

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRÜNÜR BÖLGEDEKİ BÜKÜMLÜ ELEKTROMANYETİK DALGALARIN PROFİL
GÖRÜNTÜLERİNİN ANALİZİ

Makbule GÖK

HAZİRAN 2022

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRÜNÜR BÖLGEDEKİ BÜKÜMLÜ ELEKTROMANYETİK DALGALARIN PROFİL
GÖRÜNTÜLERİNİN ANALİZİ

Hazırlayan
Makbule GÖK

Danışman
Prof. Dr. Koray KÖKSAL

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
Prof. Dr. Koray KÖKSAL
Dr. Öğr. Üyesi Serhat Berat EFE

HAZİRAN 2022

ONAY

Makbule GÖK tarafından hazırlanan “**Görünür Bölgedeki Bükümlü Elektromanyetik Dalgaların Profil Görüntülerinin Analizi**” adlı tez çalışması 08/06/2022 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

(Başkan)

Prof. Dr. Koray KÖKSAL

(Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Serhat Berat EFE

(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Mehmet Bakır ŞENGÜL

Enstitü Müdürü

BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Görünür Bölgedeki Bükümlü Elektromanyetik Dalgaların Profil Görüntülerinin Analizi**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. / / 20...

Makbule GÖK
İmza

ÖZET

GÖRÜNÜR BÖLGEDEKİ BÜKÜMLÜ ELEKTROMANYETİK DALGALARIN PROFİL GÖRÜNTÜLERİNİN ANALİZİ

Makbule GÖK

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Koray KÖKSAL

Haziran 2022, 38 sayfa

Bu tez çalışmasında yörüngesel açısall momentuma sahip bükümlü elektromanyetik dalga üretilmiş ve görünür bölgede yer alan bu dalgalara ait yoğunluk dağılımı görüntü işleme teknikleri ile incelenmiştir. Açısall momentuma sahip elektromanyetik dalga üretilirken hologram tekniğı kullanılmış, Fourier dönüşüm tekniğı ile “*Mathematica*” programında çatal hologramlar üretilmiştir. DLP/DMD teknolojisi kullanılarak üretilen hologramlarla eş fazlı, görünür bölge dalga boyuna sahip, tek frekanslı elektromanyetik dalgaların genliğı ve fazı modüle edilmiştir. Bu şekilde yörüngesel açısall momentuma sahip bükümlü elektromanyetik dalgalar üretilmiştir. DMD (dijital mikro ayna cihazı) yardımıyla yörüngesel açısall momentuma sahip bükümlü elektromanyetik dalgaların iki boyutlu profil görüntüsü CCD kamerayla kayıt altına alınmıştır. Yüksek çözünürlüklü resim formatında kayıt altına alınan bükümlü elektromanyetik dalgaların profil görüntülerine ait yoğunluk dağılımları C# dili kullanılarak Visual Studio 2019 programında görüntü işleme teknikleri ile incelenmiştir. Teoride hesaplanan yoğunluk dağılımları deneysel olarak da doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Bükümlü ışık, Açısall Momentuma Sahip Işık, Görüntü İşleme

ABSTRACT

ANALYSIS OF PROFILE IMAGES OF TWISTED ELECTROMAGNETIC WAVES IN VISIBLE REGION

Makbule GÖK

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate Education Institute

Department of Electrical - Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Koray KÖKSAL

June 2022, 38 pages

In this thesis, a twisted electromagnetic wave with orbital angular momentum has been produced and the intensity distribution of these waves in the visible region has been investigated by image processing techniques. For generating electromagnetic waves with angular momentum, the hologram technique was used. The fork holograms have been plotted by the Mathematica software in the frame of Fourier transform. The amplitude and phase of the single-frequency-electromagnetic waves which are coherent and monochromatic have been modulated by using DLP/DMD technology. In this way, twisted electromagnetic waves carrying orbital angular momentum are produced. With the aid of DMD (digital micro mirror device), two-dimensional profile images of twisted electromagnetic waves with orbital angular momentum were projected and recorded with a CCD camera. The intensity distribution of the recorded profile images in high-resolution image format has been investigated by using the C# language, image processing techniques, and the Visual Studio 2019 program. As a result, the result of the theoretical calculation of the intensity distribution has been confirmed experimentally.

Keywords: Twisted Light, Angular Momentum Light, Image Processing

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden baŐlayarak son aŐamaya kadar her konuda benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Koray KÖKSAL'a Őukranlarımı sunarım. Ayrıca bütün resmi iÇ ve iŐlemlerimi hızlıca ve özenle yerine getiren Bitlis Eren Üniversitesi Elektik - Elektronik Mühendisliği ABD hocalarına ve personellerine teŐekkürü borç bilirim.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan anne-babam baŐta olmak üzere tüm aileme, yoğun çalışma temposunda bana her yönüyle destek olan eŐim Mehmet'e ve mezun olmamı dört gözle bekleyip mezuniyetime günler kala vefat eden kıymetli kayınpederime, kardeŐim Gülsüm'e, yengeme, varlığı ile bir motivasyon kaynağı olan oğlum Davut Ali'ye teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasında BEBAP 2021.10 numaralı proje kapsamında verdikleri desteklerden dolayı Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel AraŐtırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

ÖNSÖZ

Günümüz dünyasında teknoloji her alana girmiş ve hayatın vazgeçilmez önemli bir parçası olmuştur. Teknoloji hayatın içerisinde kendine yer buldukça teknolojiye olan ihtiyaç hızlı bir ivme ile artmakta ve hep daha fazlasına, daha gelişmişine, daha hızlısına gereksinim duyulmaktadır. Bu ihtiyaç şöyle bir benzetme yapılarak açıklanabilir; çekilen bir fotoğrafın daha ayrıntılı ve daha net olması için çözünürlüğün artırılması, çözünürlük için fotoğraf dosyasının hafızada kapladığı alanın ve boyutun artması, boyut artıkça da daha fazla depolama alanının olması gerekmektedir. Bu hızlı teknolojik değişim ve gelişim döngüsüne bağlı olarak teknolojik çalışmalara paralel bir şekilde akademik dünyada da hızlı değişimler kaydedilmektedir.

Özellikle görüntü teknolojilerinde son yıllarda büyük ilerleme kaydedilmiştir. Bu ilerlemenin temel sebepleri:

- Son derece hassas farklı özelliklerde birçok elektromanyetik dalga kaynağının üretiminin başarılması
- Optik, optoelektronik, optomekanik, manyetooptik, fiber optik alanlarında yapılan yeni keşifler ve ilerlemeler sayesinde ışık ve elektromanyetik dalga formlarının üretimi, iletimi ve kontrolünün başarılı bir şekilde sağlanması
- Yüksek çözünürlüklü kameralar sayesinde yüksek çözünürlüklü fotoğrafların elde edilmesi
- Yüksek çözünürlüklü fotoğrafların görüntü işleme teknikleri ile analiz edilmesi

olarak sıralanabilir. Bu temel sebeplerin her birisi ışık-madde etkileşimine dayanmakta ve ışığa duyarlı mikro- ve nano-ölçekli malzemelerin geliştirilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Mikro-ölçekli malzemeler ile elektromanyetik dalgaların genliği ve fazı ayarlanabilir birer parametre haline dönüştürülmektedir.

Bu tez çalışması teknolojik gelişmelerin neredeyse her alanında, özellikle de görüntü teknolojileri alanında etkisi ve sonuçları büyük olan elektromanyetik dalgaları konu edinmektedir. Tez çalışmasında görünür bölgedeki elektromanyetik dalgaların yapılandırılması, faz ve genliklerinin değiştirilmesi ile elde edilen bükümlü ışık formlarının üretilme yöntemleri, elde edilen dalga formlarının ve yoğunluk profillerinin analizi ele alınmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Yörünge Açısal Momentumu (YAM) Taşıyan Elektromanyetik Dalgalar	2
1.2. Görünür Bölge Elektromanyetik Dalgalar: Optik Vorteks Işınları ve Kullanım Alanları	5
1.3. Görünür Bölge Bükümlü Elektromanyetik Dalgaların Üretilme Yöntemleri	7
1.4. Bükümlü Elektromanyetik Dalga'nın Matematiksel İfadesi	8
1.5. Uzaysal Işık Modülatörü (Spatial Light Modulators-SLM)	8
1.6. DLP Teknolojisi ve DMD	10
1.7. DMD Çalışma Prensipleri	12
1.8. Elektromanyetik Dalga Kaynağı Olarak Lazer	14
2. MATERYAL VE YÖNTEM	16
2.1. Deney Düzeninde Kullanılan Materyaller	16
2.1.1. Lazer, THORLABS NPL64A	16
2.1.2. SLM, LG PH300-GL	16
2.1.3. Optik Mercek	16
2.1.4. CCD Kamera	16
2.1.5. Mathematica 12	17
2.1.6. Visual Studio 9	17
2.2. Yöntem	17
2.2.1. İyileştirilmiş Lazer Spotu	18
2.2.2. Hologram ve Holografik Maske Üretimi	19
2.2.3. Görüntünün Uzaysal Işık Modülatörüne Aktarılması	22
2.2.4. Görünür Bölgedeki Bükümlü Elektromanyetik Dalga'nın (Optik Vortex) Üretilmesi ve Görüntülenmesi	23

2.2.5. Girişim Desenlerinden YAM Değerine Sahip Uygun Işığı Elde Etme	25
2.2.6. Yüksek Çözünürlüklü Resim Formatı	26
3. BULGULAR	27
3.1 Radyal Işın Profiline Elde Edilmesi	27
3.2 Radyal Işın Profiline Analizi	28
4. SONUÇ VE TARTIŞMA	33
5. KAYNAKLAR	34
YAYINLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	38



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
1.1.(a) Üç farklı yörüngesel açısal momentum değeri için faz cephesi, yoğunluk profili ve düzlem dalga ile girişim deseni gösterimleri [4]	4
1.1.(b) YAM=3 olan bir ışının düzlem dalga ile girişim deseni	4
1.2. Farklı açısal momentuma sahip bükümlü ışık profilleri. [5]	5
1.3. Optik cımbız şematik gösterimi [15].....	6
1.4. Görüntünün resim formatı [25]	10
1.5. Lazer Görüntüsü [25]	10
1.6. MxN sayıda mikro ayna [40]	11
1.7. Tipik bir DMD ışığının yanında iki DMD ayna pikselinin şeması [26].....	11
1.8. Dijital bir mikro aynanın diyagramı [27]	13
1.9. Bir DMD pikselinin genişletilmiş görüntüsü [28].....	14
2.1 Gaussian fonksiyonu gösterimi	18
2.2. (a) Pin hole'den geçirilmiş ışık spotu.....	18
2.2. (b) Pin hole'den geçirilmemiş olan ışık spotu.....	18
2.3. Hologramı oluşturma ve hologramdan sanal görüntü elde etme işlemleri.....	19
2.4. Girişim desenleri	20
2.5. Hologram görüntüsü ve sadece $\ell = 0, \pm 1$ için ışığın radial profili	21
2.6. Denklem 5'in Mathematica'da oluşturulmuş matematiksel eşitliği.....	22
2.7. $\ell = \pm 10$ için elde edilmiş hologramlar	22
2.8. (a) Deney düzeneği	24
2.8. (b) Deney düzeneğine ait blok şema	24
2.9. $\ell = -12$ 'den $\ell = 12$ 'ye kadar topolojik yük değerlerine sahip tüm optik girdap desenleri.....	25
2.10. 532 nm dalga boyu girişim desenleri	26
2.11. Pin hole.....	26
3.1. $\ell = 1$ için optik girdap desenleri.....	27
3.2. $\ell = 1$ bükümlü ışın spotu radyal profili	28
3.3. $\ell = 1$ için optik girdap desenleri.....	28
3.4. $\ell = 9$ için optik girdap desenleri.....	28
3.5. $\ell = -10$ 'dan $\ell = 10$ 'a kadar optik girdap desenleri.....	29
3.6. $\ell = 7$ ile $\ell = 10$ arasında topolojik yük değerlerine sahip noktaların 3B profilleri.....	30
3.7. $\ell = 1$ ile $\ell = 10$ arasında topolojik yük değerlerine sahip noktaların toplam yoğunluğu	31
3.8. İki karşı-yayılan bükülmüş ışığın yoğunluk kalıpları.....	32

SİMGELER DİZİNİ

ℓ	Topolojik yük
h	Plank sabiti
ϕ	Azimet açısı
θ	Polar açısı
l	Yörünge kuantum sayısı
E	Enerji
E_0	Molekülün temel durumdaki enerjisi
w	İçer boş kafesin genişliği
X_i	Fonksiyon kümesi
E	Exponansiyel terim
P	Radyal nod sayısı
$L_p^l(x)$	Genelleştirilmiş Laguerre polinomu

KISALTMALAR DİZİNİ

SLM	Uzamsal ışık modülatörü
DLP	Dijital ışık işleme
DMD	Dijital mikro ayna
LG	Laguerre-Gaussian
SAM	Spin açısai Momentum
YAM	Yörünge açısai momentumu



1. GİRİŞ

Teknoloji çağına girmekle birlikte bilişim mühendislikleri çağın en popüler meslekleri haline gelmiştir. Elektrik elektronik mühendisliği de bilişim mühendislikleri için birleştirici bir rol üstlenmiştir. Çünkü teori, yazılım ve donanımın bir araya getirilmesi sonucu teknolojik ürünün ortaya çıkması gerekmektedir. Tam da bu noktada elektronik mühendisliği devreye girmektedir. Bu tez çalışmasındaki amaç da optik fiziğin bir konusu olan, teorik ve deneysel olarak birçok kişi tarafından çalışılan görünür bölgedeki bükümlü elektromanyetik dalgaları bir elektronik mühendisi gözüyle üretmek ve analiz etmektir.

Elektronik mühendisliğinin en temel yapı taşı olan telekomünikasyon hayatın her noktasında zorunlu bir dal olmaya başlamıştır. Telekomünikasyon sadece iletişim, ses iletimi değil bütün görsel, işitsel, sözel verilerin alışverişidir. Radyo sinyallerinden fiber optik veri aktarımına kadar her iletişim teknolojisi telekomünikasyonun kapsama alanına girmektedir. Teknoloji geliştikçe telekomünikasyon da aynı hız ve ölçü de gelişmek zorundadır. Çünkü teknoloji geliştikçe dijitalleşme artmakta, bu alanda hıza ve veri boyutuna olan ihtiyaç da artmaktadır. Normal günlük yaşamda bile kullandığımız teknolojik materyaller hız ve depolama alanı olarak artık yetersiz kalmaktadır. Örneğin daha önce ihtiyaçlarımızı karşılamakta yeterli olan telefon bağlantılı ethernet kablolu ağlar şu an yetersiz kalmakta hatta bazen fiber optik altyapılı ağlar bile ihtiyaca cevap verememektedir. Yine aynı şekilde dijital depolama için kilobayt boyutunda alanlar yeterli gelirken şu an terabayt boyutunda alanlar yetersiz kalabilmektedir. Tüm bu teknolojik gelişmeler zamanla daha fazlasına daha hızlısına olan yönelimi artırmaktadır. Bu artışla son yıllarda telekomünikasyonda farklı teknolojileri deneyerek ihtiyaçlara cevap vermek adına denemeler yapılmaktadır. Bu tez çalışmasının ana konusu olan bükümlü ışıklar da bu denemelerden en popüler olanıdır. Fiber optik telekomünikasyonda bükümlü ışıklar kullanılarak veri aktarım bant genişliği artırılabilir buna bağlı olarak da veri aktarım hızı ve boyutu artırılabilir. Son yıllarda bu konu üzerine birçok bilim adamı ve araştırmacı çalışmakta ve farklı sonuçlar elde etmektedir. Aşağıda bahsedilen çalışma bu çalışmalardan yalnızca biridir.

AB birliği tarafından finanse edilmiş ve 2018’de tamamlanmış bir proje [1] ile bükümlü ışık, optik sistemlerde iletim kapasitesini ve veri merkezlerindeki optik anahtarlar gibi optik bileşenlerin performansını artırmak için kullanıldı. Proje kapsamında, bulut bilişim sistemleri, sosyal ağ, video gibi hizmetlerin veri merkezlerinin performansını etkilemesinden kaynaklı sorunları ele alacak teknik çözümler üzerine çalışıldı. Daha önceki çalışmalarla çok sayıda teknik çözüm ve ağ mimarisi önerildi. Ancak bu sorunlar esas olarak veri merkezi optik bağlantılarının

ve anahtarlarının ölçeklenebilirliğini, bant genişliğini ve güç tüketimini iyileştirmekle ilgili olduğu için yetersiz kaldı. Bu noktada bilim adamları ışığın yörünge açısız momentum (YAM) özelliğini kullanarak fiber optik üzerinden iletilebilen veri miktarını ve veri merkezlerindeki optik anahtarların performansını artırmak için çalıştılar. YAM kırıışı birçok tamsayı değeri alabilen sarmal veya bükülmüş bir dalgaya sahiptir. Proje koordinatörü Prof. Antonella Bogoni “Fotonlar veri taşımak için bir ve sıfır olarak kullanılan geleneksel iletişim sistemlerinin aksine, ışığın YAM değeri sayesinde birçok farklı sarmal moda karşılık gelir ve ek verilerin kodlanmasını sağlar. Bu, YAM parametresinin iletişim sistemlerinin kapasitesini artırma potansiyeline sahip olduğu anlamına geliyor.” diyerek fiber iletim kapasitesini artırmak için bükümlü ışığın çözüm olarak kullanılabilceğini vurgulamaktadır.

Veri aktarım bant genişliğini artırmak teorik olarak kabaca şöyle gerçekleşmektedir; geleneksel fiber optik iletişimde anahtarlama, fotonların “1” ve “0” durumuna göre gerçekleştirilirken, fotonların taşıdığı YAM değerine karşılık gelen birçok farklı tamsayı değeri ile anahtarlama yapılabilir. Çünkü YAM taşıyan ışık (ilerleyen bölümlerde bahsedilecek olan) topolojik yükün (ℓ) aldığı değerlere göre yapılandırılmaktadır. Bükümlü ışık için, ℓ herhangi bir tamsayı değeri alabilir, böylece kırışler daha fazla bilgiyi kodlayabilir. Örneğin, üç optik mod “ $\ell = -1$ ”, “ $\ell = 0$ ” ve “ $\ell = +1$ ” üç kodlama durumu ile bir "qutrit" olarak hareket edebilir [2]. Bu da farklı anahtarlama parametrelerine olanak sağlamaktadır. Anahtarlama parametrelerinin artması ile optik anahtarlama önemli bir hızlanma kazanarak iletişim hızına da etki edecektir. Biraz daha somut bir şekilde ifade edilecek olursa geleneksel dijital iletişimler bilgi taşımak için fotonları “1” ve “0” olarak kullanırken, fotonlardaki iç içe geçmiş bükülmelerin sayısı, “1” ve “0” sayılarının yanına harf eklemeye benzer ek veriler taşımalarını sağlayacaktır [3].

Bükümlü ışık konusunun önemi ve kullanım alanlarının anlaşılması amacı ile gündelik hayatta herkesin muhatap olabileceği telekomünikasyon üzerinden örnekle konu açıklanmaya çalışıldı. Bükümlü ışığın kullanım alanları telekomünikasyon ile sınırlı değildir. Aksine birçok farklı teknolojik alanda kullanılmakta veya kullanımı amaçlanmaktadır. Farklı kullanım alanlarına dair çalışmalar ileride bir başlık altında incelenecektir.

1.1.Yörünge Açısız Momentumu (YAM) Taşıyan Elektromanyetik Dalgalar

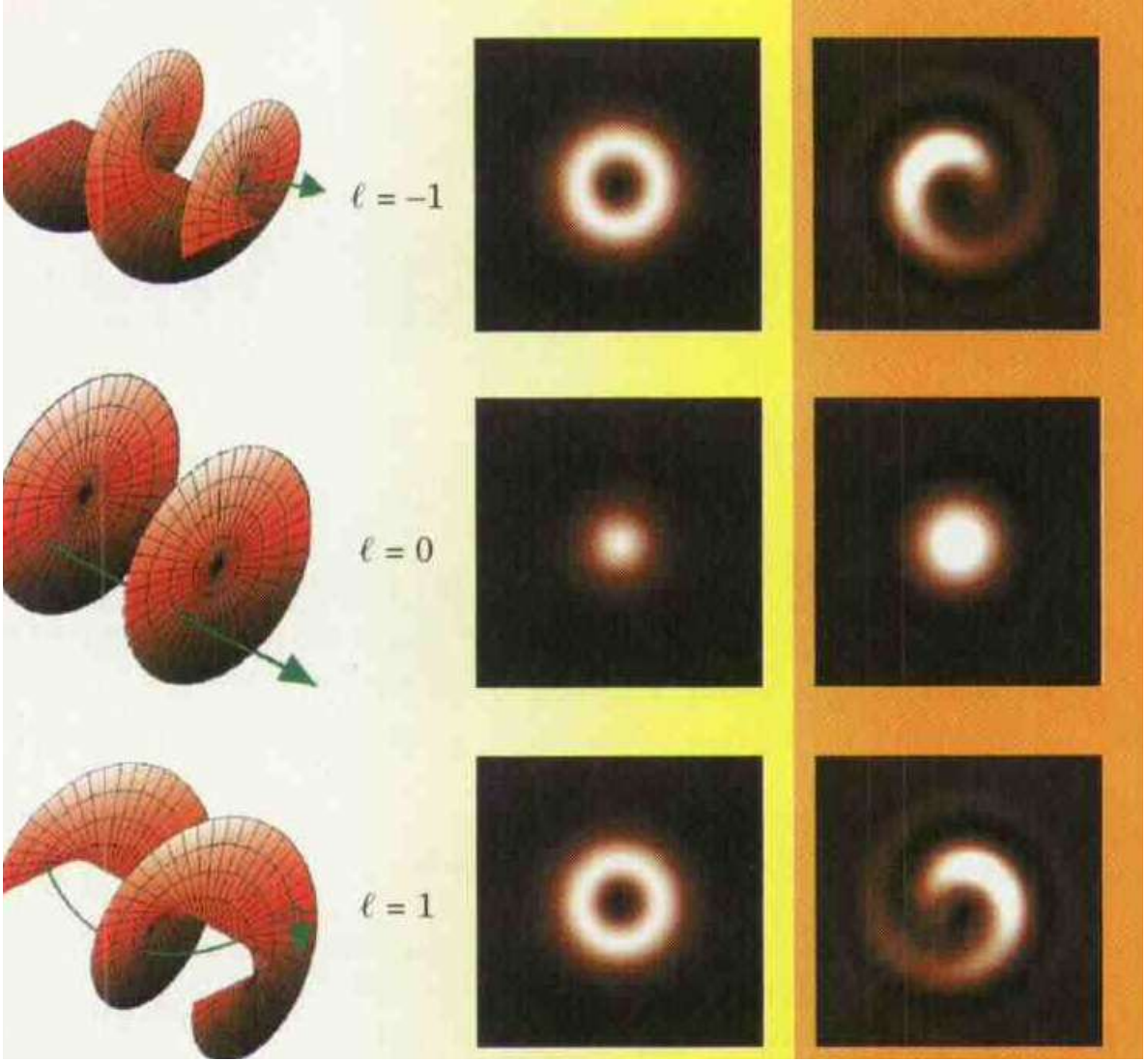
Açısız momentum, doğrusal momentumun dönme eşdeğeridir. Hareket eden bir nesne düz çizgi boyunca doğrusal momentum taşır. Doğrusal hareketinin yanı sıra hareket eden nesne aynı zamanda da dönebilir. Dönen bir nesne aynı anda spin (kendi eksenini etrafındaki dönüş)

açısal momentumu (SAM) ve yörünge açısal momentumu (YAM) taşır. Bu iki momentum bütün elektromanyetik dalgalar için de söz konusu olabilir.

1905 yılında Poynting elektromanyetik radyasyon basıncı ve momentum yoğunluğu adıyla bir teori geliştirmiş, 1921 yılında ise Einstein Planck'ın karacisim yasasının ve bir elektromanyetik radyasyon alanı içerisinde kalan bir molekülün hareketinin ışığın momentumunun $\hbar k$ olmasıyla açıklanabileceğini göstermiştir. Şimdilerde ise doğrudan ışığın lineer momentumu moleküllerin ve atomların tuzaklanması ya da soğurulması için kullanılabilir.

Poynting 1909 yılında ışığın dairesel polarizasyonu ile ortaya çıkan bir spin açısal momentuma sahip olduğunu fark etti. Tek bir fotona karşılık gelen bu açısal momentum değeri $\pm\hbar$ idi. Yaklaşık 80 yıl sonra ışığın aynı zamanda yörüngesel açısal momentum değerine sahip olabileceği ortaya atıldı ki; bu fikir Les Allen'in fikriydi. Allen, polarizasyonun durumundan bağımsız olarak ışığın $e^{-i\ell\phi}$ ile ifade edilebilecek bir azimutal faz bağımlılığına sahip olup, açısal momentum taşıyabileceğini fark etti. Işını bir silindir gibi düşünürsek, ışının dik kesitini oluşturan dairenin açısal koordinatı ϕ olacaktır. ℓ ise tamsayı pozitif ya da negatif değerler olabilir. Bu yörüngesel açısal momentum değeri foton başına $L = \ell\hbar$ olarak tanımlanmıştır. Dairesel polarize bir ışında olduğu gibi, yörüngesel açısal momentumun işareti ışığın ilerleme yönüne göre sağ el kuralı ile belirlenmektedir.

Şekil 1.1.(a)'da görüldüğü gibi, bir ışının YAM'ı spin açısal momentumundan farklı olarak ışının polarizasyonundan bağımsızdır. YAM helikal faz cephelelerinden kaynaklanmaktadır ki, yeşil oklar Poynting vektörü olup, vektörün yönü ışının ilerleme yönü ile aynı değildir. Işın için belirlenecek sabit bir yarıçapta, Poynting vektör eksen etrafında spiral bir yol çizecektir. Her bir ℓ değeri için anlık faz durumuna ait şematik gösterim solda gösterilmiştir. Orta sütunda ışının halkalı bir yoğunluk profiline sahip olduğunu gösteren şekil bulunmaktadır. Bükümlü ışın düzlem dalga ile girişim yaptığında ortaya en sağdaki spiral yapıyı ortaya çıkaran yoğunluk deseni ortaya çıkmaktadır. Spiral kolların sayısı helikal ışının sarmaşık faz cephesinin ℓ değerine eşittir. Helikal faz aşamalı ışınların özelliği eksendeki sıfır yoğunluğa sebep olan faz tekilliğidir. Böylece bu tip ışınların dik kesit yoğunluk desenleri ışığın ne kadar odaklandığından bağımsız olarak halkalı özellik göstermektedir. YAM'ı 3 olan bir ışının helikal kollarının sayısı 3'tür, Şekil 1.1.(b) örnek bir görüntü içermektedir. Bu tarz bir görüntü ancak YAM=3 olan bir ışının düzlem dalga ile girişim deseni oluşturmasıyla ortaya çıkar. Şekil 1.1.(b)'deki YAM değeri pozitifdir. Çünkü ışığın yoğunluğu merkezden sarmalın dışına doğru azalmaktadır. Sağ el kuralına göre bu azalma saat yönündedir.



Şekil 1.1.(a) Üç farklı yörüngesel açısal momentum değeri için faz cephesi, yoğunluk profili ve düzlem dalga ile girişim deseni gösterimleri [4]



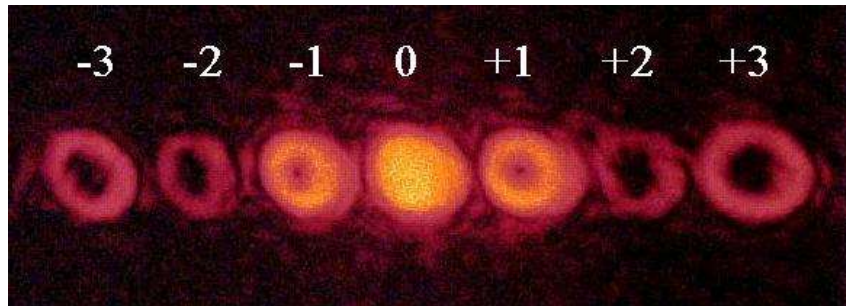
Şekil 1.1.(b) YAM=3 olan bir ışının düzlem dalga ile girişim deseni

Bununla birlikte optik yörüngesel açısai momentum kavramı yeni değildir. Çok kutuplu elektronik geçişler yörüngesel açısai momentum taşıyan ışınım üretebilirler. Fakat bu işlem çok nadir olup birkaç yasak atomik ve moleküler geçişe tekabül eder. Yeni olan şey ise laboratuvar ortamında kuantize yörüngesel açısai momentuma sahip ışık ışınlarının üretilebilmesidir. Bu ışınlar polarize olanlara benzeşik özellikler gösterebilir. Örneğin spin-orbit etkileşimi bu tip ışınlarda gözlemlenebilir.

1.2. Görünür Bölge Elektromanyetik Dalgalar: Optik Vorteks Işınları ve Kullanım

Alanları

Optik Vorteks (bükümlü elektromanyetik dalga) bir elektromanyetik dalganın ilerleme eksenini etrafında bir tirbuşon gibi bükülmesidir. Bu bükülme nedeniyle eksenindeki dalgalar birbirini sıfırlar. Bu yüzden bükümlü bir elektromanyetik dalganın faz cephesinden bir görüntü alındığında, ortasında yoğunluğun sıfır olduğu bir halka meydana gelir [5]. Şekil 1.2, görünür bölgede kırmızı renge denk gelen, yaklaşık 632 nm dalga boyuna sahip bir elektromanyetik dalganın çatal hologramdan geçirildikten sonraki girişim desenini göstermektedir. Desenlerin her biri üzerinde yer alan rakamlar, bükümlü elektromanyetik dalganın özelliklerinden biri olan topolojik yükü (ℓ) temsil eder. Topolojik yük dalganın ilerleme eksenini boyunca tek bir dalga boyu mesafesinde kaç kere kıvrıldığını gösteren bir parametredir. Bükümlü dalga ℓ tane birbirine dolaşmış sarmal faz cephesine sahiptir. Bu kıvrılma elektromanyetik dalganın yörünge açısai momentum taşıdığını ifade eder [6].



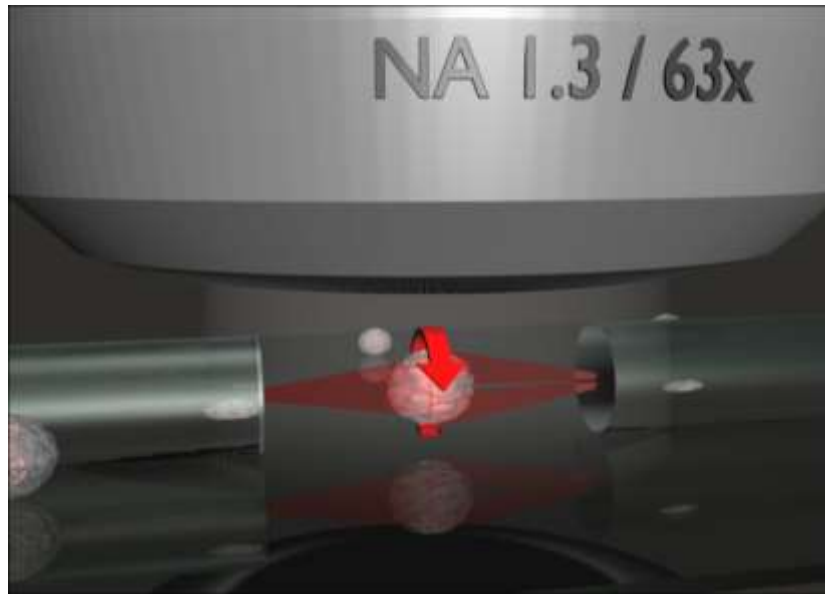
Şekil 1.2. Farklı açısai momentuma sahip bükümlü ışık profilleri. [5]

Görünür bölgedeki ışık ışınları ile ilgili yapılan çalışmalar, ışığın lineer ya da açısai momentum taşıdığına dair önemli tespitleri ortaya koymuştur. Poynting tarafından 1884 yılında ışığın lineer momentum taşıdığına dair bir çalışma yapılmıştır. Daha sonraki süreçlerde de dairesel polarize olmuş bir ışığın açısai momentum taşıdığını gösteren ifadeler türetilmiştir [7].

Işığın yörüngesel açısal momentumunu ve ışığın sarmal özelliklerini veren matematiksel ifade $e^{i\ell\phi}$ olup, üstel fonksiyon ışığın fazına ait bir özelliktir ve ϕ açısı boyunca faz farkının oluştuğunu gösterir. Benzer şekilde, dairesel polarize yani spin açısal momentumu taşıyan bir ışık için spinin açısal momentum değeri $\mp\hbar$ durumunda olduğu gibi, bükülmüş ışık $\mp\ell\hbar$ değerlerini alabilir. Yörüngesel açısal momentum taşıyan ışık, elektrik vektörünün ilerleme eksenini etrafında yaptığı hareketin dairesel bir bükülme hareketine benzemesinden dolayı bükümlü ışık olarak da adlandırılmaktadır [7].

Bükümlü ışık veya optik girdap demeti olarak adlandırılan yörüngesel açısal momentum (YAM) taşıyan ışık için, optik cımbız [8, 9], kuantum şifreleme [10], boşlukta iletişim [11], optik tuzaklama ve soğutma [12, 13] gibi konular tekil optik alanında artan potansiyel uygulamalardır.

1970'lerden itibaren Ashkin ve çalışma arkadaşları lazer ışınlarının mikroskobik manipülasyona ve atomik sistemlere uygulanmasına öncülük etmişlerdir. Optik cımbızlarda, elektrik alanı maksimum olan sıkı odaklanmış bir Gauss ışını parlak bir odak oluşturur. Herhangi bir dielektrik parçacık, onu ışın odağına doğru hareket ettiren bir kuvvete maruz kalır. Işık nedeniyle ortaya çıkan gradyan kuvveti saçılma ve yerçekimi ek kuvvetleri ile ışın odak noktasına yakın tuzak konumunda birleştirilir [8]. Bu şekilde optik cımbız oluşturulur. Kısacası odaklanmış bir lazer ışını ile bir tuzak alanı oluşturulmuş olur. Canlı hücreleri taşımak ya da hapsedmek optik cımbızların kullanım alanlarına birer örnek olarak verilebilir [14]. Bu kullanım alanı biyoloji ve tıp bilimlerinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Şekil 1.3'te biyoloji alanında çalışması yapılmış ve uygulanmış bir optik cımbızın şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 1.3. Optik cımbız şematik gösterimi [15]

Işığın spin ve yörünge açısal momentumu yapılandırılarak bilgi aktarımında enine ek bir kanal oluşturulur ve kanal bant genişliği artırılır. Bilgi iletiminde enine uzaysal serbestlik derecesini kullanmak daha fazla ve hızlı bilgi iletimi, yüksek boyutlu kuantum şifreleme imkanı sunar. [3]

Serbest alan yani boş uzay iletişimde optiklerle veri alış-verişi sağlanırken ışığın spin veya yörünge açısal momentumunun kullanılması enine bant genişliğini artıracığından veri aktarım hızı ve boyutunda artışlar oluşmaktadır.

1.3. Görünür Bölge Bükümlü Elektromanyetik Dalgaların Üretilme Yöntemleri

Optik girdap ışınlarının üretilmesi için bazı farklı deneysel teknikler kullanılmıştır. Spiral faz plakaları [16] ve güvercin prizmaları [17], sabit topolojik yük taşıyan ışık üretme yöntemleridir. Genlik ve fazın dinamik modülasyonuna izin veren uzaysal ışık modülatörleri [18], bilgisayar tarafından oluşturulan hologramların yardımıyla optik girdap desenlerini oluşturmak için kullanılabilir.

Bir optik vorteks elde etmek veya üretmek için holografi denilen teknolojiye dayanılır. Holografi teknolojisi kullanılarak çatal hologramlar oluşturulur ve bu çatal hologramlar uzaysal ışık modülatörlerinde maskeleyici olarak kullanılır. Uzaysal ışık modülatörüne çatal hologram görüntüsü aktarılır ve ışık kaynağı bu maskeden (istediğimiz karanlık ve aydınlık bölgeden) geçirilerek optik vorteks elde edilir.

Bir optik girdap demetinin enine profilinin homojen olmayan özellikleri, bazı yalıtkan mikro partikülleri, atomları ve molekülleri manipüle etmek için güçlü bir araç olarak kullanılabilen optik kuvvet gradyanına yol açar [19]. Teorik açıdan, Laguerre-Gauss ışınları, aksel dalga denkleminin silindirik koordinatlardaki çözümleri olan iyi tanımlanmış optik girdaplardır [20, 21]. Laguerre-Gaussian (LG) kırımlar, çatal-hologram teknikleri [22] kullanılarak oluşturulabilir, ancak elbette teorik ve deneysel olarak elde edilen radyal profiller arasında bazı farklılıklar olabilir.

Bir LG ışınının enine profili, Elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeninin genliğinin (E_0) karesine denk gelir. ℓ elektromanyetik alanın sarmal faz değişimini karakterize eden ışığın topolojik yükü veya yörünge açısal momentumu (YAM) olarak bilinir. Ancak deneysel olarak üretilen LG ışınının YAM değerinin kolay belirlenemediği iyi bilinmektedir. Bu tez çalışmasında asıl amaç optik girdapları üretmek, spotların görüntülerini almak ve YAM değeri bilgisini elde etmek için spotlara görüntü işleme yapmaktır. Çalışmada optik bir teknik ve görüntü işleme tekniği kullanılarak YAM değeri elde edilmektedir.

1.4. Bükümlü Elektromanyetik Dalganın Matematiksel İfadesi

$$\vec{E} = E_0 \frac{C_{\ell,p}}{\sqrt{1+\frac{z^2}{z_R^2}}} e^{-\frac{\rho^2}{w^2(z)}} \left(\frac{\sqrt{2}\rho}{w^2(z)}\right)^{|\ell|} L_p^{|\ell|} \left(\frac{2\rho^2}{w^2(z)}\right) \times e^{-i\omega t} e^{i\ell\phi + ikz - i(2p+|\ell|+1)\tan^{-1}(z/z_R) + i\frac{k\rho^2 z}{2(z^2+z_R^2)}} \hat{x} \quad (1)$$

Denklem 1'deki parametrelerin ayrıntılı tanımları şu şekildedir. $L_p^{|\ell|}$ parametreleri p (radyal düğüm) ve ℓ (topolojik yük) olan Laguerre fonksiyonudur. $w(z)$ ışın sırtı olarak bilinmektedir. Bu parametre ışının radyal profilinde yoğunluğun sıfır olduğu bölgenin kapladığı alanı göstermektedir. $e^{-\frac{\rho^2}{w^2(z)}}$ üstel ifadesi, elektromanyetik dalganın gaussian tipi bir dağılımı olduğunu gösterir. $e^{-i\omega t}$ kompleks üstel terimi frekans ve zaman parametrelerini içermekte olup, dalganın faz yapısının bir parçasıdır. Fiziksel ve matematiksel bir tanım olarak, gerçek bir değişkenin periyodik fonksiyonunun fazı 0 ve 2π arasında açısal bir döngünün tamamlanmasına karşılık gelir. $e^{-i\omega t}$ zamanda periyodik bir döngüyü gösterir. ω açısal frekanstır. $e^{i\ell\phi}$ azimut açısı yönündeki periyodikliği ifade eder. Açısal frekans ve zaman arasındaki ilişkinin benzeri ℓ ile ϕ arasında geçerlidir. e^{ikz} elektromanyetik dalganın ilerleme yönündeki periyodikliğe ait faz tanımıdır. k lineer momentum dalga vektörüdür. $e^{-i(2p+|\ell|+1)\tan^{-1}(z/z_R)}$ ise Gouy fazı olarak bilinmektedir. z_R ışın sırtı ile ilişkili bir parametredir. $e^{i\frac{k\rho^2 z}{2(z^2+z_R^2)}}$ ise eğim fazı olarak adlandırılmaktadır. E_0 dalganın elektrik alan genliğini ifade ederken, $C_{\ell,p}$ ise normalizasyon faktörünü göstermektedir. \hat{x} bu dalgaya ait vektörel yönü temsil eder ve elektrik alanının x yönünde lineer polarize olduğunu gösterir.

1.5. Uzaysal Işık Modülatörü (Spatial Light Modulators-SLM)

Uzaysal ışık modülatörü (SLM), ışığın genliğini, fazını ve polarizasyonunu modüle edebilecek şekilde tasarlanmış yüksek teknoloji cihazlardır. İçerisindeki özel DLP ya da LCD teknolojisi sayesinde ışığı istenilen şekilde modüle ederek yapılandırılmasını sağlar. SLM teknolojisi projektörlerde ve ekranlarda uzun süredir kullanılmaktadır. Bir projektörde görüntü elde etmek için kullanılan çok sayıda optik bileşen bulunmaktadır. Işığı yapılandırmak üzere tasarlanmış bu projektörlerde; ışığın odaklanması, filtrelenmesi, farklı renk ışık kaynaklarının

belli oranlarda LCD/DLP yüzeyindeki görüntünün üzerine düşürülmesi gibi birçok işlem basamağı vardır. Ayrıca LCD/DLP ekranına düşürülen görüntünün hızla yenilenmesi olayı da karmaşık elektronik ve optik mühendislik çalışmalarını beraberinde getirmektedir.

Bu bilgilerden anlaşılacağı gibi, LCD/DLP teknolojisinin ana gayesi ışığı şekillendirmektir. Bir LCD/DLP modülü üzerine doğrudan gönderilen bir lazer ışını modül üzerinde bulunan holografik bir şekilden yansıdığında (ya da içinden geçtiğinde), hologramın fourier uzayındaki görüntüsünü verecektir [23].

Mikro Elektro-Mekanik Sistemlere (Micro-Elektro-Mechanical System–MEMS) dayanan SLM'ler yarı iletken bir çip üzerinde hareketli elemanlara monte edilmiş bir dizi mikro aynadan oluşur. Her bir mikro ayna hem mekanik hem de elektrostatik kuvvet tarafından bağımsız olarak yön değiştirebilir. Örneğin bir mikro aynayı etkileyen bir ışık ışınının yansması mikro aynaya uygulanan elektrostatik kuvveti değiştirerek mikro aynayı hareket ettirmek suretiyle kontrol edilebilir [24]. MEMS tabanlı SLM'ler dijital ekran sistemlerinde birçok uygulamada yenilikçi bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Bir dijital ekran uygulamasında her bir mikro ayna görüntülenen görüntünün bir pikseli ile ilişkilendirilmektedir. Parlak bir piksel üretmek için pikselle ilişkilendirilen mikro aynanın durumu, mikro aynanın yansıyan ışığını görüntülemek için bir hedefe yönlendirilerek ayarlanır. Karanlık bir piksel üretmek için mikro aynanın durumu, mikro aynanın yansıyan ışığını görüntüleme hedefinden uzağa yönlendirecek şekilde ayarlanır. Siyah beyaz bir görüntüyü görüntülemek için, mikro ayna dizisi bir ışık huzmesi ile aydınlatılmaktadır. İstenilen görüntünün piksellerinin parlaklığına bağlı olarak mikro aynaların yansıtıcı durumunu koordine ederek, tüm yansıtılan ışıkların ayrı ayrı mikro aynalardan toplanan etkisi, istenen görüntünün üretilmesidir [24]. Görüntünün kalitesi mikro aynaların ışığı güçlü bir şekilde yansıtmasından kaynaklanmaktadır.

SLM difraktif optik, adaptif optik, optik cımbız, optik bilgi işleme ve holografik projeksiyon gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. SLM kullanmanın avantajları yüksek derecede esneklik, hızlı anahtarlama süresi, yeniden yapılandırma kalitesi ve tekrar üretilebilirliktir [23]. Uzaysal ışık modülatörleri ışık huzmesinin yoğunluğunu yani parlaklığını modüle edebilir, bir giriş ışınını istenilen herhangi bir çıkış ışını şeklinde yapılandırabilir. Bu özelliklerinden dolayı holografik veri depolama merkezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [25].

Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te THORLABS firmasına ait bir uzaysal ışık modülatörünün yine kendi yazılım programına yüklenmiş bir resmi modüle ederek lazer görüntüsünün yansıtılmış hali yer almaktadır.



Şekil 1.4. Görüntünün resim formatı [25]



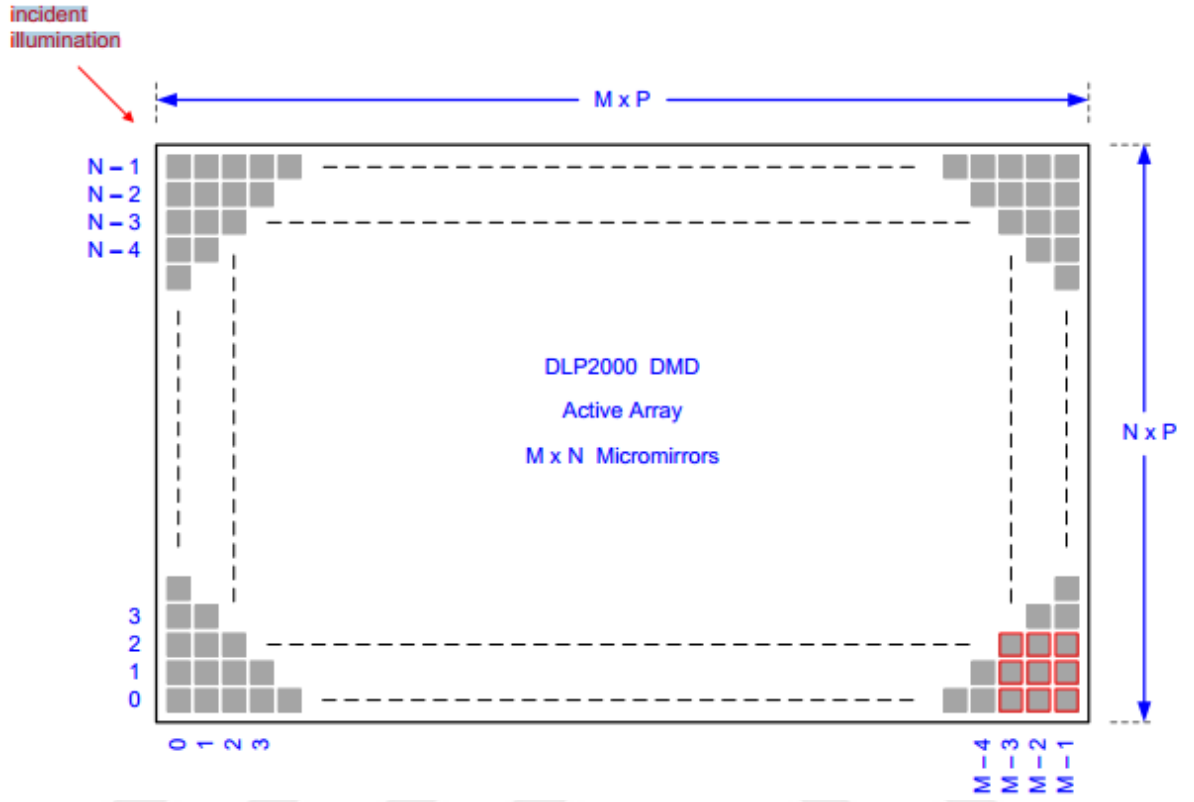
Şekil 1.5. Lazer Görüntüsü [25]

1.6. DLP Teknolojisi ve DMD

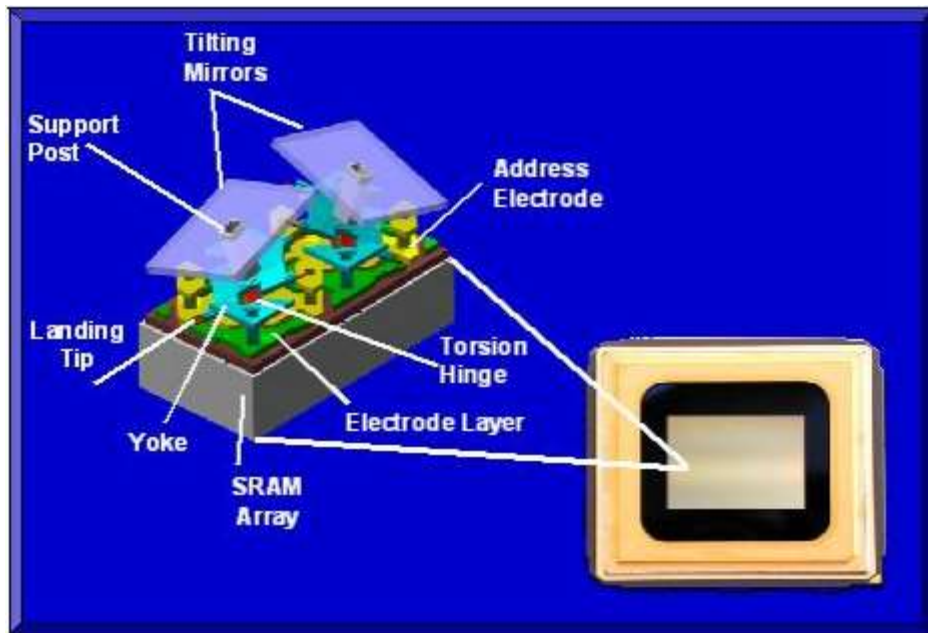
DLP (Digital Light Processing) teknolojisinin açılımı dijital ışık işlemedir. DMD'yi kullanarak optik mikro-elektro-mekanik teknolojiye dayanarak çalışmaktadır. Texas Instruments tarafından icat edilmiş olup şu an ağırlıklı olarak projeksiyon cihazlarında kullanılmaktadır.

DMD (Dijital Micro Mirror Device) olarak adlandırılan dijital mikro ayna cihazı yarı iletken bir çip üzerine matris formatında yerleştirilmiş MEMS sistemiyle mikroskobik hareketler eden yüzbinlerce mikro aynadan oluşan bir cihazdır. Her bir ayna 800x600, 1024x768

boyutlarındaki bir resimdeki her bir pikseli temsil eder. Şekil 1.6’da $M \times N$ sayıda mikro aynanın matris formunda diziliş diyagramı yer almaktadır.



Şekil 1.6. $M \times N$ sayıda mikro ayna [40]



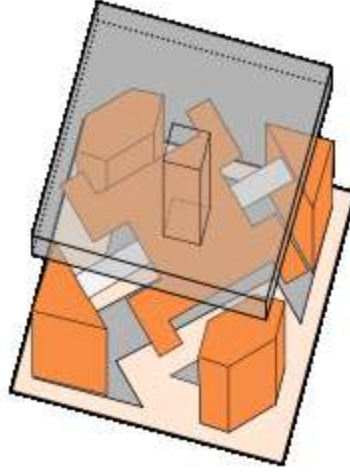
Şekil 1.7. Tipik bir DMD ışığının yanında iki DMD ayna pikselinin şeması [26]

Bu tez çalışmasında mikro aynalar oluşturulan hologramlarla yönetilmektedir. Yani holograma göre aynalar hareket edip optik vortex oluşmaktadır. Hologramdan geçirilen lazer ışını hologramın karanlık ve aydınlık bölgelerine göre mikro aynalara düşmekte, üzerine ışık düşen mikro aynalar hareket edip yansıma işlemini gerçekleştirmektedir. Şekil 1.7'deki şema bu hareketleri sağlayan mekanizmaya örnek olarak verilebilir. Lazerden gelen ışın aynalar üzerinde parlar ve her aynanın lense doğru veya ondan uzağa açılı olmasına bağlı olarak, her piksel açılır veya kapanır. Sonuç olarak aynaların holograma göre hareket ve yansıması ile bükümlü ışık üretilir.

1.7. DMD Çalışma Prensibi

Dijital mikro ayna cihazlarındaki sistem her bir aynanın altında bulunan statik rastgele erişimli bellek (Static random Access memory-SRAM) hücrelerinin lojik durumuna bağlı olarak +12 derece veya -12 derece açıyla dönen optik elektro-mekanik bir sistemdir. SRAM voltajı adres elektrotlarına uygulanır ve elektro statik bir çekim oluşturur. Aynalara bir voltaj darbesi uygulandığında, her bir ayna SRAM verilerine göre yerinde kalır veya hızlı bir şekilde ters durumuna döner. Stabilize edildikten sonra SRAM hücrelerinin durumu aynanın durumunu etkilemeden değiştirilebilir.

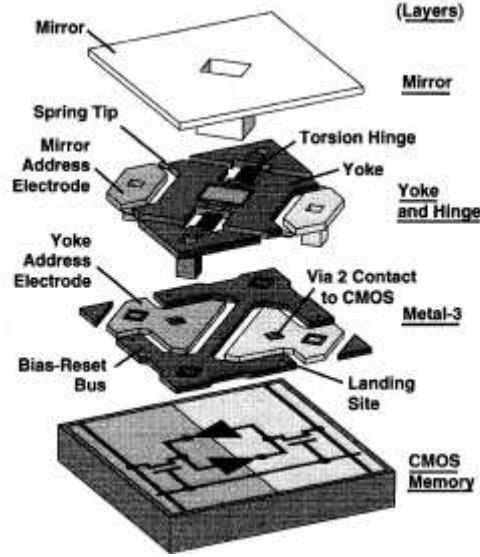
Bir DMD çipinin yüzeyinde, görüntülenecek görüntüdeki piksellere karşılık gelen dikdörtgen bir dizide düzenlenmiş birkaç yüz bin mikroskobik ayna vardır. Aynalar ayrı ayrı $\pm 10-12^\circ$ olarak açık veya kapalı duruma döndürülebilir. Açık durumda, projektör ampulünden gelen ışık objektife yansıtılır ve piksel ekranda parlak görünür. Kapalı durumda, ışık başka bir yere (genellikle bir soğutucuya) yönlendirilir ve pikselin koyu görünmesini sağlar. Aynaların kendileri alüminyumdan yapılmıştır ve yaklaşık 16 mikrometredir. Her ayna, uyumlu burulma menteşeleri ile iki destek noktasına bağlanan bir eksen üzerine monte edilir. Bu menteşe tipinde, eksen her iki ucuna sabitlenir ve ortada bükülür [27]. Küçük ölçekli olmasından dolayı menteşe yorgunluğu sorun değildir ve testler 1 trilyon (10¹²) işlemin bile gözle görülür hasara neden olmadığını göstermiştir. Testler ayrıca menteşelerin DMD üst yapısı tarafından emildiğinden normal şok ve titreşimden zarar göremediğini göstermiştir [28]. Şekil 1.8'de burulma yayı alt soldan sağa doğru (açık gri) ve aşağıdaki bellek hücrelerinin elektrostatik pedleri (sol üst ve sağ alt) ile asılı eksen üzerine monte edilmiş aynayı gösteren dijital bir mikro aynanın diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Dijital bir mikro aynanın diyagramı [27]

İki çift elektrot, aynanın konumunu elektrostatik çekimle kontrol eder. Menteşenin her iki tarafında bir çift elektrot vardır, çiftlerden biri eksen üzerinde hareket etmek için konumlandırılmıştır ve diğeri doğrudan aynaya etki eder [29]. Aynaları hareket ettirmek için, öncelikle elektrotlara bağlı olan her pikselin altında bulunan bir SRAM hücresine gerekli durum yüklenir. Tüm SRAM hücreleri yüklendikten sonra, ön gerilim gerilimi kaldırılarak, aynayı hareket ettirerek SRAM hücresinden gelen yüklerin hâkim olmasına izin verilir. Ön gerilim geri yüklendiğinde, ayna bir kez daha konumunda tutulur ve bir sonraki gerekli hareket bellek hücresine yüklenebilir.

Ayna, alttaki bellek hücresi ve ayna iskeleti arasındaki elektrostatik çekimin bir sonucu olarak döndürülür. Ayna ve çatal (yoke) bir ön gerilim ve reset gerilimine bağlanır. Adres elektrotları altta yatan (Complementary Metal Oxide Semiconductor) CMOS belleğine kontaklar aracılığı ile bağlanır. Aynaların hareketi ayna altındaki belleğe “1” ve “0” olarak aktarılır. Şekil 1.9’da belleğe ulaşan katmanların ayrıntıları verilmiştir. Uygulanan ön gerilim voltajı sonucunda oluşan elektrostatik alan farkına göre aynanın hareketi sağlanmış olur. Aynanın ilk konumuna gelmesi için kısa reset pulse uygulanır ve aynanın ön gerilimle voltajı kaldırılır [28]. Bu işlemler her bir piksel yani her bir mikro ayna için tek tek yapılır.



Şekil 1.9. Bir DMD pikselinin genişletilmiş görüntüsü [28]

DMD mikro ayna için optik anahtarlama şu sıralama ile gerçekleşmektedir: Bir ayna açıldığında, aydınlatma kaynağından ışığı projeksiyon merceğinin giriş gözüne doğru yönlendirir. Her ayna yaklaşık 20 μ s içinde “açık” dan “kapalı” ya geçer. Ancak, projeksiyon merceğinin giriş gözbebeği göz önüne alındığında, optik geçiş süresi 2 mikro saniye seviyesindedir. Aynaların maksimum modülasyon oranı (elektronik tarafından belirlenir) 180 Hz'dir. Aynaların yapışmaması için “açık” durumda harcanan maksimum süre 19 ms'dir. Aynaların optik anahtarlama zamanları tarafından belirlenen ikili darbe genişlik modülasyonu, mikro aynaların "açık" ve "kapalı" zamanlarının oranını değiştirerek gri tonlamayı sağlamak için kullanılır. Her iki pozisyonda da sadece 19 ms veya daha az kalmalarına izin verilir, böylece her gri seviyede sürekli çevrilirler, ancak görev döngüsü neredeyse sıfırdan %100'e çıkar. Böylece, orta-gri bir değer (piksel değeri = 128) elde etmek için, ayna zamanın yarısı için “açık” ve diğer yarısı için “kapalı” konuma getirilir ve mevcut ışığın yarısını çıkış merceğinin giriş camı üzerinden gönderilir. 0 ila 255 arasındaki dijital piksel gri tonlama değerlerine karşılık gelen toplam 256 farklı açma / kapama oranı kombinasyonu mevcuttur [30].

1.8. Elektromanyetik Dalga Kaynağı Olarak Lazer

Lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation-Laser) aynı dalga boyuna sahip ve aynı fazda ilerleyen fotonların birleşiminden oluşan bir elektromanyetik dalgayı ifade eder. Bir lazer ışını yayınımlı sırasında ilerleme ekseninden dışarıya doğru çok az bir sapma yapar. Bu da lazer ışınının uzun mesafelerde doğrusal bir çizgi üzerinde ilerlemesine olanak

sağlar. Diğer tür ışınımlarda ise faz uyumluluğu ya da dalga boyundaki farklılıklar ışının tek bir çizgide ilerlemesini engeller. Bir elektromanyetik dalga için polarizasyon, dalga boyu (frekans), genlik temel parametrelerdir. Bununla birlikte ışığın ilerlemesi ile ilgili ve dalga cephesi ile ilişkili faz özellikleri de önem arz etmektedir. Bu noktada ışığın sinüzoidal ya da kare dalga olarak ilerleme yönünde farklı türlerde periyodikliği bulunabilir. Hatta piko saniye ya da mikro saniye mertebelerinde bir elektromanyetik dalga puls(darbe) şeklinde de üretilebilir. Lazeri diğer ışık kaynaklarından ayıran özellik lazer ışınının uyumlu (koherent) olmasıdır yani fotonları uyumlu bir huzme şeklinde oluşturmasıdır. Femto saniye cinsinde ultra kısa darbeler üretilebilir [31].

Lazerin temeli atom, molekül ya da band enerji düzeyleri arasındaki elektron geçişleri ile oluşan ışık fotonlarına dayanır. Bir atomun $E_2 > E_1$ olacak şekilde iki enerji düzeyi olsun. Minimum enerji ilkesine göre atom veya moleküller düşük enerji seviyesinde olmak istediklerinden E_2 seviyesindeki elektron kendiliğinden E_1 seviyesine inecektir. Bu sırada enerjisi $E_2 - E_1$ olan bir foton salar. Eğer elektron geçişi sırasında açığa çıkan elektromanyetik salınım kendiliğinden gerçekleşirse fotonun yönü rastgele olur, bu elektromanyetik yayılım gelişigüzel (spontan) ışımaya olarak adlandırılır. Ancak eğer E_2 düzeyindeki elektron $E_2 - E_1$ enerjisindeki başka bir fotonla etkileşerek E_1 düzeyine inerse bu şekilde salınan fotonun yönü ve fazı geçişe etki eden fotonla aynı olacaktır. İşte bu tür geçişe uyarılmış ışımaya denir ve lazerin çalışmasının ana ilkesidir. Uyarılmış ışımada çıkan foton asıl foton ile uyumlu yani koherenttir. Bu, iki fotonun aynı frekans, faz ve polarizasyona sahip olduğunu ifade eder. Bu şekilde birçok foton bir araya gelerek ışık huzmesi oluşur ve lazer elde edilmiş olur [31].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deney Düzeneginde Kullanılan Materyaller

2.1.1. Lazer, THORLABS NPL64A

Deney düzeneginde ışık kaynağı olarak Thorlabs firmasının ürettiği nanosaniye darbeli diyot lazer kullanılmıştır. Dalga boyu 640 nm (kırmızı ışık) tercih edilmiştir. Lazer, düzeneğe dahil edilirken sinyal jeneratörü aracılığı ile tekrarlama frekansı 8 MHz, darbe genişliği (genliği) 4Vpp olarak ayarlanmıştır.

NPL64A'nın Teknik Özellikleri:

- 405 nm'den 980 nm'ye kadar merkez dalga boyu seçenekleri.
- Sabit veya ayarlanabilir darbe genişlikleri.
- 10 MHz'e kadar tekrarlama oranları.
- Ayarlanabilir boş alan çıkışlı kompakt lazer sistemi.

2.1.2. SLM, LG PH300-GL

SLM olarak 640x360 çözünürlükte DLP2000 DMD ekran kullanıldı.

2.1.3. Optik Mercek

Bükümlü ışığı CCD kamera ekranına kayıp olmadan düşürebilme amacı ile odaklama yapan optik mercek kullanıldı.

2.1.4. CCD Kamera

Karanlık ortamda kurulan deney düzeneginde bükümlü ışığı kaydedebilmek için düşük ışık koşullarında iyi performansından dolayı 480 piksel çözünürlükte CCD kamera kullanıldı.

2.1.5. Mathematica 12

Laguarre Gaussian fonksiyonu ile hologramları oluşturmak için simgesel matematik yazılımı Mathematica 12 kullanıldı.

2.1.6. Visual Studio 9

$\ell = 1$ ile $\ell = 10$ arasında topolojik yük değerlerine sahip noktaların toplam yoğunluğu elde ettiğimiz Şekil 3.7'deki grafik yoğunluk profillerinin ayrı ayrı görüntü işleme sonucunda verdiği değerlerin toplamından oluşmaktadır. Bu değerler kaydedilirken ve görüntü işleme yapılırken görsel sonuçlar da sunabilen yazılım programı Visual Studio 9 kullanıldı.

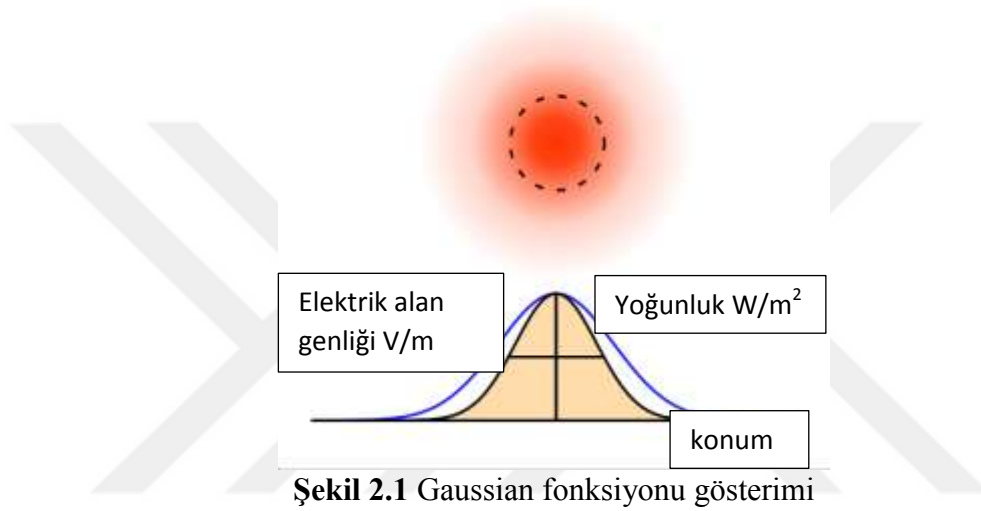
2.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında deneysel olarak elde edilen görünür bölgedeki bükümlü elektromanyetik dalgalar için kullanılan yazılımlar, optik deney düzeneği ve görüntü analizi için gerekli kamera sistemi ile görüntü işleme yazılımları bulunmaktadır. Çalışmanın iyi bir şekilde sonuçlanabilmesi için aşağıdaki basamakların tamamlanması gerekmektedir:

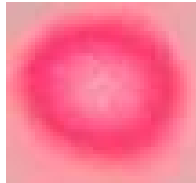
- İyileştirilmiş bir lazer spotu elde edilmesi,
- Matematiksel olarak elde edilmiş bir çatal hologramın yüksek çözünürlüklü bir resim formatına dönüştürülmesi,
- Bu hologramın kendi elde ettiğimizi DLP tabanlı bir uzaysal ışık modülatörüne (SLM) aktarılması,
- Lazerin uygun bir şekilde konumlandırılarak, DLP tabanlı SLM üzerine gönderilmesi ve girişim desenlerinin elde edilmesi,
- Girişim desenleri içerisinde bizim için uygun olan bükümlü elektromanyetik dalga spotunu izole ederek kameraya gönderilmesi,
- Kamera görüntülerini yüksek çözünürlüklü resim formatı olarak kaydedilmesi,
- Bu resimlerin görüntü işleme tekniği ile analiz edilerek teorik olarak elde edilen bükümlü elektromanyetik dalga sonuçları ile karşılaştırılması.

2.2.1. İyileştirilmiş Lazer Spotu

Yarıiletken diyotlar tarafından üretilmiş bir lazer ışını istenilen düzeyde olmayabilir. İdeal bir lazer spotu Şekil 2.1'deki gibi merkezden dışarı doğru yoğunluğu azalan bir gaussian fonksiyonunu vermelidir. Bu tarz bir gaussian dağılımını elde etmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden bir tanesi, ışığın odaklanması ve bir pin hole (iğne deliği) den geçmesini sağlamaktır. Pin hole uzaysal eş fazlılığı sağladığı gibi, ışığın kaynaktan çıkarken ya da yol boyunca uğradığı bozulmayı da ortadan kaldıracaktır.



Şekil 2.2. (a) Pin hole'den geçirilmiş ışık spotu

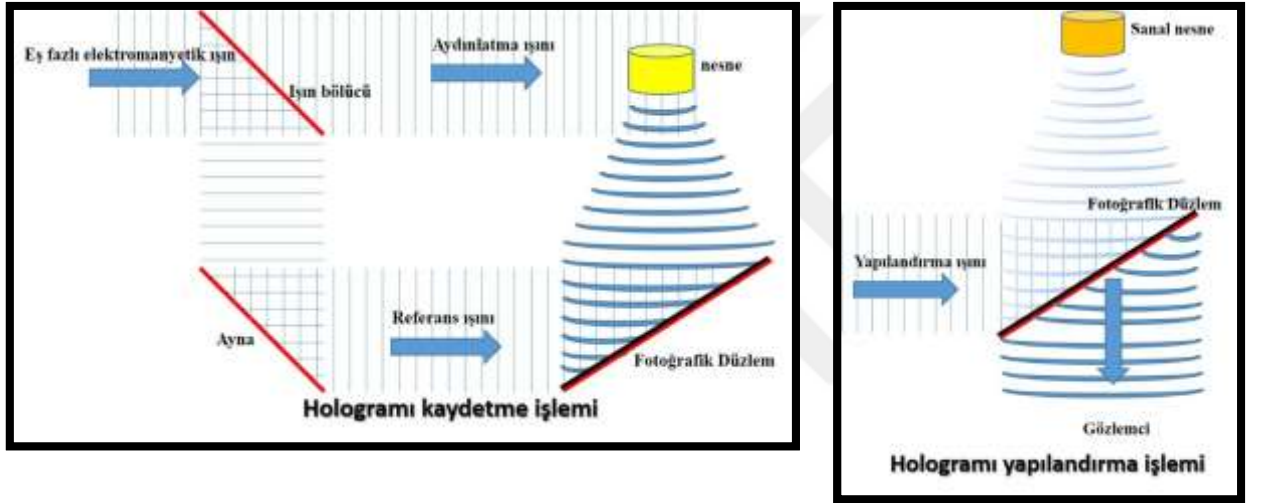


Şekil 2.2. (b) Pin hole'den geçirilmemiş olan ışık spotu

Şekil 2.2'de pin holden geçirilmemiş resimde merkezde maksimum yoğunluk, dış tarafa doğru yoğunluğun gaussian fonksiyonu şeklinde azaldığı bir daire görünmektedir.

2.2.2. Hologram ve Holografik Maske Üretimi

Holografi bir nesneden saçılan ışının kaydedilmesine ve bu ışının tekrar yapılandırılmasına olanak sağlayan bir tekniktir. Kaynak, düzenli bir yoğunluk dağılımına sahip ve rengi sabit olan bir lazer ışını olduğunda, mikroskobik girişim desenleri bir düzlem, film ya da fotoğrafik bir ortama kaydedilir. Bu teknik lazer holografisi olarak adlandırılır. Bu teknikte lazer ışını Şekil 2.3'ten de görüleceği üzere ikiye ayrılır. Bu ışıklardan biri nesne ışını iken diğeri referans ışınıdır. Nesnenin konumu düzlemin diğer tarafından nesnenin görülebileceği şekilde olmalıdır. Nesneden saçılan ışınlar düzlem üzerine geldiğinde, referans ışınları ile girişim deseni oluştururlar.



Şekil 2.3. Hologramı oluşturma ve hologramdan sanal görüntü elde etme işlemleri

Holografinin temelinde yatan fiziğin anlaşılabilmesi girişim ve kırınımın anlaşılmasına bağlıdır. Girişim, birden fazla dalga cephesinin üst üste binmesi ile elde edilebilir. Kırınım ise dalga cephesinin nesne ile karşılaşması sonucu ortaya çıkar. Birbirini takip eden yani tekrarlayan desenlerin oluşturduğu yapıya kırınım ızgarası adı verilir. Üzerinde düzgün ve düzenli yarıkların yer aldığı bir metal düzlem kırınım ızgarasına örnek olarak verilebilir. Bir ızgara üzerine yönlendirilen elektromanyetik dalga 7-8 farklı dalgaya ayrılır ve kırınıma uğrayan dalgaların yönleri ızgaradaki yarıklar arasındaki boşluğa ve dalga boyuna bağlı olur.

Çift yarık deneyi bu durumun daha az karmaşık bir örneğidir. Bu durum için, aynı kaynaktan çıkan iki düzlem dalganın holografik bir kayıt ortamına üst üste bindirilerek aktarılması basit bir hologram örneğidir. Şekil 2.4'te çift yarık deneyi ile elde edilmiş girişim desenleri gösterilmiştir. İki dalga girişim yaparak düz-çizgisel püskül şeklinde (karanlık ve

aydınlık) desenler ortaya çıkar ve bu desenlerin yoğunluğu kayıt ortamı boyunca sinüzoidal bir değişim gösterir.



Şekil 2.4. Girişim desenleri

Girişim desenlerinin arasındaki mesafe ışığın dalga boyu ve iki dalganın ilerleme eksenleri arasındaki açı ile ilişkilidir. Kaydedilen ışık deseni bir kırınım ızgarasıdır. Bu kayıtlı kırınım ızgarası, kullanılan ışıklardan bir tanesi ile aydınlatılırsa, bu durumda kullanılan ikinci ışığın ortaya çıkmasına sebep olur. Bu anlamda, kaydedilen ışık desenlerine holografik kayıt adı verilir. [32].

Bu tez çalışmasında bilgisayar destekli holografi (CGH) adı verilen teknik kullanılarak hologramlar üretilmiştir. Hologramlar matematiksel ifadelerin görüntüye dönüştürülmesiyle elde edilir. Bilgisayar tarafından oluşturulan holografik maskeler için analitik ifade, iki üstel fonksiyonun girişimi olarak tanımlanabilir. Girişim denklemi;

$$\mathcal{X}_T = |\mathcal{X}_1 + \mathcal{X}_2|^2 \quad (2)$$

Burada birincil fonksiyon;

$$\mathcal{X}_1 = e^{ikx} \quad (3)$$

ifadesidir ki, bu ifade elektromanyetik dalganın düzlem dalga formunu yansıtır. İkincil fonksiyon ise;

$$\mathcal{X}_2 = e^{i\ell\phi} \quad (4)$$

ifadesidir ki, bu ifade elektromanyetik dalganın ilerleme yönü eksenini etrafında helical bir dönüş gerçekleştirdiğini gösterir. Lineer momentum ile ilişkili olan k parametresi, x yönünde ışığın dalga vektörüne denk gelir. Aynı mantıkla ℓ ifadesinin de ışığın azimutal yönde dalga vektörüne denk geldiğini ve açısal momentum ile ilişkili olduğunu söyleyebiliriz. Denklem ikide yer alan eşitliği tekrar düzenleyecek olursak girişim desenine ait eşitlik

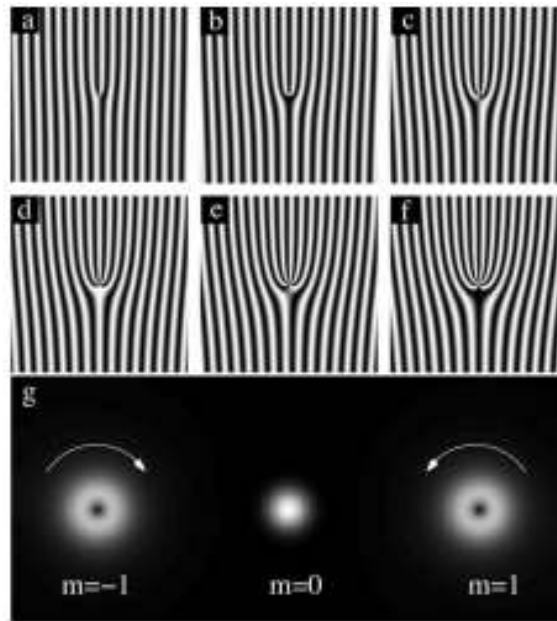
$$\mathcal{X}_T = 2[1 + \cos(kx - \ell\phi)] \quad (5)$$

şeklinde olur. Bu eşitlikte amacımız dalga cephesinde radyal profili Gauss fonksiyonu ile ifade edilen elektromanyetik dalga için $e^{i\ell\phi}$ ile azimutal yönde bir faz farkı oluşturmaktır. Böylece bilgisayar tarafından oluşturulan holografik maskeler, referans düzlem dalgası $\mathcal{X}_1 = e^{ikx}$ ve tekil faz taşıyan bir nesne dalgası $\mathcal{X}_2 = e^{i\ell\phi}$ 'ın girişimi ile oluşturulacaktır [33]. Bu oluşturulan hologram, deneyde kullanılan referans dalgayı içeren Gauss ışını yani lazer ile aydınlatıldığında çıkış ışınında uzak alan Fraunhofer kırınım desenleri (girdap ışını) oluşur [33]. Burada ℓ topolojik yüküdür. Bu yüzden çıkış ışını yapılandırılmak istendiğinde ℓ değeri değiştirilir. ℓ negatif ve pozitif tam sayı değerleri alabilir. Negatiflik ve pozitiflik girdap ışınının yani optik vortexin faz dağılımının yönünü belirleyen parametredir. “+” optik vortexin saat yönünde “-” ise optik vortexin saat yönünün tersine döndüğünü belirtir. Gauss ışını;

$$\mathcal{X}_G = e^{-r^2/w_0^2} \quad (6)$$

şeklinde verilir. $\mathcal{X}_G\mathcal{X}_T$ fonksiyonunun Fourier ile elde edilecek olan ışığın yoğunluğunu verir.

$$I = F[\mathcal{X}_G\mathcal{X}_T] = F[e^{-\frac{r^2}{w_0^2}} |e^{ik_x x} + e^{i\ell\phi}|^2] \quad [33] \quad (7)$$



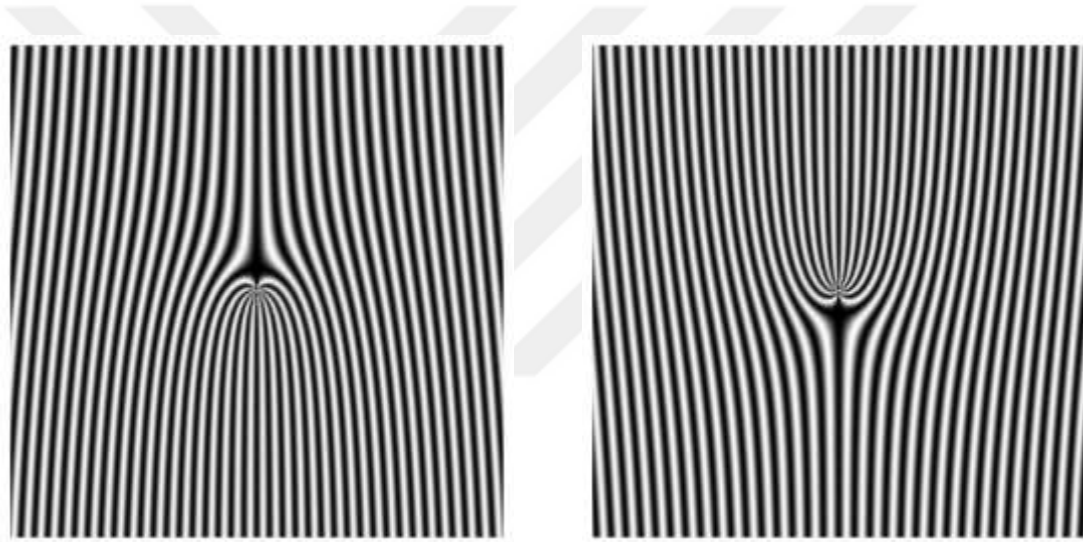
Şekil 2.5. Hologram görüntüsü ve sadece $\ell = 0, \pm 1$ için ışığın radial profili

Şekil 2.5 (a)-(f) arası ℓ topolojik yükünün 1-6 değerleri arasındaki hologram görüntüsüdür, (g) ise Denklem 7'deki I fonksiyonunun $\ell = 0, \pm 1$ değerleri için oluşturulmuş radyal profil sonucudur [36].

Denklem 5 ile verilen matematiksel eşitliğin Mathematica'ya aktarılması ve eşitliğe ait çizilen figür Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de gösterilmiştir.

```
m = -10
tab2 = Table[2 (1 + Cos[k x - m ArcTan[x + .001, y]]), {y, -max, max, dx}, {x, -max, max, dx}];
fig2 = ListDensityPlot[tab2, Axes -> False, Frame -> False, ColorFunction -> GrayLevel, ImageSize -> 1000]
```

Şekil 2.6. Denklem 5'in Mathematica'da oluşturulmuş matematiksel eşitliği



Şekil 2.7. $\ell = \pm 10$ için elde edilmiş hologramlar

2.2.3. Görüntünün Uzaysal Işık Modülatörüne Aktarılması

Tez çalışmasında, DLP tipi mikro-ayna düzeneğine sahip olan bir projeksiyon cihazı SLM olarak kullanılmak üzere modifiye edilmiştir. DLP ile kullanılan lazer düzeneği arasında yer alan fiziksel optik bileşenler iptal edilmiştir. Bunun dışında kalan projeksiyona ait tüm fiziksel bileşenler ve bilgisayarla iletişimi sağlayan bağlantı üniteleri muhafaza edilmiştir. Mathematica programı ile oluşturulan hologramlar, bilgisayardan DLP ekranına bu şekilde aktarılabilmekte ve istenilen hologram ekrana yansıtılabilmektedir. Bu dinamik hologramlar üzerine gönderilen lazer ışınları Denklem 6'da verilen eşitliğe göre yapılandırılmakta ve lazerin DLP'den yansıması hedeflenen YAM değerine sahip bükümlü ışığı vermektedir.

2.2.4. Görünür Bölgedeki Bükümlü Elektromanyetik Dalganın (Optik Vortex) Üretilmesi ve Görüntülenmesi

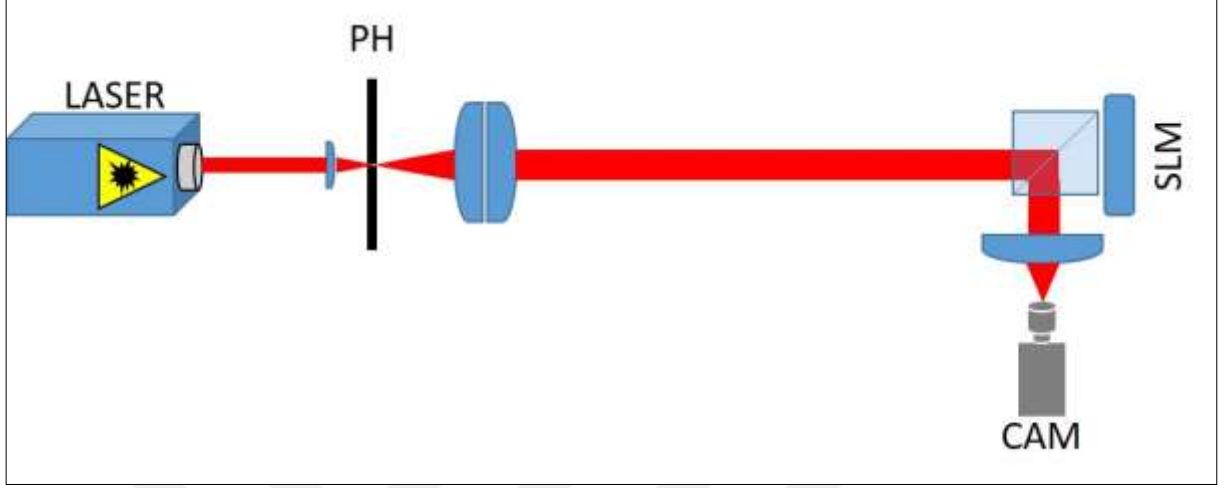
Deneysel olarak üretilmiş herhangi bir optik girdap ışınının teorik olarak Denklem 1 ile tanımlanabileceği iyi bilinmektedir. Basit bir teknik olarak, bilgisayar tarafından oluşturulan hologramlar, optik girdap desenlerini üretmek için oldukça etkilidir. Genel eğilim, iletilen ışığın yoğunluk profilini modüle etmek ve ayarlamak için sıvı kristal ekranları kullanmak olsa da [34], hızlı yenileme oranları ve genlik modülasyon özellikleri avantajları nedeniyle DMD ekranları kullanma imkânı vardır [35, 36]. Şekil 2.8.(a)'da şematik olarak gösterilen bu deneyde, bilgisayar tarafından oluşturulan holografik maskeler elde etmek için her iki farklı teknik de (DMD ve LCD ekranlar) kullanıldı ve bir deney düzeneği ortaya koyuldu.

Şekil 2.8'de, SLM, sıvı kristal ekran (LCD) tabanlı uzaysal ışık modülatörü (SLM) cihazını ifade eder. LCD-SLM üzerindeki pikselleri bilgisayar tarafından ayarlamak ve holografik faz veya genlik maskeleri kullanılarak lazer ışınının dalga cephesini tasarlamak mümkündür [34].

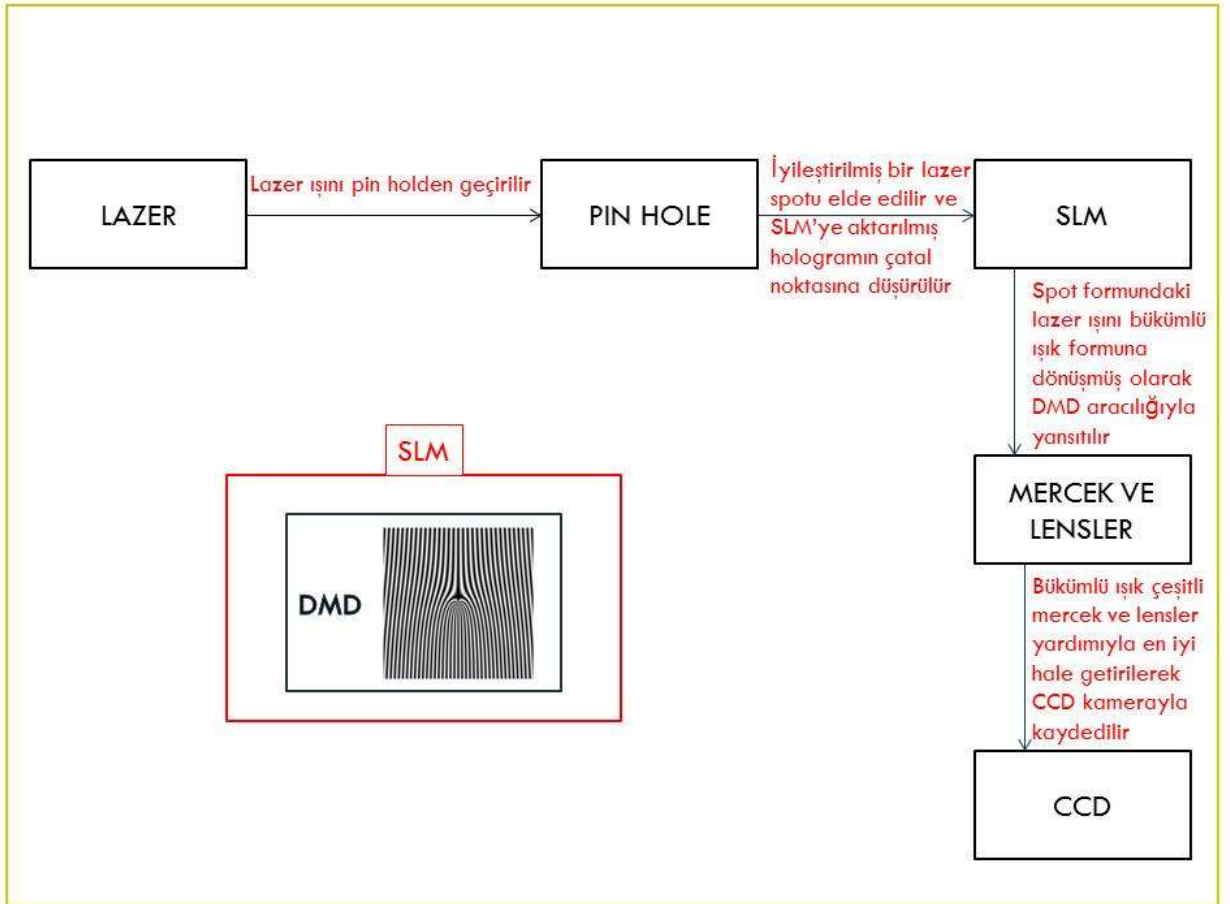
Bu çalışmada ilk deney düzeneği olarak daha hantal bir sistem kuruldu. Bu sistemde hologramlar fotoğraf filmlerine basıldı ve lazer ışını bu fotoğraf filmlerindeki çatal noktalarına düşürüldü. Çatal noktalardan geçen lazer ışını perdeye bükümlü ışın olarak yansıdı. Bu sistem ayarlanması güç hantal bir sistemdi. Çünkü farklı topolojik yük değerlerine sahip kalıpları görmek için her defasında düzenekteki hologram basılı filmlerin değiştirilmesi gerekmekteydi. Bu sebeplerden ötürü çalışmanın son halinde yer alan CGH tekniği ile kurulmuş deney düzeneğine geçildi ve bu sistem ile çalışıldı.

Optik girdap modellerinin üretimi ve görüntüsü için deneysel kurulum 632,8 nm ile 1 mW He-Ne lazer kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 2.8.(a)'da gösterilen PH ve CAM, iğne deliğini ve CCD kamerayı temsil eder. Işın ayırıcı ve lensler diğer unsurlardır. Şekil 2.8.(a)'da şematik olarak gösterilen deney düzeneğinin ayrıntısından bahsedilecek olursa, sırasıyla düzenek kurulumu şöyledir: İlk adım olarak Mathematica programı kullanılarak çatal hologramlar oluşturulur. Oluşturulan çatal hologramlar bilgisayar aracılığı ile SLM'ye yani SLM içerisinde bulunan DMD ekranına yüklenir. Spot formundaki lazer ışını iğne deliğinden geçirildikten sonra SLM'ye aktarılan çatal hologramın merkez noktasına düşürülür. Merkez noktasına düşürülen lazer ışını hologramdan geçerek yörüngesel açısal momentum kazandırılmış bükümlü ışığa dönüşür ve yine DMD ekran aracılığı ile CCD kameraya yansıtılıp kaydedilir. CCD kameraya kaydedilmeden önce optik mercekler yardımıyla bükümlü ışık odaklanır. Bütün işlem

basamakları Şekil 2.8.(b)'de blok şema ile verilmiştir. Son aşama olarak da elde edilen görüntüler yani ışığın radyal profil görüntüleri üzerinde görüntü işleme teknikleri uygulanarak ışığın YAM'nın özellikleri hakkında yorumlar yapılır.

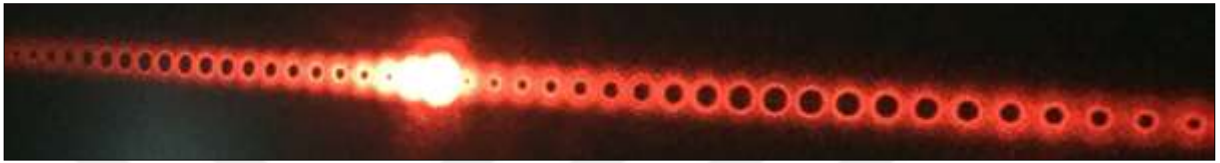


Şekil 2.8. (a) Deney düzeneği



Şekil 2.8. (b) Deney düzeneğine ait blok şema

Lazer ışığının dalga boyu sabit tutularak (burada 632,8 nm), maskelerin topolojik yük (ℓ) değeri değiştirilmektedir. SLM üzerine yansıtılan çatal hologramlar kullanılarak oluşturulan optik girdap modellerinin elde edilen enine profilleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Şekil 2.9'da $\ell = -12$ 'den $\ell = 12$ 'ye kadar topolojik yük değerlerine sahip tüm kalıpları görmek mümkündür. Analitik ifadeler ve karşılık gelen maske resimleri Mathematica yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen maske resimlerinin birkaçı Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Çatal hologramdaki koyu saçaklar arasındaki çizgi genişliği, bir kırınım elde etmek için dikkatlice ayarlanmalıdır.



Şekil 2.9. $\ell = -12$ 'den $\ell = 12$ 'ye kadar topolojik yük değerlerine sahip tüm optik girdap desenleri

Yalnızca holografik maskeler üretmek için değil, aynı zamanda görüntü işleme yapmak için de Mathematica, optik deneyle elde edilen herhangi bir görüntüyü işlemek ve analiz etmek için çok kullanışlı bir araçtır. Bazı çalışmalar, kirişin profilini enine düzlemde ve yayılma yönlerinde analiz etmek için çaba göstermiştir [37-39]. Burada, radyal yönde yoğunluk dağılımı arasındaki ilişkiye odaklanıldı ve ışığın radyal profili hakkındaki bilgilerin, ışığın YAM'ının özelliklerini gösterebildiği iddia edildi.

2.2.5. Girişim Desenlerinden YAM Değerine Sahip Uygun Işığı Elde Etme

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi uygun bir çatal hologramın DLP üzerine aktarılması ve lazer ışınlarına maruz bırakılması sonucunda girişim desenleri elde etmek mümkündür. Dalga boyu 532 nm olan bir lazer ışınının DLP üzerinde oluşturulmuş çatal hologramdan yansması sonucu elde edilen girişim desenleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Şekil 2.10'daki halka tipi spotlar bükümlü ışıkları göstermektedir. Elde edilen girişim desenlerinden en uygun olanı seçilir ve Şekil 2.11'deki gibi ayarlanabilir bir pin holeden geçirilebilir.



Şekil 2.10. 532 nm dalga boyu girişim desenleri



Şekil 2.11. Pin hole

Herhangi bir desenin ışığın ilerleme yönündeki (“z” yönü) yayılımı bir lazer ışını gibi değildir. Lazer ışını “z” yönünde çok az bir sapmaya(divergence) uğrarken, desenlerden her biri bu yönde ıraksar ve desenler arasındaki mesafe de açılır. Şekil 2.10’da görüldüğü gibi, desenler mükemmel bir spot şeklinde değildir. Deney sırasında kullanılan optik bileşenlerle spotların simetrik ve mükemmel birer halka haline getirilmesi mümkündür.

2.2.6. Yüksek Çözünürlüklü Resim Formatı

Bu tür bir resim formatı doğrudan lazer spotunun kamera üzerine düşürülmesi ile mümkün olmaktadır. Özellikle CCD kameralar bükümlü ışık tarzındaki bir ışımaya tepki verecek şekilde tasarlanmıştır. Yüksek çözünürlük görüntü işleme için önemli parametrelerden bir tanesidir.

3. BULGULAR

Görünür bölge elektromanyetik bir dalganın radyal profili uygun bir CCD kamera yardımıyla kaydedilebilmektedir. Aslında radyal profilden kasıt bir cihette dalga cephesidir. Bir lazer ışınının geliş yönüne dik olarak konulan kamera, lazerin dalga cephesine ait net görüntüyü elde edecektir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken birkaç husus vardır.

- Kameraya giren lazer ışınının yoğunluğu, kamera içerisinde bulunan mikro yarıiletken piksellerin algılama bölgesi dışında olabilir. Bu durumda gelen lazer ışınının yoğunluk derecesi ek optik bileşenlerle (polarizör ya da filtreler) ayarlanmalıdır.
- Kamerada oluşan görüntünün, dalga cephesinin ayna görüntüsü olduğu unutulmamalıdır.
- Görüntünün kalitesi ve çözünürlüğü kamera içerisinde bulunan mikro yarıiletken piksellerin sayısına bağlıdır. Ayrıca her bir piksel yarıiletken üzerine düşen ışığın yarıiletkeninde bir fotoakım oluşturduğu ve bu akımın şiddetine göre 0 ila 255 sayıları arasında dijital bir değer o piksel değeri olarak atandığı bilinmelidir. Yani elde edilen fotoğraf bilgisayara aktarılmadan önce bile dijital bir veri formatındadır. Bu durumun tespiti termal bir kamerada söz konusu değildir.
- Her ne kadar desenler birbirinden ayrılmış olsa bile, desenler arasında da optik etkileşimler söz konusudur. Yani iki farklı desen arasında yeni girişimler oluşabilir. Tamamıyla izole bir ışık spotu elde etmek oldukça zordur.
- Bununla birlikte bu çalışmadaki hedef, mükemmel ya da tam izole bir spot elde etmek değildir. Işığın radyal profilindeki değişimi gözlemek ve teorik modele uygunluğunu test etmek öncelikli hedeftir.

3.1 Radyal Işın Profiline Elde Edilmesi

Mükemmel bir bükümlü ışık spotunu elde etmenin basit bir deney düzeneği ile mümkün olmadığı ifade edildi. Bununla birlikte hassas bir düzenek ve uygun laboratuvar ortamı sağlandığı takdirde bükümlü ışık girişim desenleri mükemmel yakın sonuçlar verebilmektedir.

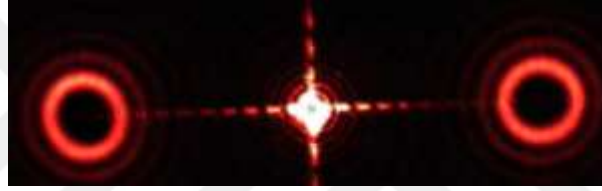


Şekil 3.1. $l = 1$ için optik girdap desenleri



Şekil 3.2. $\ell = 1$ bükümlü ışın spotu radyal profili

Şekil 3.1 YAM değeri $\ell = 1$ olan çatal hologramdan elde edilmiş bir girişim desenini göstermektedir. Şekil 3.2 ise sağdan ikinci desenin büyütülmüş halidir. Elde edilen profillerin mükemmel yakın olduğunu gösteren diğer bir parametre ise oluşan Fresnel halkalarıdır. Şekil 3.3'te $\ell = 1$ için elde edilmiş bükümlü ışığın Fresnel halkaları gösterilmiştir.



Şekil 3.3. $\ell = 1$ için optik girdap desenleri

Şekil 3.4'te YAM değeri $\ell = 9$ olan bir çatal hologramdan elde edilmiştir.

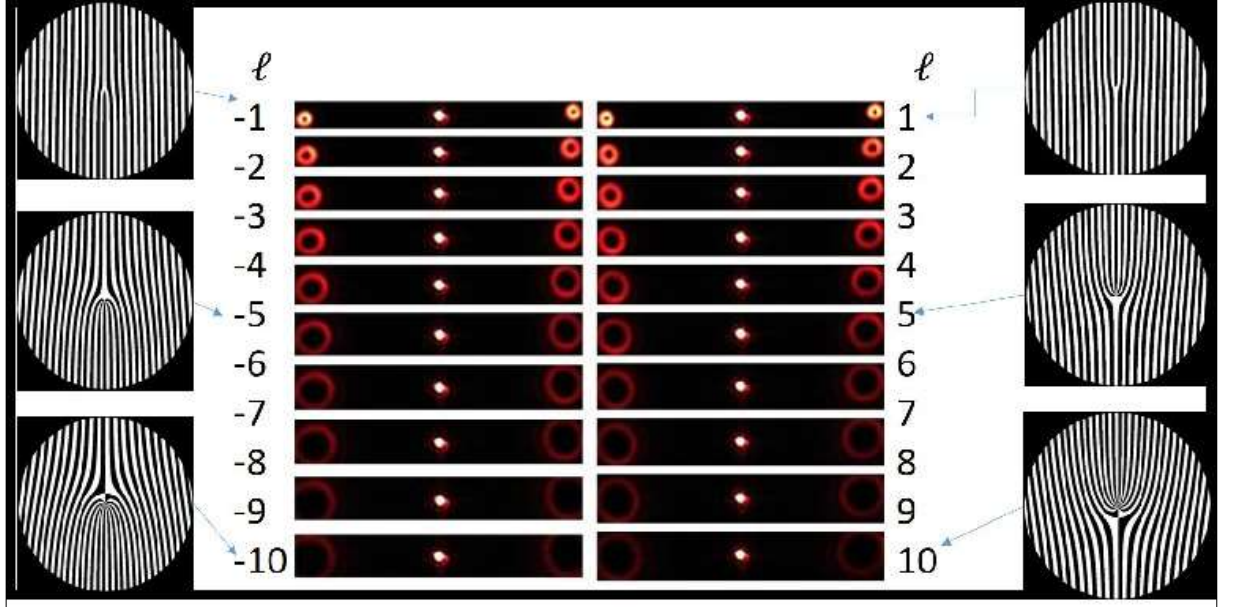


Şekil 3.4. $\ell = 9$ için optik girdap desenleri

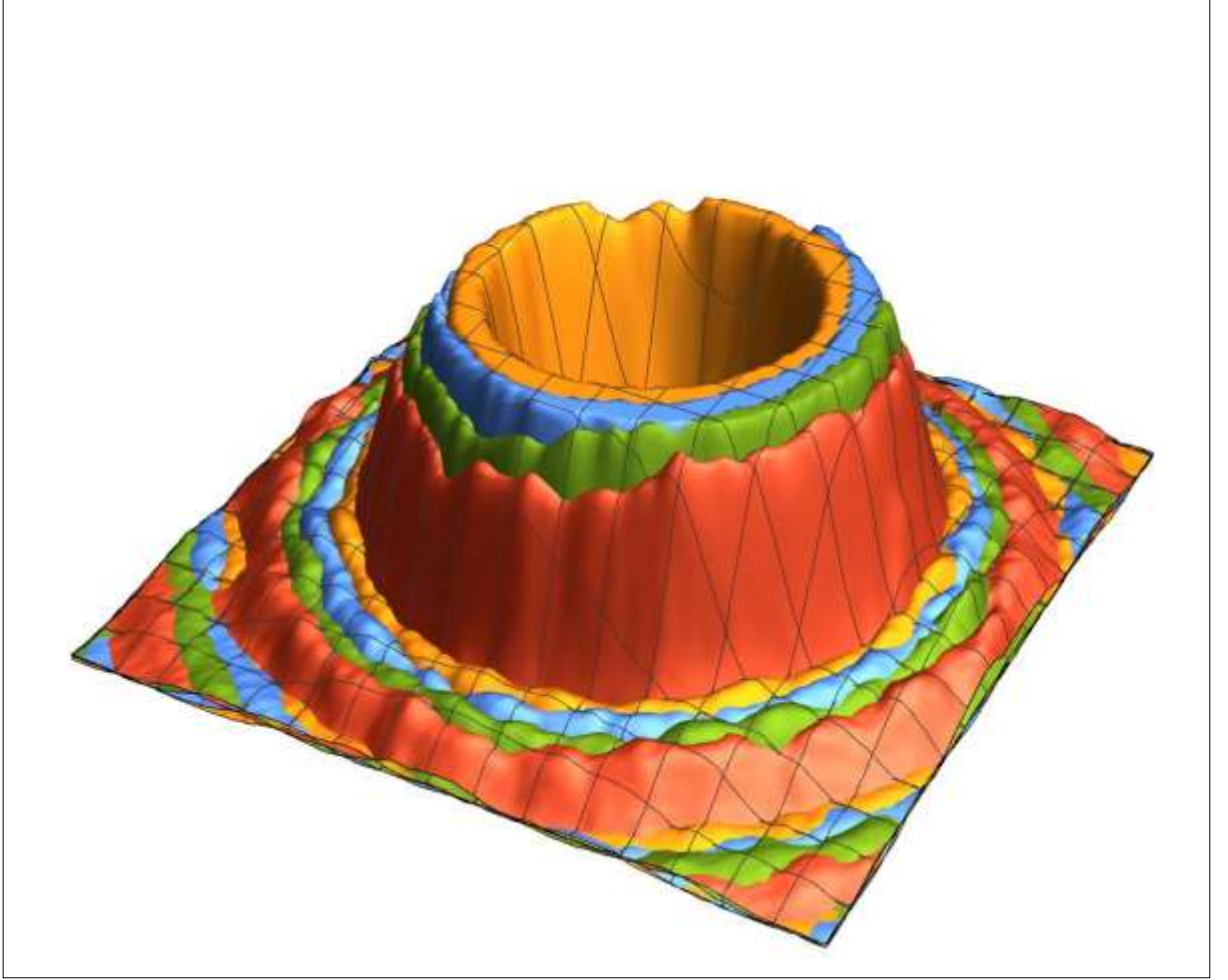
3.2 Radyal Işın Profilinin Analizi

Bu çalışmada, $-10 < \ell < 10$ arasındaki topolojik yük değerleri alınarak holografik maskeler üretildi. Çatal hologram tekniği nedeniyle, $\ell = 1$ durumunda bile, ekranda farklı değerlerine sahip birçok optik girdap deseni gözlemlenebilmektedir. Şekil 3.5, holografik maskeleri ve karşılık gelen birinci dereceden optik girdap modellerini göstermektedir. Her ℓ değeri için, ortadaki noktanın radyal profili, lazer kaynağı tarafından üretilen orijinal lazer

noktasınıkiyle aynıdır. Halka veya halka şeklindeki profil, orijinal spotun her iki tarafında da kolayca görülebilir. Halkanın yarıçapı, topolojik yükün değeri ile artmaktadır. İki ışının girişimi girdap ışınlarının özelliklerini anlamak için bir teknik olabilir. Ancak burada amaç, görüntü işleme tekniklerini kullanarak ışınları analiz etmektir. SLM üzerine yansıtılan çatal hologramlar kullanılarak elde edilen $\ell = 1$ için optik girdap desenleri Şekil 3.5 de verilmiştir, $\ell = -10$ 'dan $\ell = 10$ 'a kadar topolojik yük değerlerine sahip tüm örüntüleri görmek mümkündür



Şekil 3.5. $\ell = -10$ 'dan $\ell = 10$ 'a kadar optik girdap desenleri

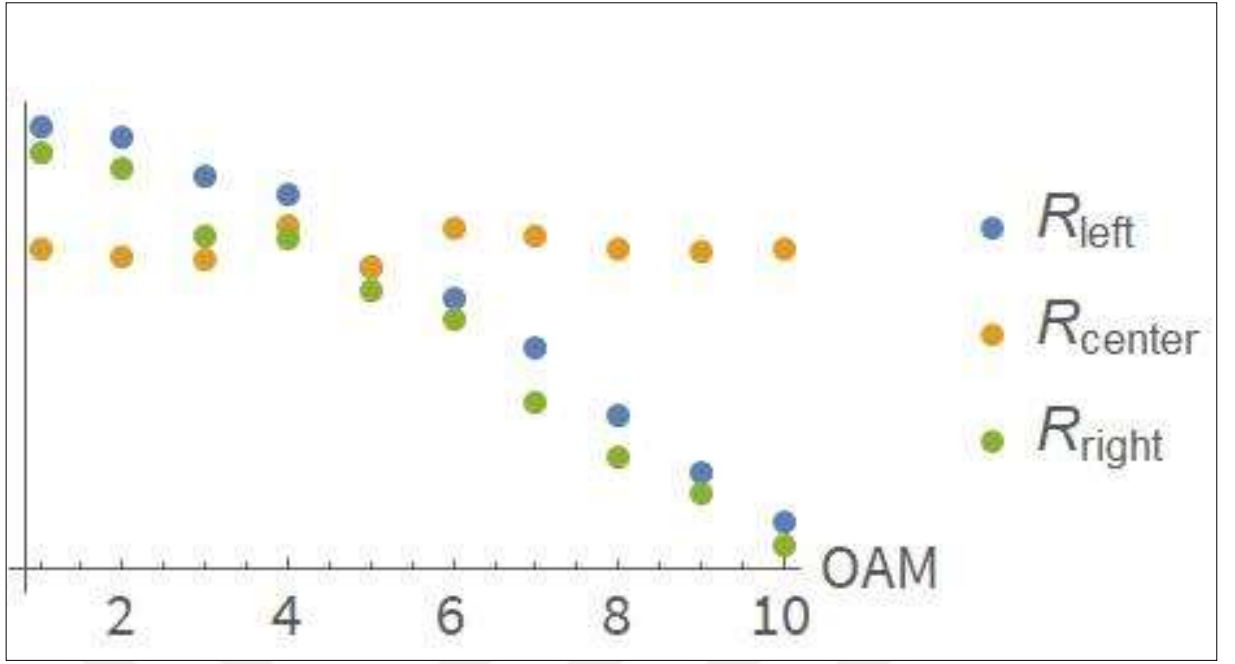


Şekil 3.6. $\ell = 7$ ila $\ell = 10$ arasında topolojik yük değerlerine sahip noktaların 3B profilleri

Görüntü işleme tekniği kullanarak noktaların 2B görüntüleri ve optik girdapların 3B radyal profiline radyal yönde salınımı görülebilir. Bu salınım, radyal düğüm p'nin (bkz. Denk. 1)

sıfırdan farklı olduğunu gösterir. Bu terim, $\left(\frac{\sqrt{2}\rho}{w^2(z)}\right)^{|\ell|}$ Denklem 1'de, YAM değerindeki artışla

halka şeklinin karanlık bölgesinin genişlemesini gösterir. Şekil 3.6, bu açılımı ve Denklem 1'in tüm özelliklerini göstermektedir.



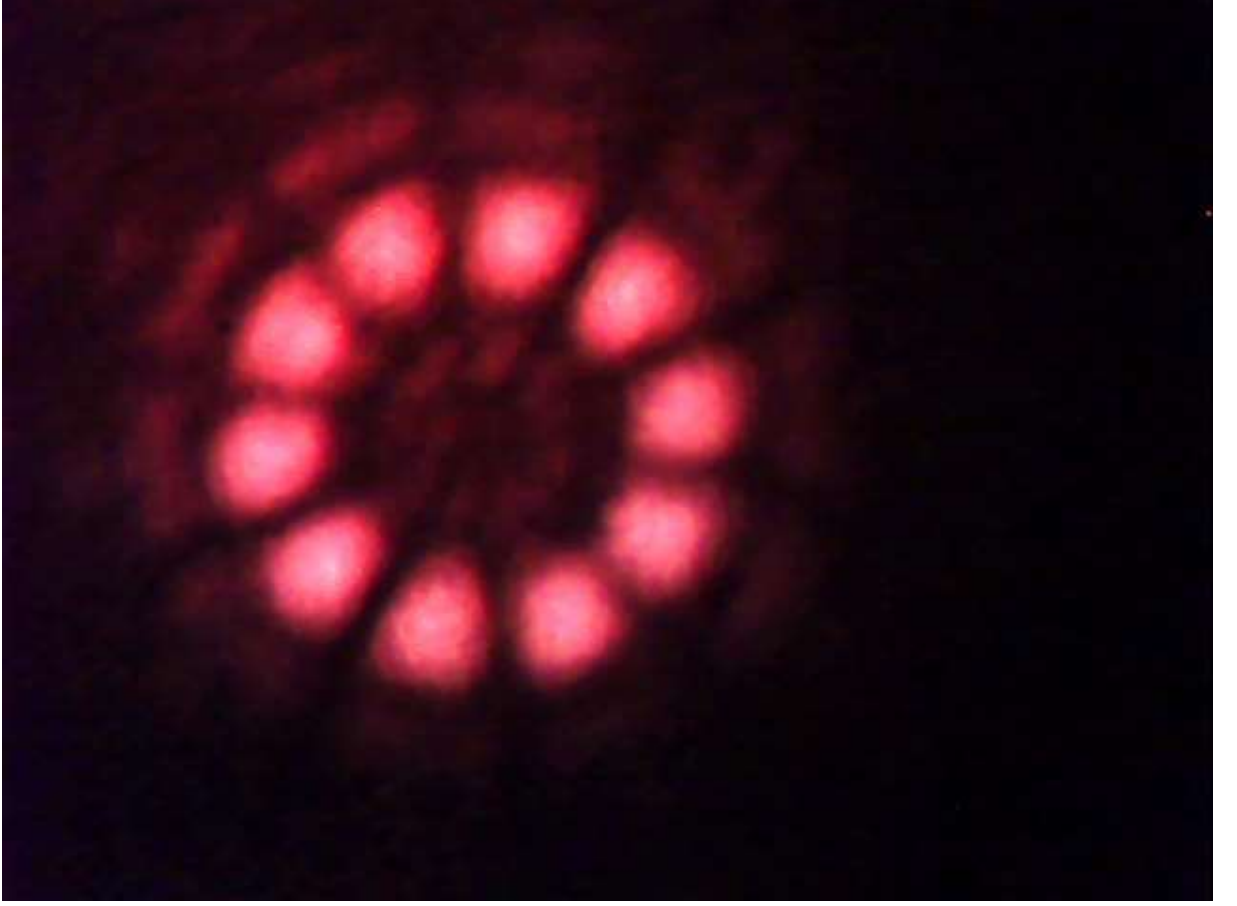
Şekil 3.7. $\ell = 1$ ile $\ell = 10$ arasında topolojik yük değerlerine sahip noktaların toplam yoğunluğu

Ayrıca, farklı YAM değerlerine sahip noktalar arasındaki herhangi bir değişikliği anlamak için toplam yoğunluğu elde etmek de mümkündür. Şekil 2.5'te halka şeklindeki noktaların ortasındaki parlak noktalar her zaman $\ell = 0$ 'ı göstermektedir. Şekil 3.7'de "R_center" olarak adlandırılan sarı işaretler bu parlak noktaların toplam yoğunluk değerlerini göstermektedir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi merkezi noktaların toplam yoğunluk değerleri sabit bir değer etrafında salınım yapmaktadır. Ancak merkezi noktaların sol (R_sol) ve sağ (R_sag) tarafındaki noktaların toplam yoğunluk değerleri YAM'ın artmasıyla azalmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi girişim desenleri bu noktalarla sınırlı değildir. Daha düşük YAM değerleri için ilk iki nokta merkezi noktadan daha parlak, daha yüksek YAM değerleri için, merkezi nokta diğerlerinden daha parlaktır.

Görüntü işlemenin bir sonucu olan Şekil 3.7, başka bir şekilde analiz edilebilir. Optik veya elektronik cihazlar vasıtasıyla ışığın YAM veya spin açısız momentum değerinin tespiti optik teknikleri kullanan herhangi bir yöntem durumunda çok önemlidir. Işığın YAM değerini tanımlamak için optik tekniğe bir örnek olarak, iki karşıt yayılan ışık demeti kullanılarak üretilen noktanın görüntüsü alındı. Şekil 3.8'de, sayı lobların iki katı YAM değeri verecektir. Bu şekilden YAM'ın $\ell = 5$ olduğu doğrudan tahmin edebilir. Ancak bu teknik tek ışıklı uygulamalarda kullanışlı değildir.

Şekil 3.7'deki sonuç, elektronik alet vasıtasıyla ışığın YAM değerinin elde edilmesine bir örnek olarak kullanılabilir. Çünkü bu sonuç bir dijital kamera kullanarak elde edildi ve sinyalleri

sayısal değerlere donüştürüldü. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, toplam yoğunluk değeri YAM’ın artmasıyla azalmaktadır. Bu, elektronik bir cihazla ışığın YAM’ını belirlemenin bir yolu olduğu anlamına gelir.



Şekil 3.8. İki karşı-yayılan bükülmüş ışığın yoğunluk kalıpları

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yüksek Lisans süresince birçok deney ve bu deneylere ait sonuçlar incelenmiştir. Örneğin 532 nm lazer ışınları ile yapılan deneyler sonucunda, profili kaydetmek için kullanılan kameraların bu tip bir dalga boyuna oldukça hassas ve uzun süre maruz kaldığında zarar gördüğü tespit edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı bu tez çalışmasında elde edilen bütün sonuçlar yer almamaktadır. Tezde yer alan 633 nm lazer ise çalışmalarımız içerisinde bize en güvenilir sonuçları veren ve deney düzeneği ile uyumlu olan elektromanyetik dalga olma özelliğini göstermiştir.

633 nm lazer ışınlarının profil görüntüleri kameralar vasıtasıyla kaydedilmiştir. Kamera ile kaynak arasına yerleştirilen ve Mathematica programı yardımıyla elde edilen hologramlar kendi tasarladığımız DLP aygıtına başarıyla aktarılmıştır. Tez çalışmasının en önemli basamaklarından bir tanesi elektromanyetik dalgaların uzaysal profilini kontrol edebilen bir cihazın tasarlanmasıdır. Lazer ışını, üzerinde dinamik hologram yer alan DLP'ye gönderildiğinde yansıyan ışınların hologram şekline göre açısal momentuma sahip bükümlü ışınlarla dönüştüğü gözlenmiştir. Kaliteli bir bükümlü ışığın elde edilmesi ise optik cihazların doğru konumlandırılmasına bağlıdır.

Görüntü işleme tekniği kullanılarak bükülmüş ışığın yörünge açısal momentumunun değerinin elde edilebileceği gösterildi. Işığın toplam radyal yoğunluğu, YAM'ın artmasıyla azalmaktadır. Toplam yoğunluk arasında mükemmel bir ayırım olmaması durumunda bile $-\ell$ ve $+\ell$ değerlerinde, referans değer olarak merkezi noktanın toplam yoğunluğunun ($\ell = 0$) YAM'ın tüm değerleri için sabit bir değere sahip olduğu açıkça görülmektedir. Sağ ve sol taraftaki noktaların toplam yoğunluğu, merkezi noktaya göre değişmektedir. Bu sonuç, YAM değerinin görüntü işleme ile belirlenebileceğini gösterir.

Yüksek çözünürlüklü resim formatında kayıt altına alınan bükümlü elektromanyetik dalgaların profil görüntülerine ait yoğunluk dağılımları C# dili kullanılarak Visual Studio 2019 programında görüntü işleme teknikleri ile incelenmiştir. Teoride hesaplanan yoğunluk dağılımları deneysel olarak da doğrulanmıştır.

5. KAYNAKLAR

- [1] <https://cordis.europa.eu/project/id/645361/results> (Erişim tarihi: 25.01.2022)
- [2] <https://physics.aps.org/articles/v11/125/> (Erişim tarihi: 25.01.2022)
- [3] <https://digitalisationworld.com/news/52775/twisted-light-could-illuminate-new-path-for-wireless-communications> (Erişim tarihi: 25.01.2022)
- [4] Padgett M, Courtial J, Allen L. 2004. Light's orbital angular momentum. *Physics today*, 57 (5): 35-40.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_vortex/ (Erişim tarihi: 08.10.2021)
- [6] Öncan M, 2015. Moleküler Nano Yapılara Ait Elektrodinamik Özelliklerin Ultra Hızlı-Bükümlü Lazer Işınları İle Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis.
- [7] Koç F, 2016. Bükümlü ışıkların nanoboyutlu yarıiletken ve moleküler yapılardaki kuantum elektron dinamiği üzerindeki etkisi. Doktora Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis.
- [8] Padgett M, Bowman R, 2011. Tweezers with a twist. *Nature photonics*, 5 (6): 343-348.
- [9] Otte E, Denz C, 2020. Optical Trapping Gets Structure: Structured Light for Advanced Optical Manipulation. *Applied Physics Reviews*, 7 (4): 041308.
- [10] Sit A, Fickler R, Alsaiani F, Bouchard F, Larocque H, Gregg P, Yan L, Boyd RW, Ramachandran S, Karimi E, 2018. Quantum Cryptography with Structured Photons through a Vortex Fiber. *Optics Letters*, 43: 4108-4111.
- [11] Shao W, Huang S, Liu X, Chen M, 2018. Free-space Optical Communication with Perfect Optical Vortex Beams Multiplexing. *Optics Communications*, 427: 545-550.
- [12] Ashkin A, 1997. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94 (10): 4853-4860.
- [13] Ng J, Lin Z, Chan C, 2010. Theory of Optical Trapping by an Optical Vortex Beam. *Physical Review Letters*, 104 (10): 103601.
- [14] Doğar M, 2014. A real-time digital holographic microscope with an optical tweezer. Doctoral Dissertation, Sabancı University Institute of Engineering and Natural Sciences, İstanbul.
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_tweezers/ (Erişim tarihi: 20.12.2021)
- [16] Ruffato G, Massari M, Romanato F, 2014. Generation of High-order Laguerre–Gaussian Modes by Means of Spiral Phase Plates. *Optics Letters*, 39: 5094-5097.

- [17] Gonzalez N, Molina-Terriza G, Torres JP, 2006. How a Dove Prism Transforms the Orbital Angular Momentum of a Light Beam. *Optics Express*, 14: 9093-9102.
- [18] Ostrovsky AS, Rickenstorff-Parrao C, Arrizon V, 2013. Generation of the “Perfect” Optical Vortex Using a Liquid-crystal Spatial Light Modulator. *Optics Letters*, 38: 534-536.
- [19] Ma Y, Rui G, Gu B, Cui Y, 2017. Trapping and Manipulation of Nanoparticles Using Multifocal Optical Vortex Metalens. *Scientific Reports*, 7: 1-9.
- [20] Koksall K, Lembessis VE, Yuan J, Babiker M, 2019. Interference of Axially-shifted Laguerre–Gaussian Beams and Their Interaction with Atoms. *Journal of Optics*, 21: 104002.
- [21] Koksall K, Lembessis, Yuan J, Babiker M, 2020. Atoms in Axially Shifted Tightly Focused Counter-propagating Beams: The Role of The Gouy and Curvature Phases. , 37: 2570-2577.
- [22] Bekshaev A, Orlinska O, Vasnetsov M, 2010. Optical Vortex Generation with a “Fork” Hologram Under Conditions of High-angle Diffraction. *Optics Communications*, 283 (10): 2006-2016.
- [23] <https://www.netinbag.com/tr/technology/what-is-a-spatial-light-modulator.html/> (Erişim tarihi: 14.11.2021)
- [24] Huibers AG, Patel SR (2005). Spatial light modulators with light blocking/absorbing areas. U.S. Patent No. 6,906,847. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [25] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10378 (Erişim tarihi: 10.11.2021)
- [26] Yoder LA, Duncan WM, Koontz EM, So J, Bartlett TA, Lee BL, Rancuret P, 2001. DLP technology: applications in optical networking. In *Spatial light modulators: Technology and applications* (Vol. 4457, pp. 54-61). International Society for Optics and Photonics.
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_micromirror_device/ (Erişim tarihi: 10.12.2021)
- [28] Douglass MR, 1998. Lifetime estimates and unique failure mechanisms of the digital micromirror device (DMD). 1998 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 36th Annual (IEEE) (Cat. No. 98CH36173), 31 March-2 April 1998, Reno, pp. 9-16.
- [29] Horenstein MN, Pappas S, Fishov A, Bifano TG, 2002. Electrostatic micromirrors for subaperturing in an adaptive optics system. *Journal of Electrostatics*, 54 (3-4): 321-332.
- [30] Nesbitt RS, Smith SL, Molnar RA, Benton SA, 1999. Holographic recording using a digital micromirror device. *International Society for Optics and Photonics*, 3637: 12-20.

- [31] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Lazer/> (Erişim tarihi: 07.01.2022)
- [32] Clark L, 2012. Electron vortex beams: production and propagation. Doctoral dissertation, University of York, York.
- [33] Carpentier AV, Michinel H, Salgueiro JR, Olivieri D, 2008. Making optical vortices with computer-generated holograms. *American Journal of Physics*: 76 (10), 916-921.
- [34] Huang D, Timmers H, Roberts A, Shivaram N, Sandhu AS, 2012. A Low-cost Spatial Light Modulator for Use in Undergraduate and Graduate Optics Labs. *American Journal of Physics* 80: 211-215.
- [35] Mirhosseini M, Magana-Loaiza OS, Chen C, Rodenburg B, Malik M, Boyd RW, 2013. Rapid Generation of Light Beams Carrying Orbital Angular Momentum. *Optics Express* 21: 30196-30203.
- [36] Panarin S, Müller J, Prabhakar S, Fickler R, 2021. Spatial Structuring of Light for Undergraduate Laboratory. *American Journal of Physics*, 89 (2): 210-219.
- [37] Alsultanny YA, 2006. Laser Beam Analysis Using Image Processing. *Journal of Computer Science*: 2 (1), 109-113.
- [38] Bajić JS, Stupar DZ, Tomić J, Slankamenac MP, Joža A, Živanov MB, 2012. Implementation of The Optical Beam Profiler System Using LabVIEW Software Package and Low-cost Web Camera. 2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO, IEEE, pp: 167-172.
- [39] Hulea M, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, 2013. Evaluation of The Beam Wandering in Free Space Optics by Image Analysis. Proceedings of the International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence-ECAI-2013 IEEE, pp: 1-4.
- [40] <https://www.ti.com/product/DLP2000> (Erişim tarihi: 03.01.2022)

YAYINLAR

1. Gök M, Köksal K, 2021. Image processing of optical vortex and determination of OAM. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10 (4): 1342-1348.



ÖZGEÇMİŞ

doğdum. İlköğretim ve ortaokulu Okulu'nda ve liseyi Lisesi'nde tamamladım. yılında kazandığım Teknoloji Fakültesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yılında mezun oldum. Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladım. de yüksek lisansımı tamamladım. Yabancı dilim İngilizce'dir

Makbule GÖK