

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BESSEL HÜZMELERİNİN TEORİK, HESAPLAMALI VE DENEYSEL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

Dürdane AYNUR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BESSEL HÜZMELERİNİN TEORİK, HESAPLAMALI VE DENEYSEL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

Dürdane AYNUR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BESSEL HÜZMELERİNİN TEORİK, HESAPLAMALI VE DENEYSEL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

Dürdane AYNUR

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BESSEL HÜZMELERİNİN TEORİK, HESAPLAMALI VE DENEYSEL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Dürdane AYNUR
FİZİK
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 14/06/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Ramazan ŞAHİN (Danışman)

Doç.Dr. Mustafa KURT

Dr.Öğr.Üyesi Şerafettin YALTKAYA

ÖZET

BESSEL HÜZMELERİNİN TEORİK, HESAPLAMALI VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Dürdane AYNUR

Yüksek Lisans, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Şahin

Haziran 2019; 38 sayfa

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte lazerlerin de kullanımı yaygınlaşmıştır. Birçok çalışma alanına sahip olan lazerler özellikle bilimsel çalışmalarda ve endüstride oldukça kullanılmaktadır. Bunun yanında biyomedikal görüntüleme, doğrusal olmayan optik, mikro-işleme, hüzmeye şekillendirme gibi daha birçok alanda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır.

Son yıllarda hüzmeye şekillendirme konusunda birçok çalışma yapılmaktadır. Şekillendirilen hüzmelerden en çok öne çıkan Gauss, Airy, Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeleridir. Kırınımsız ilerlemeleri ve kendini tamir etme özellikleri ile Bessel hüzmeleri oldukça ilgi görmektedir.

Çığır açan gelişmelere tanıklık eden optik, Bessel ve Bessel-Vortex hüzmelerinin keşfedilmesi ile farklı bir boyut kazanmıştır. Bu hüzmeler uzun süre odaklı kalmaları ve karşılaştıkları engelden sonra da bozunmadan ilerleyebilmeleri sayesinde Gauss hüzmelerinin önüne geçmiştir. Farklı optik malzemeler kullanılarak elde edilebilmektedirler. Fakat kolaylık ve verimlilik açısından Axicon kullanımı daha çok tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında da, hüzmeye şekillendirme yöntemi kullanılarak Bessel ve Bessel-Vortex hüzmelerinin elde edilip karakterize edilmesi ve matematiksel hesaplamalarla karşılaştırılması, aynı zamanda Axicon mercekle odaklama yöntemi kullanılmaktadır. Ölçümler hem eş fazlı kaynaklar hem de eş fazlı olmayan kaynaklar için yapılmıştır. Bunun için farklı dalga boylarında lazerler ve LED'ler ile çalışılmıştır. Literatüre bakıldığında yapılan çalışmaların çoğunlukla eş fazlı kaynaklar ile olduğu görülmektedir. Bu tez çalışması ile hem literatüre katkı sağlanıp hem de uygulama alanlarının genişletilmesi sağlanacaktır.

ANAHTAR KELİMELER: Hüzmeye şekillendirme, gauss hüzmeleri, Axicon, Bessel hüzmeleri, Bessel-Vortex hüzmeleri

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Ramazan ŞAHİN

Doç. Dr. Mustafa KURT

Dr. Öğr. Üyesi Şerafettin YALTKAYA

ABSTRACT

ANALYSIS OF BESSEL BEAMS THROUGH THEORETICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Dürdane AYNUR

MSc Thesis in Physics

Supervisor: Assist.Prof. Ramazan SAHIN

June 2019; 38 pages

With the development of technology, the use of lasers has become widespread in many areas. Lasers with many fields of study are especially used in scientific studies and industry. In addition to biomedical imaging, in non-linear optics, in micro-processing, beam shaping is often seen in many other areas.

In recent years, many studies have been done on shaping the laser beam. Gauss, Airy, Bessel and Bessel-Vortex beams are the most prominent of these special beams. Among them, Bessel beams are very popular with their diffraction-free and self-repairing properties.

By witnessing breakthrough developments, the optics has gained a different dimension with the discovery of Bessel and Bessel-Vortex beams. These beams remain focused for longer distances and prevented the Gaussian beam from being able to move through the diffraction. They can be obtained using different optical methods. However, using Axicon is more preferred in terms of convenience in experiments and energy efficiency.

In this thesis, Bessel and Bessel-Vortex beams are experimentally obtained and characterized. Moreover, experimental results are then compared with mathematical calculations. The experiments are conducted with both the coherent sources and incoherent sources. For this purpose, different sources with different wavelengths are studied with lasers and LEDs. When we look at the literature, it is seen that the studies are mostly with coherent sources. Therefore, this thesis will contribute to the literature and expand the application areas in which incoherent sources are used.

KEYWORDS: Beam shaping, Gauss beam, Axicon, Bessel beam, Bessel-vortex beam

COMMITTEE: Assist. Prof. Ramazan SAHIN

Assoc. Prof. Mustafa KURT

Assist. Prof. Serafettin YALTKAYA

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının öneri aşamasından, sistematik analizlerin ve deneylerin yapılmasına kadar desteğini esirgemeyen, sabırla yol gösteren ve bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman başvursam bana kıymetli zamanını ayırıp bilgi, birikim ve tecrübelerini aktararak yakından ilgilenen, birlikte çalışmaktan onur duyduğum değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ramazan ŞAHİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen ve her zaman destek olan, lisans öğretiminden itibaren engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle akademik hayatıma bilimsel temeller ışığında katkılar sağlayan Dr.Öğr. Üyesi Şerafettin YALTKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübeleri ile bana destek olan ve bir abla gibi yol gösteren, her konuda yanımda olan, aynı laboratuarda mesai harcayıp bilimsel birikim elde ettiğim ekip arkadaşım Akdeniz Üniversitesi Fizik bölümü doktora öğrencisi Gülten ONAY'a teşekkür ederim.

Son olarak ama tükenmeyen sevgiyle, bugüne kadar maddi manevi hiç bir desteğini eksik etmeyen her koşulda arkamda duran ve bana destek olan, eğitim öğretim hayatımda büyük bir pay sahibi olan babama, anneme ve ağabeyime, canım aileme, sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Hüzme Şekillendirme.....	3
1.2. Gauss Hüzmeleri	3
1.3. Bessel Hüzmeleri.....	6
2. KAYNAK TARAMASI	11
3. MATERYAL VE METOD	14
3.1. Gauss Hüzmeleri	16
3.2. Bessel Hüzmeleri.....	17
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
5. SONUÇLAR	35
6. KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bessel Hüzmelerinin Teorik, Hesaplamalı ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

14/06/2019

Dürdane Aynur

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

cm	: santimetre
μm	: mikrometre
mw	: miliwatt
nm	: nanometre
mm	: milimetre
E_0	: elektrik alan genliği
R	: radyal koordinat
w_0	: şiddetin $1/e^2$ değerine düştüğü hüzme yarıçap değerı
z_R	: Rayleigh mesafesi
J_n	: birinci tür n'inci derece Bessel fonksiyonları
k_z	: boyuna dalga vektörü
k_r	: enine dalga vektörü
w	: Gauss hüzme yarıçapı
λ	: dalga boyu

Tezde ondalık ayıracı olarak ("21.01") kullanılmıştır.

Kısaltmalar

He-Ne:	Helyum-Neon Lazeri
SLM	: Spatial Light Modulator
CCD	: Charge Coupled Device
SFP	: Spiral Faz Plakası

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kuramsal (a) iki ve (b) üç boyutta hesaplanan Gauss (TEM ₀₀) huzmesi ($\omega_0=1$ mm).....	4
Şekil 1.2. Kuramsal a) iki ve b) üç boyutta hesaplanan Laguerre-Gauss (TEM ₀₁) huzmesi ($\omega_0=1$ mm).....	4
Şekil 1.3. Gauss huzmesi şeması (Anonim 1)	5
Şekil 1.4. Bessel huzmesi elde etme yöntemi; Gauss huzmelerinin Axicon'dan (konik mercek) geçirilmesi.....	7
Şekil 1.5. Kuramsal olarak hesaplanan a) 2 ve b) 3 boyutlu Bessel huzmesi elektrik Alan profilleri. Hesaplamalarda dalgaboyu 633 nm, Konik Mercek Taban açısı 0.5° alınmıştır.....	8
Şekil 1.6. Kuramsal olarak hesaplanan a) 2 ve b) 3 boyutlu Bessel-Vortex huzmesi elektrik Alan profilleri. Hesaplamalarda dalgaboyu 633 nm, Konik Mercek Taban açısı 0.5° alınmıştır.....	8
Şekil 1.7. Kuramsal olarak hesaplanan a) I(r,z), Bessel huzmesi profili, b) bu profilin r=0 mm için ilerleme boyunca şiddet değeri ve c) Şiddetin en fazla olduğu konumda radyal ekseninde şiddet dağılımı.	10
Şekil 2.1. Quartz cam üzeri 5 nm Cr ⁺²⁵ nm Au film üzerinde gerçekleştirilen femtosaniye lazer ablasyon deneyleri optik mikroskop görüntüleri. a) Bessel huzmesi ile b) Bessel-Vortex huzmesi ile.....	11
Şekil 3.1. He-Ne lazer ve Bessel ile Bessel-Vortex huzmeleri şekillendirme deney düzeneği.....	14
Şekil 3.2. LED ışık kaynakları ile gerçekleştirilen hüzme şekillendirmeleri deney düzeneği	15
Şekil 3.3. Bessel ve Bessel-Vortex huzmeleri elde etme yöntemi. (SPP-Spiral Faz Plakası)	15
Şekil 3.4. CCD kamera ile kaydedilen Gauss huzmesi a) He-Ne lazer ve ona ait b) şiddet profili (şiddet profili kırmızı kesikli çizgi üzerinden hesaplanmıştır)	16
Şekil 3.5. CCD kamera ile kaydedilen kamera ile Axicon arasındaki uzaklığa göre a) 5 cm b) 10 cm c) 15 cm d) 20 cm e) 25 cm f) 30 cm Bessel huzmesi şiddet profilleri.....	17
Şekil 3.6. Bessel huzmesi şiddet- Axicon uzaklık grafiği (kuramsal karşılaştırma farklı taban açılı Axicon mercekler için yapılmıştır)	18
Şekil 3.7. Bessel huzmesi merkez spot çapı-uzaklık grafiği.....	19

Şekil 3.8. Bessel-Vortex hüzmeleri spot çapı-uzaklık grafiği (kuramsal olarak hesaplanan çap değeri yaklaşık 95 µm, deneysel olarak elde edilen ortalama çap değeri 108 µm' dir.).....	20
Şekil 3.9. Bessel-vortex hüzmeleri şiddet-uzaklık grafiği	21
Şekil 3.10. Bessel-Vortex hüzmeleri spot çapı-uzaklık grafiği (kuramsal olarak hesaplanan çap değeri yaklaşık 95 µm, deneysel olarak elde edilen ortalama çap değeri 108 µm' dir.).....	21
Şekil 3.11. He-Ne lazer kullanılarak hüzmeye şekillendirme analizleri a) Bessel huzmesi b) Bessel-Vortex hüzmeleri CCD kamera görüntüleri ve bu şiddet dağılımlarına ait c) Bessel ve d) Bessel-Vortex kesitleri	22
Şekil 3.12. Deneylerde kullanılan ışık kaynaklarının spektroskopik özellikleri a) He-Ne lazer b) Mavi renkli LED c) Yeşil renkli LED d) kırmızı renkli LED	23
Şekil 3.13. Renkli CCD kamera ile kaydedilen Bessel hüzmeleri görüntüleri a) Mavi b) Yeşil c) Kırmızı LED kaynaklar için	24
Şekil 3.14. Kırmızı LED kaynak için elde edilen a) Bessel ve b) Bessel-Vortex hüzmeleri CCD kamera görüntüleri.....	25
Şekil 3.15. Yeşil LED ile yapılan Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeye şekillendirme çalışmaları (Bessel hüzmeleri farklı iki uzaklıkta elde edilmiştir ve renkli CCD kamera kullanılmıştır.)	26
Şekil 3.16. Kırmızı LED ile yapılan Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeye şekillendirme çalışmaları (siyah-beyaz CCD kamera kullanılmıştır)	26
Şekil 3.17. Farklı LED ışık kaynakları için elde edilen Bessel hüzmeleri boyutunun hüzmeye ilerleme mesafesi ile değişimi sonuçları	28
Şekil 3.18. Kırmızı LED ışık kaynağı için elde edilen Bessel-Vortex hüzmeleri boyutunun hüzmeye ilerleme mesafesi ile değişimi sonuçları	28
Şekil 3.19. $\lambda=633$ nm dalgaboylu eş-fazlı ışık kaynağı için elde edilen ilerleme boyunca ve hem enine düzlemde hem de ilerleme doğrultusunda şiddet dağılımları a) ve b) ideal Axicon; c) ve d) yassı uçlu Axicon için hesaplanmıştır	29

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Farklı Axicon taban açıları ve farklı dalga boyuna sahip kaynaklar için kuramsal olarak hesaplanan Bessel hüzmesi merkez spot çapı değerleri	9
Çizelge 1.2. Farklı Axicon taban açıları ve farklı dalga boyuna sahip kaynaklar için kuramsal olarak hesaplanan Bessel-Vortex huzmesi merkez halka çapı değerleri	9
Çizelge 3.1. Farklı dalga boyuna sahip kaynaklar için kuramsal olarak hesaplanan Bessel hüzmesi merkez spot çapı değerleri.....	25

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun merakı, temel bilimler ve özellikle ışığın doğası hakkındaki çalışmaların çok eski çağlara kadar dayandığını göstermektedir. Işık nedir ve onunla neler yapılabilir? Neden şeffaf camların gece sanki bir ayna gibi davrandığı? Işık ışınlarının her zaman dosdoğru mu ilerleyeceği? Gökyüzünün rengi ve gökkuşağı olaylarının arkasındaki sırrın ne olduğu? Gibi sorular ve özellikle lazer ve normal beyaz ışık kaynakları arasındaki farkın ne olduğu soruları bu süreçte birçokları tarafından sorulmuş olmalıdır. Bu alandaki çalışmalar her ne kadar tarih öncesinden başlayıp 10. yüzyılda Alhazen tarafından gözdeki görme sürecinin ışık ile açıklanmasına kadar dayansa da özellikle yapılan gözlemler ve deneyler sayesinde kendisini 17. yüzyıldan sonra ivmelemeye başlamıştır. O zamana kadar yapılan ve Galileo' nun öncülük ettiği gökyüzü gözlemler ve sonrasında özel olarak tasarlanmış ışık ışını yönlendiricileri (mercekler ve aynalar vs.) ve lazerlerin yapılabilirliği ile hızlı bir gelişme gösteren optik özellikle uygulamalı optiğin öne çıkmasıyla olağanüstü gelişme göstermektedir. Özellikle 19. yüzyılda Maxwell tarafından ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunun ve bu elektromanyetik dalgaların hızının ışık hızı diye tabir edilen ve boşlukta en büyük değerini alan bir hızla ilerlediğini söylemesiyle bu alan yeni bir evrimle sürecine girmiştir. Kırılma, kırınım ve ışık ışınlarının girişimi, yapılan deneylerde ışığın kimi zaman dalga kimi zaman ise bir parçacık gibi davranması, Optik alanının gizemini araştırmacılar arasında artırmaktadır. Çok fazla uygulama alanına sahip olan Optik; teknolojik anlamda günümüzde evrensel düzeyde büyümeye sahiptir. Optik teknolojisindeki hızlı ve büyük gelişmeler muhtelif lazer kaynaklarının kullanımını da arttırmıştır. Yapılan bilimsel çalışmalar ve teknolojik uygulamalarda (Elektromanyetik tayfın Ultraviyole, Görünür ve Kızılötesi bölgelerinde), farklı türden lazerler (sürekli lazerler, puls-atımlı lazerler ve yüksek güçlü lazerler) önemli bir yere sahiptir. Bilimsel araştırmaların yanında endüstriyel (özellikle elektrik kablolarının yerinin fiber-optik kablolarla yer değiştirildiği alanlarda) ve biyomedikal (tomografi, cerrahi, tanı-teşhis ve tedavi süreçlerinde) uygulamalarda oldukça kullanılmaktadır.

Bunların dışında; özellikle interferometre deneyleri ile ışığın bir dalga özelliği olan girişim sebebiyle çok hassas ölçümlerde kullanılabileceği fikri yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda 19. yüzyılda Michelson ve Morley tarafından yapılan tasarımla dünyanın hızı hesaplanmıştır. Günümüzde Fabry-Perot interferometresi ile yapılan mesafe ölçümlerinde, 0.1 nm altındaki boyutlarda titreşim genliklerinin ölçülebildiği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Diğer taraftan; ışık-madde etkileşimi araştırmaları sayesinde gelen ışık, yayılan ışık ve geçen ışık arasındaki ilişki, uyarılmış ışımaya (stimulated emission) kavramının hafızamıza oturmasına sebep olmuştur. 20. yüzyılda ışığın hızının gözlemciden bağımsız sabit olması hem dalga hem de parçacık olması iddiaları ile birlikte lazer kavramının temelleri Einstein tarafından ortaya konulmuştur. İki ayna arasındaki kovuk boyunca (kazanç ortamı) yoğunlaştırılan sürücü ışık kaynağı kovuk çıkışında eş özellikli fotonlardan oluşan bir ışık ışına yumağına dönüşebilmektedir.

Eş-fazlı kaynakların yaygınlaşması ve ulaşılabilirliğinin artmasıyla birlikte farklı dalga boyunda ışımalar yapan lazer hüzmelerinin elde edilmesine olanak sağlamıştır. Günümüzde lazerler hemen hemen her alanda (otomotiv, sanayi, ziraat, arkeoloji vs.) kullanılmaktadır ve birçok çeşidi (farklı çalışma dalga boylarında düşük güçlü, yüksek güçlü, sürekli modda veya atımlı-puls modda çalışan) bulunmaktadır. Hem görünür bölgede olması hem de ulaşılabilirliği sebebiyle laboratuvar ortamında yapılan

deneylerde bunlardan en çok kullanılan Helyum-Neon (He-Ne) lazeri denilebilir. Bir atom lazeri olan He-Ne lazerleri, farklı dalgaboylarda ve gücü miliwatt mertebesinde lazer üretmektedirler. Tipik bir He-Ne lazerinin (0.5 mW' dan 5 mW' a kadar çıkışı olan) yaklaşık 25 cm'lik bir faz uyumluluk uzunluğu olmakla birlikte çıkışlarında yaklaşık olarak 1 mm çapında bir ışın demeti yayımlamaktadır. Kırmızı altı He-Ne lazerleri ve hatta yeşil (543.5 nm) He-Ne lazeri bulunmakla birlikte, parlak kırmızı (632.8 nm) He-Ne lazeri en çok tercih edilen lazer olmaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında da eş-fazlı ışık kaynağı olarak He-Ne lazeri (632.8 nm) kullanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen uygulamaların çoğu lazer kaynaklarının odaklanmasını gerektirmektedir. Özellikle yüksek çözünürlüklü görüntüleme, moleküler güdümler, optik cımbızlar, yüksek güç yoğunluğu veya enerjinin yoğunlaştırılması gibi pek çok uygulama bu sebeple çok hassas konumlandırma (hem odak noktasının pozisyonu hem de açısal konumlandırma) gerektirmektedir. Diğer taraftan odak noktası çapını azaltmak için yapılan yüksek odaklama optik aberasyon süreçlerinin etkisinin artmasına sebep olmaktadır. Dahası da; odak çapı doğrudan ışık kaynağının dalgaboyu ile ilgili olduğundan, odak çapını küçültmek için uygulanan ışık kaynağını daha küçük dalgaboyuna sahip kaynaklarla değiştirme özellikle UV dalga boyları için gerekli olan pahalı optik elemanlara sahip olma gereksinimini doğurur. Bütün bu kısıtlamalar ve nedenler sebebiyle standart ve radyal eksende Gauss matematiksel fonksiyonu ile betimlenen hüzmelerin evrilmesine ve yeni bir optik çalışma alanı olan hüzmeye şekillendirme çalışmalarının yaygınlaşmasına sebep olmuştur.

Lazer hüzmelerinin şekillendirilmesi ve bu şekillendirilen hüzmelerin malzeme işleme, optik cımbızlama gibi ileri teknolojik araştırmaların yanında otomotiv, aydınlatma gibi endüstriyel alanlarda da birçok problemin ortadan kaldırılmasına olanak sağlar. Genel olarak birçok lazer çıkışlarında TEM₀₀ olarak bilinen Hermite–Gauss ya da Laguerre–Gauss (TEM₀₁) modunda hüzmeler üretmektedir. Özel yöntemler aracılığıyla bu hüzmelerin Bessel, Bessel-Vortex veya ivmelenen Airy hüzmeleri ile adlandırılan hüzmelere şekillendirilebileceği son yıllardaki çalışmalarla gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde şekillendirilen hüzmelerden en yaygın olarak kullanılanların Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeleri olarak adlandırılan Bessel hüzmeye ailesi olduğu görülmektedir. Kırınımsız ilerlemesi ve kendini yenileyebilme (tamir etme) özellikleri ile Bessel hüzmeleri en çok araştırılan hüzmeye çeşidi olmaktadır. Gauss hüzmeye ile karşılaştırıldığında çok daha uzun mesafelerde odaklı kalabilmeleri bu bağlamda birçok uygulama ve çalışmada kolaylık sağlamaktadır.

1.1. Hüzme Şekillendirme

Şekillendirilmiş hüzmelerin en başında Bessel hüzmeleri gelmektedir. Özellikle Bessel hüzmeleri, çok küçük odak çapları ile birlikte kırınımsız ilerleyebilmeleri ve kendini yenileyebilme özellikleri ile en çok araştırılan hüzme çeşididir. Kıyaslanabilir odak çaplarıyla birlikte, Bessel hüzmelerinin odak mesafesi Gauss hüzmelerine göre daha uzun olmaktadır.

Gauss hüzmelerinin odak mesafesinin kısa olmasının nedeni kırınımıdır. Kırınım, ışığın bir engelle karşılaştığında dalga cephesinde genlik ya da fazındaki değişimle ortaya çıkabilmektedir. Buna göre Bessel hüzmelerinin teorikte kırınımına uğramamaları Gauss hüzmelerinin bir kısıtlaması olan kırınımı ortadan kaldırmaktadır.

Farklı geometrik yapıdaki merceklerden geçirilen hüzme formları kırınım ile şekillendirilebilmektedir (Türkoğlu 2012). Hüzme şekillendirme çalışmaları çok geniş kapsamda gerçekleştirilmektedir. Bu kısımda standart Gauss hüzmeleri incelenecek ve odaklama davranışları karakterize edilecektir. Daha sonra, Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeleri hakkında kuramsal kavramlar sunulup hüzme özellikleri incelenecektir.

1.2. Gauss Hüzmeleri

Lazer kovukları çıkışlarında enine düzlemde Hermite-Gauss (TEM_{00}) veya Laguerre-Gauss (TEM_{01}) matematik fonksiyonlarıyla betimlenen elektrik alan profillerine sahiptir (Siegman1986). Gauss hüzmelerinin (TEM_{00}) radyal ekseninde elektrik alan ve şiddet dağılımı en genel formda

$$E(r) = E_0 e^{-r^2/w_0^2} \quad (1.1)$$

$$I(r) = I_0 e^{-2r^2/w_0^2} \quad (1.2)$$

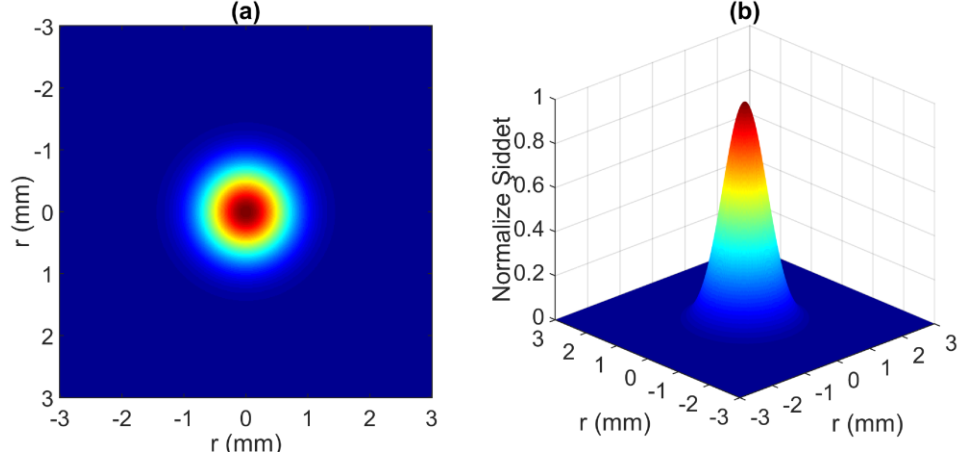
ifadeleri ile verilirken, Laguerre-Gauss (TEM_{01}) hüzmelerinin enine düzlemde elektrik alan profili ve şiddeti

$$E(r) = E_0 r e^{-r^2/w_0^2} \quad (1.3)$$

$$I(r) = I_0 r^2 e^{-2r^2/w_0^2} \quad (1.4)$$

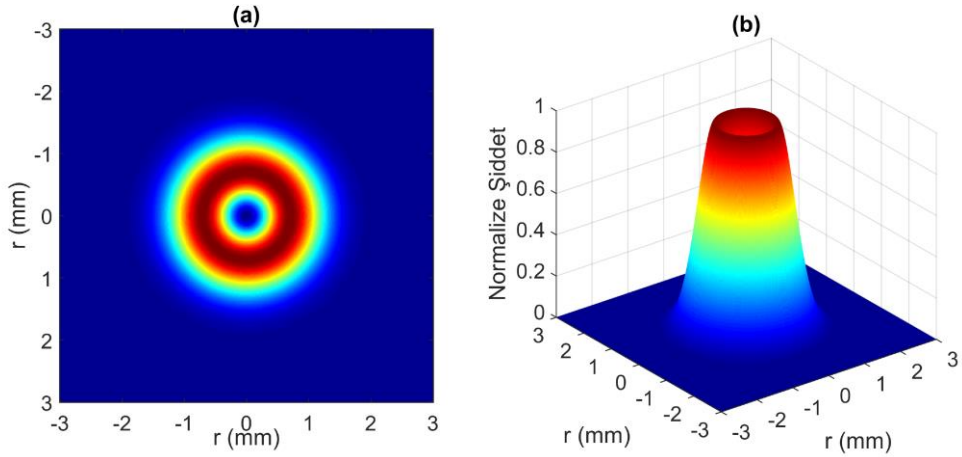
ifadeleri ile elde edilmektedir. Burada E_0 elektrik alan genliği, r radyal koordinat olarak belirtilmelidir. Elektrik alan genliği/şiddeti ancak sonsuzda sıfır olacağından aslında

hüzme sonsuz büyüklükte çap değerine sahiptir. Fakat bu kısımdaki karışıklığın ortadan kaldırılması anlamında w_0 şiddetin $1/e^2$ değerine düştüğü hüzme yarıçapı olarak kabul edilmektedir.



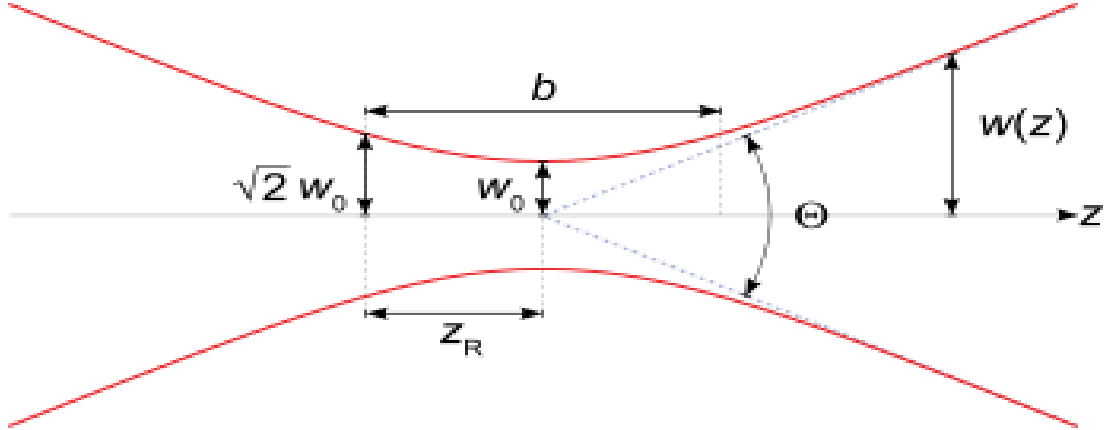
Şekil 1.1. Kuramsal (a) iki ve (b) üç boyutta hesaplanan Gauss (TEM₀₀) hüzmesi ($w_0=1$ mm)

Şekil 1.1 yukarıdaki denklemlerin MATLAB programı yardımıyla elde edilen kuramsal ve normalize şiddet dağılımını (a) iki ve (b) üç boyutta göstermektedir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi $r=0$ noktasında en tepe değerine ulaşan elektrik alan şiddeti r artarken azalmaktadır. Diğer taraftan ise; Şekil 1.2 Laguerre-Gauss (TEM₀₁) hüzmesi kuramsal şiddet dağılımını göstermektedir. Gauss hüzmelerinden farklı olarak merkezde ($r=0$) tekillik barındıran (yani sıfır elektrik alan şiddeti içeren) bir duruma sahiptir.



Şekil 1.2. Kuramsal **a)** iki ve **b)** üç boyutta hesaplanan Laguerre-Gauss (TEM₀₁) hüzmesi ($w_0=1$ mm)

Her ne kadar ince kenarlı merceklerle odaklandıklarında hüzme boyutları değişse de, enine düzlemde elektrik alan şiddet dağılımları aynı şekilde Gauss veya Laguerre-Gauss matematiksel fonksiyonu ile örtüşmektedir.



Şekil 1.3. Gauss hüzmesi şeması (Anonim 1)

Standart Gauss hüzmeleri ilerleme doğrultusunda Şekil 1.3'de görülen davranışı göstermektedir. Hüzme çapı, ilerleme z- eksenı boyunca olacak şekilde koordinata bağlı olarak değişmektedir. Hüzmenin ilerleme boyunca ki yarıçapı ($w(z)$),

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2} \quad (1.5)$$

$$w(z) = \sqrt{\frac{z_R \lambda}{\pi}} \quad (1.6)$$

ifadeleri ile verilir. Hüzme belinin $\sqrt{2}$ katına çıktığı uzaklık ise,

$$w(z_R) = \sqrt{2} w_0 \quad (1.7)$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (1.8)$$

olarak tanımlanmaktadır. z_R , Rayleigh aralığı olarak bilinmektedir ve bir Gauss ışık alanının yayılmasını karakterize etmek için kullanılan tipik bir parametredir (McGloin vd.2005). Gauss hüzmeleri, Helmholtz denkleminin paraksiyal yaklaşımla elde edilen çözümleridir. Paraksiyal yaklaşımda ışığın optik eksene çok yakın ilerlediği öngörülmektedir (Tunay 2015). Diğer taraftan Gauss ışınlarının yayılmasının temel nedeni kırınımdır. Farklı optik elemanlarda geçirilen hüzmeler kırınımına uğratarak şekillendirilmektedir. Fakat ince kenarlı mercekler aslında Fourier dönüştürücü gibi davrandığından Gauss hüzmelerinin matematiksel olarak şiddet dağılımını değiştirmez. Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı gibi odak düzleminde çok küçük çaplarda ışın demeti elde etmek çok çok kısa Rayleigh mesafelerini yanında getirmektedir. Günümüzde özellikle ileri teknolojik uygulamalarda Gauss hüzmeleri oldukça yaygın

kullanılmaktadır. Fakat doğası gereği bu hüzmelerin meydana getirdiği kısıtlamalar ve limitler farklı formlarda hüzmeler kullanılmasıyla aşılmaktadır.

2.2. Bessel Hüzmeleri

Bessel hüzmeleri de dalga denkleminin kırınımsız ilerleme özelliğine sahip bir diğer çözümdür ve bu hüzmelerin elektrik alan dağılımları Bessel fonksiyonları ile verildiğinden hüzmelerde bu isimle anılmaktadır. Elektrik alan profilleri ilerleme yönünde değişmemektedir. Standart Gauss hüzmeleri farklı yöntemler kullanılarak Bessel hüzmeleri elde edilebilir. Örneğin, dalga boyundan küçük çaplı delikten geçirilerek ($d < \lambda$), bilgisayar destekli SLM (Spatial Light Modulator) kullanılarak Bessel hüzmeleri elde etmek mümkündür. Fakat hüzmeye çapı delik çapından çok çok büyük olacağından hüzmeye enerjisinin neredeyse % 90' ı kaybedilmiş olacaktır. Diğer taraftan SLM hem bilgisayar destekli yazılım ve donanım gerektirdiğinden görece zahmetli ve pahalı bir yöntemdir. Bessel hüzmelerini, enerji transferi ve yöntemin kolaylığı bakımından daha çok tercih edilen konik yapılu merceklerle (Axicon) elde edilebilmektedir. Şekil 1.4' de Gauss hüzmelerinin Axicon' dan geçirilerek Bessel hüzmelerine dönüştürülmesinin şeması gösterilmektedir. İdeal Gauss ($M^2 = 1$) hüzmelerinin ideal bir Axicon mercekten (koni tepesi sivri) geçtikten sonra Bessel hüzmelerinin elektrik alanı kuramsal olarak;

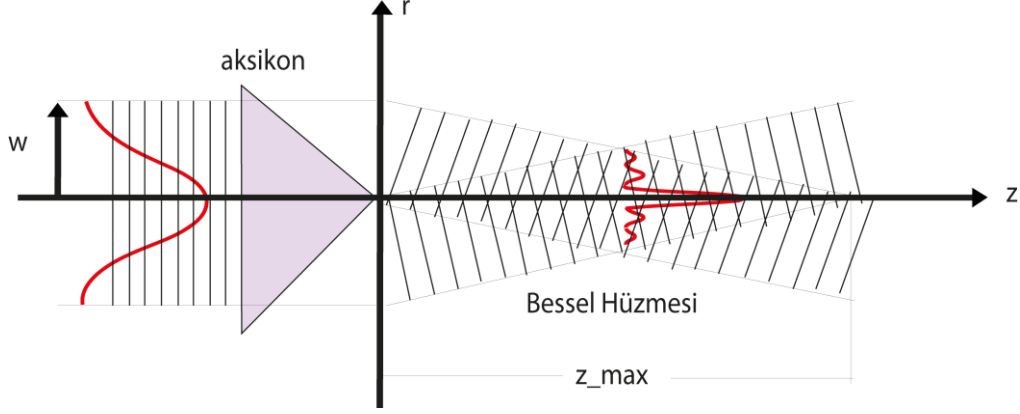
$$E(r, \phi, z) = E_0 \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \exp(\pm in\phi) \quad (1.9)$$

ifadesi ile verilmektedir (Arlt ve Dholakia 2000). Burada J_n , birinci tür n'inci derece Bessel fonksiyonlarını k_z ve k_r ise boyuna ve enine dalga vektörlerini göstermektedir. n' nin en küçük değeri n=0 için merkezde şiddetli spot etrafında eş merkezli ve eş şiddetli halkalar bulunmaktadır. Diğer tüm durumlarda ise (n>1) merkezde tekillik yani karanlık bir nokta ve etrafında eş merkezli ve eş şiddetli halkalar bulunur. Dolayısıyla, n=0 Bessel hüzmeleri diye adlandırılırken, n>1 durumunda ise Bessel-Vortex hüzmeleri için elektrik alan ifadesini vermektedir. n>1 durumunda farklı n değerleri sadece merkez halkanın çapını değiştirip tekilliğe etkisi olmamaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında sadece n=1 durumu dikkate alınmaktadır.

Skaler Helmholtz denkleminin bir çözümü olan sıfırıncı dereceden Bessel hüzmelerinin elektrik alan genliği;

$$E(r, z) = A \exp(ik_z z) J_0(k_r r) \quad (1.10)$$

ifadesi ile şiddet dağılımı $I(r,z)$ ise bu elektrik alan genliklerinin karesi alınarak hesaplanabilir (Arlt ve Dholakia 2000).



Şekil 1.4. Bessel hüzmesi elde etme yöntemi; Gauss hüzmelerinin Axicon' dan (konik mercek) geçirilmesi

Bessel hüzmeleri girişim sonucu oluşmaktadır. Axicon mercek yanal yüzeyinden kırınımına uğrayan ışık ışınları girişim bölgesinde (bu bölge uzunluğu Bessel bölgesi diye de bilinmektedir) Bessel hüzmelerini oluşturur. Bessel bölgesi uzunluğu;

$$z_{max} = \frac{w}{\tan(\beta)} \quad (1.11)$$

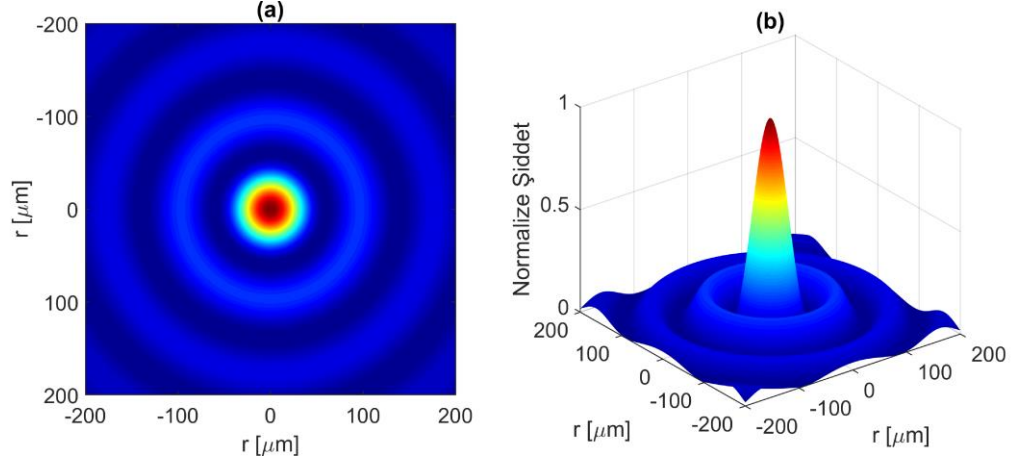
ifadesi ile verilmektedir. Burada w Gauss demet yarıçapını temsil ederken β oluşan ışık konisi tepe açısını göstermektedir. Bessel bölgesi uzunluğu anlaşılacağı üzere doğrudan Gauss hüzmeleri ile doğrusal orantılıdır. Bessel hüzmelerinin en büyük avantajı uzun mesafelerde (Bessel bölgesinde) odaklı kalabilmeleridir. Kırınımına uğramadan ilerleme yollarına devam ederler ve uzak alanda (Bessel bölgesi dışında) tek bir ışık halkası oluştururlar. Bu yüzden kırınımsız hüzmeler olarak adlandırılmaktadırlar (Soylu 2012). Ayrıca Bessel hüzmelerinin merkez spot çapı ise;

$$d_{merkez} \sim \frac{\lambda}{\sin(\beta)} \quad (1.12)$$

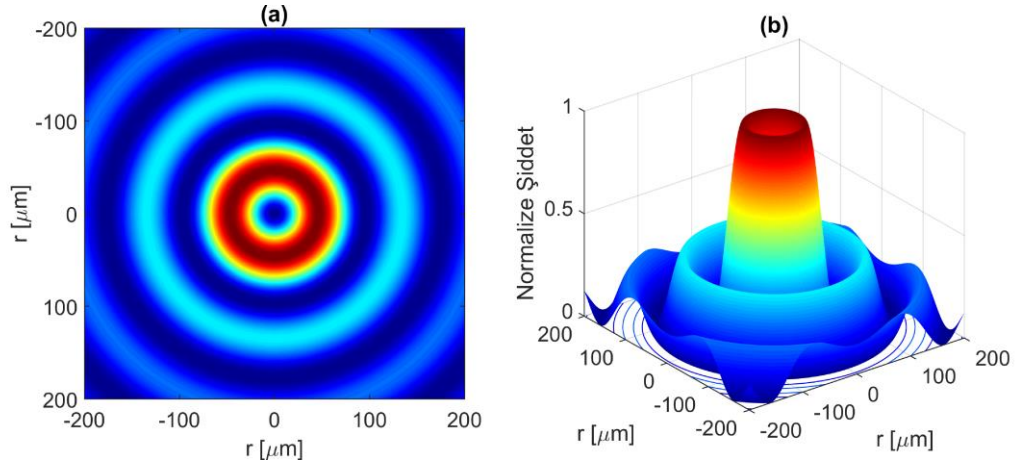
ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadeden de anlaşılacağı gibi merkez spot çapı doğrudan ışık dalgaboyu ve Axicon mercek taban açısına bağlıdır. İdeal bir Bessel hüzmesinin

merkez spot çapı Gauss hüzmelerinin aksine ilerleme doğrultusunda sabit kalırken şiddeti değişiklik gösterir.

Tipik Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeye profilleri Şekil 1.5 ve Şekil 1.6' gösterilmiştir. Burada, Gauss hüzmeye elektrik alan profili dikkate alınmadan sadece Bessel fonksiyonları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 1.5. Kuramsal olarak hesaplanan (a) 2 ve (b) 3 boyutlu Bessel hüzmeye elektrik Alan profilleri. Hesaplamalarda dalgalıy 633 nm, Konik Mercek Taban açısı 0.5° alınmıştır



Şekil 1.6. Kuramsal olarak hesaplanan (a) 2 ve (b) 3 boyutlu Bessel-Vortex hüzmeye elektrik Alan profilleri. Hesaplamalarda dalgalıy 633 nm, Konik Mercek Taban açısı 0.5° alınmıştır

Şekillerden de görüleceği üzere Bessel hüzmeleri merkezde şiddetli bir nokta ve etrafında daha düşük enerjili halkalardan oluşmaktadır. Diğer taraftan Bessel-Vortex hüzmeleri ise merkezde tekillik (sıfır şiddet) içermekte ve sadece iç içe geçmiş halkalardan oluşmaktadır. En şiddetli halka merkezde bulunan halkadır. Axicon taban açısının Bessel hüzmeye ve Bessel-Vortex hüzmeye boyutlarına etkisinin gösterilmesi

için, farklı taban açılı Axicon' lar ve uygulamalarda kullanılan tipik lazer dalga boyları için elektrik alan şiddeti profilleri hesaplanmıştır.

Dalgaboyu (nm)	0.5° (µm)	10° (µm)	25° (µm)
532	100.52	5	1.8
632	120.28	5.96	2.12
1030	199.16	9.8	3.56
1064	206	10.12	3.72

Çizelge 1.1. Farklı Axicon taban açıları ve farklı dalga boyuna sahip kaynaklar için kuramsal olarak hesaplanan Bessel hüzmeleri merkez spot çapı değerleri

Çizelge 1.1' de görüldüğü gibi merkez spot çapı, kullanılan kaynağın dalgaboyu azaltılırken azalmaktadır. Aynı şekilde Axicon mercekle taban açısını artırarak birkaç mikrometre genişliğinde şiddetli spotlar elde edilmektedir.

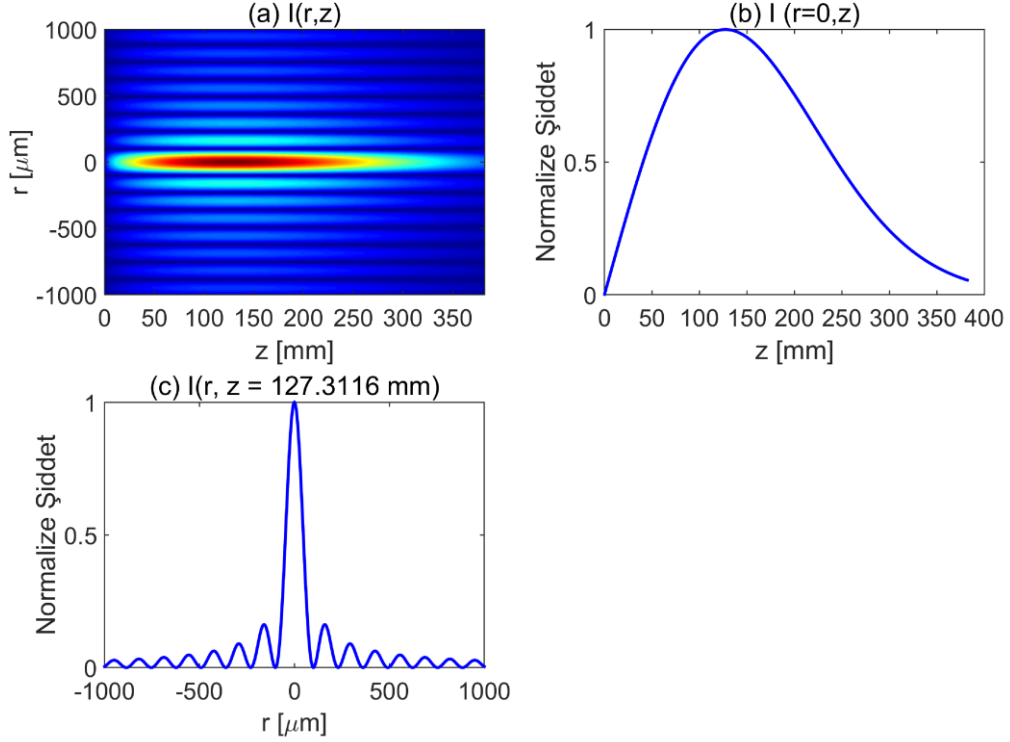
Dalgaboyu (nm)	0.5° (µm)	10° (µm)	25° (µm)
532	80.98	3.98	1.42
632	96.98	4.74	1.7
1030	159.3	7.86	2.82
1064	165.9	8.14	2.94

Çizelge 1.2. Farklı Axicon taban açıları ve farklı dalga boyuna sahip kaynaklar için kuramsal olarak hesaplanan Bessel-Vortex hüzmeleri merkez halka çapı değerleri

Bessel-Vortex hüzmeleri merkezde karanlık nokta içerdiğinden bu hüzmeler için merkez spot çapı yerine merkez halka en şiddetli noktalar arası mesafe bu tez çalışmasında merkez halka çapı olarak tanımlanmıştır. Bessel hüzmeleri için elde edilen orantıların Bessel-Vortex hüzmeleri içinde geçerli olduğu Çizelge 1.2' de görülmektedir. İdeal Bessel hüzmeleri sonsuz sayıda halka (sonsuz enerji) içermektedir (Arlt ve Dholakia 2000). Yapılan kuramsal hesaplamalarda ve kabullerde her ne kadar sonsuz sayıda halka olacağı düşünülse de bu sonsuz enerji gerektireceğinden pratikte mümkün değildir.

Ayrıca MATLAB programı yardımıyla hazırlanan Fresnel-Kirchhoff kırınım formülünü kullanarak Axicon sonrası hüzmeleri Gauss hüzmeleri kullanılarak hesaplandı. Burada kullanılan Gauss hüzmeleri elektrik alan dağılımı ideal Gauss

matematiksel fonksiyonu ile betimlenirken, Axicon ucu ultra-sivri olarak tasarlandı. Hesaplamalarda Axicon malzemesi kırılma indisi olarak *fused silica* malzemenin ilgili dalgaboyu için kırılma indisi hesaba alınmıştır. Axicon mercek taban yarıçapı 25 mm olarak tasarlanırken Gauss hüzme yarıçapı 1 mm olarak ele alınmıştır.



Şekil 1.7. Kuramsal olarak hesaplanan **a)** $I(r,z)$, Bessel hüzmesi profili, **b)** bu profilin $r=0$ mm için ilerleme boyunca şiddet değeri ve **c)** Şiddetin en fazla olduğu konumda radyal ekseninde şiddet dağılımı

Şekil 1.7 elde edilen sonuçları göstermektedir. Kaynak dalgaboyu $\lambda=1030$ nm ve Axicon taban açısı $\alpha=0.5^\circ$ olarak alınmıştır. Gauss hüzmesi yarıçapı 1 mm olarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Axicon ucunun sivri olmadığı yassı durumlar daha ileriki kısımlarda tartışılacaktır.

Yapılan deneylerde Durnin tarafından görselleştirilen Bessel hüzmeleri günümüzde oldukça ilgi odağı olmaktadır. Durnin ve meslektaşları yaptıkları çalışma ile Bessel hüzmelerini deneysel olarak elde etmişlerdir (Arlt ve Dholakia 2000).

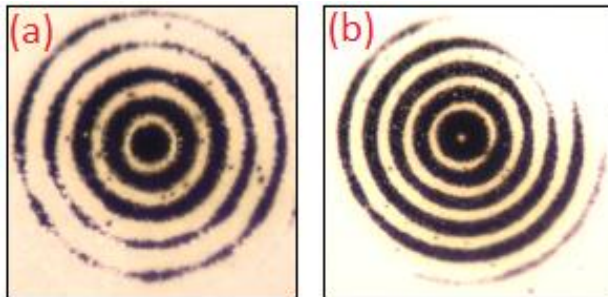
2. KAYNAK TARAMASI

Lazer kovukları genelde çıkışlarında Hermite-Gauss veya Laguerre-Gauss fonksiyonları ile verilen enine elektrik alan profiline sahiptirler (Siegman 1986). Fakat lazer çıkışlarında şiddet veya faz değişimi modülasyonu kaynağın şekillendirilmesi olanağı sağlamaktadır. Bu bağlamda, kırınımsız ilerleyen Bessel hüzmeleri ilk olarak Durnin tarafından ortaya konulmuştur (Durnin vd. 1987; Durnin 1987). Kırınımsız ilerlemenin yanında, ilerlerken kendini tamir etme özelliği bu hüzmeleri ayrıcalıklı kılmaktadır (Bouchal vd. 1998). Deneysel olarak Bessel hüzmeleri birkaç farklı yolla elde edilebilir (McLeod 1954; Vasara vd.1989; Herman ve Wiggins 1991; Niggl vd. 1997; McLeod vd. 2006; Golub 2006). Enerji transferi ve yöntemin kolaylığı bakımından Axicon en çok tercih edilen yöntemlerden biridir (Arit ve Dholakia 2000).

Düşük güçlerde çalışan lazerlerin yanısıra yüksek güçlerde ve pulse rejimde de bu tür huzmeler elde edilebilir (Beresna vd. 2011; Bhuyan 2010). Elde edilen bu hüzmelerle plazma üretimi (Polynkin vd. 2009; Aktürk 2008), doğrusal olmayan optik (Glushko vd. 1993; Tewari vd. 1995), ve malzeme işleme uygulamalarında (Şahin vd. 2013; Şahin vd. 2014; Courvoisier vd. 2009) başarılı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır.

Şekillendirilmiş hüzmeler tıp ve biyoloji alanında da geniş bir uygulama yelpazesinde kendilerine yer bulabilmiştir. Optik tomografinin yanında (Ding vd. 2002), optik tuzaklama (Paterson 2005) ve mikro-manipülasyon (Garces-Chavez vd. 2002) uygulamalarında da şekillendirilmiş hüzmeler standart yönleme göre avantajlara sahiptir.

Şekillendirilmiş hüzmelerin malzeme işlemedeki önemi yapılan çalışmalarla artmıştır. Axicon kullanılarak Bessel hüzmesi elde edilip, malzeme işlemedeki odak sorunu çözümlenmiştir (Soylu 2012). Aynı zamanda Bessel hüzmeleri sayesinde metaller üzerinde nanometre boyutunda yapılar oluşturularak plazmonik üretiminde kolaylık sağlayacağı öngörülmüştür (Yalızay 2011).



Şekil 2.1. Quartz cam üzeri 5 nm Cr+25 nm Au film üzerinde gerçekleştirilen femtosaniye lazer ablasyon deneyleri optik mikroskop görüntüleri. **a)** Bessel hüzmesi ile **b)** Bessel-Vortex hüzmesi ile

Şekil 2.1, $\lambda=515$ nm dalga boyunda 550 fs atım süresine sahip bir lazerle yapılan mikro-ablasyon deneylerini göstermektedir. Hüzme profillerine benzer şekilde ablasyon profilleri de Bessel hüzmesi ve Bessel-Vortex hüzme profillerine benzemektedir. Şekil 2.1 a 'da bulunan merkez ablasyon noktasının çapı yaklaşık $3.7 \mu\text{m}$ ' dir.

Lazer hüzmeleriyle dağlama işleminde, Gauss ve Bessel hüzmelerinin silindirik dalga kılavuzu içerisindeki karakteristik mod profili ve eşleme, zayıflama özellikleri düzenlenerek, metal içerisindeki ilerleme hareketleri sayısal olarak hesaplanmıştır (Türkoğlu 2012).

Farklı profillerde şekillendirilen lazer hüzmelerinin sıvı fantom içeren saçıcı ortamdaki ilerleyişleri incelenmiş ve Gauss hüzmelerine göre Bessel ve Airy hüzmelerinin saçıcı ortamda daha yavaş zayıfladıkları bulunmuştur. Bu da kendi kendini tamir etme özelliği bulunan bu hüzmelerin merkezlerine, sürekli bir enerji akışının olmasının hüzme şiddetindeki zayıflamayı yavaşlattığını göstermiştir (Ersoy 2016).

Optik hüzme şekillerinin ve karakteristiklerinin incelenmesi ve yerkürede yayılımlarının optik haberleşmeye etkileri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu hüzme şekillerinin optik haberleşmeye farklı şekilde etkileri olduğu bilinmektedir. Bu yüzden çeşitli hüzme tipleri incelenmiş ve Gauss-Bessel hüzmeleri analiz edilmiştir. Işık hüzmelerinin yüksek nümerik açıklık sistemlerine odaklanması ve özellikleri araştırılmıştır (Herman vd. 2001).

Simülatör kullanılarak Bessel ve gauss hüzmeleri incelenebilmektedir. Matlab kodu ile simülatörde ışık hüzmelerinin yayılımları incelenmiştir (Kamacıoğlu ve Baykal 2012).

Bessel ve Gauss için bir süper model sunulmuştur. Bu ışınların yayılımları hesaplanmış ve analitik, matematiksel olarak hesaplanmıştır (Bagini vd. 1996).

İlk kez bir Bessel ışınlarına benzer ışın üreten ultrasonik dönüştürücü keşfedilmiştir. Bu Bessel dönüştürücüsü kırınımsız hüzmelere ulaşmakta önemli bir girişime sahiptir (Hsu vd. 1989).

Özellikle biyomedikal uygulamalarında derinlerde yüksek optik güç elde ederken hüzme kalitesinin azalmaması büyük öneme sahiptir. Yüksek güçler gerektiren uygulamalarda ayrıca deri altı ablasyon deriye zarar vermeden yapılmayı gerektirmektedir. İster düşük lazer güçleri isterse yüksek lazer güçleri gerektiren uygulamalar olsun lazer hüzmesi saçıcı ortamda ilerlediğinden saçılma sebebiyle hüzme şiddet profili bozulmalara maruz kalacaktır. Kırınımsız ilerleyen Bessel hüzmelerinin en büyük avantajı Gauss hüzmelerine göre çok daha uzun mesafelerde odaklı kalabilmeleridir. Ayrıca hüzme ilerlerken kendini tamir ettiğinden bu hüzmeleri özellikle saçıcı ortamlarda kullanmak bazı avantajlar kazandırabilir. Yapılan bu tez çalışmasında da kırınımsız ilerleyen hüzmeler saçıcı ortamlarda karakterize edilerek

biyomedikal uygulamalarda daha fazla yer alması olanağı sağlanmıştır. Kullanılan saçıcı ortam özellikleri göz öz sıvısı özelliklerine yakın olduğundan çağımız göz hastalığı olan Glokom tedavisinde alternatif yöntem geliştirme olanağı elde edilecektir.

Yukarıda verilmiş bazı örneklerden de görüleceği üzere şekillendirilmiş hüzmeler temel optik ve uygulamaları alanında geniş yer bulmaktadır. Bu sebeple şekillendirilmiş hüzmelerin kalitesi kendi içinde büyük öneme sahiptir.

Yapılan literatür taramasından ve elde edilen kaynaklardan anlaşıldığı üzere yapılan bilimsel çalışmaların ve kırınımsız hüzmelerin teknolojideki kullanımının neredeyse tamamı eş fazlı ışık kaynakları (lazerler) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eş-fazlı olmayan kaynaklarla yapılan çalışmalar neredeyse hiç bulunmamaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında eş-fazlı olmayan ışık kaynakları ile hüzmeye şekillendirme işlemleri gerçekleştirildiğinden mevcut literatüre bu anlamda katkıda bulunmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

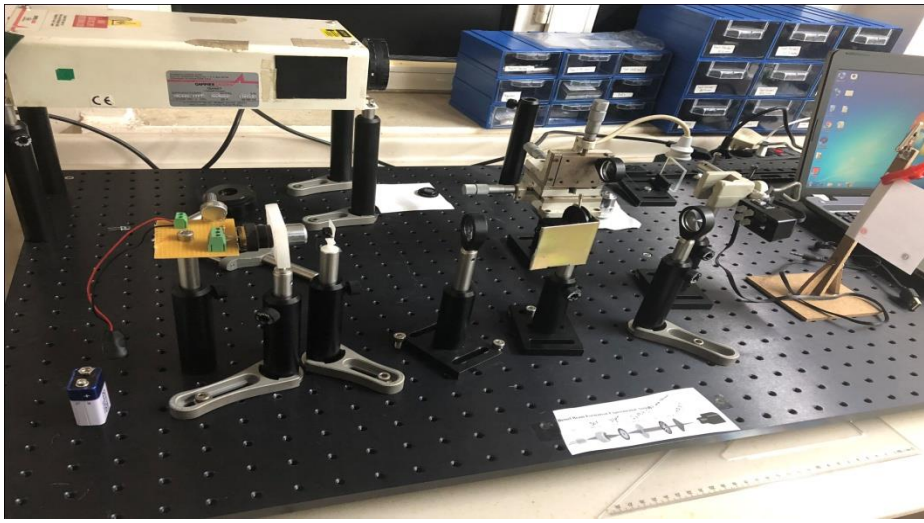
Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda ilk olarak Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeleri eş-fazlı kaynaklar için elde edilip, hüzmeye özellikleri karakterize edilmiştir. Bu bağlamda ilk olarak Bessel hüzmeleri elde etmek için deney düzeneği kurulmuş, gerekli olan opto-mekanik bileşenler ve görüntüleme sistemleri (CCD kamera ve mikroskop objektifi vs.) temin edilmiştir. Çalışmalarda eş fazlı kaynak olarak 633 nm merkez dalgaboyuna sahip He-Ne lazer, eş-fazlı olmayan kaynak olarak da farklı tepe dalgaboylarına sahip LED ışık kaynakları kullanılmıştır. Işık kaynaklarının spektroskopik özellikleri mevcut optik spektrometre ile karakterize edilmiştir. Hüzmeye şekillendirme çalışmaları Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi bünyesinde bulunan Optik ve Nanoteknoloji Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



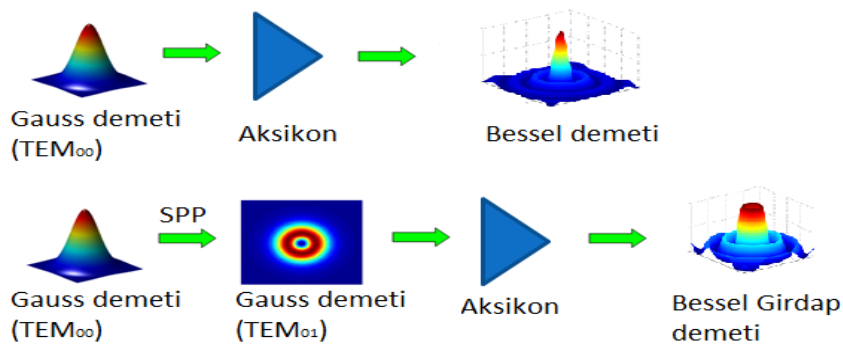
Şekil 3.1. He-Ne lazer ve Bessel ile Bessel-Vortex hüzmeleri şekillendirme deney düzeneği

Eş-fazlı kaynaklarla gerçekleştirilecek deneyler için kurulan deneysel düzenek Şekil 3.1’de gösterilmektedir. İlk olarak CCD kamera eşliğinde He-Ne lazer kaynağı görüntülenerek, kaynak elektrik alan dağılımının radyal ekseninde Gauss matematiksel fonksiyonu ile uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Daha sonra He-Ne lazer hüzmesi doğrudan Axicon (konik yapılu mercek) üzerine gönderilerek Bessel hüzmelerinin (J_0) elde edilip edilmediği CCD kamera kullanılarak gözlenmiştir. CCD kamera ile kaydedilen şiddet profilleri MATLAB programı yardımıyla analiz edilip hüzmeler karakterize edilmiştir. Bessel hüzmelerinin karakteristik özelliklerinden birisi merkez spot/halka çapının ilerleme doğrultusunda sabit kalacağıdır. Bu bağlamda Axicon mercekten farklı uzaklıklarda sistematik olarak CCD kamera yardımıyla alınan şiddet profilleri analiz edilmiştir. Diğer taraftan, benzer düzenek (birden fazla optik eleman eklenerek) eş-fazlı olmayan kaynaklar (LED’ ler) için de kurulmuştur. İlgili düzenek

Şekil 3.2’de gösterilmektedir. LED’lerin yapısı gereği ışık LED kaynaktan çıkar çıkmaz çok yüksek açı ile dağıldığından ilk olarak bir mikroskop objektifi yardımıyla ışık toplanmıştır. Daha sonra, hem eş-fazlı olmayan ışık kaynağının M^2 değerini artırmak (M^2 değeri kaynağın radyal ekseninde elektrik alan profiline ne kadar Gauss matematiksel fonksiyonu ile uyum içerisinde olduğunun bir ölçüsüdür) hem de Axicon üzerine giden ışık demetini bir miktar paralelleştirmek için bir adet pin-hole kullanılmıştır. İkinci ince kenarlı mercekle ışın demeti bir miktar daha paralelleştirildikten sonra 3-eksende hizalanabilen bir düzenek üzerine tutturulmuş Axicon merceğe gönderilmiştir. Axicon’ un diğer tarafına konumlandırılan görüntüleme sistemi ile (mikroskop objektifi ve kamera) elde edilen Bessel demeti hüzmeleri görüntülenmiştir.



Şekil 3.2. LED ışık kaynakları ile gerçekleştirilen hüzmeye şekillendirmeleri deney düzeneği



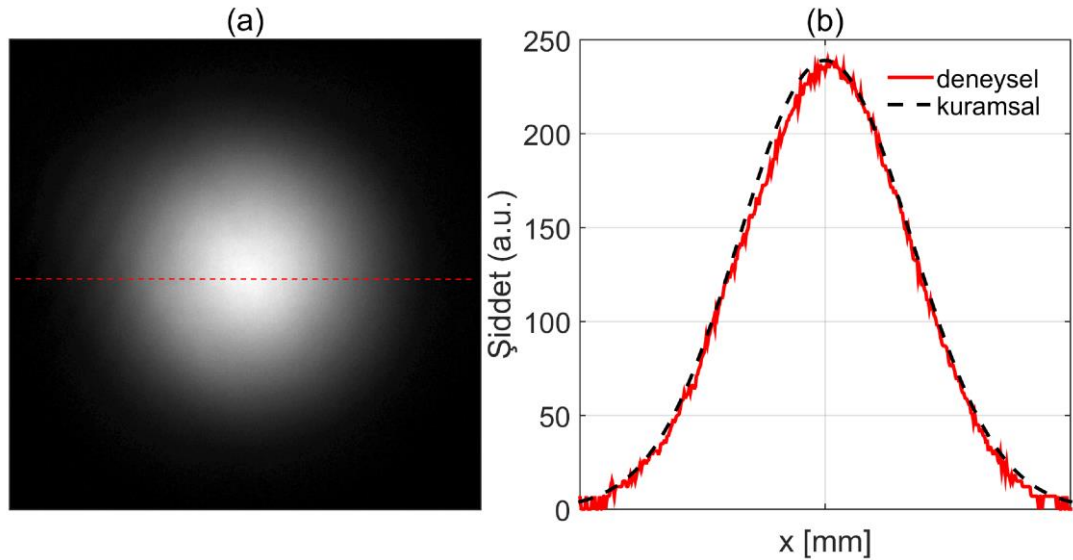
Şekil 3.3. Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeleri elde etme yöntemi. (SPP-Spiral Faz Plakası)

TEM₀₁ radyal ekseninde merkez etrafında tekillik içerdiğinden Axicon mercekten geçirildikten sonra Bessel-vortex (J_1 -eş enerjili halkalar) hüzmeleri elde edilir.

Hüzme şekillendirme deneysel yöntemi Şekil 3.3’ de şekilsel olarak anlatılmaktadır. Bessel hüzmeleri doğrudan Axicon merceğe gönderilen Gauss hüzmesi (TEM_{00}) ile elde edilirken, Bessel-Vortex hüzmeleri elde etmek için ilk önce Gauss hüzmesi- TEM_{00} bir Spiral Faz Plakasından geçirilip (SPP-Spiral Phase Plate) TEM_{01} modu elde edilir ve daha sonra Axicon merceğe gönderilir.

3.1. Gauss Hüzmeleri

Gauss hüzmelerini elde etmek için He-Ne lazer ve farklı dalga boylarında LED’ler kullanıldı. Kullanılan kaynaklar ilk önce CCD kamera yardımıyla karakterize edilmişlerdir. He-Ne lazer doğrudan CCD kamera üzerine gönderilip hüzme şiddet profilleri gözlenirken, LED’ ler ilk olarak ince kenarlı mercek yardımıyla paralelleştirilmiş daha sonra CCD kamera üzerine gönderilmiştir. Kullanılan ince kenarlı mercek Gauss matematiksel fonksiyonu ile betimlenen ışık kaynağı elektrik alan profilini matematiksel olarak değiştirmeyeceğinden, CCD kamera ile elde edilen şiddet profilleri ışık kaynakları hakkında elde edilen bilgiyi değiştirmemektedir. He-Ne lazer kaynağı kullanılarak elde edilen hüzme profili CCD kamera görüntüsü ve şiddet dağılımı Şekil 3.4’de gösterilmektedir. CCD kamera 8 bit yani siyah 0 beyaz 255 değerini alacak şekilde 256 şiddet değeri tanımlamaktadır. Bu nedenle şiddet dağılımı oransal olarak (a.u.) verilmiştir. He-Ne lazer hüzme yarıçapı 1 mm dir. Şekilden de görüldüğü üzere şiddet dağılımı tam merkezde en yüksek ve eksponansiyel olarak azalmaktadır. Deneysel şiddet profili Gauss matematiksel fonksiyonu kullanılarak hesaplanan kuramsal şiddet profili ile uyum içerisindedir.



Şekil 3.4. CCD kamera ile kaydedilen Gauss hüzmesi **a)** He-Ne lazer ve ona ait **b)** şiddet profili (şiddet profili kırmızı kesikli çizgi üzerinden hesaplanmıştır)

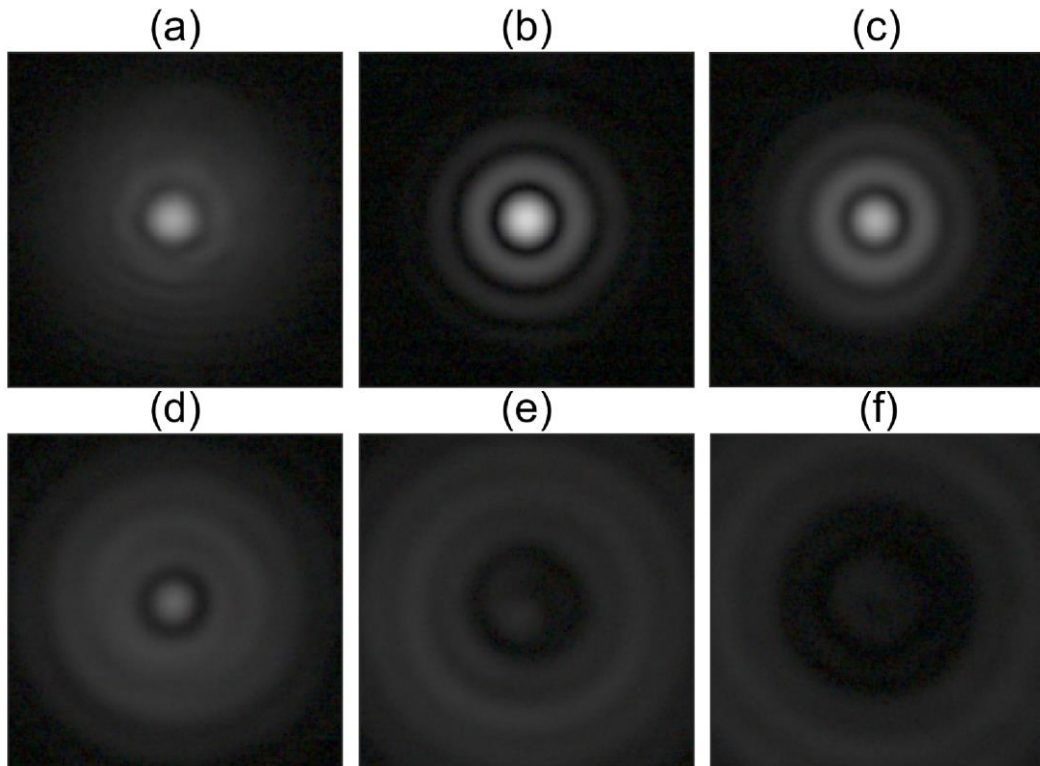
Gauss hüzmeleri kırınım sebebiyle kısa mesafelerde odaklı kalabilmektedirler. Bu, özellikle odak derinliğinin fazla olması gerektiği çalışmalarda bir dezavantaj

sağlamaktadır. Dolayısıyla, daha uzun mesafelerde odaklı kalabilmeleri ve kendini tamir etme özellikleri ile Bessel hüzmeleri, yapılan birçok çalışmada Gauss hüzmelerinin yerini almaktadır.

Gauss hüzmeleri normal modda (TEM_{00}) lazer kaynağı ile Axicon' dan geçirilerek Bessel hüzmelerine dönüştürülmüştür. SPP ile elde edilen Laguerre-Gauss matematiksel fonksiyonu ile verilen hüzmeler ise Axicon' dan geçirilerek Bessel-vortex hüzmelerine dönüştürülmüştür.

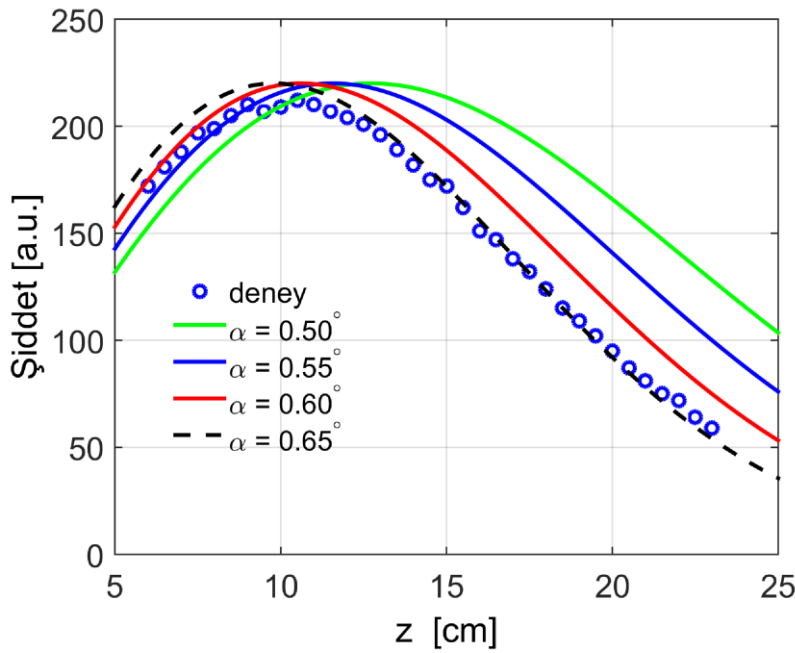
3.2. Bessel Hüzmeleri

Literatürde farklı yöntemler olsa da; Bessel hüzmeleri hem deneysel yöntemin kolaylığı hem de enerji aktarımı yönünden Axicon (konik yapılı) mercekle kullanılarak elde edilir. Bu nedenle, Bessel hüzmeleri elde etmek için laboratuvarında bulunan 0.5 dereceli Axicon mercekle çalışıldı. İlk ışık kaynağı olarak, 632 nm dalgaboyuna sahip He-Ne lazer kullanıldı. Doğrudan CCD kamera üzerine düşen lazer ışını CCD kamerada aşırı şiddetli (doyuma ulaşan) profiller oluşturduğundan lazer şiddeti yardımcı filtreler ile azaltıldı. Böylece en düşük şiddette elde edilen Bessel hüzmeleri ölçümleri yapıldı. Elde edilen Bessel hüzmelerinin karakteristik özelliklerini belirlemek için Axicon mercekten küçük adımlarla uzaklaşarak CCD kamera yardımıyla uzaklığa bağlı hüzmeleri şiddet profilleri elde edildi.



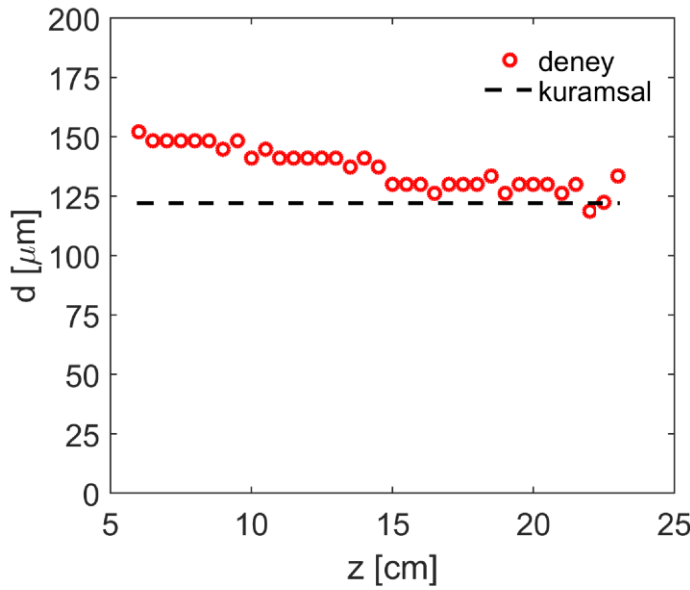
Şekil 3.5. CCD kamera ile kaydedilen kamera ile Axicon arasındaki uzaklığa göre a) 5 cm b) 10 cm c) 15 cm d) 20 cm e) 25 cm f) 30 cm Bessel hüzmeleri şiddet profilleri

Daha sonra bu görüntüler MATLAB programı yardımı ile hem hüzme ilerleme doğrultusunda tepe şiddeti değerleri hem de hüzme merkez yüksek enerjili spot çapı hesaplandı. Şekil 3.5, ilk olarak He-Ne lazer kullanılarak elde edilen Bessel hüzme profillerini farklı uzaklıklarda olmak koşuluyla göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere Bessel hüzme demeti belirli bir ilerleme mesafesine sahiptir. Yapılan analizlerde hüzme profilinin Axicon' a çok yakın ve belirli bir mesafeden daha uzak olduğu noktalarda CCD kamera ile elde edilen şiddet profilinin Bessel matematiksel fonksiyonundan uzaklaştığı görülmüştür. Şekil 3.5 (b)' de görüldüğü gibi Bessel hüzmesi merkezde yüksek şiddetli bir nokta ve iç içe geçmiş eş enerjili halkalardan oluşmaktadır. Yapılan kuramsal hesaplamalarda sonsuz sayıda halka olacağı öngörülse de, bu deneysel anlamda sonsuz enerji gerektirdiğinden gözlenen halka sayısı kuramsal kabullenmenin yanında oldukça azdır. Fakat gene de; deneysel olarak elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, bu hüzmelerin Bessel fonksiyonu imzalarını taşıdığı görülmüştür. Bunun tayini ve teyidi açısından hem ışın demeti ilerleme doğrultusunda Bessel hüzmesi merkez nokta çapı değeri (kırınımsız ilerlemenin bir koşulu olarak) hem de bu noktanın merkezindeki şiddet ölçülerek kuramsal kavramlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.6. Bessel hüzmesi şiddet- Axicon uzaklık grafiği (kuramsal karşılaştırma farklı taban açılı Axicon mercekler için yapılmıştır)

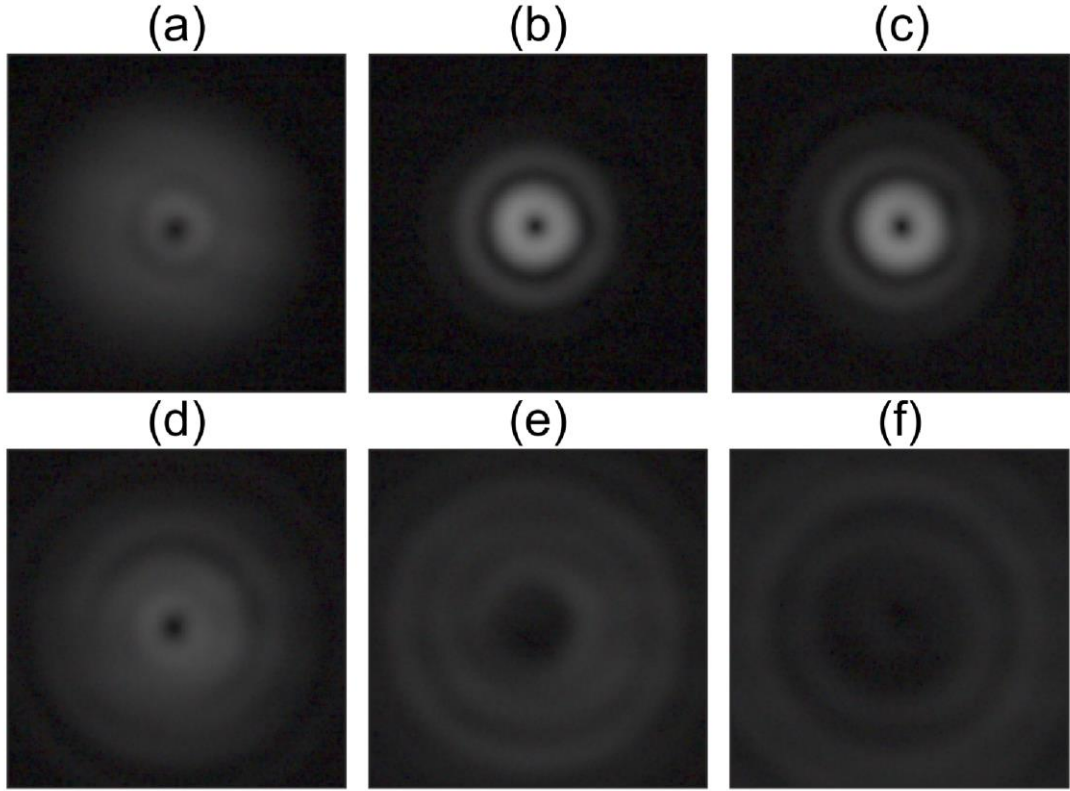
Her ne kadar satın alınan/temin edilen Axicon mercekler taban açısı bilgileri tedarikçi tarafından sağlansa da özellikle çok küçük açılı Axicon mercekler için gerçek değer sağlanan değerde bir miktar farklılık gösterebilir. Ayrıca daha önceki kısımlarda bahsedildiği üzere Axicon mercek ucunun yassılığı ilerleme doğrultusunda şiddet davranışını etkileyebilir.



Şekil 3.7. Bessel hüzmesi merkez spot çapı-uzaklık grafiği

Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 yapılan analizlerden elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekil 3.6' da hüzme ilerleme doğrultusunda elde edilen merkez spot orta noktasının CCD kamera yardımıyla elde edilen görece şiddet değerlerini göstermektedir. Şiddet değeri başlangıçta artarken belirli bir mesafeye geldiğinde en üst değerine ulaşmış daha sonra Axicon mercekten uzaklaştıkça azalmaya devam etmiştir. Bu davranış daha önce yapılan çalışmalarla uyum içerisinde. Diğer taraftan, Şekil 3.7' de görüldüğü üzere, şiddet değeri mesafeye bağlı değişirken merkez spot çap değerinin neredeyse hiç değişmediğini açıkça göstermektedir. Yapılan deneylerde ortalama çap değeri 136 µm olarak bulunmuştur. Kuramsal olarak hesaplanan değer ise yaklaşık 122 µm' dir. Teorik olarak merkez spot çap değerinin hiç değişmeyeceği öngörülse de yapılan literatür taramasından ve incelenen çalışmalardan anlaşıldığı üzere Axicon mercek uç noktasının sivriliği ve hüzme profilinin matematiksel olarak bozulması CCD kamera ile elde edilen sonuçların az da olsa sapmasına sebep olmaktadır. Bessel demetlerinin eş-fazlı kaynaklarla elde edilmesinin ardından benzer karakterizasyon Bessel-vortex hüzmeleri için de tekrarlandı.

Bessel-Vortex hüzmelerini elde etmek için de ışık kaynağı olarak He-Ne lazer kullanıldı. Küçük açılı Axicon (0.5 dereceli) ve faz plakası ile daha önce bahsedilen düzenek kurulup CCD kamera yardımıyla Axicon mercekten farklı uzaklıklarda Bessel-vortex hüzme profilleri kaydedildi. Kamera ile Axicon arasındaki uzaklık en yakın 2.5 cm olacak şekilde alınmıştır. Daha sonra 0.5 cm aralıklarla Bessel-vortex şiddet profilleri kaydedilmiştir. Şekil 3.7 en yakın ve en uzak noktalarda ve en net Bessel-vortex şiddet profili elde edilen uzaklıktaki CCD kamera görüntülerini göstermektedir. Bessel hüzmeleri için elde edilen sonuçlar (Şekil 3.8), Bessel-vortex durumu için elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir.

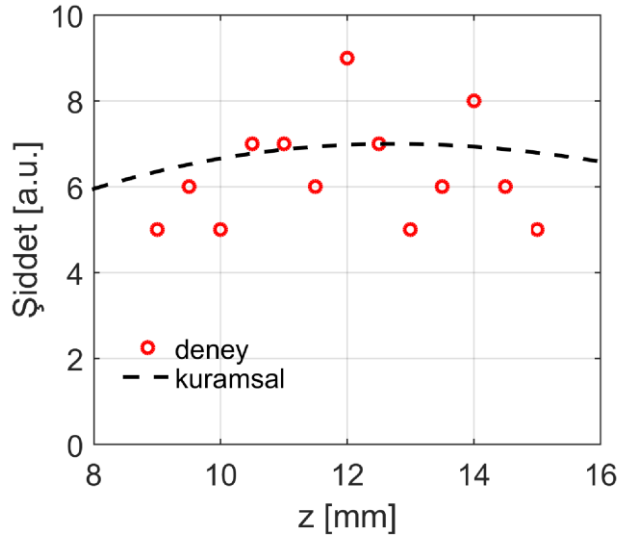


Şekil 3.8. CCD kamera ile kaydedilen kamera ile Axicon arasındaki uzaklığa göre a) 5 cm b) 10 cm c) 15 cm d) 20 cm e) 25 cm f) 30 cm Bessel-Vortex hüzmesi şiddet profilleri.

Merkezde karanlık bir nokta ve eş merkezli halkalardan oluşan Bessel-vortex veya diğer adıyla Bessel-girdap hüzmeleri de ilerleme doğrultusunda boyutları değişmemelidir. Bu durumu göstermek için küçük adımlarla değişen uzaklıklarda elde edilen Bessel-vortex şiddet profilleri için de gerekli analizler yapılmıştır. Bessel hüzmeleri için yapılan analizler Bessel-vortex hüzmeleri için yapılacak olsa da bazı farklılıklar içermektedir. Örneğin; Bessel hüzmeleri merkezde şiddetli bir nokta, Bessel-vortex hüzmeleri ise merkezde tekillik içeren karanlık ve sadece halkalardan oluşmaktadır. Bu nedenle benzerlik kurulması açısından; Bessel-vortex hüzmeleri için hüzmeye boyutu analizleri merkez halka çapı değeri üzerinden kurulmuştur. Merkez halka çapı; merkez halkanın şiddetinin en fazla olduğu mesafeler arası olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, merkez halkanın şiddetinin en fazla olduğu yerin mesafeye bağlı değişimi ise yapılan analizlerden elde edilerek Bessel hüzmelerinde elde edilen merkez spot şiddet değeri ile benzerlik kurulmaya çalışılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sayısal sonuçlar Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’ da gösterilmektedir.

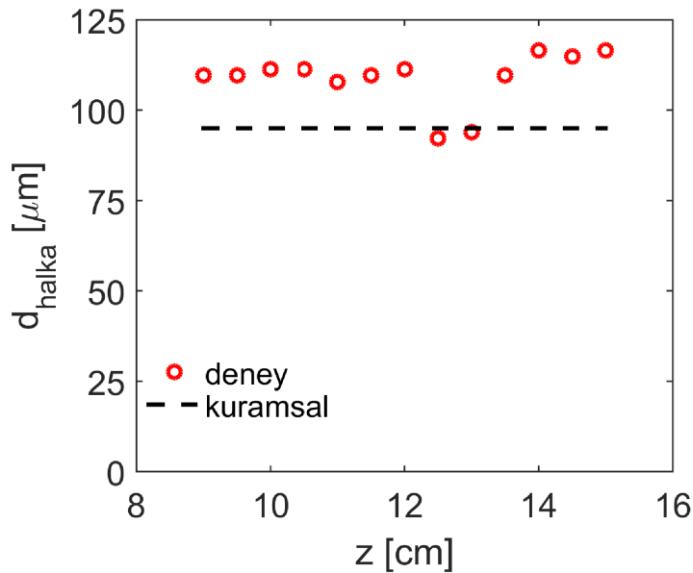
Bessel hüzmelerine benzer şekilde Bessel-vortex hüzmeleri için de merkez halka şiddet değeri başlangıçta artarken belirli bir noktadan sonra tepe değerine ulaşip azalma eğilimi ile devam etmektedir. Buna karşın merkez halka çap değeri neredeyse 10 cm

uzunlukta bile kendi değerini koruyabilmektedir. Bu değer, standart bir şekilde odaklanan Gauss hüzmelerinin yanında oldukça fazladır.



Şekil 3.9. Bessel-vortex hüzmeleri şiddet-uzaklık grafiği

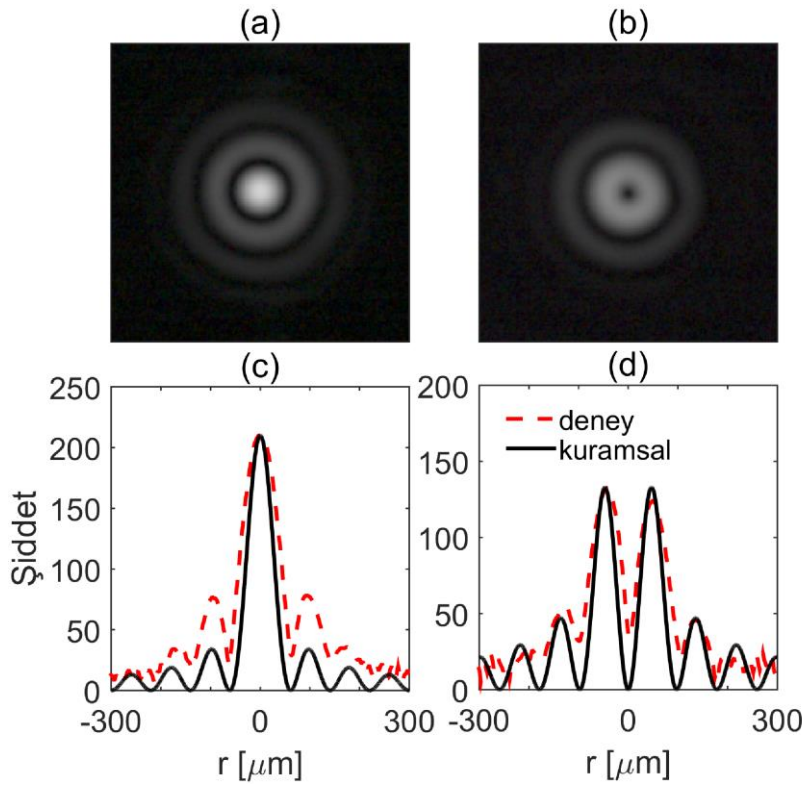
Her ne kadar şiddet ilerleme doğrultusunda farklılıklar gösterse de kuramsal olarak hesaplanan şiddet değeri deneysel ölçümlerle yakınlık göstermektedir. Farklılıkların sebebi olarak deneysel birçok parametre gösterilebilir. Fakat elde edilen deneysel şiddet dağılımları incelendiğinde karakteristik Bessel-Vortex profili elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.10. Bessel-Vortex hüzmeleri spot çapı-uzaklık grafiği (kuramsal olarak hesaplanan çap değeri yaklaşık 95 µm, deneysel olarak elde edilen ortalama çap değeri 108 µm' dir)

Yapılan deneyler ve elde edilen verilerin sistematik analizi sonucu ulaşılan bu sonuçlar hem Bessel hem de Bessel-vortex hüzmeleri hem şiddetlerini uzun mesafelerde korurken hem de merkez spot/halka çapları boyutlarını değiştirmeden ilerleyebilmektedir.

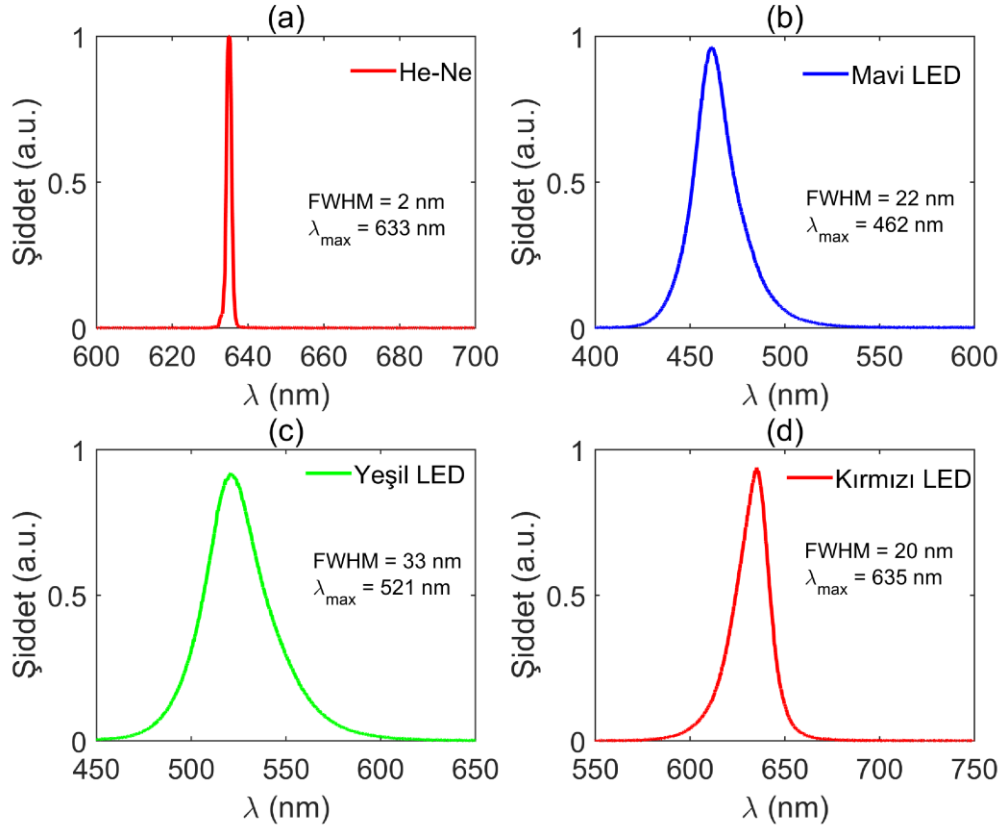
Lazer kaynaklar ile yapılan hüzmeye şekillendirme çalışmalarını özetlemek adına bir arada yapılan Bessel ve Bessel-Vortex hüzmeleri analizleri Şekil 3.11’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar kurulan hüzmeye şekillendirme düzeneğinin ve deneysel ölçümlerin, Bessel matematiksel fonksiyonunu kullanarak yapılan kuramsal hesaplamalarla uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.11. He-Ne lazer kullanılarak hüzmeye şekillendirme analizleri **a)** Bessel hüzmesi **b)** Bessel-Vortex hüzmesi CCD kamera görüntüleri ve bu şiddet dağılımlarına ait **c)** Bessel ve **d)** Bessel-Vortex kesitleri.

Yapılan deneylerin ikinci kısmı Bessel ve Bessel-vortex hüzmelerinin eş-fazlı olmayan kaynaklarla üretilmesi kısmını içermektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Bessel hüzmeleri elde etmede kullanılan kaynakların neredeyse tamamının eş-fazlı (lazer) kaynaklar olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu kısımda daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak eş-fazlı olmayan kaynaklar kullanılarak Bessel ve Bessel-vortex hüzmeleri elde edilmeye çalışılmıştır. Eş fazlı olmayan kaynak olarak piyasadan elde edilen ticari LED’ler (mavi, yeşil, kırmızı) kullanılmıştır. Dolayısıyla ilk olarak Optik Spektrometre ve CCD kamera yardımıyla ilk olarak tepe şiddet dalgaboyu ve kaynakların elektrik alan şiddet dağılımları gözlenmiştir. İlk olarak LED

ışık kaynakları mikroskop objektifi yardımıyla optik fiber içine hapsedilmiş daha sonra ince kenarlı mercek ve mikroskop objektifi yardımıyla ışın demetinin mümkün olduğunca paralelleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

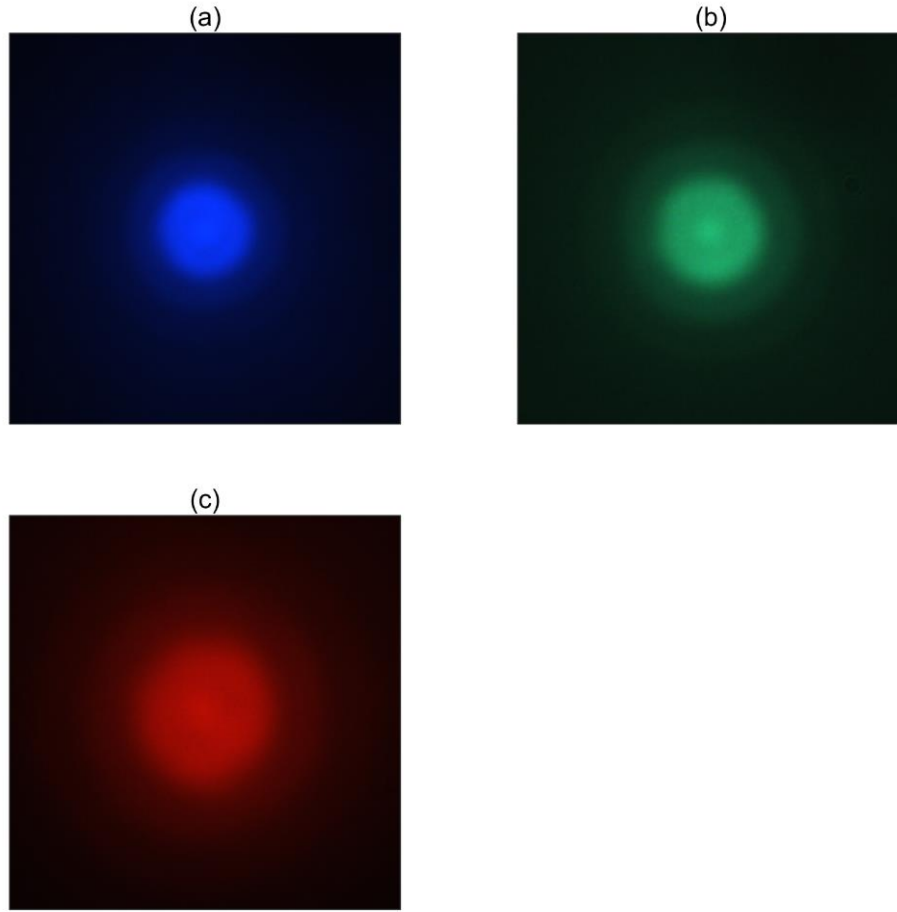


Şekil 3.12. Deneylerde kullanılan ışık kaynaklarının spektroskopik özellikleri **a)** He-Ne lazer **b)** Mavi renkli LED **c)** Yeşil renkli LED **d)** kırmızı renkli LED

Aynı zamanda, özel olarak fiber kablonun ışığın çıktığı kısmının belirli bir bölgesinin ikincil katman ve koruma kaplaması çıkartılarak ışık demetinin çıkış açısı yani sayısal açıklık (NA-numerical aperture) değeri küçültülmüştür. Benzer düzenek farklı üç tür LED için tasarlanarak eş fazlı olmayan ışık kaynakları elde edilmiştir. Kullanılan LED ışık kaynaklarının tepe şiddet dalgaboyu değerleri CCS200 (Thorlabs) spektrometresi kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

Bununla birlikte ışık kaynaklarının FWHM (full width at half-maximum) değerleri belirlendi. Sonuçlardan görüleceği üzere kullanılan kaynakların FWHM değeri He-Ne lazerin FWHM değerinin yanında oldukça fazladır (~ortalama 13 kat fazla). Diğer taraftan her ne kadar paralelleştirmeye çalışılsa da hem monokromatik olmamaları hem de eş-faz uzunluğunun (coherence length) daha kısa olmaları sebebiyle LED kaynaklar kullanılarak elde edilmeye çalışılacak Bessel hüzmeleri kalitesi lazer ışık kaynağı kullanılarak elde edilen Bessel hüzmelerine göre daha düşük olabilecektir.

LED kaynakların tepe şiddeti dalgaboyu belirlenmesinin ardından kaynaklar CCD kamera ile görüntülenmiştir.

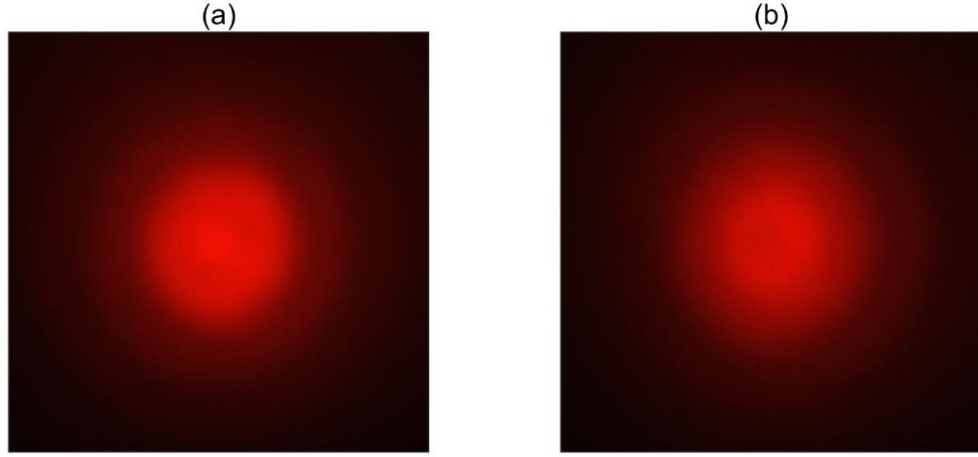


Şekil 3.13. Renkli CCD kamera ile kaydedilen Bessel hüzmesi görüntüleri a) Mavi b) Yeşil c) Kırmızı LED kaynaklar için

Şiddet profili deneyleri ve Gauss matematiksel fonksiyonu ile yapılan karşılaştırmalarda kullanılan LED kaynakların şiddet profillerinin neredeyse Gauss matematiksel fonksiyonu ile betimlenebileceği görülmüştür. Diğer taraftan Bu kaynaklar ile yapılan ilk Bessel hüzmesi elde etme deneyi sonuçları Şekil 3.13’de gösterilmiştir. Eş çözünürlüklü ve eş ölçekli bu CCD kamera görüntülerinden de anlaşıldığı üzere kullanılan ışık kaynağı dalgaboyu arttıkça elde edilen Bessel hüzmesi merkez spot çapı artmaktadır.

Yapılan çalışmalarda; bu ışık kaynakları doğrudan Axicon merceğe üzerine gönderilmiştir. Bu sayede Bessel hüzmeleri farklı tepe dalgaboyuna sahip ve eş-fazlı olmayan kaynaklar için elde edilerek hem merkez spot çapı hem de ilerleme doğrultusunda tepe şiddeti değerleri analizler gerçekleştirildi. Farklı ışık kaynakları için yapılan analizlerde; Bessel hüzmesi, lazer ışık kaynağı kullanıldığı duruma göre daha

kısa mesafelerde odaklı kalabilse de, Bessel bölgesi denen bu bölge içinde hem merkez spot çaplarının çok değişmediği hem de şiddet değerinin lazer kaynaklarla yapılan deneyler ile elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 3.14. Kırmızı LED kaynak için elde edilen **a)** Bessel ve **b)** Bessel-Vortex hüzmesi CCD kamera görüntüleri

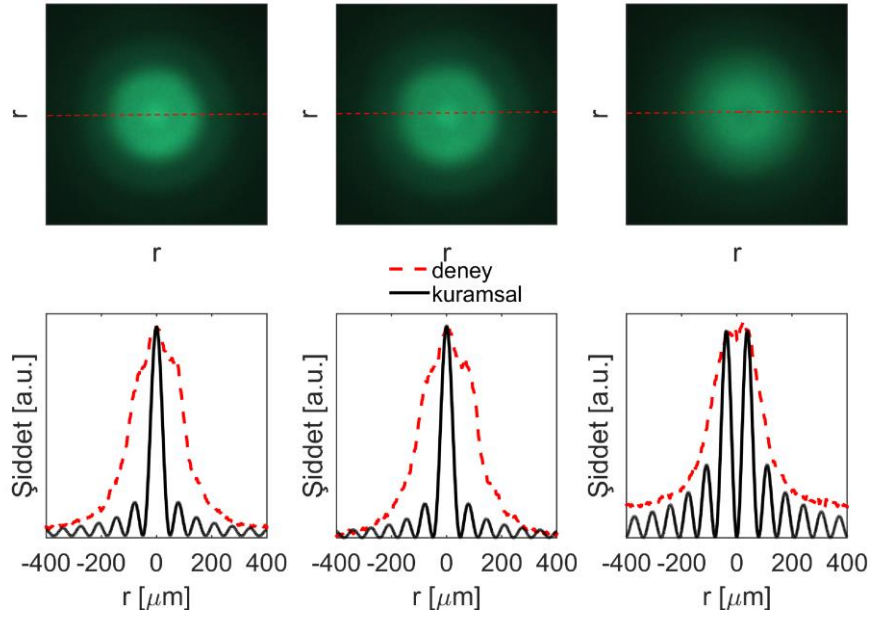
Diğer taraftan; Bessel-vortex hüzmeleri elde etmek için ilk önce ışık kaynağının SPP' den geçirilerek TEM₀₁ modu ile betimlenen Laguerre-Gauss hüzmeleri elde etmek gerektiği daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Laboratuarda mevcut olan SPP sadece tepe değeri 632 nm olan ışık kaynakları için kullanılabileceğinden, LED kaynaklarla Bessel-vortex hüzmesi elde etme deneyleri sadece kırmızı LED için gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda elde edilen şiddet dağılımı sonuçları siyah-beyaz CCD kamera ile elde edilmiş ve Şekil 3.14'de sunulmuştur. Bessel-vortex demeti için yapılan çalışmalarda da gerçekleştirilen analizlerde hüzme çapı ilerleme doğrultusunda Bessel bölgesi içinde nerdeyse değişmezken bu bölgenin eş-fazlı kaynaklara göre daha kısa olduğu görülmüştür.

Axicon taban açısı ($\alpha=0.5^\circ$)	$\lambda = 462$ nm (mavi LED)	$\lambda = 521$ nm (yeşil LED)	$\lambda = 635$ nm (kırmızı LED)
d (merkez spot çapı) (μm)	87.2	99	122

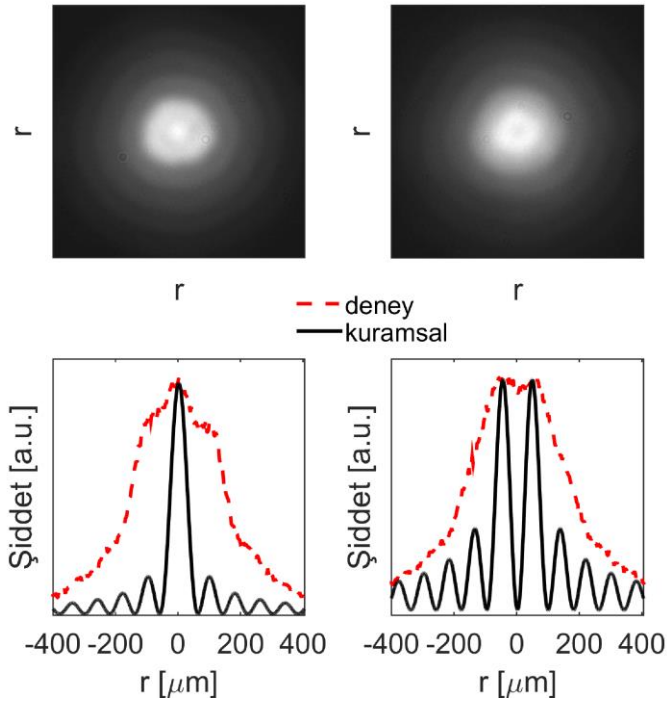
Çizelge 3.1. Farklı dalga boyuna sahip kaynaklar için kuramsal olarak hesaplanan Bessel hüzmesi merkez spot çapı değerleri

Çizelge 3.1 ideal bir Axicon merceği ve ideal Gauss hüzmesi için kuramsal olarak hesaplanan farklı dalga boylu lazer kaynaklara ait elde edilebilecek Bessel hüzmesi merkez spot çapı değerlerini göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında

kullanılan LED ışık kaynaklarının tepe ışınım dalgı boyları olarak seçilen bu değęler yapılacak deneylerde elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.



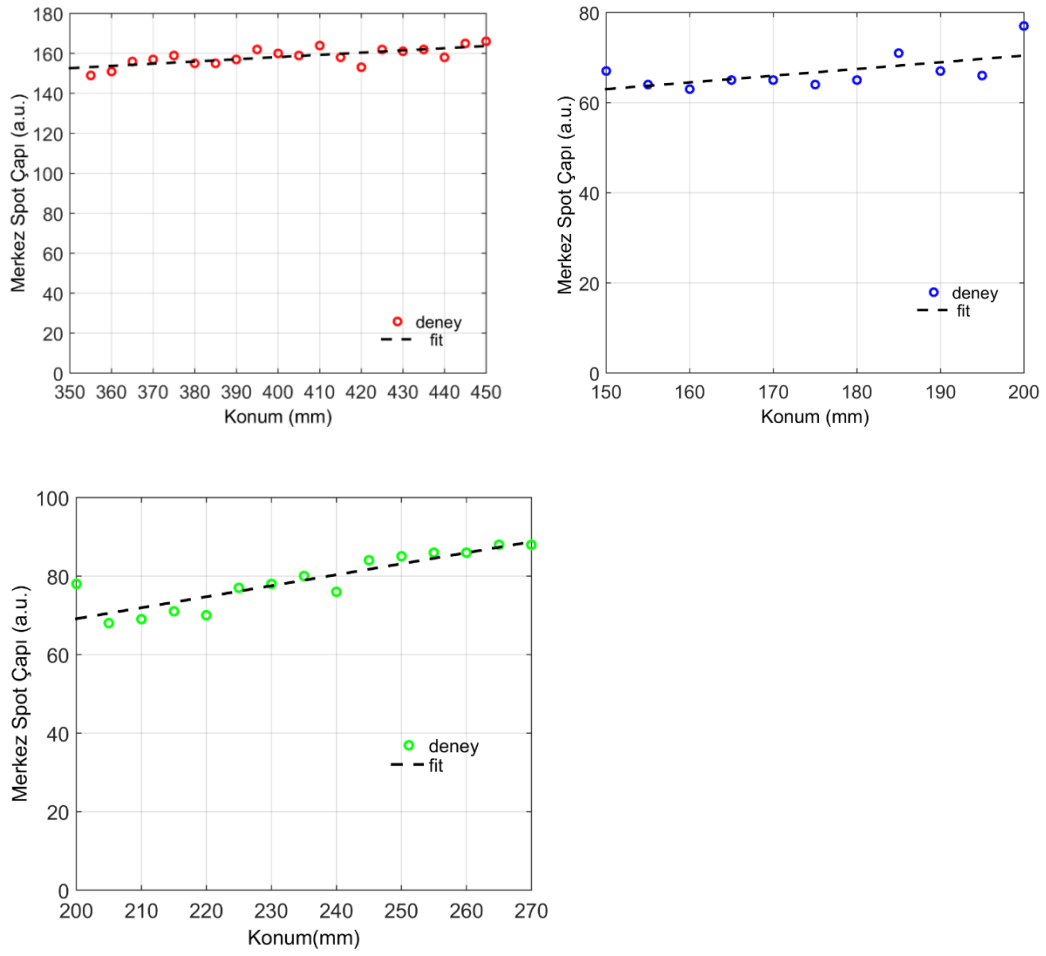
şekil 3.15. Yeşil LED ile yapılan Bessel ve Bessel-Vortex hüzme şekillendirme çalışmaları (Bessel hüzmeleri farklı iki uzaklıkta elde edilmiştir ve renkli CCD kamera kullanılmıştır)



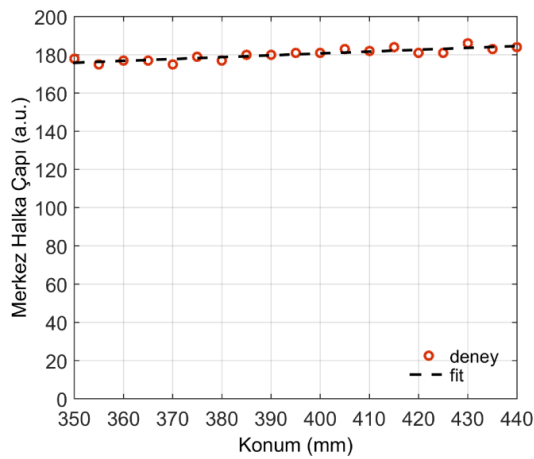
şekil 3.16. Kırmızı LED ile yapılan Bessel ve Bessel-Vortex hüzme şekillendirme çalışmaları (siyah-beyaz CCD kamera kullanılmıştır)

Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 hem yeşil hem de kırmızı renkli ışık yayan LED kaynaklar ile elde edilen hüzme şekillendirme CCD kamera görüntülerini (kare şeklinde) ve bu görüntülere ait kesit (kırmızı kesikli çizgi) profillerini göstermektedir. Kuramsal hesaplamalar LED ışık kaynakları tepe dalgaboyu değerleri ve ideal Axicon mercekler için kullanılan Bessel fonksiyonları ile elde edilmiştir. Her ne kadar CCD kamera görüntülerinden hüzme profilleri Bessel halkalarını gösterse de şiddet kesiti profilleri Bessel zarf fonksiyonları ile daha çok uyum içerisindedir. Bu kısımda Bessel merkez spot çapı ve merkez halka çapı ayırt edilemediğinden hüzme boyutu olarak kuramsal olarak eşleştirilen deneysel CCD kamera görüntülerinden hüzme boyutları elde edilmiştir.

Hem ışık kaynaklarının eş fazlı olmaması hem de kullanılan görüntüleme sisteminde bulunan objektifin kalitesi doğrudan CCD kamera üzerinde hüzme profilini etkilediğinden bu kısımda şiddet profili tamamıyla Bessel (J_0) matematiksel fonksiyonu ile verilen bir davranış göstermese de eninde düzlemde şiddet profili Bessel zarf fonksiyonu ile uyum içerisindedir. Bu kısımda yapılan analizlerde Bessel zarf fonksiyonu kullanılarak merkez demet çapı yerine hüzme boyutu ve tepe şiddeti değeri sonuçları elde edilmiştir. Hem 3 farklı ışık kaynağı (mavi, yeşil ve kırmızı LED' ler) için yapılan Bessel hüzmesi şekillendirme hem de kırmızı LED ışık kaynağı için yapılan Bessel-Vortex hüzme şekillendirme deney sonuçları Şekil 3.17 ve Şekil 3.18' de verilmektedir. Her ne kadar LED ışık kaynakları Axicon merceğe gönderilmeden önce paralelleştirilmeye çalışılsa da, bu ışık kaynakları eş-fazlı olmadıklarından sanki bir lazer ışık kaynağı gibi davranmamaktadırlar. Bu nedenle, her ne kadar Bessel hüzme boyutunun ilerleme doğrultusunda değişmeyeceği kuramsal olarak öngörülse de LED ışık kaynakları ile yapılan deneylerde bu sonuç kuramsal yaklaşımdan bir miktar sapmaktadır. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18' den de görüleceği üzere hüzme boyutu ilerleme doğrultusunda çok az bir miktar (10 cm uzaklık değişiminde yaklaşık hüzme boyutunun % 10' u kadar bir artış) göstermektedir.

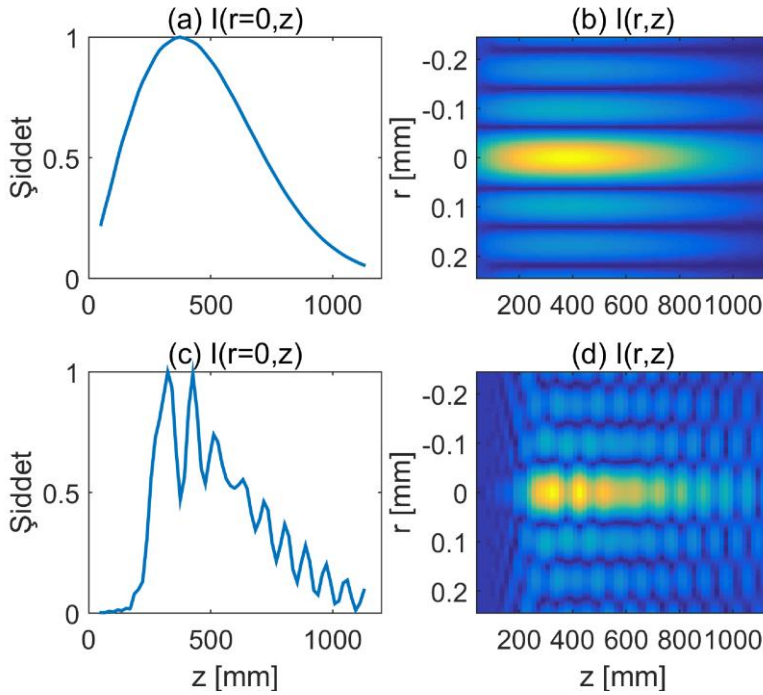


Şekil 3.17. Farklı LED ışık kaynakları için elde edilen Bessel hüzmesi boyutunun hüzme ilerleme mesafesi ile değişimi sonuçları



Şekil 3.18. Kırmızı LED ışık kaynağı için elde edilen Bessel-Vortex hüzmesi boyutunun hüzme ilerleme mesafesi ile değişimi sonuçları

Bu kısımda yapılan hüzme şekillendirme deneyleri ve eş-fazlı olmayan kaynaklar kullanıldığında elde edilen sonuçlar incelendiğinde her ne kadar elde edilen sonuçların Bessel veya Bessel-Vortex hüzme karakteristik özelliklerini taşıdığı görülsede, kuramsal hesaplamalarla deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında bir miktar farklılıklar görülmektedir. Bu farklılıklar birçok parametreye bağlı olabilir. Örneğin kuramsal hesaplamalarda ışık kaynağı şiddet dağılımının tamamen Gauss matematiksel fonksiyonu ile betimlendiği ($M^2 = 1$) hesaba katılır. Fakat çoğu lazer kaynağı bile bu değerden çok çok uzak bir değere sahip olabiliyorken, bu değer (M^2) özellikle eş-fazlı olmayan LED ışık kaynakları için çok daha büyüktür ($M^2 \gg 1$). Dolayısıyla hüzme şekillendirme üzerinde doğrudan etkili olan bu parametre hüzme şekillendirme kalitesini nihayetinde belirlemektedir. Dahası da; kullanılan ışık kaynağının tamamen Gauss matematiksel fonksiyonu ile uyum içerisinde bir şiddet dağılımına sahip olabileceği mümkün olsa da, kullanılan Axicon merceğın fiziksel kusurları bu kez hüzme şekillendirme kalitesine etki etmektedir. Işık kaynağından çıkan ışık ışınları doğrudan Axicon merceğe gönderildiğinden ve Axicon yanıl yüzeyinden kırınımaya uğrayan ışık ışınlarının girişimi ile Bessel veya Bessel-Vortex hüzme şekilleri elde edileceğinden, kullanılan merceğın konik yapıda ve ucunun ultra-sivri olması büyük önem taşımaktadır. Her ne kadar ileri teknoloji fabrikasyon teknikleri kullanılsa da özellikle küçük taban açılı Axicon mercekleri üretmek oldukça zordur. En çok karşılaşılan sorunlardan biri Axicon mercek ucunun yassılaşımasıdır. Bu yassılaşımanın hüzme şekillendirme işlemine etkisi yapılan hesaplamalarla anlaşılmasına çalışılmıştır.



Şekil 3.19. $\lambda=633$ nm dalgaboylu eş-fazlı ışık kaynağı için elde edilen ilerleme boyunca ve hem enine düzlemde hem de ilerleme doğrultusunda şiddet dağılımları **a)** ve **b)** ideal Axicon; **c)** ve **d)** yassı uçlu Axicon için hesaplanmıştır

Şekil 3.19’ da yapılan kuramsal hesaplama gösterilmektedir. Axicon ucunun yaklaşık 1 mm eğrilik yarıçapına sahip yassılaşılmaya sahip olduğu kabul edilerek, Axicon’ a gönderilen 633 nm dalga boyuna sahip 3 mm çapında bir Gauss hüzmesinin oluşturduğu hüzme şekillendirme profilleri elde edilmiştir. Yapılan ideal (ultra-sivri) ve gerçek (yassı uçlu) Axicon mercekler için yapılan bu çalışma Axicon geometrisinin hüzme şekillendirme üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Hem ilerleme düzleminde (Şekil 3.19 a) ve c)), hem de enine düzlemde (Şekil 3.19 b) ve d)) ideal ve yassı uçlu Axicon mercek karşılaştırması hüzme şekillendirme kalitesine etkisini ortaya koymaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Lazer hüzme çıkışları incelendiğinde genel olarak Hermite-Gauss veya Laguerre-Gauss matematiksel fonksiyonu ile betimlendiğinden Gauss (TEM_{00}) veya Laguerre-Gauss (TEM_{01}) hüzmeleri olarak adlandırılmaktadır. Gauss (TEM_{00}) hüzmeleri ile SPP kullanılarak bir üst mod olan TEM_{01} modu kolaylıkla üretilebilmektedir. Fakat ister Gauss (TEM_{00}) modu isterse Laguerre-Gauss (TEM_{01}) moduna sahip olsun, çoğu optik uygulaması kaynağın odaklanmasını gerektirir. Diğer taraftan, bu odaklama ne kadar fazla yapılırsa (yani hüzme odak çapı ne kadar küçük olursa) odaklı kalma mesafesi (Rayleigh uzunluğu) bir o kadar kısa olacaktır. Dolayısıyla bu kısıtlamanın ortadan kaldırılması özellikle mikro- ve nano-fabrikasyon, yüksek çözünürlüklü tomografi gibi uygulamalarında içinde bulunduğu birçok güncel ve ileri teknoloji içeren uygulamalar için faydalı olmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde bu bağlamda özellikle Bessel hüzme ailesinin (J_0 ve J_1) kırınımsız ilerleme özelliği sebebiyle bu kısıtlamayı ortadan kaldıracak en önemli adaylardan biri yapmaktadır. Çok küçük boyutlarda (ışık dalgaboyu mertebesinde) dairesel deliklerden veya özel ışık modülatörleri kullanılarak elde edilen Bessel hüzmelerine göre Axicon kullanımı hem deneysel olarak kolay olması hem de enerji transferinin (Axicon üzerine düşen ışık kaynağı enerjisinin doğrudan Bessel demetine aktarılma oranı) yüksek olması Axicon kullanımının tercih edilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda Bessel ve Bessel-vortex hüzmeleri elde edilmesi Axicon mercekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hem kırınımsız ilerleme özelliği hem de ilerlerken kendini tamir etme özelliği sayesinde çoğu lazer uygulamasında başrol oynayan Bessel hüzmeleri kullanımı literatürde yaygındır. Dahası da; bunlara ek olarak çok kolay ve çok küçük boyutlarda (~ 250 nm çapında) odaklanabilirken metrelerce odaklı kalabilme özellikleri özellikle ileri teknoloji uygulamalar (lazer mikro- nano-fabrikasyon, plazmonik vs.) hatta Glokom (göz tansiyonu) tedavisi için dahi büyük avantaj sağlamaktadır. Fakat bütün bu uygulamalar eş-fazlı lazer kaynakları ile yapılmaktadır. Bu nedenle özellikle eş-fazlı olmayan (örneğin LED' ler) kaynaklar ile yapılacak Bessel hüzmesi elde etme çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda bu tez çalışmaları kapsamında sırasıyla aşağıda belirtilen çalışmalar hem kuramsal, hem hesaplamalı hem de deneysel anlamda gerçekleştirilerek literatüre kazandırılmıştır. İlk olarak Bessel hüzmelerinin özellikleri Bessel matematiksel fonksiyonunu kullanarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerde Bessel merkez spot çapına veya Bessel-vortex hüzmeleri için merkez halka çapına etkisi olan parametrelerin kullanılan kaynağın dalgaboyu ve Axicon merceğin özellikleri olduğu anlaşılmıştır. Sistematik hesaplamalar Gauss hüzmesi dalgaboyu azalırken Bessel hüzmesi merkez spot çapının veya Bessel-vortex hüzmesi merkez halka çapının azaldığını ve kolaylıkla birkaç mikrometre boyutunda merkez spot/halka profillerine kolayca ulaşılabileceğini göstermiştir. Diğer taraftan, Bessel bölgesi uzunluğunun (yani Axicon mercek yanal yüzeyindeki kırılma sonucu girişim uzunluğunun) doğrudan Gauss hüzmesi çapı ve Axicon taban açısı ile ilişkili olduğu

gözlenmiŖtir. Gauss hüzmeleri çapı ile doğrusal olarak artan Bessel bölgesi uzunluğu aynı zamanda Axicon taban açısı artarken oldukça azalmaktadır. Buna rağmen yapılan hesaplamalardan ve sistematik analizlerden mikrometre boyutlarında Bessel merkez spot veya Bessel-vortex merkez halka hüzmeleri kullanılan Axicon taban açısına ve Gauss hüzmeleri çapına bağlı olarak metrelerce uzunlukta Bessel bölgesi elde edilebilmektedir. Diğer taraftan, Axicon mercek konik (ucu sivri) olarak tasarlanıp Fresnel-Kirchhoff integrali MATLAB programı yardımıyla nümerik olarak çözümlenip Gauss hüzmelerinin Axicon mercek sonrası elektrik alan profili elde edilmiŖtir. Gauss hüzmeleri (TEM₀₀) kullanıldığında çözümlenmelerin sonucunun Bessel (J₀) matematiksel fonksiyonu ile betimlenen Bessel hüzmelerine, Laguerre-Gauss (TEM₀₁) hüzmeleri kullanıldığında çözümlenme sonuçlarının Bessel-vortex olarak da anılan J₁ matematiksel fonksiyonu ile betimlenen elektrik alan Ŗiddet dağılımlarına sahip oldukları gözlenmiŖtir. Ŗiddet dağılımlarının 3-boyutlu elde edilmesiyle, Bessel halkalarının eş-enerjili halkalardan oluŖtuęu görölmüŖtür. Özellikle küçük açılı Axicon' lar için karŖılaŖılan Axicon ucu sivriliğinin az olması sebebiyle Bessel hüzmelerindeki kusurlar incelenmek için, Axicon ucu yassı olarak modellenip tekrar Fresnel-Kirchhoff integrali çözümlenmeleri MATLAB programı yardımıyla gerçekeŖtirilmiŖtir. Elde edilen sonuçlarda özellikle ilerleme doğrutusunda Ŗiddet dağılımının sivri uçlu Axicon' dan saptığını göstermektedir.

Yapılan kuramsal incelemeler ve sayısal hesaplamalar ışığında gerçekeŖtirilen deneyler ise iki ana kısımdan oluŖmaktadır. Daha önceki kısımlarda da belirtildiği gibi literatür incelendiğinde Ŗimdiye kadar yapılan çalıŖmaların neredeyse tamamı eş fazlı kaynaklar kullanılarak yapılmıŖtır. Bu tez kapsamında buna ek olarak eş-fazlı kaynaklar kullanılarak ta Bessel ve Bessel-vortex hüzmeleri elde edilmiŖtir. İlk olarak Bessel hüzmeleri He-Ne lazer kullanılarak elde edilmiŖ ve yapılan analizlerde sınırlı bir Bessel bölgesi içinde elde edilen hüzmelerin Ŗiddet dağılımları incelenmiŖtir. Yapılan sistematik deneylerin analizinde mikrometre boyutlarındaki Bessel hüzmeleri merkez spot çapı onlarca cm uzunluğunda odaklı kalabilirken Ŗiddet tepe değerinin önce arttığı daha sonra tepe değerine ulaŖarak azaldığı elde edilmiŖtir. EŖ-fazlı kaynakla yapılan bu deneylerin ardından Bessel-vortex hüzmeleri elde edilmesi için ilgili deneysel düzeneğe (Bessel hüzmeleri elde etme düzeneği) sadece SPP eklenerek oluŖan hüzmeler CCD kamera yardımıyla Axicon mercekten adım adım uzaklaŖarak belirli mesafelerde kaydedilmiŖtir. Sistematik ölçümler analiz edildiğinde Bessel-vortex hüzmeleri merkez spot çapının Bessel bölgesi sınırları içerisinde neredeyse deęiŖmedięi, Ŗiddetinin ise Bessel hüzmeleri için elde edilen sonuçlarla benzediği görölmüŖtür.

EŖ fazlı kaynaklarla yapılan Bessel ve Bessel-vortex elde etme ile kazanılan bilgi ve tecrübe yapılan deneylerin ikinci kısmı için büyük bir katkı saęlamıŖtır. Hüzmeleri Ŗekillendirme deneyleri ikinci kısmında hem Bessel hem de Bessel-vortex hüzmeleri elde etmek için eş-fazlı olmayan ve farklı dalgaboylarına sahip LED' ler kullanılmıŖtır. İlk olarak bu kaynaklar bir Optik Spektrometre yardımıyla karakterize edilerek tepe

şiddet dalgaboyları ve FWHM değerleri belirlenmiştir. Yapılan bu ölçümlerde LED ışık kaynaklarının FWHM değerlerinin He-Ne lazerle karşılaştırıldığında yaklaşık 30 kat daha fazla olduğu görülmüştür. LED ışık kaynaklarının karakterizasyonu sonrasında bu kaynaklar için tekrar Bessel ve Bessel-vortex hüzmeye şekillendirme deneysel düzenekleri kurulmuştur. İlk olarak Bessel hüzmeye şekillendirme deneyleri mavi, yeşil ve kırmızı renkteki LED kaynaklar için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen hüzmeye profilleri hem siyah-beyaz hem de renkli CCD kamera yardımıyla incelenmiş ve Axicon mercekle görüntüleme sistemi arasındaki mesafe sistematik artırılarak Bessel bölgesi uzunluğu belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, eş-fazlı olmayan kaynaklarla da Bessel hüzmelerinin elde edilebildiği gösterilmiştir. Şiddet profillerinin Bessel matematiksel fonksiyonu ile uyum göstermesinin yanında Bessel (J_0) zarf fonksiyonu ile de uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca eş-fazlı kaynaklarla elde edilen durumlarla karşılaştırıldığında görece az olsa da merkez spot çapının uzun mesafelerde odaklı kalabildiği gözlenmiştir. Bessel hüzmeye ilerleme doğrultusunda ise hüzmeye merkez noktası şiddetinin aynı şekilde bir tepe değerine kadar arttığı daha sonra azaldığı görülmüştür. Benzer çalışmalar eş-fazlı olmayan kaynaklarla Bessel-vortex hüzmeye elde etmek için de tekrarlanmıştır. Mevcut imkânlar dâhilinde tek tip SPP (632 nm için kullanılabilen) olduğundan eş-fazlı olmayan kaynaklar içerisinden sadece kırmızı renkli LED için Bessel-vortex demeti elde edilmiştir. LED için kurulan sisteme kolayca eklenebilen SPP sayesinde kırmızı renkli LED için Bessel-vortex hüzmeye elde edilip CCD kamera yardımıyla kaydedilmiştir. Fakat hem LED kaynağın FWHM değerinin yüksek olması hem kırınım sebebiyle Gauss hüzmeye paralelleştirilememesi hem de kullanılan optik elemanların bir kısmının düzenek için uygun olamaması sebebiyle merkezde karanlık (tekillik) etrafında eş enerjili halkalar elde etmek çok mümkün olamamıştır. Diğer taraftan merkezde bulunan halka belirgin şekilde ayırt edilebilmektedir. İleriki zamanda gerçekleştirilecek çalışmalarda farklı objektifler, pin-hole ve mercekler yardımıyla Bessel-vortex hüzmeye profilinin daha kaliteli ve kuramsal çıkarımlarla daha uyum içerisinde olduğu durumlar elde edilmeye çalışılacaktır. Bessel hüzmeleri için karakteristik imzalar bu ölçümler için de tekrarlanmıştır. Hüzmeye boyutunun çok daha uzun mesafelerde odaklı kalabilmesinin yanında şiddetini de koruduğu görülmüştür.

Yapılan kuramsal çıkarımların, hesaplamalı öngörülerin ve deneysel ölçümlerin neticesinde; eş-fazlı ışık kaynakları ile elde edilebilecek Bessel ve Bessel-vortex hüzmelerinin, eş-fazlı olmayan ışık kaynakları ile de tekrarlanabileceği görülmüştür. Bu kısımda dikkat edilmesi gereken kullanılan optik elemanların uygunluğu/kalitesi ve kurulan deneysel düzeneğin kolaylığıdır. Bu bağlamda günlük hayatta (aydınlatma, otomotiv vs.) teknolojiye farklı bir boyut kazandıran bu çalışma konusu, gelecek yıllarda yapılacak olan yeni çalışmaların önünü açabileceği ve bilimsel literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR

Yapılan tüm sistematik analizler ışığında verilebilecek sonuçlar aşağıda sıralanmıştır. Eş-fazlı kaynaklar kullanılarak kırınımsız Bessel ve Bessel-vortex hüzmeleri elde edilebilir ve giriş Gauss hüzmeye parametreleri değiştirilerek elde edilen Bessel hüzmelerinin özellikleri kontrol edilebilir. Bu bağlamda; gerek düşük güçlü lazerlerle, gerek yüksek güçlü lazerlerle gerekse atımlı (pulse) lazerlerle yapılacak uygulamalar için birçok kısıtlamayı ortadan kaldırmanın yanı sıra yeni avantajlar sağlamaktadır.

Diğer taraftan literatürdeki nerdeyse bütün çalışmaların aksine bu tez kapsamında yapılan sistematik çalışmalar göstermiştir ki; eş-fazlı olmayan ışık kaynakları (örneğin LED) için de hüzmeye şekillendirme (Bessel ve Bessel-vortex) çalışmaları gerçekleştirilebilir ve doğrudan günümüz teknolojisine uyum sağlayacak basit düzeneklere adapte edilebilir. Optik alanının temelini oluşturan elektromanyetik dalga ilerleme, elektrik alan şiddetinin radyal ekseninde dağılımını değiştirme, kırınımsız hüzmelerin elde edilmesi (hem lazerler hem de eş-fazlı olmayan kaynaklar için) teknolojideki eksiklikleri tamamlama potansiyelinin yanında ışığın doğasını anlamaya da destek olmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Akturk, S., Zhou, B., Franco, M., Couairon, A., and Mysyrowicz, A. 2009. Retaining high laser intensities and generating plasma channels over long distances in air by using an Axicon. *Optics Communications*, 282(1): 129-134.
- Alexeev, I., Leitz, K.-H., Otto, A. and Schmidt, M. 2010. Application of Bessel beams for ultra fast laser volumes structuring of nontransparent media. *Physics Procedia*, 5: 533-540.
- Arlt, J. and Dholakia, K. 2000. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon. *Opt. Commun.*, 177 (1-6): 297-301.
- Bagini, V., Frezza, F., Santarsiero, M. and Schettini G& Schirripa Spagnolo, G. 1996 Generalized Bessel-Gauss beams, *Journal of Modern Optics*, 43(6): 1155-1166.
- Beresna, M., Geceviius, M. and Kazansky, P.G. 2011. Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass [invited]. *Opt. Mater. Express*, 1 (4): 783-795.
- Bhuyan, M.K. Courvoisier, F., Lacourt, P.-A., Jacquot, M., Furfaro, L., Withford, M.J. and Dudley, J.M. 2010. High aspect ratio taper-free microchannel fabrication using femtosecond Bessel beams. *Opt. Express.*, 18 (2):566-574.
- Bouchal, Z., Wagner, J. and Chlup, M. 1998. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam. *Opt Commun.*, 151(4-6): 207-211.
- Borghi R., Santarsiero M., Alonso M. A. 2005. Highly focused spirally polarized beams, *Journal of Optical Society of America A*, 22: 1420-1431.
- Courvoisier, F., Lacourt, P.A., Jacquot, M., Bhuyan, M. K., Furfaro, L. and Dudley, J. M. 2009. Surface nanoprocessing with nondiffracting femtosecond Bessel beams. *Opt. Lett.*, 34(20): 3163-3165.
- Ding, Z., Ren, H., Zhao, Y., Nelson, J.S. and Chen, Z. 2002. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens. *Opt. Lett.*, 27(4): 243-245.
- Durnin, J. 1987. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory. *J Opt Soc Am A*, 4 (4): 651-654.
- Durnin, J., Miceli, J.J. and Eberly, J.H. 1987. Diffraction-freebeams. *Phys Rev Lett*, 58(15): 1499-1501.
- Ersoy, T. 2016. Şekillendirilmiş Lazer Hüzmelerinin Yüksek Saçılmalı Ortamla Etkileşimleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 151s.
- Garces-Chavez, V., McGloin, D., Melville, H., Sibbett, W. and Dholakia, K. 2002. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam. *Nature*, 419: 145-147.
- Glushko, B., Kryzhanovsky, B. and Sarkisyan, D. 1993. Self-phase-matching mechanism for efficient harmonic generation processes in a ring pump beam geometry. *Phys. Rev. Lett.*, 71(2): 243-246.
- Golup, I. 2006. Fresnel axicon, *Opt. Lett*, 31(12): 1890-1892.

- Herman, R. M. and Wiggins, T.A. 1991. Production and uses of diffraction-less beams. *J Opt Soc Am A*. 8(6): 932-942.
- Herman R.M. and Wiggins T.A. 2001 Propagation and focusing of Bessel–Gauss, generalized Bessel–Gauss, and modified Bessel–Gauss beams, *Journal of Optical Society of America A*, 18: 170-176.
- Hsu, D.K., Margetan, F. J. and Thompson, D. O. 1989. Bessel beam ultrasonic transducer: Fabrication method and experimental results. *Appl. Phys. Lett.* 55: 2066.
- Kamacioğlu, C. and Baykal Y. 2012. Generalized expression for optical source fields, *Journal of Optics and Laser Technology*, 44: 1706.
- McLeod, J. H. 1954. The Axicon: A new type of optical element. *J Opt Soc Am*, 44(8): 592-597.
- McLeod, E., Hopkins, A. B. and Arnold, C. B. 2006. Multiscale Bessel beams generated by a tunable acoustic gradient index of refraction lens. *Opt Lett.*, 31(21): 3155-3157.
- Niggle, L.,Lanzl, T. and Maiser, M. 1997. Properties of Bessel beams generated by periodic gratings of circular symmetry. *J Opt Soc Am A*, 14(1): 27-33.
- Paterson, L. vd. 2005. Light-induced cell separation in a tailored optical and scape, *Appl. Phys. Lett*, 87(12): 123901-3.
- Polynkin, P., Kolesik, M., Moloney, J. V., Siviloğlu, G. A. and Christodoulides, D. N. 2009. Curved Plasma Chanel Generation Using Ultra intense Airy Beams. *Science*, 324(5924): 229-232.
- Sahin, R., Morova, Y., Simsek, E. and Akturk, S. 2013. Bessel-beam-written nanoslit arrays and characterization of their optical response. *Appl. Phys. Lett.*, 102(19).
- Sahin, R., Simsek, E. and Akturk, S. 2014. Nano scale patterning of graphene through femto second laserablation. *Appl. Phys. Lett.* , 104(5): 053118.
- Siegman, A. E. 1986. Lasers. Univ Science Books.
- Soylu, B. 2012. Femtosaniye Lazer ile İnce Metal Filmler Üzerinde Nano Boyutta Yapılar Oluşturma. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 41 s.
- Tewari, S. P.,Huang, H. and Boyd, R.W. 1995. Theory of self-phase-matching. *Phys. Rev. A*, 51(4): R2702-R2710.
- Turkoğlu,K.A. 2012. Femtosaniye Lazerlerin Metallerle Etkileşimlerinden Dalga Kılavuzu Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi,115s.
- Tunay, T. 2015. Silindirik Odaklı Lazer Hüzmeleri ile Yüzey Temizleme ve Cam İşleme Çalışmaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 65s.
- Yalizay, B. 2011. Gauss, Bessel ve Airy Hüzmeleri ile Femtosaniye Lazer- Malzeme Etkileşimlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 69s.

Vasara, A., Turunen, J. and Friberg, A.T. 1989. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 6(11): 1748-1754.

Anonim1:https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_length#/media/File:GaussianBeamWaist.svg [Son erişim tarihi: 20.01.2019].

ÖZGEÇMİŞ

Dürdane Aynur
durdaneaynur@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2016-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilimdalı, Antalya
Lisans 2009-2016	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi, Antalya
Pedagojik Formasyon 2014-2015	Akdeniz Üniversitesi, Antalya