTORA TEZİ**

GÜRKAN ÇELİK

Tez Danışmanı

PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2023



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**FARKLI KESİTLER VE KESİT TİTREŞİMLERİ İÇİN OPTİKSEL KIRINIM
ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

GÜRKAN ÇELİK

Tez Danışmanı
PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2023



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



GÜRKAN ÇELİK tarafından Prof. Dr. Mustafa KURT yönetiminde hazırlanan ve **30/01/2023** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Farklı Kesitler ve Kesit Titreşimleri için Optiksel Kırınım Analizi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Mustafa KURT

(Danışman)

Doç. Dr. Murat ERTÜRK

Doç. Dr. Necati KAYA

Prof. Dr. Emel Kilit DOĞAN

Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ

Tez No :

Tez Savunma Tarihi : 30/01/2023

.....
Doç. Dr. Yener PAZARCIK

Enstitü Müdürü

.././20..

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

(İmza)

Gürkan ÇELİK

(Tarih) .././20..

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, çalıŐmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Mustafa KURT'a, ayrıca Doç. Dr. Necati KAYA ve Doç. Dr. Murat ERTÜRK'e, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen Özlem ACAR'a, hayatımın her evresinde maddi-manevi bana destek olan başta ağabeyim Arif ÇELİK olmak üzere değerli aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.”

Gürkan ÇELİK
anakkale, Ocak 2023



ÖZET

FARKLI KESİTLER VE KESİT TİTREŞİMLERİ İÇİN OPTİKSEL KIRINIM ANALİZİ

Gürkan ÇELİK

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İsim SOYİSMİ

30/01/2023, 95

Lazerin icadı ile birlikte optik metroloji tekniklerinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Bu teknikler ile alan, hacim, uzunluk gibi birçok niceliğin ölçümü hassas bir şekilde yapılabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında kırınım yöntemleri, boyutsal metrolojinin gelişimine büyük katkılar sağlamıştır. Kırınım yöntemleri, mikrometre altı titreşim ölçümlerinde hassasiyetin artırılması için yüksek potansiyele sahip ve oldukça yararlı yöntemlerin başında gelmektedir. Günümüzde metroloji alanında kırınım yöntemleri kullanılarak hassasiyet artırma çalışmaları yoğun ilgi görmektedir. Ancak dalga denkleminin spesifik çözümlerinin elde edilmesi konusunda hala sıkıntılar yaşanmaktadır. Dolayısıyla gelen ışının dalgaboyu, kenar pürüzlülüğü ve dalga modları için ayrıntılı matematiksel çözümler oldukça sınırlıdır. Literatürdeki bu eksiklikten yola çıkarak yapılan bu tez çalışması kapsamında Fresnel yaklaşımına farklı bir bakış açısı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu matematiksel yöntem kullanılarak farklı dalgaboyları, farklı kenar pürüzlülükleri ve farklı dalga modları için kırınım deseninin nasıl değiştiğine yönelik analizler yapılmıştır. Elde edilen teorik veriler deneysel verilerle karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Lazer Işını, Optik Kırınım, Fresnel Kırınımı, Dalgaboyu, Kenar Pürüzlülüğü

ABSTRACT

OPTICAL DIFFRACTION ANALYSIS FOR DIFFERENT SECTIONS AND CROSS-SECTIONAL VIBRATIONS

Gürkan ÇELİK

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Doctoral Dissertation in Physics

Advisor: Prof. Dr. Mustafa KURT

30/01/2023, 95

Regarding the invention of the laser, great advances were progressed in optical metrology techniques. Thanks to these techniques, many quantities such as area, volume, length are able to be measured precisely. In this respect, diffraction methods have made great contributions to the development of dimensional metrology. Diffraction methods are one of the most useful methods with high potential for increasing the sensitivity in submicrometer vibration measurements. Currently, sensitivity enhancement studies by using diffraction methods in the field of metrology attract great attention. However, there are still difficulties in obtaining specific solutions of the wave equation. Therefore, particular mathematical solutions for wavelength, edge roughness and wave modes of the incident beam are quite limited. Based on this absence in the literature, a different perspective on the Fresnel approach has been developed within the scope of this thesis. Using this developed mathematical method, analyzes were made on how the diffraction pattern changes for different wavelengths, different edge roughnesses and different wave modes. The obtained theoretical data were compared with the experimental data and the differences were revealed. The differences between the calculated and experimental data were indicated.

Keywords: Laser Beam, Optical Diffraction, Fresnel Diffraction, Wavelength, Edge Roughness

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

	1
1.1. Işık Nedir?	2
1.1.1. Sıradan Işığın Özellikleri	6
1.1.2. Lazer Işığının Özellikleri	7
1.2. Elektromanyetik Dalga Denklemleri	11
1.2.1. Elektrik Alanlar için Gauss Yasası	11
1.2.2. Manyetik Alanlar için Gauss Yasası	12
1.2.3. Faraday Yasası	12
1.2.4. Ampere-Maxwell Yasası	13
1.3. Poynting Vektörü	14
1.4. Süperpozisyon İlkesi	15

1.4.1. Girişim	16
1.4.2. Kırınım	17
1.5. Mikrometroloji	18
1.5.1. Konvansiyonel Yöntemler	19
Taramalı Prob Mikroskopisi (Scanning Probe Microscopy)	19
Elektron Mikroskopisi	22
X-Işını Mikroskopisi	26
1.5.2. Lazer ile Mikrometroloji	26
Konfokal Mikroskopi	27
Speckle (Benek) Mikroskopi	28

İKİNCİ BÖLÜM ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

31

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM MATERYAL VE YÖNTEM

35

3.1. Elektromanyetik Dalga Denkleminin Çözümü	35
3.2. Gauss ve Bessel Dalga Modları	37
3.3. Skaler Kırınım Teorisi	39
3.3.1. Fresnel Yaklaşımı	42
3.4. Deneysel Düzenek ve Deneyin Yapılışı	44

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM ARAŞTIRMA BULGULARI

51

4.1. Farklı d Mesafelerinin Kırınım Desenine Etkisi	51
4.2. Sabit Pürüzlülük Değerinde Farklı Dalgaboylarının Kırınım Desenine Etkisi	55
4.2.1. $\lambda=405$ nm Dalgaboyunda Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları	56
4.2.2. $\lambda=633$ nm Dalgaboyunda Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları	57
4.3. Sabit Dalgaboyu Değerinde Farklı Pürüzlülük Ölçümlerinin Kırınım Desenine Etkisi	60

4.3.1.	$\Lambda=0$ μm (Knife Edge) Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları	62
4.3.2.	$\Lambda=10$ μm Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları	63
4.3.3.	$\Lambda=30$ μm Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları	65
4.3.4.	$\Lambda=50$ μm Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları	66
4.4.	Bessel Dalga Modunda Elde Edilen Ölçümlerin Kırınım Desenine Etkisi	72
4.4.1.	Farklı d Mesafeleri için Kırınım Analiz Sonuçları	72
4.4.2.	$\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm Dalgaboyları için Kırınım Deseni Analiz Sonuçları	75
4.4.3.	$\Lambda=0$ μm (Knife Edge), $\Lambda=10$ μm , $\Lambda=30$ μm ve $\Lambda=50$ μm Pürüzlülük Boyutları için Kırınım Deseni Analiz Sonuçları	76
BEŞİNCİ BÖLÜM		83
SONUÇ ve ÖNERİLER		
5.1.	Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi	83
5.2.	Sonuç ve Öneriler	86
KAYNAKÇA		87
EKLER		I
ÖZGEÇMİŞ		XIV

SİMGELER VE KISALTMALAR

Laser	Lazer
EM	Elektromanyetik
m	Metre
s	Saniye
nm	Nanometre
E	Elektrik Alan
B	Manyetik Alan
h	Planck Sabiti
f	Frekans
UV	Ultraviyole
X-Ray	X-Işını
ρ_e	Elektriksel Yük Yoğunluğu
ϵ_0	Boş Uzayın Elektriksel Geçirgenliği
∇	Nabla Operatörü
μ_0	Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği
J	Elektrik Akım Yoğunluğu
S	Poynting Vektörü
k	Elektromanyetik Dalganın Yayılma Yönü
CCD	Yük Bağlı Sensör (Charged Coupled Device)
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken Sensör (Complimentary Metal Oxide Semiconductor)
t	Zaman
I	Güç Yoğunluğu
c	Işık Hızı
A	Elektrik Alan Genliği
ω	Frekans
q	Kompleks Işın Parametresi
φ	Manyetik Akı
J_n	n'inci Türden Bessel Fonksiyonu
π	Pi Sayısı
λ	Dalgaboyu

Λ	Pürüzlülük Boyutu
η_j	j'inci Dereceden Kırınım Verimliliği
SLM	Mekansal Işık Modülatörü (Spatial Light Modulator)
Hz	Hertz
μm	Mikrometre
SPM	Taramalı Tünelleme Mikroskopisi (Scanning Probe Microscopy)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi (Scanning Electron Microscopy)
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskopisi (Transmission Electron Microscopy)
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskopisi (Atomic Force Microscopy)



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Sık Kullanılan Lazer Çeşitleri ve Özellikleri	10
Tablo 2	Mikroskopi Çeşitleri ve Uygulamaları	29



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Elektromanyetik spektrum	3
Şekil 2	Elektromanyetik dalganın yapısı	7
Şekil 3	Absorpsiyon, kendiliğinden emisyon, uyarılmış emisyon	8
Şekil 4	Lazer sistemlerinin temel bileşenleri	8
Şekil 5	Lazerin çalışma prensibi	9
Şekil 6	Poynting vektörü ile elektromanyetik dalganın yayılım yönü	14
Şekil 7	Girişim olgusunun oluşumu	16
Şekil 8	Kırınım olgusunun oluşumu	18
Şekil 9	Taramalı tünelleme mikroskopunun yapısı	21
Şekil 10	Atomik kuvvet mikroskopunun çalışma prensibi	22
Şekil 11	Taramalı elektron mikroskopunun yapısı ve çalışma prensibi	23
Şekil 12	Transmisyon elektron mikroskopunun yapısı ve çalışma prensibi	25
Şekil 13	Konfokal mikroskopunun çalışma prensibi	27
Şekil 14	Speckle (Benek) mikroskopisi çalışma prensibi	28
Şekil 15	Kenar tarafından oluşturulan kırınım olgusunun şematik gösterimi	44
Şekil 16	He-Ne lazer	46
Şekil 17	SLM (Spatial light modulator)	47
Şekil 18	CMOS kamera sensörü	48
Şekil 19	Deney düzeneğinin şekilsel gösterimi	49
Şekil 20	Deney düzeneği	49
Şekil 21	SLM'e aktarılan engel pürüzlülük görüntüleri	50
Şekil 22	$d=10$ mm için kırınım deseni grafiği	52
Şekil 23	$d=30$ mm için kırınım deseni grafiği	52

Şekil 24	d=50 mm için kırınım deseni grafiği	53
Şekil 25	d=70 mm için kırınım deseni grafiği	53
Şekil 26	d=100 mm için kırınım deseni grafiği	54
Şekil 27	d=200 mm için kırınım deseni grafiği	54
Şekil 28	405 nm ve 633 nm dalgalı boylarında deney düzeneğinden elde edilen görüntüler	55
Şekil 29	Teorik analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm için kırınım deseni grafiği	56
Şekil 30	Deneysel analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm için kırınım deseni grafiği	57
Şekil 31	Teorik analizlerden elde edilen $\lambda=633$ nm için kırınım deseni grafiği	58
Şekil 32	Deneysel analizlerden elde edilen $\lambda=633$ nm için kırınım deseni grafiği	58
Şekil 33	Teorik analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm dalgalı boyları için kırınım desenlerinin karşılaştırılması	59
Şekil 34	Deneysel analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm dalgalı boyları için kırınım desenlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 35	Deney düzeneğinden elde edilen farklı pürüzlülükler için kırınım deseni görüntüleri	61
Şekil 36	Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=0$ μm engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	62
Şekil 37	Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=0$ μm engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	63
Şekil 38	Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=10$ μm engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	64
Şekil 39	Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=10$ μm engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	64
Şekil 40	Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=30$ μm engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	65
Şekil 41	Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=30$ μm engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	66

Şekil 42	Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	67
Şekil 43	Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği	67
Şekil 44	Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülükleri için kırınım desenlerinin karşılaştırılması	68
Şekil 45	Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülükleri için kırınım desenlerinin karşılaştırılması	69
Şekil 46	$50 \mu\text{m}$ ve $0 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı	70
Şekil 47	$50 \mu\text{m}$ ve $10 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı	70
Şekil 48	$50 \mu\text{m}$ ve $30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı	71
Şekil 49	$50 \mu\text{m}-0 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}-10 \mu\text{m}$ ve $50 \mu\text{m}-30 \mu\text{m}$ titreşim farklarının karşılaştırılması	71
Şekil 50	$d=10 \text{ mm}$ mesafesi için elde edilen kırınım deseni grafiği	72
Şekil 51	$d=20 \text{ mm}$ mesafesi için elde edilen kırınım deseni grafiği	73
Şekil 52	$d=40 \text{ mm}$ mesafesi için elde edilen kırınım deseni grafiği	73
Şekil 53	$D=50 \text{ mm}$ mesafesi için elde edilen kırınım deseni grafiği	74
Şekil 54	$d=70 \text{ mm}$ mesafesi için elde edilen kırınım deseni grafiği	74
Şekil 55	$\lambda=405 \text{ nm}$ dalgaboyu için elde edilen kırınım deseni	75
Şekil 56	$\lambda=633 \text{ nm}$ dalgaboyu için elde edilen kırınım deseni	76
Şekil 57	$\Lambda=0 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni grafiği	77
Şekil 58	$\Lambda=10 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni grafiği	77
Şekil 59	$\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni grafiği	78
Şekil 60	$\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni grafiği	79

Şekil 61	$\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülükleri için elde edilen kırınım desenlerinin karşılaştırılması	79
Şekil 62	$50 \mu\text{m}$ ve $0 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı	80
Şekil 63	$50 \mu\text{m}$ ve $10 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı	81
Şekil 64	$50 \mu\text{m}$ ve $30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı	81
Şekil 65	$50 \mu\text{m}-0 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}-10 \mu\text{m}$ ve $50 \mu\text{m}-30 \mu\text{m}$ titreşim farklarının karşılaştırılması	82



BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Işık kullanılarak cisimlerin şekil ve ebat gibi özelliklerinin belirlenmesi yüzyıllardır kullanılan bir yöntemdir. On yedinci yüzyılda ışığın yapısıyla ilgili kırınım ve girişim gibi olguların keşfi ile yeni yöntem ve teknikler geliştirilerek ışığın doğasının anlaşılması konusunda büyük katkı sağlanmıştır. Yirminci yüzyılın başlarında Einstein'ın lazerin kuramsal temellerini oluşturması ve 1960'lı yıllarda da lazerin keşfi ile özellikle mikrometre altı titreşim ölçümlerinde büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. Günümüzde kırınım yöntemleri kullanılarak mikrometre altı titreşim ölçümlerinde hassasiyetin artırılması için oldukça fazla çaba sarf edilmektedir. Klasik yöntemlerde karşılaşılan zorluklar, lazer mikrometrolojisinin gelişmesinde temel faktörlerden biri olmuştur. Ancak Fresnel ve Fraunhofer yaklaşımlarında dalga denkleminin spesifik çözümlerinin elde edilmesi konusunda hala sıkıntılar yaşanmaktadır. Bu nedenle literatürde kenar pürüzlülüğü, dalgaboyu ve farklı dalga modları gibi parametreler için ayrıntılı matematiksel çözümler sunan çalışmalar oldukça azdır. Literatürdeki bu eksiklikten yola çıkarak yapılan bu çalışma kapsamında Fresnel yaklaşımına farklı bir bakış açısı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu matematiksel yöntem kullanılarak farklı dalgaboylarında, farklı kenar pürüzlülüklerinde ve farklı dalga modlarında kırınım deseninin nasıl değiştiğine yönelik analizler yapılmıştır. Elde edilen teorik veriler deneysel verilerle karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konmuştur.

Tezin ilk bölümünde, çalışma boyunca değinilen ve kullanılan terimlerin tanımları ve kısa tarihçeleri sunulmuştur. "Işık Nedir?, EM Dalga Denklemleri, Poynting Vektörü, Süperpozisyon İlkesi" alt başlıklarında ışığın tanımı, çeşitleri, fiziksel ve davranışsal özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. "Mikro Metroloji" başlığı altında da mikrometre altı ölçümlerde kullanılan konvansiyonel yöntemler ve lazer kullanılarak gerçekleştirilen mikro metroloji hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, tezin ana konusu ve amacı doğrultusunda konu ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Belirtilen bu çalışmalar sayesinde çözmek istediğimiz problemin tanımı ve çözümüne yönelik yapılan farklı çalışmalara dolayısıyla farklı bakış açılarına yer verilmiştir.

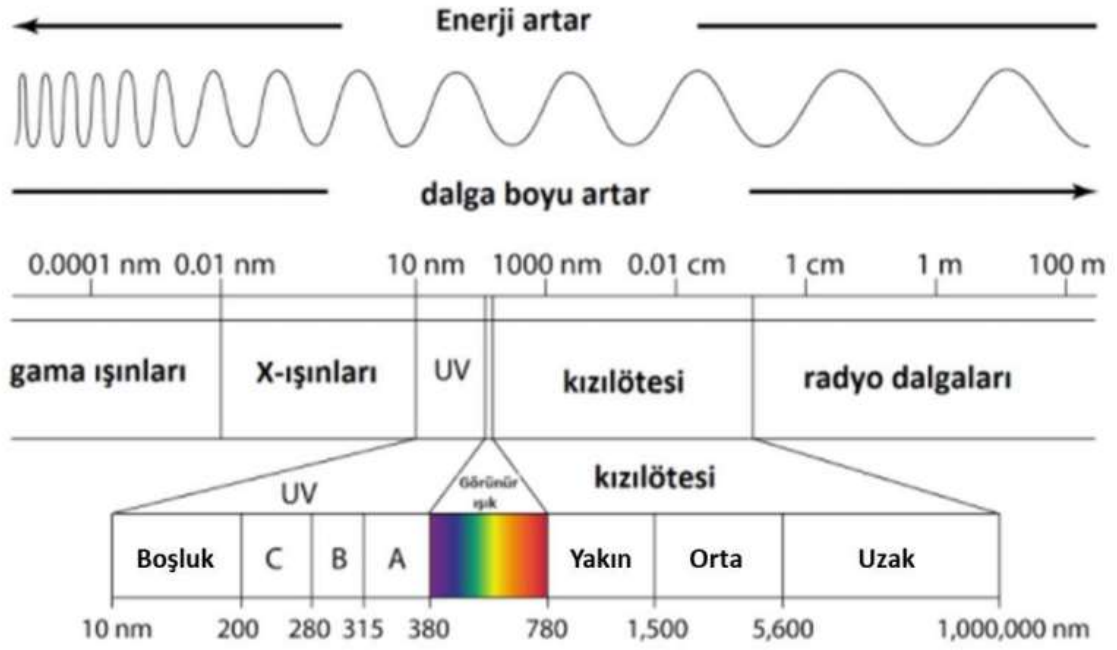
Üçüncü bölümde, elektromanyetik dalga denkleminin çözümü, tezde kullanılan dalga formlarının özellikleri ve matematiksel gösterimleri verilmiştir. Dalga denkleminin türetiminden elde edilen kırınım denklemleri verilmiş olup geliştirdiğimiz yeni kırınım denklem formuna kadar gelen basamaklar adım adım verilmiştir. Daha sonrasında tezin deneysel kısmı olan deney düzeneği ve deneylerin yapıları hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, üçüncü bölümde oluşturulan kırınım denklemi kullanılarak yapılan analizlere yer verilmiştir. Buna göre değişken olarak seçilen pürüzlülük boyutu, dalgaboyu, engel-ekran arasındaki mesafe ve farklı dalga modları için grafikler ve yorumları verilmiştir. Ayrıca deneysel veriler ile teorik veriler karşılaştırılmıştır.

Tezin son bölümünden farklı parametreler için yapılan analizler değerlendirilmiştir. Ayrıca deneysel ve teorik verilerin karşılaştırılması sonucunda ortaya çıkan farklılıklar hakkında açıklamalarda bulunulmuştur. Bunun yanı sıra gerçekleştirilen bu tezin literatüre nasıl bir katkı sağlayacağı ve gelecek çalışmalar için nasıl potansiyeller sunduğu hakkında açıklamalar bulunmaktadır.

1.1. Işık Nedir?

Işık bir elektromanyetik dalgadır. Işığın vakumdaki hızı 299.792.458 m/s'dir. Elektromanyetik spektrumun bir noktasını diğerlerinden ayıran en temel unsur, yayılan enerjinin ardışık tepe noktaları arasındaki mesafeyi tanımlayan ve λ ifadesiyle gösterilen dalgaboyudur. Gama ışınlarından radyo dalgalarına kadar uzanan elektromanyetik tayfin insan gözüyle görülebilen bölümü 380 nm - 760 nm dalgaboyları arasında bulunan kısmı kapsar. Görünür bölge olarak isimlendirilen bu alan içerisinde dalga boyu değiştikçe farklı renklerde ışımaya gerçekleşir. Örneğin 500 nm – 570 nm dalgaboyları arasında gerçekleşen ışımaya yeşil olarak görünürken; 620 nm – 760 nm dalgaboyları arasında olan ışımaya ise kırmızı olarak görünür (Bridges vd., 2010; Güzel ve Özlüoymak, 2015).



Şekil 1. Elektromanyetik Spektrum (Atakan, 2022).

Binlerce yıldır insanlık, görme olayının nasıl gerçekleştiği ve ışığın doğası hakkında birçok merak barındırmaktadır. Milattan önce ışığın doğasını anlamaya yönelik olarak ilk fikirler eski Mısır ve Yunan bilim insanları tarafından ortaya atılmıştır. Ayrıca bu dönemde ışığın doğasından yararlanarak birçok silah yapıldığı bilinmektedir. Net bilgiler olmadığı için şehir efsanesi olarak kalan bir olayda, antik dönemin en önemli bilim insanlarından biri olan Arşimed, Roma lejyonları tarafından yaşadığı şehrin kuşatılması nedeniyle bronzdan dev aynalar inşa ettirdi ve güneş ışınlarını Roma gemilerine yansıtarak onların yanmalarını sağladı. Onyedinci yüzyıla gelene kadar Öklid, Platon, Aristo, Kopernik, İbni Sina, Johannes Kepler, G.Galilei gibi farklı uygarlıktan birçok bilim insanı bu konuda fikirler üreterek ışığın yapısını anlamaya ve pratik olarak kullanmaya çalışmışlardır (Kamer Aras, 2011; Kirkland ve Grady, 2006).

Onyedinci yüzyılın başlarında mercek kullanılarak oluşturulan teleskopun işleyişi hakkında bilgi sahibi olan Galileo ve Kepler kırılma olayında gelen ve kırılan ışığın açılarının belirli bir geometriye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Yakınsak ve ıraksak mercek olmak üzere iki ayrı yolda çalışmalarını sürdüren bu bilim insanları ile aynı dönemde Fermat; ışığın iki nokta arasındaki yollardan en kısa zamanda gidebileceği yolu seçtiğini

savunmuştur. Onyedinci yüzyılın ortalarına doğru Grimaldi, bir ışık kaynağını bir çubuğun üzerine düşürdüğünde çubuğun gölgesinde ışık şeritlerinin belirmediğini farketmiştir. Bu sayede Grimaldi kırınım olgusunu ilk defa gözlemleyen bilim insanı olmuştur (E. Hetch, 2016).

Işığın ve optiğin tarihi hakkında konuşulduğunda ismi anılmadan geçilmeyecek bir dahi olan Isaac Newton sadece optik değil matematik, astronomi ve felsefe gibi alanlarda da çalışmalar yapmıştır. Newton “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” ve “Opticks” gibi bilim dünyasına yön veren birçok esere imza atmıştır. Bu eserlerinde hareket ve mekanik konularının yanı sıra ışığın prizmada kırılması ve renklerine ayrılması, yansıma-kırılma olayları ve ışığın parçacık hareketi konusunda çalışmaları kendinden sonraki bilim insanlarını etkisi altına almıştır (Newton, 1952; Westfall, 1994). Yine onyedinci yüzyılda Newton’un ışığın parçacık hareketine tezat olarak Christiaan Huygens, ışığın hareketini anlamamanın en iyi yolunun onu havadaki sesin yayılımıyla karşılaştırmak olduğunu düşünüyordu. Farklı ortamlarda ışığın hızının değiştiğini gözlemleyen Huygens, ışığın bir kaynak tarafından yayılan bir dalga gibi davrandığını ve yayılan bu dalgaların her bir noktasının yeni dalgacıklara kaynak oluşturduğunu belirtmiştir. Ayrıca kırılma, yansıma ve çift kırılma olgularının tutarlı açıklamalarını yapmıştır (Dijksterhuis, 2004; Kubbinga, 1995; Ziggelaar, 1980).

Ondokuzuncu yüzyılda ışığın doğası ile ilgili en önemli çalışmalara imza atmış olan bilim insanlarından biri Thomas Young’dur. Işığın dalga teorisi ve görme olayı üzerine yaptığı çalışmalar ile “Fizyolojik Optiğin Babası” olarak anılmaktadır (Whitaker vd., 2007). Ondokuzuncu yüzyılın başlarına kadar, dalga teorisinin genel kabulüne yol açan belirleyici keşifler yapılmadı. Buna yönelik ilk adım, 1801 yılında Thomas Young (1773-1829) tarafından girişim ilkesinin dile getirilmesi ve ince filmlerin renklerinin açıklanması olmuştur. Onyedinci yüzyılda, Huygens dalga teorisini geliştirdi ve bu teori onun yansıma ve kırılma yasalarını türetmesine izin verdi, ancak dalga hareketinin fazına atıfta bulunmadığından teorisi girişim ve kırınım etkilerini açıklayamıyordu. Kırınım desenlerinin girişim olayı ile üretildiğini ilk anlayan Young olmuştur (Born ve Wolf, 2013; Klem-Musatav vd., 2016). Young ile aynı dönemde yine Huygens’in teorisi üzerine çalışan bir başka ünlü bilim insanı Augustin Jean Fresnel, geliştirdiği ilkede, bir engele çarpan bir

dalganın parçacıklarını titreşime soktuğunu ve bunun sonucunda bu tür her parçacığın hem yansıyan hem de kırılan ortamda uygun hızlarda yayılan bir ikincil radyasyon kaynağı haline geldiğini ileri sürmüştür. Fresnel, düz kenarlar ve küçük açıklıklardan doğrudan ve kırılarak geçen ışığın (Yani birincil ve ikincil radyasyon kaynaklarının) oluşturduğu kırınım desenini incelemiştir ve bu iki elektromanyetik alanın toplam değerini veren bir matematiksel formülasyon geliştirmiştir (Born ve Wolf, 2013; Buchwald, 1989).

Ondokuzuncu yüzyılda ışığın doğası ile ilgilenen ve bu alanda büyük katkılar sunan bilim insanlarından belkide en önemlisi James Clerk Maxwell'dir. Modern elektromanyetik teorinin kurucusu olarak tanınmaktadır. Maxwell aslında ışığın elektrik ve manyetik alan hareketlerini, bu alanların birbirleri ile olan etkileşimlerine bağlamıştır ve bu etkileşimi çok verimli, kısa ve öz birkaç denklem ile açıklamıştır. Elektrik ve manyetik alanlar ilk olarak elektromanyetik teoride, elektrik yükleri ve akım taşıyan teller arasında uygulanan kuvvetlerin hesaplanmasını kolaylaştırmak için tasarlanmış matematiksel yapılar olarak tanıtılmıştır. Ancak ilerleyen yıllarda bu denklemlerin elektromanyetizmayı Einstein'ın özel ve genel görelilikleri ve kuantum elektrodinamiği gibi konularla tutarlı hale getirebilmenin ilk adımı olduğu görülecektir (Fitzpatrick, 2010; Flood, McCartney ve Whitaker, 2014).

Modern fiziğin temellerinin atıldığı yirminci yüzyılda sadece bulunduğu yüzyılın değil aynı zamanda tüm zamanların en büyük bilim insanlarından biri olarak kabul edilen Albert Einstein özel görelilik kuramını ortaya atmıştır. Buna göre ışığın foton adı verilen küçük paketlerden oluştuğunu, her bir fotonun ise $E = hf$ enerjisine sahip olduğunu öne sürdü. Burada E enerjiiyi, h planck sabitini ve f ise frekansı temsil etmektedir. Einstein'ın teorisi fotonların belirli enerji seviyelerine ulaştıklarında saçıldıklarını ortaya koyması nedeniyle foton saçılmasının ışık yoğunluğuna bağlı olmadığını da açıklamaktadır. Yani ışık yoğunluğunu arttırmak daha yüksek enerjili fotonların saçılması demek değildir, aksine daha fazla foton saçılması anlamına gelmektedir. Ayrıca elektromanyetik dalgaların yayılması için bir ortam gerekli olmadığını ve elektromanyetik dalgaların belirli bir ortamdaki yayılma hızının, malzemenin harici bir elektrik alana tepki olarak polarize olma yeteneği olan permeability ve malzemenin harici bir manyetik alana tepki olarak mıknatıslanma yeteneği olan permittivity ile elde edilebileceğini belirtmiştir. Böylece ışık kaynakları, aynalar, lensler, prizmalar, polarizörler, ızgaralar ve dedektörler gibi spektrometrelerdeki optik

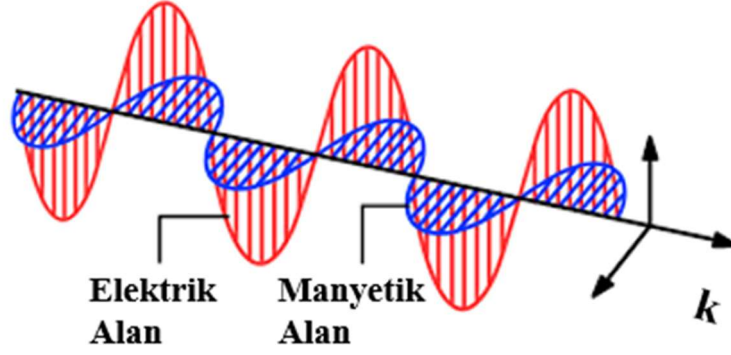
bileşenlerin çalışma prensiplerinin temeli atılmıştır (Bass vd., 1995; Hitz vd., 2012; Sharma, 2006).

Yirminci yüzyılda modern fiziğin ve kuantum mekaniğinin temellerini atan Einstein, Schrödinger, Max Plank, Heisenberg, De Broglie, Dirac ve daha birçok bilim insanının ışığın doğasını çözmeye yönelik bu çalışmaları sayesinde yirminci yüzyılın ikinci yarısında laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) icat edilmiştir ve o tarihten itibaren ışık ve optik bilimi daha önce hiç olmadığı kadar ilgi odağı haline gelmiştir (Lipson vd., 2010).

1.1.1. Sıradan Işık ve Özellikleri

Işık, Newton tarafından parçacıklı (foton) bir doğaya sahip olarak açıklanırken Huygens tarafından ise dalga formuna sahip olduğu savunulmaktaydı. Yirminci yüzyılda kuantum mekaniğinin ortaya çıkmasıyla ışığın hem dalga hem de parçacık özelliği gösterdiği ortaya çıkmıştır. Elektromanyetik spektrumda sıradan ışık olarak tanımlayabileceğimiz bölge görünür bölgedir. Bir ucunda gama ışınları ve diğer uçta radyo dalgalarını kapsayan geniş elektromanyetik dalga spektrumunun en önemli parçalarından birini ve aynı zamanda çok küçük bir bölümünü görünür bölge oluşturmaktadır. Şekil 1’de gösterildiği gibi bu iki uç arasında, azalan frekans sırasına göre X-ışınları, mor ötesi ışınları, görünür ışık, kızılötesi ışınım ve mikrodalgalar yer alır (Milonni ve Eberly, 2010; Sharma, 2006).

Sıradan ışık görünür bölgede bulunan farklı dalgaboylarındaki birkaç ışığın birleşmesiyle oluşmaktadır. Ayrıca ışık bir elektromanyetik dalga olması nedeniyle birbirine dik elektrik ve manyetik alanlardan oluşmaktadır. Işık kaynağından çıkan ışınlar düzenli değildir ve her yöne dağılırlar. Bunun nedeni; elektronların bir enerji düzeyine sahip yörüngeden farklı bir enerji düzeyine rastgele geçişler yapmasıdır (Kasnak ve Fıratlı, 2016; Kirkland ve Grady, 2006). Bir elektromanyetik alanın yapısı Şekil 2’de verilmiştir.

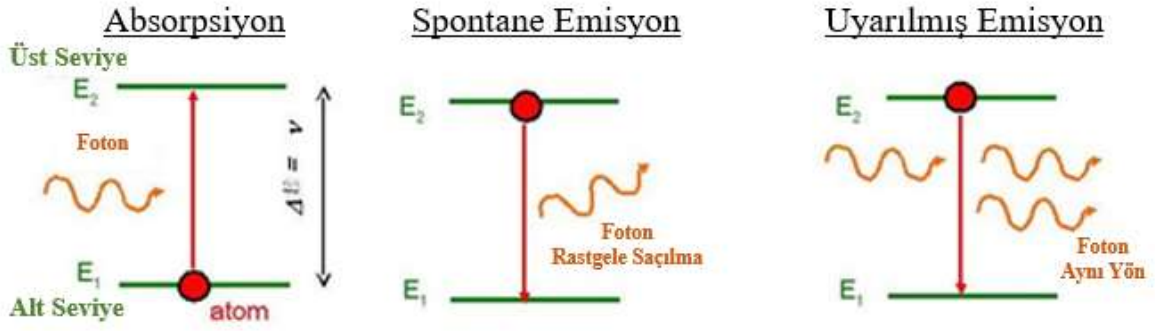


Şekil 2. Elektromanyetik dalganın yapısı (Saleh, 2017).

1.1.2. Lazer Işığı ve Özellikleri

Lazer kelimesi, "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" kelimelerinin baş harflerinden oluşturulan ve "Uyarılmış Radyasyon Emisyonu ile Işık Amplifikasyonu" anlamına gelen bir kısaltmadır. Enerji lazere genellikle elektrik olarak girer, istenilen dalgaboyuna sahip elektromanyetik dalga olarak çıkar. Monokromatik bir elektromanyetik dalga olan lazer ışını yüksek genliğe sahip olan aynı fazdaki ışın demetlerinden oluşur. Çoğunlukla görünür bölgedeki dalgaboylarında çıkış sağlayan lazerler kullanılmaktadır, ancak çok popüler olmasada mikrodalga ve kızılötesi bölgelerinde, UV bölgesine ve hatta X-ray bölgelerine kadar uzanan geniş bir skalada insan gözünün göremediği elektromanyetik dalga çıkışları sağlayan lazerler de vardır (Siegman, 1986).

Lazerin çalışma prensibi aslında oldukça basit ve anlaşılır bir mekanizmaya sahiptir. Bunun için elektronların enerji seviyelerindeki hareketlerine odaklanmamız yeterli olacaktır.



Şekil 3. – Absorpsiyon, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyon (De Matos, 2017).

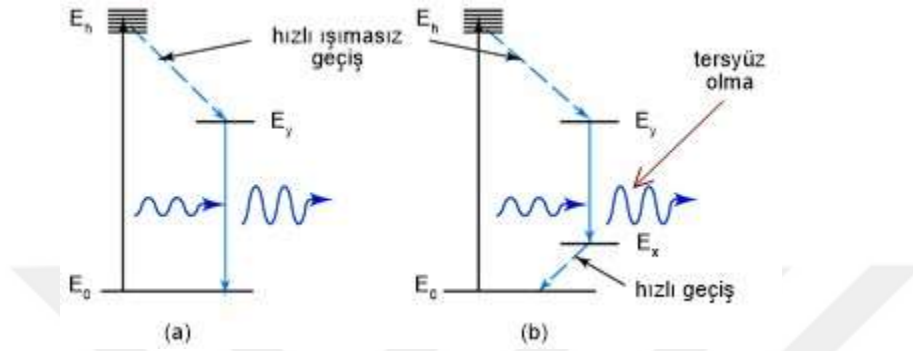
Yüksek enerji seviyesindeki bir elektron daha düşük bir enerji seviyesine geçerken üzerindeki fazla enerjiyi foton olarak yayar. Burada karşımıza iki olasılık çıkmaktadır. Birincisinde elektron, bu enerji seviyeleri arasındaki hareketini kendiliğinden gerçekleştirebilir. Bu durumda ortaya çıkan foton gelişigüzel bir saçılma yapacaktır ki bu da aslında sıradan ışığın her yöne saçılmasına bir açıklama getirmektedir. Bir diğer olasılıkta ise elektron bir foton tarafından indüklenebilir. İndüklenen elektron uyarıcı foton ile aynı fazda foton yayar. Uyarılmış emisyon, gelen bir foton ile aynı faz, yön ve frekansta saçılan 2 foton üretmesi sebebiyle foton amplifikasyonunun temelini oluşturmaktadır. Lazerler sayesinde tek tek atomlardan gelen emisyon senkronize edilir ve çok daha yüksek parlaklıkta tutarlı radyasyon elde edilir (Kasap, 2013).



Şekil 4. Lazer sistemlerinin temel bileşenleri (Kurt, 2017).

Lazer sisteminin oluşturulması için 3 temel bileşenden yararlanır. Bunlar Şekil 4'te şematize edildiği gibi uygun enerji seviyelerine sahip aktif bir ortam (gas, kristal gibi vb.),

aktif ortamı uyarma işlemini gerçekleştirmek için enerji kaynağı ve biri tam yansıtıcı diğeri ise büyük oranda yansıtıcı olan bir çift aynadan oluşan rezonatör sistemidir. Aktif ortamda yükseltlen enerji belirli bir eşiği aştığında kısmi yansıtıcı aynadan geçerek istenilen dalgaboyundaki lazer ışığını oluştururlar (Smith vd., 2007).



Şekil 5. Lazerin çalışma prensibi (Beşergil, 2022).

Uyarılmış durumdaki atomlar, uyarılmış duruma ulaştıktan sonra nanosaniyeler içinde kendiliğinden emisyon yoluyla fazla enerjilerini serbest bırakırlar. Bu çok kısa bir süre olduğu için uyarılmış atomların çoğu herhangi bir etkenin emisyonu uyarması için yeterince uzun süre yüksek enerji durumunda kalamazlar. Bu nedenle fotonların uzun ömürlü kalabilecekleri uyarılmış bir seviye olması gerekir. Fotonlar bu seviyeye ulaştıklarında burada büyük bir popülasyona ulaşmalarına yetecek kadar kalırlar. Üst lazer seviyesi uzun bir spontane ömre sahiptir, bu nedenle atomlar orada birikme eğilimi gösterir ve bu seviye ile temel durum arasında bir popülasyon inversiyonu yaratır. Kendiliğinden emisyon her zaman bazı atomların daha düşük seviyeye düşmesine izin verir, ancak kendiliğinden emisyonun ömrü ne kadar uzun olursa, uyarılmış emisyon için gereken popülasyon inversiyonunu sürdürmek o kadar kolay olur (Hecht, 2018; Yariv ve Yeh, 2007).

Lazerin en temel özelliklerinden biri tek renkli (monokromatik) olmasıdır. Teorik olarak lazerin tamamen tek renkli olması modern fiziğin belirsizlik ilkesine göre mümkün değildir. Çok dar bile olsa sıfırdan farklı bir dalgaboyu bant genişliğine sahip olmalıdır. Lazerin tek renkli olmasına neden olan iki farklı neden vardır. Bunlardan biri belirli bir ν_0 frekansında amplifike olması ve diğeri lazer sistemindeki $2 \rightarrow 1$ geçişinin normal çizgi

genişliğinden çok daha dar olmasıdır. Lazer ışığının bir diğer özelliği ise uzamsal tutarlılıktır. Birçok dalga aynı faz, genlik ve kutuplanma ile birbirine paralel demetler halinde bozulmadan uzun mesafeler katedebilir. Ayrıca uzamsal tutarlılığının getirdiği bir başka özellik de lazer ışığının gücünün normal ışığa göre oldukça fazla olmasıdır. Bu dolayısıyla onun diğer ışık kaynaklarından daha parlak olmasını sağlar (Hitz vd., 2012; Svelto ve Hanna, 1998).

Günümüzde en bilinen ve en fazla kullanılan lazer çeşitleri Tablo 1’de listelenmiştir (Tekin, 2008).

Tablo 1

Sık Kullanılan Lazer Çeşitleri ve Özellikleri

Lazer Çeşidi	Dalgaboyu	Uygulama Alanları
Helyum-Neon Lazer	632.8 nm	Metroloji, Spektroskopi, İnterferometri, Bilimsel Çalışmalar vs.
CO ₂ Lazer	10.6 µm	Malzeme İşleme, Tıp, Mikro Cerrahi
Nd:YAG Lazer	1.064 µm	Tıp, Bilimsel Çalışmalar
Ruby Lazer	694.3 nm	Tıp, Bilimsel Çalışmalar
Argon Lazer	454.6, 488, 514.5 nm	Göz Rahatsızlıkları
Titanyum Safir Lazer	660 nm – 1050 nm	Nükleer Füzyon, Bilimsel Çalışmalar, Mikro İşleme, Endüstriyel Uygulamalar
Excimer Lazer	193 nm – 353 nm	Tıp, Bilimsel Çalışmalar
Karbon Monoksit Lazer	2.6 - 4 µm, 4.8 - 8.3 µm	Tıp, Bilimsel Çalışmalar

1.2. Elektromanyetik Dalga Denklemleri

Elektromanyetik dalgalar, birbirine dik olan elektrik ve manyetik alanlarının birbirlerini besleyen dalga hareketleriyle, bu iki düzleme dik olarak ilerleyen enine dalgalardır (Semra, 2019). James Clerk Maxwell'in dalga denklemlerini oluşturması, o tarihe kadar fizik alanında yapılan en etkili buluşlardan biri olmuştur. Işığın nasıl ilerlediğini, yapısını ve davranışlarını, oluşturduğu denklemler ile çok basit bir şekilde açıklayabilmiştir. Maxwell'in bilim dünyasında gerçekleştirdiği bu devrim günümüzde kullandığımız radyo, televizyon, mikrodalga, optik iletişim ve radar sistemleri gibi birçok alanın ortaya çıkmasını sağlamıştır (Kong, 1975). Maxwell, ışığın uzaydaki hareketini dört temel denklem ile açıklamıştır:

1.2.1. Elektrik Alanlar için Gauss Yasası

Maxwell'in ilk yasası olan elektrik alanlar için Gauss yasasının temelini, elektrostatik alanın uzaydaki davranışının bu alanı üreten yük dağılımlarıyla olan ilişkisi oluşturur. Elektriksel yüklerin hareketi bir elektrik alan oluşmasını sağlar. Bir S yüzeyinden geçen bu elektriksel yüklerin oluşturduğu akı, yüzeyde bulunan toplam yük ile orantılıdır. Başka bir deyişle yüzeydeki elektrik akısı, yüzeyden geçen elektrik alan çizgilerinin toplamıdır (Sharma, 2006).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

Burada E elektrik alan, ρ_e elektriksel yük yoğunluğu ve ϵ_0 ise boş uzayın elektriksel geçirgenlik sabitidir.

1.2.2. Manyetik Alanlar için Gauss Yasası

Manyetik alanlar için Gauss yasası, manyetik alanın diverjansının her yerde sıfır olması gerektiğini belirtir. Elektrik alanlar için Gauss yasasında elektriksel akı sonsuza gidebilir. Ancak manyetik alanlar için Gauss yasasında böyle bir şey mümkün değildir. Kapalı bir S yüzeyindeki toplam manyetik akı sıfırdır. Bu S yüzeyinden manyetik akının geçmediği anlamına gelmez, sadece S yüzeyine giren manyetik alan çizgilerinin çıkan manyetik alan çizgilerine eşit olması gerektiği anlamına gelir. Bu temelde, doğada tek kutuplu manyetik monopollerin olmadığı, her kuzey kutbunun bir de güney kutbuna sahip olması gerektiğini belirtmektedir. Bunu ifade eden eşitlik aşağıda belirtilmiştir (Furlani, 2001; Kao ve Chang, 2020).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte B manyetik alan vektörüdür.

1.2.3. Faraday Yasası

Faraday yasası, temel olarak manyetik alan üzerindeki değişikliğin bir elektrik alan indükleyeceğini belirtir. Bir iletken tel boyunca hareket eden bir mıknatıs tel içerisinde bir elektrik akımı yaratmaktadır. Bu aslında elektrik alanın sadece elektriksel yükler aracılığıyla değil aynı zamanda değişen manyetik alanlar aracılığıyla da oluşabileceğini göstermektedir. Hareket eden elektriksel yükler, bu yüke dik bir manyetik alan indükler ve aynı zamanda değişen manyetik alan ise bir elektrik alan indükler.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

Eşitliğin sağ tarafında bulunan negatif – işareti indüklenen elektromanyetik alanın sahip olduğu akıyı devam ettirme eğiliminde olduğunu göstermektedir (Fitzpatrick, 2010; Frankel, 1974).

1.2.4. Ampere-Maxwell Yasası

Ampere yasası, sabit bir elektrik akımını sirküle bir manyetik alan ile ilişkilendirmiştir. Ancak bu yasa sadece sabit akımların olduğu statik durumları açıklama durumunda geçerli olabilmekteydi. Maxwell, Ampere yasasının bu eksikliğini zamana bağlı koşulları denkleme katarak genişletmiştir. Faraday yasasını düzenleyen Maxwell, değişen manyetik alanların bir elektrik alan indüklediğini matematiksel olarak açıkladıktan sonra bunun tam tersinin de olması gerektiğini düşündü. Bu nedenle denkleme manyetik alana katkıda bulunan bir terim ekleyerek Ampere yasasını daha geniş bir çerçeveye ulaştırmıştır. Denklem eklenen ve yer değiştirme akımı olarak da bilinen bu terim zamanla değişen elektrik alanını temsil etmektedir. Son halini alan ve artık Ampere-Maxwell yasası olarak isimlendirilen bu denklem, bir yüzeyden geçen bir elektrik akımının veya değişen bir elektrik akısının, o yüzeyi sınırlayan herhangi bir yol etrafında dönen bir manyetik alan ürettiğini belirtmektedir. Bir diğer deyişle telden akan bir elektrik akımı bu tele dik bir manyetik alan oluşturmaktadır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \epsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.4)$$

Bu denklemde ϵ elektriksel geçirgenlik, μ boş uzayın manyetik geçirgenlik sabiti ve \vec{J} ise elektrik akım yoğunluğudur. Maxwell oluşturduğu bu dört denklem ile bir elektromanyetik dalganın birbirlerini indükleyen ve birbirlerine dik olarak salınan elektrik ve manyetik alanlardan oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Bu denklemler sayesinde değişen elektrik ve manyetik alanların büyüklükleri belirlenerek fotonun yükü hesaplanabilmektedir (Agarwal, 2016; Fitzpatrick, 2010; Fleisch, 2008).

1.3. Poynting Vektörü

Elektromanyetik dalgalar herhangi bir yönde ilerlerken sahip oldukları enerjiyi çevrelerine yayarlar. Birim alana birim zaman içerisindeki anlık enerji geçişi Poynting vektörü ile ifade edilmektedir. Birimi watt/m^2 olan ve \vec{S} ile gösterilen bu vektörün matematiksel gösterimi aşağıda verilmiştir (Sharma, 2006).

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \quad (1.5)$$



Şekil 6. Poynting vektörü ile elektromanyetik dalganın yayılma yönü.

Poynting vektörü, dinamik EM alanları ile bu alanların yaydığı enerji arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Yani enerji transferinin yönünü göstermesinin yanında akan bu enerjinin güç yoğunluğunu da ifade etmektedir (Kao ve Chang, 2020).

Poynting vektörünün birim alana düşen güç yoğunluğunu vermesi nedeniyle günümüzde görüntüleme ve sensör sistemlerinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Sensörler ve kameralar ışığın titreştiği dalgaboyuna erişemezler. Bu yüzden dedektörler ışığın birim zamandaki güç yoğunluğunu ölçerek görüntülemeyi yapmaktadırlar (Driver ve Kanda, 1988). Görüntüleme sistemlerinin geliştirildiği ilk günden beri en önemli konuların başında görüntü kalitesini arttırmak gelmektedir. Son dönemde en çok kullanılan dedektörlerden biri olan CCD sensörler içerisinde yer alan çipin pixellere bölünmesi sayesinde her pikselin, fotoelektrik etki tarafından üretilen elektronları toplayan bir potansiyel kuyusu vardır. Bir pozlamanın sonunda her piksel, üzerine düşen ışık miktarıyla orantılı bir miktarda elektron

yükü toplar. Toplanan bu yükler bazı yöntemlerle okunur ve görüntüleme yapılmış olur. CCD'ler en yüksek görüntü kalitesi (kuantum verimliliği ve kuantum noise) sağlayan fotoğrafik, bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda büyük katkı sağlamıştır. Fotoğraf plakaları her yüz fotondan birini yakalayabilirken, modern CCD'ler her yüz fotondan seksenini yakalayabilir. Bu, kamera sensörünün ışığa maruz kalma süresinde (exposure time) önemli bir azalmaya izin verir. Bu sayede daha kaliteli görüntüler elde edilebilir (Fraden, 1994; Haus, 2010; F. Huang vd., 2008).

1.4. Süperpozisyon İlkesi

Herhangi bir noktada ya da belirli bir eksen üzerinde hareket eden n tane sinüs dalgasının bir noktada üst üste gelmesiyle oluşan yeni dalga, bu dalgayı oluşturan n tane dalganın özelliklerinin toplamını içerir. Dalga formunda olan tüm yapılar için bu ilke geçerlidir. Elektrik ve manyetik alanların sirkülasyonu ile hareket eden elektromanyetik dalgalarda, elektrik ve manyetik alanlar süperpozisyon ilkesine uyar. Yani süperpozisyon durumundaki dalganın elektrik ve manyetik alanları, bu dalgayı oluşturan n tane dalganın elektrik ve manyetik alanlarının toplamını içerir. Ancak bu dalgaların ışıma yoğunlukları için her zaman geçerli değildir. Bu durumun matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir (Sharma, 2006).

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_i \vec{E}_i(\vec{r}, t), \quad (1.6)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \sum_i \vec{B}_i(\vec{r}, t), \quad (1.7)$$

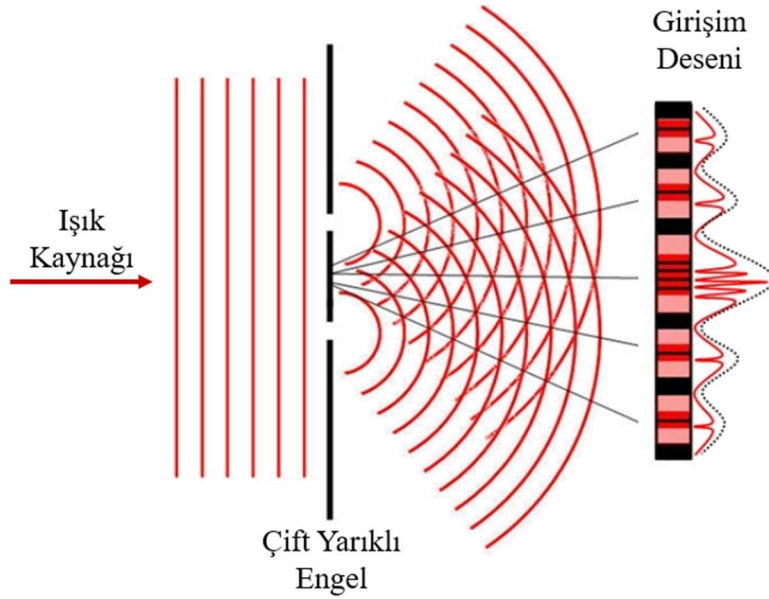
$$I(\vec{r}, t) \neq \sum_i I_i(\vec{r}, t). \quad (1.8)$$

Belirli bir zaman ve noktadaki dalga toplamlarının büyüklüğü, toplamı oluşturan her bir dalganın faz değerine bağlıdır. Dalganın fazı, uzay ve zamanın bir fonksiyonudur (Aguilar vd., 2010). Buradan yola çıkarak süperpozisyon ilkesi, Fourier analizlerinde

oldukça etkin bir şekilde kullanılır. Süperpozisyon halindeki dalganın özelliklerinden yola çıkarak her bir dalganın özellikleri ayrı ayrı analiz edilebilir. Ayrıca süperspozisyon ilkesi kuantum teoremi ve Green's fonksiyonunun analizleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Gan, 2022).

1.4.1. Girişim

Girişim olgusunun temelini süperpozisyon prensibi oluşturmaktadır. Girişim, aynı frekansa, genliğe ve dalgaboyuna sahip en az iki dalganın üst üste gelmesiyle daha yüksek, daha düşük veya aynı genlikte bileşke bir dalganın oluşması durumudur. Young'ın girişim olgusunu ortaya çıkarması bilim dünyasında ışığın dalga özelliğinin de dikkate alınmasını sağlamıştır (Kipnis, 2012).



Şekil 7. Girişim olgusunun oluşumu (“Double Slit Diffraction”, 2020).

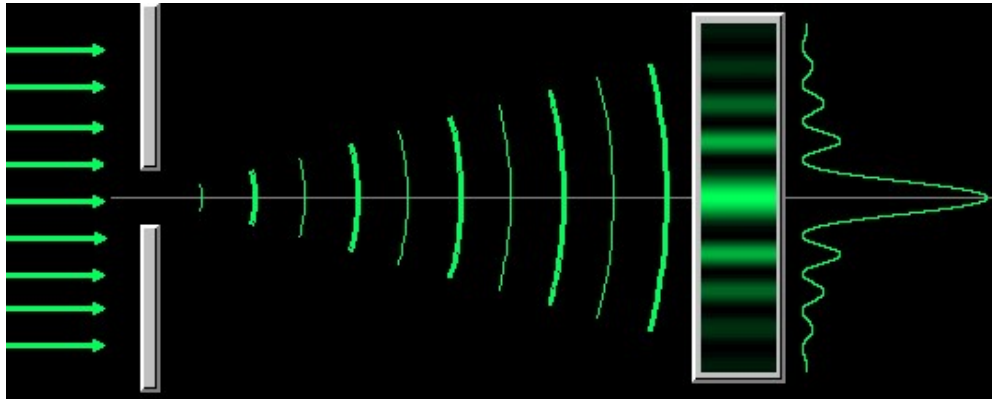
Şekil 7’de görüldüğü gibi yarıklardan geçen ışık tıpkı su dalgaları gibi hareket ederek ekran üzerine düşmektedir. Yani her bir yarıklık bir ışık kaynağı olarak davranmaktadır. İki yarıktan çıkan dalgalar üst üste gelerek ekran üzerindeki aydınlık ya da karanlık bölgeleri oluşturur. Oluşan bu desene girişim deseni denir. Aynı fazla salınan dalgalar üst üste

geldiğinde yapıcı girişim olarak adlandırılan ekran üzerindeki aydınlık saçakları oluşturur. Yine benzer şekilde fazlarında farklılık olan dalgaların üst üste gelmesiyle ekran üzerinde karanlık saçaklar oluşturur. Buna da yıkıcı girişim denir (Bass vd., 1995).

1800'lü yıllara kadar bilimsel camiada ışığın parçacık özelliğe sahip olduğu savunuluyordu. Young'ın 1803'te gerçekleştirdiği deney ile aslında ışığın dalga formunda yayıldığını kesin olarak göstermiştir. Kuantum mekaniğinin yirminci yüzyılda ortaya çıkmasına rağmen bu deney ile ışığın dalga parçacık yapısının kanıtlanmasının yanı sıra belirsizlik ilkesinin de temeli atılmıştır (Lindner vd., 2005).

1.4.2. Kırınım

Elektromanyetik dalgalar engellerden veya açıklıklardan geçtiğinde dalganın bir kısmı elektromanyetik dalganın ilerleme yönünden sapar ve bu dalga başlangıçtaki dalgadan boyut ve şekil olarak farklıdır. Bu fenomene kırınım denir. Kırınımı temelde, elektromanyetik dalganın aralıklar veya köşeler etrafında yayılarak karanlık olması beklenen bölgeleri aydınlatacak şekilde bükülmesi olarak açıklayabiliriz. Kırınımın doğasının temelinde ışığın dalga özelliği yatmaktadır. Ayrıca ses dalgaları, radyo dalgaları ve su dalgaları gibi dalga özelliği taşıyan her olguda kırınım görülebilir (Ersoy, 2006).



Şekil 8. Kırınım olgusunun oluşumu (“Kırınım”, 2021).

Işığın bir yarıktan geçerken büküldüğünü farkeden ilk kişi Grimaldi idi. Huygens dalga cephesindeki her bir noktanın ikincil dalgalar üreten noktasal kaynak olarak tanımlamıştır. Daha sonra Young gerçekleştirmiş olduğu deney ile ışığın dalga özelliğine sahip olduğu bilim dünyasına tanındı (Cecchini ve Pelosi, 1990; Vohnsen, 2006).

Kırınım ve girişim olguları birbirleri ile karıştırılmaktadır. Bu iki olgu arasındaki temel farkı şu şekilde açıklayabiliriz: Birden fazla ışın demetinin süperpozisyonundan dolayı yoğunluğun değişmesi girişim olarak adlandırılırken, ışığın bir engelin köşesinde bükülerek geometrik gölgeler oluşturması ise kırınım olarak adlandırılır (Keller, 1962; Schiller, 1997).

1.5. Mikrometroloji

Metroloji ölçüm bilimi olarak tanımlanmaktadır. Hayatı kolaylaştırmak için kullanılan birim ve ölçüm sistemleri ülkeden ülkeye hatta insandan insana bile değişebilmekteydi. Bu durum uzunluk ve ağırlık ölçümleri gibi birçok alanda oldukça büyük karışıklıklara neden olmaktaydı. Fransız ihtilali döneminde ondalık metrik sistemlerin oluşturulması, düzenlenmesi ve seri üretim uygulamalarının da ortaya çıkmasıyla birlikte günümüze kadar olan sürede modern metroloji gelişme göstermiştir. Üretilen ya da geliştirilen birçok ürünün ekonomik başarısı, ürünlerin belirli standartların üzerinde olup olmadığı ile ilgilidir. Bu nedenle modern metrolojinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Telekomünikasyon, ulaşım ve navigasyon alanlarında hassas zaman ve mesafe ölçümleri; gıda sektöründe kullanılan katkı maddelerinin ölçümleri; sağlık alanında uygulanan tedavilerdeki güvenilir ölçümler; küresel iklim değişikliği ile ilgili yapılan ölçüm ve çalışmalar; bilimsel çalışmalar ve daha birçok önemli alanda yapılan ölçümlerin doğru ve güvenilir olması gerekmektedir (Quinn ve Kovalevsky, 2005). Son yüzyılda mikrometrolojide yaşanan gelişmeler sayesinde mikrometre ve nanometre boyutlarında cihazlar geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra sensör üretimi, yüzey analizi ve uzay araştırmaları gibi birçok bilim, teknoloji ve endüstri alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir (Alting vd., 2003).

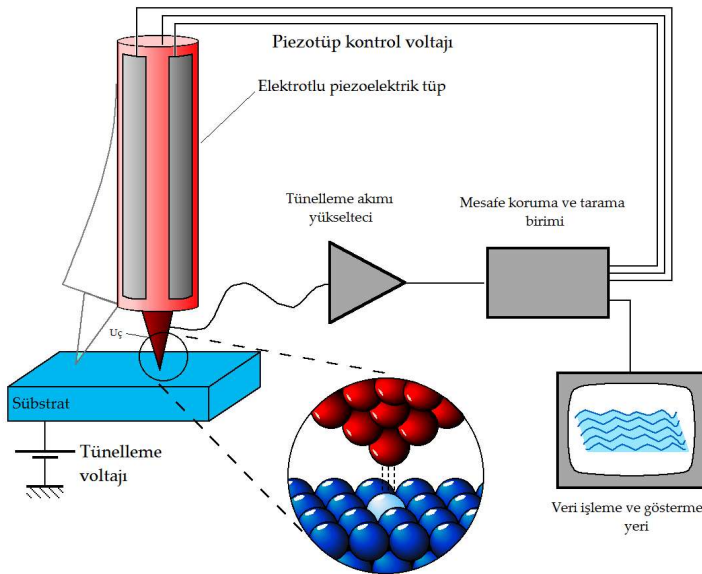
1.5.1. Konvansiyonel Yöntemler

Yüzey analizlerinde sıkça kullanılan klasik yöntemlerden başlıcaları; Scanning Probe Microscopy (SPM) ve Elektron Microscopy (SEM, TEM)'dir. Bu yöntemler mikrometre ve mikrometre altı ölçümlerde kullanılır.

Taramalı Prob Mikroskopisi (Scanning Probe Microscopy)

Bu yöntemin çıkış noktası Binnig ve Rohrer tarafından 1982 yılında keşfedilen ve bu keşif ile 1986 yılında Nobel Fizik Ödülünü alan taramalı tünelleme mikroskobunun (STM) icadı olmuştur. Bu tip ölçümler, kullanılan prob ile yüzey arasındaki etkileşime bağlı olarak Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Yakın Alan Taramalı Optik Mikroskop (NSOM) gibi üç farklı yöntemi bünyesinde barındırmaktadır. Kullanılan bu başlıca üç yöntem dışında daha birçok teknik bu başlık altında sınıflandırılmaktadır. Örneğin, manyetik güç mikroskopisi, iyon taramalı iletkenlik mikroskopisi (SICM), tarama açıklığı ile fotoemiyon mikroskopisi (PEMSA), yakın alan taramalı akustik mikroskobu (SNAM), ters fotoemiyonlu STM (STMiP), lazer taramalı tünel mikroskopisi (LSTM), elektrokimyasal taramalı tünelleme mikroskopisi (ECSTM), termal tarama mikroskopisi (SThM), gürültü tarama mikroskopisi (SNM), taramalı tünel açma potansiyometrisi (SPotM), kapasitans tarama mikroskopisi (SCM), taramalı direnç yayılma mikroskopisi (SSRM), tarama tünelleme atom probu (STAP), uç yükseltme raman saçılımı (TERS) ve fotoğraf kaynaklı güç mikroskopisi (PIFM) gibi teknikler prob tarama mikroskopisi içerisinde yer almaktadır. Genel olarak tarama prob yöntemlerinin temelinde metal silindirik bir probun yüzey ile etkileşimi yatmaktadır. Prob ile yüzey arasındaki mesafe çözünürlüğü etkilemektedir. Ancak SPM'de çözünürlük probun geometrik şekline bağlıdır. Bu sınırlamadan dolayı yatay çözünürlük yüzeydeki pürüzlülüğün dikey genliğine bağlıdır. Prob tarama mikroskopisi birkaç yüz mikrometre ile 10 pm arasında bir görüntüleme aralığına sahiptir. Bu teknikler sayesinde katı cisimlerin yüzey yapıları, yüzeydeki noktasal kusurlar ve yapısal kusurların dağılımını atomik çözünürlükte görüntülenebilir (Meyer vd., 2003).

Tarama Tünelleme Mikroskopisi (STM): Keşfedilen bu sistem temelinde kuantum tünelleme prensibine dayanmaktadır. İletken ya da yarı iletken bir yüzeyin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi ve haritalandırılmasına olanak sağlamaktadır. Prob ile yüzey arasındaki mesafe pm değerlerine kadar inebilmektedir. Metal prob ile yüzey arasında oluşturulan gerilim sayesinde probtan yüzeye ya da yüzeyden proba bir elektron akışı elde edilerek tünelleme akımı oluşturulmuş olur. Bu akım değerleri göz önünde bulundurularak prob ile yüzey arasındaki en uygun mesafe bulunur. Mesafe ayarlandıktan sonra akım incelenerek yüzeyin haritalandırılması sağlanır. Bu sistemdeki en önemli unsurlardan biri – ki aynı zamanda bu sistemin negatif yönlerinden biri – sistemin titreşim izolasyonu gerektirmesidir. Oluşturulan sistemde olabilecek en ufak bir titreşim görüntüleme sürecinin tamamını etkiler ve istenilen görüntünün elde edilmesini engeller. Ayrıca bu yöntem yüzey ile prob arasındaki mesafeden, yüzey ve probun kimyasal ve bileşimleri ve elektronik yapılarından ve yüzey ile probun elektrostatik etkileşimlerinden etkilenmektedir (Arlı vd.; Bowker ve Davies, 2009; C. H. Chen, 2021).

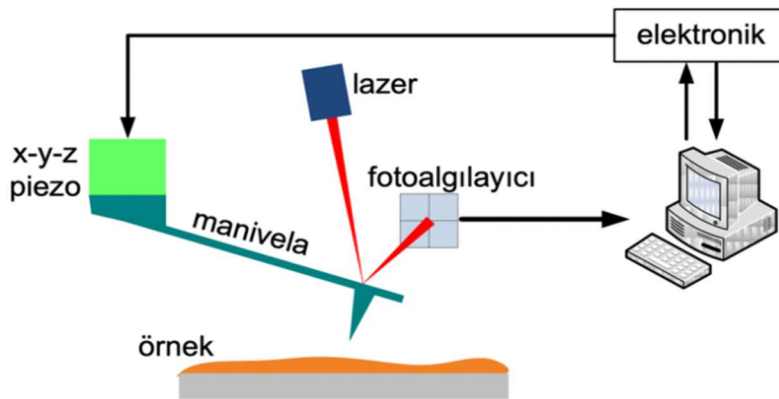


Şekil 9. Taramalı tünelleme mikroskopunun yapısı (Wikipedia, 2020).

Tarama tünelleme mikroskopisinin en önemli özelliklerinden biri atomik düzeyde görüntüleme gerçekleştirebilmesidir. Bu nedenle STM, nanometre boyutundaki yüzey pürüzlerinin niteliksel analizlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. STM'ler düşük veya

yüksek sıcaklıklarda, vakumda ya da hava ortamında analiz yapılmasına olanak sağlar. Bu özelliği sayesinde elektrokimyasal ve biyolojik çalışmalarda tercih edilir. Atomları ya da molekülleri manipüle etmeye izin vermesi ve katı-akışkanların yüzeylerinde meydana gelen dinamik süreçlerin incelenmesine izin vermesi nedeniyle ilgili alanlarda oldukça tercih edilmektedir (Bai, 2000).

Atomik Kuvvet Mikroskopisi (AFM): Atomik kuvvet mikroskopisi özellikle incelenen yüzeyin atomlarının düzenlerini ve moleküllerin yapısının görüntülenmesinde kullanılan yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme yöntemidir. Bu yüksek çözünürlük, taramalı prob mikroskopisinde temel unsurlardan biri olan prob ucunun atomik boyutlarda ebatlara sahip olmasıyla elde edilmektedir. AFM, tarama tünelleme mikroskopisi gibi metal yüzeylerin ölçümlerini yapmasının yanı sıra yumuşak, sentetik veya hücre gibi organik yapıları opaklık ve iletkenlikten bağımsız olarak birçok malzemenin görüntülenmesinde kullanılmaktadır. SEM gibi yüzeye ışık düşürülmesiyle görüntüleme yapan ışık ve elektron mikroskoplarının aksine AFM yüzeyi görüntülemek için prob ile yüzeye dokunur. Bu özelliğinden dolayı AFM'ye "Kör Mikroskopi" de denilmektedir. AFM iki boyutta ölçüm yapmaktadır. Ancak bazı yazılımlar kullanılarak bu iki boyutlu veriler istenilen açıdan üç boyutlu görüntülere çevrilebilmektedir. Bu yöntemde kullanılan prob, yüzey üzerinde hareket ettirilerek (ya da yüzey probun altında hareket ettirilerek) yüzeyin topografik yapısını ortaya çıkarmaktadır. Yüzeyin yükseklik ölçümlerini gri tonlama ile görüntüler. Bu sayede yüzeydeki tepe ve çukurların ölçülmesinin yanı sıra yüksek noktaların eğimlerinin dağılımını da sunmaktadır.



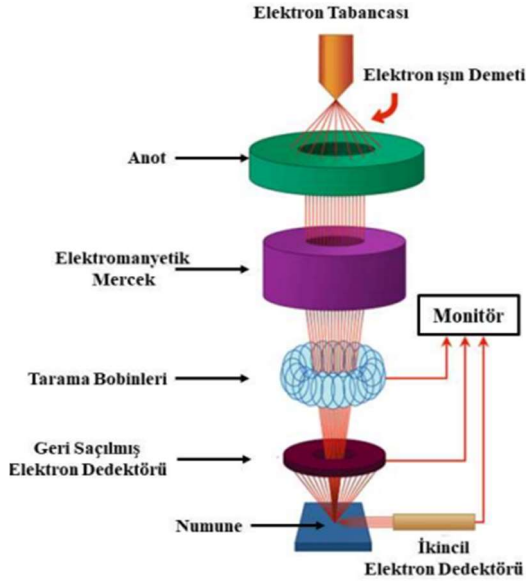
Şekil 10. Atomik kuvvet mikroskopunun çalışma prensibi (Torun, 2020).

AFM, fizik, biyoloji, kimya, nanoteknoloji, malzeme bilimi, astronomi ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Fotonik kristaller gibi periyodik yapıların optik sistemlerde kullanılması son dönemlerde oldukça artmıştır. AFM'ler kristallerin yüzeylerinin incelenmesinde kullanılabilir olsa da mekanik prob sisteminden dolayı incelenen numuneye erişimi kısıtlamaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için ekstra yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca STM'lerde olduğu gibi titreşim gibi dış etkiler ölçümü etkilemektedir (Bellitto, 2012; Braga ve Ricci, 2004; Haugstad, 2012).

Elektron Mikroskopisi

Elektron mikroskopları, elektronların manyetik alan kullanılarak odaklanması prensibine dayanır ve incelenecek olan yüzeye elektrostatik ya da belirli bir spektral aralıkta elektromanyetik dalga düşürerek görüntüleme yapar. Elektron mikroskobu bir alet tasarımı değildir. İçerisinde farklı tasarımları olan ve incelenecek olan yüzeye elektrostatik ya da belirli bir spektral aralıkta elektromanyetik dalga düşürerek görüntüleme yapan mikroskopi ailesidir. İncelenen numunelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin daha detaylı olarak belirlenebilmesi için kullanılacak olan dalgaboyunun atomik boyutların altına inmesi gerekmektedir. Bu nedenle elektron mikroskopisi başlığı altında, transmisyon elektron mikroskobu (transmission electron microscope (TEM)) ve taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope (SEM)) gibi istenilen dalgaboyuna ulaşabilen iki farklı mikroskop türü geliştirilmiştir (Watt, 1997; Yıldız, 2010).

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM): Taramalı elektron mikroskopları incelenecek olan numuneye elektron ışını gönderir. Yüzeyden saçılan elektron ışınları taranarak görüntüleme gerçekleştirilir. Bu yapısından dolayı taramalı elektron mikroskobu olarak adlandırılmıştır. Elektronlar küçük dalgaboylarına ulaşabildiği için yüzey hakkında daha detaylı bilgi elde edilmesine olanak sağlar. SEM, incelenen numuneyi bir milyon kat büyütebilir. Ayrıca yüzey ile elektron ışınlarının etkileşimi sonucunda yüzey hakkında çok fazla bilgi edinmemizi sağlayan x ışınları yayılır. SEM'in bu avantajları sayesinde malzeme endüstrisinde ve malzeme çözümlemesi yapılan bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

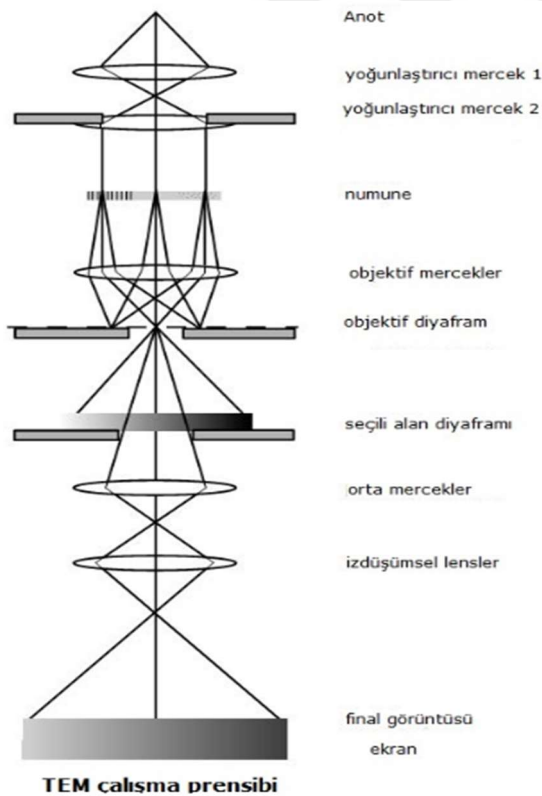


Şekil 11. Taramalı elektron mikroskobunun yapısı ve çalışma prensibi (Kuru, 2023).

SEM'i kullanılabilir kılan güçlü yönlerinden bazıları; çok çeşitli örnekler inceleyebilmesi, kolay ve hızlı numune hazırlama, otomatik ekipmanları sayesinde hızlı kullanım kolaylığı, hızlı görüntüleme ve analiz yapabilmesi, derin odaklama kapasitesi, az miktarda ışın hasarı dışında tahribatsız olması, kolay bulunabilirlik, birçok görüntü modunun yanı sıra spektroskopi ve kırınım analizi yapabilme özelliklerine sahiptir. Öte yandan SEM, örneklem büyüklüğünün sınırlılığı, sadece katı numuneleri inceleyebilmesi, numune incelemesinin sadece vakum ortamında yapılabilmesi, iletken olmayan numunelerin kaplanması gerektiği ve ayrıca yaklaşık 25 metrekarelik geniş bir kurulum alanına ihtiyacı duyması gibi sınırlılıklara sahiptir. Tüm bu avantaj ve dezavantajları göz önüne alındığında SEM, uçak, otomotiv ve savunma sanayinde yapılan metallerin dayanıklılık ölçümleri, doku bakteri gibi organik yapıların görüntülenmesi, kimsyal bileşiklerin yapılarının incelenmesi ve bilimsel araştırmalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Akçayöz vd., 2019; Bozzola ve Russell, 1999; Ul-Hamid, 2018).

Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM): Transmisyon elektron mikroskobunda görüntü oluşturabilmek için gereken temel olgu kırınımdır. Davisson ve Germer tarafından ilk kez gözlenen potansiyel fark uygulanarak hızlandırılan elektronların dalgaboylarının atomik

boyutlara yaklaştığı görülmüştür. Çok küçük dalgaboylu elektronlar düzenli kristal atomlarına çarpıtılarak kırınıma uğrattılır. Hızlandırılan elektronlar katı bir numunenin içerisine nüfuz edebilir. Bu şekilde ince numunelerden geçebilen elektronlardan transmisyon elektron kırınım modeli oluşturmak mümkün olmuştur. İletilen elektronlar çeşitli lensler tarafından odaklanarak analiz edilebilir. İlk kez 1940'lı yılların başlarında kullanılmaya başlanan transmisyon elektron mikroskobunda incelenecek olan numunenin geçirgen olması gerekmektedir. Bu nedenle bu yöntem ile incelenen numunelerin 50-500 nm aralığında inceliğe sahip olması gerekmektedir. TEM'ler temel olarak optik mikroskoplarla aynı presipte çalıştırılmaktadır. Başka bir deyişle TEM, elektron ışınını tüm numune üzerine düşürür. İnce numune içerisinden geçen ışınlar arka tarafta çeşitli mercekler tarafından odaklanarak görüntü algılayıcılara aktarılır. İncelenen numunelerin 50-500 nm aralığındaki bir incelikte olmasının sebebi, özellikle hücre gibi organik yapılarda renklendirmenin düzgün bir şekilde elde edilmek istenmesidir.



Şekil 12. Transmisyon elektron mikroskobunun yapısı ve çalışma prensibi (“Elektron Mikroskoplarının Çalışma Prensibi”, 2014).

Transmisyon elektron mikroskobu, objektif merceği, bir ara mercek ve bir projektör merceği olmak üzere temelde üç sistemin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bunun dışında cihazların türüne göre farklı mercek ve lens sistemlerinin de olduğu çeşitler de vardır. TEM ile elde edilen görüntülerin çözünürlük kalitesi objektif merceğinin özelliklerine bağlıdır. Kırınım kontrastlı görüntüler için ise ışın seçim açıklıkları önemlidir. Transmisyon elektron mikroskoplarının ince yüzeylerin yapı ve özelliklerinin incelenmesinde kullanılmasının yanı sıra, hücre gibi organik yapıların iç yapı ve mekanizmalarının incelenmesi için kullanılmaktadır. İncelenen numunenin ayrıntılı olarak görüntülenen kısmının numuneye göre oldukça küçük bir bölge olması, kaliteli görüntü elde edilebilmesi için numunenin sabit dolayısıyla ölü hücreler olması ve renklendirmede yaşanan süreçler bu mikroskobun sınırlılıkları arasındadır (Amelinckx vd., 2008; Egerton, 2005; Quagliotti, 2017; Winey vd., 2014).

X Işını Mikroskopisi

X ışını mikroskopi çalışmaları 1950'li yıllarda başlamıştır. X ışını mikroskoplarında numune incelenmek için x ışınlarına maruz bırakılır. Bu sayede mikro ve nano çözünürlüklerde görüntü elde edilir. Birçok farklı X ışını mikroskop çeşidi vardır. Bunlardan bazıları ayrıntılı görüntü elde edebilmek için fresnel bölge plakaları gibi mercekler kullanırken, bazıları da x ışını mercekleri kullanmaktadır. Katı numunelerin kırılma indisleri x ışını dalgaboylarında 1'e yakın olduğu için dışbükey ve içbükey merceklerle odaklanamaz. Ayrıca numune genellikle vakum ortamındadır çünkü incelenen sıvı numuneler yeterince soğutulmaz ise x ışınına maruz kaldığında buharlaşmaktadır (Egerton, 2005; Jacobsen, 2019; Sayre ve Chapman, 1995).

X ışını mikroskopları, kozmik x ışını kaynaklarının araştırılmasında, füzyon enerjisindeki sıcak plazmaların incelenmesinde, mikro yapı üretimlerinde, atomik ve moleküler yapıların incelenmesinin yanında katı hal ve yüzey analizlerinde ve hücre bakteri gibi canlı organizmaların incelenmesinde kullanılmaktadır. X ışını mikroskopları diğer mikroskopi yöntemlerine göre daha kısa pozlama sürelerine sahiptir. Bu aynı zamanda

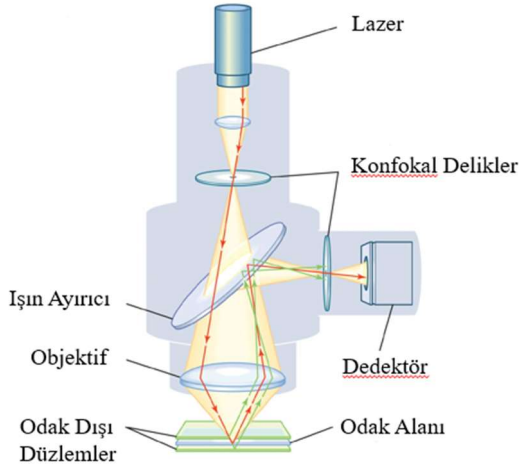
numuneye uygulanan radyasyonun düşük olmasını sağlamaktadır (Schmahl ve Rudolph, 2013).

1.5.2. Lazer ile Mikrometroloji

Son 50-60 yılda optik cihazlar, mikroeletromekanik parçalar ve çeşitli yüzey analizlerinde hassas ölçüm yapabilmek için oldukça önem arz etmektedir. Klasik yöntemlerde numunenin gerçek değerlere en yakın analizlerinin yapılmasında karşılaşılan zorluklar yeni yöntemlerin keşfedilmesine neden olmuştur. Son yıllarda oldukça fazla tercih edilen lazer odaklı mikrometroloji çalışmaları klasik yöntemlerde karşılaşılan bu zorlukların üstesinden gelmekte oldukça katkı sağlamaktadır.

Konfokal Mikroskopi

İlk konfokal mikroskobunun patenti Marvin Minsky tarafından 1957 yılında alınmıştır. Konfokal mikroskopisi, görüntü oluşumu sırasında odak dışından gelen ışınları engellemek için uzamsal bir delik kullanılarak numunenin mikroskobik görüntüsünün optik çözünürlüğünü ve kontrastını arttırmayı amaçlayan bir görüntüleme tekniğidir. Işık objektif lensler tarafından görüntü düzlemindeki küçük bir noktaya odaklanır. Odak düzleminin diğer kısımlarından gelen ışınlar deliği çevreleyen opak madde tarafından engellenir. Böyle bir sistemde numunenin yanal ayrıntılarını görüntülemek zordur. Ancak Minsky'nin tasarımında bu engel, numuneyi yan çevirerek aşılmıştır. Böylece incelenen nokta görüntü boyunca taranarak görüntü bilgileri toplanır. Bu yöntemin yavaşlığı ve titreşime olan duyarlılığı, 1980'lerde numune boyunca aydınlatmayı rasterleştirilmenin geliştirilmesiyle aşılmıştır.



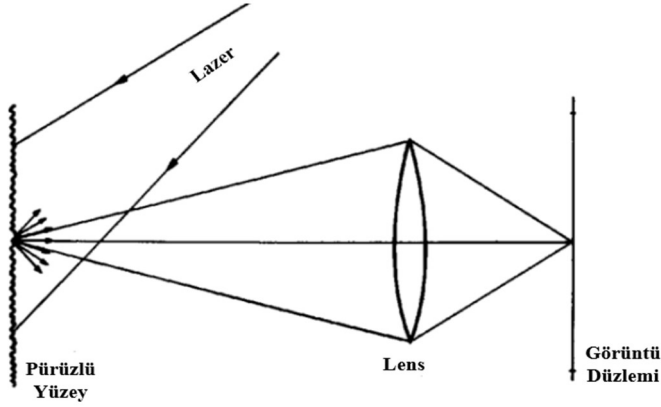
Şekil 13. Konfokal mikroskobunun çalışma prensibi (Shannon and Ford, 2023).

Günümüzde konfokal mikroskopide en çok kullanılan teknik lazer taramalı konfokal mikroskoplardır (CLSM). Geleneksel floresan sistemlerinin aksine bu sistemlerde odak dışı ışınlar engellenir. Bu sistemde objektif merceği aynı zamanda yoğunlaştırıcı görevi de görür. Numune üzerine düşürülerek geri dönen lazer ışığı dikromatik ışın ayırıcı ile dedektöre gitmek üzere konfokal deliğe yönlendirilir. Dedektöre gelen sinyaller bilgisayar ortamında depolanarak analiz edilir. Geleneksel konfokal yöntemlerdeki numunenin civa ya da ksenon kaynağından gelen ışıkla yıkanması yerine CLSM’de numuneye gönderilen lazer hüzmesi taranır (Jerome and Price, 2018; Paddock, 1999). Konfokal mikroskopi, üç boyutlu yapıların gözlemlenmesi için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Özellikle biyomedikal bilimlerde canlı hücrelerin üç boyutlu olarak görüntülenmesi, hücre içi yapıların uzamsal dağılımlarının belirlenmesi, canlı hücre yapılarındaki fizyolojik olayların izlenmesi gibi alanlarda oldukça fazla tercih edilmektedir (Paddock vd., 2014).

Speckle (Benek) Metroloji

Speckle (benek) metroloji, pürüzlü yüzeye lazer ışığının yansıtılmasıyla üretilen ve elde edilen desenin analiz edilmesiyle yapılan bir ölçüm tekniğidir. Lazer olgusu ortaya çıkmadan önce yüzey ölçümleri genellikle mekanik profilometre ile yapılmaktaydı. Ancak bu yöntemin incelenen yüzeye zarar vermesi ve dolayısıyla ölçümü etkilemesi sebebiyle yeterince verimli olamamıştır. Özellikle lazer ışını kullanılarak yapılan benek analizleri

temassız ve pratik bir yöntem olmuştur. Gelen ışın, numune üzerine düşer ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan faz kaymaları ile bir girişim deseni elde edilir. Girişim deseni, ışının gelme açısından ya da yüzeydeki pürüzlülüğünden kolayca etkilenir. Bu nedenle benek deseni üzerinde bu farklılıklar incelenebilmektedir. Benek metrolojisi temel olarak hafif değişikliklere sahip iki benek modeli arasındaki korelasyonun analizi olarak tanımlanabilir (Dudderar ve Simpkins, 1982; Erf, 1978).



Şekil 14. Speckle (Benek) mikroskopisi çalışma prensibi. (Balamurugan and Muruganand, 2013).

Benekleme methodu; göz kusurlarının belirlenmesine yönelik yapılan analizler, holografî, yüzey tarama ve görüntüleme çalışmaları, radar sistemleri, spektroskopi, optik sistemlerin transfer fonksiyonlarının belirlenmesi, astronomi çalışmaları, interferometri, optik sistem aberasyonları, atmosferik türbülansların ölçülmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Françon, 2012).

Tablo 2

Mikroskopi Çeşitleri ve uygulamaları. (Aswatha vd., 2022; Choudhary ve Choudhary, 2017; Eaton ve West, 2010; Marturi, 2013; Robson vd., 2018; Tabib-Azar, 1999; Zarbock ve Ley, 2009)

	STM	AFM	SEM	TEM	IŞIK	KONFOKAL
Kullanım Alanları	Atomik yüzey analizleri	Malzeme bilimi, Astronomi, Bilimsel araştırmalar, Biyoloji, Mikroelektronik	Malzeme Endüstrisi, Bilimsel araştırmalar, Teknoloji	Bilimsel araştırmalar, Teknoloji	Bilimsel Çalışmalar	Kalınlık ölçümleri, Bilimsel Çalışmalar, Biyomedikal bilimler
Uygulama Ortamı	Hava, Vakum	Hepsi	Vakum	Vakum	Çevresel ortam, Vakum Sıvı	Hepsi
Boyut	3D	3D	2D	2D	3D	3D
İncelenen Örnek	İletken/Yarı-İletken	Hepsi	İletken/Yarı-İletken	İletken/Yarı-İletken	Hepsi	Canlı Hücre
Çözünürlük	Yanal 0.1 nm, derinlik 0.01 nm	0.1 nm	5 nm	0.1 nm	>0.2 µm	Yanal 180 nm, Eksenel 500 nm
Görüntüleme Oluşum Yöntemi	Moleküler Mekanik Prob	Moleküler Mekanik Prob	Yüksek Enerjili Elektron Işını (1~40 kV)	Yüksek Enerjili Elektron Işını (100 kV üzeri)	Görünür Bölge Işını	Lazer

Avantajlar	Atomik boyutta ölçüm, Düşük Sıcaklıklar da Çalışma	Nanometre mertebesinde çözünürlük, Numunenin homojenitesi ve morfolojik özelliklerinin 3D görüntünmesi, Görüntüleme ortamının çeşitliliği, Numune yüzeyinin mekanik ve kimyasal özelliklerini belirleyebilir.	1000000x Büyütme, Hızlı Görüntüleme , Dijital Analiz,	1000000x Büyütme, Kullanımı Kolay,	Hızlı, Basit, Boyut-Şekil ve homojenlik hakkında bilgi sağlar	Üstün görüntü netliği, 3D görüntü sağlama, Numunelerin iç yapılarını görselleştirebilmesi
Dezavantajlar	Titreşime Duyarlı, Pahalı, Kırılgan	Yavaş tarama hızı, Görüntü kalitesini prob ucuna bağlı	Pahalı, Sadece vakumda inceleme yapılması, Büyük fiziksel yapısı, Manyetik alana ve Titreşime duyarlı	Büyük ve Pahalı, Numune Hazırlama Zorluğu, Numune sınırlılığı, Titreşim ve elektromanyetik alan Duyarlılığı	Görüntü hakkında kapsamlı ve yeterli bilgi sağlamaz	Aşırı ışık toksitesisi, Yavaş tarama, Pahalı

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında konu ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

Yıldız gölgelerinin optik modellenmesinin yapıldığı bir çalışmada, fresnel kırınım denklemini keyfi bir kenar etrafında tek boyutlu integrallere formüle ederek bir algoritma oluşturulmuştur. Oluşturulan algoritma, boyut ölçeklerinde geniş bir aralığa sahip şekillerden kırınımın hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu sayede yıldız gölgesi teknolojisinin hassasiyet analizlerinin yapılmasında donanımlı bir araç haline gelmektedir. Ayrıca çalışmada kenar kırınım algoritmaları ile dalga cephesi hatalarını uygulamak için bir yöntem sunulmuştur. Çalışmada oluşturulan modellerin, yıldız gölgesi teknolojisinin geliştirilmesine yönelik araştırmalarda uygulanabileceği belirtilmiştir (Harnes vd., 2018).

Braunsmann ve arkadaşları, bir bant genişliğinde nanometre altı çözünürlüğe sahip nesnelerin paralel kaymasını analiz etmek için bıçak kenarı (Knife-Edge) tekniğini kullanmışlardır. Bu sistem yüksek hızlı atomik kuvvet mikroskoplarında yer değiştirme sensörlerinin tasarlanması için oldukça kullanışlıdır. Yapılan deneyde, 1 Hz-1.1 MHz bant genişliği içerisinde 0.8 nanometrelik bir sensör gürültüsü elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemin, fiziksel numune özelliklerinin yüksek hızda ölçülmesine izin verdiği ve ayrıca z-piezo yer değiştirmelerini ölçebildiği raporlanmıştır (Braunsmann vd., 2014).

Lee ve arkadaşları, kavisli kenar (Curved-Edge) kırınım tekniğini kullanarak mil metrolojisi için yeni bir algılama yöntemi geliştirmişlerdir. Mil yer değiştirmesi kavisli kenar tipi sensör (CES) kullanılarak ölçülmüştür. CES çıktıları ise kapasitif tipi sensörler (CS) ile ölçülerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Sonuçlarda CES'in CS'ye göre; algılama bant genişliği, ölçüm aralığı, prob ve hedef yüzey arasında elektriksel gürültü sorunu olmaması, sensör hassasiyetinin çeşitli parametrelere göre değişmemesi gibi niteliklerinden dolayı daha kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmada oluşturulan modelin iş mili hata

ölçümlerinde, iş mili fiziksel yapılarının ölçümlerinde ve iş mili sistemlerinin dinamik karakterizasyonlarında kullanılabileceği öngörülmektedir (Lee vd., 2019).

Rusya sahilindeki petrol sondaj platformlarının temassız yatak konumlarının denetimi için optoelektronik bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemde üç boyutlu gözlem yapabilen yüksek verimli bir lazer ölçüm makinesi yapılmıştır. Fresnel yönteminin kullanıldığı araştırmada ölçüm hatası 1 μm 'ye kadar düşürülmüştür. Optik kırınım elementleri (DOE) kullanılarak yüzey pürüzlülüklerinin şekil ve çaplarının belirlenmesine yönelik yapılan analizlerde deneysel hata 2.5 μm 'yi aşmamıştır. Geliştirilen bu sistem ile Rus nükleer reaktörleri yakıt düzeneklerinin üretim ve iyileştirme süreçlerinde kullanılan ızgara ayırıcıları hakkında bilgi sahibi olunmuştur (Chugui, 2012).

Lee ve Park'ın 2018 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, dağlık bölgelerdeki engel parametreleri kullanılarak bıçak kenarı (Knife Edge) yaklaşımının bir alt yöntemi olan Bullington Yöntemi'ni geliştirilmesini amaçlamışlardır. Bu yöntemi geliştirmek amacıyla sinir ağı yaklaşımını önermişlerdir. Geliştirilen yöntem ile dağlık alanlardaki üç ve daha fazla engel bulunan yollarda uygulanabileceği raporlanmıştır. Ayrıca Bullington yönteminin; geleneksel kırınım yöntemleri ile kıyaslandığında 3.20 dB ortalama hata ve 2.11 dB standart sapma ile daha iyi sonuçlar verdiği raporlanmıştır (Lee ve Park, 2018).

Lee ve arkadaşları (2017), nanopozisyonlama aşaması uygulamaları için optik bıçak kenarı sensörünün (OKES) yüksek doğrusalılık, uzun menzil ve yüksek doğruluk gibi parametreler için ölçüm belirsizliklerini analiz etmişlerdir. Çalışmada, daha kısa OKES mesafesi, daha kısa dalgaboyu ve daha büyük ışın çapının yüksek sinyal-gürültü oranı gösterdiği belirlenmiştir. OKES, elektromanyetik dalga yayılım prensibi ile modellenerek sonuçlar deneysel olarak da doğrulamışlardır. Elde edilen veriler ışığında OKES'in konumlandırma doğruluğu, çözünürlüğü, doğrusalığı, bant genişliği, geniş çalışma aralığı ve düşük maliyeti nedeniyle metrolojide iyi bir alternatif olabileceği raporlanmıştır (Lee vd., 2017).

Santhanakrishman ve arkadaşları (2019), fotodedektörlerin kenarlarında eş zamanlı kırınım üretilmesi ve algılanması için optiksel bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem ile lazer ışığını, fotodedektör üzerindeki aktif ve opak bölge arasına düşürülmüştür. Bu sayede kırınım ve uyarılmış girişim fotodedektörün algılama bölgesinde aynı anda meydana gelebilmektedir. Böylece dedektör, kırınım sonucunda meydana gelen sinyal değişimlerini ayırt edebilmektedir. Oluşturulan bu yöntem ile geleneksel kenar kırınım problemlerinin basitleştirildiği ve ayrıca bu yöntemin ses ve titreşim algılama uygulamalarında da büyük faydalar sağlacağını raporlamışlardır (Santhanakrishman vd., 2019).

Chursin ve Federov (2015), geometrik gölge sınırlarını belirlemek ve kırınım modelini verimli bir şekilde çözebilmek amacıyla silindirik iş parçalarının üzerine lazer ışığı düşürerek çap ölçümü yapmışlardır. Bu amaçla iş parçası gölgesinin geometrik konumunu belirlemek için bir formül üretmişlerdir. Ayrıca fiziksel uygulamalar için bir algoritma oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda, silindirik iş parçalarının çapının lazer ile temassız bir şekilde ölçülmesini sağlayan ve yüksek hassiyette aletlerin tasarlanmasına olanak sağlayan bir yöntem geliştirmişlerdir (Chursin ve Federov, 2015).

Stefanovic ve arkadaşları (2017), yapmış oldukları çalışmada ekrandan keyfi uzaklıktaki keyfi boyutlara sahip nesnelere üzerinden oluşturulan kırınım desenlerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Oluşturulan yöntem, Fresnel-Kirchhoff integralinin sayısal olarak çözümlenmesine dayanmaktadır. Ayrıca kullanılan integral yöntemi ile yapılan hesaplamaların süreleri de incelenmiştir. Çalışma sonucunda Fresnel ve Fraunhofer kırınımında FFT (Fast Fourier Transform) kullanmanın hesaplama süresini azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca engel boyutundan kırınım deseninin tahmin eden bu yöntem ile optik iletişim ve optik fiberler gibi çalışma alanlarında ilerlemeler kaydedileceği öngörülmüştür (Stefanovic vd., 2017).

Yamamoto ve arkadaşları (2002), yapmış oldukları çalışmada parçacık ya da partikül halindeki malzemelerin kırınım modeli analizini gerçekleştirmişlerdir. Buna yönelik olarak küresel olmayan daire, elips, üçgen, dörtgen ve gerçek fitoplankton şeklindeki parçacıkların Fraunhofer kırınım modellerini oluşturarak incelemişlerdir. Sonuç olarak analizlerde elde

edilen sonuçların numunelerin gerçek boyutlarıyla uyumlu sonuçlar verdiğini raporlamışlardır. Dolayısıyla oluşturdukları yöntemin partikül boyut analizlerinde kullanılabilceğini öngörmüşlerdir (Yamamoto, Matsuyama ve Wada, 2002).

Kaya ve arkadaşlarının 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada, femtosaniye radyasyon ışınlarını kullanarak suda beyaz ışık oluşumlarını incelemişlerdir. Buna göre, Gauss ışınının enine uzamsal fazını bir Hermite-Gauss modu ile değiştirerek faz kesiklikleri ve daha dik yoğunluk gradyanları sergileyen ışınlar üretmişlerdir. Ayrıca uzamsal faz değişimlerine sahip ışınları için lazer yoğunluk dağılımları Fresnel-Kirchhoff integrali kullanarak modellemişlerdir. Analizler sonucunda teorik analizler ile deneysel sonuçlar arasında uyumluluk olduğunu raporlamışlardır (Kaya vd., 2012).

Önceki çalışmalar incelendiğinde, kırınım yöntemleri kullanılarak mikrometre altı titreşim ölçümlerinde hassasiyetin artırılması için farklı çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak literatürde kenar pürüzlülüğü, dalgaboyu ve farklı dalga modları gibi parametreler için ayrıntılı matematiksel çözümler sunan çalışmalar oldukça azdır. Literatürdeki bu eksiklikten yola çıkarak yapılan bu çalışma kapsamında Fresnel yaklaşımına farklı bir bakış açısı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu matematiksel yöntem kullanılarak farklı dalgaboylarında, farklı kenar pürüzlülüklerinde ve farklı dalga modlarında kırınım deseninin nasıl değiştiğine yönelik analizler yapılmıştır. Elde edilen teorik veriler deneysel verilerle karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konmuştur.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Elektromanyetik dalga denkleminin çözümü, tezde kullanılan dalga formlarının özellikleri ve matematiksel gösterimleri bu bölümde incelenmiştir. Elektromanyetik dalga denklemlerinin çözümünden başlayarak tez çalışması kapsamında oluşturulan alternatif Fresnel yaklaşımına kadar olan hesaplamalar bu bölümde sırasıyla incelenecektir.

3.1. Elektromanyetik Dalga Denkleminin Çözümü

Elektromanyetik dalgalar bir engel ile karşılaştıklarında kırınım olgusunu sergilerler. Maxwell denklemleri, kırınım da dahil olmak üzere ışığın maddesel ortam ile olan tüm etkileşimlerini tanımlayabilen mükemmel bir denklemler topluluğudur. Aşağıda Maxwell denklemlerinden yola çıkılarak dalga denkleminin türetilmesi incelenmiştir. Boş uzayda serbest akım yoğunluğu (J) ve serbest yük yoğunluğu (ρ) sıfır olacağından dolayı Maxwell denklemlerinin vektörel formları aşağıdaki şekilde temsil edilir.

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.4)$$

Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanarak elektromanyetik dalgaların tanımlaması yapılabilir. Denklem 3.3'ün curl'ü alınarak aşağıdaki form elde edilir.

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) \quad (3.5)$$

$\nabla \times B$ ifadesinin Denklem 3.4'teki açılımını Denklem 3.3 içerisine yerleştirdiğimizde,

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right] \quad (3.6)$$

ifadesi elde edilir. Vektörel eşitlikler işleme uygulandığında;

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla^2 E + \nabla \cdot (\nabla \cdot E) \quad (3.7)$$

Vektörel eşitlikler kullanılarak Laplace dönüşümü aşağıdaki ifade ile elde edilebilir.

$$-\nabla^2 E + \nabla \cdot (\nabla \cdot E) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

Maxwell'in birinci denkleminde (Denklem 3.1), elektrik alanın diverjansı 0 olduğundan dolayı dalga denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

Benzer şekilde manyetik alan için dalga denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\nabla^2 B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

Boş uzayda ışık hızı;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (3.11)$$

ifadesi ile tanımlanır. Bu ifade dalga denklemi içerisine yerleştirildiğinde, elektrik ve manyetik alanlar için dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Kao ve Chang, 2020).

$$\nabla^2 E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.12)$$

$$\nabla^2 B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (3.13)$$

3.2. Gauss ve Bessel Dalga Denklemleri

Gauss ışını; kolay tahmin edilebilirliği, kolay karakterizasyonu ve basit yapısı nedeniyle en çok tercih edilen dalga profilidir. Ayrıca diğer ışın profillerinin tanımlanması ve nitelendirilmesinde temel kriter Gauss profili olmuştur (Alda, 2003). Lazer ışını tanımlayan Gauss profilinin sabit genlikli gösterimi aşağıda verilmiştir.

$$E(x, y, z, t) = A(x, y, z) e^{j(kz - \omega t)} \quad (3.14)$$

Eşitlikte verilen $A(x, y, z)$, z yayılma yönü boyunca değişen enine Gauss profilidir. Gauss profilinin açık gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$A(x, y, z) = \frac{1}{q(z)} \exp \left[-jk \frac{x^2 + y^2}{2} \cdot \frac{1}{q(z)} \right] \quad (3.15)$$

q parametresi “kompleks ışın parametresi” olarak adlandırılır ve matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} \quad (3.16)$$

Bu ifadede verilen R , dalga cephesinin eğrilik yarıçapıdır ve w ise beam waist'tir. Buradan yola çıkarak elektrik alanın büyüklüğü aşağıdaki ifade ile verilebilir.

$$|E(x, y, z, t)| = \left| A(x, y, z) \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2} \right] \right| \quad (3.17)$$

İfade edilen elektrik alana karşılık gelen yoğunluk (intensity) profili ise aşağıdaki gibidir (Anonim).

$$I(z, y, z) \sim \left| \frac{1}{q(z)} \right|^2 \exp \left[-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2} \right] \quad (3.18)$$

Bessel ışınları yayılma doğrultusunda ilerlerken çok az bir uzaysal dağılıma sahip olmaları nedeniyle uzun mesafeleri formunu kaybetmeden katedebilen lokalize dalgalardır. Bu özellikleri sayesinde stabil enerji akışları sağlayabilmektedirler. Nanoparçacık yönlendirme, spektroskopi, mikroskopi, kuantum anahtarlama gibi alanlarda sıklıkla tercih edilirler (Vicente ve Caloz, 2021). Uzay ve zamanın skaler fonksiyonu olarak n 'inci mertebeden Bessel ışını;

$$E_n(r, \varphi, z) = A e^{ik_z z} J_n(k_r r) e^{\pm in\varphi} \quad (3.19)$$

ile tanımlanmaktadır. Burada A elektrik alan genliği, J_n n'inci mertebeden Bessel fonksiyonu, k_z ve k_r , $k = \sqrt{k_z^2 + k_r^2} = 2\pi / \lambda$ ile verilen boylamsal ve radyal dalga vektörleri ve ayrıca r , ϕ ve z sırasıyla radyal, azimutal ve boyuna bileşenlerdir (McGloin and Dholakia, 2005). Bessel ışınının yoğunluk profili ise;

$$I(z) = \left| \sum_{j=0}^N \sqrt{\eta_j} u_j(z) \right|^2 \quad (3.20)$$

ifadesi ile temsil edilir. Denklem (3.20)'de verilen N , en yüksek kırınım derecesidir, $u_j(z)$ yayılma eksenine ve η_j ise j 'inci dereceden kırınım verimliliğidir (Kizuka vd., 2008).

3.3. Skaler Kırınım Teorisi

Bu bölümde Fresnel'in, Huygens yaklaşımını formüleştirmesi ele alınmıştır. Küresel bir dalganın Maxwell denklemlerini karşılayabilmesi için açıklık ile görüntüleme ekranı arasındaki mesafenin kullanılan dalgaboyundan büyük olması gerekmektedir. Kırınım deseninin elde edildiği bir düzende monokromatik ışığın kırınımına uğradığı açıklıkta ışığın alan dağılımı $E(x', y', z = 0)$ ile ifade edilebilir. Diğer yandan açıklıktaki her bir noktanın katkısı yani ekran üzerine düşen ışığın alan dağılımı ise $E(x, y, z)$ ile ifade edilebilir. Buradan yola çıkarak Huygens-Fresnel kırınım formülü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E(x, y, z) = -\frac{i}{\lambda} \iint_{\text{açıklık}} E(x', y', 0) \frac{e^{ikR}}{R} dx' dy' \quad (3.21)$$

Burada $-i/\lambda$ ifadesi doğru faz ve alan gücünü tanımlamaktadır. R , ekran üzerindeki (x, y, z) noktasında kesişen dalgaların yarıçapıdır. Matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$R = \sqrt{(x - x') + (y - y') + z^2} \quad (3.22)$$

Frekans ω ile temsil edilen bir ışık alanı;

$$E = E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)} \quad (3.23)$$

ile gösterilir. Burada $k \equiv n\omega / c$ ile tanımlanır ve dalga vektörünün büyüklüğünü tanımlar. İfadenin dalga denklemindeki zaman türevi aşağıdaki gibidir.

$$\nabla^2 E(r) + k^2 E(r) = 0 \quad (3.23)$$

Denklemin 3.23, $E(r)$ 'nin sadece büyüklüğü göz önüne alınarak skaler formda ifade edilmiştir ve Skaler Helmholtz Eşitliği olarak adlandırılır. Elde edilen bu form, zaman bağımlılığını ortadan kaldırarak dalga denkleminin tek bir frekansta yazılabilesine olanak sağlamaktadır. Tam dalga çözümünün elde edilebilmesi için denkleme $e^{-i\omega t}$ ifadesi eklenmelidir. Aşağıdaki gibi yazıldığında Skaler ve vektörel Helmholtz denklemleri birbirleri ile uyumaktadır.

$$E(r) = r \times \nabla E_{skaler}(r) \quad (3.25)$$

Küresel bir dalga için Skaler Helmholtz denklemi;

$$E_{skaler}(r) = r_0 E_0 e^{ikr} / r \quad (3.26)$$

Farklı bir çözüm ise aşağıdaki gibidir.

$$E_{skaler}(r) = r_0 E_0 \left(1 - \frac{i}{kr}\right) \frac{e^{ikr}}{r} \cos \theta \quad (3.27)$$

Skaler formu verilen bu ifadenin vektörel formda gösterimi ise aşağıda verilmiştir.

$$E(r) = -\hat{\phi} r_0 E_0 \left(1 - \frac{i}{kr}\right) \frac{e^{ikr}}{r} \sin \theta \quad (3.28)$$

Gustav Kirchhoff, Fresnel'in kırınım förmülünde küçük düzenlemeler yaparak aşağıdaki haline getirmiştir.

$$E(x, y, z) = -\frac{i}{\lambda} \iint_{\text{açıklık}} E(x', y', 0) \frac{e^{ikR}}{R} \left[\frac{1 + \cos(\hat{R}, \hat{z})}{2} \right] dx' dy' \quad (3.29)$$

Denklem içerisine yerleştirilen köşeli parantez içerisindeki ifade, Kirchhoff tarafından eklenmiştir ve eğiklik faktörü olarak tanımlanmaktadır. Gözlem noktası +z yönünde olduğunda eğiklik faktörü yaklaşık olarak 1'e tekabül etmektedir. Işık alanı -z yönünde yol aldığı anda ise faktör değerinin sıfırdır. Kirchhoff bu eklemesi ile ışığın Fresnel'in formülündeki eksikliği gidermiştir.

Denklem 1.5'te poynting vektörü verilmiştir. Buradan yola çıkarak poynting vektörünün ortalama değeri belirlenebilir.

$$\vec{S}(x, t) = \frac{1}{\mu_0} \vec{E}(x, t) \times \vec{B}(x, t) = \frac{E_0 B_0}{\mu_0} \sin^2(kx - \omega t) \hat{i} \quad (3.30)$$

$$S_x(x,t) = \frac{E_0 B_0}{\mu_0} \sin^2(kx - \omega t) = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} [1 - \cos 2(kx - \omega t)] \quad (3.31)$$

$$I = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 \quad (3.32)$$

3.3.1. Fresnel Yaklaşımı

Küçük açı ile gerçekleşen kırınımlarda geçerli olan bu yaklaşımda temel kriterlerden biri Fresnel sayısının 1'den büyük olması durumudur. Fresnel sayısı aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$F = \frac{\Lambda^2}{d\lambda} \quad (3.33)$$

Burada; Λ engelin boyutu, d engel ile gözlem ekranı arasındaki mesafe ve λ monokromatik ışığın dalgaboyudur. Fresnel sayısı 1'den büyük olduğu ve gerekli kriterler sağlandıktan sonra Fresnel yaklaşımı uygulanabilir. Ayrıca Fresnel yaklaşımında eğiklik faktörü 1'e eşit olduğu kabulü yapılır ve R ile z mesafeleri neredeyse eşitlenmiş olur. Bu sayede, x' ve y' bağımlılığı ortadan kaldırılarak integralin dışarısına rahatça çıkarılabilir. Buna göre;

$$R = z \sqrt{1 + \frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2z^2}} \cong z \left[1 + \frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2z^2} + \dots \right] \quad (3.34)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade Huygens-Fresnel kırınım formülünün içerisine yerleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir (Peatross ve Ware, 2011).

$$E(x, y, z) \cong -\frac{ie^{ikz} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)}}{\lambda z} \iint_{\text{açıklık}} E(x', y', 0) e^{i\frac{k}{2z}(x'^2+y'^2)} e^{-i\frac{k}{z}(xx'+yy')} dx' dy' \quad (3.35)$$

Denklem 3.32'de verilen Fresnel yaklaşımının Gauss dalgası için açık formu;

$$E(x, y, z = d) \cong -\frac{e^{ikd} e^{i\frac{k}{2d}(x^2+y^2)}}{\lambda d} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0 e^{-\frac{x'^2+y'^2}{w_0^2}} e^{i\frac{k}{2d}(x'^2+y'^2)} e^{-i\frac{k}{d}(xx'+yy')} e^{i\varphi(x',y')} dx' dy' \quad (3.36)$$

haline gelir. Burada d engel ile gözlem ekranı arasındaki mesafedir. Ayrıca integral içerisindeki $e^{-\frac{x'^2+y'^2}{w_0^2}}$ ifadesi Gauss ışınının yayılımını temsil etmektedir. İntegral içerisindeki son eksponansiyelli ifade olan $e^{i\varphi(x',y')}$ ise faz faktörüdür. Faz faktörü içerisindeki x' ve y' koordinatları $e^{i\varphi_x(x')}$ ve $e^{i\varphi_y(y')}$ şeklinde yazılarak birbirlerinden bağımsız koordinatlar olarak yazılmaktadır (Kaya vd., 2012).

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında Denklem 3.33'ten yola çıkılarak engel pürüzleri ve dalga boyunun kırınım deseni üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk olarak x' ve y' eksenlerini birbirlerine bağlamak için Euler eşitliğinden yararlanılmıştır.

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad (3.37)$$

Euler eşitliği kullanılarak revize edilen Fresnel yaklaşımı aşağıdaki forma dönüşmektedir.

$$E(x, y, z = d) \cong -\frac{ie^{ikd} e^{i\frac{k}{2d}(x^2+y^2)}}{\lambda d} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0 e^{-\frac{x'^2+y'^2}{w_0^2}} e^{i\frac{k}{2d}(x'^2+y'^2)} e^{-i\frac{k}{d}(xx'+yy')} e^{i\pi x'} dx' dy' \quad (3.38)$$

$$F = \frac{\Lambda^2}{d\lambda} \quad (3.39)$$

Gerekli parametreler eşitliğe yerleştirilerek yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değer 1'den çok küçük olduğu zaman Fraunhofer yaklaşımı kullanılırken, 1'den büyük değerlerde ise Fresnel yaklaşımı kullanılmaktadır. 1 değeri burada eşik olarak nitelendirilmektedir. Bükülen ışın yakın alan sınırları içerisinde formunu koruyarak ilerlemeye devam ederken, Fresnel sınırını aştıktan sonra bükülen dalgalar artık düzlem dalga formuna benzeyerek kırınım etkileri görünmez hale gelmeye başlar. Dolayısıyla bu durumda Fraunhofer yaklaşımına geçilmiş olur. Bu yaklaşımlar farklı mesafelere hitap ettikleri için kullanım alanları da farklılık göstermektedir. Fresnel yaklaşımı; süper odaklama, malzemelerin kalınlık ölçümleri, spektral çizgilerin karakterizasyonu gibi yakın alan odaklı çalışmalarda kullanılırken, Fraunhofer yaklaşımı ise genellikle plazma-türbülans ölçümleri, metroloji ve parçacık boyutlandırma gibi mesafenin sınırsız olduğu çalışmalarda kullanılmaktadır (Shetty and Bingi, 2020; Vitasek et al., 2011). Bu tez çalışmasında kullanılan değerler için Fresnel numarası $F=53.3965$ olarak bulunmuştur.

Çalışma kapsamında farklı dalgaboyları, yüzey pürüzlülükleri ve mesafeler için kırınım analizleri Wolfram Mathematica programı ile yapılmıştır. Wolfram Mathematica, C programlama dillerine benzer olan ve sembolik-sayısal hesaplamalar yapılmasında büyük kolaylıklar sağlayan bir programdır. Sistem modellemeleri, cebir ve mantık, matematiksel fonksiyonlar, sistem modellemeleri, mühendislik ve bilimsel çalışma alanlarında kolay bir kullanıma sahip arayüzü sayesinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Ayrıca bu çalışmada da olduğu gibi sinyal analiz hesaplamaları ve bu hesaplamalara yönelik görsel ve grafiklerin oluşturulmasında ve anlamlandırılmasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada Wolfram Mathematica programı ile, lazer kaynağından çıkan ışının bir kenara çarparak oluşturduğu kırınım deseni farklı pürüzlülük boyları ve farklı dalgaboyları için ayrı ayrı hesaplanarak görselleştirilmiştir. Elde edilen grafikler bir sonraki bölümde deneysel analizler sonucunda elde edilen grafikler ile karşılaştırılmıştır.

Teorik hesaplamalarda belirlenen parametreler doğrultusunda deneysel çalışmalar Çanakkale 18 Mart Üniversite Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenekte lazer kaynağı olarak 633 nm dalga boyu için ideal olan THORLAB He-Ne lazer kullanılmıştır. Bu tip lazerler deneysel düzeneklere kolayca yerleştirilebilmelerinden dolayı oldukça kullanışlı cihazlardır. Ayrıca oldukça yüksek ışın kalitesi ve yüksek koherentliğe sahip olması nedeniyle özellikle bilimsel çalışmalarda tercih edilme oranı yüksektir. Metroloji, DNA dizilimi analizi, akış sitometrisi, konfokal mikroskopi, opaklık izleme, hematoloji, yarı iletken kontrolü, opaklık analizi, deniz görsel yönlendirme sistemleri ve polarizasyon deneyleri gibi birçok uygulama alanında He-Ne lazerler kullanılmaktadır.



Şekil 16. He-Ne lazer (Thorlabs, 2023).

SLM (Spatial Light Modulator) cihazı olarak “THORLABS EXULUS-HD1/M – Spatial Light Modulator” kullanılmıştır. SLM cihazı (Mekansal Işık Modülatörü), özellikle bilimsel çalışmalarda sıkça kullanılan ayrı ayrı adreslenebilir piksellerle yüksek çözünürlüklü, yüksek hızlı yansıtıcı faz modülasyonu üretmek için silikon üzerinde sıvı kristal (LCoS) teknolojisi kullanan aletlerdir. Temel prensibi optik fazları modüle etmektir. Dalga cephesi düzeltmeleri, optik yakalama, ışın yönlendirme, titreşim şekillendirme, holografi, litografi, lazer işleme ve optik manipülasyon gibi geniş uygulama alanlarına sahiptir. Çalışma kapsamında kullanılan modelin özellikleri aşağıda verilmiştir.

- 400 - 850 nm çalışma aralığı için Alüminyum Kaplamalı Silikon Üzerinde Sıvı Kristal (LCoS)
- 1920 x 1080 (Full HD) Çözünürlük
- HDMI uyumlu ve USB 2.0 bağlantı desteği
- 45 derecelik optik eksen
- Boyutları: 172,0 mm x 110,0 mm x 81,6 mm
- Genişletilmiş faz kaydırma aralığı ve yüksek kare hızı modu (180 Hz'e kadar) dahil olmak üzere dört çalışma modu
- Hassas hizalama
- 6.4 μm piksel aralığı
- 633 nm'de 2π Faz/Geciktirme aralığı
- Kare hızı 60 Hz (Çerçeve güçlendirme ile 180 Hz)



Şekil 17. SLM (Spatial Light Modulator) (Thorlabs, 2022).

SLM cihazında engelin görselleştirilmesi için Matlab R2015a paket programında istenilen boyutlardaki yüzey pürüzlülükleri kodlanarak png uzantılı dosyalar haline getirilmiştir. Belirlenen pürüzlülük boyutlarındaki engeller kodlanarak png dosyaları SLM arayüzüne gönderilerek kaynaktan çıkan ışının burada kırılarak yansıtılması sağlanmıştır.

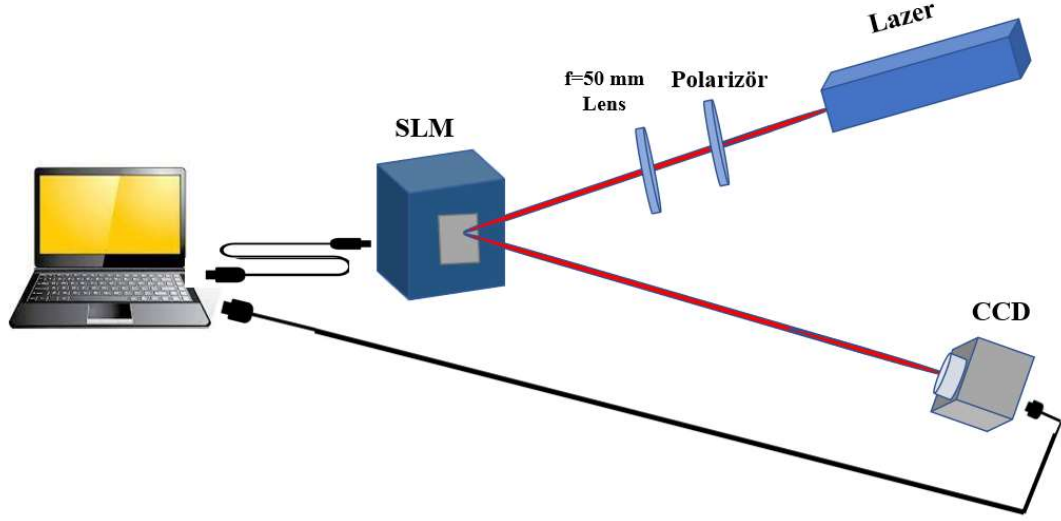
SLM cihazından yansıyan sinyal görüntülerini elde etmek için “Basler a2A1920” kullanılmıştır. CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor) sensöre sahip bu USB kamera 2.3 megapiksel çözünürlüğe sahiptir ve saniyede 160 (FPS) kare olanağı sunmaktadır. 1920×1200 piksel çözünürlüğe sahip kamera aynı zamanda 3.45 μm × 3.45 μm piksel boyutlarına sahiptir. Ayrıca 2.8 W’lık güç gereksinimi vardır. CMOS sensörlerde pikseller ayrı ayrı işlem yapabilmesi sayesinde görünür bölgede yapılan çalışmalarda oldukça fazla tercih edilen sensörlerdir.



Şekil 18. CMOS kamera sensörü (Basler, 2022).

Matlab programı kullanılarak oluşturulan engelin png formatındaki görüntüsü SLM cihazına gönderilmiştir. 405 nm ve 633 nm dalgaboylarındaki lazer kaynaklarından çıkan ışın SLM cihazı üzerine düşürülmüştür. SLM cihazında kırınıma uğrayan lazer ışını sensör kameraya gönderilerek oluşan sinyal görüntüsü bilgisayara aktarılmıştır. Deney daha sonra 0 μm (Knife Edge), 10 μm , 30 μm ve 50 μm engel boyutları için tekrar edilmiştir. Son olarak engel ve gözlem noktası arasındaki mesafenin değişimi ile ortaya çıkan kırınım deseni farklılıkları gözlemlenmiştir.

Deney düzeneğinin şekilsel ve gerçek gösterimleri aşağıda verilmiştir.

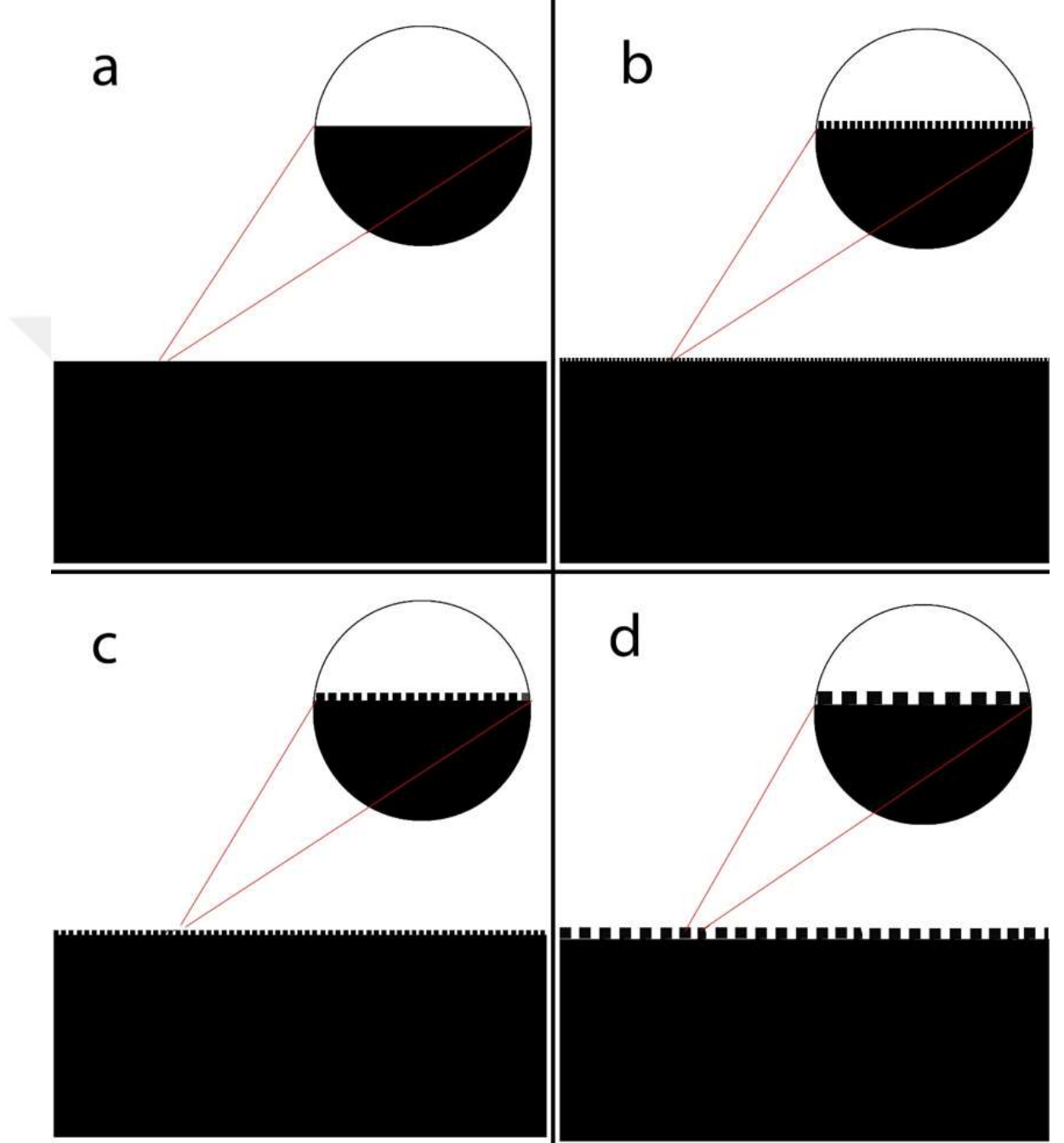


Şekil 19. Deney düzeneğinin şekilsel gösterimi.



Şekil 20. Deney düzeneği.

SLM'e aktarılan ve 0 μm (Knife Edge), 10 μm , 30 μm ve 50 μm için oluşturulan engel görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 21. SLM'e aktarılan engel pürüzlülük görüntüleri. a. $\Lambda=0 \mu\text{m}$, b. $\Lambda=10 \mu\text{m}$, c. $\Lambda=30 \mu\text{m}$, d. $\Lambda=50 \mu\text{m}$.

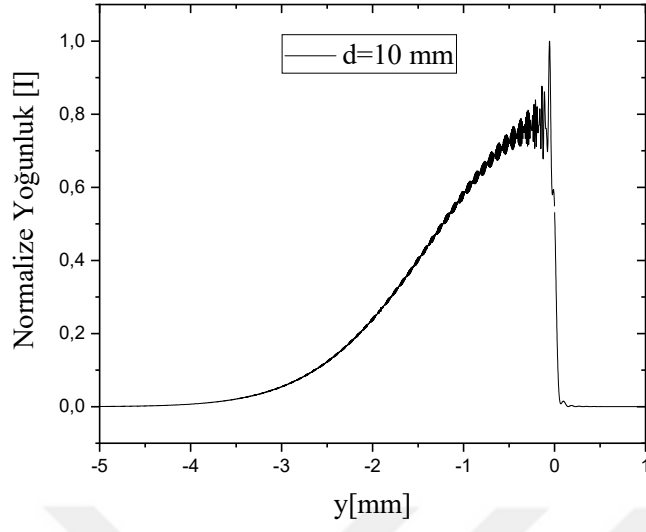
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

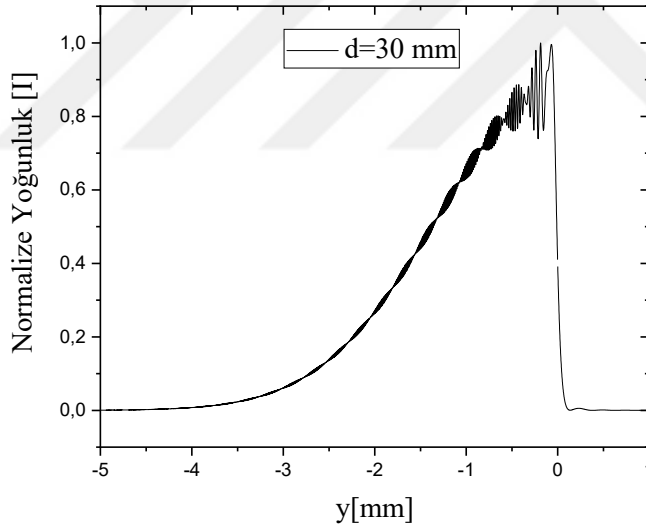
Bu çalışmada Fresnel yaklaşımına getirilen farklı bir bakış açısı ile geliştirilen matematiksel yöntem kullanılarak 405 nm ve 633 nm dalgaboylarında; pürüzsüz (Knife Edge), 10 μm , 30 μm ve 50 μm kenar pürüzlülüklerinde kırınım desenindeki değişimler analiz edilmiştir. Ayrıca hesaplamalarda d harfi ile ifade edilen engel ile gözlem ekranı arasındaki mesafe değişiminin kırınım desenine etkileri incelenmiştir. Analizler Gauss ve Bessel dalga modları için ayrı ayrı yapılarak teorik ve deneysel çıktılar karşılaştırılmıştır. Dalgaboyları ve farklı engel pürüzlülüklerinin karşılaştırıldığı grafiklerde kırınım desenleri arasındaki farklılıkların daha net anlaşılabilmesi için desenlerin tepe noktaları arasında 0.3 birimlik bir öteleme yapılmıştır. Farklı parametreler için elde edilen kırınım deseni grafikleri EK 1’de verilmiştir. Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında yapılan araştırma bulguları bu bölümde incelenmiştir.

4.1. Farklı d Mesafelerinin Kırınım Desenine Etkisi

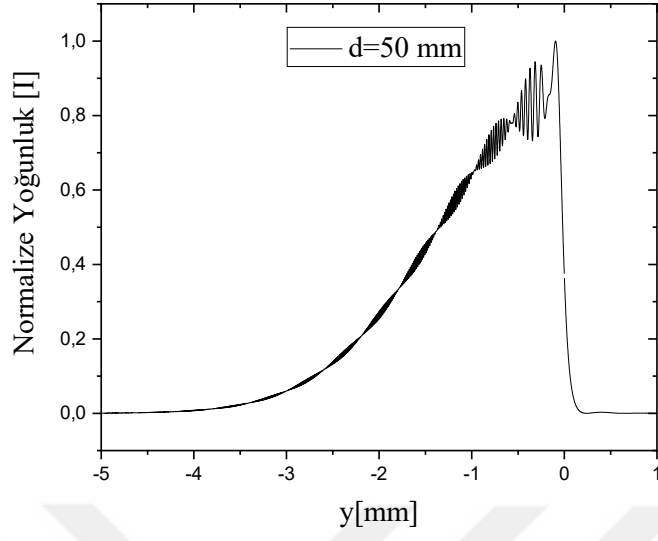
Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında yapılan teorik ve deneysel analizlerde kırınımın gerçekleştiği bölge ile gözlem noktası arasındaki mesafe d ile ifade edilmiştir. Aşağıda farklı d mesafelerinin kırınım deseninde gerçekleştirdiği farklılıkları gözlemek için yapılan analizler sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir. Bu analizler 405 nm dalgaboyu ve 50 μm engel pürüzlülüğünde yapılmıştır.



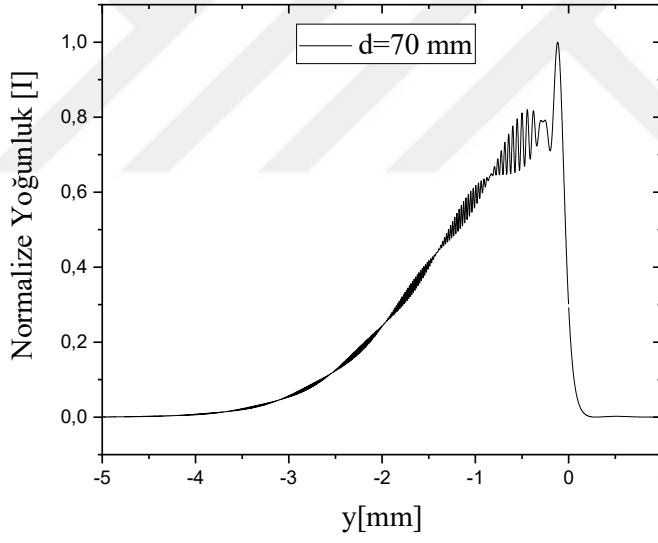
Şekil 22. $d=10$ mm için kırınım deseni grafiği



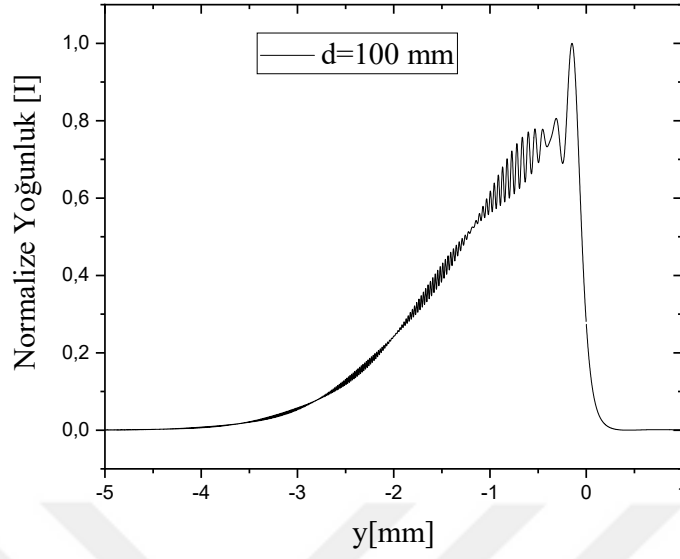
Şekil 23. $d=30$ mm için kırınım deseni grafiği



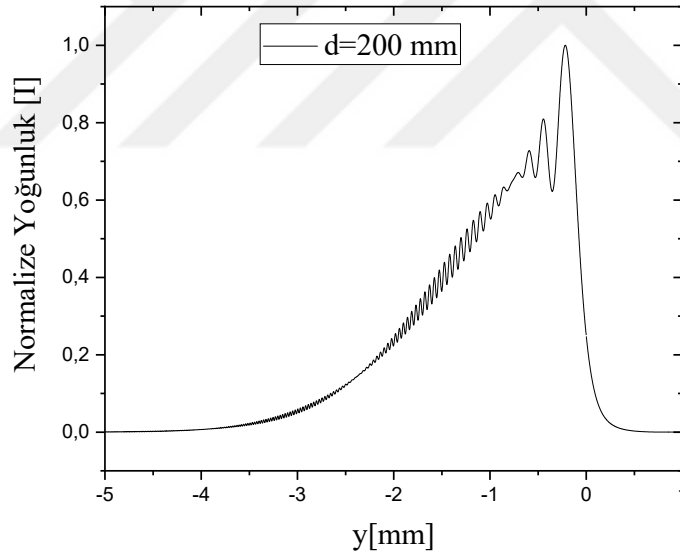
Şekil 24. $d=50$ mm için kırınım deseni grafiği



Şekil 25. $d=70$ mm için kırınım deseni grafiği



Şekil 26. $d=100$ mm için kırınım deseni grafiği



Şekil 27. $d=200$ mm için kırınım deseni grafiği

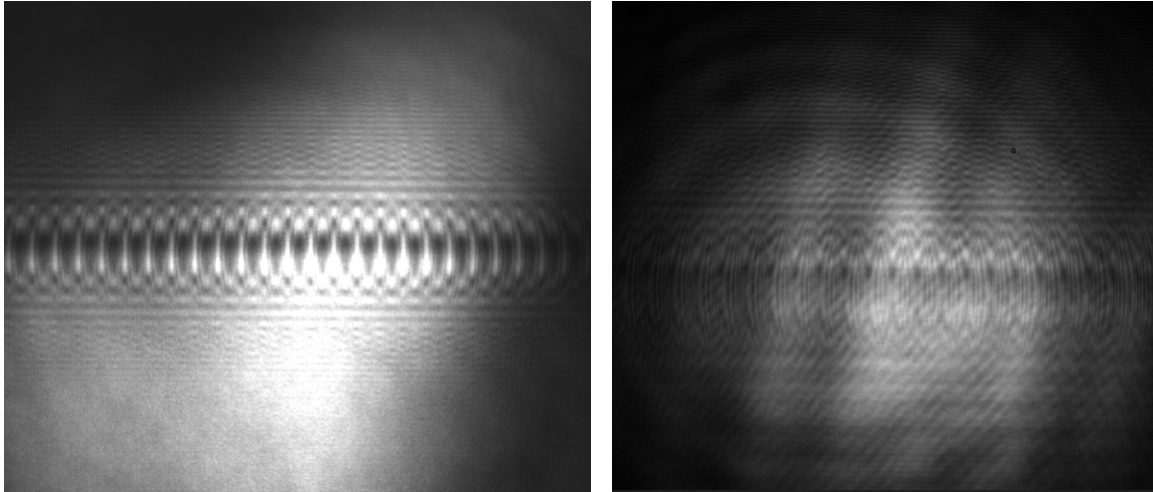
Yukarıda 10 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm ve 200 mm'lik d mesafelerinde elde edilen kırınım deseni grafikleri verilmiştir. Şekil 22'de 10 mm'lik mesafe için elde edilen grafiğe bakıldığında yoğunluk dağılımı çok küçük bir alana sıkıştığı için hiçbir paket oluşumunun görülemediği belirlenmiştir. Şekil 23'te 30 mm'de elde edilen kırınım deseninde ise paket oluşumları gözlenmiştir ancak çok sık bir forma sahiptir. 70 mm, 100

mm ve 200 mm'lik d mesafelerine bakıldığında uygun paket oluşumları gözlenmiştir ancak mesafe arttıkça bu paketlerin de azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak en verimli sonucun $d=50$ mm mesafesinde elde edildiği belirlenmiştir. Bu nedenle Gauss modu için yapılan tüm analizlerde d mesafesi 50 mm olarak belirlenmiştir.

4.2. Sabit Pürüzlülük Değerinde Farklı Dalgaboylarının Kırınım Desenine Etkisi

405 nm ve 633 nm dalgaboylarında kırınım desenindeki değişikliklere ait grafikler aşağıda verilmiştir. Değişikliklerin daha iyi bir şekilde gözlemlenebilmesi için pürüzlülüklerde en anlamlı farklılıkları yaratan $50 \mu\text{m}$ 'lik engel pürüzlülüğü seçilmiştir. Ayrıca engel ile gözlem noktası arasındaki mesafe 50 mm olarak belirlenmiştir.

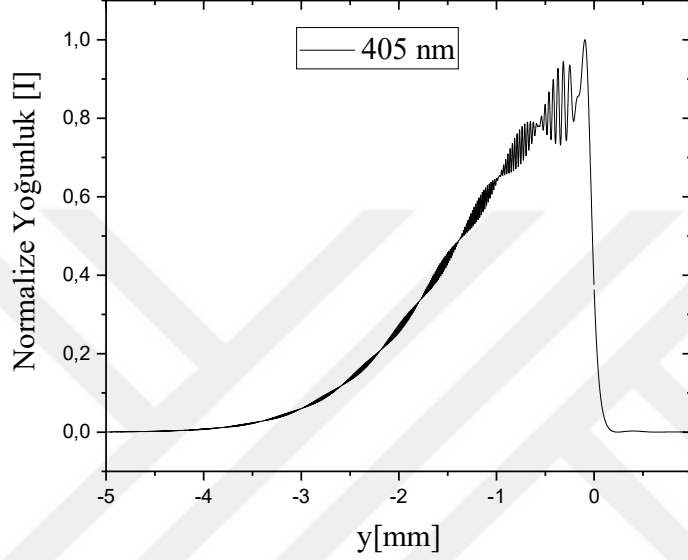
405 nm ve 633 nm dalgaboyları için deneysel düzeneden elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir.



Şekil 28. 405 nm ve 633 nm dalgaboylarında deney düzeneğinden elde edilen görüntüler

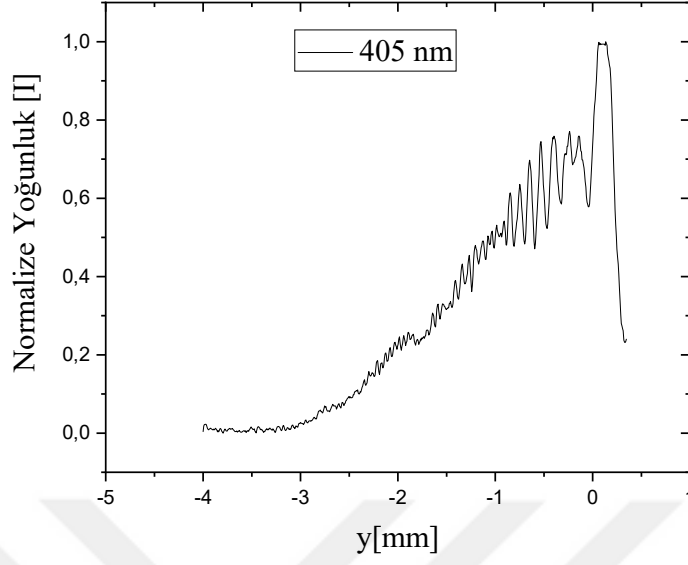
4.2.1. $\lambda=405$ nm Dalgaboyunda Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları

Oluşturulan kodlar ile yapılan teorik hesaplamalar ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deney sonucunda 405 nm dalga boyu için elde edilen kırınım deseni grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 29. Teorik analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm için kırınım deseni grafiği

Şekil 29’da teorik hesaplamalardan elde edilen kırınım deseni gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında, sönümlenme noktasına kadar paket oluşumlarının devam ettiği görülmüştür. Ayrıca paket (envelope) oluşumu net bir şekilde gözlenirken paketlerin birinci aydınlık bölgeye doğru bir sıkışma gösterdiği görülmüştür.

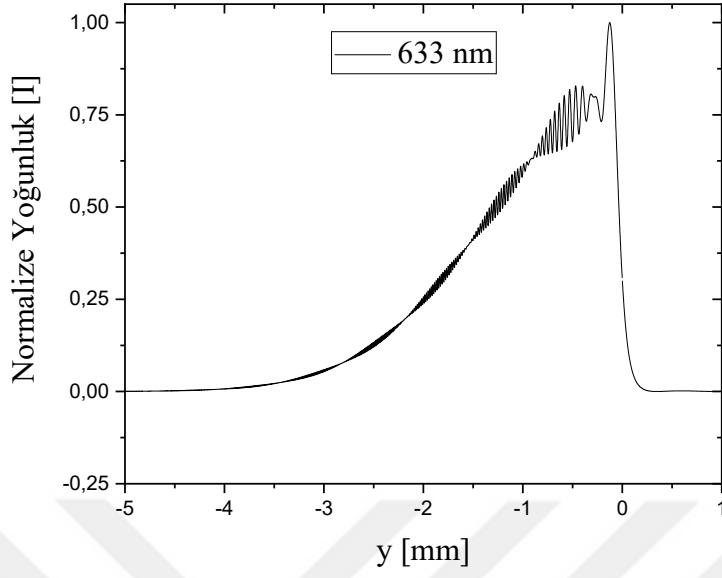


Şekil 30. Deneysel analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm için kırınım deseni grafiği

Şekil 30’da 405 nm dalgaboyu için deneysel analizler sonucunda elde edilen grafik görölmektedir. Deneysel sonuçların temel kırınım deseni formuna uygun olduğu görölmektedir. Ayrıca teorik hesaplamalardan 405 nm’de elde edilen kırınım desenindeki kadar fazla olmasa da paket oluşumları da gözlemlenmiştir. En net paket oluşum birinci aydınlık bölge çevresinde gerçekleştiği görölmektedir.

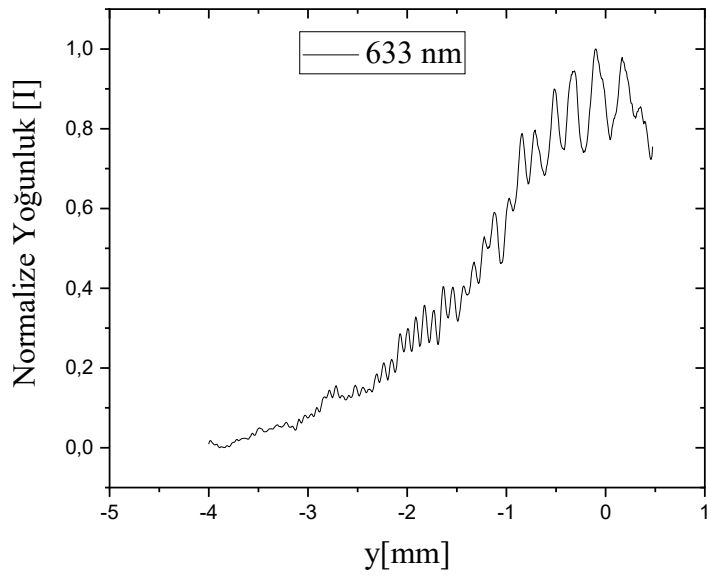
4.2.2. $\lambda=633$ nm Dalgaboyunda Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları

Teorik hesaplamalar ve deneysel analizler sonucunda 633 nm dalgaboyu için elde edilen kırınım deseni grafikler aşağıda verilmiştir.



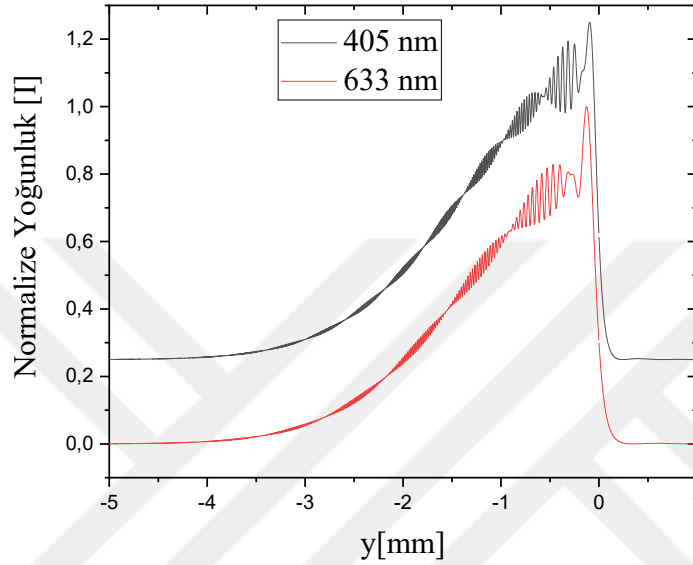
Şekil 31. Teorik analizlerden elde edilen $\lambda=633$ nm için kırınım deseni grafiği

Şekil 31’de 633 nm dalgaboyu için elde edilen kırınım deseni verilmiştir. Kırınım deseninde düzenli bir sönümlenmenin gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca net bir şekilde paket oluşumları gözlemlenmektedir.



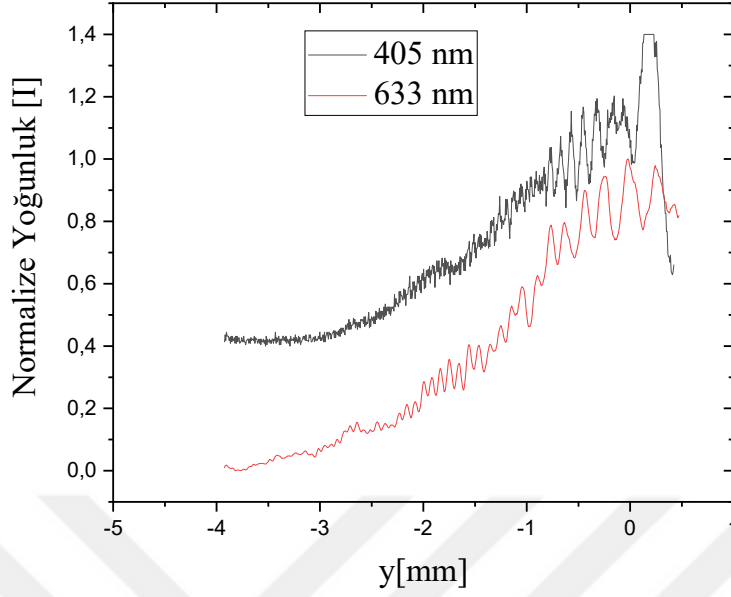
Şekil 32. Deneysel analizlerden elde edilen $\lambda=633$ nm için kırınım deseni grafiği

Şekil 32’de 633 nm dalgaboyu için gerçekleştirilmiş olan laboratuvar deney sonuçlarından analiz edilen kırınım deseni grafiği verilmiştir. Grafikte temel kırınım desenine uyumlu bir yapıya sahiptir. Ayrıca paket oluşumları gözlenmektedir.



Şekil 33. Teorik analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm dalgaboyları için kırınım desenlerinin karşılaştırılması

Şekil 33’te teorik analizlerden elde edilen 405 nm ve 633 nm dalgaboyundaki kırınım analizlerini karşılaştırılmıştır. Kırınım desen verileri 1’e normalize edilmiştir ancak dalgaboyları arasındaki farklılığın daha net anlaşılabilmesi için grafik oluşturma sürecinde desenlerin tepe noktaları arasında kasıtlı olarak mesafe eklenmiştir. Görüldüğü gibi 405 nm dalgaboyunda birinci aydınlık bölgeye doğru bir sıkışma görülmektedir. Ayrıca paket oluşumları da karşılaştırıldığında 405 nm dalgaboyunun daha net ve sık bir paketlenmeye sahip olduğu görülmüştür.



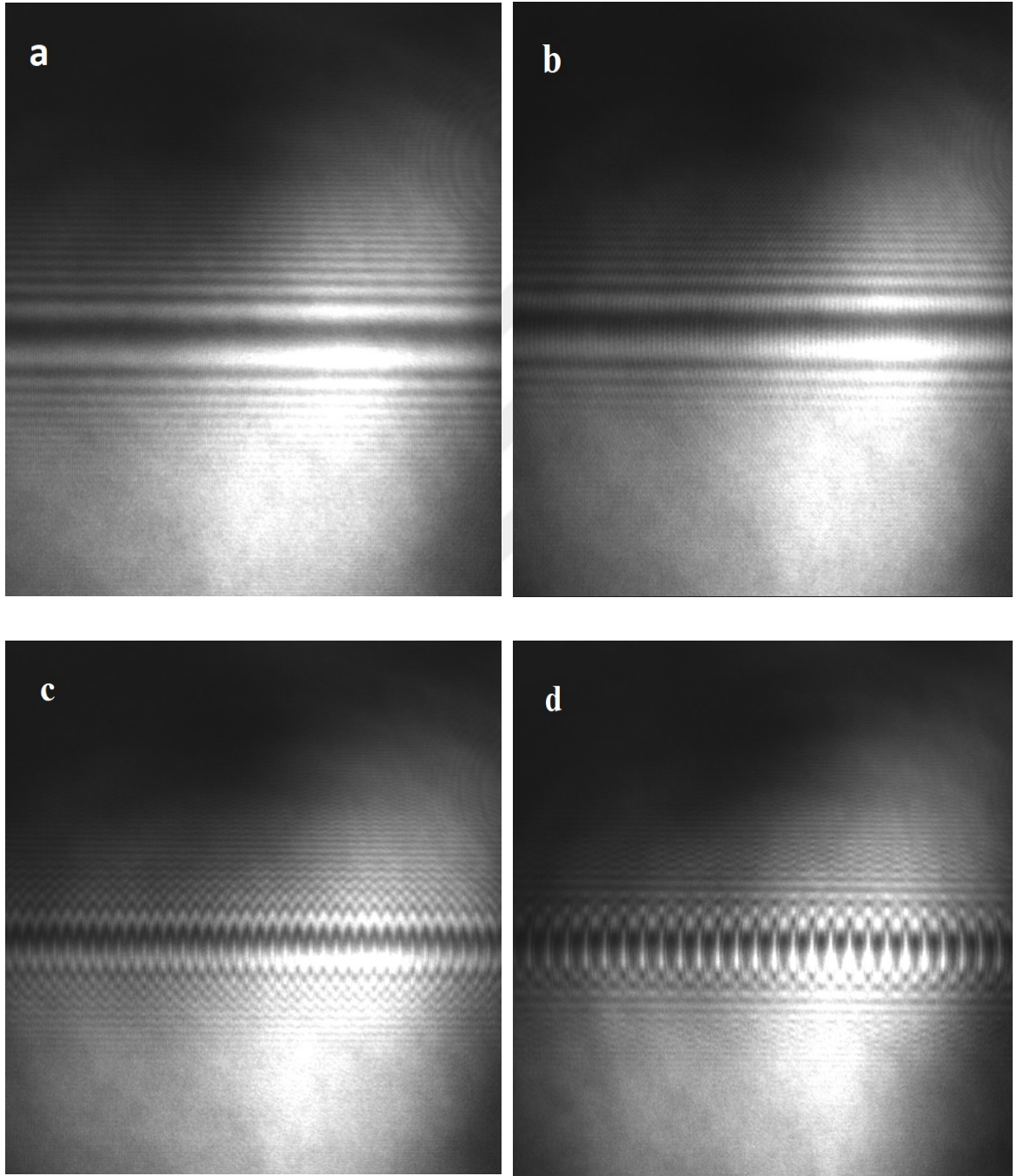
Şekil 34. Deneysel analizlerden elde edilen $\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm dalgaboyları için kırınım desenlerinin karşılaştırılması

Deneysel analizler sonucunda elde edilen 405 nm ve 633 nm dalgaboylarındaki kırınım desenleri Şekil 34'te verilmiştir. Şekil 34 incelendiğinde, teorik sonuçlara uygun dağılımlar elde edildiği görülmektedir. Buna göre 405 nm dalgaboyunda birinci aydınlık bölgeye bir sıkışma görülmekteyken 633 nm dalgaboyunda bu sıkışma görülmeyen aksine dağılım düzenli bir şekilde sönümlenmeye meyillidir. Ayrıca 405 nm'de paketlenme oluşumlarının daha sık olduğu görülmektedir.

4.3. Sabit Dalgaboyu Değerinde Farklı Pürüzlülük Ölçülerinin Kırınım Desenine Etkisi

Aşağıda $\Lambda=0$ μm Knife Edge (Bıçak Kenarı), $\Lambda=10$ μm , $\Lambda=30$ μm ve $\Lambda=50$ μm boyutlara sahip engel pürüzlülüklerinin kırınım desenine olan etkilerini belirlemek için yapılan analizlere yer verilmiştir. Analizler dalgaboyu kategorisinde en iyi sonuçları veren 405 nm dalgaboyu kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca gözlem noktası ile kırınım düzlemi arasındaki mesafe yine 50 mm olarak belirlenmiştir.

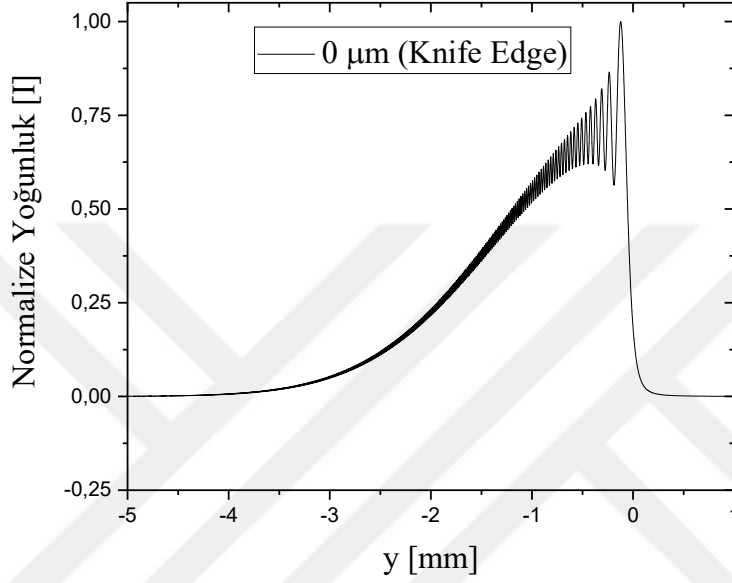
$\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülükleri için deney düzeneğinden elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir.



Şekil 35. Deney düzeneğinden elde edilen farklı pürüzlülükler için kırınım deseni görüntüleri. a. $\Lambda=0 \mu\text{m}$, b. $\Lambda=10 \mu\text{m}$, c. $\Lambda=30 \mu\text{m}$, d. $\Lambda=50 \mu\text{m}$.

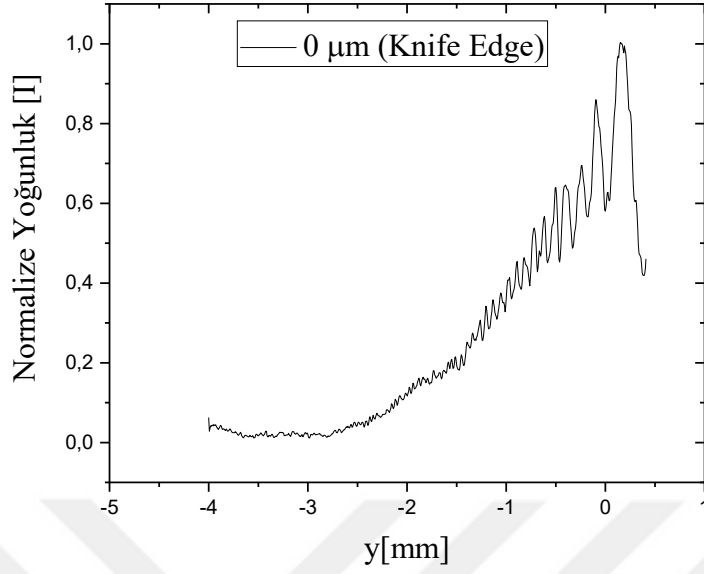
4.3.1. $\Lambda=0 \mu\text{m}$ (Knife Edge) Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları

Teorik hesaplamalar sonucunda $0 \mu\text{m}$ 'lik pürüzlülük için elde edilen grafik aşağıda verilmiştir.



Şekil 36. Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=0 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 36'de $0 \mu\text{m}$ 'lik pürüzlülük boyutundan elde edilen kırınım deseni grafiğinin temel kırınım deseni formuna uyduğu görülmektedir. Lazer ışınının engelde herhangi bir pürüze çarpımaması ve bu nedenle herhangi bir dalgalanma yada paketlenme olayının gerçekleşmediği düzgün bir kırınım olayının oluştuğu görülmektedir.

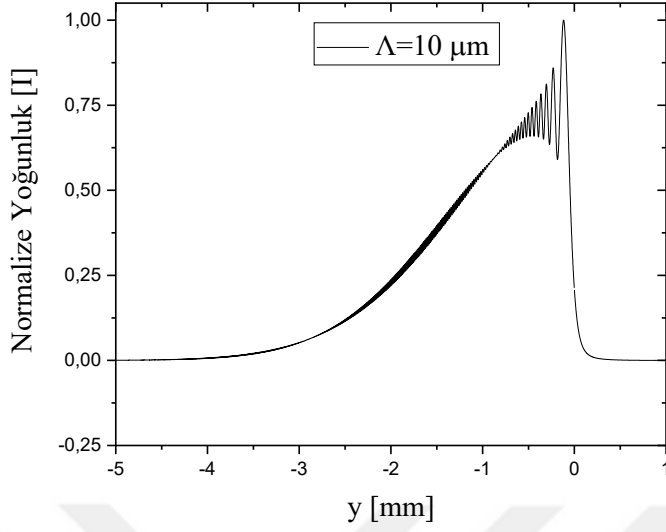


Şekil 37. Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=0$ μm engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 37’de 0 μm için deneysel analizler sonucunda elde edilen kırınım deseni verilmiştir. Burada teorik kırınım deseni sonucuna benzer bir sonuç elde edilmiştir. Düzgün bir sönümlenmeye sahiptir. Desende görülen hafif dalgalanmalar deneysel düzenden gelen ufak hatalar sebebiyle oluştuğu öngörülmektedir.

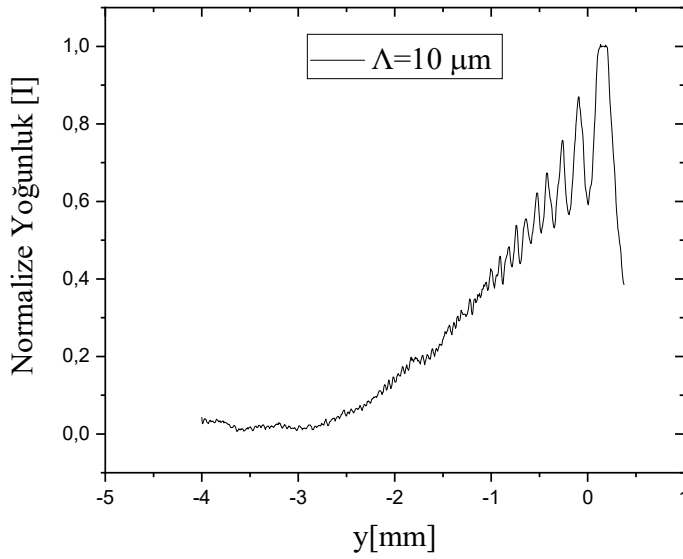
4.3.2. $\Lambda=10$ μm Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Analiz Sonuçları

Teorik hesaplamalar sonucunda $\Lambda=10$ μm pürüzlülükte elde edilen grafik aşağıda verilmiştir.



Şekil 38. Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=10 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 38’de $\Lambda=10 \mu\text{m}$ için elde edilen kırınım deseni gösterilmiştir. Buna göre, sönümlenmeden hemen önce bir paket oluşumunun ortaya çıkmaya başladığı görülmektedir. Pürüzlülüğten kaynaklanan bu değişim temel kırınım deseninden farklılaşmasına neden olmuştur.

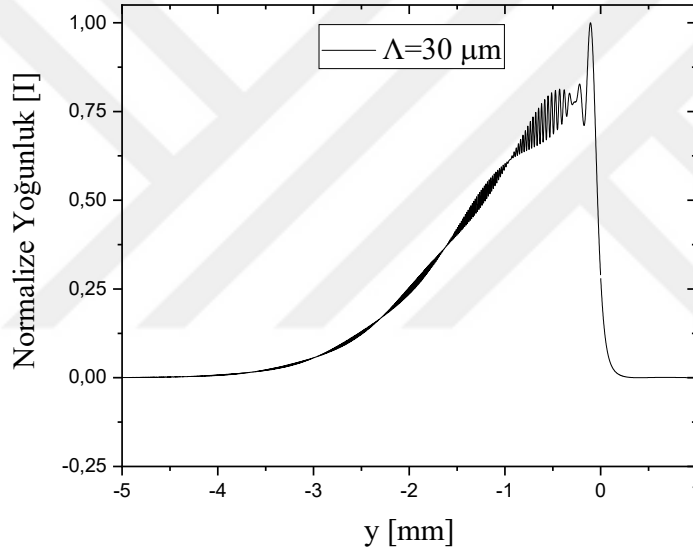


Şekil 39. Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=10 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 39’da $\Lambda=10 \mu\text{m}$ için deneysel analiz sonuçları verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi temel kırınım desenine uygun bir form elde edilmiştir. Ayrıca teorik kırınım grafiğinde görülen paket oluşumuna benzer bir dalgalanmaya sahip olduğu görülmüştür.

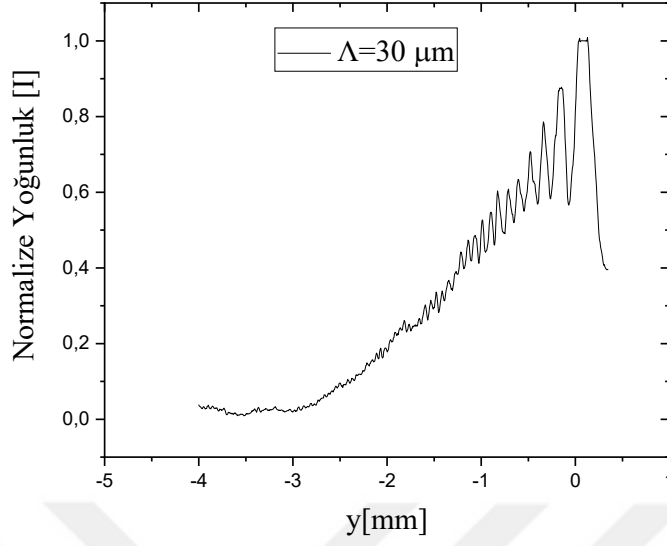
4.3.3. $\Lambda=30 \mu\text{m}$ Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Hesaplama Sonuçları

Aşağıda teorik analizler sonucunda $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen grafik verilmiştir.



Şekil 40. Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 40’ta $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni gösterilmiştir. Sönümlenme noktasına kadar paket oluşumlarının azalarak devam ettiği görülmüştür. Ayrıca oluşan paket sayısının arttığı ve birinci aydınlık bölgeye doğru bir sıklaşma olduğu belirlenmiştir.

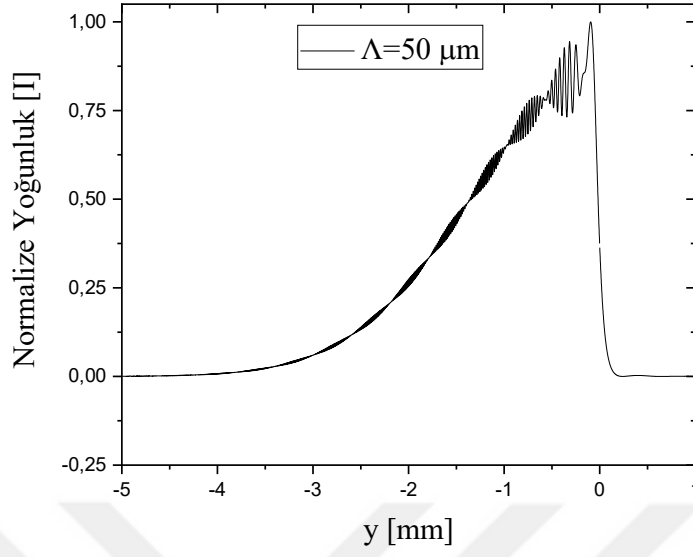


Şekil 41. Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 41’de deneysel analizler sonucunda $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde birinci aydınlık bölgeye doğru bir sıklaşmanın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca teorik analizde elde edilen kadar net olmasa da bir paketlenme oluşumu gerçekleştiği belirlenmiştir.

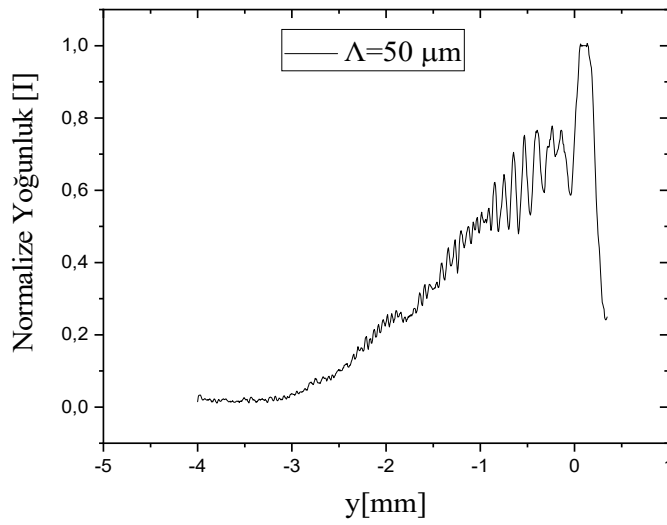
4.3.4. $\Lambda=50 \mu\text{m}$ Boyutundaki Pürüzlülükte Elde Edilen Teorik ve Deneysel Hesaplama Sonuçları

Teorik analizler sonucunda $\Lambda=50 \mu\text{m}$ için elde edilen kırınım deseni grafiği aşağıda verilmiştir.



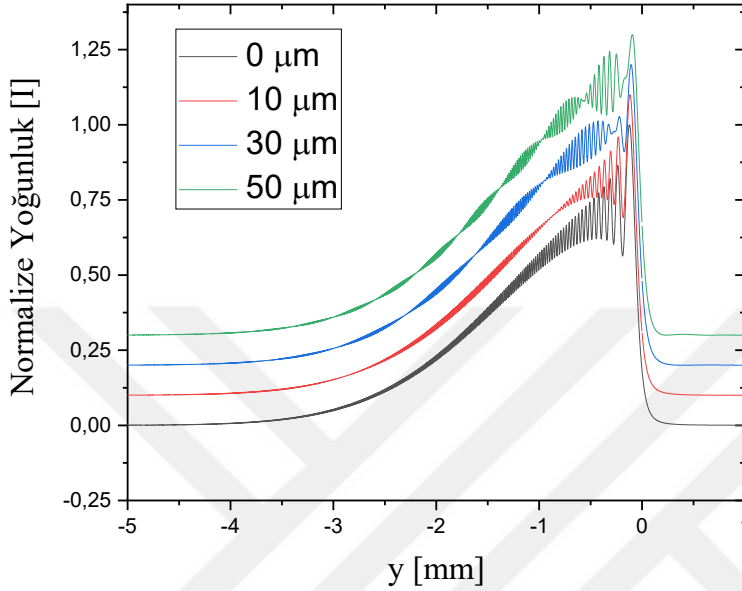
Şekil 42. Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 42’de $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğünde elde edilen kırınım deseni incelendiğinde, sık ve sönümlenme noktasına kadar devam eden paket oluşumları oldukça belirgindir.



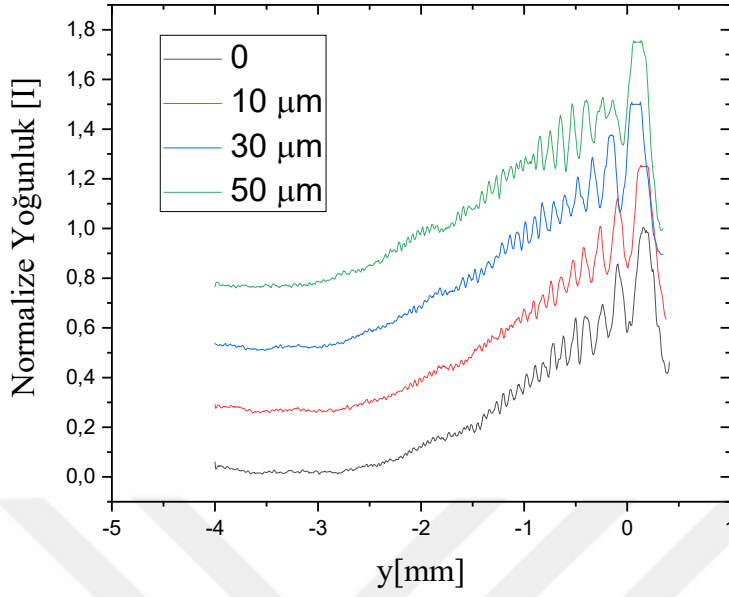
Şekil 43. Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için kırınım deseni grafiği

Şekil 43'te $\Lambda=50 \mu\text{m}$ için elde edilen deneysel analiz sonucu bulunmaktadır. Grafik incelendiğinde düzgün bir sönümlenme grafiğinin düzgün bir sönümlenmeye sahip olduğu ve sönümlenme noktasına kadar paket oluşumlarının ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 44. Teorik analizlerden elde edilen $\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülükleri için kırınım desenlerinin karşılaştırılması

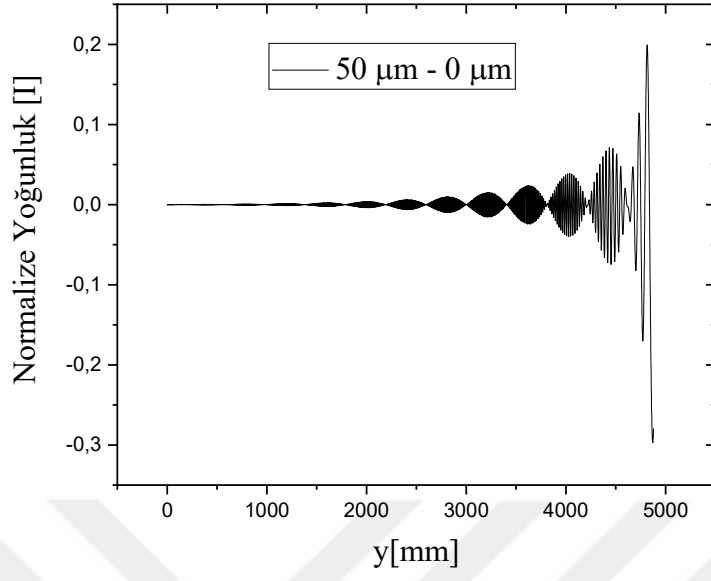
Şekil 44'te $\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinde elde edilen teorik analizlerin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Grafik incelendiğinde en net ve en iyi paket oluşumunun 50 μm engel pürüzlülüğünde elde edildiği görülmüştür. Yoğunluk ağırlıklı olarak birinci aydınlık bölgenin yakınlarında toplanmıştır.



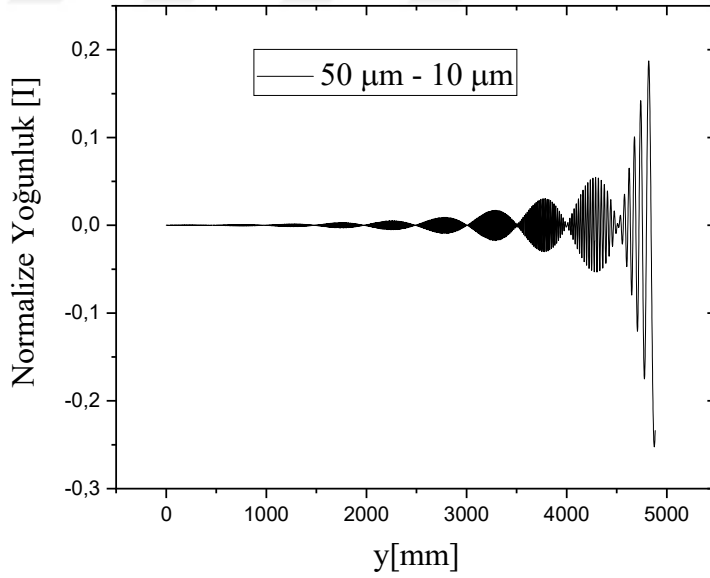
Şekil 45. Deneysel analizlerden elde edilen $\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülükleri için kırınım desenlerinin karşılaştırılması

Şekil 45'te tüm engel pürüzlülükleri için deneysel analizler sonucunda elde edilen kırınım desenleri verilmiştir. Desenler incelendiğinde en fazla paket oluşumunun $50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğünde elde edildiği görülmektedir. Bu sonucun teorik karşılaştırma ile uyumlu olduğu görülmektedir.

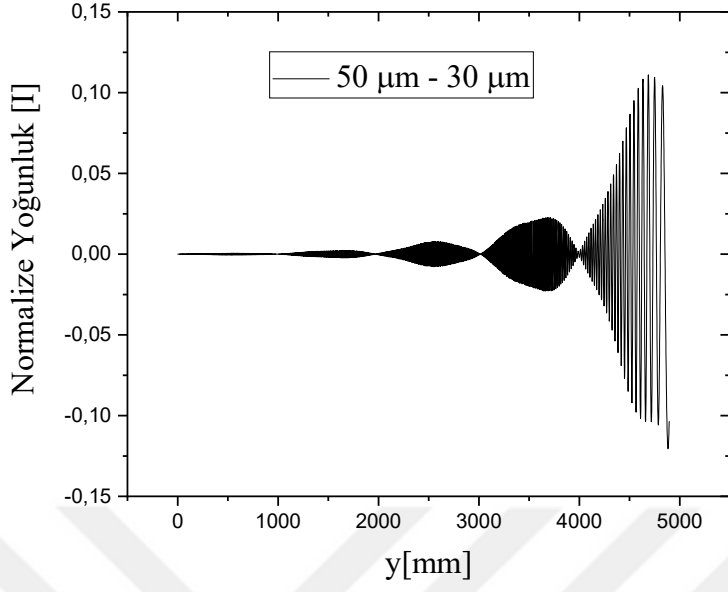
Gauss dalga profilinde 405nm ve $d=50 \text{mm}$ için elde edilen $50 \mu\text{m}-0 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}-10 \mu\text{m}$ ve $50 \mu\text{m}-30 \mu\text{m}$ titreşim farkı grafikleri aşağıda verilmiştir.



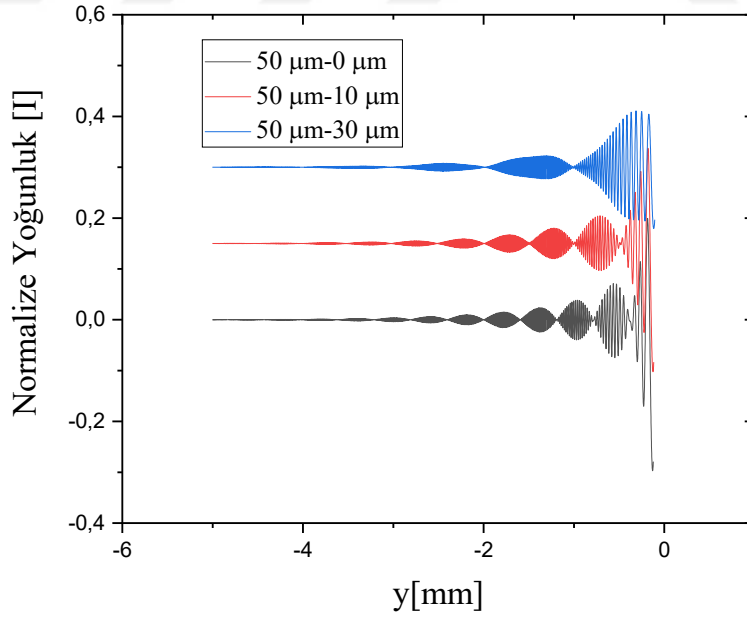
Şekil 46. 50 μm ve 0 μm engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı



Şekil 47. 50 μm ve 10 μm engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı



Şekil 48. 50 μm ve 30 μm engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı



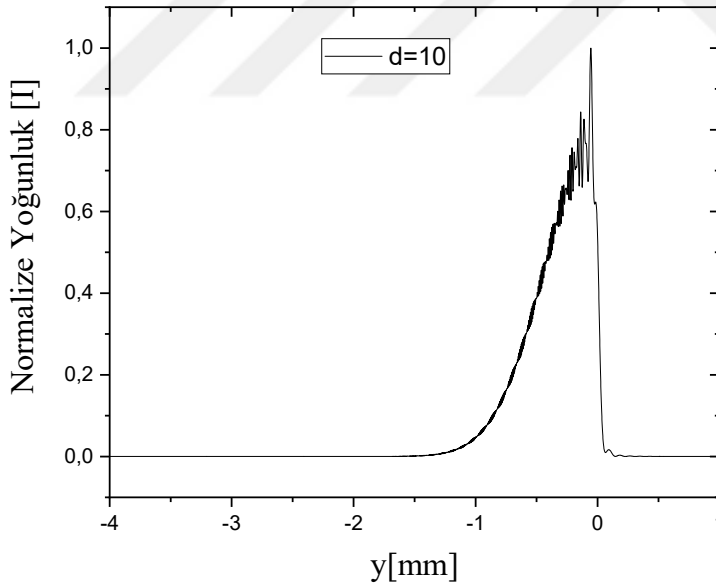
Şekil 49. 50 μm -0 μm , 50 μm -10 μm ve 50 μm -30 μm titreşim farklarının karşılaştırılması

4.4. Bessel Dalga Modunda Elde Edilen Ölçümlerin Kırınım Desenine Etkisi

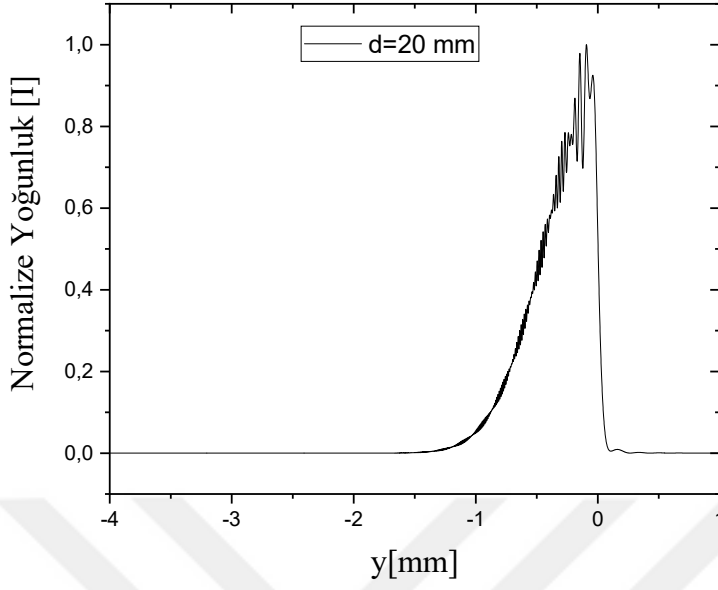
Teorik hesaplamalarda Gauss dalga modu ile kırınım analizi yapıldıktan sonra Bessel dalga modu Wolfram Mathematica'daki yazılan kodun içerisine yerleştirilerek Bessel modda kırınım desenleri elde edilmiştir. Bu bölümde Bessel modunda, farklı dalgaboyu ve engel pürüzlülükleri için elde edilen kırınım deseni analizlerine yer verilmiştir.

4.4.1. Farklı d Mesafeleri için Kırınım Analiz Sonuçları

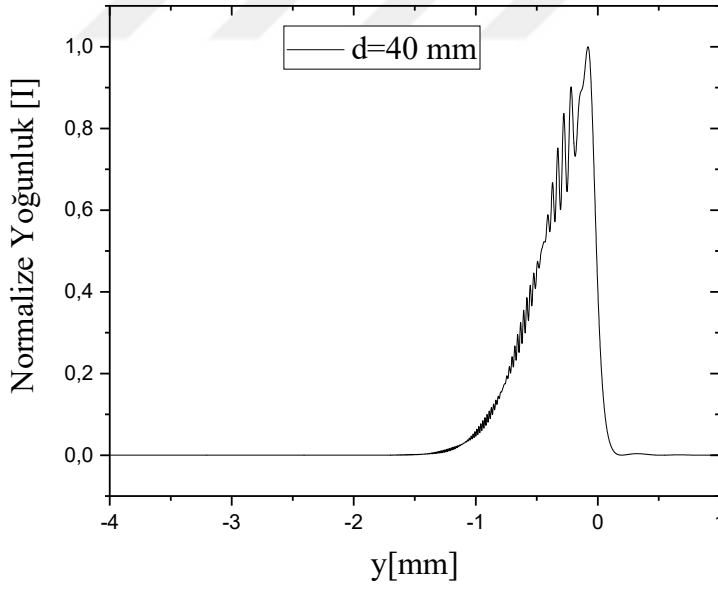
Bu çalışmada gözlem ekranı ile kırınımın gerçekleştiği bölge arasındaki mesafe d ile gösterilmiştir. Bessel dalga modunda farklı d mesafeleri için elde edilen kırınım desenleri aşağıda verilmiştir.



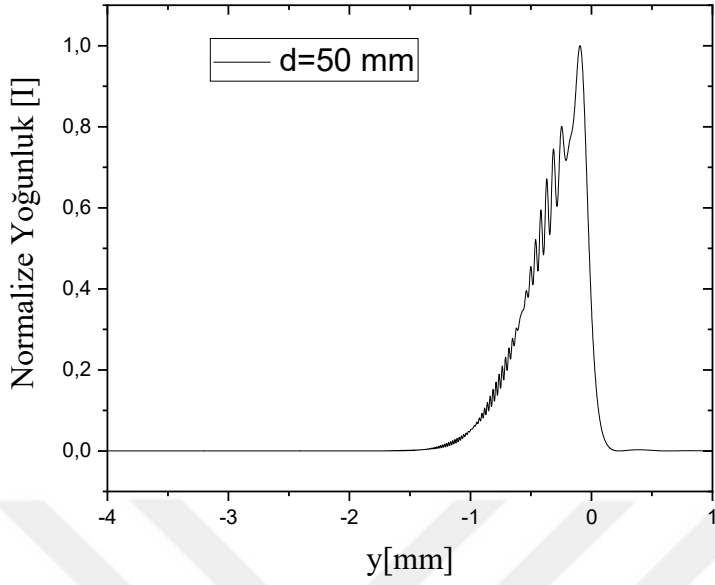
Şekil 50. $d=10$ mm mesafesi için elde edilen kırınım deseni



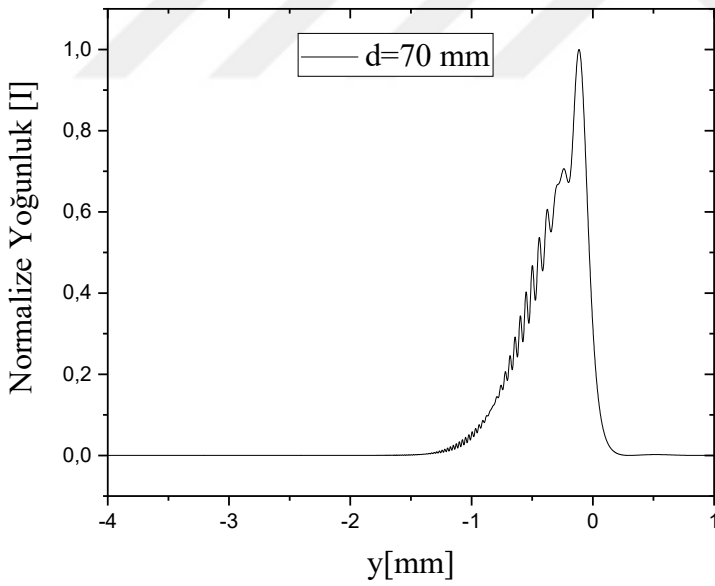
Şekil 51. $d=20$ mm mesafesi için elde edilen kırınım deseni



Şekil 52. $d=40$ mm mesafesi için elde edilen kırınım deseni



Şekil 53. $d=50$ mm mesafesi için elde edilen kırınım deseni



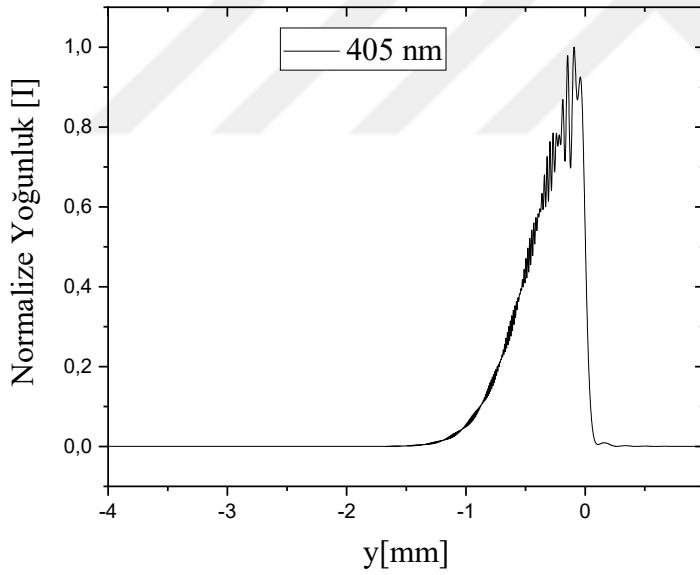
Şekil 54. $d=70$ mm mesafesi için elde edilen kırınım deseni

Yukarıda verilen kırınım desenleri incelendiğinde d mesafesi arttıkça kırınım desenindeki ayrıntıların azaldığı görülmüştür. 10 mm engel mesafesinde çok sık paket oluşumlarının gözlemlenmesi ve yoğunluk dağılımının ayrıntılı görülebilmesi nedeniyle 10

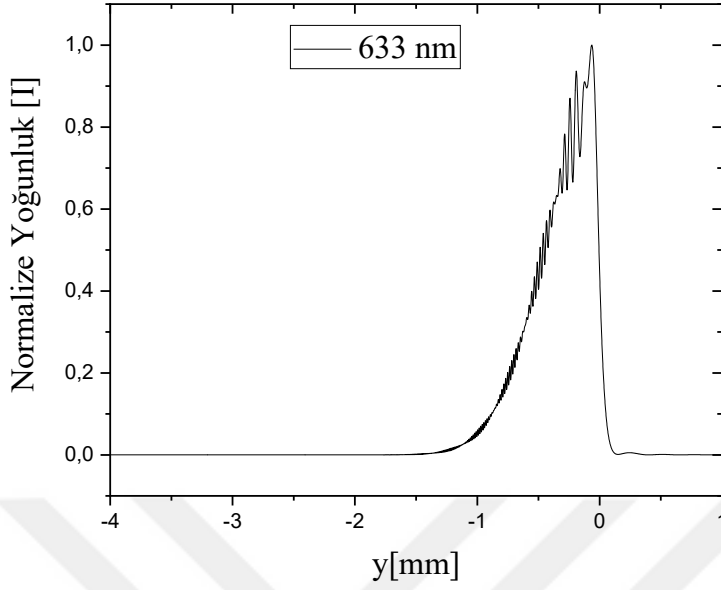
mm mesafenin analizler için uygun olmayacağı anlaşılmıştır. Bu nedenle iyi ve en net desenin elde edildiği d mesafesi 20 mm olarak belirlenmiştir. Bu bölümden sonra dalgalı boyutları ve engel pürüzlülük boyutlarına göre yapılacak olan analizlerde en iyi sonuç veren d=20 mm mesafesi kullanılmıştır.

4.4.2. $\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm Dalgalı boyutları için Analiz Sonuçları

405 nm ve 633 nm dalgalı boyutlarındaki kırınım desenleri en anlamlı sonuçlar veren $\Lambda=50$ μm pürüzlülük boyutunda analiz edilmiştir. 405 nm ve 633 nm dalgalı boyutlarında yapılan analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 55. $\lambda=405$ nm dalgalı boyut için elde edilen kırınım deseni

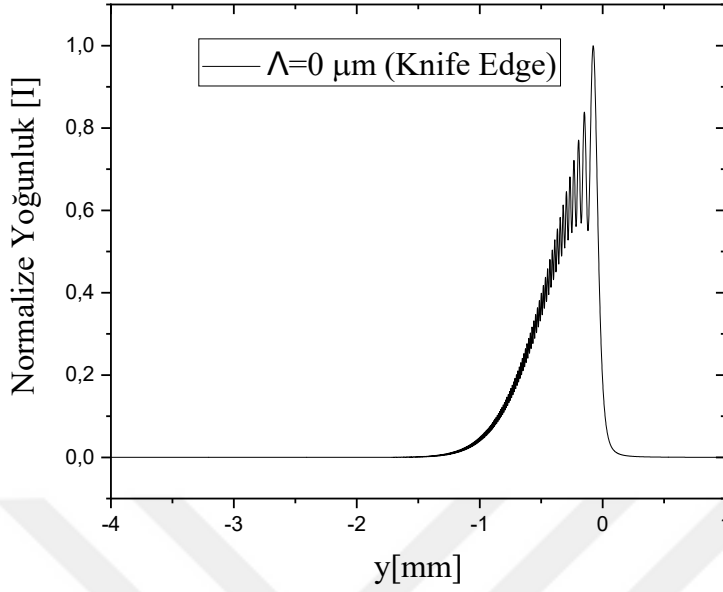


Şekil 56. $\lambda=633$ nm dalgaboyu için elde edilen kırınım deseni

Şekil 55 ve Şekil 56'da Bessel dalga modunda 405 nm ve 633 nm dalgaboyları için elde edilen kırınım desenler verilmiştir. Grafikler incelendiğinde En iyi sonucun Gauss modunda da olduğu gibi 405 nm dalgaboyu için elde edildiği görülmüştür. Ayrıca kırınım deseni, Gauss modda elde edilen kırınım desenlerine göre daha dar bir alanda sönümlenme yaşamıştır.

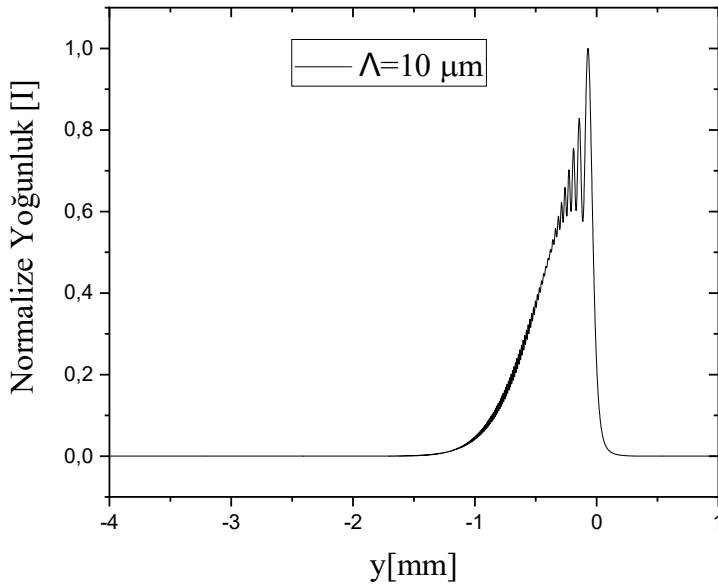
4.4.3. $\Lambda=0$ μm (Knife Edge), $\Lambda=10$ μm , $\Lambda=30$ ve $\Lambda=50$ μm Pürüzlülük Boyutları için Kırınım Deseni Analiz Sonuçları

$\Lambda=0$ μm (Knife Edge) engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni grafiği aşağıda verilmiştir.



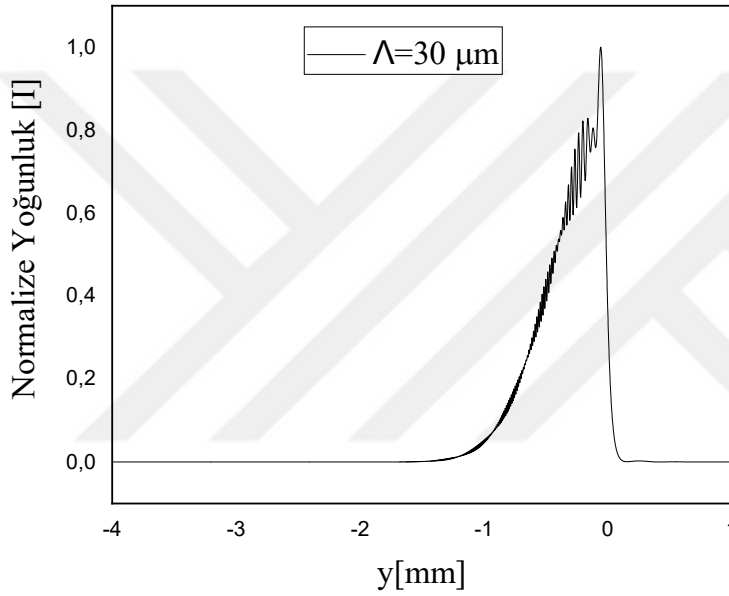
Şekil 57. $\Lambda=0 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni

Şekil 57’de $\Lambda=0 \mu\text{m}$ için kırınım deseni grafiği verilmiştir. Grafikte yoğunluğun çok yüksek bir bölümünün birinci aydınlık bölge tarafında toplandığı görülmektedir. Lazer ışını kırınım bölgesinde herhangi bir pürüzlülük ile karşılaşmadığı için paket oluşumu ya da dalgalanma gözlemlenmemiştir. Ayrıca Bessel formunu düzgün bir şekilde yansıtan grafik, temel kırınım desenine de uymaktadır.



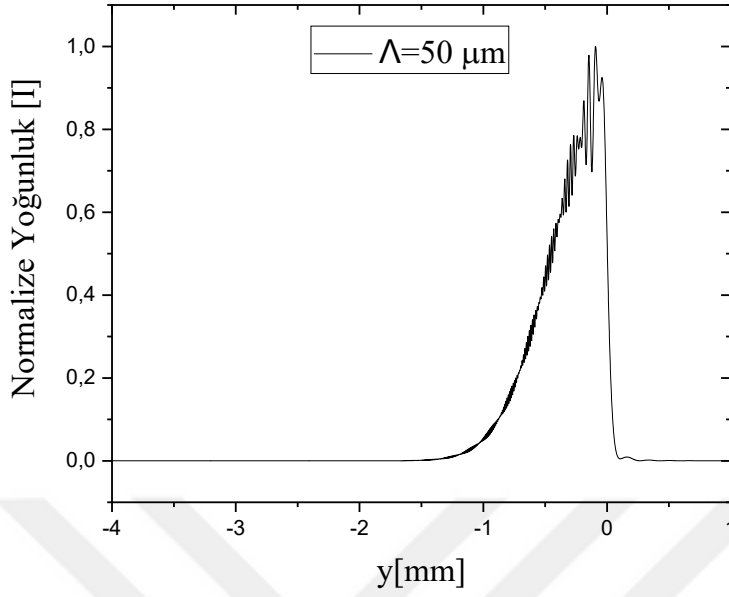
Şekil 58. $\Lambda=10 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni

Şekil 58’de $\Lambda=10 \mu\text{m}$ için elde edilen kırınım deseni verilmiştir. Grafik incelendiğinde $10 \mu\text{m}$ ’lik pürüzlülüğün kırınım deseninde farklılaşmaya neden olduğu görülmüştür. Sönümlenme noktasına yakın bir bölgede paket oluşumu gözlenmiştir.



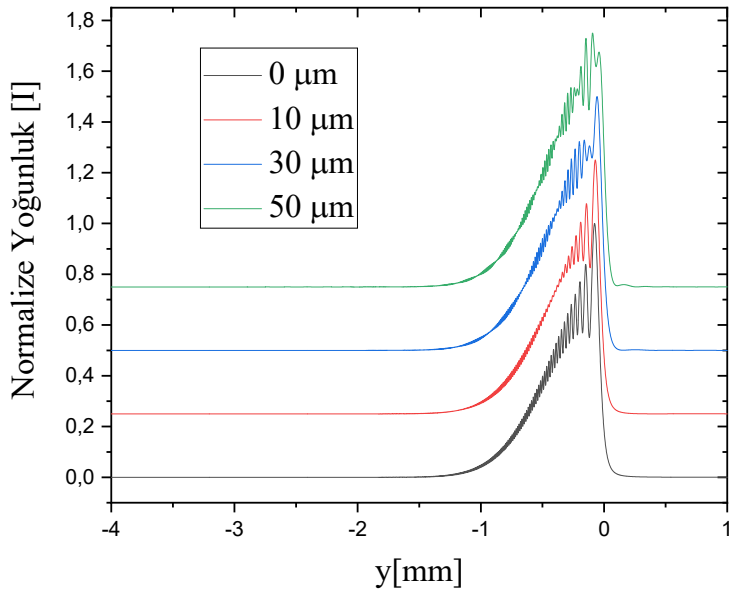
Şekil 59. $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni

Şekil 59’da $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni grafiği verilmiştir. Paket oluşumları belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca paketler birinci aydınlık bölgeye doğru bir sıkışma hareketi göstermektedir.



Şekil 60. $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseni

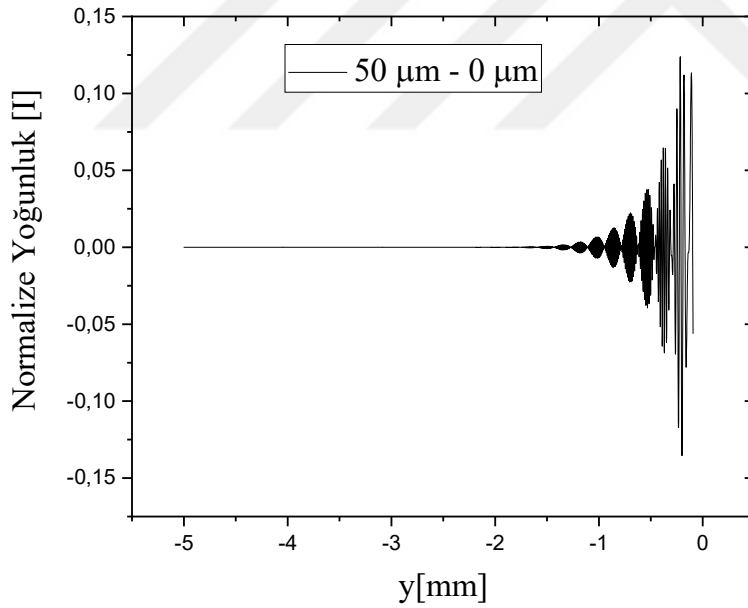
Şekil 60'ta $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü için elde edilen kırınım deseninin grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi paket oluşumları hem çok net bir şekilde görülmekte hem de sönmüleme noktasına kadar paket oluşumlarının devam ettiği gözlenmektedir. Ayrıca yoğunluk dağılımı birinci aydınlık bölgeye yakın alanda toplandığı görülmektedir.



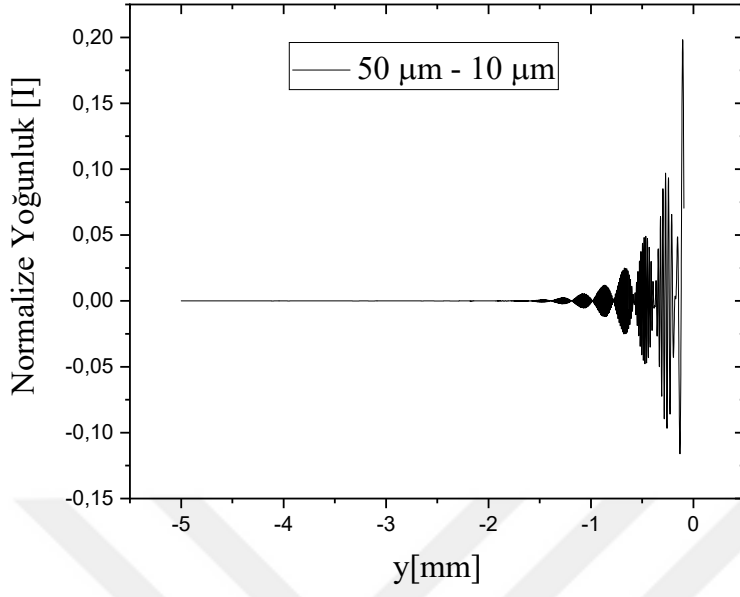
Şekil 61. $\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülükleri için elde edilen kırınım desenlerinin karşılaştırılması

Şekil 61’de tüm pürüzlülük boyutlarında elde edilen kırınım desenleri verilmiştir. Desenler arasındaki farklılıklar daha net bir şekilde anlaşılabilmesi için aralarına y ekseninde 0.25’lik mesafeler koyulmuştur. Grafik incelendiğinde en net paket oluşumlarının ve en verimli kırınım deseni grafiğinin $\Lambda=50 \mu\text{m}$ ’de ortaya çıktığı görülmektedir.

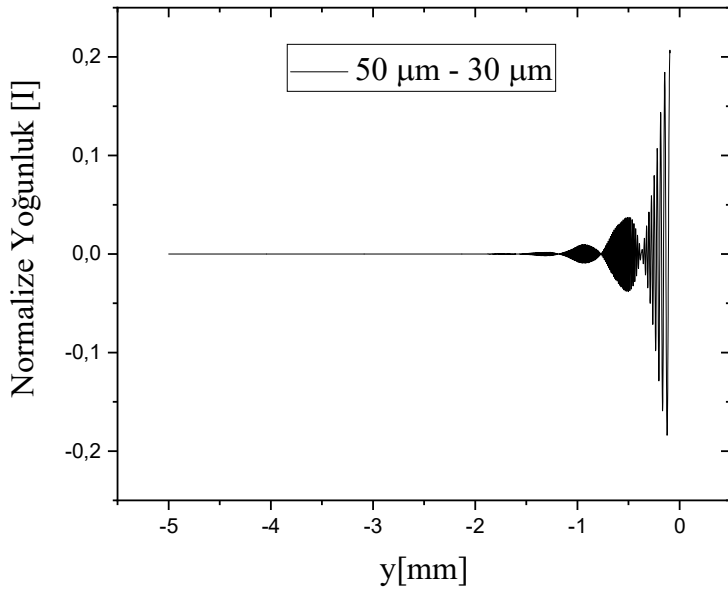
Bessel dalga profilinde 405nm için elde edilen $50 \mu\text{m}-0 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}-10 \mu\text{m}$ ve $50 \mu\text{m}-30 \mu\text{m}$ titreşim farkı grafikleri aşağıda verilmiştir.



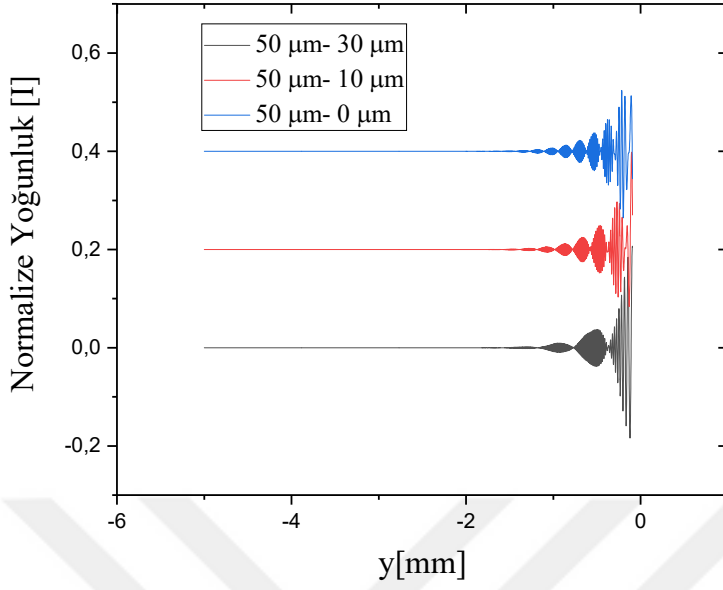
Şekil 62. $50 \mu\text{m}$ ve $0 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı



Şekil 63. 50 μm ve 10 μm engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı



Şekil 64. 50 μm ve 30 μm engel pürüzlülüklerinin titreşim farkı



Şekil 65. 50 µm-0 µm, 50 µm-10 µm ve 50 µm-30 µm titreşim farklarının karşılaştırılması

Şekil 49 ve Şekil 65'te farklı engel pürüzlülüklerinin titreşim farkları gösterilmiştir. Burada pürüzlülük boyutları birbirine yaklaştıkça gruplanma (order) arası mesafe artarken, girişim deseni de daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada görüntüleme kümülatif olarak yapıldığından görüntüleme frekansı hesaplamalara katılmamıştır. Ancak sonraki çalışmalarda, görüntüleme frekansı ile sistemin titreşim frekansı optimize edilerek çok hassas ölçümler yapılabileceği ve bu grafiklerdeki girişim desenleri sayesinde görülebileceği öngörülmektedir.

BEŞİNCİ BÖLÜM BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikrometre altı titreşim ölçümlerinin hassasiyeti üzerine son dönemde oldukça fazla odaklanılmıştır. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında mikrometre altı titreşim analizleri için Fresnel yaklaşımında yeni bir bakış açısı geliştirilerek farklı parametreler için kırınım deseni analizleri yapılmıştır. İlk olarak kırınımın gerçekleştiği bölge ile gözlem noktası arasındaki mesafeyi tanımlayan d parametresinin kırınım deseni üzerine etkileri incelenmiştir. Daha sonra $\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm dalgaboyları için kırınım deseni analizleri yapılmıştır. Ayrıca lazer ışınının kırınımını sağlayan engelde $\Lambda=0$ μm (Knife Edge), $\Lambda=10$ μm , $\Lambda=30$ μm ve $\Lambda=50$ μm engel pürüzlülüklerinin kırınım deseninde oluşturduğu değişiklikler incelenmiştir. Son olarak Gauss dalga modunda yapılan tüm bu analizler Bessel dalga formu için tekrarlanarak sonuçlar rapor edilmiştir. Tez çalışmasında Gauss mod ile yapılan analizlerin deneysel hesap ve analizlerine yer verilirken, Bessel formdaki deneysel analizler laboratuvar malzemelerindeki eksiklikler nedeniyle gerçekleştirilememiştir.

Bu bölümde ilk alt başlıkta tüm parametreler için elde edilen veriler değerlendirilmiştir. İkinci alt başlıkta ise elde edilen bu veriler ışığında tez çalışmasının literatüre nasıl bir fayda sağlayacağı hakkında görüşlere yer verilmiştir.

5.1. Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi

Bölüm 4.1'de ışığın kırınımına uğramasını sağlayan engel ile gözlem noktası arasındaki mesafe olan d parametresinin kırınım deseni üzerine etkisi incelenmiştir. 10 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm ve 200 mm mesafelerinde elde edilen kırınım deseni sonuçları incelenmiştir. Desenlere bakıldığında d mesafesi arttıkça yoğunluğun dağıldığı ve paket oluşumlarında da azalma yaşandığı gözlemlenmiştir. 10 mm'nin, paketlenme oluşumu gözlemlenemeyecek kadar yakın bir mesafe olduğu görülmüştür. 30 mm'de paketlenme oluşumları gözlemlenmiştir ancak hızlı bir sönümlenmeye sahip olduğu görülmüştür. 70 mm, 100 mm ve 200 mm'de elde edilen grafiklere bakıldığında mesafe arttıkça oluşan paketlerin de azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak 50 mm'lik mesafenin kırınım deseni

incelemelerinde en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Bu nedenle Gauss dalga modu için yapılan tüm analizlerde d mesafesi 50 mm olarak seçilmiştir.

Bölüm 4.2’de $\lambda=405$ nm ve $\lambda=633$ nm dalgaboylarında yapılan teorik ve deneysel analizler sonucunda elde edilen kırınım deseni grafikleri verilmiştir. Kırınım desenleri incelendiğinde 405 nm dalgaboyunda 633 nm dalgaboyuna göre yoğunluk dağılımının çok daha net bir şekilde elde edildiği görülmüştür. Ayrıca 405 nm dalgaboyunda yoğunluk dağılımının birinci aydınlık bölgeye yakın bölgelerde toplandığı görülmektedir. Bu iki dalgaboyunda da paket oluşumları görülmüştür ancak 405 nm dalgaboyundaki kırınım desenlerinde daha sık paket oluşumları gözlenmesinin yanı sıra bu paketlerin sönümlenme noktasına kadar devam ettiği raporlanmıştır. Deneysel analizlerden elde edilen kırınım desenleri teorik desenlerle bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. 405 nm dalgaboyundaki deneysel analizlere bakıldığında paket oluşumlarının varlığı görülmektedir. Deneysel sonuçlarda, teorik sonuçlardaki gibi daha net paket oluşumlarının gözlenememesinin sebebinin deney düzeneğinde kullanılan sinyal algılayıcı kameranın çözünürlüğüne 405 nm gibi küçük dalgaboylarını yakalamak için yeterli olmadığı öngörülmektedir. Sonuç olarak dalgaboyu büyüdükçe oluşan paketlenmelerin azaldığı ve yoğunluğun dağılmaya daha meyilli olduğu görülmüştür. Bu nedenle 405 nm dalgaboyunda elde edilen kırınım desenlerinin daha verimli sonuçlar verdiği görülmüştür. Kırınım olayı ile ışığın dalgaboyu arasında bir ters orantı olduğu bilgisinden yola çıkarak elde edilen bu sonuçların oldukça verimli olduğu görülmektedir.

Bölüm 4.3’te $\Lambda=0$ μm (Knife Edge), $\Lambda=10$ μm , $\Lambda=30$ μm ve $\Lambda=50$ μm engel pürüzlülüğünde elde edilen kırınım deseni grafiklerine yer verilmiştir. $\Lambda=0$ μm ’de elde edilen kırınım deseni incelendiğinde grafiğin temel kenar kırınım deseni formuna uygun sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca ışığın kırıldığı yüzeyde herhangi bir pürüzlülük olmaması paket oluşumlarının da gözlenmemesine neden olmuştur. $\Lambda=10$ μm boyutundaki engel pürüzlülüğü incelendiğinde pürüzlülük kaynaklı paket oluşumlarının ortaya çıkmaya başladığı belirlenmiştir. $\Lambda=30$ μm engel pürüzlülüğünde artık net bir paket oluşumunun ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca incelenen $\Lambda=0$ μm ve $\Lambda=10$ μm engel pürüzlülüklerine göre daha verimli bir sonuç elde edilmiştir. $\Lambda=50$ μm engel pürüzlülüğü incelendiğinde ise çok net paket oluşumları ortaya çıktığı ve sönümlenme noktasına kadar

paket oluşumlarının devam ettiği gözlemlenmiştir. Deneysel analizlerden elde edilen grafiklere bakıldığında teorik analizlere uygun sonuçlar elde edildiği ve deneysel düzenden kaynaklı ufak hatalar haricinde gayet uygun sonuçlar elde edilerek teorik analizleri desteklediği anlaşılmıştır. Sonuç olarak teorik ve deneysel analizler ışığında en verimli engel pürüzlülüğü boyutunun $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni olarak $\Lambda=50 \mu\text{m}$ 'nin en uygun kırınımına neden olan açıyı oluşturan ebat olduğu söylenebilir.

Bölüm 4.4'te şu ana kadar Gauss dalga modu ile yapılmış olan tüm analizler Bessel dalga modu için tekrarlanmıştır. İlk olarak Bessel dalga modu için en uygun d mesafesi aranmıştır. Elde edilen grafiklere bakıldığından 40 mm ve 70 mm mesafelerinde paket oluşumlarının azaldığı ve kırınım desenlerinin bıçak kenarı (Knife Edge) formuna doğru giden bir azalmaya sahip olduğu görülmüştür. 10 mm'lik mesafede çok sık paket oluşumu gözlemlenmiştir. Bu istenen bir etki olsa da paket oluşumlarının çok sık olması yüzey pürüzlülüğünün analizinde hatalara sebebiyet verebileceği için uygun bir form olarak kabul edilmemiştir. 20 mm'lik mesafe incelendiğinde ise net bir paket oluşumu gözlemlenmiştir. Bu nedenle en uygun mesafe $d=20 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

Bessel modda yapılan $\lambda=405 \text{ nm}$ ve $\lambda=633 \text{ nm}$ dalgaboylarındaki kırınım analizleri incelendiğinde 405 nm dalgaboyunda daha sık ve net paket oluşumlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu nedenle 405 nm dalgaboyunda daha iyi sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuç Gauss dalga modunda elde edilen sonuçlar ile benzerdir.

Bessel modda gerçekleştirilen $\Lambda=0 \mu\text{m}$, $\Lambda=10 \mu\text{m}$, $\Lambda=30 \mu\text{m}$ ve $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğü analizlerine bakıldığında engel pürüzlülüğü arttıkça paket oluşumlarının da arttığı gözlemlenmiştir. $\Lambda=0 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğünün temel kırınım deseni formuna uygun olduğu belirlenmiştir. $\Lambda=10 \mu\text{m}$ 'de pürüzlülüğün sebep olduğu paket oluşumları gözlenmeye başlanmıştır. $\Lambda=30 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğünde artık paket oluşumları net bir şekilde gözlemlenirken $\Lambda=50 \mu\text{m}$ engel pürüzlülüğünde ise en iyi ve en verimli sonucun elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar yine Gauss modda elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir.

Gauss modda elde edilen grafikler -4 mm ile 0.5 mm aralığında bir dağılım gösterirken Bessel modda elde edilen grafikler ise 1.5 mm ile 0 mm aralığında dağılım göstermiştir. Tüm bu sonuçlar ışığında Gauss ve Bessel dalga modları karşılaştırıldığında, Bessel dalga modunda elde edilen kırınım desenlerinin daha hızlı bir sönümlenmeye sahip olduğu ve bu yüzden Gauss moduna göre daha dar bir alanda kırınım deseni oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bunu nedeninin; Bessel dalgalarının kırınıma uğramadan uzun mesafeleri kat edebilmeleri ve bu mesafeyi kat ederken özellikle merkezdeki güç yoğunluğunu uzun süre koruyabilmeleri olduğu söylenebilir. Sonuç olarak titreşim analizlerinde Bessel dalga modunda Gauss moda göre daha iyi sonuçlar elde edilebileceği raporlanmıştır.

5.2. Öneriler

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında Fresnel yaklaşımına yeni bir bakış açısı getirilerek mikrometre altı titreşim analizlerinde hassasiyetin artırılması amaçlanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen veriler ışığında, geliştirilen bu matematiksel yöntemin titreşim analizlerindeki hassasiyeti arttırmak için yenilikçi ve verimli bir yol olacağı öngörülmektedir. Ayrıca bu yöntem ve bu yöntemin açacağı yol sayesinde titreşim ve yüzey analizi alanında çalışma yapacak olanlar için bir yol gösterici olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Agarwal, N. S. (2016). "New Quantum Theory Explains All the Mysterious Quantum Phenomena." *Journal of Modern Physics*, 7(15), 2135.
- Aguilar, L., Robledo-Sánchez, C., Carrasco, M., & Otero, M. (2010). The principle of superposition for waves.
- Akçayöz, D., Köken, K., Kunt, G., Müldür, İ. B., & Saykal, S. G. (2019). Elektron mikroskobun tipta kullanım alanlari.
- Alda, J. (2003). "Laser and Gaussian beam propagation and transformation." *Encyclopedia of optical engineering*, 999.
- Alting, L., Kimura, F., Hansen, H. N., & Bissacco, G. (2003). "Micro engineering." *CIRP annals*, 52(2), 635-657.
- Amelinckx, S., Van Dyck, D., Van Landuyt, J., & van Tendeloo, G. (2008). *Electron microscopy: principles and fundamentals*: John Wiley & Sons.
- Arlı, A. Ç., Karaaslan, F., Çil, C. Z., Büke, G. C., Güvenç, Z. B., Dede, M., . . . Hacettepe, T. Düşük Maliyetli Taramalı Tünelleme Mikroskobu.
- Aswatha, A., Alsahaf, A., Giepmans, B. N., and Azzopardi, G. (2022). Automated image analysis in large-scale cellular electron microscopy: A literature survey. *arXiv preprint arXiv:2206.07171*.
- Atakan, S. G. (2022). *Su altında görünür ışık haberleşmesi*. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Bai, C. (2000). *Scanning tunneling microscopy and its application* (Vol. 32): Springer Science & Business Media.
- Balamurugan, R., & Muruganand, S. (2013). "Electronic Laser Speckle Interferometer for Displacement Measurement using Digital Image Processing Technique." *Journal of Image and Graphics*, 1(1), 59-62.
- Basler. (2022). a2A1920-160umBAS - Basler ace 2. Retrieved 06.12.2022, 2022, from <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace2/a2a1920-160umbas/>

- Bass, M., Stryland, E. W. V., Williams, D. R., & Wolfe, W. L. (1995). Handbook of Optics Volume I Fundamentals, Techniques. *Handbook of Optics Volume I Fundamentals*.
- Bellitto, V. (2012). *Atomic force microscopy: imaging, measuring and manipulating surfaces at the atomic scale*: BoD–Books on Demand.
- Beşergil B., (2022). Işın Kaynakları. “Lazer Kaynaklar.” Erişim Tarihi: 15 Ekim 2022. http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/5_21.html
- Born, M., & Wolf, E. (2013). *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*: Elsevier.
- Bowker, M., & Davies, P. R. (2009). *Scanning tunneling microscopy in surface science*: Wiley-VCH.
- Bozzola, J. J., & Russell, L. D. (1999). *Electron microscopy: principles and techniques for biologists*: Jones & Bartlett Learning.
- Braga, P. C., & Ricci, D. (2004). *Atomic force microscopy: biomedical methods and applications* (Vol. 242): Springer Science & Business Media.
- Braunsmann, C., Prucker, V., & Schäffer, T. E. (2014). “Optical knife-edge displacement sensor for high-speed atomic force microscopy.” *Applied Physics Letters*, 104(10), 103101.
- Bridges, J., Dawson, U. K., Jong, I. R. L., Rivm, Jung, T., Proykova, A., . . . Fi. (2010). *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks SCENIHR: Scientific Basis for the Definition of the Term “Nanomaterial”*.
- Buchwald, J. Z. (1989). *The rise of the wave theory of light: Optical theory and experiment in the early nineteenth century*: University of Chicago Press.
- Cecchini, R., & Pelosi, G. (1990). Diffraction: the first recorded observation. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 32(2), 27-30. doi: 10.1109/74.80496
- Chen, C. J. (2021). *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy Third Edition* (Vol. 69): Oxford University Press, USA.
- Choudhary, O. P., & Choudhary, P. (2017). Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantages in Imaging Components. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6, 1877-1882. doi: 10.20546/ijcmas.2017.605.207

- Chugui, Y. V. (2012). "Optical measurement systems and technologies for scientific and industrial applications." *Pattern Recognition and Image Analysis*, 22(1), 10-21. doi: 10.1134/S1054661812010105
- Chursin, Y. A. and Fedorov, E. M. (2015). "Methods of resolution enhancement of laser diameter measuring instruments". *Optics & Laser Technology*, 67, 86-92.
- Çelik, G., Kurt, M., & Kaya, N. (2023). "A Methodology for Optical Edge Diffraction Analysis Depending on Incident Wavelength and Edge Roughness." *International Journal of Laser Science*, Vol:3, pp:141-150.
- De Matos, R. (2017). *High Efficiency Solar Pumped Laser Through a Ring Array Concentrator*.
- Dijksterhuis, F. J. (2004). *Lenses and waves: Christiaan Huygens and the mathematical science of optics in the seventeenth century* (Vol. 9): Springer Science & Business Media.
- Double Slit Diffraction. (2020). Retrieved 01.01.2023, from <https://cronodon.com/Atomic/Photon.html>
- Driver, L. D., and Kanda, M. (1988). An optically linked electric and magnetic field sensor for Poynting vector measurements in the near fields of radiating sources. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 30(4), 495-503.
- Dudderar, T., and Simpkins, P. (1982). "The development of scattered light speckle metrology." *Optical engineering*, 21(3), 396-399.
- Eaton, P., & West, P. (2010). *Atomic force microscopy*: Oxford university press.
- Egerton, R. F. (2005). *Physical principles of electron microscopy* (Vol. 56): Springer.
- Elektron Mikroskoplarının Çalışma Prensibi. (2014). Erişim Tarihi: 01.02.2023, from <http://www.acikbilim.com/2014/02/dosyalar/daha-yakin-olmak-icin-elektron-mikroskoplari-2.html>
- Erf, R. K. (1978). *Specialized metrological applications of speckle*: Academic, New York.
- Ersoy, O. K. (2006). *Diffraction, Fourier optics and imaging*: John Wiley & Sons.

- Fitzpatrick, R. (2010). *Maxwells Equations and the Principles of Electromagnetism*: Laxmi Publications, Ltd.
- Fleisch, D. (2008). *A student's guide to Maxwell's equations*: Cambridge University Press.
- Flood, R., McCartney, M., & Whitaker, A. (2014). *James Clerk Maxwell: perspectives on his life and work*: OUP Oxford.
- Fraden, J. (1994). *Handbook of modern sensors*: Springer.
- Françon, M. (2012). *Laser speckle and applications in optics*: Elsevier.
- Frankel, T. (1974). Maxwell's equations. *The American Mathematical Monthly*, 81(4), 343-349.
- Furlani, E. (2001). Review of Maxwell's Equations (pp. 73-95).
- Gan, W. S. (2022). Quantum image processing *Quantum Acoustical Imaging* (pp. 83-86): Springer.
- Güzel, E., ve Özlüoymak, Ö. B. Elektromanyetik Spektrumun Tarım Makinaları Araştırmalarında Kullanımı. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11(4), 315-320.
- Harness, A., Shaklan, S., Cash, W., and Dumont, P. (2018). Advances in edge diffraction algorithms. *JOSA A*, 35(2), 275-285.
- Haugstad, G. (2012). *Atomic force microscopy: understanding basic modes and advanced applications*: John Wiley & Sons.
- Haus, J. (2010). *Optical sensors: basics and applications*: John Wiley & Sons.
- Hecht, E. (2016). *Optics, global edition*: Pearson Education UK.
- Hecht, J. (2018). *Understanding lasers: an entry-level guide*: John Wiley & Sons.
- Hitz, C. B., Ewing, J. J., & Hecht, J. (2012). *Introduction to laser technology*: John Wiley & Sons.
- Huang, F., Klette, R., & Scheibe, K. (2008). *Panoramic imaging: sensor-line cameras and laser range-finders*: John Wiley & Sons.
- Jacobsen, C. (2019). *X-ray Microscopy*: Cambridge University Press.
- Jerome, W. G., & Price, R. L. (2018). *Basic confocal microscopy*: Springer.
- Kamer Aras, C. F. (2011). *18. ve 19. yüzyıllarda optik kuramlar*. Namık Kemal Üniversitesi.

- Kao, M.-S., & Chang, C.-F. (2020). *Understanding Electromagnetic Waves*: Springer.
- Kasap, S. (2013). *Optoelectronics & photonics: principles & practices: international edition*: Pearson.
- Kasnak, G., ve Fıratlı, H. (2016). ” Lazer Fiziği ve Lazer Uygulamalarında Temel Kavramlar. *Türkiye Klinikleri Periodontology-Special Topics*, 2(2), 1-6.
- Kaya, N., Strohaber, J., Kolomenskii, A., Kaya, G., Schröder, H., & Schuessler, H. (2012). “White-light generation using spatially-structured beams of femtosecond radiation.” *Optics express*, 20(12), 13337-13346.
- Keller, J. B. (1962). Geometrical theory of diffraction. *Josa*, 52(2), 116-130.
- Kipnis, N. (2012). *History of the Principle of Interference of Light* (Vol. 5): Birkhäuser.
- Kırımım. (2021). Erişim Tarihi: 01.11.2022, from <https://www.nkfu.com/fraunhofer-kirinimi-nedir-fresnel-kirinimi-nedir-nasil-gerceklesir-aciklamasi/>
- Kirkland, K., & Grady, S. M. (2006). *Optics: Illuminating the Power of Light*: Facts on File.
- Kizuka, Y., Yamauchi, M., and Matsuoka, Y. (2008). Characteristics of a laser beam spot focused by a binary diffractive axicon. *Optical engineering*, 47(5), 053401.
- Klem-Musatov, K., Hoerber, H. C., Moser, T. J., & Pelissier, M. A. (2016). *Classical and modern diffraction theory*: Society of Exploration Geophysicists.
- Kong, J. A. (1975). Theory of electromagnetic waves. *New York*.
- Kubbinga, H. (1995). Christiaan Huygens and the foundations of optics. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 4(6), 723.
- Kuru, M. (2023). Elektron Mikroskopları. Erişim Tarihi: 01.02.2023, from <https://avys.omu.edu.tr>
- Kurt, A., T., (2017). “Lazer, Lazerin Çalışma Prensibi ve Lazer Çeşitleri.” Erişim Tarihi:21 Eylül 2022, <https://electrologs.com/2017/12/27/lazerlazerin-calisma-prensibi-ve-lazer-cesitleri/>
- Lazer Kaynaklar. (2023). Retrieved 01.01.2023, 2023, from http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/5_21.html

- Lee, C., Jeon, S., Stepanick, C. K., Zolfaghari, A. and Tarbuton, J. A. (2017). "Investigation of optical knife edge sensor for low-cost, large-range and dual-axis nanopositioning stages." *Measurement*, 103, 157-164.
- Lee, C., and Park, S. (2018). "Diffraction Loss Prediction of Multiple Edges Using Bullington Method with Neural Network in Mountainous Areas." *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018.
- Lee, C., Zolfaghari, A., Kim, G. H., and Jeon, S. (2019). "An optical measurement technique for dynamic stiffness and damping of precision spindle system." *Measurement*, 131, 61-68.
- Lindner, F., Schätzel, M. G., Walther, H., Baltuška, A., Goulielmakis, E., Krausz, F., . . . Paulus, G. G. (2005). Attosecond double-slit experiment. *Physical review letters*, 95(4), 040401.
- Lipson, A., Lipson, S. G., & Lipson, H. (2010). *Optical physics*: Cambridge University Press.
- Marturi, N. (2013). *Vision and visual servoing for nanomanipulation and nanocharacterization in scanning electron microscope*. Université de Franche-Comté.
- McGloin, D., and Dholakia, K. (2005). "Bessel beams: diffraction in a new light." *Contemporary physics*, 46(1), 15-28.
- Meyer, E., Hug, H. J., & Bennewitz, R. (2003). *Scanning probe microscopy* (Vol. 4): Springer.
- Milonni, P. W., & Eberly, J. H. (2010). *Laser physics*: John Wiley & Sons.
- Nahar, S., Schmets, A., Schitter, G., and Scarpas, A. (2014). *Quantitative nanomechanical property mapping of bitumen micro-phases by peak-force atomic force microscopy*. Paper presented at the 12th ISAP Conference on.
- Newton, I. (1952). *Opticks, or, a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light*: Courier Corporation.
- Paddock, S. W. (1999). *Confocal microscopy: methods and protocols* (Vol. 122): Springer.
- Paddock, S. W., Fellers, T., & Davidson, M. (2014). *Confocal microscopy*: Springer.

- Peatross, J., and Ware, M. (2011). *Physics of light and optics*: Brigham Young University, Department of Physics Brigham.
- Quagliotti, D. (2017). *Multi Scale Micro and Nano Metrology for Advanced Precision Moulding Technologies*.
- Quinn, T., and Kovalevsky, J. (2005). “The development of modern metrology and its role today.” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363(1834), 2307-2327.
- Robson, A.-L., Dastoor, P. C., Flynn, J., Palmer, W., Martin, A., Smith, D. W., . . . Hua, S. (2018). “Advantages and limitations of current imaging techniques for characterizing liposome morphology.” *Frontiers in pharmacology*, 9, 80.
- Saleh, M. (2017). *Band Structure of Some Photonic Crystals*.
- Santhanakrishnan, T., Rajesh, R., Awasthi, R. L. and Sreehari, C. V. (2019). “Optical diffraction phenomena around the edges of photodetectors: A simplified method for metrological applications.” *Scientific Reports*, 9(1), 1-8.
- Sayre, D., and Chapman, H. (1995). “X-ray microscopy.” *Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography*, 51(3), 237-252.
- Schiller, C. (1997). “Motion mountain.” *The adventure of physics*, 5.
- Schmahl, G., and Rudolph, D. (2013). *X-Ray Microscopy: Proceedings of the International Symposium, Göttingen, Fed. Rep. of Germany, September 14–16, 1983* (Vol. 43): Springer.
- Semra, U. (2019). “Maxwell’in Alan Denklemleri Üzerine Bir Değerlendirme.” *Felsefe Arkivi* (51), 261-270.
- Shannon, R. R., and Ford, B. J. (2023). Confocal microscopes. Retrieved 01.02.2023, 2023, from <https://www.britannica.com/technology/microscope/Confocal-microscopes>
- Sharma, K. K. (2006). *Optics: principles and applications*: Elsevier.
- Shetty, P. P., and Bingi, J. (2020). “Demonstration of synergic Fresnel and Fraunhofer diffraction for application to micrograting fabrication.” *Optics & Laser Technology*, 130, 106340. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106340>
- Siegman, A. E. (1986). *Lasers*: University science books.

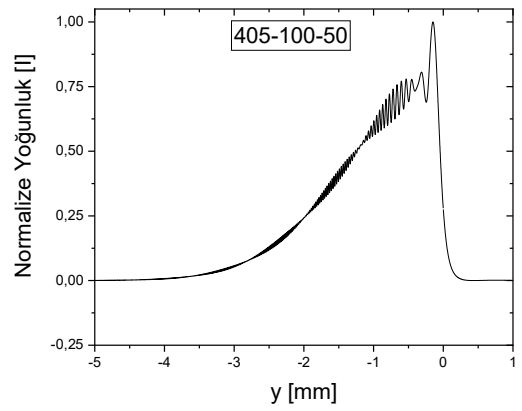
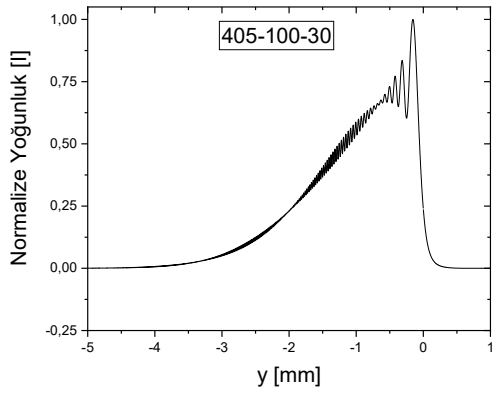
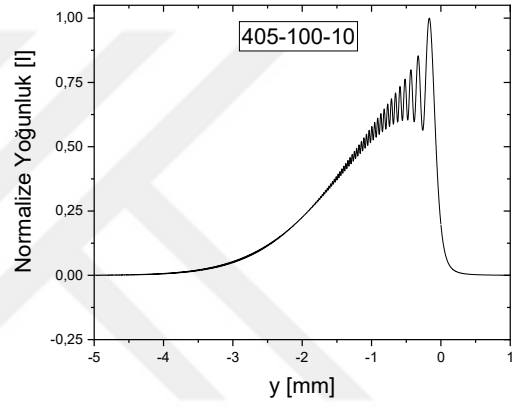
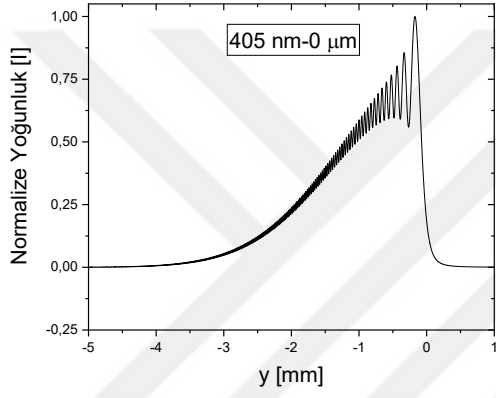
- Smith, F. G., King, T. A., & Wilkins, D. (2007). *Optics and photonics: an introduction*: John Wiley & Sons.
- Stevanovic, N., Markovic, V. M., & Nikezic, D. (2017). “New method for determination of diffraction light pattern of the arbitrary surface.” *Optics & Laser Technology*, 90, 90-95.
- Svelto, O., and Hanna, D. C. (1998). *Principles of lasers* (Vol. 4): Springer.
- Tabib-Azar, M. (1999). Near Real-Time Monitoring of Thin-Film Materials and Their Interfaces Using Evanescent Microwave Probes. 90.
- Tekin, S. (2008). Osilatör sel sisteminde optik kavite yapıları ve lazer kazanç mekanizmaları. *Ankara Üniversitesi*.
- Thorlabs. (2022). EXULUS-HD1/M - Spatial Light Modulator, 1920 x 1080, 400 - 850 nm, M4 Taps Retrieved 04.12.2022, 2022, from <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=EXULUS-HD1/M>
- Thorlabs. (2023). HRS015B - Stabilized HeNe Laser, 632.992 nm (Vacuum), 1.2 mW, Polarized from <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=HRS015B>
- Torun, H. (2020). Atomik kuvvet mikroskobu nedir? Ne işe Yarar? Retrieved 01.02.2023, from <https://sarkac.org/2020/12/atomik-kuvvet-mikroskobu-nedir-ne-ise-yarar/>
- Ul-Hamid, A. (2018). *A beginners' guide to scanning electron microscopy* (Vol. 1): Springer.
- Vicente, O. C., and Caloz, C. (2021). Bessel beams: a unified and extended perspective. *Optica*, 8(4), 451-457.
- Vitasek, J., Latal, J., Skapa, J., Koudelka, P., Hanacek, F., Siska, P., and Vasinek, V. (2011). *The Optical Intensity Distribution in The Far Field*.
- Vohnsen, B. (2006). “A Short History of Optics.” *Physica Scripta*, 2004, 75. doi: 10.1238/Physica.Topical.109a00075
- Watt, I. M. (1997). *The principles and practice of electron microscopy*: Cambridge University Press.
- Westfall, R. S. (1994). *The Life of Isaac Newton*: Cambridge University Press.
- Whitaker, H. A., Smith, C. U. M., and Finger, S. (2007). *Brain, mind and medicine: essays in eighteenth-century neuroscience* (Vol. 389): Springer.

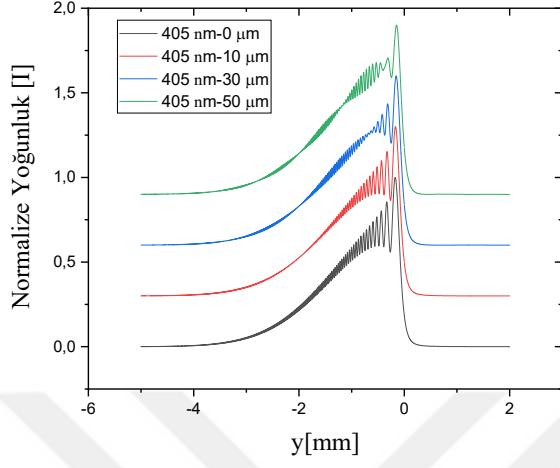
- Wikipedia. (2020). Scanning tunneling microscope. Retrieved 01.01.2023, from https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope
- Winey, M., Meehl, J. B., O'Toole, E. T., and Giddings Jr, T. H. (2014). "Conventional transmission electron microscopy." *Molecular biology of the cell*, 25(3), 319-323.
- Yariv, A., and Yeh, P. (2007). *Photonics: optical electronics in modern communications*: Oxford university press.
- Yamamoto, H., Matsuyama, T. and Wada, M. (2002). "Shape distinction of particulate materials by laser diffraction pattern analysis." *Powder technology*, 122(2-3), 205-211.
- Yildiz, K. (2010). Tabakalı bazı ince filmlerin mikroyapılarının elektron mikroskopisi ile incelenmesi.
- Zarbock, A., and Ley, K. (2009). "New Insights Into Leukocyte Recruitment by Intravital Microscopy." *Current topics in microbiology and immunology*, 334, 129-152. doi: 10.1007/978-3-540-93864-4_6
- Ziggelaar, A. (1980). "How did the wave theory of light take shape in the mind of Christiaan Huygens?" *Annals of Science*, 37(2), 179-

EKLER

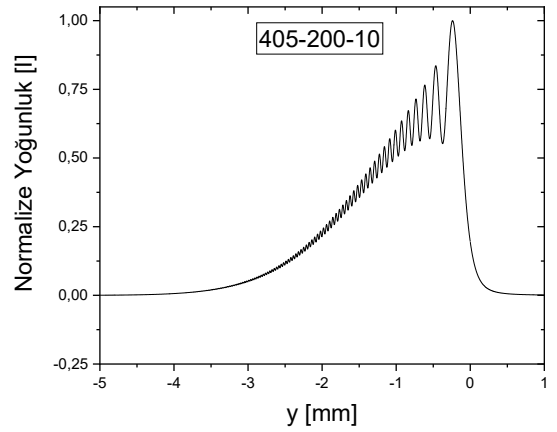
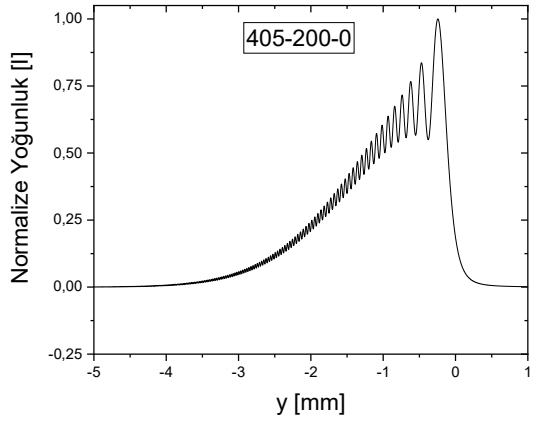
EK 1

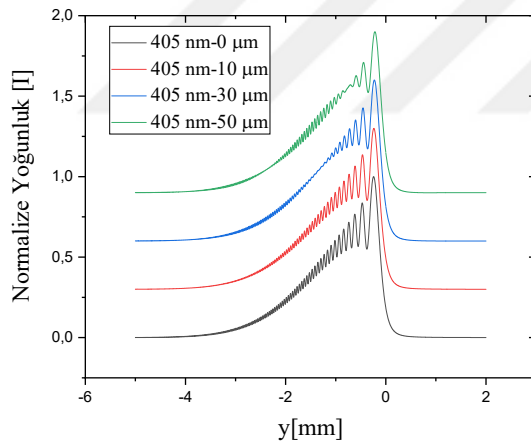
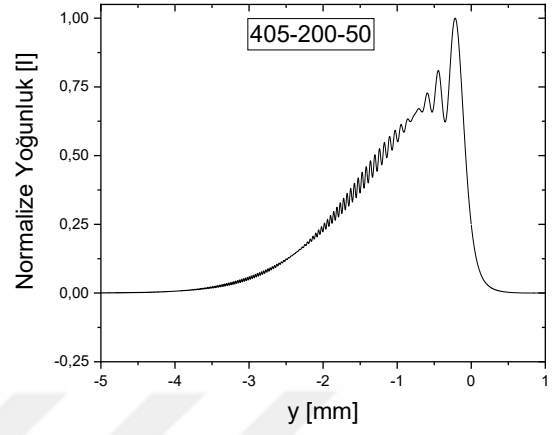
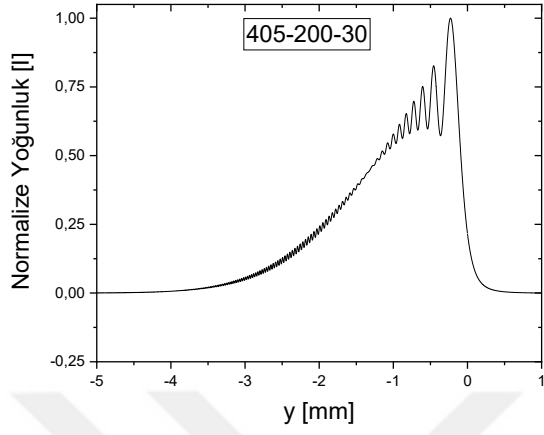
Gauss dalga profilinde $d=100$ mm mesafe ve 405 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler



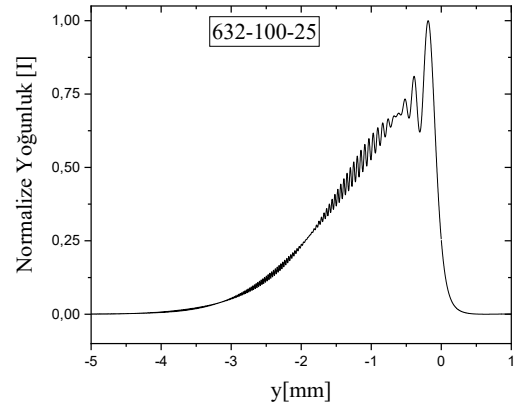
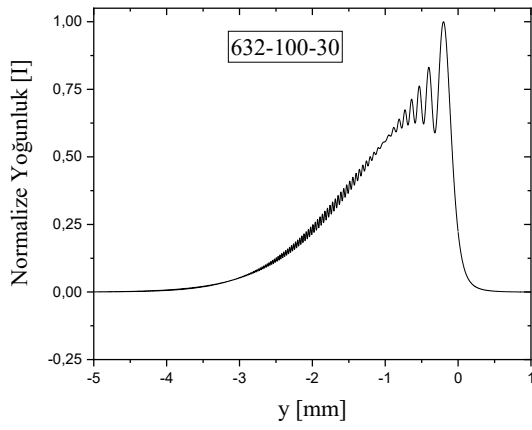
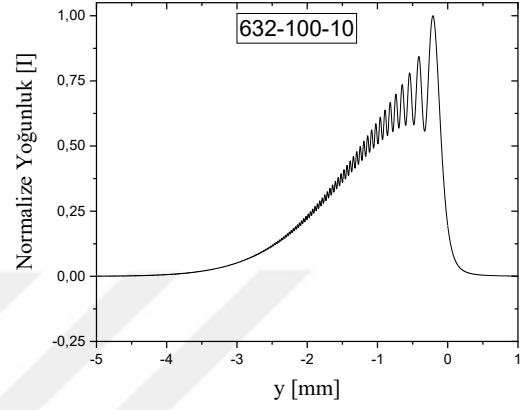
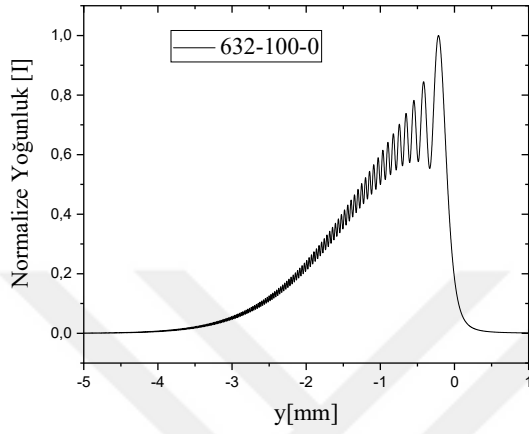


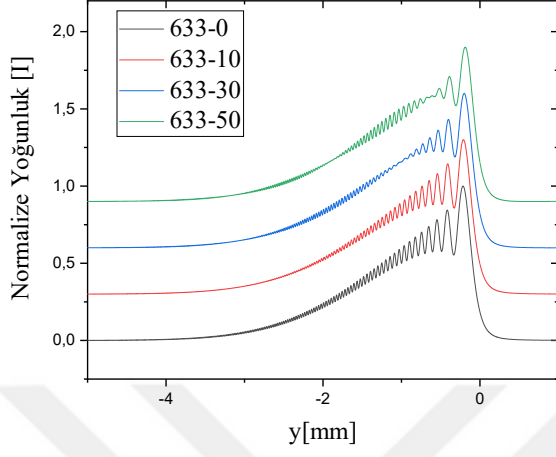
Gauss dalga profilinde $d=200$ mm mesafe ve 405 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler



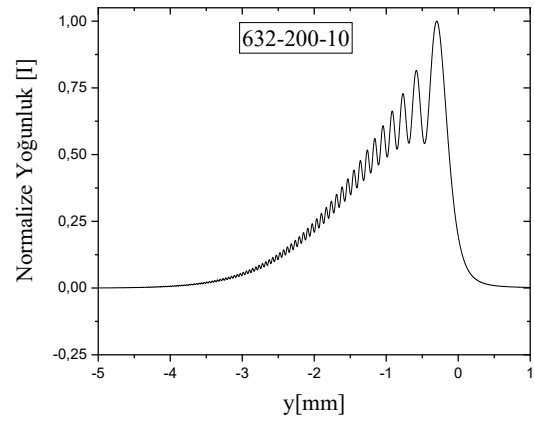
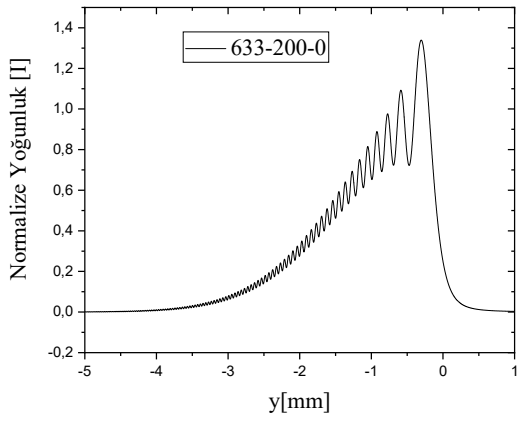


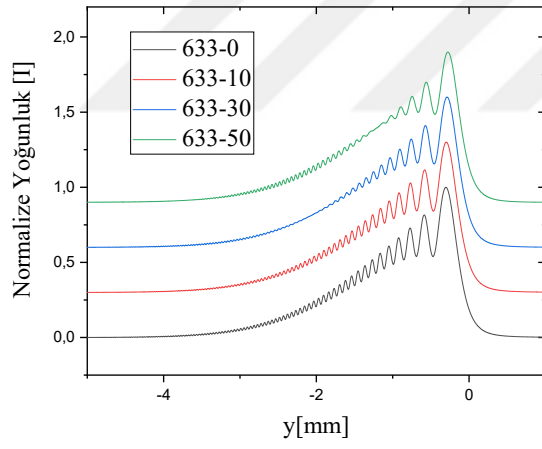
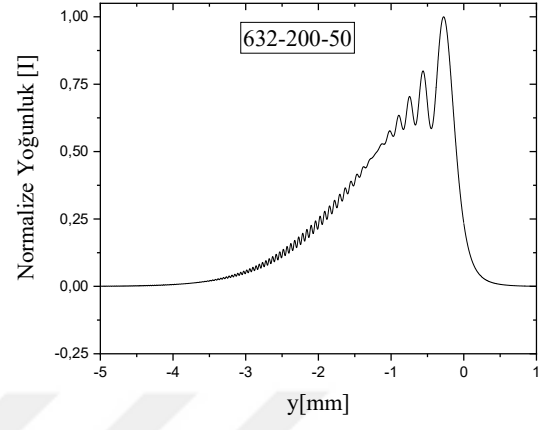
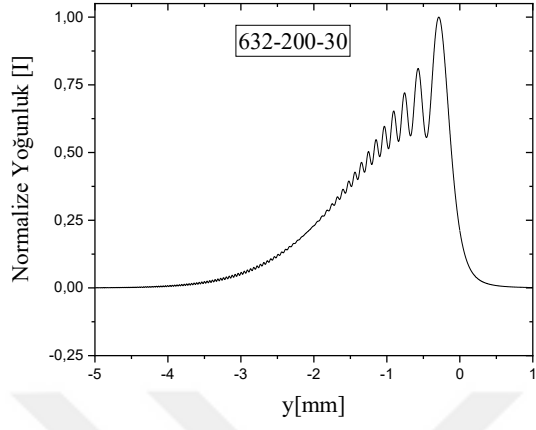
Gauss dalga profilinde $d=100$ mm mesafe ve 633 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler



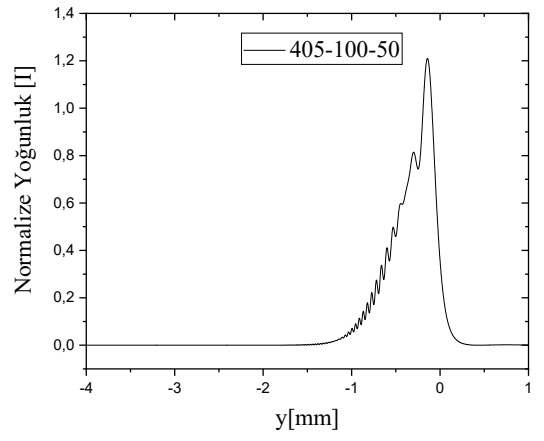
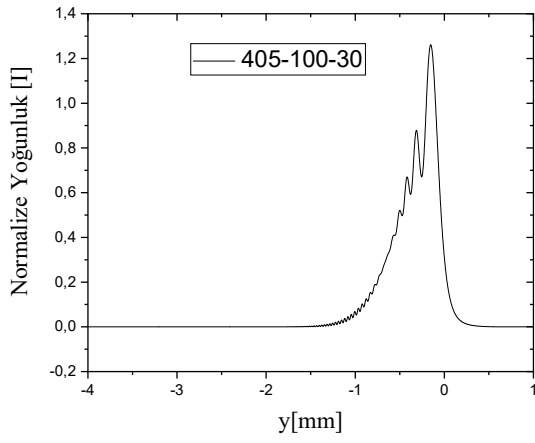
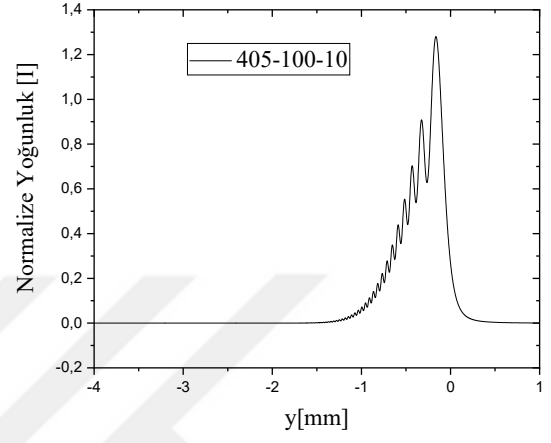
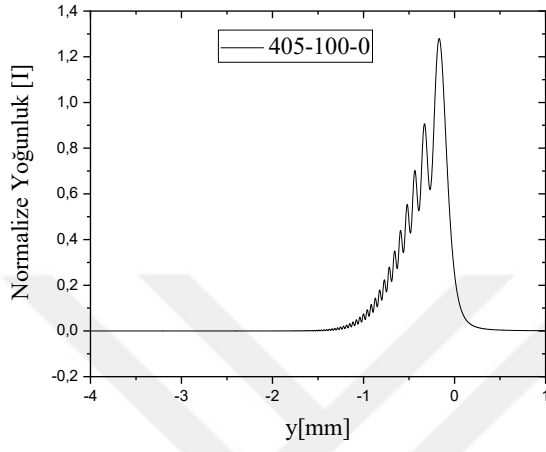


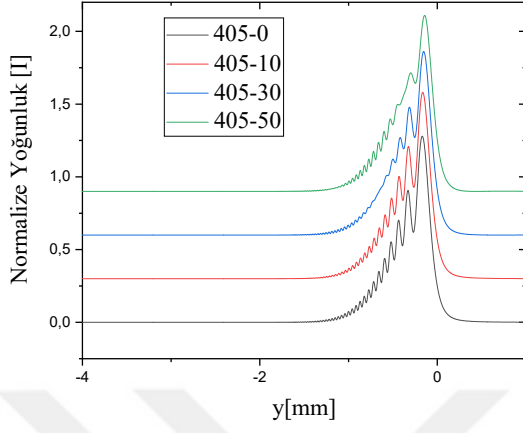
Gauss dalga profilinde $d=200$ mm mesafe ve 633 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler



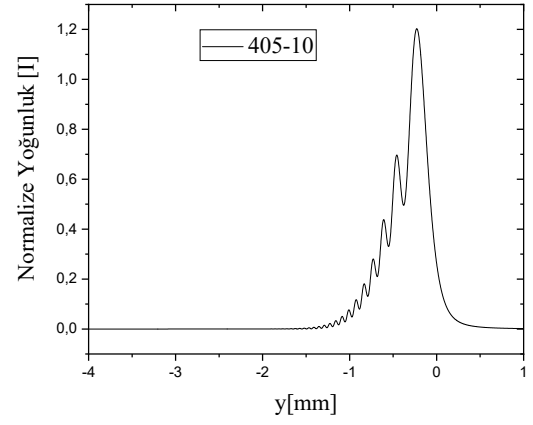
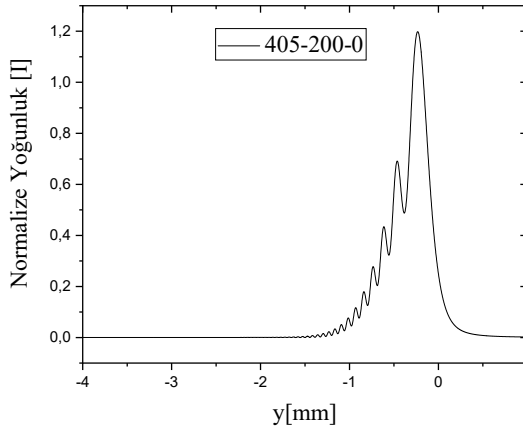


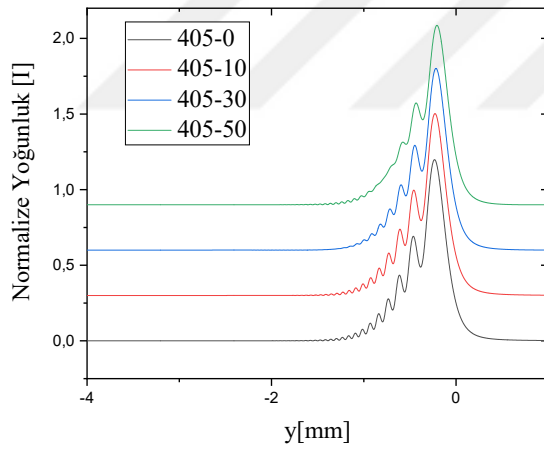
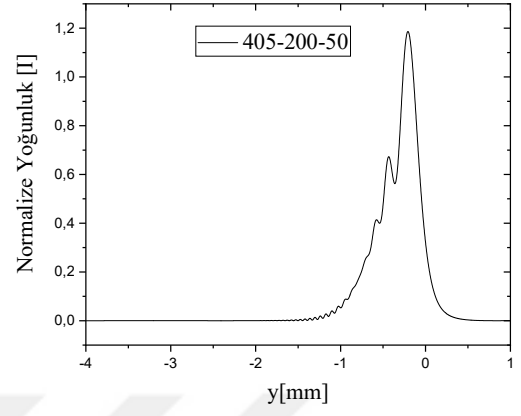
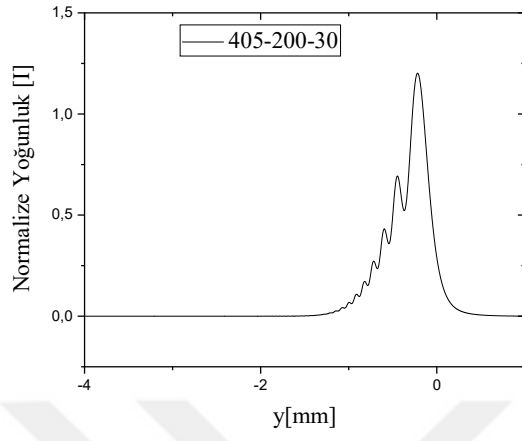
Bessel dalga profilinde $d=100$ mm mesafe ve 405 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler



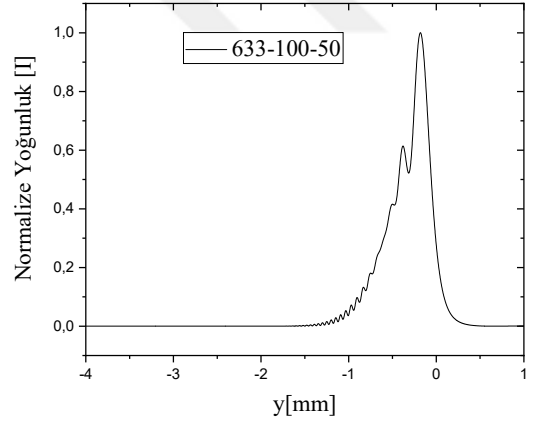
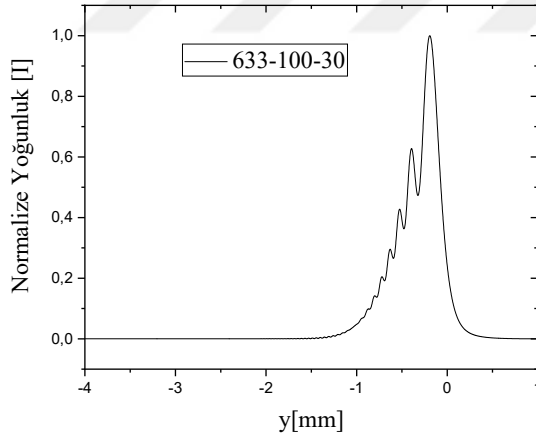
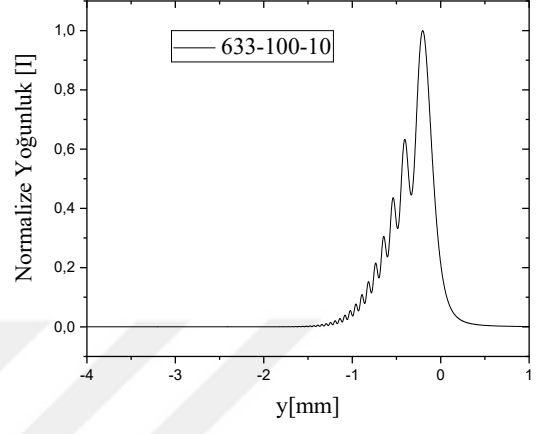
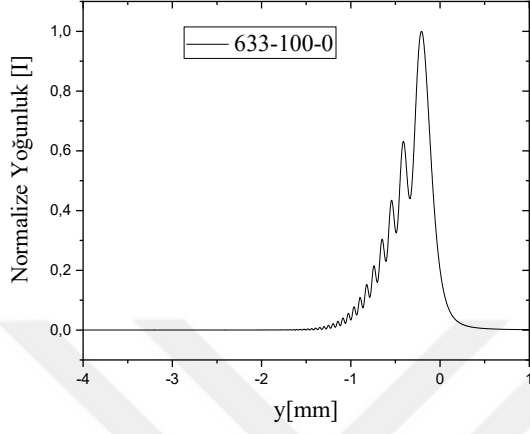


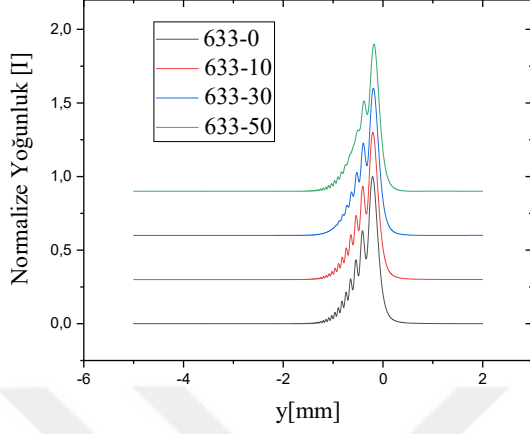
Bessel dalga profilinde $d=200$ mm mesafe ve 405 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler



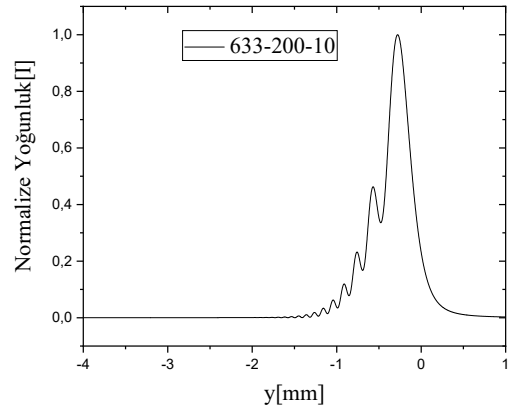
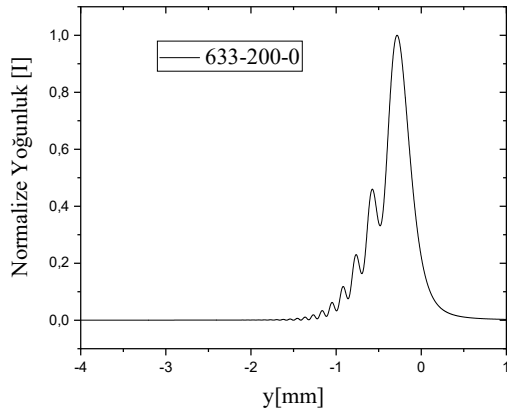


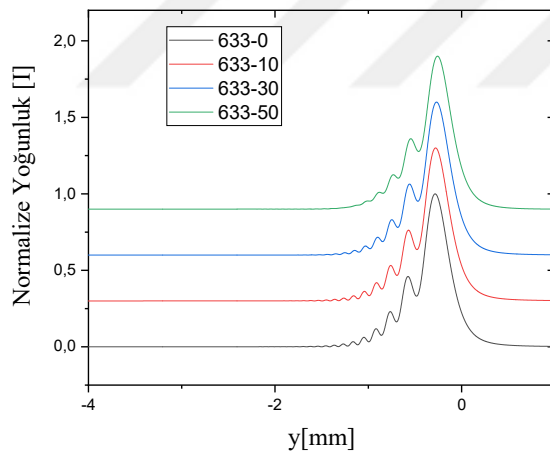
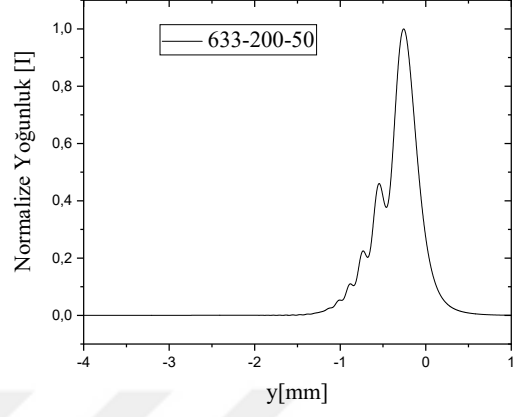
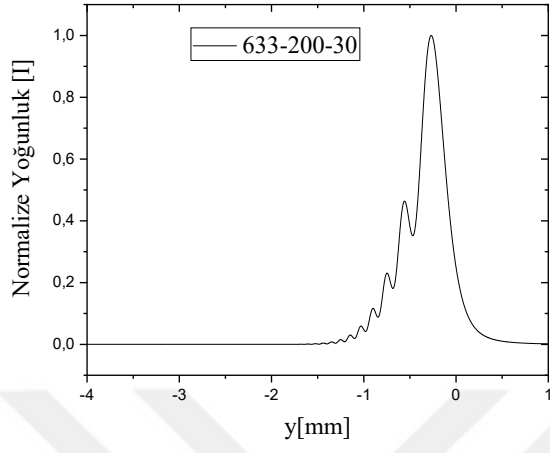
Bessel dalga profilinde $d=100$ mm mesafe ve 633 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler





Bessel dalga profilinde $d=200$ mm mesafe ve 633 nm dalgaboyunda elde edilen grafikler





Çelik, G., Kurt, M., & Kaya, N. (2023). “A Methodology for Optical Edge Diffraction Analysis Depending on Incident Wavelength and Edge Roughness”. *International Journal of Laser Science*, Vol:3, pp:141-150.

Int. Journ. of Laser Science, Vol. 3, pp. 141–150
Reprints available directly from the publisher.
Photocopying permitted by license only.

©2022 OCP Materials Science and Engineering
Published by license under the OCP Science imprint,
Old City Publishing, Inc.

A Methodology for Optical Edge Diffraction Analysis Depending on Incident Wavelength and Edge Roughness

G. ÇELİK^{1,*}, M. KURT² AND N. KAYA³

¹Department of Physics, School of Graduate Studies, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, 17100, Turkey

²Department of Electrical-Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, 17100, Turkey

³Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, 17100, Turkey

Diffraction as being useful and precise measurement method is widely used in sub-micrometre metrology. Scientists make a great effort to enhance precision of sub-micrometre measurements by means of the diffraction method, due to a high potential of diffraction method in metrology. In spite of being made lots of experimental and theoretical study related to diffraction technique as a measurement method, there are so limited studies served detailed mathematical solutions in the aspect of edge roughness and incident beam wavelength. In this study, optical diffraction analysis was conducted theoretically using edge diffraction methodology for different experimental configuration parameters for the combination of incident wavelength and edge roughness. We observed noticeable changes in the diffraction patterns obtained for different roughness and incident wavelengths. The results clearly show that diffraction pattern analysis can be used as an innovative approach to enhance the sensitivity in many applications such as surface analysis, particle sizing, advanced sensor applications, etc.

Keywords: Laser beam, optical diffraction, Fresnel diffraction, wavelength, edge roughness, measurement, theoretical methodology

*Corresponding author: E-mail: [REDACTED]