

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORCID : - - -**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**ORCID : - - -**

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Öncelikle yüksek lisans tezi danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçiminde ve gerekse çalışmaların yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen, akademisyen olma yolunda her türlü bilimsel katkıyı sağlayan sayın hocam Doç. Dr. Kadir TÜRK'e ve aynı şekilde fikirleri ile çalışmalarımda her zaman destek ve yardımcı olan değerli meslektaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda durup sabırla bana destek olan aileme ve bu süreçte desteklerini esirgemeyen Haberleşme Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (HATAL) öğretim görevlisi ve mühendis ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Oğuzhan BAŞER  
Trabzon 2020

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Görünür Işık Haberleşmesi’nde Çok Seviyeli Modülasyon Türleri için MOSFET’li LED Sürücü Tasarımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Kadir TÜRK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/08/2020

Oğuzhan BAŞER

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	X
1. GENEL BİLGİLER .....	13
1.1. Giriş.....	13
1.2. Literatür Taraması.....	16
1.3. VLC Kanal Yapısı.....	20
1.4. VLC Modülasyon Çeşitleri .....	24
1.5. VLC Vericiler.....	26
1.6. VLC Alıcılar.....	31
1.7. MOSFET ve MOSFET Sürücü .....	33
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	36
2.1. Giriş.....	36
2.2. Devre Analizi .....	38
2.3. Benzetim Çalışmaları .....	41
2.4. Veri Oluşturma.....	44
2.5. Deneysel Çalışmalar.....	45
3. BULGULAR ve İRDELEME .....	52
3.1. Giriş.....	52
3.2. Sürücü Testleri .....	52
3.3. Histogram.....	54
3.4. Oda İçi BER .....	57
3.5. Güç ve Verimlilik.....	59
4. SONUÇLAR .....	61
5. ÖNERİLER.....	62
6. KAYNAKLAR .....	63
ÖZGEÇMİŞ	

## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

# GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ'NDE ÇOK SEVİYELİ MODÜLASYON TÜRLERİ İÇİN MOSFET'Lİ LED SÜRÜCÜ TASARIMI

Oğuzhan BAŞER

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Kadir TÜRK  
2020, 57 Sayfa

Işık yayan diyotlar (Light Emitting Diodes, LED) geleneksel aydınlatma cihazlarına kıyasla yüksek enerji verimliliği ve uzun ömürleri ile çevre dostu bir aydınlatma imkânı sağlamaktadır. Bu nedenle günümüzde kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Ayrıca LED'lerin yüksek hızlarda anahtarlanabilmeleri onları kısa mesafeli kablosuz optik haberleşme için iyi birer verici yapar. Bu nedenle, özellikle LED kullanılarak, aydınlatmanın gücü veya rengi insan gözünün fark edemeyeceği hızlarda değiştirilerek veri iletimi de gerçekleştirilebilir. Bu teknolojiye görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC) adı verilmektedir. VLC'nin radyo frekansı (Radio Frequency, RF) haberleşmesine göre daha güvenilir, ucuz ve verimli olması, RF bandının giderek kalabalıklaşmasından dolayı VLC, RF'e bir alternatif veya tamamlayıcı teknoloji olarak ilgi çekmektedir.

Bu çalışmada kapalı mekân VLC sistemleri için aydınlatma şartlarını sağlarken veri iletimi gerçekleştirebilen bir LED sürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan LED sürücü Metal oksit yarı iletken alan etkili transistörleri (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistör, MOSFET) anahtar olarak kullanırken çok seviyeli modülasyonları desteklemesi ile yüksek verimliliğin yanı sıra verici sistemin kolay tasarlanabilir ve düşük maliyetli olmasını sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** VLC, LED Sürücü, Çok Seviyeli Modülasyon, MOSFET

## Master Thesis

### SUMMARY

#### LED DRIVER DESIGN WITH MOSFET FOR MULTILEVEL MODULATION TYPES IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Oğuzhan BAŞER

Karadeniz Technical University  
The Graduate of Natural and Applied Sciences  
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Kadir TÜRK  
2020, 57 Pages

Light emitting diodes (Light Emitting Diodes, LED) provide an environment-friendly lighting opportunity with high energy efficiency and long life compared to traditional lighting devices. Therefore, their use is becoming more and more common today. Also, the ability to switch LED's at high speeds makes them good transmitters for short-range wireless optical communication. For this reason, data transmission can also be performed by changing the power or color of the lighting at speeds that the human eye cannot notice, especially by using LED. This technology is called Visible Light Communication (VLC). VLC attracts attention as an alternative or complementary technology to RF due to the VLC is more reliable, inexpensive and efficient compared to radio frequency (Radio Frequency, RF) communication and the RF band is getting more and more crowded.

In this study, an LED driver is designed that can perform data transmission while providing lighting conditions for indoor VLC systems. The designed LED driver supports multi-level modulation when using Metal oxide semiconductor field effect transistors (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) as switch, making the transmitter system easy to design and low cost.

**Keywords:** VLC, LED Driver, Multi-Level Modulation, MOSFET

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Elektromanyetik Spektrum.....	13
Şekil 2. VLC Kanal için Örnek Oda Modeli .....	21
Şekil 3. VLC Kanal Modeli .....	23
Şekil 4. LED Renk Spektrumu .....	28
Şekil 5. LED Eşdeğer Devresi.....	30
Şekil 6. Kamera ile VLC Haberleşme .....	32
Şekil 7. MOSFET Sürücü Push-Pull Yapısı.....	35
Şekil 8. LED Sürücü Modeli .....	37
Şekil 9. LED Sürücü Şematik.....	39
Şekil 10. NCP81074 İç Görünümü.....	40
Şekil 11. LED Sürücü Benzetim.....	42
Şekil 12. Benzetim Sonuçları .....	43
Şekil 13. Veri Paketi.....	44
Şekil 14. Oda Modelinde Ölçüm Noktaları .....	45
Şekil 15. LED Sürücü PCB Çizimi .....	46
Şekil 16. LED Sürücüler.....	47
Şekil 17. LED Grubu Modeli .....	48
Şekil 18. LED Grupları.....	49
Şekil 19. Transistörlü Lojik Seviye Yükseltici.....	50
Şekil 20. Deney Seti Blok Diyagramı .....	50
Şekil 21. Alıcıdaki Genlik Seviyeleri .....	53
Şekil 22. Genlik Seviyeleri Histogram Grafiği .....	54
Şekil 23. Histogram Grafikleri (1 - 16 Ölçüm) .....	56
Şekil 24. BER Grafikleri .....	58
Şekil 25. Alınan Sinyal Gücü - 1 .....	59
Şekil 26. Alınan Sinyal Gücü - 2.....	59



## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. LED Yarı İletken Malzemeler.....	27
Tablo 2. MOSFET Parametreleri .....	34
Tablo 3. Normalize Genlik Seviyeleri.....	55
Tablo 4. Ölçüm Numaraları.....	57



## SEMBOLLER DİZİNİ

<i>APD</i>	: Çığ Fotodiyot (Avalanche Photodiode)
<i>A<sub>PD</sub></i>	: Fotodiyot Yüzey Alanı
<i>BER</i>	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
<i><math>\beta n</math></i>	: n. LED'in Güç Spektral Dağılımı
<i>C<sub>GS</sub></i>	: Gate - Source Kapasite Değeri
<i>C<sub>iss</sub></i>	: Giriş Kapasite Değeri
<i>C<sub>oss</sub></i>	: Çıkış Kapasite Değeri
<i>C<sub>rss</sub></i>	: Ters Transfer Kapasitesi
<i>CMOS</i>	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
<i>CSK</i>	: Renk Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying)
<i>d<sub>o</sub></i>	: LED - Fotodiyot Arası En Kısa Mesafe
<i>DAC</i>	: Dijital Analog Çevirici (Digital Analog Converter)
<i>f<sub>t</sub></i>	: Transistörün Kesim Frekansı
<i>FOV</i>	: Görüş Açısı (Field of View)
<i>GaAs</i>	: Galyum Arsenid
<i>GaAsP</i>	: Galyum Arsenik Fosfit
<i>GaP</i>	: Galyum Fosfit
<i>GPS</i>	: Küresel Konum Sistemi (Global Positioning System)
<i>h(t)</i>	: Birim Vuruş Tepkisi
<i>InGaAIP</i>	: İndiyum Galyum Alüminyum Fosfit
<i>ITS</i>	: Akıllı Ulaşım Sistemi (Intelligent Transportation Systems)
<i>k</i>	: Verici İle Alıcı Arasında Yansıma Sayısı
<i>L<sub>o</sub></i>	: LOS Durumu İçin Yol Kaybı
<i>LED</i>	: Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
<i>Li-Fi</i>	: Işık ile Bağlantı (Light Fidelity)
<i>LOS</i>	: Görüş Hattı (Line of Sight)

<i>m</i>	: Lambert indeksi
<i>MOSFET</i>	: Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
<i>NRZ</i>	: Sıfıra Dönmeyen (Not Return Zero)
<i>OFDM</i>	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)
<i>OLED</i>	: Organik LED (Organic LED)
<i>OOK</i>	: Açma - Kapama Anahtarlama (On-Off Keying)
<i>OPAMP</i>	: İşlemsel Yükselteç (Operational Amplifier)
<i>OWC</i>	: Kablosuz Optik Haberleşme (Optical Wireless Communication)
<i>PAM</i>	: Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation)
<i>PCB</i>	: Baskı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
<i>PD</i>	: Fotodiyot (Photodiode)
<i>PF</i>	: Güç Faktörü (Power Factor)
<i>PLC</i>	: Güç Hattı Haberleşmesi (Power Line Communication)
<i>PPM</i>	: Darbe Konum Modülasyonu (Pulse Position Modulation)
<i>PWM</i>	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
<i>RGB</i>	: Kırmızı Yeşil Mavi (Red Green Blue)
<i>RF</i>	: Radyo Frekansı (Radio Frequency)
<i>RLL</i>	: Sınırlı Çalışma Uzunluklu Kod (Run length limited)
<i>SiC</i>	: Silikon Karbid
<i>SMD</i>	: Yüzey Montajlı Cihaz (Surface Mounted Device)
<i>SNR</i>	: İşaret Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio)
<i>t</i>	: Zaman
<i>t<sub>d(ON)</sub></i>	: Gecikme Süresi (Açılma)
<i>t<sub>d(OFF)</sub></i>	: Gecikme Süresi (Kapanma)
<i>t<sub>f</sub></i>	: Düşme Süresi
<i>t<sub>r</sub></i>	: Yükselme Süresi
<i>V<sub>GS</sub></i>	: Gate - Source Gerilimi
<i>V<sub>DS</sub></i>	: Drain - Source Gerilimi
<i>V2I</i>	: Araç - Altyapı Arası Haberleşme (Vehicle to Infrastructure)

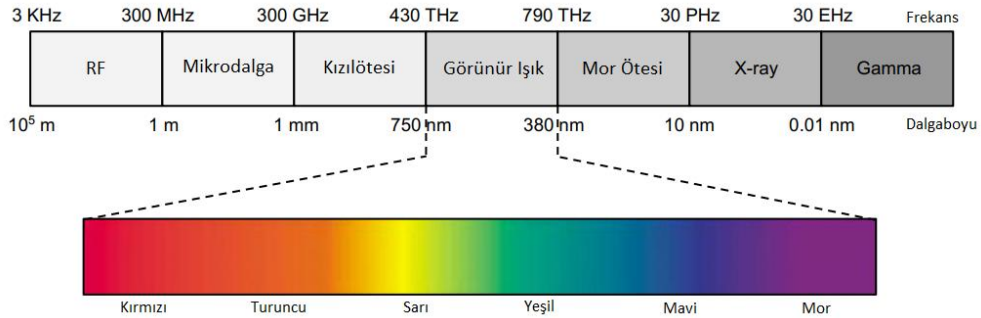
<i>V2V</i>	: Araç - Araç Arası Haberleşme (Vehicle to Vehicle)
<i>VLC</i>	: Görünür Işık Haberleşmesi (Visible Light Communication)
<i>WDM</i>	: Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama (Wavelength Division Multiplexing)
<i>Q<sub>GS</sub></i>	: Gate - Source Yük Değeri
<i>QLED</i>	: Quadrichromatic LED
$\phi_0, \theta_0$	: Yansıyan Işığın Normal ile Yaptığı Açısı
$\mu$ LED	: Mikro LED (Micro LED)



# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Gelişen teknoloji ile haberleşmeye olan talep giderek artmaktadır. Özellikle akıllı telefonların yaygınlaşmasından sonraki süreçte ortaya çıkan, sesin yanında görüntü de aktarma gibi veri iletimi talepleri kablosuz haberleşme alanında yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Başta kilobitler mertebesinde olan kablosuz haberleşme hızları günümüzde gigabit mertebesine ulaşmış ve daha da hızlandırmak için sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Artan talep ile kablosuz haberleşmede kullanılan radyo frekans (Radio Frequency, RF) bandı gittikçe dolmaktadır. Hali hazırda boş durumda bulunan yüksek frekanslarda çalışan sistemlerin tasarımı ise hem zahmetli hem de yüksek maliyet gerektirmektedir. Bu sorunlara çözüm için görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC) güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [1]. VLC, LED'lerin insan gözünün algılamayacağı yüksek hızlarda anahtarlanması ile yapılan veri iletim yöntemidir. Yapılan anahtarlanmanın yüksek hızlarda olması hem veri iletim hızını arttırmakta hem de aydınlatmada titreşim meydana gelmemesini sağlamaktadır. VLC'nin en büyük avantajlarından birisi de özellikle iç mekânlarda aydınlatma ve veri iletimini aynı anda sağlıyor olmasıdır. Günlük hayatta LED'lerin kullanımının yaygınlaşıyor olması da VLC haberleşmeyi daha da cazip hale getirmektedir. Günümüzde ev aydınlatmalarının yanı sıra trafik ışıkları, sokak aydınlatmaları ve araçların farlarında LED aydınlatmalar kullanılmaktadır. Görünür ışık spektrumu 430 THz ile 790 THz arası frekans bandında lisans gerektirmeden kullanılabilir (Şekil-1). Bu sebeple VLC iç ve dış mekân haberleşmelerinde rahatlıkla kullanılabilir.



Şekil 1. Elektromanyetik Spektrum

Günümüzde evler, araçlar, trafik aydınlatmaları, cep telefonları gibi günlük hayatımızın birçok yerinde LED kullanımı yaygınlaşmaktadır. Çünkü LED'ler diğer enerji kaynaklarına göre daha verimlidir ve maliyet olarak daha ucuzdur. LED'lerin çalışma ömürlerini etkilemeden yüksek frekansta anahtarlanabiliyor olması VLC için önemli bir tercih sebebi olmuştur. Günlük hayatta LED kullanımının yaygınlaşması VLC'nin günlük hayata uygulanabilirliğini arttırmaktadır. VLC üzerine akademik çalışmalar son 20 yıldır yapılmaktadır. RF ile kıyaslandığında bu süreç oldukça azdır. Bu sebeple VLC, keşfedilmeye ve araştırmaya açık bir alan olarak ortaya çıkmaktadır.

VLC üzerine yapılan bilinen ilk çalışma 1880 yılında Alexander Grahambell tarafından yapılmıştır. Ancak bu çalışma günümüzde kullanılan VLC'den farklı olarak gün ışığı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [2]. Daha sonralarda 1998 yılında floresan lambalar kullanılarak bazı denemeler gerçekleştirilmiştir [3]. Ancak floresan lambalar düşük hızlarda anahtarlanabilmektedir. Bu sebeple floresan lambalar ile yapılan VLC çalışmalarında düşük hızlarda veri iletimi gerçekleştirilebilmiştir. LED'ler kullanılarak yapılan VLC çalışmalarına 21. yüzyılın başlarında başlanmış ve günümüzde hala VLC üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Gerçekçi kanal modeli için yapılmış iki çalışma genellikle referans olarak kabul edilir. Bunlardan ilki John R. Barry ve arkadaşları tarafından 2011 yılında gerçekleştirilmiştir [4]. Bu modelde matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve ışığın duvarlardan ve nesnelere Lambertian dağılımı ile dağıldığı kabul edilmiştir [5]. Alıcıya gelen bütün ışıklar toplanarak matematiksel model elde edilmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada ise VLC kanal modeli oluşturulabilmesi için Zemax programı yardımı ile ışın izleme teknikleri kullanılmıştır [6].

Kablolu ve kablosuz haberleşmede modülasyon önemli bir yer taşımaktadır. Modülasyon iletilmesi gereken veriyi kanalın bozucu etkilerine karşı dirençli hale getirirken haberleşme kanalının daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. VLC'de haberleşme gerçekleştirilirken taşıyıcı işaret kullanılmadığından modülasyon daha fazla önem taşımaktadır. Tek taşıyıcılı modülasyonlar Kızılötesi (Infrared, IR) Haberleşmede yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. VLC'de bunlara ek olarak çok taşıyıcılı modülasyonlar da kullanılmaktadır. Işık ile haberleşme kullanılırken modülasyonun yanı sıra kullanılan kodlama tekniğinin de önemi büyüktür. Çünkü veri iletimi sırasında kullanılan modülasyon çeşidine bağlı olarak arka arkaya çok fazla 1 ya da 0 gönderimi aydınlatmada titreme etkilerinin meydana gelmesine sebep olacaktır. Titreme etkisi, aydınlatma sağlanması istenen durumlarda göze zarar vereceği gibi haberleşmede senkronizasyonun bozulmasına

da sebep olmaktadır. Titreme etkisini en aza indirmek için Sınırlı Çalışma Uzunluklu (Run Length Limited, RLL) kodlarından olan Manchester, Miller ya da hat kodları gibi kodlar kullanılmaktadır [1]. VLC’de kullanılan modülasyon çeşitleri 1.4’de detaylı olarak verilmiştir.

VLC yüksek frekanslı bir elektromanyetik dalga olması sebebi ile çevredeki objelere ve duvarlara nüfuz edemez. Bu özellik VLC’nin farklı odalardaki haberleşme sırasında verilerin karışmasını ve girişim oluşturmasını engeller. Aynı zamanda bu özellik oda içerisindeki kanal kapasitesini ve haberleşme güvenliği de arttırmaktadır. Işığın duvarlar arasından geçemiyor olması sebebi ile duvarlar, VLC haberleşmede doğal güvenlik duvarı oluşturmaktadır. VLC’nin sahip olduğu bu özellik nedeniyle VLC RF’e göre çok daha güvenli bir haberleşme yöntemidir.

LED kullanımının dış mekânlarda da yaygınlaşmış olması VLC’nin son yıllarda çalışmaları artan Akıllı Ulaşım Sistemleri (Intelligent Transportation Systems, ITS) için de önemli bir kablosuz haberleşme teknolojisi olarak tercih edilmesine sebep olmuştur. Akıllı ulaşım sistemlerinde VLC kullanılırken dış mekân senaryoları geçerli olduğundan önemli bir parametre olan gün ışığı ve güneş radyasyonu dikkate alınmalıdır. Tasarlanan VLC sistemlerinde bu sorunlara çözüm bulmak için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. VLC’de akıllı ulaşım sistemleri için yapılan çalışmalarda iki ayrı ana başlık bulunmaktadır. Bu başlıklar araç-araç arası iletişim (Vehicle to Vehicle Communication, V2V) ve araç – altyapı arası iletişim (Vehicle to Infrastructure Communication, V2I) olarak isimlendirilirler. V2I uygulamalarında genellikle trafik ve sokak aydınlatmaları kullanılarak yapılan haberleşmeleri içermektedir. V2V uygulamalar ise araçların ön ve arka farları kullanılarak gerçekleştirilen haberleşme uygulamalarını içermektedir. Bu sistemlerde önerilen verici yöntemine göre alıcı olarak fotodiyot ya da kamera kullanılabilir. Bu sistemlerde önerilen verici yöntemine göre alıcı olarak fotodiyot ya da kamera kullanılabilir.

Konumlandırma uygulamalarında genellikle küresel konumlandırma sistemi (Global Positioning System, GPS) sistemleri kullanılmaktadır. Ancak GPS sistemleri iç mekânlarda çalışmamaktadır. İç mekânlarda yapılan konumlandırma sistemlerinde RF tabanlı çözümler kullanılmaktadır. RF tabanlı sistemler ile yapılan konumlandırma uygulamaları düşük doğruluk ile çalışmaktadır. Ayrıca RF sistemleri ile konumlandırma yapmak çok yolluluk (multi path) etkisi gibi sebepler ile oldukça karmaşıktır. İç mekân konumlandırma sistemlerinde VLC kullanılması RF tabanlı sistemlerde meydana gelen sistem karmaşası ve doğruluğun az olması gibi problemlerin önüne geçmektedir. LED kullanılarak yapılan konumlandırma sistemlerinde RF tabanlı sistemlerde olduğu gibi çok sayıda LED

aydınlatma kullanılarak gerçekleştirilmekte ve santimetreler mertebesinde hata ile konumlandırma gerçekleştirilebilmektedir.

VLC'nin bir diğer kullanım alanı da sualtı haberleşmedir. Sualtı haberleşmede genellikle akustik tabanlı çözümler kullanılmaktadır. Bu çözümler her ne kadar uzun mesafe haberleşmeyi desteklese de akustik dalgalardan kaynaklanan düşük taşıyıcı frekansı nedeniyle kilobitler mertebesinde veri iletimini desteklemektedir. LED kullanımının su altında yaygınlaşması ile VLC kullanılarak kısa ve orta mesafelerde yapılan veri iletimi daha yüksek hızlara çıkarılabilmesi amaçlanmaktadır.

Radio Frequency (RF) sistemlerin aksine VLC sistemlerinde kullanılan alıcı ve vericilerin tasarımı, veri iletiminde taşıyıcı bir sinyal kullanılmaması sebebi ile daha kolaydır. Ayrıca ışık negatif ve kompleks genlik değeri alamayacağı için VLC'de yapılan iletişim reel ve pozitif değerlerdedir. Bu sebeple VLC'de yapılan modülasyon işlemleri RF'e göre daha az karmaşıklık içerirler.

## 1.2. Literatür Taraması

LED aydınlatmanın kullanıldığı VLC konusundaki öncü çalışmalardan biri [8]'dir. Bu çalışmada VLC, enerji hattı haberleşmesiyle (power line communication, PLC) birleştirilmiştir. Yapılan çalışma deneysel olarak gerçekleştirilmiş, PLC ile VLC birleşiminin avantajlarından bahsedilmiştir. Boyutları 5 metreye 7 metre olan bir ofis ortamında 6 adet LED aydınlatma ile haberleşme gerçekleştirilmiş ve 1 Mbps veri hızına ulaşılmıştır.

Su altı haberleşmede sistemlerinde kısa ve orta mesafede akustik haberleşmeye göre daha yüksek veri hızlarına çıkabilmek için VLC ile çalışmalar yapılmaktadır. Ancak su altında çalışmak diğer ortamlara göre daha zor olduğundan su altında yapılan çalışmaların sayısı daha azdır. Su altında VLC kullanılarak yapılan bir çalışmada LED ve fotodiyot kullanılarak haberleşme gerçekleştirilmiştir [9]. Su altı kanalı modelini oluşturarak deneysel çalışma yapmak için 6,5 metre boyunda 520 lt'lik bir su tankı kullanılmıştır. Haberleşmeyi gerçekleştirmek için 12 farklı senaryo denenmiş ve her senaryoda farklı modülasyon teknikleri, örnekleme hızları ve OFDM parametreleri kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 6,5 metre mesafesinde  $10^{-6}$  BER ile haberleşme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca su altı VLC haberleşmede mavi LED kullanımının soğuk beyaz ve yeşil LED'lere göre daha yüksek performans verdiğini gözlemlemişlerdir. Su altı haberleşmede yapılan farklı bir çalışmada haberleşme mesafesini arttırmak için çok atlamalı (multi-hop) bir sistem



önerilmiştir [10]. Farklı su altı şartları altında farklı LED'ler kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda 200 cm mesafede tek atlamalı sistem başarısız olmuş ancak iki atlamalı sistem %85 başarılı olmuştur.

Araçlar arası iletişim için yapılan VLC çalışmalarının genel konusu araçların ön ve arka farlarını kullanarak haberleşmedir [11, 12]. Alıcı olarak ise verilen çalışmalarda da görüldüğü üzere fotodiyot ve kamera kullanılabilir. Ancak çok sayıda VLC vericisi bulunan dış mekân uygulamalarında kamera kullanımı daha uygun olabilmektedir. Çünkü kameralar görüş açısındaki birçok LED'i aynı anda algılayabilmektedir ve bu özellik haberleşme için avantaj sağlamaktadır. Araç-altyapı iletişimi için 2007 yılında yüksek hızlı kamera kullanılarak trafik ışıklarından gönderilen verinin alınmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır [13]. Kameranın trafik ışığından uzak olması durumunda piksellerin küçülmesinden kaynaklı sorunlardan bahsedilmiştir. Gönderilen verideki yüksek ve düşük hızlı bileşenlerin önceliğini değiştirerek bu sorunu çözmeye çalışmışlardır.

Hong-Kong Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada şebeke gerilimi doğrudan kullanılarak yüksek verimli bir LED sürücü sistemi tasarlanmıştır. İndüktörsüz LED sürücü olarak isimlendirilen bu sürücüde AC şebeke gerilimi çok sayıda MOSFET yardımı ile kademeli olarak azaltılarak LED'lere aktarılmış ve LED'ler sürekli olarak uygun çalışma gerilimi ve akımında tutulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada veri iletimi sırasında oluşacak titreme etkisi ve güç faktörü (Power Factor, PF) ön planda tutulup sürücünün verimliliği yüksek tutulmaya çalışılmıştır. Aydınlatma ve veri iletimi için fosfor tabanlı beyaz LED kullanılmıştır. Yapılan çalışmada ON-OFF Keying (OOK) modülasyonu ile 1 metre mesafeden 8 Mbit/sn veri iletilmiştir [14].

AC Şebeke geriliminin çok sayıda MOSFET kullanılarak düşürüldüğü farklı bir çalışmada kondansatör kullanılmadan LED sürücü tasarlanmıştır. Kondansatörlerin çalışma ömrünün LED'lerin çalışma ömründen daha kısa olduğu savunulmuş ve bu sebeple tasarlanan sürücüde kondansatör kullanılmamıştır. Tasarlanan sürücüde PF ve verimlilik yüksek tutulmaya çalışılmıştır. Devredeki çok sayıda MOSFET anahtar olarak kullanılarak LED'lerden akan akım için alternatif yollar oluşturulmuştur. Böylece LED'lerden akan akım sürekli sabit tutulmaya çalışılmıştır. Tasarlanan devrede kullanılan indüktör üzerinde depolanan enerjiyi boşaltmak için indüktöre paralel olarak bir diyot yerleştirilmiştir. Tasarlanan LED sürücünü PF değeri 0.92 olup %94 verimlilikte çalışmaktadır [15].

Doğrudan AC şebekeden beslenen bir diğer LED sürücü tasarımında darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM) ve darbe konum modülasyonu (Pulse

Position Modulation, PPM) beraber kullanılmıştır. Tasarlanan sürücüde iki ayrı MOSFET kullanılmıştır. MOSFET'lerden biri doğrultulan AC giriş gerilimini LED'ler için uygun değere ayarlamak için diğeri ise VLC sinyali göndermek için LED'leri anahtarlama için kullanılmıştır. Önerilen LED sürücüde veri iletiminin yanı sıra dimming desteği de bulunmaktadır. Tasarlanan sürücüde verimliliğin yüksek olması ön planda tutulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda sürücü verimliliğinin dimming yapılmadığı ve veri iletilmediği zamanda en yüksek olduğu belirtilmiştir. Veri iletimi için fosfor tabanlı beyaz LED'ler kullanılarak 2 Mbps veri hızına ulaşılmıştır [16].

Ön denkleştirici ve mavi ışık filtresi kullanılarak yapılan bir sürücü devresi tasarımında LED'lerin oluşturduğu kapasitif etkiler en aza indirilmeye çalışılmıştır. Aynı LED sürücüde 3 farklı Denkleştirici kullanılarak farklı frekanslardaki parazit etkileri giderilmeye çalışılmıştır. Tasarlanan sürücüde anahtarlama ve sinyal yükseltme için işlemsel yükselteçler (Operational Amplifier, OPAMP) kullanılmıştır. Yapılan çalışmada OOK modülasyonu kullanılarak 10 cm mesafede 80 Mbps veri hızına ulaşılmıştır [17].

Ön denkleştirici kullanılarak yapılan farklı bir çalışmada, anahtarlama ve sinyal yükseltme işlemleri için çok sayıda MOSFET kullanılmıştır. LED'lerin oluşturduğu parazit etkisini gidermek için tasarlanan ön yükselteç ve MOSFET'e gerekli DC kutuplamayı sağlamak için transistör'ler kullanılmıştır. LED'ler ve fotodiyot arasına lensler yerleştirilmiş ve fosfor etkisini azaltmak için mavi ışık filtresi kullanılmıştır. Ancak LED'lerin önünde lens kullanılması sebebiyle bu çalışmada aydınlatma şartı dikkate alınmamıştır. Yapılan çalışmada OOK modülasyonu kullanılarak 1m mesafede 460 Mbps veri hızında veri iletimi gerçekleştirilmiştir [18].

MOSFET kullanılarak yapılan farklı bir çalışmada LED'in oluşturduğu parazit etkisi ön denkleştirici kullanılmadan farklı bir yöntem ile giderilmeye çalışılmıştır. Tasarlanan sürücüde LED'lere paralel olarak bir MOSFET daha eklenerek anahtarlamaı sağlayan MOSFET ile ters çalışması sağlanmıştır. Bu sayede anahtarlamaı sağlayan LED tıkamaya girdiğinde LED üzerindeki kapasitif yükler boşaltılmış ve parazit etkisi en aza indirmek amaçlanmıştır. Tasarlanan sürücü ile LED'lerin anahtarlama hızı arttırılıp 50 Mbps veri hızına ulaşılmıştır [19].

VLC kullanılarak yapılan konumlandırma çalışmaları da mevcuttur. Kapalı bir ortamda çok sayıda LED kullanılarak düşük hesaplama hatası ile konumlandırma uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. VLC ile konumlandırma üzerine yapılan ilk çalışmalardan biri [20]'de verilmiştir. Yapılan çalışmada verici olarak çok sayıda LED ve

alıcı olarak hareketli bir cihaz kullanılmıştır. Her LED vericiye bulunduğu konumu ve kimlik bilgisini içeren yayın yaptırılmış ve alıcıya bilginin hangi LED'den geldiği aktarılması sağlanmıştır. Alıcıda gelen işaretin sinyal gücü, gelen veri ile üçgenleme algoritmaları kullanılarak birleştirilerek alıcının konumu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada 40 cm hassasiyet ile konumlandırma gerçekleştirilmiştir. VLC haberleşmede kamera kullanılarak yapılan iç mekân konumlandırma uygulamaları da mevcuttur [21]. Kamera ile yapılan çalışmada alıcının konumu, verici olarak kullanılan LED'den gelen ışığın geliş açısı da hesaba katılarak üçgenleme algoritması ile tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada alıcının konumu 10 cm hassasiyet ile tespit edilmiştir.

LCD ekranların VLC'de kullanımı ile ilgili yapılmış çalışmalar da literatürde mevcuttur. Telefon, bilgisayar ya da reklam panosu gibi LCD ekranlar VLC'de verici olarak kullanılabilir. VLC'de verici olarak LCD ekran kullanıldığında alıcı olarak kamera kullanılmalıdır. Görünür ışığın sahip olduğu kısa dalga boyu ve dar ışık hüzmesi özellikleri nedeniyle LCD ekran ile kamera iletişimi daha az girişime neden olur ve daha güvenlidir. [22]'de verilen çalışmada LCD ekran kullanılarak Mbit'ler mertebesinde veri iletimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada LCD ekranın kameraya göre duruşundan kaynaklanan bazı sorunlardan bahsedilmiş ve çözümler önerilmiştir. [23]'de ekran-kamera iletişiminde meydana gelen sorunların analiz edilmiş ve çözüm için PixNet isimli bir sistem önerilmiştir. Önerilen bu sistem RF'de sıklıkla kullanılan OFDM'den ilham alınarak tasarlanmıştır ve bilgiyi iki boyutlu olarak frekans ekseninde kodlamaktadır. PixNet'in ana elemanları perspektif düzeltme algoritmaları, adaptif olarak bulanıklılık önleme ve ortam ışığı filtresidir.

Düşük maliyetli ve hızlı prototipler geliştirilmesine olanak sağlamak için tasarlanmış hazır VLC prototipleme sistemleri de mevcuttur. OpenVLC, VLC için tasarlanmış yazılımı açık prototipleme aracıdır [24]. Tasarlanan bu sistem haberleşme modülü olarak BeagleBone Black kullanılmaktadır ve Linux ile çalışmaktadır. Donanımın üzerinde bulunan LED ve fotodiyot sayesinde çift yönlü iletişime izin vermektedir. OOK modülasyonu ve Manchester kodlama kullanılarak yapılan ilk çalışmalarda birkaç kilobitlik hızlara ulaşılabilmektedir. 2019 yılında yayınlanan OpenVLC 1.3 versiyonu ile 4 metre mesafede 400kb/sn veri hızlarına ulaşabilmektedir [25]. Düşük maliyetli VLC prototipleme cihazlarına bir diğer örnek de [26]'de verilmiştir. 2-PPM kodlama kullanılarak gerçekleştirilen bu prototipleme cihazı OpenVLC'ye göre biraz daha basittir ve OpenVLC'de olduğu gibi tek yönde veri alışverişi gerçekleştirmektedir. 360 derecede her yöne veri iletimi gerçekleştirebilen üzerinde 20 adet

LED bulunan prototipleme kartları da mevcuttur [27]. Yazılım tabanlı radyo kullanılan VLC prototipleme cihazlarında daha yüksek seviyeli modülasyonlar kullanılmış ve yüksek hızlara çıkılmıştır [28, 29].

Akıllı iç mekân aydınlatma sistemlerinde LED'lerin kullanımı yaygındır. Çünkü LED'ler düşük enerji tüketimlidir ve çok çipli LED'ler kullanıldığında renk kontrolü ya da karartma gibi iç mekân uygulamalarında ihtiyaç duyulan özellikleri sağlarlar. Bu sebeple akıllı aydınlatma sistemlerinin VLC ile birleştirildiği çalışmalar mevcuttur [30, 31]. Yapılan çalışmalarda konum tabanlı aydınlatma ve AC şebeke ile uyumlu olarak veri transferi gerçekleştirilmiştir.

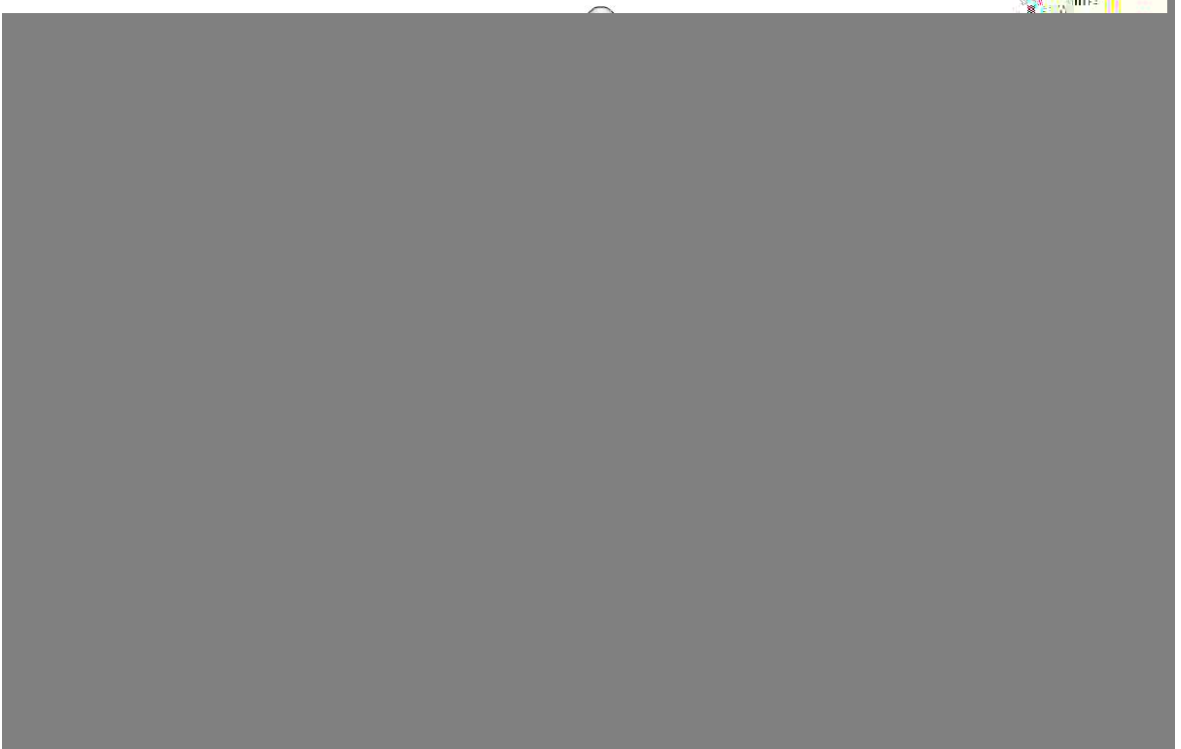
VLC kullanılarak yüksek veri hızlarında haberleşme gerçekleştirilen bazı çalışmalar mevcuttur. 2012 yılında yapılan bir çalışmada VLC kullanılarak yüksek hızlarda veri iletimi gerçekleştirilmiştir [32]. Bu çalışmada RGB LED'ler beyaz ışık verecek şekilde kullanılıp 1.5 Gbps veri hızına ulaşılmıştır. 3 renk kanalı ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen 3 kanalda dalga boyu bölmeli çoğullama (Wavelength Divison Multiplexing, WDM) yöntemi ile 3.4 Gbps veri hızına ulaşılmıştır. Yapılan çalışmada aydınlatma şartı aranmamış ve tasarlanan sistemin verimliliğine dikkat edilmeden en yüksek veri hızına ulaşmak amaçlanmıştır. Tasarlanan LED sürücüsünde sinyal yükselme işlemleri için OPAMP, LED'lerin DC kutuplamasını sağlamak için ise bias-tee devresi kullanılmıştır. Veri iletimi 30 cm mesafede gerçekleştirilmiştir.

### 1.3. VLC Kanal Yapısı

VLC'de yapılan çalışmalarda genellikle Barry modeli kullanılır [4]. Bu modele göre ortamdaki her ışık kaynağı ayrı ayrı birer VLC vericisi olarak düşünülür. Verici olarak konumu sabit bir fotodiyot vardır. Her vericinin alıcıda oluşturduğu güç Barry modeline göre hesaplanır. Bütün vericilerin alıcıda oluşturduğu güç toplamsal etki edeceği için toplanır ve odadaki kanalın dürtü yanıtı (Channel Impulse Response) elde edilir. Elde edilen kanal tepkesinin formülü (1)'de verilmiştir.

$$h(t) = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)}(t; \Phi_n) \quad (1)$$

Bu formülde  $N_t$  toplam LED sayısını,  $t$  zamanı,  $k$  verici ile alıcı arasında giden ışığın yansıdığı yüzey sayısını,  $\beta_n$  ise  $n$ . LED'in güç spektral dağılımını temsil etmektedir. (1)'de verilen ifade kanal tepkesinin en genel halidir. Verilen ifade kullanılarak verici ile alıcı arasındaki yol kaybı hesaplanabilmektedir. Bu hesabı yapmak için Şekil-2'deki oda modelini referans alınarak (5)'de verilen ifade elde edilir.



Şekil 2. VLC Kanal için Örnek Oda Modeli

Şekil-2'de görüldüğü üzere vericiden alıcıya ışık farklı yollar üzerinden varabilmektedir. Yol kaybı hesabı yapılırken ışığın duvarlardan yansımadan doğrudan alıcıya gittiği (Line of Sight, LOS) ve direk görüşün olmadığı (Non Line of Sight, NLOS) olamadığı durumlar ayrı ayrı hesaba katılmaktadır. LOS hesabı yapılırken  $k = 0$  alınır. NLOS hesabı yapılırken  $k \geq 1$  alınır ve  $k$  değeri yansıma sayısına göre değişiklik gösterir.

$$L_0 = \frac{APD(m+1)(\cos^m \phi_0)(\cos \theta_0)}{2\pi d_0^2} \quad (2)$$

LOS olan durum için yol kaybı ifadesinin açık hali (2)'de verilmiştir. Verilen ifadedeki  $A_{PD}$  kullanılan fotodiyotun yüzen alanını,  $d_0$  LED ile fotodiyot arası en kısa mesafeyi,  $\phi_0$  ve  $\theta_0$  ise LED ile fotodiyot arasındaki ışığın normal ile yaptığı açığı ifade etmektedir. Formülde belirtilen  $m$  ise Lambert indeksidir. Lambert indisi kullanılan LED'in görüş açısının (Field of View, FOV) yarısına bağlı olarak (3)'deki şekilde hesaplanabilir. LOS durumunda herhangi bir yansımaya olmadığı için LED'den çıkan ışık ile fotodiyota ulaşan ışığın normal ile yaptığı açı aynı olacaktır.

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos\phi_{1/2})} \quad (3)$$

Yol kaybı ifadesi NLOS olan durumda her yansımaya için ayrı ayrı hesaplanır. LOS olan durumda verilen ifadede de kullanılan açılar NLOS durumunda, yüzeyin normali ile yapılan açılar ile değiştirilecektir. Ayrıca her yansımada yüzeyler arası mesafe de ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Sonuç olarak NLOS olan durum için (4)'de verilen genel ifade ortaya çıkmaktadır.

$$L_{k+1} = \frac{A_{PD}(\cos\phi_{k+1})(\cos\theta_{k+1})}{\pi d_{k+1}^2} \quad (4)$$

Her yansımaya için yapılan hesaplar ayrı ayrı hesaplanıp toplanarak toplam yol kaybı ifadesi elde edilmiş olur. Yol kaybı ifadelerini (1)'deki ifadede yerine yazarsak (5)'deki gibi bir ifade elde ederiz.

$$h^{(k)}(t; \Phi_n) = \int_{S \in S} [L_1 L_2 \dots L_{k+1} \Gamma_n^{(k)} \text{rect}\left(\frac{\alpha_0}{FOV}\right) x \delta\left(t - \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_{k+1}}{c}\right)] dA_s \quad (5)$$

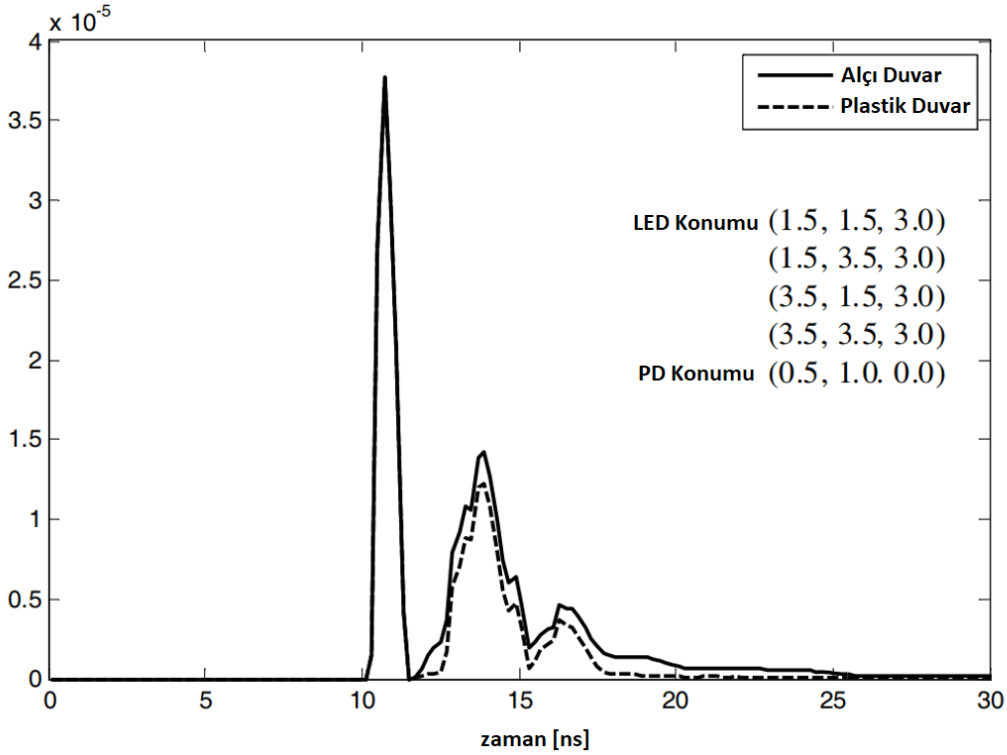
Genel ifadede bulunan "rect" fonksiyonu fotodiyota gelen ışığın FOV içerisinde olup olmadığını kontrol eden fonksiyondur. "rect" fonksiyonun işlevi basit olarak (6)'da verildiği gibidir.

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 0 \\ 0, & |x| > 0 \end{cases} \quad (6)$$

(5)'de bulunan  $\Gamma_n^{(k)}$  terimi n. LED kaynağından çıkan ışığın k defa yansıdıktan sonraki gücünü temsil etmektedir. Işığın gücü, LED'in spektral güç dağılımına ve yansıdığı nesnenin yapıldığı malzemeye bağlı olarak her yansımada azalarak alıcıya ulaşmaktadır. Alıcıya ulaşan ışığın gücü (7)'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\Gamma_n^{(k)} = \int_{\lambda} \Phi_n(\lambda) \rho_1(\lambda) \rho_2(\lambda) \dots \rho_k(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Verilen kanal ifadesi gerçekçi bir oda senaryosunda 4 LED armatür ve bir alıcı kullanılarak simüle edildiğinde Şekil-3'deki gibi bir grafik elde edilir [4]. Yapılan benzetimde oda ortamında duvarların malzemesi alçı ve plastik olduğu varsayılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen grafik çıktısında oluşan ilk tepe doğrudan alınan (LOS) ışıklardan kaynaklanmaktadır. Diğer tepeler ise duvarlardan yansıyan ışınlar ile meydana gelmektedir. Grafiğin arkaya doğru azalarak uzuyor olmasının sebebi duvarlardan yansıyan ışınlar doğrudan giden ışınlarla göre daha geç ve daha çok zayıflayarak alıcıya ulaşmasıdır.



Şekil 3. VLC Kanal Modeli

Şekil – 3’de verilen sonuçlar 4 adet verici ve 1 adet alıcı olduğu varsayılarak benzetim ortamında elde edilmiştir. Verici olarak LED armatürler, alıcı olarak ise fotodiyot kullanıldığı kabul edilmiştir. Yapılan kanal ölçümünde alıcı sabit tutulmuş ve 1 yansıma olduğu durumda alıcıdaki ışığın gücü hesaplanmıştır. Alıcının oda içerisinde gezdirilerek oluşturulmuş VLC kanal modeli oluşturulan çalışmalar da mevcuttur [33]. Alıcı hareket ettirilerek oda içerisindeki farklı yerlerde elde edilen güçler benzetim ortamında analiz edilmiştir. Deneysel olarak VLC kanal modelinin analiz edildiği çalışmalar da yapılmıştır [34]. Yapılan çalışmada 6 adet LED armatür ve bir alıcı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar benzetim ortamında oluşturulan Barry kanal modeli ile benzerlik göstermektedir.

VLC sistemlerde iletilen sinyale bozucu etki olarak genelde üç adet gürültü kaynağından bahsedilir. Bunlardan ilki güneş ışığı ya da ortam aydınlatmaları gibi diğer ışıklar kaynaklanan gürültüdür. İkinci gürültü kaynağı ise VLC sistemlerde alıcı tarafta kullanılan fotodiyottan kaynaklanan gürültüdür (shot noise). Üçüncü gürültü kaynağı ise ön yükselteçlerden kaynaklanan ısı gürültü olarak isimlendirilen gürültüdür.

#### 1.4. VLC Modülasyon Çeşitleri

VLC’de haberleşme yapılırken kanalı daha verimli kullanmak ve veriyi kanalın bozucu etkilerine karşı daha dirençli hale getirmek farklı çeşitlerde modülasyon yöntemi kullanılmaktadır. VLC’de kullanılan bazı modülasyon çeşitlerinin, ışığın renk özelliklerini kullanması sebebi ile RF’de kullanımı mümkün değildir. VLC’de kullanılan modülasyon çeşitlerinin bazıları aşağıda verilmiştir.

**Açma - Kapama Anahtarlama (OOK):** Basit bir modülasyon tekniği olan OOK, LED durumunun 1 ve 0 şeklinde değiştirilmesi ile gerçekleştirilebilir. DC balansı ve titreme etkilerini en aza indirmek için RLL kodlar ile birlikte kullanımları yaygındır [1, 35]. OOK-NRZ kullanılırken 0’lar ve 1’ler, pozitif ve negatif gerilimleri temsil etmektedir. OOK kullanılarak gerçekleştirilen VLC haberleşme çalışmasında yüksek hızlarda veri iletimi gerçekleştirilmiştir [36]. Anahtarlar için MOSFET, veri iletimi için mikro LED’ler kullanılmıştır. Yapılan çalışmada paralel olarak veri transferi yapılması halinde 1.5Gbps’lik veri hızına ulaşılmıştır.

**Darbe Konum Modülasyonu (PPM):** Bu modülasyonunda belirli bir bite karşılık gelen darbe, bir sembol süresi içinde bilgi işaretinin genliğine bağlı olarak değiştirilir. PPM



modülasyonunda gerekli ortalama güç, DC balans etkisinin ve düşük frekans bileşenlerinin zayıf olması sebebi ile OOK'ya göre daha azdır. Fakat PPM, haberleşme kanalını daha verimsiz kullanılır. Ayrıca PPM kullanıldığında sistem karmaşıklığı OOK'ya göre artmaktadır. Çünkü PPM kullanıldığında alıcıda sembol senkronizasyonu gereklidir [7, 37]. PPM farklı çeşitleri kullanılarak gerçekleştirilmiş VLC çalışmaları mevcuttur. Kullanılan PPM türlerine örnek olarak Farksal PPM (Differential PPM, DPPM), Expurgated PPM (EPPM), Çakışan PPM (Overlapping PPM, PPM) ve Değişken PPM (Variable PPM, VPPM) verilebilir. Ancak sahip olduğu dezavantajlar nedeniyle yüksek hızlarda veri iletimi gerçekleştirmek zordur. OPPM'in darbe konumlarının çakışmasına izin vermesi sebebiyle diğer PPM çeşitlerine göre daha yüksek hızları desteklemektedir [38]. Düşük veri hızlarında veri iletilmesi sebebiyle PPM'in VLC'de kullanımı çok yaygın değildir. Karartma (dimming) ve veri iletiminin aynı anda gerçekleşmesi istenilen uygulamalarda PPM daha fazla tercih edilir [39].

**Darbe Genlik Modülasyonu (PAM):** Bant genişliğini OOK'ya göre daha verimli kullanan ve uygulaması kolay bir modülasyon türüdür. İletilecek veri darbenin genliği kullanılarak modüle edilir ve birden fazla genlik seviyesi alıcıya ulaşır. PAM, RF ile kullanılırken meydana gelen genlik seviyelerinin ortalamasının sıfır olabilmesi için negatif ve pozitif değerler almaktadır. Ancak VLC sistemleri negatif genlik alamadığından M-PAM kullanıldığında oluşan genlik seviyeleri sıfır ile (M-1) arasında değişir. VLC'de PAM kullanılırken modülasyonlu işaretin pozitif olması modülasyon işlemi ve önerilen sürücü yapısını kolaylaştırmaktadır. Işık alıcıya toplamsal olarak ulaşmaktadır. Önerilen sürücünün temel mantığı da farklı güçlerdeki LED gruplarını ayrı ayrı anahtarlayarak alıcıda farklı genlik seviyeleri oluşturmak olduğu için PAM modülasyonunun kullanımı önerilen sürücü yapısı için uygun olmaktadır.

**Darbe Konum Darbe Genişlik Modülasyonu (PPMPWM):** Hibrit bir model olan bu modülasyon tipinde PWM ve PPM kombine olarak kullanılmaktadır [40]. Bu iki yöntemin birlikte kullanılmasındaki amaç PPM'in bazı avantajlarını ve PWM'in güç verimliliği özelliklerini birlikte kullanmaktır. Bu yöntem PPM'e göre daha düşük BER değerlerine ulaşılmasını sağlamakta ve daha fazla spektral verimlilik sağlamaktadır.

**Renk Kaydırmalı Anahtarlama (CSK):** Çok çipli LED'lerde her renk kanalının ayrı ayrı kullanılarak gerçekleştirilen modülasyon tipidir. Kanallar her ne kadar ayrı ayrı kontrol ediliyor olsa da modülasyon sonucunda ortaya çıkan rengin standartlarda belirlenen kısıtları vardır. Bu sebeple CSK modülasyonu sırasında renk kanalları için keyfi parlaklık değerleri

seçilemez. Verici olarak RGB LED kullanıldığında CIE 1931 renk uzayında seçilebilecek 7 adet nokta vardır ve bu noktalar CSK modülasyonu için yıldız kümesi (Konselasyon) noktalarını belirten üçgenin köşelerini ifade eder. RGB kanallarının ışık şiddetleri değiştirilerek her sembol için renk noktaları oluşturulur. CSK modülasyonu için gerekli alıcı ve verici sistemin tasarımı diğer modülasyon tiplerine göre karmaşıktır. CSK kullanılarak VLC üzerine yapılmış çalışmalar mevcuttur [41-43].

Dik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM): Paralel olarak yüksek hızlarda veri iletilmesi istenilen durumlarda alıcıda karmaşık denkleştiriciler kullanılarak semboller arası girişim (Inter Sembol Interference, ISI) etkilerini azaltmak gerekir. Paralel veri iletimi için çok taşıyıcılı OFDM modülasyonu kullanmak ise bu gereklilikleri ortadan kaldırır [44, 45]. OFDM Wi-Fi ve Dijital Video Aktarım uygulamaları gibi RF uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu modülasyon tipinde Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) kullanılarak frekans uzayındaki alt taşıyıcılara yüklenen veriler zaman uzayında iletmeye hazır hale getirilir. Ön ek (Cyclic Prefix, CP) eklenen OFDM modülasyonunu veri alıcıya iletilir. Eklenen ön ek kanalın ISI etkilerini azaltmada etkilidir. Alıcıya ulaşan veriden CP çıkartılır ve Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) uygulanır. Böylece zaman uzayındaki veri tekrar frekans uzayında alt taşıyıcılara ayrılmış hale gelir. RF’de OFDM modülasyonu kullanılırken IFFT işlemi sonrası meydana gelen veriler kompleks olmaktadır. Ancak OFDM VLC’de uygulanmak istendiğinde bazı değişiklikler yapmak gerekir. Çünkü VLC ile iletilecek veriler sadece pozitif ve reel olabilirler. IFFT işlemi sonrası verilerin kompleks olmasını önlemek için hazırlanan veriye IFFT uygulanmasından önce Hermitian simetri işlemi uygulanır [46]. Hermitian simetri uygulanması veri iletiminde kullanılan bant genişliğinin yarıya inmesine sebep olmaktadır. IFFT işlemi sonrası ortaya çıkan OFDM sembollerinin negatif olmasını engellemek için de bazı yöntemler mevcuttur. Bunlardan bir tanesi OFDM sembollerine DC genlik eklemektedir. Bu method DC Ofsetli OFDM (DCO-OFDM) olarak bilinmektedir.

### 1.5. VLC Vericiler

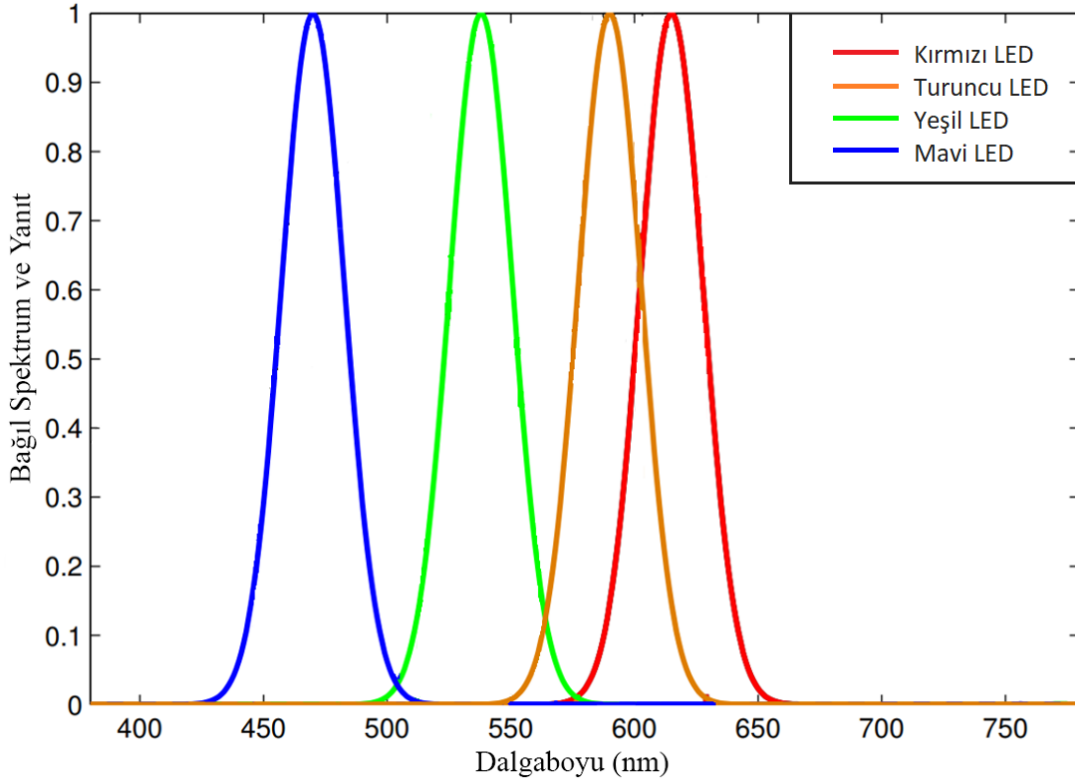
VLC haberleşmede verici olarak LED’ler kullanılır. LED’ler elektriği iletirken ışık yayabilen materyallerden oluşturulur. Meydana gelen ışığın rengi kullanılan malzemeye göre çeşitlilik gösterir. Kırmızı Galyum Arsenik Fosfit (GaAsP)’den yapılan kırmızı LED’in

dalga boyu 630nm ile 660nm arasında değişiklik gösterir. Tablo-1’de LED’lerde kullanılan yarı iletken malzemelere göre dalga boyu ve ışığın renginin değişimi görülmektedir.

Tablo 1. LED Yarı İletken Malzemeler

Yarı İletken Malzeme	Dalga Boyu	Renk
GaAs - Galyum Arsenit	850-940nm	Kızıl Ötesi
GaAsP - Galyum Arsenit Fosfit	630-660nm	Kırmızı
GaAsP - Galyum Arsenit Fosfit	605-620nm	Koyu Sarı (Amber)
GaP - Galyum Fosfit	585-595nm	Sarı
InGaAlP - İndiyum Galyum Alüminyum Fosfit	550-570nm	Yeşil
SiC - Silisyum Karbür	430-505nm	Mavi
GaN - Galyum Nitrid	450nm	Beyaz

LED’lerin güç, renk ya da anahtarlama özelliklerine göre farklı çeşitleri vardır. Tek renk veren LED’lerin yanı sıra aynı anda çok renk verebilen LED’lerde bulunmaktadır. Çok renk veren LED olarak piyasada çoğunlukla kırmızı, yeşil ve mavi LED’in bir arada bulunduğu RGB LED’ler bulunur. RGB LED’ler haberleşme uygulamalarında her renk kanalının ayrı ayrı kullanılması halinde veri hızının yüksek değerlere ulaşmasını sağlamaktadırlar. RGB’lere koyu sarı (Amber) eklenerek QLED (Quadrichromatic LED)’ler oluşturulmuştur. Bu LED’ler 4. renk kanalı sayesinde daha yüksek hızlarda veri iletimini sağlayabilmektedirler. Özellikle renk kaydırmalı anahtarlama (Color Shift Keying, CSK) gibi modülasyonlar için LED içerisindeki kanal sayısının fazla olması avantaj sağlamaktadır. LED’lerde kullanılan kanal sayısının artması sadece haberleşme için avantaj değil aydınlatma içinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle beyaz ışık elde etmede sıklıkla kullanılan üzerinde fosfor bulunan mavi LED’ler uzun süreli kullanıldıklarında sıcaklık sebebi ile üzerindeki fosfor zaman içerisinde deforme olur [47] ve ortaya çıkan ışık farklı bir renge dönüşür. Çok kanallı LED’lerde fosfor tabakası bulunmadığından bu şekilde sorunlar yaşanmaz.



Şekil 4. LED Renk Spektrumu

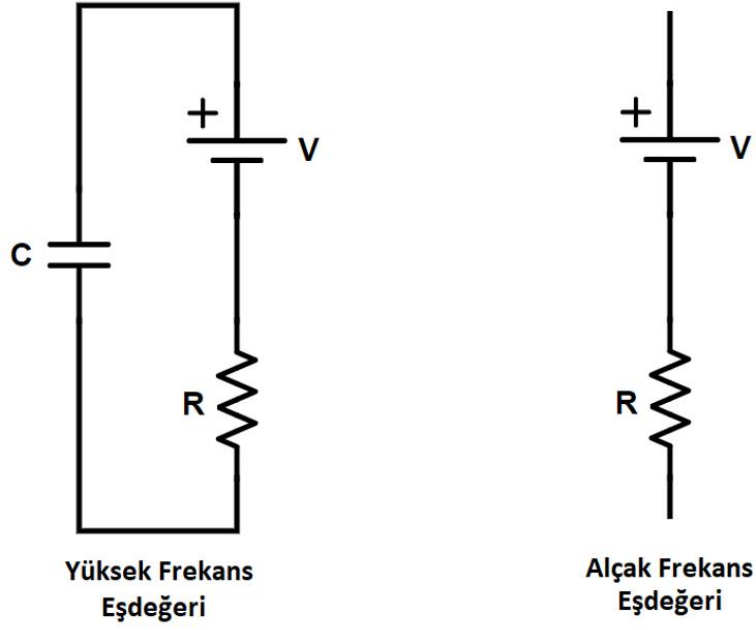
RGB LED'ler beyaz ışık eldesi için uygun olsa da görünür ışık spektrumundaki tüm renkleri elde etmekte yetersiz kalmaktadır. Görünür ışık spektrumunun tamamındaki renklerin eldesi için daha fazla kanallı LED'lere ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil-4'de kırmızı, mavi, yeşil ve koyu sarı renkler için dalga boyları görülmektedir. Şekil-4'de de görüldüğü üzere yeşil ile kırmızı renkler arasındaki boşluğu koyu sarı renk doldurmaktadır. Böylece görünür ışık spektrumundaki farklı renkler QLED'ler ile elde edilebilmektedir.

Çok kanallı LED'lerin yanı sıra önceliği aydınlatma olmayan yüksek frekanslarda anahtarlama için tasarlanmış LED'ler de bulunmaktadır. Yüksek frekanslı LED'lerde anahtarlama ön planda olduğu için LED'in iç yapısından kaynaklanan kapasite değeri küçük tutulmaya çalışılır. Kapasite değeri küçük LED elde edebilmek için LED'in boyutunu oldukça küçük tutmak gerekmektedir. Bu sebeple yüksek frekanslı LED'ler mikro LED ( $\mu$ LED) olarak da isimlendirilirler. Tasarımın ve boyutun LED'in frekans tepkisine olan etkisi [48]'de incelenmiştir. Yapılan çalışmada tasarlanan LED'in kontakları arasındaki mesafe kısaldıkça kontak direnci arttığı için gerilim düşümünün de arttığı gözlemlenmiştir. Tasarlanan LED'lerde açıklık çapı  $75 \mu\text{m}$  olduğunda  $4.8 \text{ pF}$  kapasite değeri ölçülmüşken,

200  $\mu\text{m}$  olduğunda 27.5 pF kapasite değeri ölçülmüştür. Açıklık çapı azaldıkça kontaklar arası mesafe azaldığından LED içerisindeki kapasite değeri azalmaktadır. Mikro LED'ler kullanılarak yapılan VLC çalışmalarında yüksek hızlara ulaşılmıştır. 14-84  $\mu\text{m}$  arası mikro LED'ler kullanılarak yapılan bir VLC çalışmasında 450 MHz 3-dB bant genişliğine ve 1.5 Gbps veri hızına ulaşılmıştır [49].

Önceliği veri iletimi ya da aydınlatma olmayan LED'lerde bulunmaktadır. Organik LED (OLED) olarak adlandırılan bu LED modeli daha çok telefonlar ve televizyonlar gibi görüntüleme cihazlarında kullanılmaktadır. OLED'ler iki iletken arasında ince organik bir dizi filminden oluşur. Bu LED tipinin en büyük avantajı şeffaf ve esnek cihazlar tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Diğer LED'ler ile kıyaslandığında OLED'ler frekans ve dayanıklılık olarak daha verimsizdir [50]. Ancak OLED'lerin frekans tepkisini, denkleştiriciler kullanarak arttırmaya yönelik yapılan çalışmalar mevcuttur.

Aydınlatma olarak kullanılan LED'lerde genellikle beyaz renk tercih edilir. Bu yüzden aydınlatma şartı sağlanması istenen VLC uygulamalarında genellikle beyaz renkli ışık veya beyaz rengin yakın tonlarını veren LED kullanılır. LED kullanarak beyaz ışık üretmenin iki yolu vardır. İlki kırmızı-yeşil-mavi (RGB) LED kullanmak diğeri ise mavi ışık veren LED'in üzerine fosfor ile kaplayarak beyaz ışık vermesini sağlamaktır. LED'in üzerinde fosfor tabakasının kalınlığı ile gün ışığı, ılık beyaz ya da soğuk beyaz gibi farklı beyaz renkler elde edilir [51]. Ancak fosfor kaplanmış LED'lerde yapılan anahtarlamanın hızı, üzerlerinde bulunan fosfor nedeniyle 2 MHz ile sınırlanmaktadır [52]. Çünkü fosfor ışığın tepki süresinin düşmesine neden olmaktadır. RGB LED'lerde ise fosfor tabakası bulunmaması sebebi ile anahtarlama hızı 30 MHz değerlerine çıkabilmektedir [53]. Verilen değerler anahtarlama hızını arttırmak için herhangi bir işlem yapılmadığı durumda elde edilen LED anahtarlama hızı değerleridir. Ayrıca LED'lerin iç yapısında bulunan kondansatör de anahtarlama hızını etkilemektedir. LED'in yüksek ve düşük frekanstaki eşdeğer devresi Şekil-5'deki gibidir.



Şekil 5. LED Eşdeğer Devresi

Verilen şekilde de görüldüğü üzere LED'in yüksek frekans eşdeğer modeline paralel olarak bir kondansatör eklenmektedir. LED'in iletme geçebilmesi için bu kondansatörün tamamen dolması, kapanabilmesi için ise bu kondansatörün tamamen boşalması gerekir. Bu sebeple LED'in paralelindeki kondansatör, OOK tipi modülasyonlarda LED'in çalışma hızını sınırlar. LED'lerin aydınlatma gücünü arttırmak için paralel bağlanması ise kondansatör değerini arttıracığından anahtarlama frekansını daha çok düşürür. LED'leri kontrol etmek için tasarlanan LED sürücülere ek sistemler tasarlanarak LED'in sahip olduğu kapasitif etki azaltılmaya çalışılmaktadır.

VLC üzerine yapılan çalışmalarda tasarlanan sistemde kullanılan modülasyon tekniği, maliyet, aydınlatma şartı gibi parametrelere bağlı olarak beyaz ışık eldesi için iki yöntem de kullanılabilir. Bu çalışmada maliyetinin daha düşük olması ve aydınlatma sistemlerinde kullanımının yaygın olması sebebi ile fosforlu LED'lerin kullanımı tercih edilmiştir. VLC kullanılırken aydınlatma şartı sağlanmak isteniyorsa kullanılan LED sayısı ve buna bağlı olarak kontrol edilmesi gereken toplam güç artacaktır. Bu durumda kullanılacak çok sayıda LED'i kontrol edebilmek için daha yüksek güçleri destekleyen bir LED sürücü devresi gerekmektedir.

Yüksek güçlerin kontrolü gerektiğinde MOSFET'ler, OPAMP ve transistörlere göre çok daha fazla tercih edilir. Çünkü MOSFET'lerin drain-source gerilimleri ve akımları,

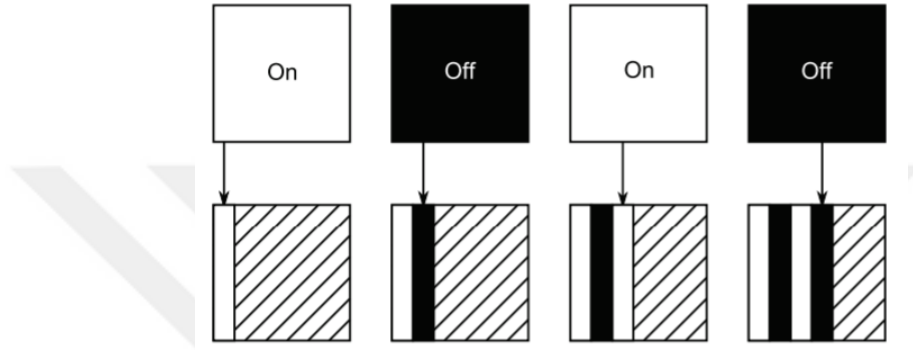
yüksek akım ve gerilim ile çalışan yükleri desteklemektedir. Bu sayede yüksek güçlerdeki aydınlatmalar MOSFET'ler ile kolaylıkla kontrol edilebilmektedir.

## 1.6. VLC Alıcılar

VLC çalışmalarında genellikle 2 tip alıcı kullanılır. En yaygın olarak fotodedektörler kullanılmaktadır. Fotodedektörler ışığı elektrik akımına çeviren yarı-iletken cihazlardır. Ticari olarak satılan genel amaçlı fotodedektörler bile birkaç megahertzlik bant genişliğine sahiptirler. VLC'nin RF'de olduğu gibi Doppler kayması gibi etkilerden etkilenmemesi sebebi ile karmaşık takip algoritmaları VLC'de gerekmez. Bu sebeple çok basit fotodedektörler kullanılarak da veri iletişimi sağlanabilir [50]. Fotodedektörler de genel olarak ikiye ayrılır. Bunlar PIN fotodiyotlar (PIN-PD) ve çığ fotodiyotlar (Avalanche PD, APD) olarak isimlendirilirler. PIN PD'ler APD'lere göre yüksek sıcaklık toleransı, düşük maliyet ve yüksek yoğunluklu ışık altında daha ideal çalışma gibi avantajlara sahiptirler. APD'ler daha çok düşük ışık yoğunluğu olan ortamlarda kullanılırlar.

VLC için kullanımda fotodedektörlerin en büyük dezavantajı çok hassas olmalarıdır. Fotodedektörler görünür ışık spektrumunun yanı sıra kızılötesi ve mor ötesi ışıkları da yakalar. Özellikle dış mekân kullanımlarında güneş ışığı gibi etkiler nedeniyle fotodedektörler doyuma girebilirler. Bu sebeple gün ışığından etkilenmemek için farklı cihazların kullanımı araştırılmıştır. Akıllı telefonlar sahip oldukları kamera sayesinde potansiyel VLC alıcısı haline getirmektedir. Kameralarda bulunana görüntüleme sensörü içerisinde entegre devre olarak matrix şeklinde çok sayıda fotodedektör bulunur. Ancak kameraların sahip olduğu yüksek görüntü çözünürlüğü sebebiyle fotodedektör sayısı da oldukça fazladır. Bu fotodedektörlerin hepsini aynı anda okumak işlem yükünü fazlalaştırdığı için saniyede yakalanan kare sayısı kameralarda düşüktür. Düşük kare sayısında çalışmaları sebebiyle kameraların doğrudan VLC alıcısı olarak kullanımı oldukça düşük veri hızlarında iletişime neden olacaktır. Ancak kameralarda bulunan "rolling shutter" özelliği kullanılarak daha yüksek hızlarda veri iletimi gerçekleştirilebilmektedir. Kameraların içerisindeki çok sayıda fotodedektörü paralel olarak aynı anda okumak mümkün değildir. Modern kameralarda fotodedektörlerden sütun tarama tekniği kullanılarak görüntü alınmaktadır. Bu sütun tarama özelliğine "rolling shutter" denir. Kameralarda bulunan bu özellik kullanılarak yapılan bir çalışmada birkaç kilobitlik bir veri hızına çıkılmıştır [54]. Yapılan çalışmada verici OOK modülasyonu ile veri göndermiş ve alıcıda

5 megapixel kamera kullanılmıştır. Verici yaptığı anahtarlamayı kameradan daha yüksek hızda yaptığı için farklı zaman dilimlerinde farklı sütunlarda ışık görünmüştür. Diğer sütunlarda ise ışık görünmemiştir. Şekil-6’de alıcıda oluşan görüntünün bir örneği verilmiştir. Yapılan çalışmada gönderilen veri Manchester kodlama ile gönderildiğinde 3.1 Kbps veri hızına ulaşılmıştır.



Şekil 6. Kamera ile VLC Haberleşme

VLC alıcısı olarak kullanılabilen bir diğer cihazda LED’in kendisidir. LED’ler sahip oldukları foton algılama karakteristikleri sayesinde VLC alıcısı olarak kullanılabilirler. Literatürde kolay tasarımı ve düşük bütçeli olarak tanımlanan, LED kullanılarak yapılmış VLC alıcı çalışmaları mevcuttur [55, 56]. Alıcı olarak LED kullanımının fotodetektör kullanımına göre bazı avantajları vardır. İlk olarak LED’ler fotodetektörlere göre daha küçük frekans aralığını algırlar. Bu sayede dış etkilerden kaynaklı girişim ve gürültü etkileri en aza indirilmiştir olur. Ayrıca LED’lerin hassasiyeti zaman içerisinde değişmez. En önemli avantajı ise tasarlanan sistemde aynı LED hem verici hem de alıcı olarak kullanılabilmesidir.

Yapılan çalışmada alıcı tarafta “Thorlabs DET10A” markalı 150MHz bant genişliğine sahip fotodiyot kullanılmıştır. Bant genişliği yüksek bir fotodiyot ile birlikte bant genişliği yüksek bir osiloskop kullanılmıştır. Bu sayede alıcı tarafta örneklemeden kaynaklı hataların en aza indirilmesi sağlanmıştır.



## 1.7. MOSFET VE MOSFET Sürücü

MOSFET'ler alan etkili transistörlerdir. Analog ve sayısal sistemlerde sıklıkla kullanılırlar. MOSFET'lerin giriş empedansı yüksektir, güç harcamaları düşüktür, normal transistörlere göre daha yüksek frekanslarda çalışabilirler. Giriş empedansının yüksek olması sebebi ile transistörlerde olduğu gibi akım ile değil gerilim ile kontrol edilirler. MOSFET'lerde genellikle 3 adet pin bulunur. Drain ile source yük akımının aktığı, Gate ise MOSFET'in kontrol edildiği giriş pinidir. MOSFET'lerde Drain ile Source arasında akan akım ile Gate arasında lineer bir bağlantı bulunmaz. Yüksek güçte yüklerin kontrol edilmesi gereken uygulamalarda kullanımları yaygındır.

MOSFET'leri mikrogenetleyici ile kullanmak için genellikle bir sürücü devresi gerekir. Çünkü MOSFET'lerin datasheet'lerinde belirtilen gerekli gate-source gerilimi ( $V_{GS}$ ) MOSFET'ler için genellikle 10 V'dan yüksek değerlerdedir. Mikrogenetleyiciler ise 3.3 V ya da 5 V gibi düşük gerilim değerlerinde çıkışa sahiptirler. Mikrogenetleyici çıkışını MOSFET'in ihtiyaç olduğu gerilim seviyesine çıkaran devrelere MOSFET sürücü devresi denir. Aynı zamanda kullanılan sürücü, MOSFET'te bulunan Gate ile Source arası kondansatörün ( $C_{GS}$ ) hızlıca dolup boşalmasını sağlar. Bu özellikle MOSFET'lerin yüksek frekanslarda anahtarlama istenilen uygulamalarda oldukça önemlidir.

Yapılan çalışmada veri iletimi gerçekleştirirken oda içi aydınlatma şartlarını da sağlayan bir LED sürücü tasarlanmıştır. Bu sebeple kullanılan MOSFET'lerin hızlı veri iletebilmesi ve titreme etkisi oluşturup göz sağlığına zarar vermemesi için yüksek frekanslarda anahtarlama yapmaları gerekmektedir. MOSFET'i yüksek frekanslarda anahtarlatabilmek için seçilen MOSFET'in datasheet'inde bulunan bazı özelliklere dikkat edilmelidir. Bu özellikler Tablo-2'de verilmiştir.

Tablo 2. MOSFET Parametreleri

Giriş Kapasitesi	$C_{iss}$	Açılma Gecikme Süresi	$t_{d(on)}$
Çıkış Kapasitesi	$C_{oss}$	Yükselme Süresi	$t_r$
Ters Transfer Kapasitesi	$C_{rss}$	Kapanma Gecikme Süresi	$t_{d(off)}$
Gate – Source Yüğü	$Q_{gs}$	Alçalma Süresi	$t_f$

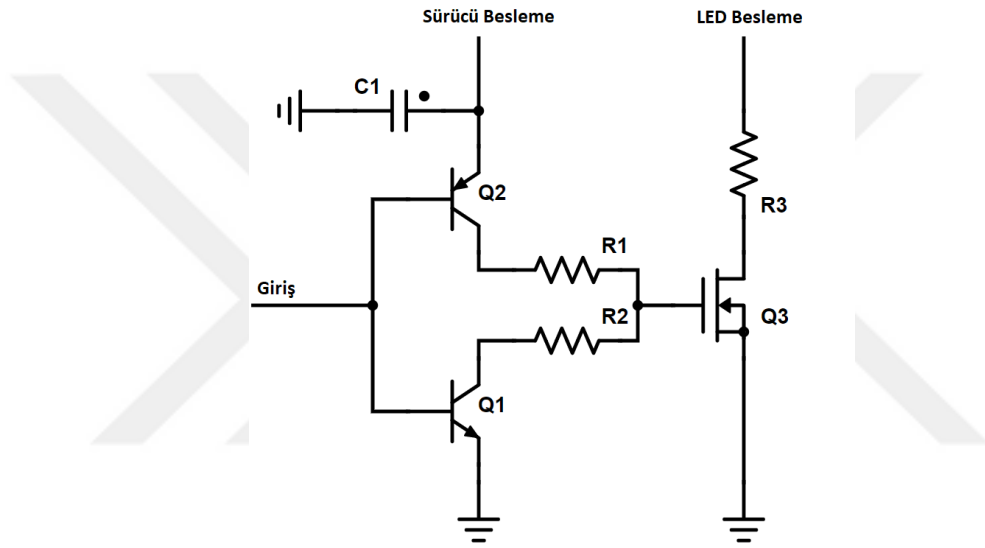
Yüksek hızda anahtar olarak kullanılacak MOSFET tercih edilirken Tablo-2’de isimleri verilen parametrelerin olabildiğince küçük olmasına dikkat edilmelidir. Bu tabloda sağ tarafta verilen parametreler doğrudan zaman ifade ettiklerinden anlaşılması kolaydır. Soldaki parametreler ise MOSFET’in iç yapısından kaynaklanan kapasite değerleridir. Bu değerler ile kullanılan MOSFET’in pinleri arasındaki kapasite değerleri hesaplanabilir. MOSFET’in gate, drain ve source pinleri arasındaki kapasite değerlerinin hesaplaması basit matematiksel işlemler ile (8)’deki gibi gerçekleştirilebilir.

$$\begin{aligned}
 C_{gd} &= C_{rss} \\
 C_{ds} &= C_{oss} - C_{gd} \\
 C_{gs} &= C_{iss} - C_{gd}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Kullanılan MOSFET’in yüzey montajlı cihaz (Surface Mount Device, SMD) ya da delikli baskı devre kartı (Printed Circuit Board, PCB) elemanı (Through Hole Technology, THT) olması, Tablo-2’de belirtilen parametreleri doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada MOSFET seçilirken anahtarlamayı etkileyen parametreler ve ticari olarak erişilebilirlik göz önüne alınarak Infineon marka BSC120N03LS kullanılmıştır. Bu MOSFET’in SMD olması devre kartından kaynaklanacak parazit etkilerini de oldukça düşürmektedir.

MOSFET sürücü seçerken MOSFET’de olduğu gibi yükselme ve alçalma zamanlarının yanı sıra MOSFET sürücünün iç yapısına da dikkat edilmiştir. On Semiconductor tarafından üretilen NCP81074A model tek kanallı MOSFET sürücü tercih edilmiştir. Seçilen MOSFET sürücünün sahip olduğu push-pull yapısı sayesinde kullanılan

MOSFET'in gate yük değerini sağlayıp,  $C_{GS}$  kondansatörünü hızlıca doldurup boşaltabilmektedir. MOSFET sürücü içerisinde bulunan push-pull yapısı Şekil-7'de verilmiştir. MOSFET sürücü, besleme gerilimini içerisindeki push-pull yapısı ile bağlı olduğu MOSFET'in gate'ine aktarır. Böylece MOSFET için gerekli olan  $V_{GS}$  değerini de sağlamış olur. Kullanılan MOSFET sürücü datasheet'inde [57] de belirtildiği üzere çıkış geriliminin değişmesi için giriş gerilimi besleme gerilimini en az yarısı kadar olmalıdır. Tasarlan sistemde MOSFET sürücüyeye kullanılan MOSFET'in  $V_{GS}$  değerini sağlamak için besleme gerilimi olarak 12 V verilmiştir.



Şekil 7. MOSFET Sürücü Push-Pull Yapısı

Şematik çizimi verilen push-pull yapısı transistörlü olarak verilmiştir (Şekil-7). Ancak P ve N kanallı MOSFET'lerin benzer bağlantı yapılması ile de bu yapı oluşturulabilmektedir. Verilen şematikte R3 yükü temsil eden direnç değeridir. R1 ve R2 ise kullanılan MOSFET için giriş direnci değerleridir. Q3 yükü kontrol eden MOSFET, Q1 ve Q2 MOSFET sürücünün içerisindeki push-pull yapısını temsil eden transistörlerdir. MOSFET sürücünün beslemesine dışarıdan paralel olarak bağlanan kondansatör C1 olarak verilmiştir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

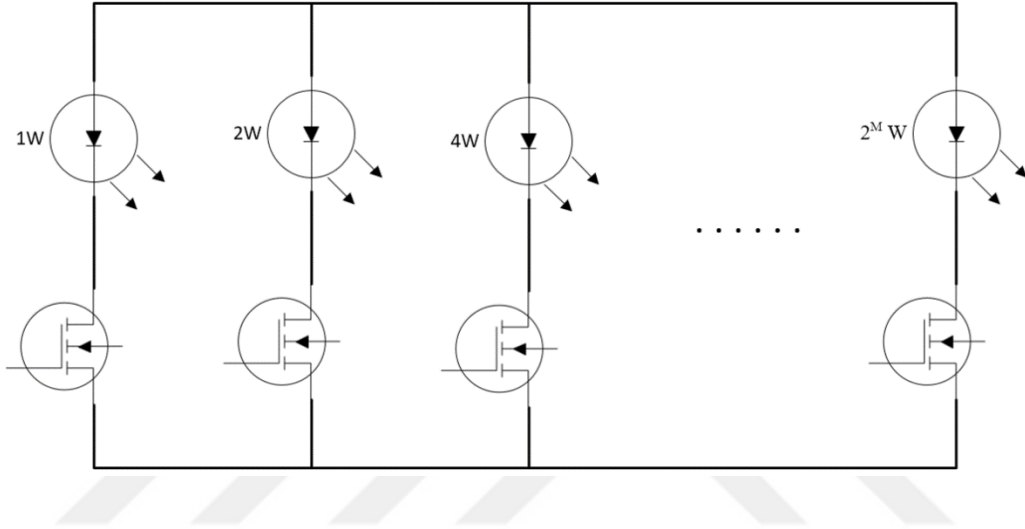
### 2.1. Giriş

Günümüzde LED kullanarak veri iletimi için tasarlanan çeşitli LED sürücüler bulunmaktadır. Tasarlanan bazı sürücüler verimliliği ve aydınlatmayı ön plana alırken, bazıları en yüksek veri hızına ulaşmaya çalışmışlardır. Bu sebeple tasarlanan sürücülerde ön planda tutulan amaca göre kullanılan devre elemanları ve devre topolojileri farklılık göstermektedir. Özellikle iç mekân VLC haberleşme için tasarlanan LED sürücüleri veri iletimini sağlarken aynı anda aydınlatma da sağlamaları gerekmektedir. Bu durum LED sürücü tasarımını daha karmaşık hale getirmektedir. Ayrıca tasarlanan her LED sürücünün düşük güç tüketimi ve uzun çalışma ömrü gibi özelliklere sahip olması beklenir. Düşük güçlü CMOS teknolojisi kullanılarak üretilen LED sürücüler, LED performansını, parlaklığı ve veri iletimini kontrol edilmesini sağlayan tek çip devreler üretilmesine imkân vermektedir [14, 58]. Verimliliğin ön planda tutularak yapılan çalışmalarda genelde doğrudan AC şebeke geriliminden beslenen sistemler tasarlanmıştır [15, 16]. Ön denkleştirici kullanarak LED'lerin iç yapısından kaynaklanan ve anahtarlama hızını olumsuz etkileyen etkilerin giderilmeye çalışıldığı çalışmalar mevcuttur [17, 18, 59]. OFDM ve yüksek seviyeli modülasyonlar gibi çok seviyeli işaretleri destekleyen sürücü tasarımları da mevcuttur [44, 60].

Literatürdeki LED sürücülerde devre topolojisine göre transistör, MOSFET, DAC, Bias-T ya da OPAMP gibi yapılar kullanılmıştır. MOSFET ve transistörler genellikle OOK gibi çok sayıda genlik seviyesi içermeyen modülasyon çeşitlerinde kullanılmaktadır. Çünkü çok seviye oluşturmak için transistör ve MOSFET'leri aktif bölgede kontrol etmek oldukça zordur. Çok seviyeli modülasyonu destekleyen LED sürücülerde ise genellikle OPAMP ve DAC'lar kullanılır [61, 62]. Bu donanımlar yüksek frekanslarda çok seviyeli modülasyonlar ile çalışabiliyor olmalarına rağmen yüksek güç gerektiren aydınlatmalara ihtiyaç duyulduğunda yetersiz kalmaktadırlar.

Bu çalışmada tasarlanan LED sürücüde MOSFET'ler anahtar olarak kullanılarak çok seviyeli modülasyon ile veri iletimi gerçekleştirilmiştir. MOSFET'ler farklı sayılarda gruplanmış LED'lere bağlanmıştır. Her LED grubunda farklı sayılarda LED olduğundan, LED grupları anahtarlandığında farklı güçlerde ışık yayılmaktadır. Ancak gruplar

oluşturulurken, meydana gelecek genlik seviyelerinin düzgün olabilmesi için LED gruplarında meydana gelen aydınlatma gücü 2'nin kuvvetleri olarak artacak şekilde ayarlamaya dikkat edilmiştir. Böylece sadece 1. LED grubu açıldığında 1. genlik seviyesi, 1. ve 2. LED grubu birlikte açıldığında 3. genlik seviyesinde işaret elde edilebilmektedir. MOSFET'ler ile LED grupları arasında yapılan bağlantının blok diyagramı Şekil-8'de verilmiştir.



Şekil 8. LED Sürücü Modeli

LED grupları oluşturulurken seri ya da paralel bağlantı tercih edilebilir. Ancak LED'lerin seri bağlanması giriş gerilimini arttırmakta ve her grup için ayrı gerilim seviyesi gerekmektedir. Paralel bağlanması ise LED'ler iç yapısından kaynaklanan kapasitif etkiyi arttırmaktadır. Yapılan bu çalışmada LED sürücü devresinde farklı gerilim seviyelerine ihtiyaç duymamak için LED grupları oluşturulurken LED'ler paralel bağlanmıştır.

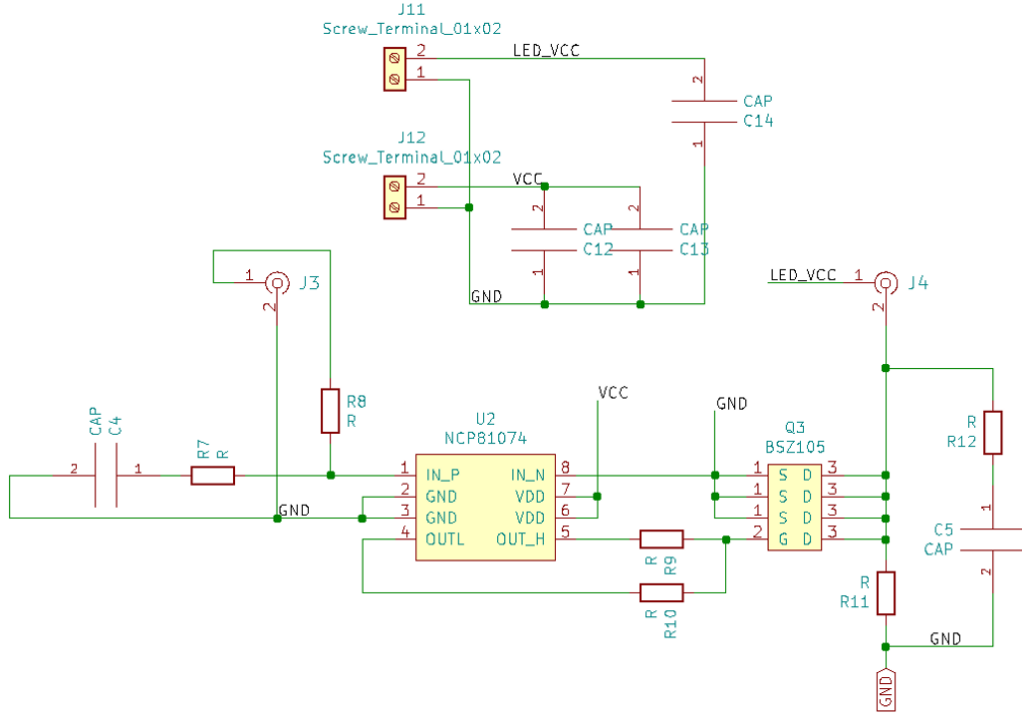
Her LED grubundan gönderilen veri OOK kullanılarak modüle edildiğinden LED gruplarını ayrı ayrı anahtarlamak çok seviyeli veri iletimi için yeterli olmaktadır. Farklı güçlerdeki LED grupları anahtarlandıklarında, meydana gelen ışık toplamsal etki oluşturacağından çok seviyeli modülasyon yapılmış gibi çok seviyeli bir şekilde alıcıya ulaşmaktadır. Bu sayede önerilen LED sürücü ile uygun sayıda LED grubu kullanarak PAM ya da OFDM gibi çok seviyeli modülasyon yapılabilir. Eklenen LED grubu ile oluşturulacak genlik seviyesi sayısı kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Yapılan çalışmada MOSFET'ler anahtar olarak kullanılırken 8-PAM modülasyonu ile haberleşme gerçekleştirilmiştir. Önerilen LED sürücüdeki MOSFET'lerin anahtar olarak kullanılırken

çok seviyeli haberleşmeyi destekliyor olması sistem karmaşıklığını, dolayısıyla sistem maliyeti azaltmaktadır. Aynı zamanda önerilen LED sürücüde MOSFET kullanılması yüksek güçteki aydınlatmaların kullanılmasına imkân vermektedir.

Önerilen LED sürücü için yapılan çalışmalar veri oluşturma, devre analizi, benzetim çalışması ve deneysel çalışma şeklindedir. Veri oluşturma kısmında, önerilen sürücü devresi ile yapılacak ölçümler için MATLAB ortamında üretilen veriden bahsedilmiştir. Devre analizi kısmında önerilen sürücünün analizi ve şematik çizimleri gerçekleştirilmiştir. LED sürücünün benzetim çalışmaları NI Multisim ve LTSpice programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması tamamlanan devrenin PCB üretimine hazır hale getirilmesi Kicad devre çizim programı ile yapılmıştır. Son olarak da üretimi gerçekleştirilen LED sürücünün testleri deneysel çalışmalar kısmında anlatılmıştır.

## 2.2. Devre Analizi

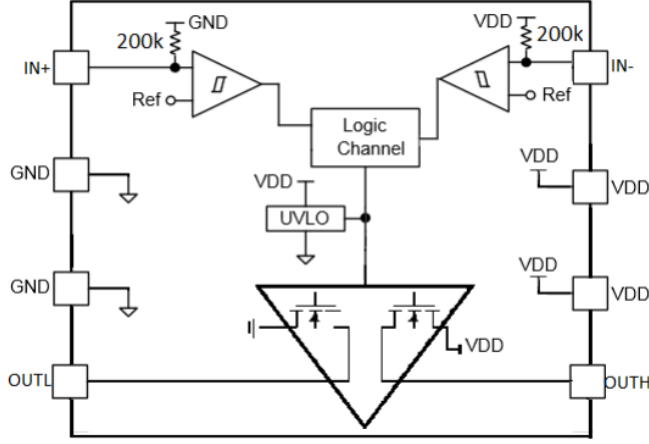
Önerilen sürücü için yapılan devre tasarımında, devre elemanları seçilirken bazı kriterler göz önünde bulundurulmuştur. LED sürücüde en önemli eleman LED'leri anahtarlayacak MOSFET olduğu için ilk olarak onun seçiminden başlanıp diğer elemanlar da ona uygun olacak şekilde seçilmiştir. Tasarlanan sürücünün şematik çizimi Şekil-9'da görülmektedir. Seçilen BSC120N03LS MOSFET SMD yapısı ve 30 V  $V_{DS}$  gerilimi ile tasarlanan sistemin özelliklerini karşılamaktadır. Ayrıca düşük  $C_{GS}$  değerine sahip olması bu MOSFET'in açılıp kapanması için gereken sürenin kısa olmasını sağlamaktadır. Şekil-9'da verilen şematik çiziminde aynı PCB çizimine sahip olan farklı bir MOSFET kullanılmıştır. Verilen çizimde kullanılan MOSFET'i kontrol etmek için NCP81074 MOSFET sürücü kullanılmıştır. Bu MOSFET sürücü tercih edilirken, iç yapısına ve düşük anahtarlama süresine sahip olma gibi özellikleri göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 9. LED Sürücü Şematik

Verilen şematik çiziminde R8 MOSFET sürücünün giriş direncidir, Giriş direnci basit bir empedans eşitleyici olarak çalışarak MOSFET sürücü ile işaret verilen donanım arasındaki bağlantıdan kaynaklanan osilasyonları azaltması için kullanılmıştır. C12, C13 ve C14 besleme hatlarındaki parazitleri önlemek için kullanılan bypass kondansatörleridir. MOSFET için kullanılan giriş dirençleri şematik çizimde R9 ve R10 olarak verilmiştir. MOSFET'in gate pinine bağlanan giriş direnç değeri, MOSFET hızlı anahtarlanabilmesi için oldukça önemlidir. Bu değer çok büyük olması MOSFET'in  $C_{GS}$  kondansatörünün yavaş dolmasına, çok küçük olması ise iletme geçme anında MOSFET'in gate pininde osilasyon oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple en ideal giriş direnci değeri bulunmalı ya da MOSFET'in açılma ve kapanma anlarında farklı direnç değeri kullanılmasını sağlayacak bir devre tasarlanmalıdır. Tercih edilen MOSFET sürücünün push-pull yapısındaki ayrı çıkışlar sayesinde ek devreye ihtiyaç duyulmadan MOSFET'in açma ve kapama anlarında farklı direnç değeri kullanabilmesi sağlanabilmektedir (Şekil-10) [57]. MOSFET sürücü ile MOSFET arasında farklı değerlerde direnç bağlanarak, MOSFET iletme ve tıkmaya geçerken farklı direnç değerleri üzerinden  $C_{GS}$  kondansatörünün dolması ve boşalması sağlanabilmektedir. Yapılan denemelerde  $C_{GS}$  kondansatörünü doldurmak için 5 Ohm'luk giriş direnci ideal olduğu gözlemlenmiştir. Boşaltma için ise 0 Ohm'luk direnç bağlanarak

kondansatörün hızlıca boşalması ve MOSFET'in tıkamaya geçme süresinin kısa olması sağlanmıştır.



Şekil 10. NCP81074 İç Görünümü

Devrede bulunan R11 direnci LED'ler için kutuplama direnci olarak kullanılmıştır. MOSFET'lerin tıkama anında bu direnç üzerinden bir miktar akım akarak LED'lerin tamamen kapanması önlenmiştir. Bu sayede MOSFET iletime geçtiğinde LED'in gerilim akım grafiğindeki ölü zaman süresi en aza indirilerek LED'in daha hızlı anahtarlanması sağlanmıştır.

LED'lerin yüksek frekans modelinde bulunan kondansatör ile devreye bağlanan kabloların oluşturduğu indüktanslar rezonans etkisi oluşturmaktadır. Bu rezonans etkisi sebebi ile devre üzerindeki MOSFET'in Drain pininde osilasyon meydana gelmektedir. Oluşan osilasyonun frekansını belirlemek için L-C devresinin osilasyon frekans hesabı (9) kullanılmaktadır.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

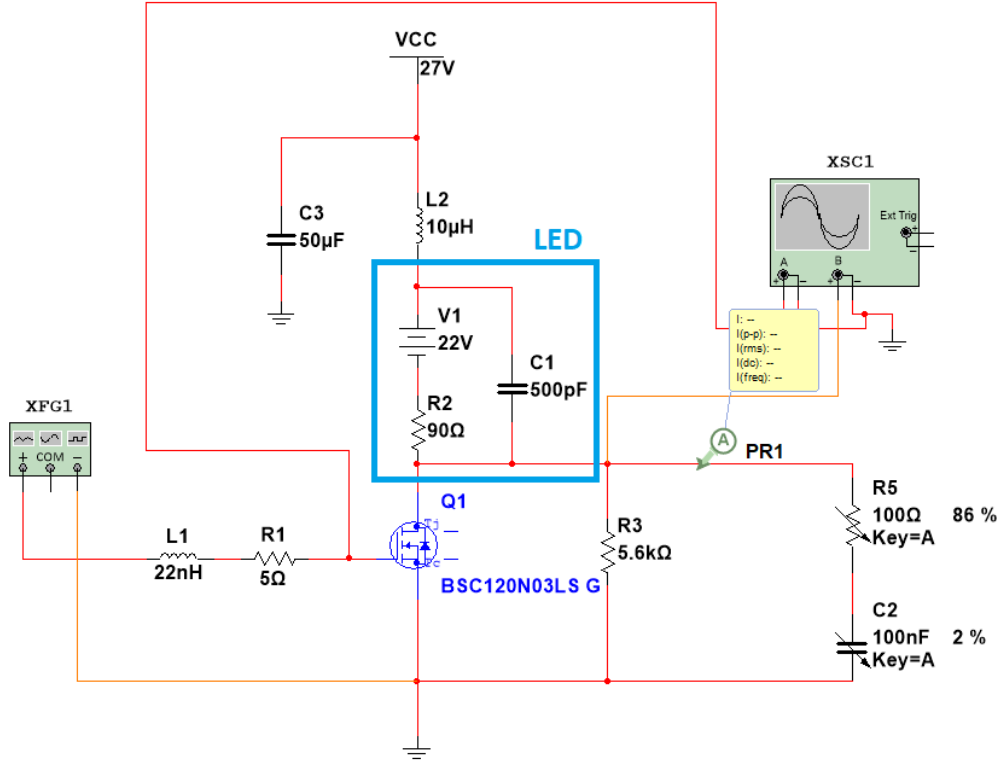
Buradaki C değeri LED'lerin iç yapısındaki kondansatörü temsil ettiğinden ticari LED'lerde bu değer 150-500pF arasında değişmektedir [14]. L değeri ise kullanan kabloların uzunluğuna ve boyuna göre değişiklik göstermektedir. PCB'deki yollardan kaynaklanan endüktansı etkisi kablolarla kıyasla çok küçük kaldığından ihmal edilebilmektedir.



Kablolardan kaynaklanan parazit etkisini en aza indirmek için devre üzerindeki besleme ve toprak bağlantıları arasına yüksek değerli kondansatörler bağlanmıştır. Bu kondansatörler besleme kablolarından kaynaklı parazit etkilerini neredeyse sıfırlamaktadır. Ancak LED'lerin iç yapısında bulunan kondansatör ile devredeki indükans etkili elemanların rezonans etkisinden kaynaklanan osilasyonlarda bir değişikliğe sebep olmamaktadır. LED'lerin iç yapısındaki kondansatörlerin sebep olduğu osilasyon ekisini azaltmak için devre üzerinde farklı yerlere snubber devre elemanları koyulmuştur. Şematiği verilen devrede bulunan bütün elemanlar test sırasında kullanılmamıştır. Bazı elemanlar ihtiyaç halinde devreye rahat eklenebilmesi için şematiğe ve devrenin PCB çizimine eklenmiştir.

### **2.3. Benzetim Çalışmaları**

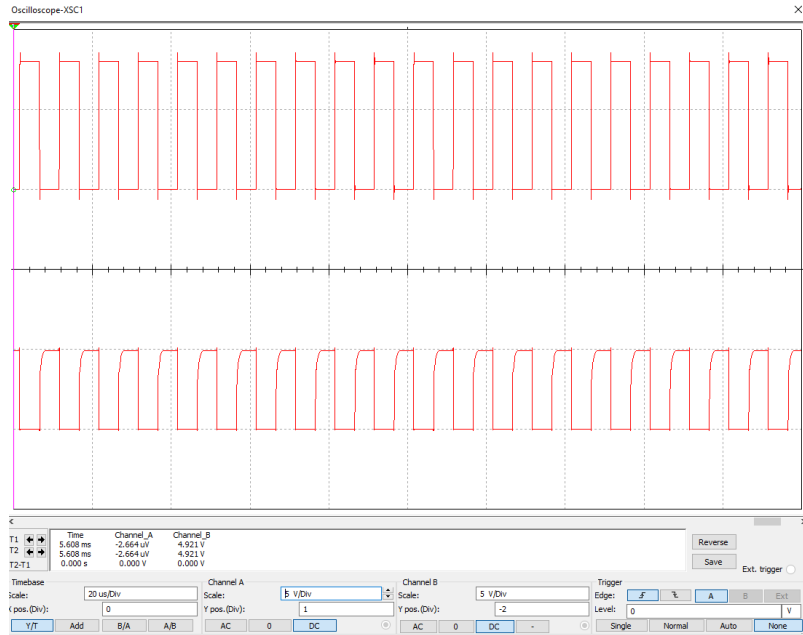
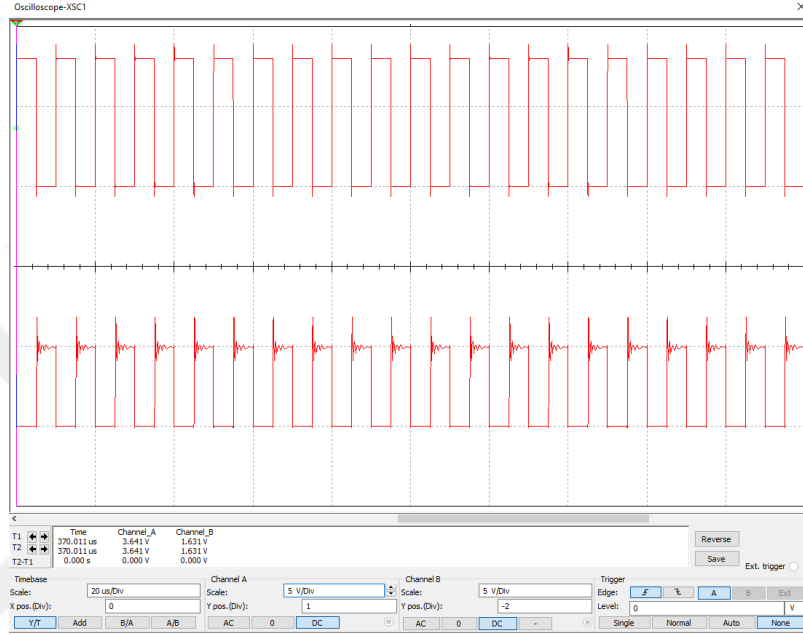
Teorik analizi gerçekleştirilen devrenin benzetim analizinin gerçekleştirilebilmesi için Multisim ve LTSpice kullanılmıştır. Benzetim ortamında devrenin farklı frekanslarda giriş çıkış işaretleri incelenmiş ve en uygun çalışma frekansı için ön inceleme gerçekleştirilmiştir. Devrenin gerçekteki modeline en uygun şekilde olması için oluşturulan benzetime LED'in yüksek frekans eşdeğeri ve kablolardan kaynaklanan indükans'lar da eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gerçekleştirilecek devre üzerindeki devre elemanlarında değişiklikler yapılmıştır. Benzetim ortamında farklı farklı devre topolojileri denenerek en iyi sonucu veren devre aranmıştır. MOSFET'ler uygulanan giriş işaretinin genliği ile yükselme ve alçalma zamanları benzetim ortamında ayarlanabildiği için yapılan benzetimlerde MOSFET sürücü kullanılmamıştır. Multisim benzetim programında kurulan devre şeması Şekil-11'deki gibidir.



Şekil 11. LED Sürücü Benzetim

Oluşturulan benzetim modelinin gerçeğe en yakın modeli yansıtması için parazit etkisi oluşturan elemanlardan benzetime eklenmeye çalışılmıştır. L2 sisteme bağlanan besleme hattının oluşturduğu indüktans etkisini göstermektedir. V1, R2 ve C1 ise kullanılan LED'in modellenmesi için koyulmuştur. R1 kullanılan MOSFET'in giriş direncini, L1 ise MOSFET sürücü ile MOSFET arasındaki PCB yollarının oluşturduğu indüktans etkisini temsil etmesi için benzetime eklenmiştir. R3 LED'in kutuplama direncidir. Bu direnç yardımı ile MOSFET kapandığı zamanlarda LED'lerden bir miktar akım geçmesi sağlanarak, LED'lerin tamamen kapanması engellenmiş ve LED'lerin ilettime geçme aşamasındaki ölü zaman en aza indirilmiştir. C3 devrenin beslemesi ile toprağı arasında büyük bir bypass kondansatörüdür. Bu kondansatör devrede besleme kablolarından kaynaklanan parazit etkisini azaltmak için kullanılmıştır. R5 ve C2 ise devrede kullanılan snubber elemanlarıdır. Bu elemanların değerlerini benzetim ortamında hızlıca değiştirilebilmesi için ayarlanabilir olarak koyulmuşlardır. Snubber eleman değerleri hesaplandıktan sonra tam değer tespiti için bu yöntem kullanılmıştır.

Tasarlanan devrenin benzetimi için iki ayrı benzetim programı kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonucu olarak LED sürücüsünde kullanılan MOSFET'in Gate ve Drain pinlerindeki gerilimler referans alınmıştır. Bu pinler üzerindeki osilasyon ve LED'lerde bulunan kondansatörlerden kaynaklanan gecikme etkileri incelenmiştir. NI Multisim programı ile yapılan sonuçlar Şekil-12'de verilmiştir.

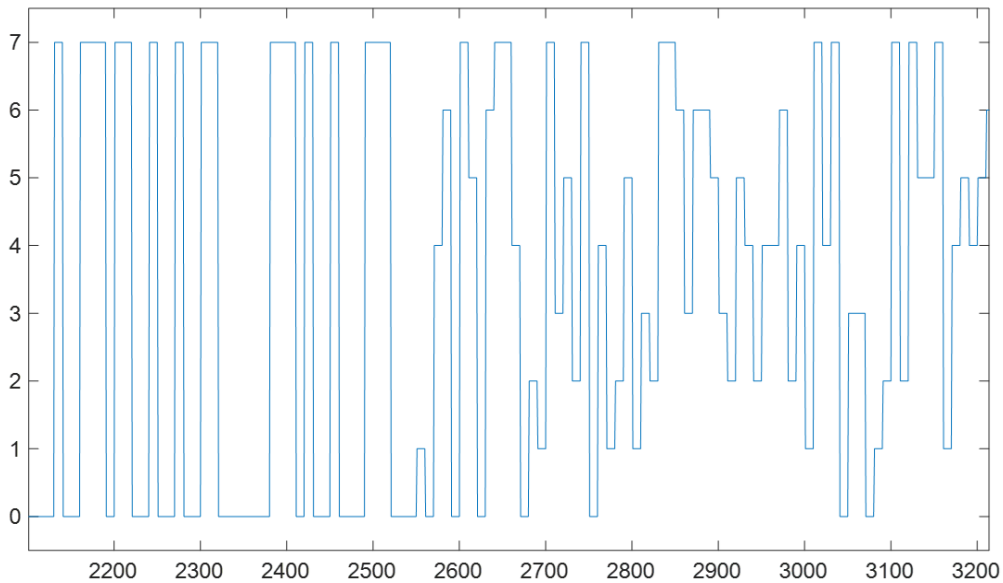


Şekil 12. Benzetim Sonuçları

Şekil-12’de verilen Osiloskop görüntülerinde 100 KHz giriş işareti verildiğinde tasarlanan devrenin iki farklı durumu için çıktılar verilmiştir. Üstteki grafikler  $V_{GS}$  gerilimini alttaki grafikler ise  $V_{DS}$  gerilimini vermektedir.  $V_{DS}$  geriliminde osilasyon olan ilk görüntü bypass kondansatörü ve snubber elemanları olmadan elde edilen benzetim sonucudur. İkinci görüntü ise snubber elemanları kullanılarak elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere bağlanan elemanlar devre üzerindeki parazit etkisini oldukça düşürmüştür.

## 2.4. Veri Oluşturma

Tasarlanan LED sürücü ile BER analizi yapılabilmesi için MATLAB kullanılarak bir veri seti hazırlanmıştır. Hazırlanan veri seti 8. Derece PN dizisi elemanlarından seçilmiştir. PN dizisinin sadece kendisi ile korelasyon sonucu yüksek değer ürettiği olması alıcı tarafındaki senkronizasyon işlemlerini kolaylaştırmaktadır. Bu yüzden veri paketinin başında kullanılmıştır. MATLAB ile üretilen veri paketi içindeki PN dizisi iki farklı şekilde bulunmaktadır. Veri paketinin başında 255 adet PN dizisi bitleri korelasyon işlemi için koyulmuştur. Veri paketinin geri kalanında ise asıl gönderilen veri olan PN dizisinin 8-PAM olarak modüle edilmiş hali bulunmaktadır. Bu modülasyon basitçe PN dizisindeki 255 adet bitin 3’erli gruplar halinde farklı LED sürücülere verilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Gönderilen veri paketinin bir kısmının görüntüsü Şekil-12’deki gibidir.

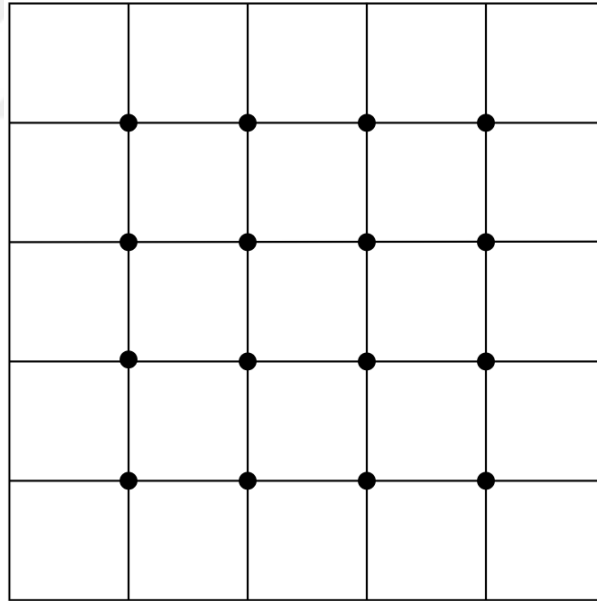


Şekil 13. Veri Paketi

Şekil-13’de 2-PAM olan PN dizisinden 8-PAM olan veri kısmına geçişi görülmektedir. Oluşturulan gruplardaki LED’ler farklı sayılarda olmaları nedeniyle MOSFET’ler iletime geçtiğinde LED’ler farklı güç seviyesinde ışık meydana gelmektedir. Bu sayede gönderilmek istenilen işaret 8-PAM olarak alıcı tarafa aktarılmaktadır.

## 2.5. Deneysel Çalışmalar

Yapılan deneysel çalışmada önerilen sürücü kullanılarak 3 m X 3 m’lik bir alan içerisinde aydınlatma ve veri iletimi testleri yapılmıştır. Gün ışığı gibi dış etkilerin en aza indirilmesi için alanın kenarları beyaz tahtalar ile kapatılmıştır. Böylece beyaz duvarları olan kapalı bir oda modeli oluşturulmuştur. Kapalı oda içerisindeki zemin 60 cm X 60 cm’lik karelere bölünerek karelerin köşe noktalarına gelecek şekilde 16 adet ölçüm noktası belirlenmiştir. Oluşturulan oda modelindeki ölçüm noktaları Şekil-14’deki gibidir.

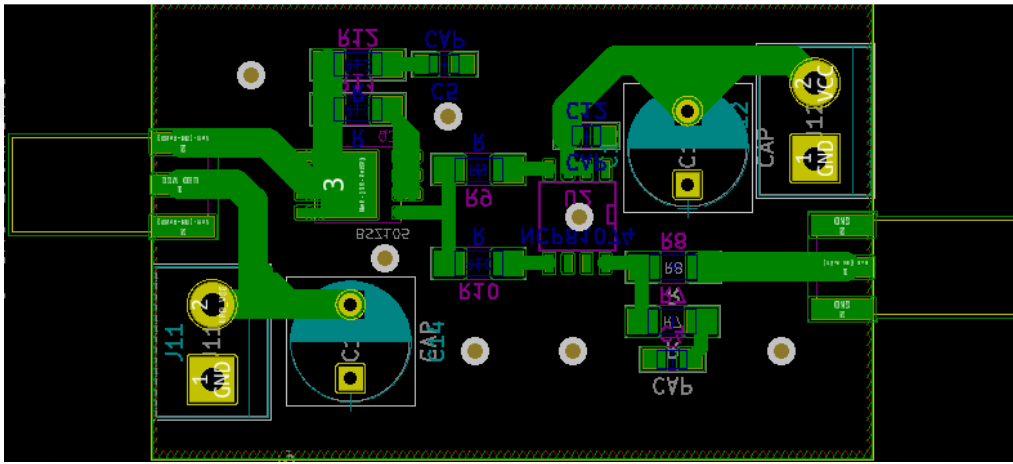


Şekil 14. Oda Modelinde Ölçüm Noktaları

Oluşturulan oda modeli içerisinde yapılan çok sayıdaki ölçümde amaç, önerilen sürücünün odanın farklı yerlerindeki veri iletim performansını gözlemlemektir. Bu yüzden her noktada ayrı ayrı kayıtlar alınarak BER ve güç analizleri yapılmıştır. Alınan kayıtlar

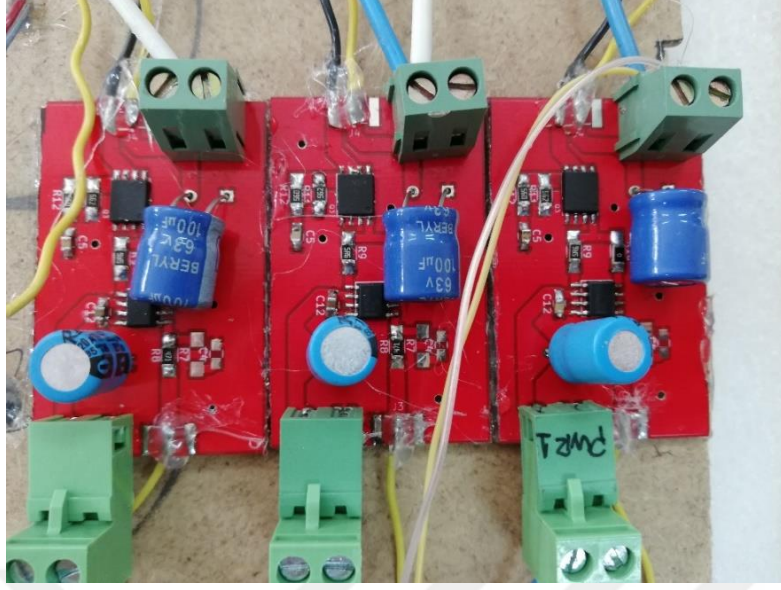
MATLAB yardımı ile ayrı ayrı analiz edilerek histogram ve BER grafikleri çıkarılmıştır. Yapılan ölçümlerin sonuçları deneysel sonuçlar kısmında verilmiştir.

Benzetimi gerçekleştirilen devrenin PCB çizimi, açık kaynaklı Kicad devre çizim programı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan devrenin görüntüsü Şekil-15’de görülmektedir. Devre tasarımı kısmında PCB yollarından kaynaklanacak indüktans etkilerini en aza indirmek için elemanlar arası yollar mümkün olduğunda kısa tutulmaya çalışılmıştır. Yine aynı sebepten yapılan devre tasarımındaki bütün elemanlar SMD olarak seçilmeye çalışılmıştır.



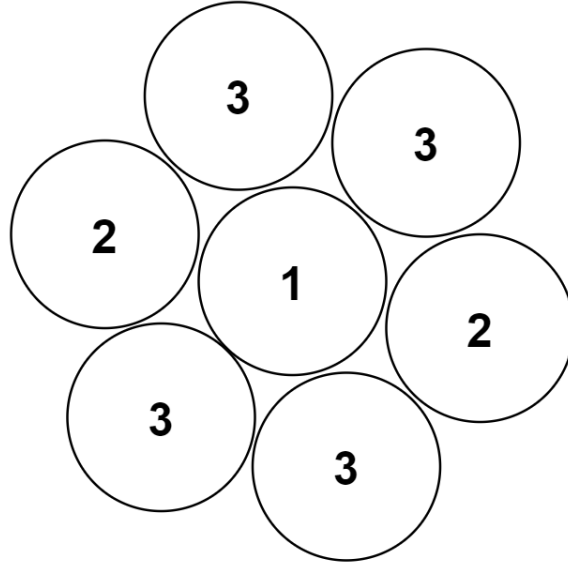
Şekil 15. LED Sürücü PCB Çizimi

MOSFET sürücünün besleme pininin yanındaki kondansatörün devre üzerindeki işlevi oldukça önemlidir. Bu kondansatör, MOSFET'in  $C_{GS}$  kondansatörünün hızlıca dolmasını sağlamak için MOSFET sürücüyeye gerekli anlık akımı sağlamaktadır. Bu yüzden kondansatör, MOSFET sürücünün besleme pinine olabildiğince yakın yerleştirilmiştir. Oluşturulan devrenin görüntüsü Şekil-16’da verilmiştir. 3 LED grubu olduğu için 3 adet LED sürücü kullanılmıştır.



Şekil 16. LED Sürücüler

LED'lerden 4 tanesi bir grup, 2 tanesi ayrı bir grup, geri kalan bir tanesi ise tek olarak sürücülere bağlanmıştır. Oluşturulan LED gruplar Şekil-17'de gösterildiği gibi görünmektedir. LED'ler seri bağlandıkları zaman uygulanması gereken giriş gerilimi artmaktadır. Bu yüzden yapılan çalışma da LED'lerin paralel bağlanması tercih edilmiştir. LED'lerin paralel bağlandıkları zaman ise içlerinde bulunan kapasitif etki artmaktadır. Tasarlanan sürücüde bu etkiyi azaltmak için herhangi bir çalışma yapılmamıştır.



Şekil 17. LED Grubu Modeli

Şekil-17’de verilen çemberler LED aydınlatmaları, içlerindeki numaralar ise hangi gruba ait olduğunu ifade etmektedir. Tasarlanan sürücüde 8-PAM modülasyonu desteklemesi için 3 grup kullanıldığını belirtmiştik. Bu sebeple burada da birden üçe kadar numaralar kullanılmıştır. LED yerleştirilirken grupların simetrik olmasına dikkat edilmiştir. Böylece alıcının, vericinin direk karşısında olmadığı durumlarda meydana gelebilecek sorunlar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan LED’ler piyasada satılmakta olan sıradan 10W LED aydınlatmalardır. Satın alınan LED’lerin içleri açılarak bağlantıları değiştirilmiş ve tasarlanan sürücüde kullanılan MOSFET’ler ile çalışabilmesi için 27 V’da çalışacak hale getirilmiştir. Her LED armatürün çapı 6 cm olup 7 adet LED armatür kullanılarak Şekil-17’deki gibi 3 grup oluşturulmuştur. LED grubunun gerçekleştirilen görüntüsü Şekil-18’de verilmiştir. LED’ler aynı yöne bakmaları için aralarında en az boşluk kalacak şekilde 3 mm’lik ahşap bir plaka üzerine silikon yardımı ile sabitlenmiştir.

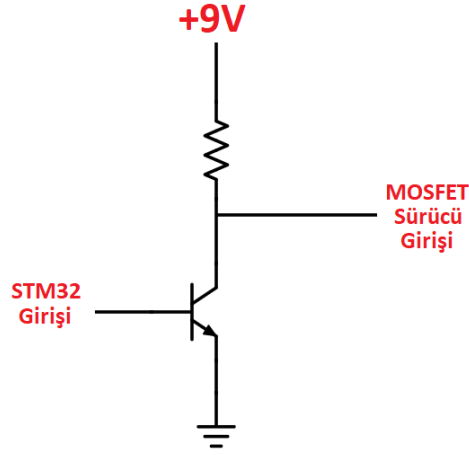




Şekil 18. LED Grupları

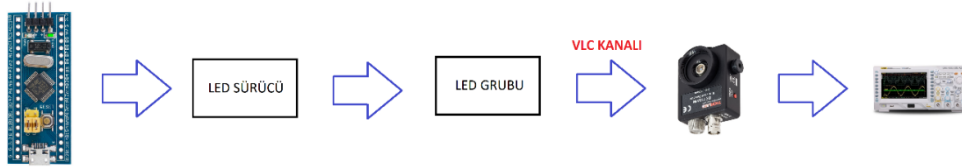
Matlab kullanılarak oluşturulan giriş işareti LED Sürücü devrelerine STM32F1 serisi mikrodenetleyici kart kullanılarak verilmiştir. Kullanılan LED sürücü sayısı 3 olduğundan mikrodenetleyici üzerinde 3 adet pin kullanılmıştır. Kullanılan pinlerin yüksek frekans anahtarlama özellikleri aktif edilip verilen işaretler arası gecikmenin en az olması için aynı port'dan kullanımına dikkat edilmiştir. Aynı port üzerinde kullanıldıklarından veri değişimi pin olarak değil port olarak mikro denetleyiciden iletilmiş ve bu sayede veri geçişleri 3 pin için neredeyse aynı anda yapılmıştır.

Kullanılan mikrodenetleyicinin pin çıkışları lojik 3.3 V'dur. MOSFET sürücünün düzgün çalışabilmesi için 3.3 V'un MOSFET sürücünün besleme gerilimini yarısı olan 6 V'a kadar yükseltilmesi gerekmektedir. Bu sebeple araya transistörlü bir yükselteç devresi eklenmiştir. Eklenen transistörlü yapı Şekil-19'de görülmektedir.



Şekil 19. Transistörlü Lojik Seviye Yükseltici

Verilen şekilde kullanılan transistör yapısının bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan ilki bu transistörlü yapı, girişi değil (NOT) işlemine tabi tutarak çıkışa aktarmaktadır. Bu sebeple alıcıda elde edilen işaret gönderilen işaretin tam tersi olmaktadır. İşaretin tersinin alıcıya ulaşmasını engellemek için işlemciye yüklenen bitler pinlerden iletilirken değil işlemi yapılarak gönderilmiştir. İkinci dezavantajı ise kullanılan transistörün anahtarlama hızıdır. Seçilen transistörün  $f_T$  parametresi düşük olması halinde istenilen frekans değerinde anahtarlama doğru şekilde yapamayacaktır. Yapılan çalışmada bu parametre değeri 300 MHz olan 2N2222 transistörü tercih edilmiştir. Oluşturulan deney setinin blok diyagramı Şekil-20’de verilmiştir.



Şekil 20. Deney Seti Blok Diyagramı

Gönderilen veriler fotodiyot kullanılarak alınmış ve Osiloskop kullanılarak kaydedilmiştir. Osiloskopda kayıt işlemi yapılırken anahtarlama hızının 100 katı hızda örnekleme yapılmıştır. Böylece her sembol için 100 adet örnek elde edilmiştir. Kaydedilen

veriler MATLAB ortamına aktarılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz işlemi öncelikle kaydedilen verilerde genlik normalizasyonu yapılmış ve senkronizasyon sağlanmaya çalışılmıştır. Senkronizasyon işlemi için kaydedilen veriler ile 8. Derece PN dizisi arasında korelasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Korelasyon işleminin doğru sonuç verebilmesi için PN dizisinde her bit 100 örnek olacak şekilde genişletilmiştir.

Alınan veride senkronizasyon işlemi gerçekleştirilip veri paketlerinin başı belirlendikten sonra, 2-PAM modülasyonlu olarak gönderilen PN dizisi ve 8-PAM modülasyonlu olarak gönderilen veri için genlik seviyelerinin eşikleri belirlenmiştir. 2-PAM olarak gönderilen veride verinin tam ortası eşik olarak seçilmişken 8-PAM olarak gönderilen veride her kayıt için en ideal genlik seviyesi eşikleri histogram grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. Eşit aralıklı seçilen genlik seviyeleri için histogram grafikleri oluşturulup seviyeler arası mesafeler incelenmiş ve seviye eşikleri bu histogram grafiklerine bakılarak değiştirilmiştir. En ideal seviye eşikleri belirlendikten sonra gönderilen veri ile alınan veri kıyaslanarak BER grafikleri çıkarılmıştır.

### **3. BULGULAR VE İRDELEME**

#### **3.1. Giriş**

Yapılan çalışmada önerilen MOSFET sürücü ile yapılan testlerden elde edilen sonuçlar bu kısımda verilmiştir. Sürücü için yapılan testlerde genlik seviyelerinin analizi, alıcıda alınan seviyelerin histogram analizi, oda içinde iletilen verinin BER analizi, ve tasarlanan sürücünün verimlilik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada tasarlanan sürücü ile oda içerisinde yapılan ölçümlerde 16 adet farklı noktada veri paketi kayıt edilmiştir (Şekil - 14). Bu kayıtlar daha sonra offline olarak MATLAB ortamında analiz edilerek oda içerisindeki Bit Error Ratio (BER) grafiği çıkartılmıştır. Gönderilen veri paketindeki 8-PAM modülasyonlu veride seviyelerin kontrolü için bir test verisi gönderilmiştir. Bu sayede iletilen işarette seviyelerin genlikleri ve zaman aralıkları analiz edilmiştir. Alınan seviyelerin histogramı çıkartılarak hangi genlik değerlerinde işaretler alındığının analizi yapılmıştır. Son olarak önerilen LED sürücünün güç ve verimlilik analizi gerçekleştirilmiştir.

#### **3.2. Sürücü Testleri**

Sürücünün çalışma performansının ilk değerlendirmesini yapmak için LED sürücü kullanılarak bir test verisi gönderilmiştir. Test amaçlı iletilen veri, bütün seviyelerin gözlemlenebilmesi için 8. seviyeden 1. seviyeye kadar tüm seviyeler arka arkaya eklenerek oluşturulmuştur. Alıcı, verici olarak kullanılan LED'lerden 1.5 m mesafe uzakta LED'lerin tam karşısında ve LED'lere doğru bakacak şekilde konumlandırılmıştır. Fotodiyotun üzerinde ışığı odaklamak için bir lens kullanılmıştır. Osiloskopta alınan verinin görüntüsüne bakılarak lens en iyi konuma getirilip osiloskoptaki veri ve ekran görüntüsü harici bir belleğe kaydedilerek analizi gerçekleştirilmiştir. Gönderilen test verisinin Osiloskop ile kaydedilen görüntüsü Şekil-21'de verilmiştir



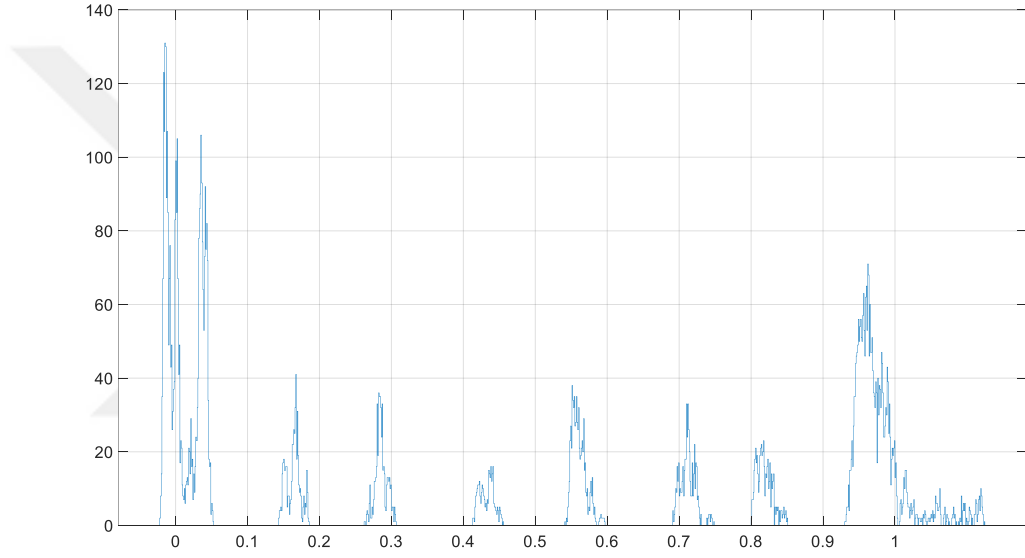
Şekil 21. Alıcıdaki Genlik Seviyeleri

Şekil-21’de verilen Osiloskop görüntüsüne göre iletilen 8-PAM modülasyonlu işaret alıcı tarafında düzgün bir şekilde alınmaktadır. LED’ler 100 KHz’de anahtarlandığından sembol aralıkları eşit ve  $10 \mu\text{s}$  saniye olacak şekildedir. Alınan işaretle 2., 4. ve 6. seviyelerden sonra arasında ani düşüşler meydana gelmiştir. Bu ani düşüşler LED grupları arasındaki geçişin eş zamanlı olarak gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. LED grubunun kapanması, açılmasından daha kısa sürdüğü için seviye geçişlerinde ani düşüşler meydana gelmektedir. Bu düşüşler sembol periyodunun sonunda meydana gelmektedir. Örnekleme yapılırken sembol periyodunun ortası referans olarak kullanıldığı için işaretle meydana gelen ani düşüşler yapılan analizleri etkilememiştir.

Alınan işaretle 2 ve 3. Seviye arası ile 6 ve 7. Seviyelerin arası mesafe diğer seviyelere göre biraz daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu seviye farklılığı alıcı tarafta kullanılan fotodiyota ışığı odaklamak için kullanılan lensten kaynaklanmaktadır. Lens, farklı LED gruplarından çıkan ışıkları aynı şekilde fotodiyota odaklayamamakta bu yüzden de alıcı tarafındaki işaretle genlik seviyelerinde küçük farklılıklara sebep olmaktadır. Ancak MATLAB ortamında yapılan BER analizinde bir soruna sebep olmamaktadır.

### 3.3. Histogram

Yapılan deneysel çalışmada gönderilen verilerin analizinin kolay gerçekleştirilebilmesi için osiloskop yardımı ile kayıt edilen verilerin MATLAB ortamında histogram grafikleri oluşturulmuştur. Bu sayede LED sürücü ile gönderilen seviyelerin normalize genlik değerleri ve sayıları net bir şekilde görüntülenmiştir. Oda içerisinde yapılan ölçümlerde LED'lere en yakın konumlardan birinde kayıt edilen veri paketinin histogram grafiği Şekil-22'de görülmektedir.



Şekil 22. Genlik Seviyeleri Histogram Grafiği

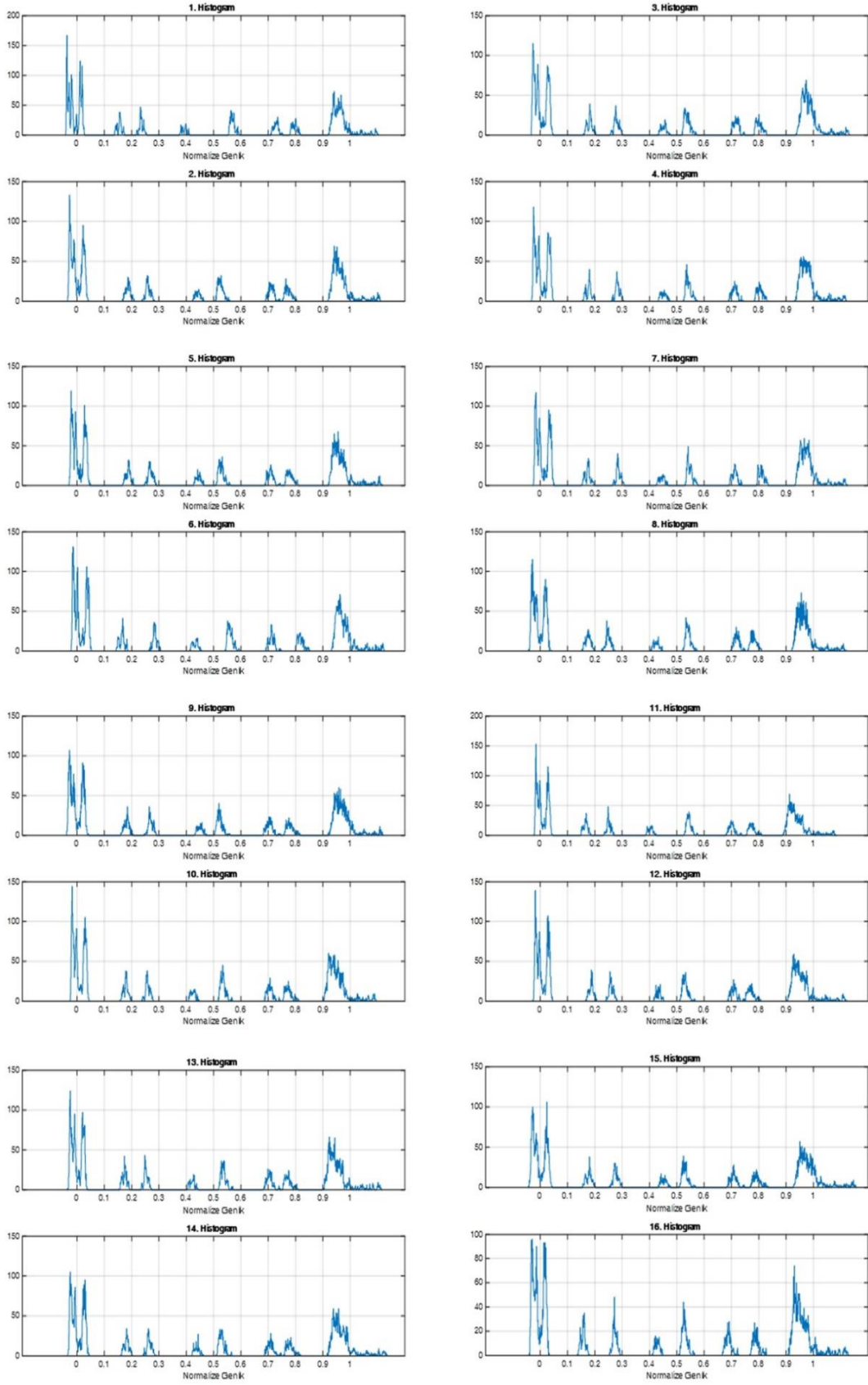
İlk bakışta histogram grafiğinde de alıcı tarafta 8'den fazla seviye varmış gibi görünmekte. Ancak seviyelerin gruplandırılması doğru şekilde yapıldığında 8 adet seviye olduğu seçilebilmektedir. Alıcıda alınan seviyelerin normalize genlik değer aralıkları Tablo-3'deki gibidir. Vericiye yakın konumda yapılan veri iletiminde genlik seviyeleri arası mesafe seviye tespiti için yeterince geniş olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Normalize Genlik Seviyeleri

Genlik Aralığı	0 – 0.10	0.10-0.22	0.22-0.36	0.36-0.5	0.5-0.65	0.65-0.77	0.77-0.89	0.89-1
Seviye	0	1	2	3	4	5	6	7

Tabloda verilen değerlerde üst satırdakiler seçilen genlik aralığı, alt satırdakiler ise bu genlik aralığında gelen veriler için seçilen seviyeyi ifade etmektedir. Verilen değerler LED'lere en yakın kayıt için seçilen seviye değerleridir. Bu kayıta seviyeler arası mesafeler fazla olduğundan hatasız olarak veri iletimi gerçekleştirilmiştir.

Histogram grafiğinde meydana gelen negatif genlik değerleri kullanılan fotodiyotun iç yapısından kaynaklanan değerlerdir. Normalize değerlerde'de 1'i aşan genlik değerleri ise devrede kullanılan bypass kondansatörlerinden kaynaklanmaktadır. Gönderilen veri paketleri arasında bazı boşluklar yerleştirilmiştir. Bu boşluklarda vericiden 0 değeri gönderilmekte ve MOSFET'ler kapalı konumda tutulmaktadır. MOSFET'ler kapalı konumda tutulurken tasarlanan devrede bulunan bypass kondansatörleri tamamen dolmaktadır. Veri iletimi başladığında ise LED'ler üzerinden boşalmakta ve veri paketinin başındaki PN dizisinde bazı yüksek genlikler oluşmasına sebep olmaktadır. Bu yüksek genlikler 2 PAM ile modüle edilmiş PN dizisinde olduğu için alıcı tarafta yapılan seviye tespiti işleminde sorun yaratmamaktadır. Alınan 16 ölçüm için elde edilen histogram grafikleri Şekil-23'de verilmiştir.



Şekil 23. Histogram Grafikleri (1 - 16 Ölçüm)



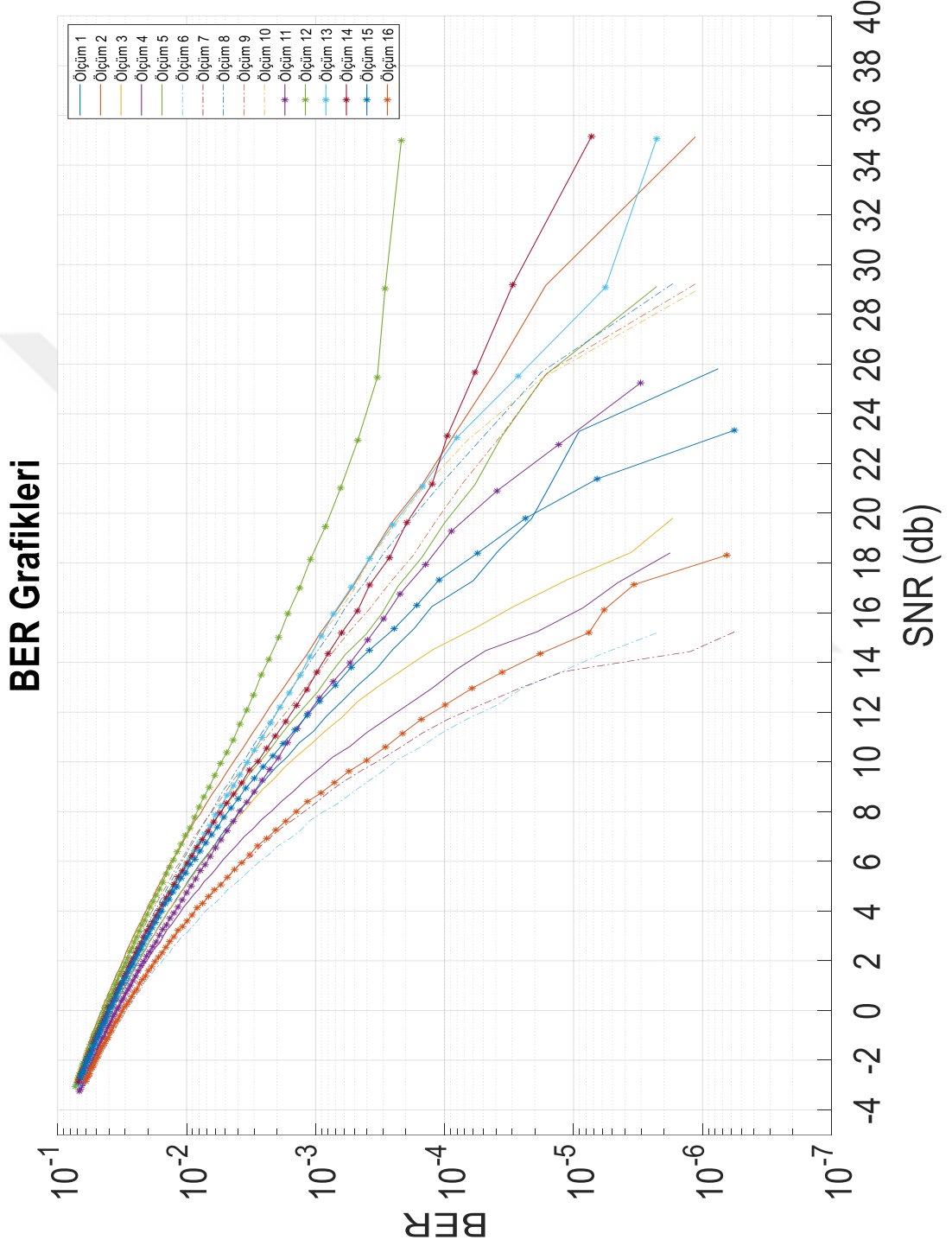
### 3.4. Oda İçi BER

Tasarlanan LED sürücünün testlerini gerçekleştirmek için oluşturulan oda ortamında her ölçüm noktası için ayrı ayrı veri kaydedilip offline olarak MATLAB ortamında analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan veri analizlerinde kayıt edilen veri için BER 0 olacak şekilde 8-PAM demodülasyonu için genlik eşikleri seçilmiştir. Daha sonra bu verilere gücü iteratif olarak arttırılmış gürültü eklenerek SNR-BER grafikleri elde edilmiştir. Alınan ölçümlerin konumları Tablo-4’de verilmiştir.

Tablo 4. Ölçüm Numaraları

1	2	3	4
8	7	6	5
9	10	11	12
16	15	14	13

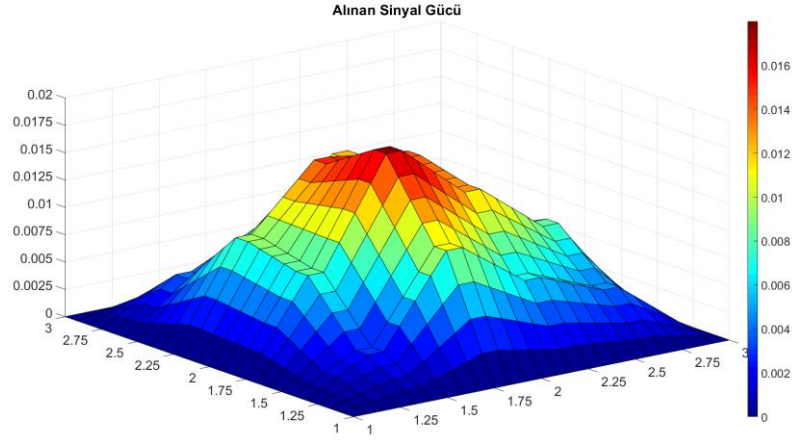
Elde edilen BER grafiklerindeki sonuçların hepsi birbirinin aynısı çıkmamıştır. Bunun nedeni histogram grafiklerinde de olduğu gibi alıcıda ışığı odaklamak için kullanılan lensten kaynaklanmaktadır. Her ölçüm noktasında ışık tam odaklanmadığı için alıcıda alınan seviyeler farklı ölçüm noktalarında farklı çıkmaktadır. Bu nedenle de elde edilen BER grafikleri de farklı çıkmaktadır. Bu sorun, kullanılan lensin odağı daha farklı olan bir lens ile değiştirilmesi ya da verici olarak kullanılan aydınlatmanın gücü arttırılması ile çözülebilir. Yapılan 16 adet ölçüm sonucu elde edilen BER grafikleri Şekil-24’de verilmiştir.



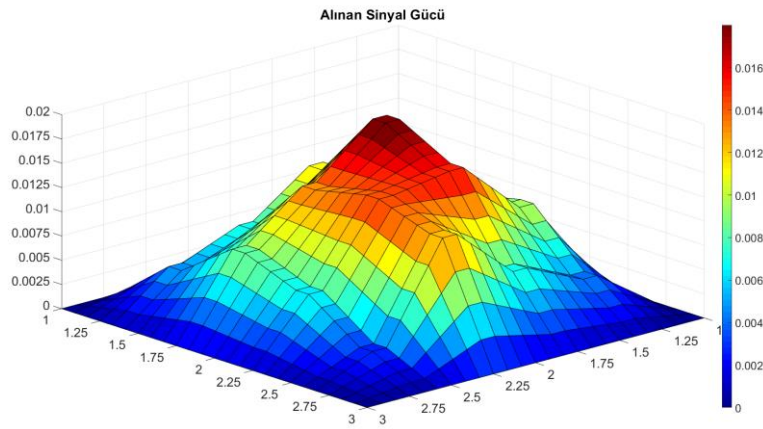
Şekil 24. BER Grafikleri

### 3.5. Güç ve Verimlilik

Tasarlanan sürücü ile yapılan ölçümlerde elde edilen güç değerleri her nokta için ayrı ayrı hesaplanıp kaydedilmiştir. Hesaplama yapılırken her kayıta bulunan veri paketleri için ayrı ayrı güç hesabı yapılmış ve bu hesaplamaların ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Böylece yapılan kayıttan en doğru sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Bu hesaplamalar yine MATLAB kullanılarak korelasyon, seviye belirleme ve BER analizi işlemlerinden sonra gerçekleştirilmiştir. Her noktada yapılan ölçümler 2 boyutlu bir matrise kaydedilerek 3 boyutlu olarak çizdirildiğinde Şekil-25 ve Şekil-26'daki grafikler ortaya çıkmıştır. Verilen şekillerde 3 boyutlu alınan sinyal gücü grafiğinin ön ve arkadan görüntüsü mevcuttur.



Şekil 25. Alınan Sinyal Gücü - 1



Şekil 26. Alınan Sinyal Gücü - 2

Grafiklerden de görüldüğü üzere odanın kenarlarında daha düşük sinyal gücü ortasında daha yüksek sinyal güçlü veri kaydedilmiştir. Sonuçların tam simetrik olmamasının nedeni alıcıda ışığı odaklamak için kullanılan lense her seferinde tam odaklanmamış olmasıdır.

Tasarlanan sürücüde 7 adet LED aydınlatma kullanılmıştır. Bu LED'ler her biri 10 W olduğu için teorik olarak 70 W aydınlatma gücü bulunmaktadır. Ancak veri iletimi sırasında her MOSFET OOK modülasyonu ile anahtarlandığı için bu teorik güç yarıya düşüp 35 W olmaktadır. Önerilen sürücüde LED'leri beslemek için 28 V kullanıldığında LED'ler anahtarlama sırasında 800 mA akım çekmiştir. Sürücünün çektiği güç hesaplandığında yaklaşık olarak 23 W'lık gücün LED'lere aktarıldığı gözlemlenmiştir. Sürücünün tam kapasite sürülememesinin en önemli sebepleri kullanılan snubber elemanlarının ve LED kutuplaması için kullanılan direncin devrede sürekli olarak güç harcıyor olmasıdır.

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre önerilen LED sürücü sahip olduğu birçok özellikle literatürde önerilen sürücülere göre avantajları bulunmaktadır. Özellikle önerilen sürücünün farklı modülasyonları desteklemesi sebebiyle esnek yapıya sahip olması ve yüksek güçlerde aydınlatmaları rahatlıkla destekliyor olması en önemli avantajlardandır.

Literatürde VLC üzerine yapılan çalışmada önerilen sürücü benzeri bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada MOSFET'leri anahtar olarak kullanıp VLC'de çok seviyeli modülasyonlar ile veri gönderilmesi denenmiş ve başarı ile veri iletimi sağlanmıştır. MOSFET'ler 100 KHz'de anahtarlanmış ve 3 grup LED ve 3 adet LED sürücü devresi kullanılmıştır. Veri iletimi için PAM modülasyonu tercih edildiğinde gönderilen 8-PAM modüleli olarak gönderilmiştir. Veri analizi offline olarak gerçekleştirilip alınan ölçümler 3mx3mx2m beyaz oda içerisinde yapılmıştır. Oda içerisinde alınan ölçümlere bakıldığında teorik oda analizlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

LED sürücünde veri iletimi yapılması için MOSFET'ler 100 KHz seçilmesinin nedeni LED'lerin oluşturacağı parazit etkisini en aza indirmektir. Bu çalışmada LED'lerin yüksek frekansta anahtarlanması ile meydana gelen parazit etkilerini gidermek için çalışma yapılmamıştır. Çünkü bu çalışmanın öncelikli amacı önerilen LED sürücü tasarımının denenmesi ve sonuçları incelenmesidir.

Önerilen LED sürücü sahip olduğu avantajların yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu dezavantajlardan biri tasarlanan sürücünde değişiklik yapılmadığında 8-PAM için tasarlanmış LED sürücü aynı anda 4-PAM'ı desteklememektedir. Çünkü 4-PAM için gerekli genlik seviyelerini, 8-PAM için kullanılan LED grupları ile elde etmek mümkün değildir. Bir diğer dezavantajı ise LED grupları arası uzaklığın alıcıdaki BER'i doğrudan etkilemesidir. Özellikle alıcıda lens kullanıldığı durumlarda LED grupları arası mesafe alıcıda genlikler arası değişimi oldukça etkilemektedir.

## 5. ÖNERİLER

Yapılan çalışmada LED sürücü tasarımı denenmiş ve sonuçları analiz edildiğinde başarılı sonuçlar aldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada LED'lerin yüksek frekansta oluşturduğu parazit etkileri gidermek için çalışma yapılmadığından anahtarlama ve bu sebeple veri iletimi 100 KHz'de gerçekleştirilmiştir. Önerilen LED sürücüye ön denkleştirici elemanları ve mavi ışık filtreleri gibi yapılar eklenerek sürücünün daha yüksek hızlarda LED'leri anahtarlama sağlanabilir.

Devrede meydana gelen osilasyonları azaltarak daha yüksek frekanslarda anahtarlama yapmak için kullanılan snubber elemanları devrede güç harcamakta ve devrenin verimini düşürmektedir. Snubber elemanları olmayan farklı bir devre topolojisi kullanılarak hem devre verimi hem de anahtarlama hızı artırılabilir.

Bu çalışmada 3 adet LED sürücü ve 7 adet LED aydınlatma kullanılarak 8-PAM modülasyonu ile veri iletimi gerçekleştirilmiştir. Daha fazla sayıda LED ve LED sürücü kullanılarak OFDM gibi modülasyonlar ile veri iletimi sağlanabilir.

Alıcı tarafta gelen ışığı fotodiyota odaklamak için kullanılan lens, her açıdan gelen ışığı dik olarak ileten Fresnel Lens benzeri bir lens ile değiştirilirse seviyelerde meydana gelen kaymalar en aza indirilip daha az bit hatalı veri iletimi sağlanabilir.

Yapılan çalışmada veri iletimi için herhangi bir kodlama tekniği kullanılmamıştır. Bu sebeple haberleşmede olması istenmeyen arka arakaya aynı bitlerin çok fazla gelmesinden kaynaklı DC seviyenin oluşmasını engelleyen bir yapı bulunmamaktadır. Bu durum sürücünün performansını olumsuz etkilemektedir. İletilen veri için RLL kodlar kullanılarak yapılan modülasyonlarda daha yüksek hızlarda veri iletimi gerçekleştirmek mümkün olabilir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Rajagopal, S., Roberts, R.D. ve Lim, S.-K., IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support, IEEE Communications Magazine, 50,3 (2012) 72-82.
2. Bell, A.G., Adams, W.G., Tyndall ve Preece, W.H., Discussion on "The photophone and the conversion of radiant energy into sound", Journal of the Society of Telegraph Engineers, 9,34 (1880) 375-383.
3. Jackson, D.K., Buffaloe, T.K. ve Leeb, S.B., Fiat lux: a fluorescent lamp digital transceiver, IEEE Transactions on Industry Applications, 34,3 (1998) 625-630.
4. Lee, K., Park, H. ve Barry, J.R., Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications, IEEE Communications Letters, 15,2 (2011) 217-219.
5. Gfeller, F.R. ve Bapst, U., Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation, Proceedings of the IEEE, 67,11 (1979) 1474-1486.
6. Miramirkhani, F. ve Uysal, M., Channel Modeling and Characterization for Visible Light Communications, IEEE Photonics Journal, 7,6 (2015).
7. Kahn, J.M. ve Barry, J.R., Wireless infrared communications, Proceedings of the IEEE, 85,2 (1997) 265-298.
8. Komine, T. ve Nakagawa, M., Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 49,1 (2003) 79-79.
9. Tokgoz, S.C., Boluda-Ruiz, R., Yarkan, S. ve Qaraqe, K.A., ACO-OFDM Transmission over Underwater Pipeline for VLC-based Systems, 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) 2019, İstanbul, Turkey.
10. Ahmad, Z., Rajbhandari, S., Salih, O. ve Green, R., Demonstration of a multi-hop underwater visible light communication system, 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) 2017, Girona, Spain.
11. Wu, L.-C. ve Tsai, H.-M., Modeling vehicle-to-vehicle visible light communication link duration with empirical data, 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps) 2013, Atlanta, USA.
12. Yu, S.-H., Shih, O., Tsai, H.-M., Wisitpongphan, N. ve Roberts, R.D., Smart automotive lighting for vehicle safety, IEEE Communications Magazine, 51,12 (2013) 50-59.
13. Arai, S., Mase, S., Yamazato, T., Endo, T., Fujii, T., Tanimoto, M., Kidono, K., Kimura, Y. ve Ninomiya, Y., Experimental on Hierarchical Transmission Scheme for

- Visible Light Communication using LED Traffic Light and High-Speed Camera, 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference 2007, Baltimore, USA.
14. Gao, Y., Li, L. ve Mok, P.K.T., An AC Input Inductor-Less LED Driver for Efficient Lighting and Visible Light Communication, IEEE Journal of Solid-State Circuits 53,8 (2018) 2343 - 2355.
  15. Baek, J. ve Chae, S., Off-line buck LED driver for series connected LED segments, 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2017, Tampa, FL, USA.
  16. Modepalli, K. ve Parsa, L., Dual-Purpose Offline LED Driver for Illumination and Visible Light Communication, IEEE Transactions on Industry Applications, 51,1 (2014) 406-419.
  17. Minh, H.L., O'Brien, D., Faulkner, G., Zeng, L., Lee, K., Jung, D. ve Oh, Y., 80 Mbit/s Visible Light Communications using pre-equalized white LED, 2008 34th European Conference on Optical Communication 2008, Brussels, Belgium.
  18. Li, H., Chen, X., Guo, J., Gao, Z. ve Chen, H., An analog modulator for 460 MB/S visible light data transmission based on OOK-NRS modulation, IEEE Wireless Communications, 22,2 (2015) 68-73.
  19. Kishi, T., Tanaka, H., Umeda, Y. ve Takyu, O., A High-Speed LED Driver That Sweeps Out the Remaining Carriers for Visible Light Communications, Journal of Lightwave Technology 32,2 (2013) 239-249.
  20. Li, L., Hu, P., Peng, C., Shen, G. ve Zhao, F., Epsilon: A Visible Light Based Positioning System, Symposium on Networked Systems Design and Implementation 2014, Seattle: 331-343.
  21. Kuo, Y.-S., Pannuto, P., Hsiao, K.-J. ve Dutta, P., Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light, Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking 2014.
  22. Ashok, A., Jain, S., Gruteser, M., Mandayam, N., Yuan, W. ve Dana, K., Capacity of pervasive camera based communication under perspective distortions, 2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom) 2014, Budapest, Hungary.
  23. Samuel, D.P., Nabeel, A. ve Dina, K., PixNet: Interferencefree Wireless Links Using LCD-camera Pairs, Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking 2010, New York.
  24. Wang, Q., Giustiniano, D. ve Puccinelli, D., OpenVLC: software-defined visible light embedded networks, Proceedings of the 1st ACM MobiCom workshop on Visible light communication systems 2014, New York.
  25. Galisteo, A., Juara, D. ve Giustiniano, D., Research in Visible Light Communication Systems with OpenVLC1.3, 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT) 2019, Limerick, Ireland.



26. Schmid, S., Corbellini, G. ve Mangold, S., LED-to-LED visible light communication networks, Proceedings of the fourteenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing 2013, New York.
27. Klaver, L., Design of a network stack for directional visible light communication. (2020).
28. Rahim, M., Miravakili, A., Ray, S., Koomson, V. ve Little, T., Demonstration of a software Defined Visible Light Communication System, 17th Annual International Conference on Mobile 2011, Las Vegas.
29. Rahaim, M., Miravakili, A., Ray, S., Koomson, V., Hella, M. ve Little, T., Software defined visible light communication, Wireless Innovation Forum Conference on Communications Technologies and Software Defined Radio 2014.
30. Miki, M., Asayama, E. ve Hiroyasu, T., Intelligent Lighting System using Visible-Light Communication Technology, 2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems 2006, Bangkok, Thailand.
31. Jenq, F.-L., Pu, Y.-C. ve Weng, Z.-C., An AC LED smart lighting system with white light FSO communication, 2010 International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation (3CA) 2010, Tainan, Taiwan.
32. Cossu, G., Khalid, A.M., Choudhury, P., Corsini, R. ve Ciaramella, E., 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED, Optics Express, 20,26 (2012) 501-506.
33. Albayrak, C. ve Turk, K., Rate adaptive system for visible light communications, 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) 2017, Barcelona, Spain.
34. Yazgan, A., Simsek, C., Albayrak, C., Tugcu, E. ve Turk, K., Experimental Channel Measurement for Indoor Office Visible Light Communication, 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) 2018, Athens, Greece.
35. Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S., Habel, K., Buttner, A., Langer, K.-D. ve Walewski, J.W., 125 Mbit/s over 5 m wireless distance by use of OOK-Modulated phosphorescent white LEDs, 2009 35th European Conference on Optical Communication 2009, Vienna, Austria.
36. Zhang, S., Watson, S., McKendry, J.J.D., Massoubre, D., Cogman, A., Gu, E., Henderson, R.K., Kelly, A.E. ve Dawson, M.D., 1.5 Gbit/s Multi-Channel Visible Light Communications Using CMOS-Controlled GaN-Based LEDs, Journal of Lightwave Technology, 31,8 (2013) 1211-1216.
37. Elgala, H., Mesleh, R. ve Haas, H., Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art, IEEE Communications Magazine, 49,9 (2011) 56-62.

38. Bai, B., Xu, Z. ve Fan, Y., Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM, The 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2010) 2010, Shanghai, China.
39. Zhao, S., Xu, J. ve Trescases, O., A dimmable LED driver for visible light communication (VLC) based on LLC resonant DC-DC converter operating in burst mode, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2013, Long Beach, CA, USA.
40. Fan, Y., Bai, B. ve Green, R.J., PPMPWM: A new modulation format for wireless optical communications, 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010) 2010, Newcastle upon Tyne, UK.
41. Chen, S.-H. ve Chow, C.-W., Color-Shift Keying and Code-Division Multiple-Access Transmission for RGB-LED Visible Light Communications Using Mobile Phone Camera, IEEE Photonics Journal, 6,6 (2014).
42. Singh, R., O'Farrell, T. ve David, J.P.R., An Enhanced Color Shift Keying Modulation Scheme for High-Speed Wireless Visible Light Communications, Journal of Lightwave Technology, 32,14 (2014) 2582-2592.
43. Tuğcu, E., Yazgan, A., Albayrak, C. ve Türk, K., Red-shift effect in multi-color LEDs based visible light communication, Optics Communications, 463 (2020).
44. Elgala, H., Mesleh, R., Haas, H. ve Pricope, B., OFDM Visible Light Wireless Communication Based on White LEDs, 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring 2007, Dublin, Ireland.
45. Albayrak, C., Türk, K., Tuğcu, E. ve Yazgan, A., Seamless rate adaptation for indoor visible light communication without CSI at the transmitter, Physical Communication, 40 (2020).
46. Armstrong, J., OFDM for Optical Communications, Journal of Lightwave Technology, 27,3 (2009) 189-204.
47. Zukauskas, A., Vaicekauskas, R., Ivanauskas, F., Kurilcik, G., Bliznikas, Z., Breive, K., Krupic, J., Rupsys, A., Novickovas, A., Vitta, P., Navickas, A., Raskauskas, V., Shur, M.S. ve Gaska, R., Quadrichromatic white solid state lamp with digital feedback, Third International Conference on Solid State Lighting, (2004) 185-198.
48. Ikeda, K., Horiuchi, S., Tanaka, T. ve Susaki, W., Design parameters of frequency response of GaAs—(Ga,Al)As double heterostructure LED's for optical communications, IEEE Transactions on Electron Devices, 24,7 (1977) 1001 - 1005.
49. Liao, C.-L., Ho, C.-L., Chang, Y.-F., Wu, C.-H. ve Wu, M.-C., High-Speed Light-Emitting Diodes Emitting at 500 nm With 463-MHz Modulation Bandwidth, IEEE Electron Device Letters, 35,5 (2014) 563-565.

50. Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V. ve Parthiban, R., LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17,3 (2015) 1649-1678.
51. Steigerwald, D.A., Bhat, J.C., Collins, D., Fletcher, R.M., Holcomb, M.O., Ludowise, M.J., Martin, P.S. ve Rudaz, S.L., Illumination with solid state lighting technology, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 8,2 (2002) 310-320.
52. Grubor, J., Lee, S.C.J., Langer, K.-D., Koonen, T. ve Walewski, J.W., Wireless High-Speed Data Transmission with Phosphorescent White-Light LEDs, 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication - Post-Deadline Papers (published 2008) 2007, Berlin, Germany.
53. Liaw, S.-K., Chou, H.-H., Wu, C.-J., Chien, M.-J. ve Teng, C., 500 Mb/s OOK visible light communications using RGB-based LEDs, 2015 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE) 2015, Taipei, Taiwan.
54. Danakis, C., Afgani, M., Povey, G., Underwood, I. ve Haas, H., Using a CMOS camera sensor for visible light communication, 2012 IEEE Globecom Workshops 2012, Anaheim, CA, USA.
55. Leigh, P.D.Y., Very Low-Cost Sensing and Communication Using Bidirectional LEDs, International Conference on Ubiquitous Computing 2003, Berlin, Heidelberg.
56. Giustiniano, D., Tippenhauer, N.O. ve Mangold, S., Low-complexity Visible Light Networking with LED-to-LED communication, 2012 IFIP Wireless Days 2012, Dublin, Ireland.
57. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP81074-D.PDF> Single Channel 10A High Speed Low-Side MOSFET Driver. NCP81074A, NCP81074B. 05/17/2020.
58. Mirvakili, A. ve Koomson, V.J., High efficiency LED driver design for concurrent data transmission and PWM dimming control for indoor visible light communication, 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series 2012, Seattle, WA, USA.
59. Fujimoto, N. ve Mochizuki, H., 477 Mbit/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single commercially available visible LED and a practical LED driver with a pre-emphasis circuit, 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC) 2013, Anaheim, CA, USA.
60. Lin, B., Tang, X., Ghassemlooy, Z., Fang, X., Lin, C., Li, Y. ve Zhang, S., Experimental Demonstration of OFDM/OQAM Transmission for Visible Light Communications, IEEE Photonics Journal, 8,5 (2016).
61. Başer, O. ve Türk, K., Görünür Işık Haberleşmesi Sistemlerinde M-Pam İçin Deneysel Performans Analizi, 19 Mayıs Yenilikçi Bilimler Kongresi 2019, Samsun.

62. Jalajakumari, A.V.N., Tsonev, D., Cameron, K., Haas, H. ve Henderson, R., An energy efficient high-speed digital LED driver for visible light communications, 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC) 2015, London, UK.



## ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan BAŞER 1994 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mareşal Fevzi Çakmak İlköğretim Okulu'nda orta öğrenimini Trabzon Lisesi'nde gerçekleştirmiştir. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'ne başladı. 1 yıllık hazırlığı da okuyarak 2017 yılında mezun olmuştur. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

