



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

**BÜKÜMLÜ IŞIKLARIN FOTOVOLTAİKLER ÜZERİNDEKİ  
ELEKTRİKSEL ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**TARIK KOÇ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN  
Dr. Öğr. Üyesi Fikret YALÇINKAYA**

**KIRIKKALE – 2022**



TARIK KOÇ tarafından hazırlanan “BÜKÜMLÜ IŞIKLARIN FOTOVOLTAİKLER ÜZERİNDEKİ ELEKTRİKSEL ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Fikret YALÇINKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan: Prof. Dr. Şerafettin EREL

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ata ŞEVİNÇ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: 27/06/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## ETİK İLKELERE UYGUNLUK BİLDİRİMİ

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tarık KOÇ

27.06.2022



# ÖZET

## BÜKÜMLÜ IŞIKLARIN FOTOVOLTAİKLER ÜZERİNDEKİ ELEKTRİKSEL ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı,

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fikret YALÇINKAYA

Haziran 2022, 82 sayfa

Uzaysal Işık Modülatörleri (Spatial Light Modulator-SLM) optik öğretim ve bilimsel çalışmalar için çok yönlü araçlardır. Faz şekillendirme, holografi ve optik kontrol alanlarında kullanılabilirler. SLM'ler gerek endüstriyel alanlarda gerek lisans ve lisansüstü laboratuvarlarda yararlı bir araç olarak kullanılabilirler. Fakat yüksek maliyetlerinden dolayı bu alanlardaki kullanımları kısıtlıdır. Bu sebeple düşük maliyetle üretilebilecek SLM'lerin hem endüstriyel alanlarda hem de bilimsel laboratuvarlarda daha yaygın kullanılabileceği öngörülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmanın ilk amacı, mevcut SLM'lere alternatif olarak Dijital Mikroayna Cihazı (Digital Micromirror Device-DMD) tabanlı projektörün modifikasyonu ile düşük maliyetli SLM oluşturulabileceğinin gösterilmesidir. Tasarlamış olduğumuz SLM, holografide ve bükümlü ışıkların elde edilmesinde kullanılabilir. Bükümlü ışık veya diğer adıyla açısız momentuma sahip elektromanyetik dalgalar giriş eksenine boyunca dönen sarmal dalga cephelemine sahip bir ışın olarak ifade edilebilir. Bükümlü ışıklar optik haberleşmede, atom fiziğinde ve radyo iletişimi gibi birçok farklı bilimsel çalışma alanlarında kullanılmaktadır. Bu tür pratik uygulamalara ek olarak bükümlü ışıklar, etkileşime girdiği maddeye hem foton enerjisi hem de açısız momentum aktarabilir. Bundan dolayı bükümlü ışıkların madde ile etkileşimi sonucunda daha yüksek akımlar oluşabilir. Bu çalışmanın diğer bir amacı da modifiye edilmiş SLM

ile elde edilen bükümlü ışık spotunun yarıiletken bir solar panel üzerindeki elektriksel etkisinin deneysel olarak incelenmesi olmuştur. Böylece düşük maliyetli SLM üretilmiştir. Üretilen SLM'nin maliyeti, teknik özellik bakımından benzer ticari SLM'ye göre % 99,62 oranında düşürülmüştür. Ayrıca bükümlü ışıklar fotovoltaikler üzerine düşürülerek daha yüksek akımlar elde edilmiştir. Akım artımı %18.2 oranında gerçekleşmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Uzaysal ışık modülatörü, Dijital Mikroayna Cihazı, Hologram, Bükümlü ışık, Işığın açısız momentumu, Fotovoltaikler, Işıkmadde etkileşimi.





# **ABSTRACT**

## **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL EFFECT OF TWISTED LIGHTS ON PHOTOVOLTAICS**

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Elektrical-  
Elektronics Engineer, Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fikret YALÇINKAYA

June 2022, 82 pages

Spatial Light Modulators (SLM) are versatile tools for optical teaching and scientific studies. They can be used in the fields of phase shaping, holography and optical control. SLMs can be used as a useful tool both in industrial fields and in undergraduate and graduate laboratories. However, their use in these areas is limited due to their high costs. For this reason, it is predicted that SLMs, which can be produced at low cost, can be used more widely both in industrial areas and scientific laboratories. Therefore, the first aim of this study is to show that low-cost SLM can be created by modifying the Digital Micromirror Device (DMD)-based projector as an alternative to existing SLMs. The SLM we have designed can be used in holography and to produce twisted lights. Twisted light or electromagnetic waves with angular momentum can be expressed as a beam with spiral wavefronts rotating along the beam axis. Twisted light (or electromagnetic waves with angular momentum) can be expressed as a beam with spiral wavefronts rotating along the beam axis. Twisted lights are used in many different scientific fields such as optical communications, atomic physics, and radio communications. In addition to such practical applications, twisted lights can transfer both photon energy and angular momentum to matter with which they interact. Therefore, higher currents can occur as a result of the interaction of twisted lights with matter. Another aim of this study

was to experimentally investigate the electrical effect of a twisted light spot obtained with a modified SLM on a semiconductor solar panel. Thus, low cost SLM was produced. The cost of the produced SLM has been reduced by 99.62% compared to the similar commercial SLM in terms of technical features. In addition, higher currents are obtained by dropping twisted lights onto photovoltaics. The current increase was 18.2%.

**Keywords:** Spatial light modulator, Digital Micromirror Device (DMD), Hologram, Twisted light, Angular momentum of light, Photovoltaics, Light-matter interaction.



## TEŞEKKÜR

Tez alıőması sırasında her tŸrlŸ bilgi, teővik ve deneyimleri ile yardımlarını esirgemeyen, değerli dŸőnceleri ile beni doğruya yŸnlendiren danıőmanım Sayın Dr. Őęr. Őyesi Fikret YALÇINKAYA'ya gŸnŸlden teőekkŸrlerimi arz ederim.

YŸksek lisans tez çalıőmam sŸresince konunun olgunlaőtırılmasında kaynak ve yŸntem açısından bana sŸrekli yardımda bulunarak yol gŸsteren değerli abim Doç. Dr. HŸseyin KOÇ'a, çalıőmalarım boyunca tez yazımı ve tez yazım kuralları denetimi konusunda yardımı için değerli abim Dr. Őęr. Őyesi Yunus KOÇ'a ve çalıőmam sırasındaki kŸŸk veya bŸyŸk yardımını esirgemeyen herkese teőekkŸr ederim.

YŸksek lisans tez çalıőmamın baőtından sonuna kadar beni gŸnŸlden destekleyen değerli eőtme ve Őęrenimim boyunca bŸyŸk fedakârlıklarda bulunan aileme sonsuz ŐŸkranlarımı sunarım.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xii
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GENEL TANIMLAMALAR VE LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>5</b>
2.1. Uzaysal Işık Modülatörü.....	7
2.2. Dijital Mikro ayna cihazlar (Digital Micromirror Device-DMD) .....	10
2.3. Elektromanyetik Dalgalar .....	12
2.4. Elektromanyetik Dalgaların Açısız Momentumu / Optik Girdaplar .....	14
2.4.1. Spin ve Yörüngesel Açısız Momentum .....	15
2.4.2. Azimutal Faz Yapısı .....	17
2.5. Yörünge Açısız Momentum Taşıyan Optik Işıkların Üretimi .....	19
2.5.1. Hologram .....	21
2.5.2. Bilgisayar Tarafından Oluşturulan Hologram (Computer-Generated Hologram-CGH ) .....	22
2.5.2.1. Lohmann Hologramı .....	23
2.6. Açısız Momentuma Sahip Elektromanyetik Dalgaların Yarı İletken Malzemeler Üzerindeki Elektriksel Etkisi.....	26
2.6.1. Kuramsal Olarak Formülleştirme .....	27

<b>3.MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>30</b>
3.1. Uzaysal Işık Modülatörü Tasarımı .....	30
3.2. Holografik Maske Tasarımı ve Açısal Momentuma Sahip Elektromanyetik Dalgaların (Bükümlü Işıkların) Üretilmesi.....	33
3.3. Bükümlü Işıkların Fotovoltaikler Üzerindeki Elektriksel Etkisi .....	37
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>42</b>
<b>5.SONUÇ.....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>51</b>



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Tablo 2. 1.</b> Elektromanyetik dalgalara ait spektrumlar .....	13
<b>Tablo 3. 1.</b> SLM'ye dönüştürülen projektörün özellikleri.....	31
<b>Tablo 3. 2.</b> Lamba kontrol devresi pim diyagramı .....	32
<b>Tablo 3. 3.</b> Fotovoltaik panel özellikleri .....	39
<b>Tablo 3. 4.</b> GW Instek GDM-8245 masa tipi dijital multimetrenin DC akım özellikleri.....	40
<b>Tablo 4. 1.</b> Tasarladığımız SLM cihazının diğer SLM cihazları ile karşılaştırılması	42
<b>Tablo 5. 1.</b> YAM'ın yarıiletken üzerindeki etsinin farklı çalışmalarıyla karşılaştırılması .....	50

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. LCD tabanlı SLM ve bilgisayar bağlantısı .....	7
Şekil 2. 2. SLM yapısı .....	8
Şekil 2. 3. SLM Donanım yapısı.....	8
Şekil 2. 4. Dijital mikro ayna cihazı .....	11
Şekil 2. 5. Bir DMD pikselinin genişletilmiş görüntüsü.....	12
Şekil 2. 6. Işık için SAM ve YAM .....	14
Şekil 2. 7. Açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar.....	18
Şekil 2. 8. Paralel yönde ilerleyen aynı yüke sahip iki giriş. Topolojik yükün işaretine göre dönüş yönleri .....	18
Şekil 2. 9. Işın kesiti boyunca değişen faza sahip bir SLM kullanarak bir ışık ışınının faz modülasyonu. ....	20
Şekil 2. 10. Işın kesiti boyunca değişen geçirgenliğe sahip bir SLM kullanarak bir ışık ışınının genlik modülasyonu. ....	20
Şekil 2. 11. Polarizör kullanarak ışık ışınının polarizasyon modülasyonu .....	21
Şekil 2. 12. Lohmann hologramı için yeniden yapılandırma şeması.....	24
Şekil 2. 13. Hücre tanımı (a) kompleks bir hologram ve (b) bir detour-phase binary hologram .....	25
Şekil 2. 14. Sistem kurulumunun resmi .....	27
Şekil 3. 1. Tasarlanan cihazın blok diagramı.....	31
Şekil 3. 2. Lamba kontrol devresi .....	32
Şekil 3. 3. Lamba kontrol devresi pin atama .....	32
Şekil 3. 4. DLP tabanlı uzaysal ışık modülatörü (a) modülatör bileşenleri, (b) ana kartın üstten görüntüsü.....	33
Şekil 3. 5. Paralel yönde ilerleyen aynı yüke sahip iki giriş.....	34
Şekil 3. 6. Farklı $m$ topolojik değerleri için $H$ 'nin çizimleri.....	36
Şekil 3. 7. Yapılandırılmış EMD üretimi ve tespiti için deney kurulumu. ....	37
Şekil 3. 8. Yapılandırılmış EMD'nin fotovoltaiik hücre üzerindeki etkisinin incelenmesi için kurulan deney düzeneği şeması.....	39
Şekil 3. 9. Alüminyum folyo ile kaplı kutu .....	40
Şekil 3. 10. Deney düzeneği .....	41

<b>Şekil 4. 1.</b> Yapılandırılmış elektromanyetik dalgaların CCD görüntü kayıtları. ....	43
<b>Şekil 4. 2.</b> Düz bir yüzey üzerinde yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar.....	43
<b>Şekil 4. 3.</b> Yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar .....	44
<b>Şekil 4. 4.</b> $m$ topolojik yüküne sahip hologram maskeleri ve yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar.....	45
<b>Şekil 4. 5.</b> (a) Bigman H.H'nin yüksek lisans çalışmasında elde ettiği yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar (b) Bu tez kapsamında tasarladığımız SLM ile elde ettiğimiz yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar. ....	46
<b>Şekil 4. 6.</b> YAM değerine göre oluşan akım değerleri .....	47





## SİMGELER DİZİNİ

$\ell_{YAM}$	Yörünge açısal momentum değeri
$A_0$	Vektör potansiyelinin genliği
$\vec{E}$	Elektrik alan
$E_0$	Elektrik alan şiddeti
$\vec{H}$	Manyetik alan
$H_0$	Manyetik alan şiddeti
$\vec{e}$	Polarizasyon vektörü
$k_x$	Elektron başlangıç momentumu
$\vec{p}$	Momentum vektörü
$\psi_1$	Referans dalgası
$\psi_2$	Nesne dalgası
$\hbar$	Planck sabiti
$\Psi$	Elektron dalga fonksiyonu
$A$	Vektör potansiyeli
$B$	Manyetik akı yoğunluğu
$F$	Kuvvet
$H$	Hologram transmisyon fonksiyonu
$I$	Işığın uzak yüzeydeki parlaklığı
$J$	Toplam açısal momentum
$L$	Yörünge açısal momentum
$S$	Spin açısal momentum
$c$	Işık hızı
$f$	Frekans
$m$	Yörünge açısal momentumun topolojik yük değeri
$n$	Ortamın kırılma indisi
$\Omega$	Yeniden oluşturulmuş görüntünün genliği
$\beta$	Dalga cephesinin fazı
$\lambda$	Dalga boyu
$\tau$	Tork
$\omega$	Işığın frekansı

## KISALTMALAR DİZİNİ

CCD	Charge Couple Device
CGH	Computer Generated Hologram
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DC	Direct Current
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digital Micromirror Device
EMD	Elektromanyetik Dalga
IR	Infrared
LCD	Liquid Crystal Display
LG	Laguerre-Gaussian
MEMS	Micro-Elektro-Mechanical system
SAM	Spin Açısai Momentum
SLM	Spatial Light Modulator
TL	Twisted Light
YAM	Yörüngesel Açısai Momentum

# 1.GİRİŞ

Uzaysal ışık modölatörü (Spatial Light Modulator-SLM), elektromanyetik dalgayı genlik ve faz bakımından modüle eden optoelektronik bir cihazdır. Bir dizi mercek sisteminden oluşan SLM'ler elektromanyetik dalgayı toplar, odaklar ve kırınımını sağlar. SLM'lerin bu özelliği tek dalga boyunda eş fazlı ışınım yapan bir elektromanyetik kaynaktan yayılan dalganın kırınımına uğrayarak yapısının değişmesini sağlar. Statik maskeler SLM'lerin kırınım ve girişim deneylerini yapabilir; ancak bunlar, genellikle çizgi ızgaralar ve çift yarıklar gibi kolayca temin edilebilen maskelerle sınırlıdır. Bu maskelerin oluşturulması ya zaman alan bir işlemdir ya da yüksek maliyetlidir. Ayrıca, statik kırınım elemanları kolayca modifikasyona izin vermezler. Buna karşılık bilgisayar kontrollü SLM ile girişim desenleri üretmek, kendi kırınım öğelerini tasarlamak ve (deneysel bir sonuç olarak) maskeleri değiştirmek daha hızlı ve daha avantajlıdır. Örneğin bir SLM kullanılarak, model parametreler üzerinde gerçek zamanlı kontrol ile kırınım, girişim ve holografi kavramları dinamik bir şekilde gösterilebilir. Böylece SLM'ler, standart laboratuvar ekipmanları ile icra edilemeyen yeni deneyleri gerçekleştirmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca SLM'lerin akademik ve bilimsel çalışmaların gerçekleştirildiği optik laboratuvarlarına dâhil edilmesinin; kırınım, Fourier Optiği, görüntü işleme ve sinyal işleme teknikleri gibi konulardaki araştırmalara büyük ölçüde fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

SLM'ler geniş bir uygulama alanına sahiptir. Örneğin; SLM'ler görüntüleme uygulamalarında dalgaları düzleştirmek ve sapmayı düzeltmek için kullanılabilir. Lazer ışınını bağımsız (ayrı ayrı) adreslenebilir noktalara (piksellere) yönlendirebilir ve böylece lazer ışını bir 3D (3 boyutlu) hacim alanında yoğunlaştırılabilir. Telekomünikasyon uygulamalarında sinyalleri kodlayarak bir ışık huzmesinin veri bant genişliğinin artırılmasında kullanılabilir. Kızılötesi (IR) spektrumu kullanılarak askeri hedeflerin etkili bir şekilde test edilebilmesi (Örneğin füzelerin kızılötesi

hedefleme sistemlerinin test edilmesi) için büyük arenaların görüntülerinin oluşturulmasına imkân sağlar. Biyomedikal uygulamalarında (lazer cerrahisinde) daha hassas kesime izin verir ve bir petri kabındaki hücreleri ayırmak için optik cımbızlama işlemlerinde kullanılır. Ayrıca SLM'ler tarafından oluşturulan bir dizi odaklanmış nokta ile hücreler sıralanabilir ve bir hedef boyunca yalnızca tek bir hücreyi hareket ettirmek için kısaç olarak kullanılabilir. Aynı teknik ile çeşitli malzemelerin nano ölçekli montajı için de kullanılabilir. Örneğin; karbon tabanlı nanotüpler, nanowalls ve nanowires için kullanılabilir.

SLM'lerin birçok bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı görülmektedir. Fakat bu cihazların fiyatlarının oldukça yüksek olması bu kullanımı sınırlamaktadır. Bundan dolayı bu cihazların daha düşük maliyetlerle üretimi daha yaygın bir kullanıma imkân sağlayacaktır. Bu cihazların üretiminde, Texas Instruments şirketi tarafından üretilen dijital mikroayna cihazı (Digital Micromirror Device-DMD) kullanım maliyetini oldukça düşürecektir. Yani, bu cihazların maliyetinin düşürülmesinde DMD'ler büyük görev üstlenmektedir. DMD'ler hem bir Mikro Elektro-Mekanik Sistem (Micro-Elektro-Mechanical System–MEMS) hem de SLM olan tek hacimli üretim cihazıdır. Bir MEMS, bütünleyici metal oksit yarı iletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor-CMOS) elektroniğinin altında kontrol edilen yüz binlerce hareketli mikro ayna dizisinden oluşur. Aynaların oldukça yüksek yansıtıcı olması ve ışığı modüle etmek için kullanılması, DMD'yi bir optik MEMS, daha özel olarak da yansıtıcı bir SLM yapar.

SLM üretiminde DMD aynaların kullanımı maliyetin düşürülmesinde oldukça faydalı olacaktır. Ayrıca DMD' nin diğer birçok özelliği de bu ekran yongasını bir adım öne çıkarmaktadır. Bu özellikler; oldukça yüksek görüntü çözünürlükleri, yüksek anahtarlama hızı, geniş spektral bant aralığında çalışması ve binary hologram gösterimidir. DMD'nin bu özelliklere sahip olması sebebiyle, 3D hesaplamalı görüntüleme, opto-genetikte nöronal aktivite kontrolüne kadar çeşitli uygulamalar için çok kullanışlı bir araç teşkil ettiği söylenebilir. Ayrıca optik ve lazer alanında oldukça önemli bir uygulama sahası olan açısız momentuma sahip elektromanyetik dalgaların (bükümlü ışıklar-Twisted Light-TL) üretilmesinde de DMD'ler büyük rol üstlenmektedir [1].

Açısız momentuma sahip elektromanyetik dalgalar, eksen boyunca dik bir düzlemden bakıldığında merkezi karanlık bir ışık halkası olarak görünürler. Bir ışık

ışınının fazı, yayılma eksenini etrafında tıpkı bir tirbuşon gibi bükülebilir. Poynting (1909), dairesel polarize bir elektromanyetik dalganın açısal momentum taşıdığını göstermiştir. Fakat bu dalganın gerçek etkisinin anlaşılması, Allen (1992) tarafından Laguerre-Gaussian tipi açısal momentum taşıyan elektromanyetik dalgaların uzaysal profilini tanımlayıp üretmeyi başarılmasından sonra olmuştur. Bu çalışma, spin açısal momentum (SAM) ile yörüngesel açısal momentum (YAM) ayrımını yaparak birçok araştırmanın önünü açmış ve böylece araştırmacıların çoğu bunu temel çalışma kabul edip, bu alanda bağımsız araştırmalar yapmıştır [2–5].

Açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar, kuantum mekaniksel olarak nitelendirilmiş ve moleküllerle etkileşimleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır [6,7]. Böylece birçok karmaşık deneysel konfigürasyonlar geliştirilmiştir [8–11]. Günümüzde ise bükümlü ışıklarla ilgili çalışmalar özellikle optik fiber haberleşmede bant genişliği artırma ve hızlı veri iletişimi [2,12], radyo frekanslarında zengin radyo astronomisi oluşturma, yeni kablosuz iletişim konsepti oluşturma, çözünürlük, hassasiyet, girişim toleransını ve genel kullanılabilirliği artırma [3,13], bilgisayarlarda okuma yazma hızını artırma gibi birçok önemli teknolojik gelişmelere katkı sağlar [5]. Örneğin 2020 yılında Royal Astronomical Society'nin aylık bildirimlerinde yayınlanan bir çalışmada, dönen bir M87\* kara deliğin yakınında yayılan ışığın yörüngesel açısal momentum taşıdığına dair gözlemsel kanıtlar sunulmuştur. Ayrıca bu çalışma, optik açısal momentum bilgilerinin astronomik mesafeler boyunca yayılabileceğini öne sürmüştür [14]. Bunların yanı sıra farklı çalışmalarda da ışık-madde etkileşimi ile ilgili olarak açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgaların valans elektronlarını etkileyebileceği, açısal momentum değerinin elektrona aktarılabilirliği ve iletim bandına taşınan elektronlarla elektrik akımı elde edilebileceği teorik olarak gösterilmiştir [5,15–17]. Işık-madde etkileşimleri üzerine yapılan teorik ve deneysel çalışmalar bize foton enerjisi ile birlikte açısal momentumun da sisteme aktarılabilirliğini göstermektedir. Açısal momentum taşıyan elektromanyetik dalgalar, taşıdıkları açısal momentumu etkileşime girdikleri sisteme aktararak sistemin açısal momentumunu değiştirebilmektedir. Bu özelliği ile fiber optik iletişimde yüksek bant genişliğine çıkılması [18,19], bilgisayarlarda manyetik okuyucuların okuma yazma hızlarının artırılması [20] ve yüksek duyarlı optik ölçümler [21–23], kuantum enformasyon ve kuantum kriptoloji gibi geniş

uygulama alanlarında büyük avantajlar sunması öngörülmektedir. Bu çalışmada, bilimsel ve endüstriyel alanlarda SLM'lerin yaygın bir şekilde kullanımı amacıyla, düşük maliyetli DMD tabanlı bir SLM cihaz tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu cihazla açısall momentuma sahip elektromanyetik dalgaların nasıl elde edileceği gösterilmiştir. Ayrıca açısall momentumun ışık-madde etkileşimi üzerine yapılan araştırmalar ışığında, bir fotovoltaiik üzerine düşürülen açısall momentuma sahip elektromanyetik dalğanın elektriksel etkisi incelenmiştir. Üretilen açısall momentuma sahip elektromanyetik dalgaların bir fotovoltaiik üzerine düşürülerek daha yüksek akımların elde edilebileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Açısall momentuma sahip elektromanyetik dalgaların fotovoltaiiklerin üzerindeki etkisinin incelenmesindeki temel amaç, enerjinin günümüzde insanlar için oldukça önemli bir ihtiyaç olması ve enerjiye olan ihtiyacın her geçen gün artmasıdır.

Sanayi, inşaat, tarım, ulaşım gibi birçok sektörde ve bireysel kullanımda enerji esastır. Dünya genelinde enerji ihtiyaçlarının büyük bir kısmı fosil yakıtlarından elde edilmektedir. Bu kaynakların dünyada ciddi çevresel sorunlara yol açması, rezervlerinin tükenecek olması ve fiyat istikrarsızlığı gibi sebeplerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi her geçen gün daha da artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin temiz bir enerji kaynağı olması ve kullanım kolaylığı sunması onu yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkarmaktadır. Fakat fotovoltaiikler düşük enerji verimliliğine sahiplerdir bundan dolayı kurulum için oldukça geniş alan gereksinimleri vardır. Bu sebepten dolayı fotovoltaiiklerden daha yüksek enerji verimliliğı alabilmek oldukça önemlidir. Dolayısıyla bu çalışmanın, güneş enerjisinden daha verimli bir şekilde yararlanılabileceği üzerine ilerde yapılacak araştırmalara da katkı sağlayacağı söylenebilir.

## 2. GENEL TANIMLAMALAR VE LİTERATÜR TARAMASI

Son otuz yılda, YAM'a sahip optik ışınlar yalnızca bilimsel bir merak olmaktan çıkıp, süper çözünürlüklü görüntüleme, optik yakalama, klasik optik iletişimi ve kuantum optik iletişimi gibi çok çeşitli ileri uygulamalarda kullanılmıştır. Tüm bu uygulamalarda ilk adım, bir YAM modunun üretilmesidir. Deneysel olarak, istenen YAM modlarını oluşturmak için çok sayıda yöntem vardır [24]. YAM modunun oluşturulmasıyla ilgili olarak kullanılan ilk yöntemlerden biri sadece iki silindirik lensin kullanımı şeklinde oluşmuştur [24]. Bu alandaki çalışmalar artıkça YAM modlarının oluşturulması için ikili holografik optik (Binary holographic optical), spiral faz plakası (Spiral phase plate) ve düzlemsel meta yüzey (Planar metasurface) gibi farklı yöntem teknikleri geliştirilmiştir. Genel olarak, YAM modu üretimi (elektron ışını, iyon ışını ve/veya fotolitografi kullanılarak litografik olarak üretilen) statik optik elemanlar veya SLM gibi aktif cihazlar kullanılarak gelen ışık ışınının özelliklerinde bir veya daha fazlasının modüle edilmesiyle elde edilir. Statik optik elemanların modifikasyonları kolay değildir. Buna karşılık bilgisayar kontrollü aktif bir SLM cihazı ile girişim desenleri üretmek, kendi kırınım öğelerini tasarlamak ve deneysel bir sonuç olarak maskeleri değiştirmek daha hızlı ve daha avantajlıdır.

Allen tarafından (1992), açısal momentum taşıyan elektromanyetik dalgaların uzaysal profilini tanımlayıp YAM üretmeyi başarılmasından sonra, birçok bağımsız çalışma yapılmıştır. YAM'la ilgili çalışmalar, özellikle optik fiber haberleşmede band genişliği artırma ve hızlı veri iletişimi [2,12,25], radyo frekanslarında zengin radyo astronomisi oluşturma, yeni kablolu iletişim konsepti oluşturma, çözünürlük, hassasiyet, girişim toleransını ve genel kullanılabilirliği artırma [3,13,26–28], radar uygulamalarında yüksek çözünürlükler sağlama [29,30] bilgisayarlarda okuma yazma hızını artırma gibi birçok önemli teknolojik gelişmelere katkı sağlar [5]. Örneğin 2020 yılında, Royal Astronomical Society'nin aylık bildirimlerinde yayınlanan bir çalışmada, dönen bir M87\* kara deliğin yakınında yayılan ışığın, yörüngesel açısal momentum taşıdığına dair gözlemsel kanıtlar sunulmuştur. Bu çalışma, optik açısal momentum bilgilerinin astronomik mesafeler boyunca yayılabileceğini öne sürmüştür [14]. Ayrıca, haberleşme alanında yapılan

çalışmalarda, YAM tabanlı kablosuz iletişimin uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Aynı frekans bandını paylaşan iki YAM modu (YAM modları 0 ve 1) incelenmiştir. Sırasıyla 60 GHz ve 17 GHz taşıyıcı frekansları ile YAM tabanlı yüksek kapasiteli iletim gerçekleştirilmiştir [13,31–33]. YAM, Multiplexing Millimeter Wave (mmWave) iletişiminde yüksek kapasite elde edebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, YAM tabanlı kablosuz iletişim üzerine yapılan araştırmalar, mod algılama, mod ayırma, eksen tahmini, hizalama, mod modülasyonu, YAM ışınlarının yakınsaması ve mod atlama gibi birçok konuyu kapsamaktadır. Genellikle MIMO (Multiple Input Multiple Output) oğullama YAM ile birlikte kullanılabilir. Böylece spektrum verimliliği önemli ölçüde artırılabilir. Deneysel ve teorik alışmalar, MIMO tabanlı uzaysal oğullama (MIMO-based spatial multiplexing) ve YAM çoğullamanın birlikte kullanılmasının kablosuz iletişimde spektrum verimliliğinin artırabileceği gösterilmiştir [33–37].

Özetle açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgaların uygulama alanlarının birkaçını maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz:

- I. Optik girdaplar, hücreler gibi mikrometre byklğindeki parçacıkları işlemek için optik ımbız olarak kullanılır. Bu tür parçacıklar, YAM kullanılarak ışının eksenini etrafında döndürülebilir.
- II. Işığın YAM modları kullanılarak kablosuz haberleşmede daha hızlı veri iletişimi sağlanabilir. Örneğin; bu modlar kullanılarak 143 km'lik bir mesafede serbest uzay iletimi sağlanmış ve bilginin doğru bir şekilde iletildiği gösterilmiştir [38].
- III. Optik mikroskopide, açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar kullanılarak oldukça yüksek uzamsal çözünürlük elde edilebilir [39].
- IV. Kuantum kriptografi veya kuantum hesaplama uygulamaları için daha yüksek boyutlu kuantum bilgi kodlamasında kullanılabilir [40–42].
- V. Işık-madde etkileşimi ile ilgili olarak açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgaların valans elektronlarını etkileyebileceği, açısal momentum değerinin elektrona aktarılabilceği ve iletim bandına taşınan elektronlarla elektrik akımı elde edilebileceği teorik olarak gösterilmiştir [5,15–17].
- VI. Açısal momentum taşıyan elektromanyetik dalgalar taşıdıkları açısal momentumu etkileşime girdikleri sisteme aktararak sistemin açısal



momentumunu değiştirebilmektedir. Bu özelliği ile fiber optik iletişimde yüksek bant genişliğine çıkılması [18,19], bilgisayarlarda manyetik okuyucuların okuma yazma hızlarının artırılması [20] ve yüksek duyarlı optik ölçümler [21–23], kuantum enformasyon, kuantum kriptoloji gibi geniş uygulama alanlarında kullanılabilir.

## 2.1. Uzaysal Işık Modülatörü

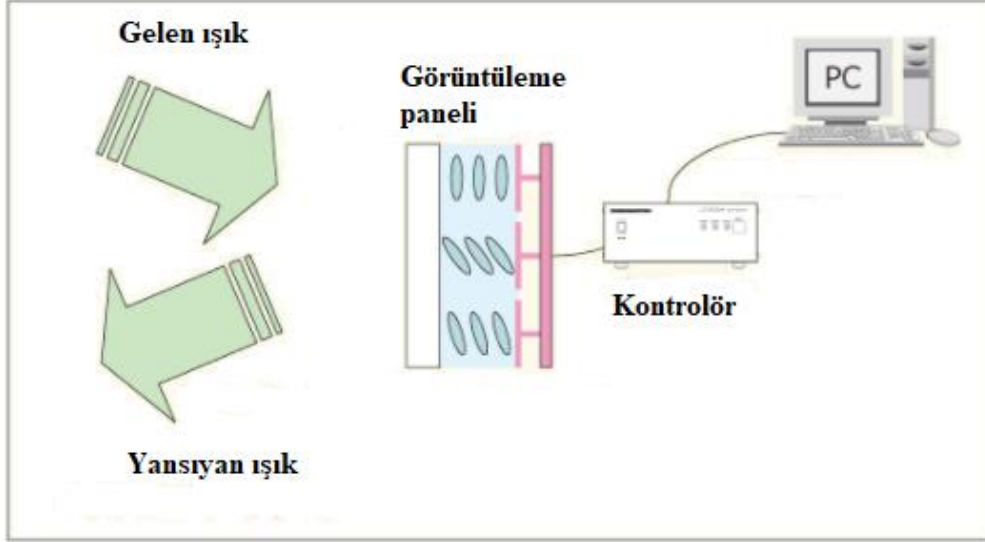
SLM'ler, optik ve elektriksel bir girişe karşılık gelen uzaysal düzende ışık ışını huzmesini modüle eden dönüştürücülerdir (Şekil 2.1). Bu optoelektronik cihazlar, ışığın fazını ve genliğini ayrı ayrı veya aynı anda kontrol edebilen bir dizi pikselden oluşmaktadır. Ayrıca SLM'ler bilgisayar kontrollü çalışırlar (Şekil 2.1). Bundan dolayı girişim desenleri üretmek, kendi kırınım öğelerini tasarlamak ve deneysel bir sonuç olarak maskeleri değiştirmek daha hızlı ve daha avantajlıdır. Örneğin; bir SLM kullanılarak, model parametreler üzerinde gerçek zamanlı kontrol ile kırınım, girişim ve holografi kavramları dinamik bir şekilde gösterilebilir. Böylece SLM'ler, standart laboratuvar ekipmanları ile erişilemeyen yeni deneyler gerçekleştirmeyi mümkün kılmaktadır.



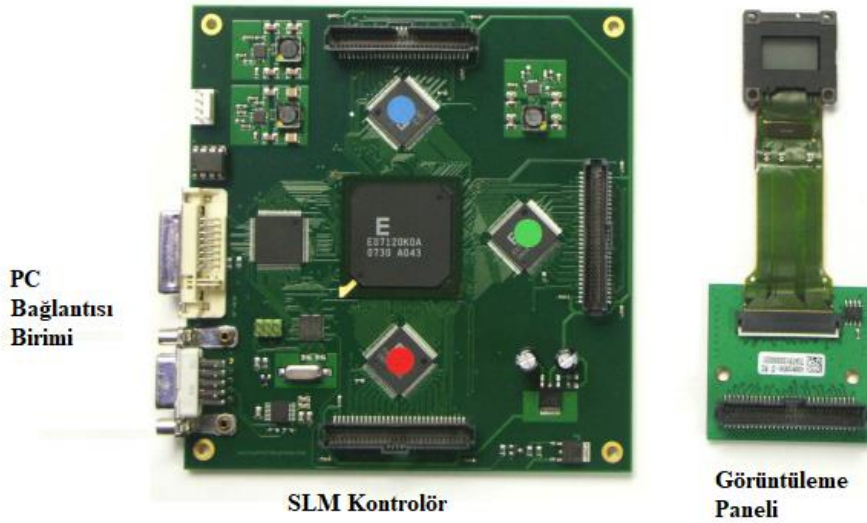
Şekil 2. 1. LCD tabanlı SLM ve bilgisayar bağlantısı [43]

SLM'ler donanımsal olarak iki temel donanım üzerine inşa edilmiştir. Bu donanımlardan biri görüntüleme paneli ikincisi kontrolördür. Görüntüleme paneli LCD ve DMD gibi ekran çiplerinden oluşur. Bir SLM için görüntüleme paneli oldukça önemlidir. Çünkü ışık modülasyonu bu kısımda gerçekleştirilmektedir. Hedeflenen bir uygulamada en uygun SLM'yi tanımlamak için panel çözünürlüğü,

aktif optik alan, yenileme hızı ve spektral kabul gibi çeşitli performans kriterleri dikkate alınmalıdır. Kontrolör kısmı ise hem panel kontrolü hem de panel ile bilgisayar arasındaki görüntü aktarımını sağlar. Aşağıdaki şekillerde SLM'nin temel donanımsal yapısı gösterilmektedir (Şekil 2.2, Şekil 2.3.).



Şekil 2. 2. SLM yapısı



Şekil 2. 3. SLM Donanım yapısı [44]

Birçok bilimsel ve endüstriyel alanda kullanılan SLM'ler, görüntüleme, dijital holografı, optik anahtarlama, mikro yapı imalatı, telekomünikasyon, savunma sanayi, biyomedikal, tıp ve fizik gibi alanlarda geniş kullanıma sahiptir. Örneğin; SLM'ler, fiber optik haberleşme [2], mikroskobik lazer ameliyatı [45], optik bilgi işleme [46], in-vivo görüntüleme [47] ve elektrostatik baskı [48] gibi çeşitli alanlarda yaygın

olarak uygulanmaktadır. Ayrıca ışık ışınının uzaysal profilini manipüle etmek isteyen birçok uygulama alanlarında da kullanılmaktadır.

Özetle SLM'nin kullanım alanlarının ilgili birkaçını maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz;

- 1) **Holografik veri depolama:** Holografik veri depolama tekniği, geleneksel optik ve manyetik teknolojisinin ötesinde depolama yoğunluğu ve veri hızına ulaşma potansiyeline sahiptir. Holografik depolama benzersiz avantajlara sahiptir. Bunlar, son derece kısa veri erişim süresi ( $< 50 \mu\text{s}$ ), son derece hızlı veri giriş ve çıkış oranları (10 Gb/sn) ve veri tabanlarında 100 Gb/sn'yi aşan oranlarda bilgi bulma konusunda muazzam arama yetenekleri barındırmaktadır. Mevcut manyetik disk tabanlı depolama sistemlerinden çok daha üstündür [49–52].
- 2) **Mikroskopi:** Optik mikroskopide, SLM kullanılarak daha yüksek çözünürlük elde edilebilir. Bir SLM ile fizyolojik koşullar altında dokuları yüksek çözünürlüklü olarak görüntülemeyi mümkün kılmaktadır [53]. Ayrıca bu gelişmiş optoelektronik cihazların, tarama problu mikroskoplar gibi optik veya tamamen farklı cihazlarla birleştirilmesi, malzemelerin moleküler yapısının mikro veya nanometre ölçekli uzaysal çözünürlükle incelenmesine imkân tanımaktadır [54].
- 3) **Bilimsel ve tıbbi uygulamalar:** Mikroskopi, spektroskopi ve meteorolojide SLM kullanımının getirdiği ön görülen gelişmeler, tıbbi ve bilimsel pazarlar için gerçek zamanlı gelişmiş görüntüleme sistemi sağlamıştır [55]. Tıp alanında, in-vivo görüntüleme [53] ve belki kanserli dokunun tedavisi, endoskopi ve diğer tedavilerde SLM'ler kullanılarak önemli gelişmeler sağlanacaktır [56,57].

Pek çok araştırma alanında kullanılan SLM'ler, DMD ve sıvı kristal ekran (Liquid Crystal Display-LCD) olmak üzere iki farklı ekran tipine sahiptir. Texas Instruments tarafından geliştirilen DLP tabanlı DMD, hem bir MEMS hem de SLM olarak kullanılabilen cihazlardır. DMD, CMOS elektroniğinin altında kontrol edilen yüz binlerce hareketli mikro ayna dizisinden oluşur. Aynalar oldukça yüksek yansıtıcılardır ve ışığı modüle etmek için kullanılırlar. Böylece optik bir MEMS olan

DMD, hem yansıtıcı bir SLM [49] hem de holografik ekranlar için popüler bir ekran çipi olarak ifade edilebilir [58–61].

Öte yandan DMD'ler gibi LCD'ler de yüksek yansıtıcılardır, ışığı modüle etmek için kullanılırlar ve holografik ekranlar için popüler çiplerdir. Holografik ekranlar için DMD'nin çözünürlüğü ve piksel boyutu, holografik ekranlar için görüntü panel oranları, LCD ekran çiplerinden çok farklı değildir. DMD'lerin bu benzer özelliklerin yanı sıra diğer ekran yongalarına göre üstün birtakım niteliklere de sahiptir. Bunlar yüksek çözünürlük, çok yüksek hız tepkisi, oluşturulan görüntü ile yeniden yapılandırılan ışın arasında derin ayırım ve binary hologram gösterimidir [58,59].

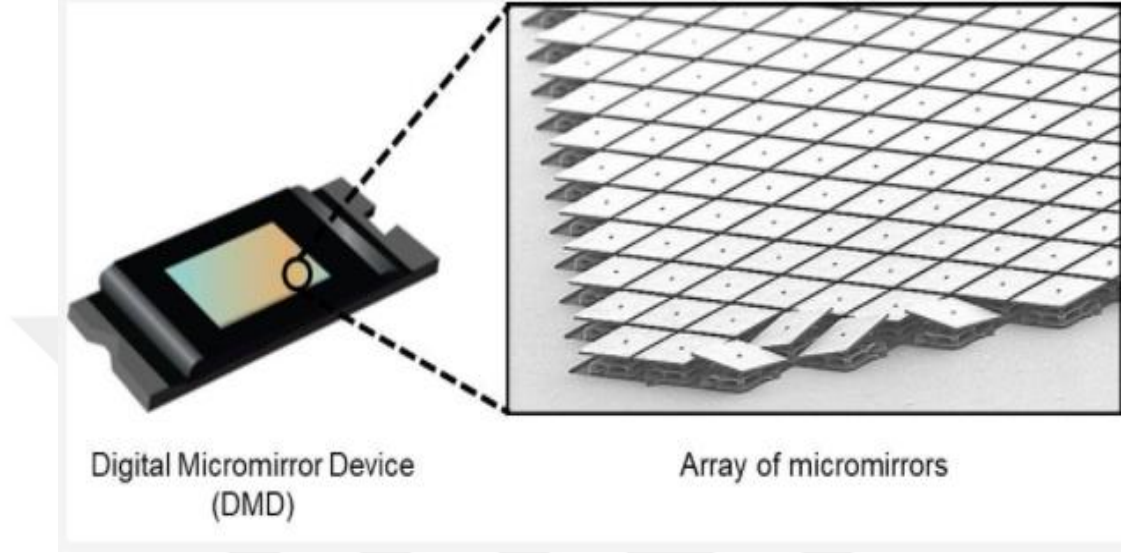
DMD'deki çok yüksek hız tepkisi, renkleri ve gri seviyeyi sunmaya izin verebilir, zaman çoklamasıyla yeniden oluşturulan görüntünün çözünürlüğünü ve boyutunu artırır [58,59]. DMD'nin yüksek hız tepkisine, geniş çalışma spektral bant aralığına ve yüksek güç eşiğine sahip olması sebebiyle, 3D hesaplamalı görüntüleme [62] opto-genetikte nöronal aktivite kontrolüne [63] kadar çeşitli uygulamalar için çok kullanışlı bir araç olduğu söylenebilir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, değişken faz yapısını bir ışın üzerine kodlamak için DMD'ler kullanılmıştır [64,65].

## **2.2. Dijital Mikro ayna cihazlar (Digital Micromirror Device-DMD)**

Texas Instruments ilk olarak 1977'de Deforme Edilebilir Ayna Cihazı (Starting as the Deformable Mirror Device) üretirken, 1987'de Dijital mikro ayna cihazını geliştirmiştir [49]. Daha sonraki yıllarda, DMD teknolojisi Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing-DLP) şeklinde ticarileştirilmiştir. 2002'den itibaren, DLP'nin en yaygın kullanım alanı olarak projeksiyonları görmekteyiz. Mikro Elektro-Mekanik Sistem olan DMD ayrıca uzaysal ışık modülatörü görevi gören tek hacimli üretim cihazdır. Bir MEMS CMOS elektroniğinin altında kontrol edilen yüzbinlerce hareketli mikro ayna dizisinden oluşur. Bu aynalar oldukça yüksek yansıtıcılardır ve ışığı modüle etmek için kullanılır, böylece DMD'yi bir optik MEMS, daha özel olarak yansıtıcı bir SLM yapar.

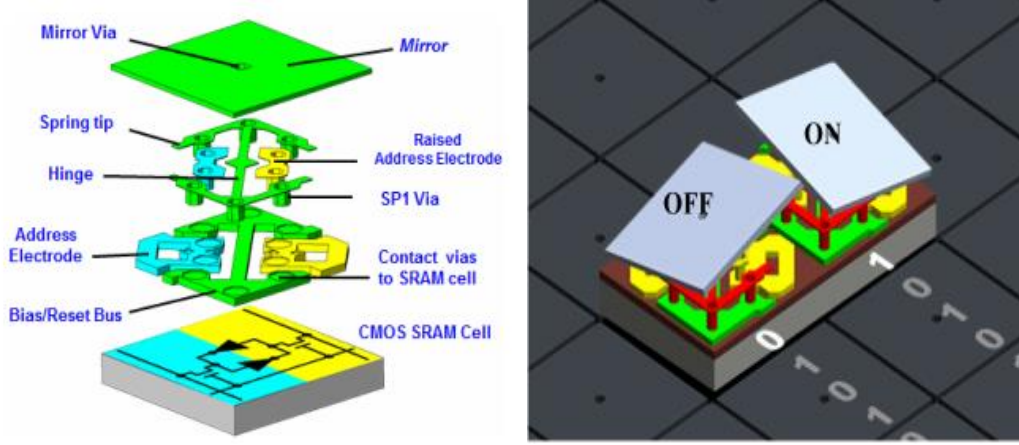
DMD'ler tipik olarak optik litografi, metal püskürtme, plazma oksit biriktirme ve entegre devrelerin üretimi için geliştirilen plazma aşındırma teknikleri gibi teknikler kullanılarak bir yarı iletken levha üzerine imal edilmiş küçük yapılardır [46]. Yarı iletken silikon substrat üzerinde üretilen her bir DMD binlerce (500000'den daha

fazla) ayrı ayrı adreslenebilir mikro aynalardan oluşur (Şekil 2.4). Aynalar alüminyum ile metalize edildiğinden yüksek yansımaya özelliğine sahiptirler. Ayrıca bu aynalar “ + 10, 0, -10, + 12, 0, -12” veya “ + 17, 0, -17” derece dönecek şekilde ayrı ayrı adreslenebilirler.



Şekil 2. 4. Dijital mikro ayna cihazı

Her bir mikro ayna, ışık kaynağına (açık) veya bir ışık kaynağından uzağa (kapalı) eğilmek üzere tasarlanmıştır. Dijital bir sinyal aynanın altındaki bir elektroda enerji verdiğinde ayna eğilir. 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. Uygulanan ön gerilim voltajı sonucunda oluşan elektrostatik alan farkına göre aynanın hareketi sağlanmış olur. Aynanın ilk konumuna gelmesi için kısa reset pulse uygulanır (Şekil 2.5). Bir ayna saniyede 30.000 defadan fazla kapatılabilir ve açılabilir [66].



Şekil 2. 5. Bir DMD pikselinin genişletilmiş görüntüsü [66]

Yaygın olarak kullanılan SLM'ler LCD tabanlıdır. Bu SLM'ler aktarıcı, yansıtıcı, binary veya analog olabilirler. Ancak DMD'yi birçok uygulama için daha çekici kılan hız, hassasiyet ve geniş bant özelliğine sahip olmalarıdır [11]. Ayrıca DMD'ler, ultraviyole ( $10\text{ nm} - 100\text{ nm}$ ) ile kızılötesi ( $750\text{ nm} - 1\text{ mm}$ ) dalga boyları arasındaki elektromanyetik dalgaları modüle edebilir. Piksel yanıt süreleri pikosaniye kadar düşüktür ve pikseller analog veya dijital moda çalıştırılabilirler. Genlik veya faz modülatörü olarak işlev görebilirler. Bu özelliklerden dolayı DMD'lere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Ayrıca DMD'ler optik bilimi ile ilgili çalışmalarda önemli bir araç olmuştur. DMD tabanlı SLM'ler, optik korelasyon, spektrum analizi, telefon ve devre anahtarlama gibi bilgi işleme uygulamalarında kullanılan enine anahtarlama (crossbar switching) ve frekans eksizyonu gibi bir çok uygulama alanına sahiptir [48].

Ayrıca optik ve lazer alanında oldukça önemli bir uygulama sahası olan, açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgaların (bükümlü ışıklar-Twisted Light) üretilmesinde de DMD'ler büyük rol üstlenmektedir.

### 2.3. Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalgalar veya elektromanyetik radyasyon, elektrik alanların ( $\vec{E}$ ) ve manyetik alanların ( $\vec{H}$ ) periyodik olarak değişmesi nedeniyle oluşur. Böylece boşlukta ışık hızıyla ( $\sim 3e^8\text{ m/s}$ ) yayılır. Elektromanyetik dalgayı oluşturan bileşenler ( $\vec{E}$  ve  $\vec{H}$ ) birbirine diktir. Matematiksel terimlerle ifade edilecek olursa bir elektromanyetik dalga,  $\vec{E} \times \vec{H}$  vektörünün vektörel çarpımı yönünde yayılır. Yani

elektromanyetik dalgaların  $z$  yönünde yayıldığını varsayarsak,  $x - z$  düzleminde  $x$  eksenini elektrik bileşeni  $\vec{E}$  içerirken,  $y - z$  düzleminde  $y$  eksenini manyetik bileşen  $\vec{H}$ 'yi içerir. Elektromanyetik dalgalar genlik, dalga boyu ve frekans gibi temel özelliklere sahiptir. Bir elektromanyetik dalganın genliği, alan miktarlarının maksimum yoğunluğunu belirler. Elektrik alanın genliğini ( $E_0$ ) metre başına volt ( $V/m$ ) ve manyetik alan genliğini ( $H_0$ ) metre başına amper ( $A/m$ ) cinsinden verilir. Bir elektromanyetik dalganın dalga boyu ( $\lambda$ ), elektrik ve manyetik alanların ardışık iki tepe veya iki çukur arasındaki mesafesidir. Saniyedeki döngü sayısına frekans ( $f$ ) denir. Frekans birimi, Hertz ( $Hz$ ) cinsinden ifade edilir. Dalga boyu ve frekans, ters orantılı olan niceliklerdir. Bir elektromanyetik dalganın boş alanda yayılma hızı ışık hızına ( $c$ ) eşittir. Bu nicelikler arasındaki matematiksel bağıntı şu şekilde verilebilir.

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik radyasyonun frekans aralığı ve bunların ilgili dalga boyları ve foton enerjileridir. Elektromanyetik dalgalar, çeşitli dalga boylarına / frekanslarına göre sınıflandırılır ve düzenlenebilir. Bu sınıflandırma elektromanyetik spektrum olarak bilinir. Elektrik ve manyetik alanların periyodik değişiminin nasıl meydana geldiğine ve üretilen güce bağlı olarak, elektromanyetik spektrumun farklı dalga boyları üretilir.

Elektromanyetik spektrum; gama ışınları, x-ışınları, ultraviyole ışınları, görünür ışın, kızılötesi ışın ve radyo dalgalarına kadar bilinen  $10^4 m - 10^{-14} m$  dalga boyu arasındaki geniş bir aralığa sahip elektromanyetik dalgaların dizilimleridir. Tablo 2.1, elektromanyetik dalgalara ait bu spektrumları göstermektedir.

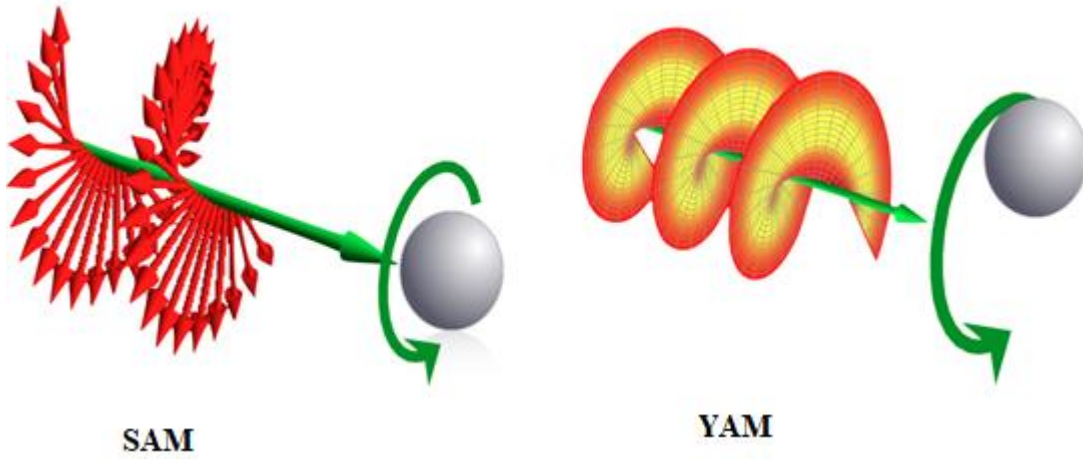
**Tablo 2. 1.** Elektromanyetik dalgalara ait spektrumlar

Elektromanyetik Radyasyon	Dalga Boyu	Frekans	Foton Enerjisi
Gama ışınları	$10^{-2} nm - 10^{-6} nm$	$3x10^{22} Hz - 3x10^{17} Hz$	$10^4 eV - 10^8 eV$
X-ışınları	$10^{-2} nm - 10 nm$	$3x10^{20} Hz - 3x10^{16} Hz$	$10^2 eV - 10^6 eV$
Ultraviyole	10 nm - 100 nm	$3x10^{17} Hz - 3x10^{15} Hz$	$10^1 eV - 10^3 eV$
Görünür	400 nm - 750 nm	$3x10^{15} Hz - 3x10^{14} Hz$	$1,8x10^0 eV - 3,1x10^0 eV$
Kızılötesi	750 nm - 1 mm	$3x10^{14} Hz - 3x10^{11} Hz$	$10^{-3} eV - 10^0 eV$
Mikrodalga	1 mm - 10 cm	$3x10^{12} Hz - 3x10^8 Hz$	$10^{-3} eV - 10^{-6} eV$
Radyo ve Tv	10 cm - 1 km	$3x10^{10} Hz - 3x10^4 Hz$	$10^{-5} eV - 10^{-10} eV$

## 2.4. Elektromanyetik Dalgaların Açısal Momentumu / Optik

### Girdaplar

Işık veya daha genel olarak elektromanyetik dalga yalnızca enerjiyi değil, aynı zamanda tüm nesnelere karakteristik bir özelliği olan momentumu da taşır. Işık ayrıca dönme hareketindeki tüm nesnelere bir özelliği olan açısal momentumu da taşıyabilir. Örneğin; bir ışık demeti ileriye doğru yayılırken kendi eksenini etrafında dönebilir. Bir ışık demeti için genellikle iki dönme şekli tanımlanabilir (Şekil 2.6). Birincisi yayılma yönü etrafındaki elektrik ve manyetik alanların dinamik dönüşüdür (SAM). İkincisi ana ışın eksenini etrafındaki ışık ışınlarının dinamik dönüşüdür (YAM). Herhangi bir ışığın toplam açısal momentumu, spin ve yörüngesel katkılarının toplamı olarak verilir ( $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ ) (Burada  $\vec{J}$  toplam açısal momentum,  $\vec{L}$  yörüngesel açısal momentum ve  $\vec{S}$  spin açısal momentumdur).



Şekil 2. 6. Işık için SAM ve YAM [67].

Açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar, eksen boyunca dik bir düzlemden bakıldığında merkezi karanlık bir ışık halkası olarak görünürler [68]. Bu dalgalar, lazer kavitesinin manipülasyonu ile [68,69], mod dönüştürücüler kullanılarak [70] veya bilgisayar tarafından oluşturulan hologramları kullanan basit bir teknik ile [68,71,72] oluşturulabilir. Bilgisayar tarafından holografi oluşturma basit bir tekniktir [68,72]. Birçok çalışmada bilgisayar tarafından oluşturulan hologramların nasıl tasarlanacağı gösterilmiştir [73,74].



### 2.4.1. Spin ve Yörüngesel Açısal Momentum

Optik alanlar için toplam açısal momentum kavramı uzun zamandır bilinmektedir. Bununla birlikte YAM taşıyan bir ışık demeti kavramı, Laguerre-Gauss ışınlarının (paraksiyel yaklaşım içinde) iyi tanımlanmış bir YAM taşıdığı keşfedilene kadar önemi tam olarak bilinmiyordu [75]. Bu keşiften sonra ışığın YAM'a olan modern ilgi başlamış ve birçok bilimsel çalışmaya da konu olmuştur.

Işığın mekanik etkilerinin nicel olarak işlenmesi ancak Maxwell'in dinamik elektromanyetik dalgalar teorisine ışık teorisi entegre edildikten sonra mümkün olmuştur. Bu teori ile Poynting elektromanyetik alandaki enerji için bir süreklilik denklemi türetmiştir [76]. Heaviside, Maxwell denklemleri için vektörel notasyonu tanıttıktan sonra, bu süreklilik denklemi Poynting vektörü kullanılarak modern formunda yazılabilir [77]. İlginç bir şekilde, elektromanyetik alandaki doğrusal momentum yoğunluğu, seçilen birimler sistemine bağlı olarak, sabit faktörlerden ayrı bir Poynting vektörü tarafından da verilmektedir. Poynting ayrıca dönen bir şaft şeklindeki dairesel polarize ışığın açısal momentumu için bir ifade türetmiştir [78]. Daha sonra, Poynting'in ifadesi, dairesel polarize ışık nedeniyle çeyrek dalga plakasında tork ölçülerek doğrulanmıştır. Bu zamana kadar kuantum mekaniği sağlam bir şekilde kurulmuş ve Beth, torkun klasik olarak hesaplanıp hesaplanmadığını veya dairesel polarize ışığın her bir kuantumunun  $\pm\hbar$  açısal momentum taşıdığı varsayımından aynı niceliksel sonucun elde edilebileceğini göstermiştir [79].

Işık huzmelerindeki spin açısal momentum böylece dairesel polarize ışık açısından oluşturulurken, ışık huzmelerinin yörüngesel açısal momentumu daha az tanıdık bir kavram olarak kalmıştır. Ancak bu, genel olarak ışık alanlarının yörüngesel açısal momentumunun çalışılmadığı anlamına gelmez. Toplam açısal momentum yoğunluğu, radyal vektör ile yörünge açısal momentum için tipik bir form olan doğrusal momentum yoğunluğunun vektörel çarpımı ile verilir [77]. Bu ilgi çekici gerçek, toplam açısal momentumu genel bir elektromanyetik alan için spin ve yörünge parçalara bölmenin zorluklarını göstermektedir. Leiden Üniversitesi'nde, paraksiyel optik veya lazer laboratuvarında gerçekleştirilebilen Laguerre-Gauss ışık demetlerinin, toplam açısal momentumunun spin ve orbital parçalarının iyi tanımlanmış bir ayrıma sahip olduğu keşfedilmiştir [75]. Bu, optik mikro

manipülasyon ve optik yakalama alanında ışığın açısal momentumunun geniş bir şekilde kullanılmasına yol açmıştır.

Spin ve orbital açısal momentuma ayrılma, ışığın kuantum mekanik özellikleri için de çok önemlidir. İki ortogonal polarizasyon, örneğin sol ve sağ dairesel polarize ışık ve dolayısıyla spin açısal momentumu, kuantum bilgisinde bir qubit'in [Qubit kuantum hesaplamada üst üste binme sergiler. Bu nedenle, normal bitlerin aksine, qubitler aynı anda hem 1 hem de 0 olabilir.] optik bir uygulama olarak uzun zamandır kullanılmaktadır. Hem spin hem de orbital açısal momentumda dolaşmış foton çiftleri üretme olasılığı kuantum bilgisinde bir kaynak olarak optik açısal momentuma güçlü bir ilgi yaratmıştır. Spin açısal momentumunun aksine, orbital açısal momentum iki ortogonal durumla sınırlı değildir, bu yüzden yüksek boyutlu bir kuantum sistemi olarak kullanılır [77].

Simetrik bir momentum akı yoğunluğu için, açısal momentum süreklilik denklemi, radyal konumun bir vektör ürünü ve ilgili doğrusal yoğunluk tarafından verilen bir yoğunluk, akı yoğunluğu ve kaynak yoğunluğu ile yerine getirilebilir. Bu, açısal momentumun yalnızca  $L = r \times P$  çapraz çarpımı tarafından verilen yörüngesel açısal momentuma bağlı olduğu ve tork  $\tau = r \times F$ 'nin tamamen F kuvveti tarafından belirlendiği katı bir cisme benzer. Süreklilik teorisinde bu, içsel açısal momentum olmadığını ve içsel torkun olmadığını ve yeterince küçük hacimler için tüm açısal niceliklerin karşılık gelen doğrusal miktar tarafından zaten verildiğini gösterir. Klasik akışkanlar için bu oldukça haklı bir varsayımdır, ancak dairesel polarize ışık spin açısal momentumu taşır. Bu, toplam açısal momentumun belirli kısımlarına "spin" ve "orbital" terimlerini atamanın zorluklarını gösterir. Işık demetleri için bu zorluk, en azından kısmen, açısal momentum yoğunluğunun kendisi yerine açısal momentum akısı kullanılarak çözülebilir [80].

Toplam açısal momentum, spin ve yörünge açısal momentumlarının toplamıdır. SAM optik polarizasyonla, YAM ise ışık ışınlarının faz yapısından türetilen açısal momentum ile ilişkilendirilir. Alan açısından toplam açısal momentum şu şekilde ifade edilebilir:

$$J = \int \epsilon_0 r \times (E \times B) dV = L + S \quad (2.2)$$

Burada  $L$  yörünge kısmı ve  $S$  spin kısmını temsil etmektedir. YAM ve SAM ayırımını yapabilmeyen en açık yolu,  $B$ 'yi, vektör potansiyeli  $A$  cinsinden yazmak ve küçük bir manipülasyondan sonra aşağıdaki denklemleri bulmaktır. Eşitlik 2.3 ve 2.4'te  $i$ -Alt simgeli semboller, karşılık gelen vektörlerin kartezyen bileşenlerini gösterir.

$$J = \epsilon_0 \int [E_i(r \times \nabla)A_i + E \times A - \nabla_i(E_i r \times A)]dV \quad (2.3)$$

$$= \epsilon_0 \int [E_i(r \times \nabla)A_i + E \times A]dV - \epsilon_0 \int (r \times A)E \cdot dS$$

Burada Gauss teoremi kullanılmaktadır. Alanlar yeterince hızlı azalırsa yüzey integrali sıfır olur. Böylece yörünge ve spin parçaları şu şekilde tanımlanabilir:

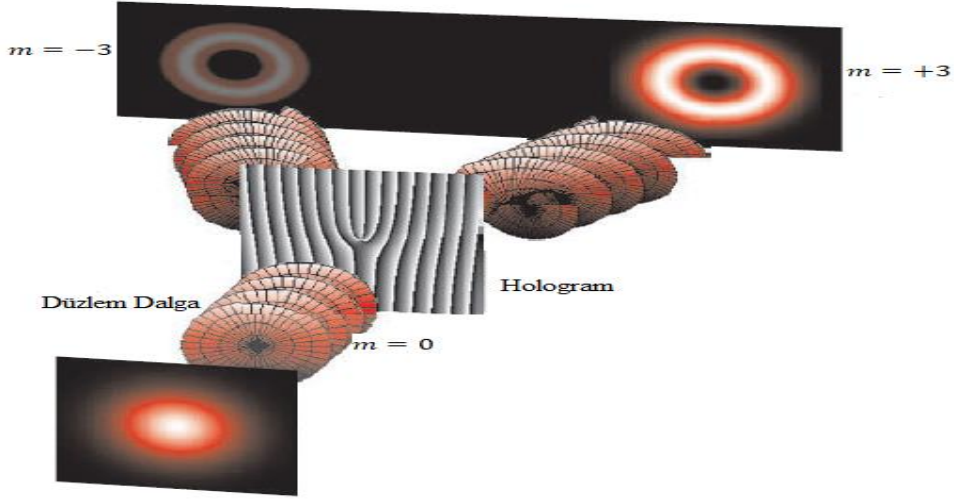
$$L = \epsilon_0 \int E_i(r \times \nabla)A_i dV \quad (2.4)$$

$$S = \epsilon_0 \int E \times A dV \quad (2.5)$$

Kuantum teorisinde açısal momentum operatörü ile yapılan benzetme, ilk bölümün yörünge açısal momentum ile ilişkisini göstermektedir. Bununla birlikte, ikinci kısım açıkça alanın vektörel doğasına ve dolayısıyla polarizasyonuna bağlıdır, bu da onu spin ile ilişkilendirmeyi doğal kılar.

#### 2.4.2. Azimutal Faz Yapısı

**Bir ışık ışınının fazı**, yayılma eksenini etrafında tıpkı bir tirbuşon gibi bükülebilir. Bir ışık dalgası  $X \cdot e^{i\beta}$  formunda kompleks sayılarla ifade edildiği zaman, silindirik koordinat düzleminin  $(r, \theta, z)$  azimutal açısının, faz dağılımına oranı kıvrılma olarak tanımlanmaktadır. Burada  $X$  alanının genliğini,  $\beta$  ise dalga cephesinin fazını ifade etmektedir. Öte yandan  $r, \theta, ve z$  parametreleri ise sırasıyla radial mesafe, polar açı ve azimut açısını ifade etmektedir. Söz konusu kıvrılmadan dolayı,  $z$  eksenini boyunca ışık dalgası ortadan kalkar. Çünkü açısal koordinatın  $\theta$  değeri  $r = 0$ 'da iyi tanımlanamaz ve bu durum da genliğin yok olduğu bir faz tekilliğine yol açar [68,81].  $\beta = m\theta$  eşitliği helisel bir faz dağılımı ile tanımlanır [1]. Böyle bir ışık ışını, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi düz bir yüzeyde, merkezi karanlık bir delik olan parlak halka gibi görünecektir.

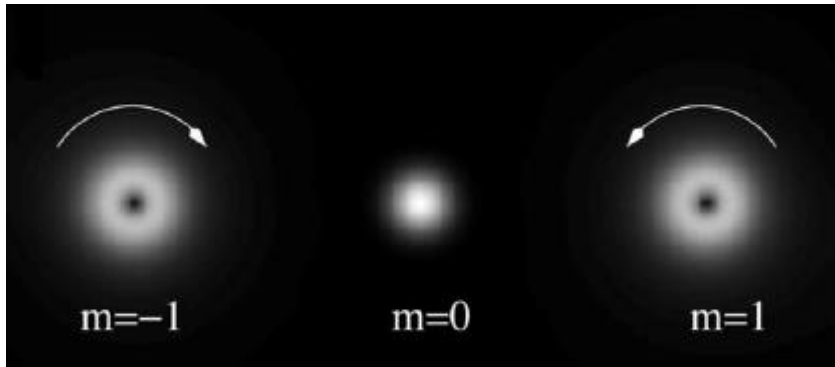


**Şekil 2. 7.** Açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar[68].

Alanın sürekliliğini sağlamak için  $\theta = 2\pi$  değerinde karanlık nokta etrafındaki faz sargılarının sayısını belirten  $m$  tamsayısı vardır. Bu sayı, girdabın topolojik yüküdür.  $m$ 'nin fiziksel anlamı, pozitif (saat yönünün tersine dönüş için) veya negatif (saat yönünde dönüş için) olabilen tekillik etrafındaki faz dönüş hızıdır (Şekil 2.7) [68]. Açısal momentum  $L_z$ 'nin z-bileşeni bize  $m$ 'nin tanımını verir. Işık ışını için her foton başına  $L_z$  değeri,  $\hbar$  Planck sabitinin  $2\pi$ 'ye bölümüyle elde edilir.

$$L_z = -i\hbar \frac{\partial \beta}{\partial \theta} = -i\hbar m \quad (2.6)$$

$\theta = 2\pi$ 'deki süreklilik koşulunun, açısal momentumun nicelendirilmesini ifade ettiği açıktır.  $L_z$  değeri, ışın ilerledikçe  $\vec{p}$  momentum vektörünün kara delik etrafında bir dönme hareketi yaptığını gösterir.



**Şekil 2. 8.** Paralel yönde ilerleyen aynı yüke sahip iki kiriş. Topolojik yükün işaretine göre dönüş yönleri [68].

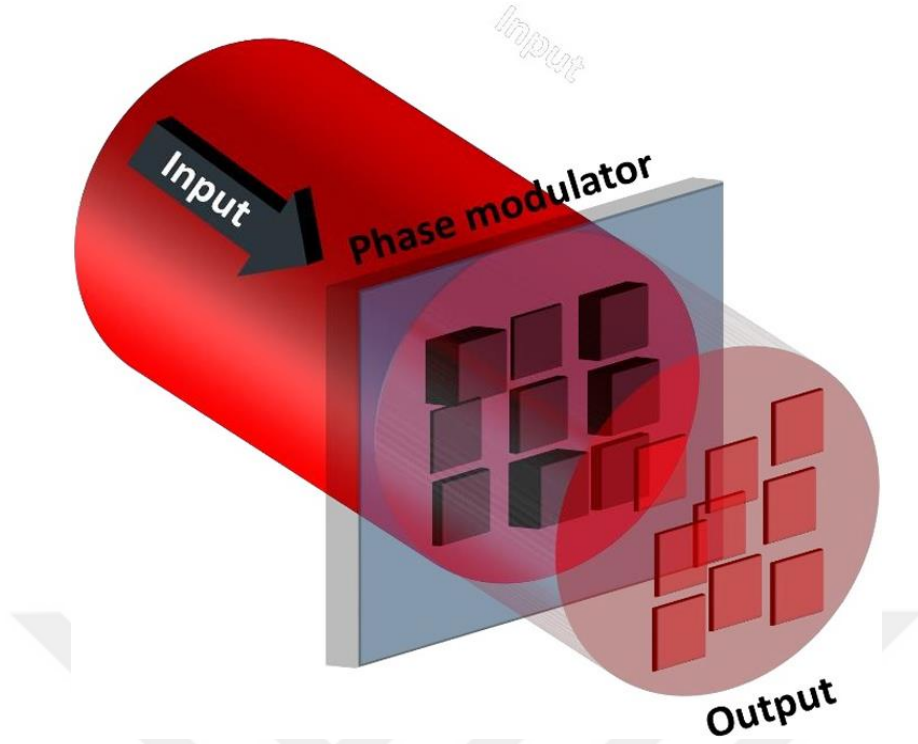
## 2.5. Yörünge Açısal Momentum Taşıyan Optik Işıkların Üretimi

Yapılandırılmış ışık, yoğunluk, faz ve polarizasyon gibi doğal parametreleri belirli bir yapı elde etmek için manipüle edilen elektromanyetik radyasyonu ifade eder. Gereksinimlere bağlı olarak, yukarıdaki parametrelerden biri veya daha fazlası özelleştirilir ve kontrol edilir. Kalınlığa veya kırılma indisi modülasyonuna veya her ikisine de sahip bir optik eleman ile ışık fazı yapılandırılabilir. Daha yüksek bir kalınlık / kırılma indisi daha uzun bir optik yolla sonuçlanırken, daha düşük değerler daha kısa optik yollarla sonuçlanır. Işık fazının yapılandırılması sonuç olarak denklem (2.7)' de verilen ışın boyunca bir diferansiyel faz gecikmesidir.

$$\Delta\phi(x,y) = 2\pi n\Delta t(x,y)/\lambda \cong 2\pi t\Delta n(x,y)/\lambda \quad (2.7)$$

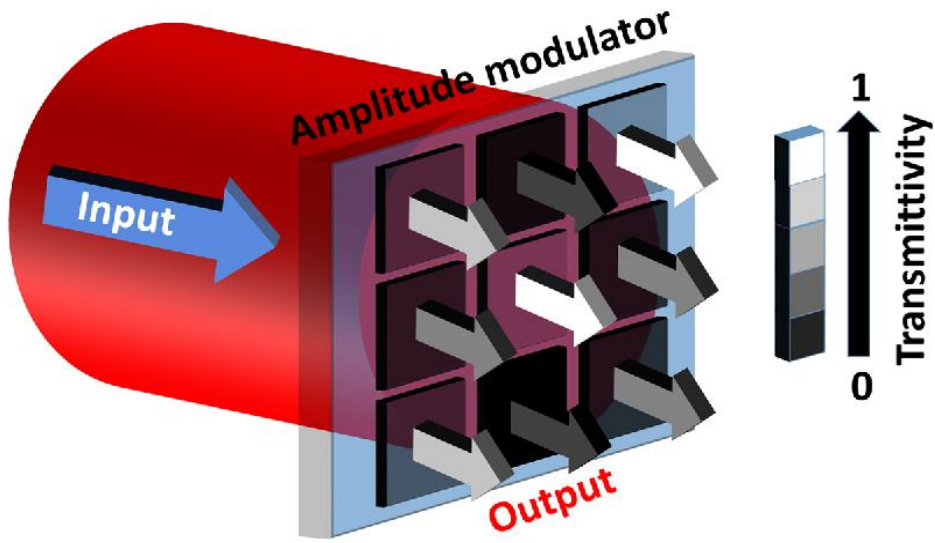
Burada  $n$  ortam kırılma indisi,  $t$  kalınlık ve  $\lambda$  dalga boyudur.

Bir enine faz modülasyon örneği şekil 2.9' da gösterilmiştir. Işık fazının yapılandırılmasında faz modüle edici SLM'ler arasında holografik optik elemanlar, kırılma / kırınımlı optik elemanlar ve dielektrik yüzeyli malzemeler bulunur. Bu elemanlar pasif SLM'leri oluşturur. Ayrıca ışık fazının yapılandırılması LCD ve DMD tabanlı aktif SLM'ler kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Bu tür aktif cihazların bariz avantajları, esneklikleri ve yeniden yapılandırılabilirlikleridir. Bununla birlikte bu tür cihazlar biraz pahalıdır. Fakat faz kalıpları arasında geçiş gerektiren uygulamalar için oldukça avantajlıdır [24].



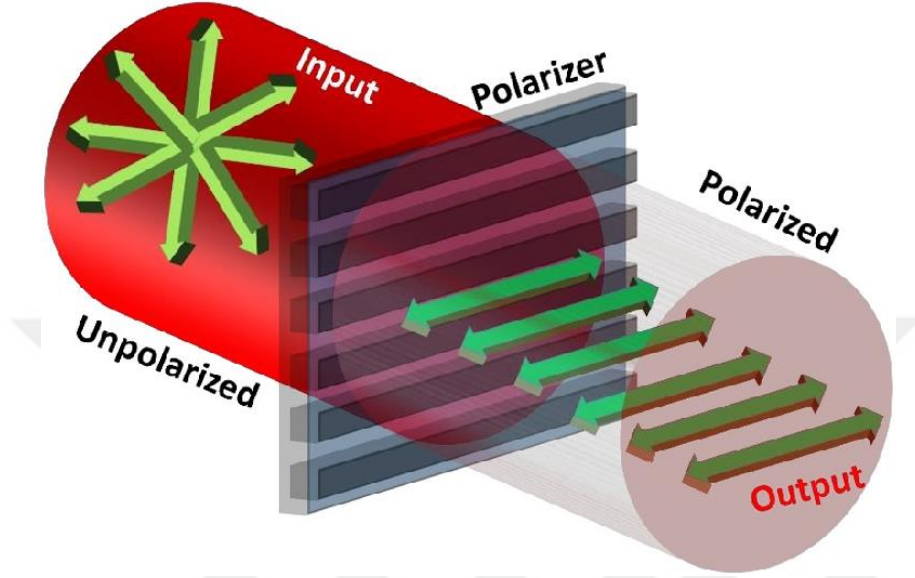
**Şekil 2. 9.** Işın kesiti boyunca değişen faza sahip bir SLM kullanarak bir ışık ışınının faz modülasyonu [24].

Yapılandırılması nispeten daha kolay bir parametre, enine düzlem boyunca değişken geçirgenlik değerlerine sahip genlik maskesinden oluşan bir SLM şekil 2.10'da gösterildiği gibidir. Bu yaklaşımın yaygın bir örneği bir DMD'nin kullanılmasıdır. DMD'nin genliği manipüle eden bir cihaz oluşturmasına rağmen, cihazdan belirli bir mesafede istenen dağılımı oluşturmak üzere programlanabilmektedir.



**Şekil 2. 10.** Işın kesiti boyunca değişen geçirgenliğe sahip bir SLM kullanarak bir ışık ışınının genlik modülasyonu [24].

Polarizasyon modülasyonu, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi bir polarizör kullanılarak elde edilebilir. Bazı uygulamalar için, genlik veya faz gibi yalnızca bir parametreyi modüle etmek yeterliyken, bazı durumlarda belirli bir yapıya sahip bir optik ışın üretmek için bir veya daha fazla parametreyi aynı anda modüle etmek istenir.



Şekil 2. 11. Polarizör kullanarak ışık ışınının polarizasyon modülasyonu [24].

Kırılma indisinin ve/veya kalınlığın uzaysal değişimi, fazı değiştirir. Bu tanım gereği, kırılma elemanları bile SLM'ler olarak kabul edilebilir. Fakat bu kırılma elemanlarının imalatı zor ve zaman alan bir işlemdir. Ayrıca bu pasif SLM'ler model parametreler üzerinde gerçek zamanlı kontrol ile kırınım, girişim ve holografi kavramları dinamik bir şekilde gösterilmesine izin vermezler. Bu zorlukların üstesinde gelmek için DMD veya LCD tabanlı aktif SLM'ler kullanılması oldukça avantajlıdır. Aktif SLM'ler için faz maskesi tasarımı için holografik teknikler kullanılabilir.

### 2.5.1. Hologram

Hologram, bir nesnenin üç boyutlu (3D) bilgilerini kaydetmek ve yeniden oluşturma bilimidir. Başka bir ifade ile hologram bir dalga cephesinin hem fazını hem de genlik bilgilerini yakalayan bir tekniktir. Hologram, optik dalga cephesini kaydetmek ve yeniden yapılandırmak için ışığın girişim ve kırınım özelliklerini kullanır. Bu çalışmanın temel amaçlarından biri, açılal momentuma sahip elektromanyetik dalgaların üretimi için çatal hologram kullanılmasıdır.

Geniş kullanım alanı bulunan açısız momentuma sahip elektromanyetik dalgaların üretilmesi birkaç şekilde gerçekleştirilebilir. Açısız momentuma sahip elektromanyetik dalgalar lazer kavitesinin manipülasyonu ile [68], mod dönüştürücüler kullanılarak [70] veya bilgisayar tarafından oluşturulan hologram (Computer Generated Holography-CGH) tekniğiyle [68,71–73,82] üretilir. CGH kullanılarak üretilen girişim kalıbı yalnızca bilgisayar programında mevcut olan sanal bir nesnedir (Şekil 2.12). Bu sanal nesne (hologram) bir ortama basıldığında (SLM veya şeffaf bir asetat kâğıda) ve aydınlatıldığında ortaya çıkan elektromanyetik dalga bir açısız momentum kazanacaktır.

CGH yöntemi, diğer hologram oluşturma yöntemleri ile karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlara sahip olduğu söylenebilir:

- ✓ Özel holografik kayıt materyallerine ihtiyaç duymaz,
- ✓ Fiziksel görünümünü kaydetmeye gerek duymadan optik dalga duvarını sentezleyebilir,
- ✓ Holografik datayı kolayca kopyalayabilir, aktarabilir, manipüle edebilir ve depolayarak eşsiz bir dalga duvarı kontrolü sunar.

### **2.5.2. Bilgisayar Tarafından Oluşturulan Hologram (Computer-Generated Hologram-CGH)**

CGH, hologramların dijital olarak üretilmesi için kullanılan yöntemlerle ilgilendir. Hologram daha sonra bir film üzerine basılabilir veya holografik yeniden yapılandırma için bir SLM'ye yüklenebilir. CGH'ler, üç boyutlu nesnelerin gerçek dünyada var olmak zorunda olmaması avantajına sahiptir. Başka bir deyişle, kişinin göstermek istediği nesneler hayali olabilir. CGH'lerin üretilmesi için, çeşitli görüntüleme cihazları ve yeniden yapılandırma yöntemleri için farklı hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir.

Genellikle CGH belirli bir görüntünün iki boyutlu (2D) Fourier Transformunun binary olarak gösterilmesidir. Görüntünün daha sonra hologramdan yeniden oluşturulması için bir Fourier transform lens kullanılır. Son yıllarda aktif bir araştırma alanı olan CGH ile ilgili literatürde birçok çalışma görülmektedir. Örneğin, Chuying Yu ve ark. [83] kuaterniyon Fresnel dönüşümü, kaos ve CGH'ye dayalı şifreleme şemasını araştırmıştır. Schwerdtner ve ark. [84] bir görüntüleme cihazı kullanılarak holografik olarak oluşturulan bir nesnenin yeniden yapılandırılması için

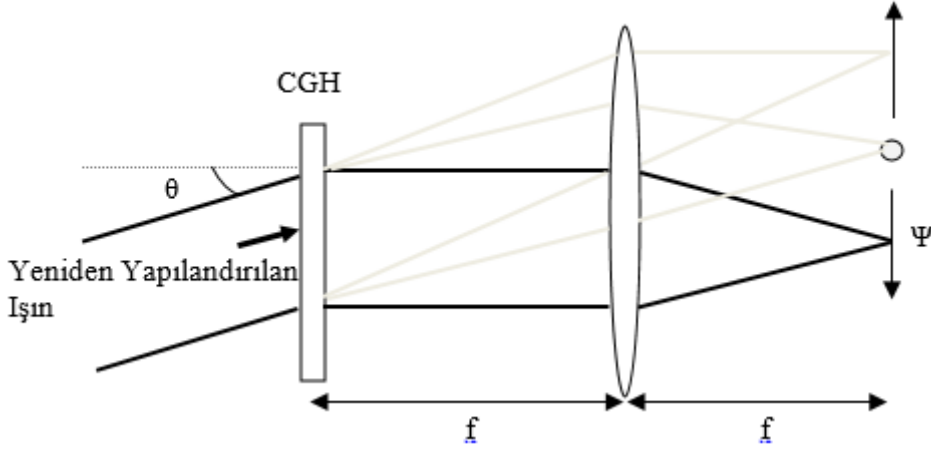


hologram hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Leister ark. [85] gözlemci penceresinden bakan bir gözlemcinin gözlemlenen üç boyutlu (3D) bir sahneyi yeniden oluşturulabilmesi için uygun bir şekilde kodlanmış bir hologram elde etme yöntemi önermiştir. Bu çalışmaların yanı sıra Sapma fazı tipi hologramlar, en yaygın CGH türleridir ve bu tür hologramlarla da ilişkili birçok çalışma bulunmaktadır [86–88]. Örneğin, Brown ve Lohmann [89], Fourier dönüşüm fazı dışında bir faz seçerek hologram rekonstrüksiyonunu geliştirmiştir. Tripathy ve ark. [90], istenilen kırınım verimini elde edilmesinde kullanılacak holografik ızgara tasarımı için bir algoritma önermiştir.

### **2.5.2.1. Lohmann Hologramı**

Modern dijital holografinin ortaya çıkışı genellikle Lohmann ve arkadaşlarının altmışlı yılların ortasında yaptığı çalışmayla başladığı söylenebilir [91]. Bir Lohmann hologramı (veya The Detour-Phase hologram), belirli bir görüntünün örneklenmiş Fourier dönüşümüdür. Bir Fourier Dönüşüm hologramında görüntünün rekonstrüksiyon için pozitif bir lensin Fourier dönüştürme özellikleri kullanılır. Dolayısıyla bu süreç iki adımdan oluşur: birincisi belirli bir görüntünün örneklenmiş Fourier dönüşümünü gerçekleştirmek ve ikincisi istenen görüntüyü hologramdan yeniden oluşturmak için bir Fourier dönüştürücü mercekle kullanılmaktadır (Şekil 2.12). Fourier tabanlı CGH sadece 2D görüntüleri yeniden yapılandırabilir. Brown ve Lohmann [91], 3D nesnelerin CGH'nı hesaplamak için bir teknik geliştirdiler. 3D nesnelere yayılan ışığın hesaplanması, Fresnel-Kirchhoff kırınım integraline olağan parabolik yaklaşıma göre gerçekleştirilir. Bu nedenle, CGH tarafından yapılandırılacak dalga cephesi, her bir nesne düzleminin Fourier dönüşümünün ikinci dereceden bir faz faktörü ile değiştirilen derinlikteki süperpozisyonudur.

Şekil 2.12'de gösterilen Lohmann yöntemine göre bir Fourier hologramının yeniden yapılandırması için bir optik şema geliştirilmiştir. Lohmann yönteminde, hologram düzlemi, her biri bir açıklık içeren daha küçük dikdörtgenlere bölünür [91]. Şekil 2.13'te Lohmann hücresinin bir örneği görülmektedir. Genliğin kontrolü, açıklığın boyutu ile sağlanır. Fazın ayarlanması için açıklığın konumu değiştirilir. Bu, binary aktarım modeliyle sonuçlanır.



Şekil 2. 12. Lohmann hologramı için yeniden yapılandırma şeması [90].

Şekil 2.12,  $f$  odak uzaklığına sahip bir Fourier dönüşüm merceği aracılığı ile bir Fourier hologramını yeniden yapılandırma kurulumunu göstermektedir.  $H(x, y)$  hologramı ve yeniden oluşturulmuş görüntünün  $(\Omega(x, y))$  genliği arasındaki ilişki denklem 2.8'deki gibidir.

$$\Omega(x, y) = \mathcal{F}\{H(x, y)\Omega_r(x, y)\}_{k_x=\frac{k_0x}{f}, k_y=\frac{k_0y}{f}} \quad (2.8)$$

Burada,  $\theta$  eğim açısı ve  $\Omega_r(x, y) = \exp(-jk_0 \sin\theta x)$  bir düzlem dalga rekonstrüksiyon ışığının karmaşık genliğini gösterir.

Genel olarak, hologram  $H(x, y) = a(x, y)\exp[-j\phi(x, y)]$  gibi kompleks bir fonksiyondur. Burada  $a(x, y)$  ve  $\phi(x, y)$  sırasıyla hologramın genliği ve fazıdır. Dolayısıyla amacımız kompleks bir fonksiyon olan  $H(x, y)$  hologramına benzeyen binary genlik modeli  $H_b(x, y)$  fonksiyonunu tasarlamaktır. Yeniden yapılandırma düzlemi  $m \times n$  boyutunda bir pencereyle sınırlıysa,  $H_b(x, y)$ 'yi pencerenin içinde olacak şekilde bulmak mümkündür.

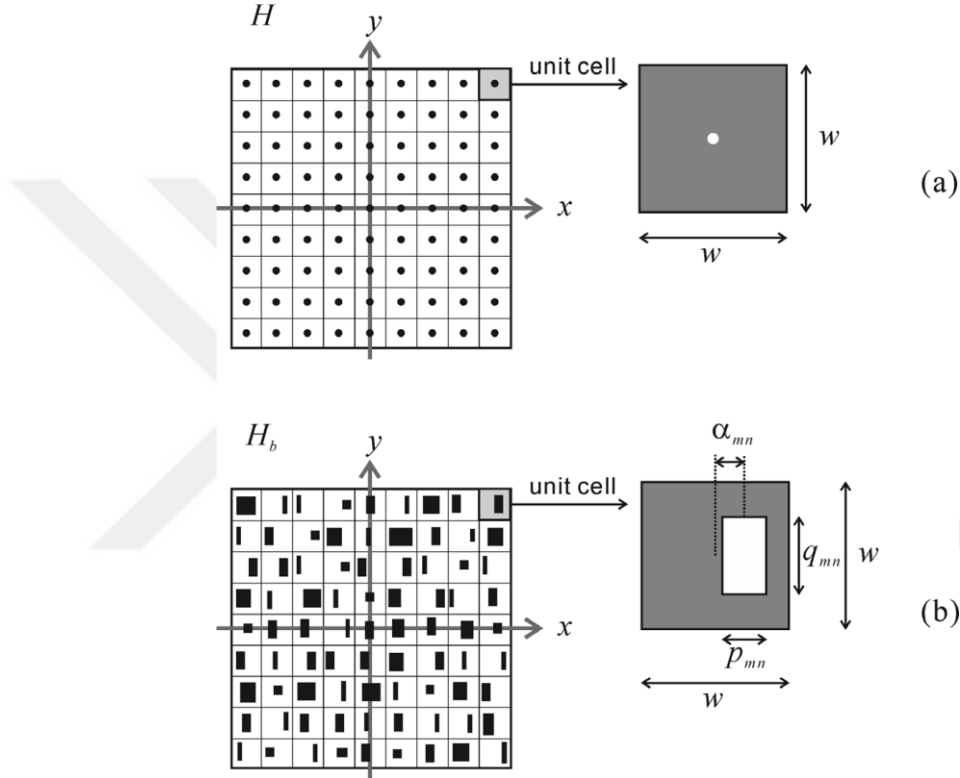
$$\mathcal{F}\{H_b(x, y)\Omega_r(x, y)\} \approx \mathcal{F}\{H(x, y)\Omega_r(x, y)\} \quad (2.9)$$

İlk olarak, hologramın alanı bir dizi birim hücreye bölünür ve şekil 2.13'te gösterildiği gibi her hücrenin boyutu  $w \times w$ 'dir. Kompleks hologram  $(H(x, y))$  için, hem  $a(x, y)$  hem de  $\phi(x, y)$ 'nin herhangi bir hücre içinde yavaş değiştiği

varsayılır; hücreler daha sonra bir dizi nokta kaynağıyla değiştirilebilir ve aşağıdaki gibi örneklenmiş bir karmaşık hologram elde edilir.

$$H_s(x, y) = \sum_{m,n} a_{mn} e^{-j\phi_{mn}} \times \delta(x - x_m, y - y_n) \quad (2.10)$$

Burada  $(m, n)$   $x_m = mw, y_n = nw$  ;  $a_{mn} = a(x_m, y_n)$  ve  $\phi_{mn} = \phi(x_m, y_n)$  merkezli hücrenin indeksleridir.



**Şekil 2. 13.** Hücre tanımı (a) kompleks bir hologram ve (b) bir detour-phase binary hologram [92].

Binary hologram  $a_{mn}$  ile orantılı bir alanın opak arka planında şeffaf bir açıklık açarak örneklenmiş karmaşık hologram  $H_s(x, y)$ 'yi simüle edebilir. Işığın fazı, açıklığın merkezini hafifçe kaydırarak kontrol edilebilir. Her hücre içinde açılan açıklık,  $p_{mn} \times q_{mn}$  boyutunda bir dikdörtgendir. Böylece binary hologram şu şekilde ifade edilebilir [92]:

$$H_b(x, y) = \sum_{m,n} \text{rect} \left( \frac{x - x_m - a_{mn}}{p_{mn}}, \frac{y - y_n}{q_{mn}} \right) \quad (2.11)$$

## 2.6. Açısal Momentuma Sahip Elektromanyetik Dalgaların Yarı İletken Malzemeler Üzerindeki Elektriksel Etkisi

YAM taşıyan ışığın üretilebilmesi fotonikte yeni çalışmaların önünü açmıştır [93]. Bu tür bir ışık mikroskopik parçacıkları (optik cımbız) [94–96], atomları, molekülleri [10,97,98] ve ayrıca Bose-Einstein yoğunlaşmalarını [99] yakalamak, döndürmek ve manipüle etmek için kullanılabilir. Açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar kullanılarak elektronun enerji seviyelerinin etkilenebildiği teorik olarak gösterilmiştir [100]. Bu dalgaların yarı iletkenler tarafından soğurulması ve yerel akımların oluşumu teorik olarak da gösterilmiştir [4]. Ayrıca bu dalgaların iletkenlerdeki yük taşıyıcılarının taşıma özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması oldukça ilginç sonuçlar verebilir.

Bantlar arası uyarımlarla ilişkili foton kaynaklı akımlar, foton taşıyıcı uyarımların kuantum girişimi ile etkileyebilir. Bantlar arası uyarımları, açısal momentum kullanarak tetikleme olasılığı teorik olarak gösterilmiştir. Açısal momentum ile yarı iletkenler arasındaki etkileşimle ilgili son araştırmalar, açısal momentumun yarı iletkenler tarafından emilimine ve elektronik geçişlerin kuantum noktalarındaki çalışmasına ayrılmıştır. Burada açısal momentum taşıyan homojen olmayan bir elektromanyetik alanın kuantum halkalarda elektriksel akımlar ürettiği ve dolayısıyla halka çevresinde lokalize bir ışık kontrollü manyetik alan oluştuğu söylenebilir [4,100].

Yarı iletken ve iletken malzemeler içerisinde yer alan elektronlar, dışarıdan uygulanan elektromanyetik bir dalga ile boş olan seviyelere yükseltgenirler. Özellikle iletim bandına yükseltgenerek serbest hale gelen elektronlar akıma katkı sağlarlar. Akıma katkı sağlayan elektron sayısı metallerde çok yüksekken, yarı iletkenlerde uygulanan dış etkinin ve enjekte edilen yük taşıyıcılarının sayısına bağlıdır. Elektromanyetik dalga ile sahip olduğu enerji, dalga boyu, frekans ya da polarizasyon elektronun bir üst seviyeye yükseltgenmesinde kullanılan temel parametrelerdir. Uygun dalga boyuna sahip bir elektromanyetik dalga yarı iletkenlerdeki değerlik elektronlarının bant aralığını geçerek iletim bandına oturmasını sağlayacaktır. Elektromanyetik dalga ile sahip olduğu polarizasyon, spin ya da yörüngesel açısal momentum ise elektronların farklı manyetik kuantum sayılarına oturmasını ya da spin polarize durumuna geçmesini sağlayacaktır. İşte bu



Burada  $\Psi = \Psi(x, y, t)$  elektronun dalga fonksiyonu ve  $\vec{A} = \vec{A}(x, y, z = 0, t)$ , gelen ışığın şerit düzlemindeki vektör potansiyelidir. Burada  $\nabla \vec{A} = 0$  kabul edilmektedir. Genel olarak bükümlü ışık vektör potansiyeli, enine (Transversal) değildir. Boyuna (Longitudinal) bileşen, ışığın  $z$  yönü boyunca dalga vektörünün mertebesinde. Elektron, bükümlü ışığın etki alanına girmeden önceki başlangıç durumu şu şekilde tanımlanabilir:

$$\Psi(t = 0) = N \sin\left(\frac{\pi y}{L_0}\right) \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \exp(ik_x x) \quad (2.13)$$

Burada  $N$  normalizasyon sabitidir, dalga vektörü  $k_x$  yayılan elektronun momentumunu yansıtır,  $(x_0, L_0/2)$   $t = 0$ ' daki ortalama elektron konumudur ve  $\sigma$  dalga paketinin  $x$  yönündeki genişliğini belirler.

Belli bir süre sonra elektron, bükümlü ışığın etki ettiği bölgeye ulaşacaktır. Burada kırınım boyunca çok küçük bir noktaya odaklanan ışık demetinin dikkate alındığını belirtmek önemlidir. Böyle bir odaklama, metalmalzemelere dayalı yeni lenslerin geliştirilmesi sayesinde mümkündür. Böyle bir noktadaki elektrik alanının profili, gelen ışına göre mercekle düzenlenmesi ile değiştirilebilir, ancak topolojik yapısı korunur.  $z = 0$  düzlemindeki Laguerre-Gauss (LG) modları ile üretilen  $\ell_{YAM}$  topolojik yüküne sahip YAM ışını kullanılabilir. Ayrıca  $\ell_{YAM}$ 'a ek olarak LG modları radyal indeks ( $p$ ) ve bel ölçüsü (waist size- $w_0$ ) ile tanımlanır. Burada LG modlarının en basit şekli  $p = 0$  olarak ele alınabilir. Bu durumda yoğunluk profili  $z = 0$  civarında halka şeklinde görünür ( $p \neq 0$  daha fazla nitel bilgi eklemeyiz) (Şekil 2.14). Dairesel polarize bir YAM ışına karşılık gelen vektör potansiyelinin, hesaplama sınırlamaları, daha büyük veya daha karmaşık yapıları incelemesi nedeniyle kutupsal koordinatlarda yazmak daha uygun olacaktır.

$r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$  ve  $\varphi(x, y) = \arctan(y/x)$  ise;

$$A(r, \varphi, t) = Re \left\{ \vec{e} A_0 \left( \frac{\sqrt{2}r}{w_0} \right)^{|\ell_{YAM}|} e^{-r^2/w_0^2} e^{i(\ell_{YAM}\varphi - \omega t + \theta)} \right\} \quad (2.14)$$

Burada  $\omega$  ışığın frekansı,  $\ell_{YAM}$  YAM değeri,  $A_0$  vektör potansiyelinin genliği,  $\vec{e}$  polarizasyon vektörü ve  $\theta$  fazdır.

LG modları, bir YAM ışınına ve bunun sonucunda bir elektrona tork aktarabilecek şekildedir. Aktarılan tork miktarı  $\ell_{YAM}$  tarafından belirlenir. Ayrıca pratik bir avantaj, ışık-madde etkileşiminin YAM ışınların bozunmasından daha hızlı olmasıdır [107]. Böylece uygun bir yarı iletken malzemeyle bu işlem deneysel olarak gerçekleştirilebilir.



## 3.MATERYAL VE METOD

### 3.1. Uzaysal Işık Modülatörü Tasarımı

DMD'ler ışığı sağlam bir şekilde modüle etmek için tasarlanmıştır. Modülasyon yapıları sigma-delta modülasyonunda olduğu gibi anahtarlama dayalıdır ve görüntüleme tatmin edici sonuçlar verir. DMD'ler, LCD'lerdeki son gelişmelerle karşılaştırıldığında, DMD teknolojisinin LCD'lere göre yüksek bir anahtarlama hızına ( $\sim 30\mu s$ ) sahip olduğu kolaylıkla tespit edilebilir [108,109]. Ancak LCD'lerdeki kırılma elemanları daha düşük bir anahtarlama hızına ( $\sim 20 ms$ ) sahiptir. DMD teknolojisi, hem optik doldurma faktörü hem de ışık iletimi açısından LCD teknolojisine göre daha iyi performans sunar. Bu parametreler DMD'lerde %94 ve %98 değerlerine sahipken, LCD'ler sırasıyla %93 ve %90 karşılık gelen değerlere sahiptir. Ancak LCD teknolojisinin piksel boyutu ( $3,74 \mu m$ ), DMD'nin piksel boyutundan ( $5,4 \mu m$ ) daha küçüktür. DMD ve LCD teknolojilerinde anahtarlama hızı, optik doldurma faktörü ve ışık iletimi ve piksel boyutundaki son teknolojik gelişmeler, SLM'lerin 355nm ile 400nm arasındaki dalga boylarında kullanılmasına izin vermektedir [1,110,111].

Bu tez çalışmasının ilk amacı düşük maliyette bir SLM tasarlamaktır. Bunun için DLP tabanlı DMD ekrana sahip ikinci el projektör kullanılmıştır. Bu projektördeki DMD  $1024 \times 768$  piksele sahiptir. DMD'nin piksel boyutu, kırınım verimliliği ve pikseller arasındaki boşluk bilgileri sırasıyla;  $10.8 \mu m$ , %86 ve  $1 \mu m$ 'dir. Görünür ışık için etkili yansıma oranı yaklaşık %88'dir. DMD'deki her bir mikro ayna "+12, 0 ve -12" derece eğilebilecek şekilde ayarlanabilir.

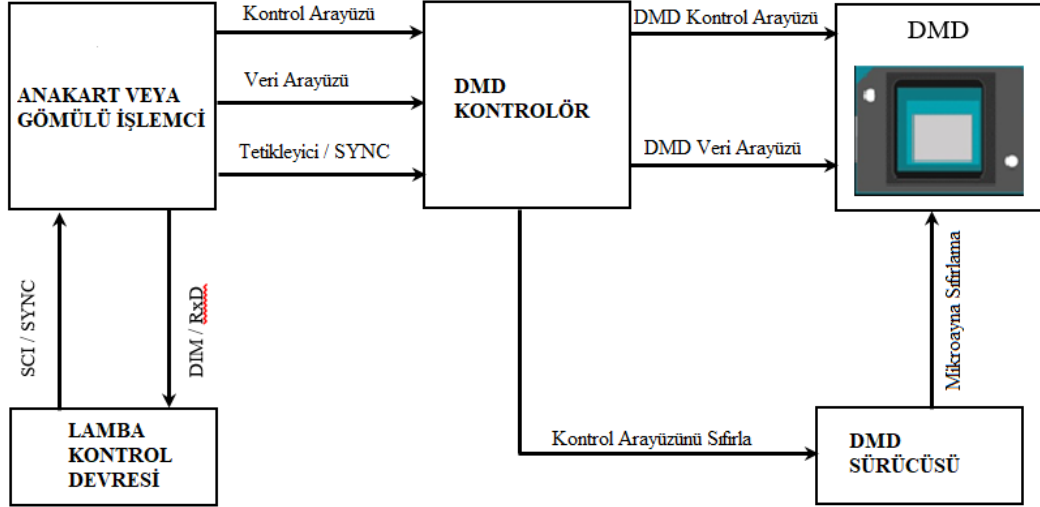
Tasarlanan SLM, ikinci el olarak 17.57\$'ya satın alınan BENQ MX511 DLP projektör modifiye edilerek oluşturulmuştur. Bu projektör, ışığı modüle etmek için DLP5500-DMD panel kullanır. Kullanılan DMD panel 750000'den fazla mikro aynaya sahip, yüksek çözünürlüklü DMD, gelen ışığın genliğini, yönünü ve/veya fazını modüle eden bir SLM'dir. Bu DMD 420 nm ile 700 nm dalga boyu arasındaki elektromanyetik dalgaları modüle edebilir. DMD özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



**Tablo 3. 1.** SLM'ye dönüştürülen projektörün özellikleri.

DMD Parametreleri	Tanımlama
Chipset Ailesi	DLP5500
Bileşen türü	DMD
Aydınlatma dalga boyu (Min) (nm)	420
Aydınlatma dalga boyu (Max) (nm)	700
Mikroaynanın dizi boyutu	1024 × 768
Piksel veri hızı (Max) (Gbps)	3.9
Mikroayna piksel boyutu (µm)	10.8
Ekran çözünürlüğü (Max)	1024 × 768 (XGA)
Mikroaynanın Eğim Açısı (Düz Duruma Göre)	±12°
Ekranın boyutu	0,55-inç Mikroayna Dizisi Diyagonal
Mikroaynanın Yansıtıcılığı	88%
Kırınım Etkisi	86%
Dolgu Faktörü	92%

DLP projektörünün soğutma fanı, kontrol devresi, ana kartı ve DMD ekranı kullanılarak SLM'ye dönüştürülmüştür. Şekil 3.1'de dönüştürülen SLM cihazının blok diyagramı verilmiştir.



**Şekil 3. 1.** Tasarlanan cihazın blok diyagramı [1]

Burada dönüştürülen cihazdaki lambaya ihtiyaç olmadığı için özel bir yöntemle devre dışı bırakılmıştır. Lambanın devre dışı bırakılmasını daha iyi anlayabilmek için öncelikle lambanın çalışma yöntemini açıklamakta fayda vardır. Lambanın çalışma yöntemi şu şekildedir: OSRAM'ın standart evrensel asenkron alıcı-verici (Universal Asynchronous Receiver Transmitter-UART) protokolü uygulama notuna göre, seri iletişim arayüzü (Serial Communications Interface-SCI) sinyali UART yazılım komutundan daha yüksek bir açılma önceliğine sahiptir [112]. Projeksiyon cihazının

çalışması için ana karttan lamba kontrol devresine bir sinyal gider. Bu olay, Tablo 3.2’de görüldüğü gibi Pim 5 üzerinden olur; kontrol devresinden ana karta, Pim 4 üzerinden sinyal gelmesi durumunda da cihaz çalışmaya başlar.

**Tablo 3. 2.** Lamba kontrol devresi pim diyagramı

Pin No	Pim Diyagramı
Pin 1	Flag / TxD+ (Phototransistor Collector)
Pin 2	Flag / TxD- (Phototransistor Emitter)
Pin 3	Common LED+ (LED Anodes)
Pin 4	SCI / Sync. (cathode LED)
Pin 5	DIM / RxD (cathode LED)

Tablo 3.2’ deki Pim 1, Pim 2 veri hattı, cihazın ana kart elektronik çıkışını ve diğer veri hattı olan Pim 5 ise, lamba sürücüsü için giriş hattını içerir. Tüm ara yüz hatları, ekstra düşük voltaj güvenlik izolasyonu sağlayan üç optokuplör aracılığı ile şebekeden optik olarak izole edilmiştir. Lamba kontrol devresinin ara yüzü, LED hatlarını (Pim 4 ve Pim 5) nominal akımla sürmek, fototransistör çıkış (Pim 1 ve Pim 2) durumunu okumak ve uygun bir dijital sinyale çevirmek zorundadır. Projeksiyon cihazındaki lambayı iptal etmek için kullanılacak veri hatları Pim 4 ve Pim 5’tir.



**Şekil 3. 2.** Lamba kontrol devresi [112]

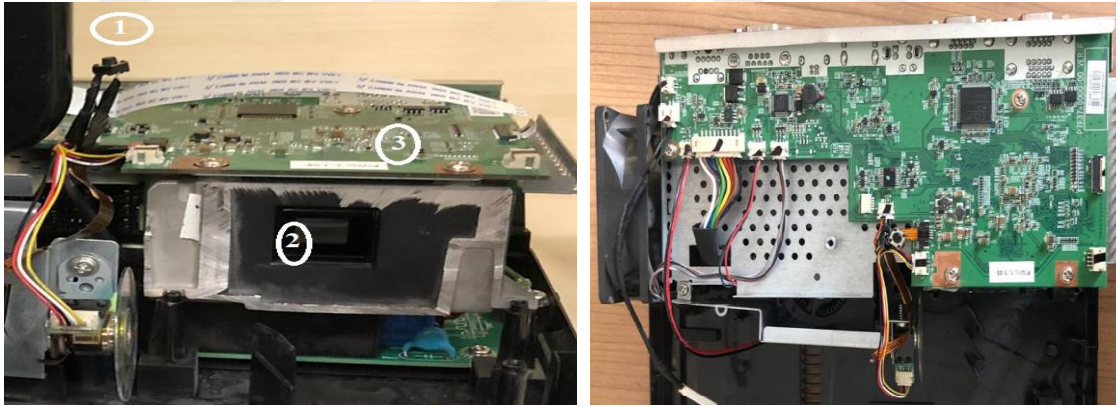


**Şekil 3. 3.** Lamba kontrol devresi pin atama [112]

Çalışma yöntemi ve Pin diyagramı bu şekilde olan lamba kontrol devresinin iptali için kullanacağımız yöntem ise şu şekildedir: Tablo 3.2’deki Pin diyagramında gösterildiği gibi Pin 5 ve Pin 4 hatları, lamba kontrol devresi ve ana kart arasındaki

lambanın çalışıp çalışmadığını kontrol eden veri bacaklarıdır. Lambayı projeksiyon cihazından çıkardığımızda, cihazın düzgün bir şekilde çalışabilmesi için, ana kartla lamba kontrol devresi arasında veri iletişimi sağlanması gereklidir. Bunun için Pin 4 ve Pin 5 arasına bir buton takılmıştır. SLM cihazının güç düğmesine basıldıktan sonra Pin 4 ve Pin 5 arasına takılan butona da basılması ile ana kart ve lamba kontrol devresi arasında veri iletişimi sağlanacaktır. Böylece sorunsuz bir biçimde iptal edilen lamba çıkartılarak, SLM'ye dönüştürülen projeksiyon cihazı doğru bir şekilde çalışacaktır.

Projeksiyon cihazındaki lamba gibi merceklerin de SLM'de kullanımları gereksizdir. Cihazdaki DMD'nin önünde bulunan mercekler ve metal kısımların ayrıştırılması tamamen mekanik bir işlem olduğu için bu kısımlar sistemden kolayca çıkartılmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra SLM tasarlanmıştır. Şekil 4'te DLP tabanlı projeksiyon cihazının SLM'ye dönüştürülmüş biçimi gösterilmiştir. 1 ile numaralandırılmış kısım lamba kontrol devresini iptal etmek için takılan butonu, 2 ile numaralandırılmış kısım DMD'yi, 3 ile numaralandırılmış kısım ana kartı göstermektedir.



Şekil 3. 4. DLP tabanlı uzaysal ışık modülatörü (a) modülatör bileşenleri, (b) ana kartın üstten görüntüsü

### 3.2. Holografik Maske Tasarımı ve Açısal Momentuma Sahip Elektromanyetik Dalgaların (Bükümlü Işıkların) Üretilmesi

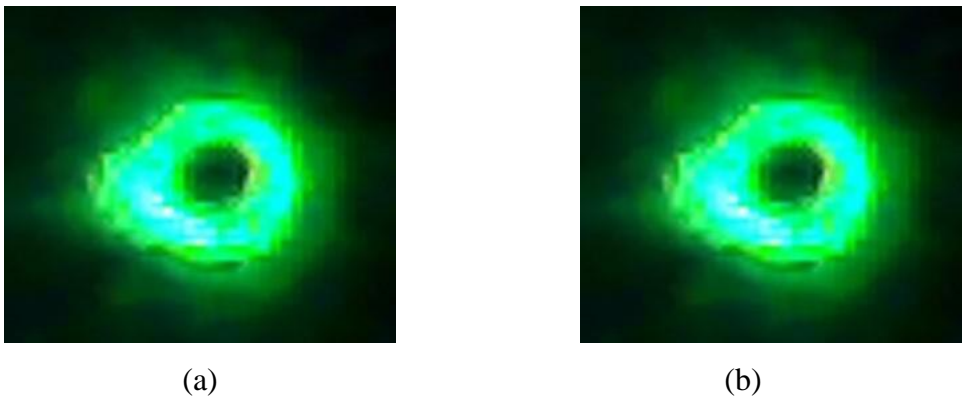
Açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar, eksen boyunca dik bir düzlemden bakıldığında merkezi karanlık bir ışık halkası olarak görünürler [68]. Bir ışık ışınının fazı, yayılma eksenini etrafında tıpkı bir tirbuşon gibi bükülebilir. Bir ışık

dalgası  $X. e^{i\beta}$  formunda kompleks sayılarla ifade edildiği zaman, silindirik koordinat düzleminin  $(r, \theta, z)$  azimut açısı, faz dağılımına oranı kırılma olarak tanımlanmaktadır. Burada  $X$  alanın genliğini,  $\beta$  ise dalga cephesinin fazını ifade etmektedir. Öte yandan  $r, \theta, ve z$  parametreleri ise sırasıyla; radial mesafe, polar açı ve azimut açığı ifade etmektedir. Söz konusu kırılmadan dolayı,  $z$  eksenini boyunca ışık dalgası ortadan kalkar. Çünkü açısal koordinatın  $\theta$  değeri  $r = 0$ 'da iyi tanımlanamaz ve bu durum da genliğin yok olduğu bir faz tekiliğine yol açar [68,81].  $\beta = m\theta$  eşitliği, helisel bir faz dağılımını ile tanımlanır. Böyle bir ışık ışını, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi düz bir yüzeyde, merkezi karanlık bir delik olan parlak halka gibi görünecektir.

Alanın sürekliliğini sağlamak için  $\theta = 2\pi$ 'de, karanlık nokta etrafındaki faz sargılarının sayısını belirten  $m$  tamsayısı vardır. Bu sayı, girdabın topolojik yüküdür.  $m$ 'nin fiziksel anlamı, pozitif (saat yönünün tersine dönüş için) veya negatif (saat yönünde dönüş için) olabilen teklik etrafındaki faz dönüş hızıdır [68]. Açısal momentum  $L_z$ 'nin  $z$ -bileşeni bize  $m$ 'nin tanımını verir. Kuantum teorisinde ışık ışını için her foton başına  $L_z$  değeri,  $\hbar$  Planck sabitinin  $m$  topolojik yük çarpımına eşittir.

$$L_z = -i\hbar \frac{\partial \beta}{\partial \theta} = -i\hbar m \quad (3.1)$$

$\theta = 2\pi$ 'deki süreklilik koşulunun, açısal momentumun nicelendirilmesini ifade ettiği açıktır.  $L_z$  değeri, ışın ilerledikçe  $\vec{p}$  momentum vektörünün kara delik etrafında bir dönme hareketi yaptığını gösterir. Şekil 3.5 (a) görüntü saat yönünün tersine bir dönüş yaparken Şekil 3.5 (b) görüntü saat yönünde hareket etmektedir.



**Şekil 3. 5.** Paralel yönde ilerleyen aynı yüke sahip iki kiriş.

Açısal momentuma sahip elektromanyetik dalgalar, lazer kavitesinin manipülasyonu [68,69], mod dönüştürücüler kullanılarak [70] veya bilgisayar tarafından oluşturulan hologramları kullanan basit bir teknik [68,71,72] oluşturulabilir. Bilgisayar tarafından holografi oluşturma basit bir tekniktir [68,72]. Birçok çalışmada bilgisayar tarafından oluşturulan hologramların nasıl tasarlanacağını gösterilmiştir [73,74]. Bu tez çalışmasında açısal momentuma sahip bir elektromanyetik dalga üretilmesi için bilgisayar tarafından çatal hologram tasarlanmıştır.

Bir çatal hologram, bir spiral dalga ve eğimli bir düzlem dalga arasındaki girişim ile üretilen holografik bir optik elemandır. Hologram oluşumu matematiksel olarak şu şekilde tanımlanabilir: Bir Gauss ışını içine  $e^{im\theta}$  fazı yerleştirilerek,  $\psi_1 = e^{ikx}$  referans eğik düzlem dalgası ve tekil faz taşıyan  $\psi_2 = e^{im\theta}$  nesne dalgasının girişimi ile H hologram transmisyon fonksiyonu elde edilir. Burada  $k$ , dalganın eğim açısını gösteren uzaysal frekanstır. Bu holograma, referans dalgalı bir ışık ışını düşürüldüğünde, çıkış ışını yeniden yapılandırılarak açısal momentuma sahip bir ışın olarak görünecektir. Denklem 3.2'de H hologram transmisyon fonksiyonu gösterilmiştir. Mathematica yazılım programında denklem 3.2'deki H hologram transmisyon fonksiyonu kullanılarak aydınlık ve karanlık çizgilerden oluşan holografik maske tasarımı elde edilmiştir.

$$H = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |e^{ikx} + e^{im\theta}|^2 = 2[1 + \cos(kx - m\theta)] \quad (3.2)$$

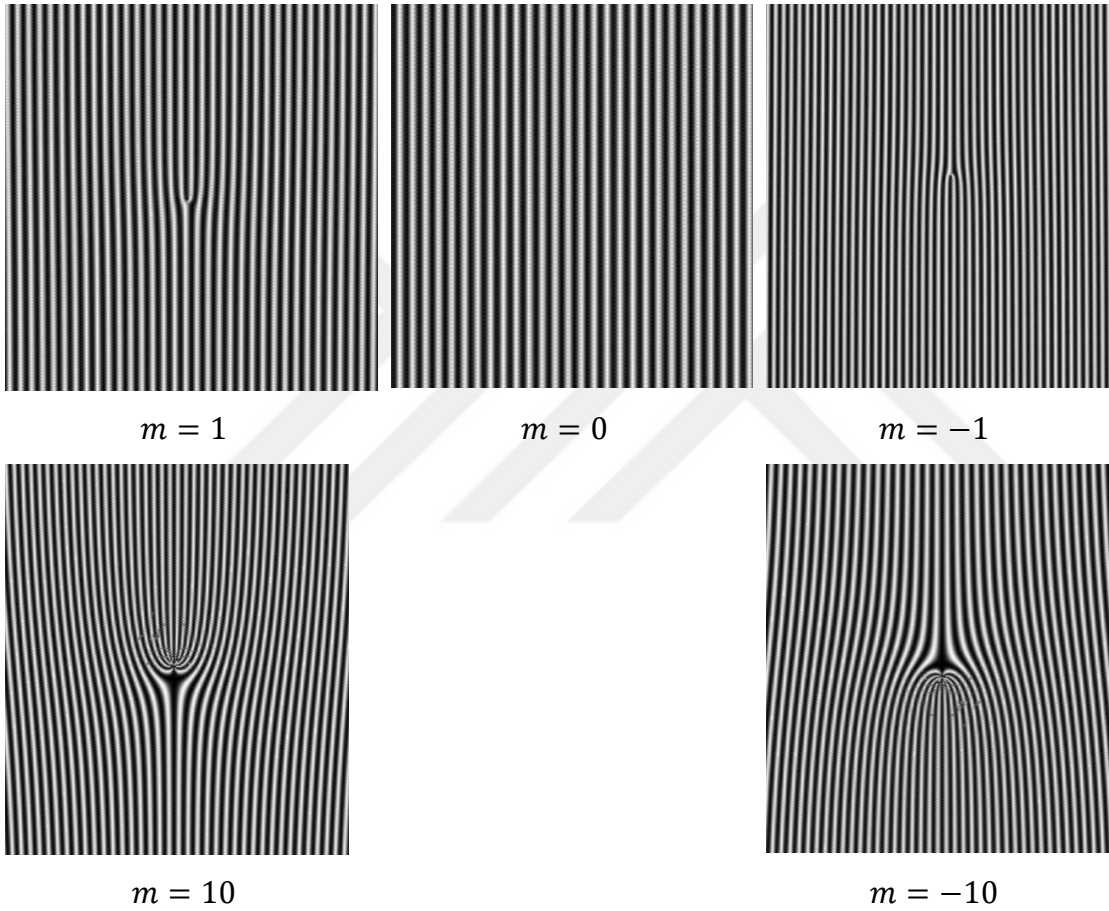
Burada  $\theta = \tan^{-1}(y/x)$  polar koordinattır. Şekil 6'da farklı  $m$  topolojik değerlerine sahip hologram maskeleri gösterilmiştir.

Bu holografik desenlerden biri  $w$  genişliğinde bir Gaussian ışını ( $\psi_G = e^{-r^2/w^2}$ ) ile aydınlatıldığında, ortaya çıkan desen uzak alan Fraunhofer kırınım desenidir. Bu desen ile  $\psi_G H$  giriş fonksiyonu ve H hologram transmisyon fonksiyonu Fourier transformu ile orantılıdır [68]. Böylece bilgisayar tarafından oluşturulan hologramdan, uzak yüzeydeki parlaklık aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$I = \mathcal{F}[\psi_G H] = \mathcal{F}\left[e^{-r^2/w^2} |e^{ik_x x} + e^{im\theta}|^2\right] \quad (3.3)$$

Burada  $k_x$ , eğik dalga vektörünün  $x$ -bileşenidir. Sonuç olarak standart bir matematik yazılım programı ile hesaplanabilir ve çizdirilebilir.  $\psi_G H$ 'nin Fourier transformunun

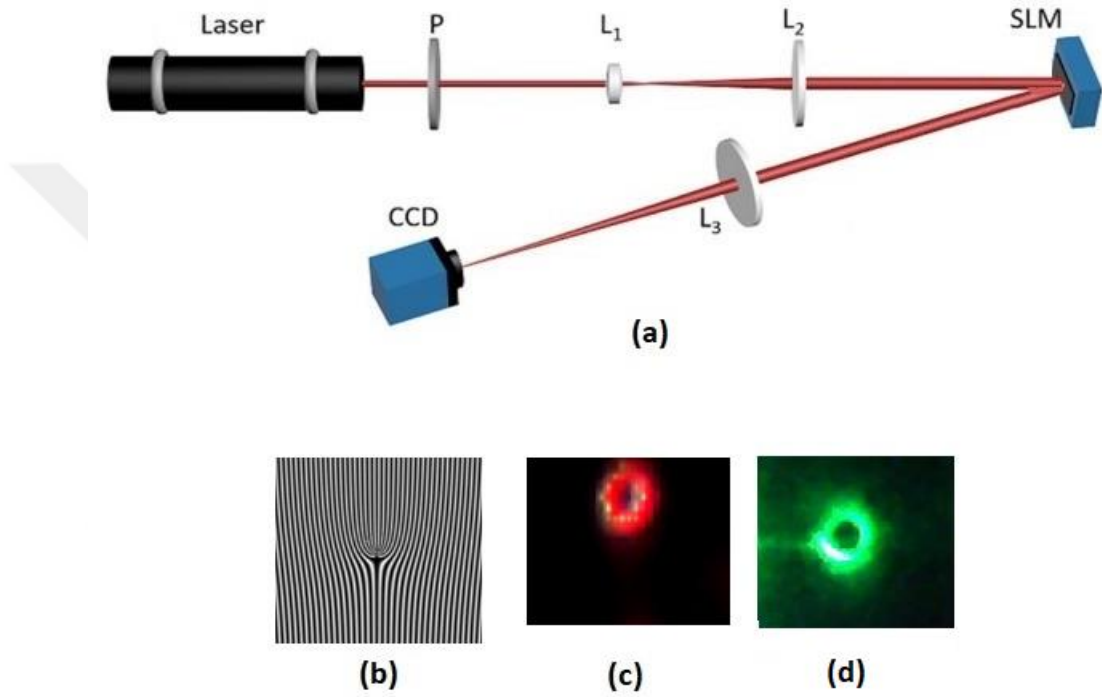
topolojik değerleri  $m = 5$  ve  $m = -5$  olan Gauss ışınları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekil 3.5'te gösterilen iki girdap için de ışık yoğunluğu aynıdır. Bununla birlikte faz yayılımları zıt yönlüdür. Yani  $m = 5$  için saat yönünün tersine dönerken,  $m = -5$  için ise saat yönünde döner. Sonuç olarak hologram maskesi, hologramı kaydetmek için kullanılan  $\psi_1$  referans dalga ışınına özdeş bir lazer ışını ile aydınlatıldığında, (azimut fazındaki)  $\psi_2$  nesne ışın demetinin tam bir rekonstrüksiyonu elde edilir [71]. Şekil 3.6'da  $m$  topolojik değerine karşılık gelen hologram maske desenleri gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. Farklı  $m$  topolojik değerleri için  $H$ 'nin çizimleri.

Şekil 3.7'de ikinci el olarak alınan bir SLM'ye dönüştürülen cihaz ile yapılandırılmış elektromanyetik dalga (EMD) elde etmek için deney düzeneği şeması gösterilmiştir. Yapılandırılmış EMD üretiminde kullanılan ışın kaynakları Şekil 3.7 (c) 640 nm'de çalışan 13 mW'lık lazer ve Şekil 3.7(d) 532 nm'de çalışan 100 mW'lık lazer kullanılmıştır. Dikey polarizasyon seçmek için bir polarizör kullanılmıştır. EMD,  $L_1$  ve  $L_2$ 'yi içeren ışın genişleticilerden geçer. Daha sonra EMD, SLM'ye yüklenen CGH'yi aydınlatır. Farklı topolojik değerlere sahip yapılandırılmış EMD'ler

oluşturmak için farklı hologramlar kullanılmaktadır. Şekil 3.7 (b)'de görülen CGH, SLM'ye yüklenmiştir. Yapılandırılmış EMD, yansıma ve kırınımına uğrayarak oluşur. Şekil 3.7 (c) ve (d)'de gösterildiği gibi sırasıyla topolojik değeri  $m = -5$ ,  $m = +10$  yapılandırılmış EMD elde edilir. Uzak alan kırınım deseni, dışbükey lens ( $L_3$ ) Fourier düzleminde bir CCD kamera tarafından yakalanır.



**Şekil 3. 7.** Yapılandırılmış EMD üretimi ve tespiti için deney kurulumu.

Şekil 3.7 (a) Deney düzeneğindeki; P-Polarizör, L-Mercek, SLM-Uzaysal Işık Modülasyonu, CCD-Kamera. Şekil 3.7 (b) SLM'ye yüklenen CGH hologramı. Şekil 3.7 (c) açısız momentum değeri  $m = -5$  yapılandırılmış EMD. Şekil 3.7 (d) açısız momentum değeri  $m = +10$  yapılandırılmış EMD.

### 3.3. Bükümlü Işıkların Fotovoltaikler Üzerindeki Elektriksel Etkisi

Fotovoltaik etki arayışında malzeme yapılandırılmasına çok fazla çaba harcanmaktadır. YAM'a sahip ışığın yarı iletken tabanlı halkalara aktaracak şekilde yapılandırılmasının, açık devre voltajı veya fotogalvanik (toplu fotovoltaik) tip akımın üretilmesi için kullanılabileceği düşünülmektedir. Hem ışığın

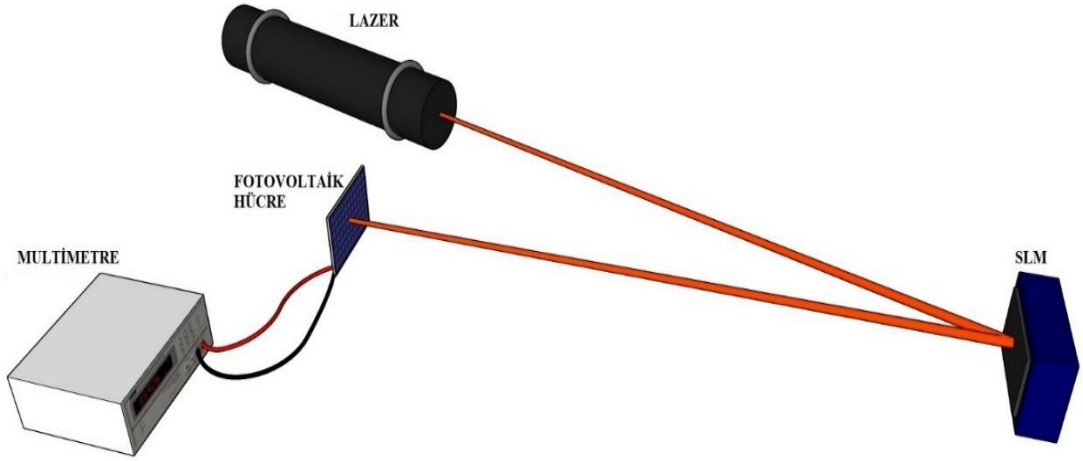
yapılandırılmasında hem de maddeyi hapsetme potansiyelinden kaynaklanan fotovoltaik etki, yükü dışarıya doğru iten etkin merkezkaç potansiyelini güçlendiren ışığın yörünge açısal momentumunu artırarak büyütülebilir.

YAM ışını ile ilişkili faz cephesi sarmal bir şekil oluşturur. Bu nedenle, ışık yayılımı  $z$  yönü boyunca olan silindirik koordinatlarda, uzaysal alan dağılımı bir  $\exp(i\ell_{YAM}\varphi)$  terim içerir. Burada  $\varphi$  azimut açısı ve  $\ell_{YAM}$  bükümlü ışığın YAM yüküdür. Allan ve ark. sarmal ışınların (örneğin Laguerre-Gaussian (LG) modları olarak gerçekleştirilen)  $z$  yönünde foton başına  $\ell_{YAM}\hbar$  miktarında YAM taşıdığını göstermiştir. Birçok teknikle YAM oluşturulabilir: Bunlar SLM üzerine yansıtılan CGH'ler (ki bu tezde bu yöntem kullanılmaktadır), asigmatik mod dönüştürücüler, spiral faz plakaları ve homojen olmayan anizotropik plakalarda spin açısal momentumunun YAM'a dönüştürülmesi ile oluşturulabilir. Bu yöntemlerin farklı avantajları ve dezavantajları vardır. Genel olarak, SLM ile bağlantılı ışın üretimi düşük verimliliğe sahiptir ve genel ışın kalitesi, LCD veya DMD'nin piksel boyutu ile belirlenir. Diğer teknikler statiktir ve bu nedenle dinamik olarak kontrol edilemez.

YAM taşıyıcılarının zamanla değişimi madde ile etkileşimde önemli bir unsurdur [5]. Bu, yörünge hareketini ışıkla yönlendirmek için niteliksel olarak yeni yollar oluşturan yük taşıyıcıları üzerine uygulanan bir tork anlamına gelir. Örneğin, Watzel ve ark. bir YAM ışık noktasıyla ışınlanmış bir yarı iletken şeritteki bir elektronik dalga paketinden, yönü ve genliği YAM ışınının parametreleri tarafından yönetilen bir enine kayma elde eder [107].

YAM ışınının madde-ışık etkileşimi üzerine yapılan birçok teorik çalışma, fotovoltaik hücreler üzerine düşürülen YAM ışınlarının daha yüksek akımların üretilmesi için kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında fotovoltaik hücreler üzerine düşürülen YAM ışınları ile daha yüksek akımların üretileceği deneysel olarak incelenmiştir. YAM üretilmesinde CGH ve SLM kullanılmıştır (bkz başlık 3.2). Farklı topolojik değerlerde üretilen YAM bir fotovoltaik hücre üzerine düşürülerek akım değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.8).





**Şekil 3. 8.** Yapılandırılmış EMD'nın fotovoltaiik hücre üzerindeki etkisinin incelenmesi için kurulan deney düzeneği şeması.

Deney düzeneğinde diyot lazer aydınlatıcı kullanılmıştır. Aydınlatıcının dalga boyu  $500\text{ nm} - 570\text{ nm}$  'dir ve çıkış gücü  $200\text{ mW}$ 'tır. Fotovoltaiik hücre paneli  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  boyutundadır. Panelin diğer özellikleri tablo 3.3'te verilmiştir.

**Tablo 3. 3.** Fotovoltaiik panel özellikleri

Panel Parametreleri	Açıklama
Nominal Gerilim (VMP)	2 V
Nominal Akım (IMP)	160 mA
Açık Devre Gerilimi	2.4 V
Kısa Devre Akımı (ISC)	190 mA
Fotovoltaiik Malzeme	Monokristal Silikon

Ayrıca deneyde ölçüm cihazı olarak "GW Instek GDM-8245" masa tipi dijital multimetre kullanılmıştır. Deneyde sadece doğru akım (DC) ölçümü yapılmıştır. Bundan dolayı kullanılan ölçüm cihazının akımla ilgili çözünürlük ve doğruluk özelliği Tablo 3.4'te verilmiştir. Kullanılan multimetre bu deney için yeterlidir. Fakat ölçülen akımlar oldukça küçüktür bundan dolayı daha tatmin edici ve daha net sonuçlar alabilmek için doğruluk ve çözünürlüğü daha yüksek olan bir ölçüm cihazı kullanılabilir.

**Tablo 3. 4.** GW Instek GDM-8245 masa tipi dijital multimetrenin DC akım özellikleri

Kademe	Çözünürlük	Doğruluk
500 $\mu A$	0.01 $\mu A$	$\pm(0.2\% + 2)$
5 mA	0.1 $\mu A$	$\pm(0.2\% + 2)$
50 mA	1 $\mu A$	$\pm(0.2\% + 2)$
500 mA	10 $\mu A$	$\pm(0.2\% + 2)$
2 A	100 $\mu A$	$\pm(0.3\% + 2)$
20 A	1 mA	$\pm(0.3\% + 2)$

Bu tez çalışmasında icra edilen deneyde oldukça küçük akımlar ölçülmektedir. Çevresel faktörler (örneğin ışık) ölçülecek akım değerini etkileyebilir. Bundan dolayı kurulan deney düzeneğinde fotovoltaik panel üzerindeki çevresel etkileri minimuma indirmek için fotovoltaik panel iç ve dış yüzeyi alüminyum folyo ile kaplı bir kutu içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.9).



**Şekil 3. 9.** Alüminyum folyo ile kaplı kutu

Panel yüzeyine tek bir ışık spotu düşürebilmek için kutunun ön kısmına ışık spotunun geçebileceği büyüklükte bir kesit açılmıştır. YAM'un topolojik değeri sırasıyla -2, -1, 0, 1 ve 2 olan ışık spotları fotovoltaik panel üzerinde düşürülerek akım değerleri ölçülmüştür. Deney düzeneği şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3. 10. Deney düzeneği

## 4. BULGULAR

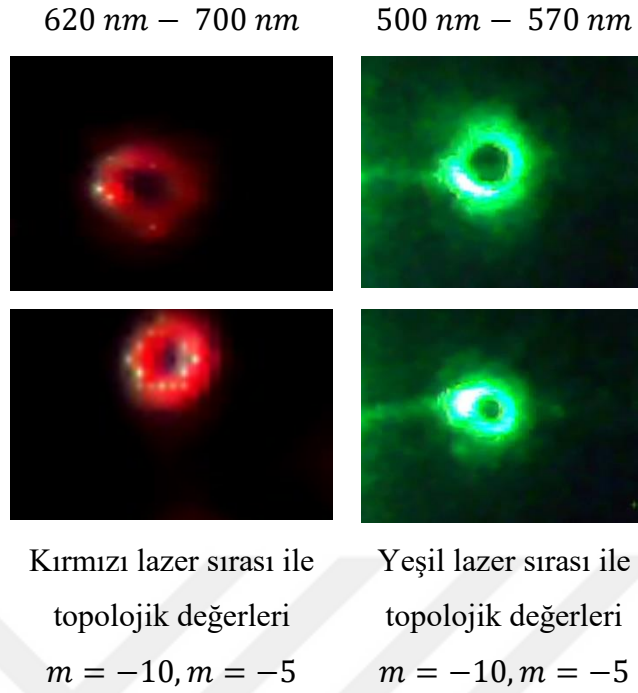
Yeni bir yaklaşımla tasarlanan SLM cihazı, ticari bir ürün olan Model LC2012 (Hololeye) ve literatürdeki benzeri çalışmalarda tasarlanan DLP tabanlı SLM'ler ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4.1'de görüldüğü gibi, tasarladığımız SLM, mevcut muadillerine kıyasla çok düşük bir maliyetle elde edilmiştir. Çünkü bu tezin konusu olan SLM tasarımının temeli, yalnızca 17.57 \$'a satın alınan DLP tabanlı ikinci el bir projektör cihazına dayanmaktadır.

**Tablo 4. 1.** Tasarladığımız SLM cihazının diğer SLM cihazları ile karşılaştırılması

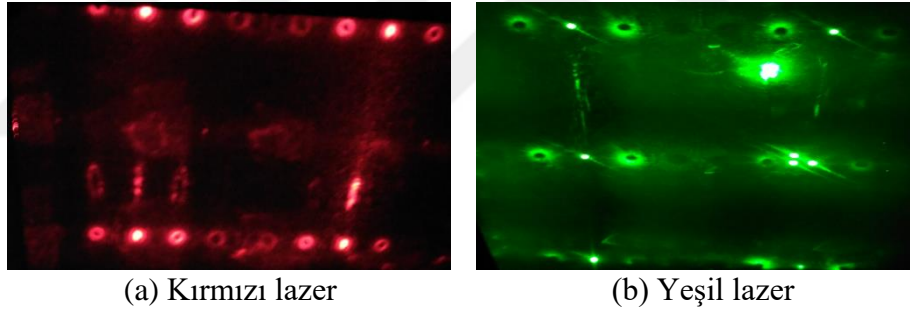
Özellikler	SLM (Bu Tez)	DLP4710-DLP Geliştirme Modülü [113]	DLP2000-DLP Geliştirme Modülü [114]	LC2012 SLM
Ekran tipi	DMD	DMD	DMD	LCD
Çözünürlük	1024 x 768 pixel	1920 x 1080	640x360	1024 x 768 pixel
Piksel Aralığı	10.8 µm	5.4 µm	7.6 µm	36.0 µm
Giriş frekansı	60 Hz	120 Hz	120 Hz	60 Hz
Bağlantı Şekli	HDMI	HDMI	HDMI	HDMI
Ürün fiyatı	17.57\$	~1500\$	~200\$	~ 4672\$

Modifiye edilen SLM'deki DMD aydınlatma dalga boyları 420 nm-700 nm arasındadır. Modifiye ettiğimiz SLM'nin bu dalga boyları arasında çalıştığını göstermek için farklı dalga boylarına sahip (640 nm kırmızı ve 532 nm yeşil) lazer ışınları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların modifiye edilen SLM'nin doğru bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Modifiye edilen SLM cihazını test için öncelikle Mathematica yazılım programı ile oluşturulan hologram maskesi, DMD'ye yüklenmiştir. DMD üzerindeki holograma lazer ışığı düşürülmüştür. Lazer ışığının DMD ayna üzerinden geri yansınmasıyla, yapılandırılmış elektromanyetik dalga elde edilmiştir. Bu çalışmada, temel amaç doğrultusunda tasarlanan cihazın, SLM olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Aynı zamanda tasarlanan cihazın, var olan SLM'lere göre daha düşük maliyetle üretilmesi gösterilmiştir. SLM ile temel bir deney düzeni kurularak, yapılandırılmış elektromanyetik dalga elde edilmiştir. Yapılandırılmış elektromanyetik dalgaların, CCD (Charge Coupled Device) ile görüntü kayıtları alınmıştır.

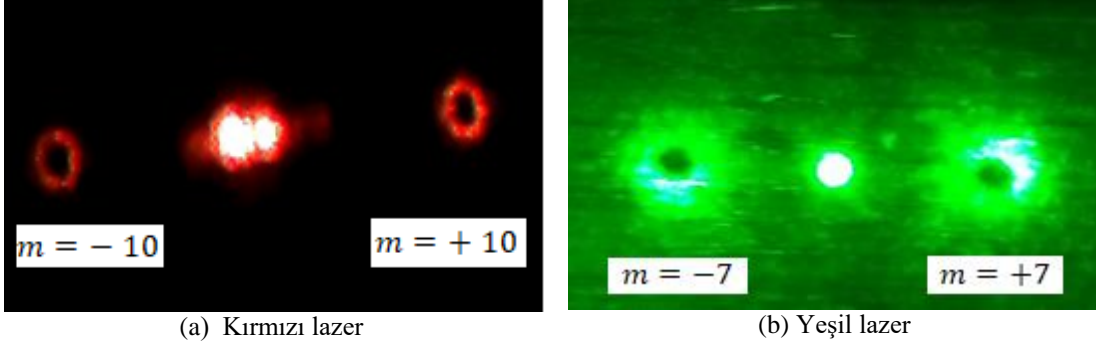


**Şekil 4. 1.** Yapılandırılmış elektromanyetik dalgaların CCD görüntü kayıtları.



**Şekil 4. 2.** Düz bir yüzey üzerinde yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar

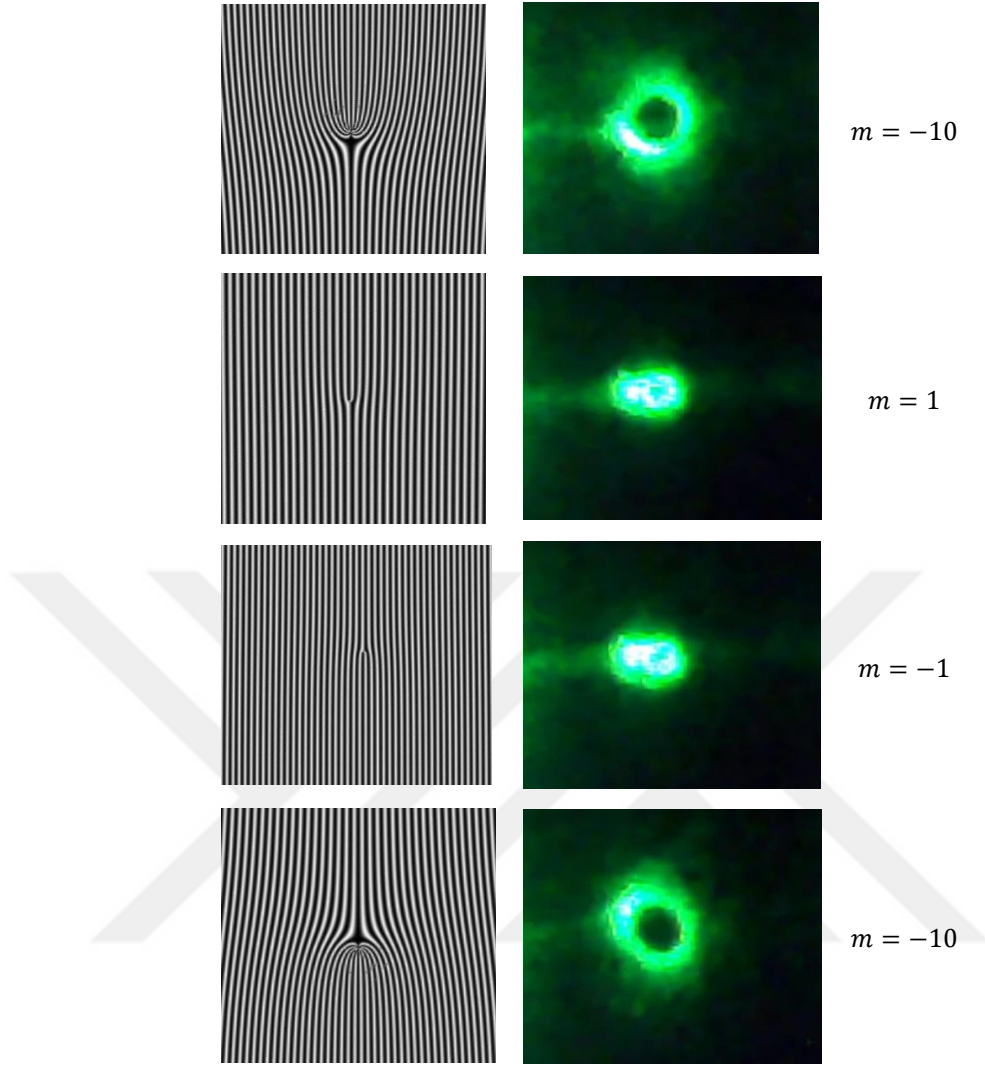
DLP tabanlı SLM ile elde edilen yapılandırılmış kırmızı (620nm-700nm) ve yeşil (500nm-570nm) lazer ışığının, CCD görüntü kayıtları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.2'de düz bir yüzeye düşürülen yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar görülmektedir. Mutlak olarak aynı topolojik yük değerlerine sahip yapılandırılmış EMD çiftleri görülmektedir. Şekil 4.2'nin daha iyi anlaşılması için şekil 4.3'te mutlak olarak aynı topolojik yük değerine sahip yapılandırılmış EMD çifti ele alınmıştır.



**Şekil 4. 3.** Yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar

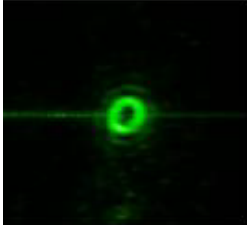

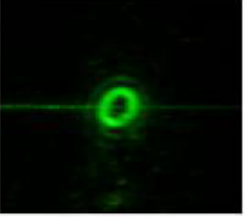
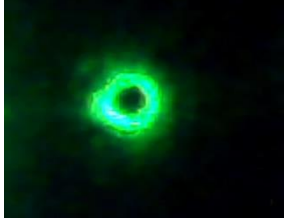
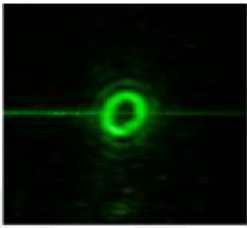

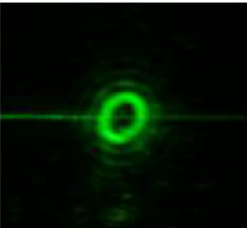

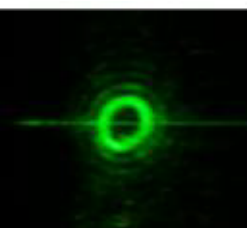
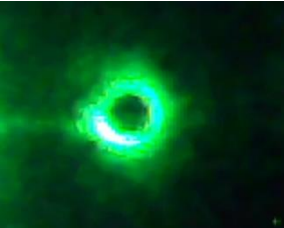


Şekil 4.3 (a)'da görülen 620 nm-700 nm'deki kırmızı lazer ışınının topolojik yük değeri  $m = \pm 10$ 'dir. Topolojik yük değeri  $m = -10$  saat yönünde dönerken  $m = +10$  saat yönünün tersine döner. Şekil 4.3 (b)'de görülen 500 nm-570 nm'deki yeşil lazer ışınının topolojik yük değeri  $m = \pm 7$ 'dir. Topolojik yük değeri  $m = -7$  saat yönünde dönerken  $m = +7$  saat yönünün tersine döner. Görüntüde yeşil ışığın daha parlak olmasının sebebi kullanılan aydınlatıcı cihazının çıkış şiddetinin daha yüksek olmasıdır. Ayrıca şekil 4.3 (b)'de ışığın düzleme yayılmasının sebebi kullanılan aydınlatıcının özelliğinden kaynaklanıyor olabilir.

Şekil 4.4'te topolojik değerleri  $m = 10$ ,  $m = 1$ ,  $m = -1$ ,  $m = -10$  olan hologram maskeleri ve bu hologram maskelerine karşılık gelen yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar gösterilmiştir. Elde edilen yapılandırılmış elektromanyetik dalgaların görüntüleri ile SLM arasındaki (CCD ile SLM arası) mesafe yaklaşık olarak 1,5 metredir. Şekillerde görüldüğü gibi, topolojik yük ( $m$ ) arttıkça, bükümlü ışıkların merkezi olan karanlık nokta ile parlak halka arasındaki mesafe (parlak halkanın yarıçapı) de artmaktadır.



**Şekil 4. 4.**  $m$  topolojik yüküne sahip hologram maskeleri ve yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar.

Şekil 4.5'te Heath Howie Bigman'nın [115], LCD tabanlı SLM ile elde ettiği yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar ile DLP tabanlı SLM kullanarak elde ettiğimiz yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar görsel olarak karşılaştırılmıştır. Bu görsellerde, değişen topolojik değerlere göre aynı bükümlü ışıklar görülmektedir. Fakat tasarladığımız SLM ile elde ettiğimiz bükümlü ışıklar, ışık şiddetinden dolayı daha parlak bir yansımayla görülmektedir.

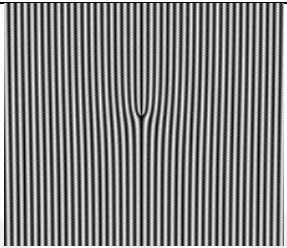
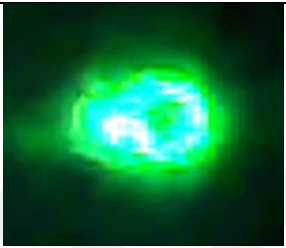
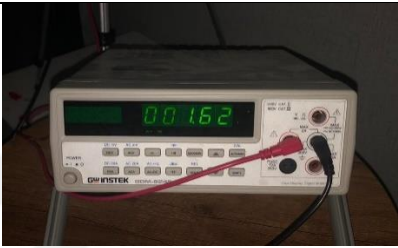
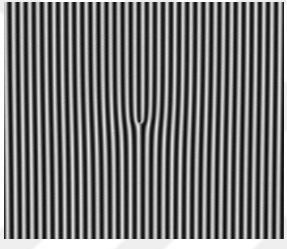
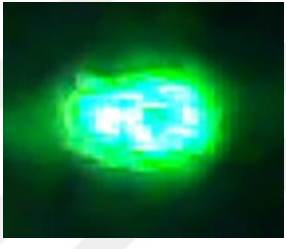

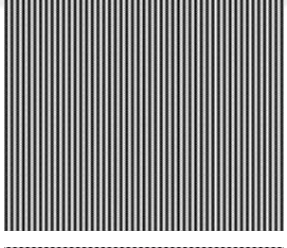
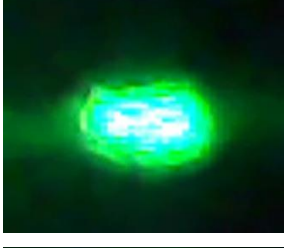
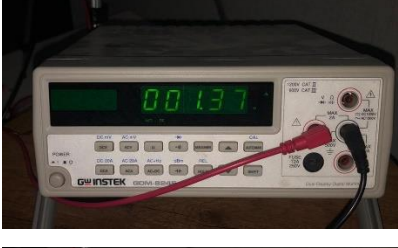
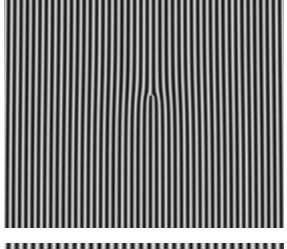

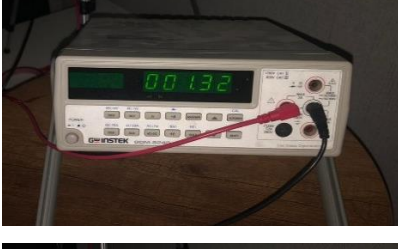
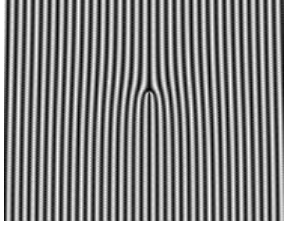

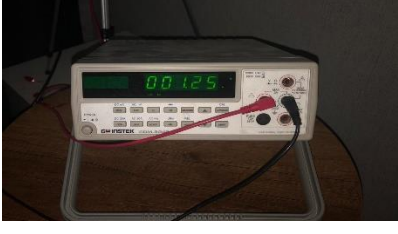
Topolojik Değer	Bigman H.H	Tasarladığımız SLM
$m = 5$		
$m = 6$		
$m = 7$		
$m = 8$		
$m = 9$		
$m = 10$		
	(a)	(b)

**Şekil 4. 5.** (a) Bigman H.H'nin yüksek lisans çalışmasında elde ettiği yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar (b) Bu tez kapsamında tasarladığımız SLM ile elde ettiğimiz yapılandırılmış elektromanyetik dalgalar.

Bu tez çalışmasının amaçlarından biride YAM'ın fotovoltaik etkisinin deneysel olarak gözlemlemektir. Bu deneylerde YAM ışını bir fotovoltaik panel üzerine



düşürülmüştür. Deneysel olarak elde ettiğimiz bulgular YAM değeri pozitif olan ( $\ell_{YAM} = (+)$ ) ışınlarının akım değerlerinin YAM değeri sıfıra ( $\ell_{YAM} = 0$ ) göre daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. YAM değeri negatif ( $\ell_{YAM} = (-)$ ) olan ışınlarının ise YAM değeri sıfıra ( $\ell_{YAM} = 0$ ) göre daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Bu deney sonuçları teorik beklentileri karşılamaktadır. Elde edilen sonuçlar şekil 4.6'da verilmiştir.

YAM	Çatal Hologram	YAM ışını	Multimetre Görüntüsü
$\ell_{YAM} = +2$			
$\ell_{YAM} = +1$			
$\ell_{YAM} = 0$			
$\ell_{YAM} = -1$			
$\ell_{YAM} = -2$			

Şekil 4. 6. YAM değerine göre oluşan akım değerleri

YAM değerinin pozitif yönde artıkça akım değerinin artığını ve YAM değerinin negatif yönde azaldıkça akım değerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar fotona kazandırılan YAM değerinin elektrona aktarabileceğini göstermektedir. YAM değeri sifira göre akım artış oranı  $\ell_{YAM} = +1$ ' de %9.1 ve  $\ell_{YAM} = +2$ 'de %18.2'dir. Ayrıca  $\ell_{YAM} = -1$ ' de %3,65 ve  $\ell_{YAM} = -2$ ' de %9.1 oranlarda akımda azalma meydana gelmiştir. Watzel ve ark. tarafından yapılan teorik çalışmada  $\ell_{YAM} = +1$  için tek bir spotta beklenen artış oranı %2.6 ve  $\ell_{YAM} = -1$ ' de ise beklenen akım düşüşü %4.2'dir [107]. Bu tez çalışması elde edilen sonuçlar mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında pozitif yöndeki YAM değerleri için daha iyi sonuçlar elde edildiği aşıkardır.



## 5.SONUÇ

SLM'ler optik öğretim ve bilimsel çalışmalar için çok yönlü araçlardır. Faz şekillendirme, holografi ve optik kontrol alanlarında kullanılabilirler. SLM'ler gerek endüstriyel alanlarda gerek lisans ve lisansüstü laboratuvarlarda yararlı bir araç olarak kullanılabilirler. Fakat yüksek maliyetlerinden dolayı bu alanlardaki kullanımları kısıtlıdır. Bu sebeple düşük maliyetle üretilebilecek SLM'lerin hem endüstriyel alanlarda hem de bilimsel laboratuvarlarda daha yaygın kullanılabilmesi öngörülmüştür. Bu doğrultuda bu tez çalışmasında, mevcut SLM'lere alternatif olarak DLP tabanlı projektörün modifikasyonu ile düşük maliyetli SLM oluşturulabileceği gösterilmiştir. Tasarlanmış olduğumuz SLM, holografide ve elektromanyetik dalgaların yapılandırılmasında kullanılabilir. Aynı zamanda tasarlanmış olduğumuz SLM'nin, çözünürlük, yansıma oranı, yüksek tepkime hızı ve maliyet bakımından ticari bir SLM'ye göre daha avantajlı olduğu gösterilmiştir. DLP tabanlı SLM'lerin, UV bölgesindeki elektromanyetik dalgaların yapılandırılmasında da kullanılabilecek şekilde geliştirilebileceği öngörülmektedir.

Modifiye edilmiş SLM ile YAM ışınlarının oluşturulabileceği de bu tez çalışmasında gösterilmiştir. Modifiye edilmiş SLM ile oluşturulan YAM ışınları, farklı tez çalışmasında ticari LCD tabanlı SLM ile oluşturulan YAM ile görsel olarak karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5). Bu karşılaştırma sonucunda düşük maliyetle modifiye edilen SLM ile oldukça iyi sonuçlar alındığı görülmektedir. Sonuç olarak YAM ışınları ile yapılacak çalışmalarda modifiye edilen DLP tabanlı SLM'nin kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasının son amacı olarak modifiye edilmiş SLM ile elde edilen YAM ışını spotunun yarı iletken bir solar panel üzerindeki elektriksel etkisinin deneysel olarak incelenmesidir. Farklı topolojik değerlere sahip YAM ışını ile yapılan deneyde beklentimiz pozitif yöndeki açısal momentum değerlerinin akım artışını sağlaması ve negatif yöndeki açısal momentum değerlerinin ise akım düşüşüne neden olmasıdır. Elde edilen sonuçlar bu beklentiye karşılık gelmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar benzeri teorik çalışmalar ile karşılaştırılmıştır (Tablo 5.1). Sonuçlar YAM değerinin elektrona aktarabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca YAM ışının yük

değerinin pozitif yönde artışı daha yüksek akımların oluşmasına sebep olmaktadır (Şekil 4.6).

**Tablo 5. 1.** YAM'ın yarıiletken üzerindeki etsinin farklı çalışmalarla karşılaştırılması

YAM değeri	Bu tez çalışmasında		Karşılaştırılan çalışma	
	$\ell_{YAM} = +1$	$\ell_{YAM} = -1$	$\ell_{YAM} = +1$	$\ell_{YAM} = -1$
Artış ve Azalış oranı	(+) %9.1	(-) %3.65	(+) %2.6	(-) %4.2

YAM taşıyan ışığın, bir yarı iletkenden akan yük akımlarını oluşturmak ve manipüle etmek için kullanılabilmesi gösterilmiştir. Bu akımdaki değişiklikler ters işaretlidir ve topolojik değerin işareti seçilerek kontrol edilebilir. Fotovoltaik etki, solar panel üzerindeki bükülmüş ışık noktalarının sayısı artırılarak büyütülebilir.

Fotovoltaik panellerin verimliliğinin artırılmasında genellikle malzeme yapılandırılması üzerine çaba harcanılmaktadır. Bu çalışmada ise ışığın yapılandırılmasıyla enerji verimliliğinin artırılabilmesi gösterilmiştir. Tek bir YAM spotu ile elde edilen akım artış oranı %9.1'dir. Bu oran bükümlü ışık spot sayısı veya YAM değeri artırılarak yükseltilebilir.

Dünya genelinde enerji ihtiyacının karşılanması için farklı kaynaklar kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji de bu kaynaklardan biridir. Yenilebilir enerji kaynaklarına ilginin artması çevresel sorunların çözümüne ve daha düşük maliyetlerde enerji üretmeye katkı sağlayacaktır. Bundan dolayı yenilebilir enerji kaynaklarının verimliliğinin artırılması oldukça önem arz etmektedir. Bu tez çalışması ışığın manipülasyonu ile daha yüksek akımlar elde edilebileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın güneş ışığından faydalanarak daha yüksek enerji üretilmesi için ileride yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Yalçınkaya, F., Koç, T. ve Pala, Z. (Basımda). Spatial Light Modulator Design and Generation of Structured Electromagnetic Waves Using Digital Light Processors. *Optica Applicata*, doi:.
- [2] Brüning, R., Ndagano, B., McLaren, M., Schröter, S., Kobelke, J., Duparré, M. ve Forbes, A. (2016). Data transmission with twisted light through a free-space to fiber optical communication link. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 18(3), 03LT01.
- [3] Yan, Y., Xie, G., Lavery, M. P. J., Huang, H., Ahmed, N., Bao, C., Ren, Y., Cao, Y., Li, L., Zhao, Z., Molisch, A. F., Tur, M., Padgett, M. J. ve Willner, A. E. (2014). High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing. *Nature Communications*, 5, 1–9.
- [4] Quinteiro, G. F. ve Tamborenea, P. I. (2009). Theory of the optical absorption of light carrying orbital angular momentum by semiconductors. *Epl*, 85(4), 0–5.
- [5] Wätzel, J. ve Berakdar, J. (2016). Centrifugal photovoltaic and photogalvanic effects driven by structured light. *Scientific Reports*, 6(1), 1–7.
- [6] Dennis, M. R., King, R. P., Jack, B., Oholleran, K. ve Padgett, M. J. (2010). Isolated optical vortex knots. *Nature Physics*, 6(2), 118–121.
- [7] Babiker, M., Bennett, C. R., Andrews, D. L. ve Dávila Romero, L. C. (2002). Orbital Angular Momentum Exchange in the Interaction of Twisted Light with Molecules. *Physical Review Letters*, 89(14), 143601.
- [8] Clark, L. A. (2012). *Electron Vortex Beams : Production and Propagation*. Doctoral Dissertation. University of York, England.
- [9] Franke-Arnold, S., Leach, J., Padgett, M. J., Lembessis, V. E., Ellinas, D., Wright, A. J., Girkin, J. M., Öhberg, P. ve Arnold, A. S. (2007). Optical ferris wheel for ultracold atoms. *Optics Express*, 15(14), 8619.

- [10] Dávila Romero, L. C., Andrews, D. L. ve Babiker, M. (2002). A quantum electrodynamics framework for the nonlinear optics of twisted beams. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 4(2), S66.
- [11] Leach, J., Dennis, M. R., Courtial, J. ve Padgett, M. J. (2004). Knotted threads of darkness. *Nature*, 432(7014), 165.
- [12] Torres, J. P. (2012). Optical communications: Multiplexing twisted light. *Nature Photonics*, 6(7), 420–422.
- [13] Thidé, B., Then, H., Sjöholm, J., Palmer, K., Bergman, J., Carozzi, T. D., Istomin, Y. N., Ibragimov, N. H., ve Khamitova, R. (2007). Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain. *Physical Review Letters*, 99(8), 087701.
- [14] Tamburini, F., Thidé, B. ve Della Valle, M. (2020). Measurement of the spin of the M87 black hole from its observed twisted light. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 492(1), L22–L27.
- [15] Quinteiro, G. F. ve Tamborenea, P. I. (2010). Twisted-light-induced optical transitions in semiconductors: Free-carrier quantum kinetics. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 82(12), 1–10.
- [16] Köksal, K. ve Koç, F. (2016). Optical manipulation of photo-induced current in spherical semiconductor quantum dots by optical vortices. *Philosophical Magazine*, 96(25), 2686–2695.
- [17] Sordillo, L. A., Mamani, S., Sharonov, M. ve Alfano, R. R. (2019). The interaction of twisted Laguerre-Gaussian light with a GaAs photocathode to investigate photogenerated polarized electrons. *Applied Physics Letters*, 114(4), 041104.
- [18] Wang, J., Yang, J. Y., Fazal, I. M., Ahmed, N., Yan, Y., Huang, H., Ren, Y., Yue, Y., Dolinar, S., Tur, M. ve Willner, A. E. (2012). Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature Photonics*, 6(7), 488–496.

- [19] Bozinovic, N., Yue, Y., Ren, Y., Tur, M., Kristensen, P., Huang, H., Willner, A. E. ve Ramachandran, S. (2013). Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers. *Science*, 340(6140), 1545–1548.
- [20] Koç, F. (2016). Bükümlü Işıkların Nanoboyutlu Yarıiletken Ve Moleküler Yapılardaki Kuantum Elektron Dinamiği Üzerindeki Etkisi. Doktora Tezi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Bitlis.
- [21] D'Ambrosio, V., Spagnolo, N., Del Re, L., Slussarenko, S., Li, Y., Kwek, L. C., Marrucci, L., Walborn, S. P., Aolita, L. ve Sciarrino, F. (2013). Photonic polarization gears for ultra-sensitive angular measurements. *Nature Communications*, 4(1), 1–8.
- [22] Lavery, M. P. J., Speirits, F. C., Barnett, S. M. ve Padgett, M. J. (2013). Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum. *Science*, 341(6145), 537–540.
- [23] Zhou, Z.Y., Li, Y., Ding, D.S., Zhang, W., Shi, S. ve Shi, B.S. (2014). Optical vortex beam based optical fan for high-precision optical measurements and optical switching. *Optics Letters*, 39(17), 5098.
- [24] Pachava, S., Dharmavarapu, R., Vijayakumar, A., Jayakumar, S., Manthalkar, A., Dixit, A., Viswanathan, N. K., Srinivasan, B. ve Bhattacharya, S. (2019). Generation and decomposition of scalar and vector modes carrying orbital angular momentum: a review. *Optical Engineering*, 59(04), 041205.
- [25] Detani, T., Zhao, H., Wang, P., Suzuki, T. ve Li, H. (2021). Simultaneous Generation of The Second- and Third-Order OAM Modes by Using a High-Order Helical Long-Period Fiber Grating. *Optics Letters*, 46(5), 949.
- [26] Jing, H., Cheng, W., Zhang, W. ve Lyu, R. (2019). OAM Based Wireless Communications with Non-Coaxial UCA Transceiver. 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Istanbul, Turkey, 8-11 September.

- [27] Feng, P.-Y., Qu, S.-W. ve Yang, S. (2020). OAM-Generating Transmitarray Antenna With Circular Phased Array Antenna Feed. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(6), 4540–4548.
- [28] Jing, H., Cheng, W., Li, Z. ve Zhang, H. (2018). Concentric UCAs Based Low-Order OAM for High Capacity in Radio Vortex Wireless Communications. *Journal of Communications and Information Networks*, 3(4), 85–100.
- [29] Zeng, Y., Wang, Y., Chen, Z., Zhang, J. ve Zhang, J. (2020). Two-dimensional OAM radar imaging using uniform circular antenna arrays. 2020 IEEE 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 15-20 March.
- [30] Chen, R., Long, W. X., Gao, Y., & Li, J. (2018). Orbital angular momentum-based two-dimensional super-resolution targets imaging. 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Anaheim, USA, 26-19 November.
- [31] Tamagnone, M., Craeye, C. ve Perruisseau-Carrier, J. (2012). Comment on ‘Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test’. *New Journal of Physics*, 14(11), 118001.
- [32] Mahmoudi, F. E. ve Walker, S. D. (2013). 4-Gbps Uncompressed Video Transmission over a 60-GHz Orbital Angular Momentum Wireless Channel. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2(2), 223–226.
- [33] Ren, Y., Li, L., Xie, G., Yan, Y., Cao, Y., Huang, H., Ahmed, N., Zhao, Z., Liao, P., Zhang, C., Caire, G., Molisch, A. F., Tur, M. ve Willner, A. E. (2017). Line-of-Sight Millimeter-Wave Communications Using Orbital Angular Momentum Multiplexing Combined With Conventional Spatial Multiplexing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(5), 3151–3161.
- [34] Cheng, W., Zhang, W., Jing, H., Gao, S. ve Zhang, H. (2019). Orbital Angular Momentum for Wireless Communications. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 100–107.



- [35] Yan, Y., Li, L., Zhao, Z., Xie, G., Wang, Z., Ren, Y., Ahmed, N., Sajuyigbe, S., Talwar, S., Tur, M., Ashrafi, N., Ashrafi, S., Molisch, A. F. ve Willner, A. E. (2016). 32-Gbit/s 60-GHz millimeter-wave wireless communication using orbital angular momentum and polarization multiplexing. 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 22-27 May.
- [36] Cheng, W., Zhang, H., Liang, L., Jing, H. ve Li, Z. (2018). Orbital-Angular-Momentum Embedded Massive MIMO: Achieving Multiplicative Spectrum-Efficiency for mmWave Communications. *IEEE Access*, 6, 2732–2745.
- [37] Amin, A. A. ve Shin, S. Y. (2020). Channel Capacity Analysis of Non-Orthogonal Multiple Access With OAM-MIMO System. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(9), 1481–1485.
- [38] Krenn, M., Handsteiner, J., Fink, M., Fickler, R., Ursin, R., Malik, M. ve Zeilinger, A. (2016). Twisted light transmission over 143 km. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48), 13648–13653.
- [39] Yan, L., Gregg, P., Karimi, E., Rubano, A., Marrucci, L., Boyd, R. ve Ramachandran, S. (2015). Q-plate enabled spectrally diverse orbital-angular-momentum conversion for stimulated emission depletion microscopy. *Optica*, 2(10), 900.
- [40] Malik, M., O’Sullivan, M., Rodenburg, B., Mirhosseini, M., Leach, J., Lavery, M. P. J., Padgett, M. J. ve Boyd, R. W. (2012). Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding. *Optics Express*, 20(12), 13195.
- [41] Boyd, R. W., Jha, A., Malik, M., O’Sullivan, C., Rodenburg, B. ve Gauthier, D. J. (2011). Quantum key distribution in a high-dimensional state space: exploiting the transverse degree of freedom of the photon. In *Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication IV*, San Francisco, USA, 12 February.
- [42] Barreiro, J. T., Wei, T.-C. ve Kwiat, P. G. (2008). Beating the channel

- capacity limit for linear photonic superdense coding. *Nature Physics*, 4(4), 282–286.
- [43] Santec Corporation. Liquid Crystal Based Spatial Light Modulator SLM-210. [https://www.santec.com/dcms\\_media/other/SLM-210-C-E-v1.0\\_2203\\_web.pdf](https://www.santec.com/dcms_media/other/SLM-210-C-E-v1.0_2203_web.pdf) İndirilme tarihi: 5 Nisan 2021.
- [44] Bild-und Lichtsysteme. LCD L3C07U-85G13 spatial light modulator. [https://www.bbs-bildsysteme.com/Microdisplay\\_EPSON\\_HD\\_L3C07U-pol-new\\_.pdf](https://www.bbs-bildsysteme.com/Microdisplay_EPSON_HD_L3C07U-pol-new_.pdf) İndirne Tarihi: 28 Mayıs 2021.
- [45] Jayasinghe, A. K., Rohner, J. ve Hutson, M. S. (2011). Holographic UV laser microsurgery. *Biomedical Optics Express*, 2(9), 2590.
- [46] Hornbeck, I. L. J., Alstyne, V. ve Nelson, W. E. (1992). Spatial light modulator and method (Patent Sayı U.S. Patent No.5,096,279).
- [47] Frankowski, G., Chen, M. ve Huth, T. (2002). Phaseshift rapid in-vivo measuring of human skin (PRIMOS) by digital fringe projection with micromirror display devices DMD. In *Interferometry XI: Applications*, Seattle, USA, 19 June.
- [48] Hornbeck, L. J. (1996). Digital light processing and MEMS: An overview. In *Digest IEEE/Leos 1996 Summer Topical Meeting. Advanced Applications of Lasers in Materials and Processing*, Keystone, USA, 5-9 August.
- [49] Dudley, D., Duncan, W. M. ve Slaughter, J. (2003, January). Emerging digital micromirror device (DMD) applications. In *MOEMS display and imaging systems*. International Society for Optics and Photonics, San Jose, USA, 20 January.
- [50] Hesselink, L., Orlov, S. S. ve Bashaw, M. C. (2004). Holographic data storage systems. *Proceedings of the IEEE*, 92(8), 1231–1280.
- [51] Mendoza-Castro, J., Jerez, V., Torres, Y. ve Aguilera, E. (2019). Holographic Data Storage Based Orbital Angular Momentum. *Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS*, Washington, USA, 15-19 September.

- [52] Lin, X., Liu, J., Hao, J., Wang, K., Zhang, Y., Li, H., Horimai, H. ve Tan, X. (2020). Collinear Holographic Data Storage Technologies. *Opto-Electronic Advances*, 3(3), 19000401–19000408.
- [53] Bae, K., Zheng, W. ve Huang, Z. (2020). Spatial light-modulated stimulated Raman scattering (SLM-SRS) microscopy for rapid multiplexed vibrational imaging. *Theranostics*, 10(1), 312–322.
- [54] Sinjab, F., Liao, Z. ve Notingher, I. (2019). Applications of Spatial Light Modulators in Raman Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 73(7), 727–746.
- [55] Schmieder, F., Klapper, S., Koukourakis, N., Busskamp, V. ve Czarske, J. (2018). Optogenetic Stimulation of Human Neural Networks Using Fast Ferroelectric Spatial Light Modulator—Based Holographic Illumination. *Applied Sciences*, 8(7), 1180.
- [56] Elsayed, M., Ghazy, M., Youssef, Y. ve Essa, K. (2019). Optimization of SLM process parameters for Ti6Al4V medical implants. *Rapid Prototyping Journal*, 25(3), 433–447.
- [57] Zhang, J., Hu, Q., Wang, S., Tao, J. ve Gou, M. (2019). Digital Light Processing Based Three-dimensional Printing for Medical Applications. *International Journal of Bioprinting*, 6(1), 1.
- [58] Park, M. C., Lee, B. R., Son, J. Y. ve Chernyshov, O. (2015). Properties of DMDs for holographic displays. *Journal of Modern Optics*, 62(19), 1600–1607.
- [59] Takaki, Y. ve Okada, N. (2009). Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator. *Applied Optics*, 48(17), 3255–3260.
- [60] Nesbitt, R. S., Smith, S. L., Molnar, R. A. ve Benton, S. A. (1999). Holographic recording using a digital micromirror device. In *Practical holography XIII* (Vol. 3637. International Society for Optics and Photonics, San Jose, USA, 25 March.

- [61] Nayar, S. K., Branzoi, V. ve Boult, T. E. (2004). Programmable imaging using a digital micromirror array. In Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, USA, 27 June-2 July.
- [62] Sun, B., Edgar, M. P., Bowman, R., Vittert, L. E., Welsh, S., Bowman, A. ve Padgett, M. J. (2013). 3D computational imaging with single-pixel detectors. *Science*, 340(6134), 844–847.
- [63] Zhu, P., Fajardo, O., Shum, J., Zhang Schärer, Y. P. ve Friedrich, R. W. (2012). High-resolution optical control of spatiotemporal neuronal activity patterns in zebrafish using a digital micromirror device. *Nature protocols*, 7(7), 1410–1425.
- [64] Ren, Y. X., Li, M., Huang, K., Wu, J. G., Gao, H. F., Wang, Z. Q. ve Li, Y. M. (2010). Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using digital micromirror device. *Applied Optics*, 49(10), 1838–1844.
- [65] Rodrigo, P. J., Perch-Nielsen, I. R. ve Glückstad, J. (2006). High-speed phase modulation using the RPC method with a digital micromirror-array device. *Optics Express*, 14(12), 5588.
- [66] Gong, C. ve Hogan, T. (2014). CMOS compatible fabrication processes for the digital micromirror device. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2(3), 27–32.
- [67] Karimi, E. (2009). Generation and manipulation of laser beams carrying orbital angular momentum for classical and quantum information applications. Doctoral Dissertation. Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy.
- [68] Carpentier, A. V., Michinel, H., Salgueiro, J. R. ve Olivieri, D. (2008). Making optical vortices with computer-generated holograms. *American Journal of Physics*, 76(10), 916–921.
- [69] Brambilla, M., Cattaneo, M., Lugiato, L. A. ve Prati, F. (1990). Transverse laser patterns and phase singularity crystals. Institute of Physics Conference

Series, 43(115), 133–144.

- [70] Beijersbergen, M. W., Allen, L., van der Veen, H. E. L. O. ve Woerdman, J. P. (2016). Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum. *Optical Angular Momentum*, 96, 135–144.
- [71] Slinger, C., Cameron, C. ve Stanley, M. (2005). Computer-generated holography as a generic display technology. *Computer*, 38(8), 46–53.
- [72] Heckenberg, N. R., McDuff, R., Smith, C. P. ve White, A. G. (1992). Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms. *Optics Letters*, 17(3), 221.
- [73] Trester, S. (1996). Computer simulated holography and computer generated holograms. *American Journal of Physics*, 64(4), 472–478.
- [74] Bártolo, P. J. (Ed.). (2011). *Stereolithography: materials, processes and applications*. New York: Springer Science & Business Media.
- [75] Allen, L., Beijersbergen, M. W., Spreeuw, R. J. C. ve Woerdman, J. P. (1992). Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Physical Review A*, 45(11), 8185–8189.
- [76] Poynting, J. H. (1884). XV. On the transfer of energy in the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 175, 343–361.
- [77] Andrews, D. L. ve Babiker, M. (Ed.). (2012). *The Orbital Angular Momentum*. New York: Cambridge University Press.
- [78] Poynting, J. H. (1909). The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(557), 560-567.
- [79] Beth, R. A. (1936). Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light. *Physical Review*, 50(2), 115–125.

- [80] Barnett, S. M. (2002). Optical angular-momentum flux. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 4(2), S7–S16.
- [81] Huang, D., Timmers, H., Roberts, A., Shivaram, N. ve Sandhu, A. S. (2012). A low-cost spatial light modulator for use in undergraduate and graduate optics labs. *American Journal of Physics*, 80(3), 211–215.
- [82] Porter, A. G. ve George, S. (1975). An elementary introduction to practical holography. *American Journal of Physics*, 43(11), 954–959.
- [83] Yu, C., Li, J., Li, X., Ren, X. ve Gupta, B. B. (2018). Four-image encryption scheme based on quaternion Fresnel transform, chaos and computer generated hologram. *Multimedia Tools and Applications*, 77(4), 4585–4608.
- [84] Schwerdtner, A. (2018). Method of computing a hologram for reconstructing an object using a display device. U.S. Patent No. 9,989,920.
- [85] Leister, N., Haussler, R., ve Schwerdtner, A. (2019). Method and a display device for generating a holographic reconstruction of an object. U.S. Patent No. 10,401,794.
- [86] Dallas, W. J. (1971). Phase Quantization in Holograms—a Few Illustrations. *Applied Optics*, 10(3), 674–676.
- [87] Goodman, J. W. ve Silvestri, A. M. (1970). Some Effects of Fourier-domain Phase Quantization. *IBM Journal of Research and Development*, 14(5), 478–484.
- [88] Naidu, P. S. (1975). Quantization noise in binary holograms. *Optics Communications*, 15(3), 361–365.
- [89] Brown, B. R. ve Lohmann, A. W. (1969). Computer-generated Binary Holograms. *IBM Journal of Research and Development*, 13(2), 160–168.
- [90] Tripathy, A. K., Tripathy, S. K., Pattanaik, S. R. ve Das, S. K. (2021). A New Algorithm For Reconstruction Of A Computer-Generated Hologram (CGH). *The Computer Journal*, 64(2), 245–253.

- [91] Lohmann, A. W. ve Paris, D. P. (1967). Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer. *Applied Optics*, 6(10), 1739.
- [92] Liu, J. P. ve Poon, T. C. (2014). *Introduction to Modern Digital Holography*. New York: Cambridge University Press.
- [93] Molina-Terriza, G., Torres, J. P. ve Torner, L. (2007). Twisted photons. *Nature physics*, 3(5), 305-310.
- [94] Allen, L. (2002). Introduction to the atoms and angular momentum of light special issue. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 4(2), S1–S6.
- [95] Barreiro, S. ve Tabosa, J. W. R. (2003). Generation of Light Carrying Orbital Angular Momentum via Induced Coherence Grating in Cold Atoms. *Physical Review Letters*, 90(13), 133001.
- [96] Vo-Dinh, T. ve Cullum, B. (2000). Biosensors and biochips: advances in biological and medical diagnostics. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 366(6), 540-551.
- [97] Al-Awfi, S. ve Babiker, M. (2000). Atomic motion in hollow submicron circular cylinders. *Physical Review A*, 61(3), 033401.
- [98] Araoka, F., Verbiest, T., Clays, K. ve Persoons, A. (2005). Interactions of twisted light with chiral molecules: An experimental investigation. *Physical Review A*, 71(5), 055401.
- [99] Torres, J. P. ve Torner, L. (Eds.). (2011). *Twisted photons: applications of light with orbital angular momentum*. Weinheim: John Wiley & Sons.
- [100] Quinteiro, G. F. ve Berakdar, J. (2009). Electric currents induced by twisted light in Quantum Rings. *Optics Express*, 17(22), 20465.
- [101] Grätzel, M. (2011). Photoelectrochemical cells. In *Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group, Kainan University, Tauhuan, Taiwan*, 15

November.

- [102] Peet, J., Kim, J. Y., Coates, N. E., Ma, W. L., Moses, D., Heeger, A. J. ve Bazan, G. C. (2007). Efficiency enhancement in low-bandgap polymer solar cells by processing with alkane dithiols. *Nature Materials*, 6(7), 497–500.
- [103] Thompson, B. C. ve Fréchet, J. M. J. (2008). Polymer–Fullerene Composite Solar Cells. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(1), 58–77.
- [104] Yang, X., Loos, J., Veenstra, S. C., Verhees, W. J. H., Wienk, M. M., Kroon, J. M., Michels, M. A. J. ve Janssen, R. A. J. (2005). Nanoscale Morphology of High-Performance Polymer Solar Cells. *Nano Letters*, 5(4), 579–583.
- [105] Li, G., Shrotriya, V., Huang, J., Yao, Y., Moriarty, T., Emery, K. ve Yang, Y. (2005). High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends. *Nature Materials*, 4(11), 864–868.
- [106] Timmerman, D., Izeddin, I., Stallinga, P., Yassievich, I. N. ve Gregorkiewicz, T. (2008). Space-separated quantum cutting with silicon nanocrystals for photovoltaic applications. *Nature Photonics*, 2(2), 105–109.
- [107] Wätzel, J., Moskalenko, A. S. ve Berakdar, J. (2012). Photovoltaic effect of light carrying orbital angular momentum on a semiconducting stripe. *Optics Express*, 20(25), 27792.
- [108] Texas Instruments (2019). Product Folder Order Now DLP7000 DLP7000 DLP ® 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD. (2012). <https://www.ti.com/> İndirilme Tarihi: 5 Şubat 2021.
- [109] Douglass, M. R. (1998). Lifetime estimates and unique failure mechanisms of the digital micromirror device (DMD). 36th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, Reno, Nevada, 10-14 March.
- [110] Hamamatsu Photonics (2016). LCOS-SLM (Liquid Crystal on Silicon-Spatial Light Modulator). <https://www.hamamatsu.com/> İndirme Tarihi: 23 Temmuz 2020 .
- [111] Texas Instruments (2019). Dlp9000Xuv. <https://www.ti.com/> İndirilme Tarihi:



24 Temmuz 2020.

- [112] Osram (2010). Application Note How to connect the Control board Interface ( UART , Communication and Synchronization ). <https://studylib.net/doc/8287321/application-note-how-to-connect-the-control-board-interfa/> İndirme Tarihi: 23 Temmuz 2020.
- [113] Cox, M. A. ve Drozdov, A. V. (2021). Converting a Texas Instruments DLP4710 DLP evaluation module into a spatial light modulator. *Applied Optics*, 60(2), 465-469.
- [114] Panarin, S., Müller, J., Prabhakar, S. ve Fickler, R. (2021). Spatial structuring of light for undergraduate laboratories. *American Journal of Physics*, 89(2), 210–219.
- [115] Bigman, H. H. (2012). Zero Spatial Chirp Vortices From Supercontinuum Modulation. Doctoral Dissertation. San Diego State University, San Diego, USA.

# ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :

Doğum Tarihi

Yabancı Dil

Eğitim Durumu :

Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Bitlis Eren Üniversitesi

Kırıkkale Üniversitesi

Yayımları (SCI) :

Yayımları (Diğer) :