



**GÜN IŞIĞI ETKİLERİNİ AZALTMAK İÇİN
KIZILÖTESİ ALICI – VERİCİ KULLANILARAK
YÜKSEK HIZLI LI-FI SİSTEM TASARIMI**

Hasan Eren EMİR

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK**

**2022
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GÜN IŞIĞI ETKİLERİNİ AZALTMAK İÇİN KIZILÖTESİ ALICI – VERİCİ
KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI LI-FI SİSTEM TASARIMI**

Hasan Eren EMİR

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

22 / 08 / 2022

Hasan Eren EMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜN IŞIĞI ETKİLERİNİ AZALTMAK İÇİN KIZILÖTESİ ALICI – VERİCİ KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI LI-FI SİSTEM TASARIMI

Hasan Eren EMİR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Li-Fi (Light Fidelity) teknolojisi, ışığın taşıyıcı sinyal olarak kullanılmasına dayanan, hava ortamından başka özel bir iletim ortamı gerektirmeyen ve yüksek hızlı veri iletişimine olanak sağlayan yeni bir veri iletişim teknolojisidir. RF (Radyo Frekans) iletişiminde sınırlı ve ücretli bant genişliği kısıtlamalarını aşarak, yüksek hız ve güvenilirlik ihtiyacını maliyet etkin bir şekilde karşılayacak bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar, özellikle VLC (Visible Light Communication), yani görünür ışık spektrumunu kullanarak gerçekleştirilen iletişim tekniğine dayanmaktadır. Ancak TV, projeksiyon cihazı, monitör, aydınlatma sistemleri gibi ışık kaynakları ve hatta gün ışığı, VLC üzerinde bozucu girişim (interference) etkilerine sahiptir. Bu tez çalışması ile çevresel bozucu faktörlerden etkilenmenin azaltılması için Li-Fi sistemlerinde VLC yerine, IR (Infrared / kızılötesi) alıcı – verici çifti kullanımını öneren sistem tasarımı incelenmiştir. Ayrıca kullanılacak sistem, çeşitli açılardan incelenerek en uygun IR dalga boyu belirlenmeye çalışılmıştır.

2022, 57 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Li-Fi (Light Fidelity), Görünür Işık İletişimi, Kızılötesi Işık İletişimi, Işık Spektrumu, Sinyal Girişimi, Gün Işığı

ABSTRACT

MS. Thesis

HIGH SPEED LI-FI SYSTEM DESIGN WITH USING INFRARED RECEIVER – TRANSMITTER

Hasan Eren EMİR

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Li-Fi (Light Fidelity) technology is a new data communication technology based on using light as a carrier signal, which does not require a special transmission medium other than the air environment and enables high-speed data communication. It is considered as a solution that will meet the need for high speeds and reliability, cost-effectively, by overcoming the limited and paid bandwidth restrictions in RF (Radio Frequency) communication. Studies in this field are based on VLC (Visible Light Communication), that is a communication technique using the visible light spectrum. However, light sources such as TV, projector, monitor, lighting systems and even daylight have interference effects on VLC. In this thesis, the system design that proposes the use of IR (Infrared) transceiver pairs instead of VLC in Li-Fi systems is studied in order to reduce the effects of environmental disturbance factors. In addition, the system to be used will be examined from various angles and the most suitable IR wavelength will be determined.

2022, 57 page

Keywords: Li-Fi (Light Fidelity), VLC (Visible Light Communication), IRLC (IR Light Communication), Light Spectrum, Signal Interference, Day Light

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı üstlenerek bilgi, tecrübe ve kıymetli vaktini ilgiyle paylaşan, danışman hocam Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK’a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım ve eğitim sürem boyunca imkanlarından faydalandığım Erzurum Teknik Üniversitesi’ne, hoşgörülü personeline ve kıymetli akademisyenlerine teşekkürlerimi sunarım.

Her anlamda gelişimimi destekleyen Quorion Data Systems GmbH Kurucusu Ali YÜKSEL’e, Quorion Software Center Genel Müdürü Coşkun DEVECİ’ye, ekipman tedariki için yardımını esirgemeyen meslektaşım Onur KÖMEÇ’e ve tüm Quorion ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Sevgi ve destekleri ile her zaman yanımda olan değerli eşim Ferda TAŞKESENLİOĞLU EMİR’e ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hasan Eren EMİR
Haziran 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Kapsamı	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	9
3.1. IRLC ve VLC Sistemleri.....	9
3.2. Mikrodenetleyici Kartı	10
3.3. LED (Işık Yayan Diyot).....	12
3.3.1. LED karakteristiği.....	14
3.4. Fotodetektörler (Işık Algılayıcıları)	16
3.4.1. Fotoelektrik dedektörler	17
3.4.2. P-N fotodetektörler.....	19
3.4.3. P-i-N fotodetektörler	20
3.5. İşlemsel Yükselteçler (Opamp).....	21
3.6. Modülasyon – Demodülasyon.....	22
3.6.1. Sayısal modülasyon.....	23
3.6.2. ASK modülasyon	23
3.6.3. OOK modülasyon	24
3.7. Dijital İletişim Teknikleri.....	25
3.7.1. Paralel iletişim tekniği	25
3.7.2. Seri iletişim tekniği	26
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	28
4.1. Kullanılabilir IR Dalga Boylarının Araştırılması.....	28

4.1.1. IR kaynağın insan sağlığı üzerine etkileri	28
4.1.2. Gün ışığının kızılötesi iletişime etkileri	30
4.1.3. Kullanılacak IR dalga boyunun belirlenmesi	32
4.2. Deney Düzenekleri	33
4.2.1. Alıcı deney devresi	33
4.2.2. Verici deney devresi	37
4.3. Deney Programları	38
4.3.1. Kontrolcü programı	38
4.3.2. BER tespit programı	39
4.4. Farklı Gün Işığı Koşulları Altında Deney Düzeneklerinin Test Edilmesi	41
4.4.1. 50lux aydınlatma altında test	43
4.4.2. 300lux aydınlatma altında test	46
4.4.3. 500lux aydınlatma altında test	48
4.4.4. Çıktıların karşılaştırılması	51
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	53
5.1. Sonuç	53
5.2. Öneriler	54
KAYNAKLAR	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
b	bit
B	Bayt
c	Işık Hızı
λ	Dalga boyu
E _g	Yasak Enerji Aralığı / Bant Aralığı
f	Frekans
GHz	Giga Hertz
h	Planck Sabiti
Hz	Hertz
KB	kilobayt
KHz	Kilo Hertz
lx	Lux
MHz	Mega Hertz
m	Metre
mV	milivolt
mA	miliamper
nm	Nanometre
Ω	Ohm
THz	Tera Hertz
v	Foton frekansı
V	Voltaj

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
ASK	Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (Amplitude shift keying)
BER	Bit-Hata Oranı (Bit-Error Rate)
bps	Saniyedeki bit sayısı (Bit per second)
DC	Doğru Akım
FIR	Uzak Kızılötesi (Far Infra-red)
IR	Kızılötesi (Infra-red)
IRLC	Kızılötesi Işık İletişimi (Infrared Light Communication)
LAZER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Işık Yayan Diyot (Light Emitted Diode)
Li-Fi	Işık Bağlantısı (Light-Fidelity)
LSB	En Küçük Değerlikli Bit (Least Significant Bit)
MSB	En Büyük Değerlikli Bit (Most Significant Bit)
NIR	Yakın Kızılötesi (Near Infra-red)
OOK	Açma-Kapama Anahtarlama (On-Off keying)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
SNR	Sinyal-Gürültü Oranı (Signal-Noise Ratio)
VLC	Görünür Işık İletişimi (Visible Light Communication)
Wi-Fi	Kablosuz Bağlantı (Wireless-Fidelity)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrum	9
Şekil 3.2. Arduino Nano mikrodenetleyici kartı üstten görünüşü.....	10
Şekil 3.3. Arduino Nano mikrodenetleyici kartı alttan görünüşü	11
Şekil 3.4. Arduino Nano mikrodenetleyici pin diyagramı	12
Şekil 3.5. LED’lerin üretildikleri malzemelere göre yaptıkları ışıma dalgaboyları.....	13
Şekil 3.6. LED’lerin yapısı ve ışımlarının oluşum mekaniği	13
Şekil 3.7. Standart bir LED’in akım – gerilim karakteristiği	15
Şekil 3.8. Standart bir LED’in ışık şiddeti – akım karakteristiği	15
Şekil 3.9. Standart bir LED’in açisal ışıma diyagramı	16
Şekil 3.10. Fotoelektrik dedektörlerin çalışma bölgeleri	17
Şekil 3.11. Fotoelektrik dedektör üretiminde kullanılan malzemeler ve algıladıkları dalga boyları aralığı	18
Şekil 3.12. Fotoelektrik dedektör kutuplanması ve devre bağlantısı	19
Şekil 3.13. Fotoelektrik dedektör üzerine düşen foton akısı ile orantılı iletim seviyesi .	19
Şekil 3.14. Fotoelektrik dedektör bölgeleri.....	20
Şekil 3.15. PiN fotodedektör yapısı ve enerji seviyeleri.....	21
Şekil 3.16. İşlemsel yükselteçlerin (opamp) farklı çalışma modları için konfigürasyonları	22
Şekil 3.17. Genlik modülasyonu – demodülasyonu için örnek grafik	23
Şekil 3.18. Genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK) modülasyon diyagramı	24
Şekil 3.19. Açma-kapama anahtarlama (OOK) modülasyon diyagramı.....	24
Şekil 3.20. Genlik kaydırmalı anahtarlama – açma-kapama anahtarlama (ASK–OOK) modülasyonları sinyal görüntüsü	25
Şekil 3.21. Paralel iletişim diyagramı	25
Şekil 3.22. Seri iletişim diyagramı	26
Şekil 3.23. Veri paketi yapısı	27
Şekil 3.24. Eşlik biti eklenmiş veri paketi yapısı	27
Şekil 4.1. Fotoelektrik dedektör üzerine düşen foton akısı ile orantılı iletim seviyesi ...	28
Şekil 4.2. Farklı dalga boylarında ışımalara maruz kalan insan cildinin bazı maddeleri emilim seviyesi	30
Şekil 4.3. Çeşitli dalgaboylu ışımların atmosfer ve yeryüzüne ulaşma seviyeleri	31

Şekil 4.4. Alıcı devre proteus devre şeması	33
Şekil 4.5. Fotodiyot çıkış sinyali ve yükseltilmiş çıkış sinyali osiloskop görüntüsü	36
Şekil 4.6. Verici devre proteus devre şeması	37
Şekil 4.7. Kontrolcü programı.....	38
Şekil 4.8. BER tespit programı	40
Şekil 4.9. IRLC alıcı – verici prototipi.....	41
Şekil 4.10. VLC verici prototipi.....	42
Şekil 4.11. VLC alıcı prototipi.....	42
Şekil 4.12. VLC iletişim mesafe testi.....	42
Şekil 4.13. IRLC iletişim mesafe testi	43
Şekil 4.14. VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 38.400bps, 50lx	44
Şekil 4.15. VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 57.600bps, 50lx	44
Şekil 4.16. BER hesabı sonucu, VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 57.600bps, 50lx	45
Şekil 4.17. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 38.400bps, 50lx	45
Şekil 4.18. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 57.600bps, 50lx	46
Şekil 4.19. VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 19.200bps, 300lx	47
Şekil 4.20. VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 10cm, iletişim hızı 28.800bps, 300lx	47
Şekil 4.21. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 38.400bps, 300lx	48
Şekil 4.22. VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 14.400bps, 500lx	49
Şekil 4.23. VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 5cm, iletişim hızı 28.800bps, 500lx	49
Şekil 4.24. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 28.800bps, 500lx	50
Şekil 4.25. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 5cm, iletişim hızı 38.400bps, 500lx	50
Şekil 5.1. TSAL6100 IR LED’ in açısall ışıma diyagramı	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Arduino Nano teknik bilgileri.....	11
Çizelge 3.2. Fotoelektrik dedektörlerin üretildikleri malzemelere göre çeşitli özellikleri	18
Çizelge 3.3. Genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK) modülasyonun avantajları, dezavantajları ve kullanım alanları	24
Çizelge 4.1. 50lx aydınlatma altında IRLC – VLC iletişim hızları, mesafe ve BER karşılaştırması	51
Çizelge 4.2. 300lx aydınlatma altında IRLC – VLC iletişim hızları, mesafe ve BER karşılaştırması	51
Çizelge 4.3. 500lx aydınlatma altında IRLC – VLC iletişim hızları, mesafe ve BER karşılaştırması	52

1. GİRİŞ

İletişim, insanlık tarihi boyunca gelişimini sürdüren önemli bir konu olmuştur. İşaret dili, sözlü ve yazılı iletişimin ardından dijital iletişim devri ile bu gelişim devam etmektedir. Ancak son yıllarda, büyük veri, dijital hizmetler, internet kullanımındaki gelişim ve son kullanıcı cihaz (tablet, telefon, bilgisayar vb.) sayılarındaki hızlı artış, iletişim teknolojisinde kapasite ihtiyacı olarak karşımıza çıkmaktadır. (Anonymous 2022). Öyle ki her ay 11 exabyte tan fazla veri trafiğinin kablosuz iletişim vasıtasıyla mobil ağlar üzerinden aktarıldığı tahmin edilmektedir (Bao et al. 2015).

Kapasite ihtiyacını gidermek için geniş spektrum bandı kullanımı en önemli gerekliliklerden biridir (Karthika and Balakrishnan 2015). Ancak kablosuz iletişim, 100km-1mm dalga boyu ile sınırlı RF spektrumu üzerinden gerçekleştirilmektedir. Üstelik RF sinyalleri üzerinde yaşanan kanal girişimi, büyük bir kapasite sınırlayıcı faktör haline gelmiştir (Tsonev et al. 2014). Kablosuz sistemlerin büyük çapta konuşlandırılması ve yüksek radyo frekanslarının kullanımı, veri aktarım problemlerine, bir seviyeye kadar cevap sunsa da büyük maliyet ve kompleks cihazlara mal olmaktadır. Buna ek olarak RF spektrumunun kullanımı hem ücrete tabiidir (Riurean et al. 2017) hem de bilimsel olarak kanıtlanmamış olsa bile, radyo frekansı sinyallerinin insan sağlığına tehdit oluşturduğu görüşü yaygındır (Yaqub et al. 2016).

RF iletişimine alternatif olarak, karşılaşılan kısıtlamaların ve problemlerin üstesinden gelebilecek ve bu alanda yeni ufuklar açabilecek VLC (Visible Light Communication) teknolojisi öne çıkmıştır. Bu teknolojinin temeli, veri iletişimde taşıyıcı sinyal olarak 380-750nm dalga boylu, görünür ışık spektrumunu kullanmaya dayanır. A. Graham Bell'in 1880 yılında yaptığı fotofon icadı VLC'nin ilk örneği olarak kabul edilmektedir (Bell 1880). Ancak VLC asıl ününü, Prof. Harald Haas'ın 2011 yılında Li-Fi'ı tanıtmaları ile kazanmıştır.

VLC, tek yönlü iletişimi ifade ederken, Prof. Haas'ın Li-Fi adını verdiği sistemle önerisi; VLC deki gibi görünür ışık spektrumunu kullanarak çift yönlü iletişim sağlanmasıdır. Görünür ışığın tercih edilmesinin en büyük nedeni, hali hazırda

aydınlatma için kullanımı yaygınlaşan LED’leri veri iletişimi için de kullanılabilir hale getirerek, ek donanım ihtiyacı ve maliyeti minimum düzeyde tutmaktır (Haas et al. 2015).

Ancak VLC, görünür ışık kaynaklarından, hatta gün ışığından bile yüksek seviyede etkilenme sorunundan ve görünür ışığın kullanımından kaynaklanan Li-Fi kullanıcılarını rahatsız etme sorunlarına sahiptir.

Dolayısıyla, iletişim sistemlerindeki gelişimi devam ettirmek ve doyuma yaklaşan RF iletişimine alternatif sunmak için Li-Fi VLC teknolojisinde karşılaşılan bu sorunları giderecek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışma, belirtilen problemleri gidermeye yönelik Li-Fi sistemlerinde VLC yerine IRLC (Infrared Light Communication) tekniğini kullanmayı önermektedir.

IR ışıma insanlar tarafından görülemediğinden, “görünür ışığın kullanımından kaynaklanan Li-Fi kullanıcılarını rahatsız etme sorunları” doğrudan çözülmektedir.

Gün ışığından etkilenme sorununu için ise birden fazla konu detayları ile ele alınarak tez çalışması içerisinde çözülmesi hedeflenmektedir.

1.2. Tezin Kapsamı

Yapılan tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır;

- 1) Giriş bölümünde Li-Fi teknolojisinin doğuşundan, kablosuz iletişim sistemlerinin ve Li-Fi teknolojisinde kullanılan görünür ışık iletişiminin sorunlarından bahsedilmektedir. Bu bölüm, tezin belirtilen sorunlara karşı önerdiği çözümü ve bu çözümün gerektirdiği altyapıyı özetlemektedir.

- 2) Kaynak özetleri bölümünde, literatür taraması ve araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Li-Fi, VLC, IRLC teknolojilerini ve bu teknolojilerin çeşitli yönlerini inceleyen çalışmaların özeti sunulmuştur.
- 3) Materyal ve yöntem bölümünde, çalışma detayları, materyalleri ve yöntemleri açıklanmaya çalışılmış, izlenen yol ve yöntem ifade edilmiştir.
- 4) Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde, amaçlanan çalışma gerçekleştirilmeye çalışılmış, oluşturulan deney düzeneği test edilmiştir.
- 5) Sonuç ve öneriler bölümünde, yapılan çalışmanın çıktıları ve bu çıktıların değerlendirmesi sunulmuştur. Çalışmanın geliştirilmesine yönelik önerilere yer verilmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tsonev et al. (2014) tarafından yayınlanan bir çalışmada, baş gösteren radyo frekansı (RF) spektrum krizine, optik kablosuz iletişimin (OWC) artık alternatif ve olgun bir çözüm olduğunu göstermeyi amaçlamaktadır. Mobil veri talepleri artmaya devam ederken, ağ spektral verimliliği sahada yeni tanıtılan standartlara ve büyük teknolojik gelişmelere rağmen doygun hale geldiğinden, yaklaşmakta olan bir “RF spektrum krizi” hakkında birçok bağımsız uyarı olmuştur. Aşırı kalabalık RF etki alanından ağ trafiğinin büyük bir bölümünü potansiyel olarak boşaltabilecek elektromanyetik spektrumun alternatif bölümlerini keşfetmeye yönelik önemli araştırma çalışmaları yapılmıştır. 28GHz bölgesinde milimetre dalga (mmWave) iletişiminin yanı sıra kızılötesi ve görünür ışığın kullanımından yakın zamanda kayda değer sonuçlar bildirilmiştir. Nitekim VLC, yaklaşmakta olan bu spektrum krizini azaltmak için potansiyel bir çözüm olarak tanımlanmıştır.

Haas et al. (2014) tarafından yayınlanan çalışmada şunlardan bahsedilmiştir; aydınlatma, hemen hemen her yaşam ortamına entegre edilmiş bir meta olduğundan ve halihazırda mevcut olan gelişmiş altyapılardan dolayı optik kablosuz iletişim için özellikle cezbedicidir. Görünür ışık spektrumunun yüksek hızlı veri iletişimi için kullanılması, aynı zamanda bir sonraki enerji verimli aydınlatma dalgasının kalbinde yer alan ışık yayan diyotun (LED) ortaya çıkmasıyla sağlanır. Bu anlamda, aydınlatma ve iletişim işlevlerini birleştirme konsepti, muazzam bir maliyet tasarrufu ve karbon ayak izini azaltma potansiyeli sunmaktadır. Öncelikle, mevcut aydınlatma altyapısı yeniden kullanılabilirdiğinden VLC erişim noktalarının (AP'ler) kurulumu nispeten kolay olmaktadır. Aydınlatma gerekli olmasa ve ışıklar görsel olarak kapalı olsa bile veri iletişimine izin verecek enerji verimli yoğunluk modülasyonu (IM) teknikleri mevcuttur. Üstelik, görünür ışık spektrumu, mmWave spektrumu da dahil olmak üzere 30 GHz'e kadar olan tüm RF spektrumundan 10.000 kat daha fazla, 100'lerce THz lisanssız bant genişliği sağlamaktadır. Optik radyasyon, genel olarak, diğer radyo dalgalarını veya hassas elektronik ekipmanların çalışmasını engellememektedir. Bu nedenle, elektromanyetik radyasyona duyarlı alanlarda, optik kablosuz kapsama alanı sağlamak idealdir. Örneğin: uçaklar, hastaneler, petrokimya ve nükleer santraller, vb. Ayrıca, ışığın duvar gibi engellerden geçememesi, doğal bir ağ güvenliği sunmaktadır.

Videv et al. (2014) tarafından yayınlanan bir çalışmada şunlardan bahsedilmiştir; yakın zamanda, deneysel laboratuvar koşulları altında fosfor kaplı beyaz LED'ler kullanılarak 1Gb/sn'yi aşan veri hızları rapor edilmiş, kırmızı-yeşil-mavi (RGB) LED'le 3.4Gb/sn'lik bir iletişim sağlanmıştır. Başka fosfor kaplı beyaz LED'lere sahip benzer Gb/sn kablosuz sistemi, 4x4 çoklu giriş-çoklu çıkış (MIMO) konfigürasyonu kullanılarak gösterilmiştir. Bu çalışma ile, şimdiye kadar yürütülen araştırmaların bir kısmı özetlenmekte ve özellikle kablosuz ağ oluşturmaya odaklanarak iletişim sistemlerinin farklı yönleri incelenmektedir. Bununla birlikte uplink bağlantı kanalı üzerinde uygulanabilecek en pratik çözüm olarak IR veya RF spektrumunun dikkate alınması önerilmiştir.

Bao et al. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, RF iletişimin kısıtları üzerinde durulmuş ve buna çözüm olarak 380-780nm dalga boyu aralığında kablosuz optik kullanan görünür ışık iletişimi VLC ele alınmıştır; Görünür ışık kullanan ilk kablosuz iletişim prototipi, Alexander Graham Bell'in bir ışık huzmesi üzerinde hem seslerin hem de insan konuşmalarının iletilmesine izin veren bir fotoğraflı telefon geliştirdiği 1880 yılına kadar uzanmaktadır. Ancak optik kablosuz iletişim araştırmaları bu yıllarda fazla ilgi görmemiştir. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle bu durum değişmiş ve VLC de, sinyal vericileri olarak beyaz LED'ler ve sinyal alıcıları olarak p-intrinsic-n (PIN) fotodiyotları (PD) veya çıkış foto diyotları (APD) kullanımı mümkün olmuştur. İlgili yayında, VLC sistemleri üzerinde SNR, MIMO, OFDMA, OOK gibi modülasyon ve iletişim terimleri incelenmeye çalışılmıştır.

- 1- Downlink ve uplink işlemlerinin her ikisi içinde aynı tip (görünür) ışık kaynağı kullanımının girişime sebep olabileceği,
- 2- Hareket halindeki alıcı verici çiftinde verimin azalacağı,
- 3- Uplink için görünür ışık (özellikle verimi artırmak için parlaklığı artırılan) tercihinin kullanıcıları rahatsız edebileceği

sorunları dikkate alınarak hibrit Li-Fi ağı önerilmiştir. Bu öneri ile downlink ve uplink bağlantılarının farklı tipte alıcı-verici çifti ile (örneğin downlinkin VLC ve uplinkin RF iletişimi üzerinden) gerçekleştirilmesi önerilmiştir.

Lee et al. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, fosfor kaplı beyaz LED'lerin iç mekanda gösterdikleri emsiyon analiz edilmiştir. Çalışmada Barry modeli tekniği uygulanmış ve IRLC'nin VLC den daha küçük bant genişliğine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Netsianda et al. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, görünür ışık iletişimi üzerinde OOK ve FSK modülasyon teknikleri analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucuna göre, FSK modülasyonun, OOK modülasyonuna göre daha maliyetli ve bit hata oranı (BER) performansının daha düşük olduğu belirtilmiştir.

2018'de yayınlanan bir çalışmada, fabrika robotlarından otomobil denetim verilerini iletmek için 3 yıldır Li-Fi sistemleri ile test edilen BMW fabrikasından söz edilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen Li-Fi VLC sistemine, standart LED'ler yerine IR LED'ler eklenilmiş ve çeşitli adaptasyonlar sağlanarak oldukça iyi performanslı iletişim sistemine sahip olunduğu bilgisi verilmiştir (Anonymous 2018).

Sofia et al. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, VLC Li-Fi düzeneği test edilmiştir. Alıcı-verici sistem kontrolcüsü olarak Arduino mikrodenetleyiciler, verici bölümde kaynak olarak 12V LED, alıcı bölümde fotodedektör ve sistemin genel verimini ve kararlılığını artırmak için çeşitli filtreleme – karşılaştırma elemanları kullanılmıştır. Veri, verici sistemde öncelikle ASCII formatına, ardından bitlere dönüştürülerek LED'e iletilmektedir. Alıcı sistem, vericidekinin tam tersi mantığıyla çalışarak, fotodedektör vasıtasıyla LED den algıladığı sinyalleri önce bitlere, ardından ASCII formatına ve son olarak karakterlere dönüştürmektedir. 2 metre aralığa kadar verimli çalışabilen sistemde, iletilen verilerin istenmeyen alıcıların eline geçmesini önlemek için, veriler gönderilmeden önce AES kriptolama ve alındıktan sonra AES kripto çözme algoritmaları ile desteklenmektedir.

Chourasia et al. (2021) tarafından Covid-19 hastaları üzerinde yapılan bir çalışmada; kan basıncı, sıcaklık, kalp atış gibi vücut takip sensörleri kullanılarak RF iletişiminden daha güvenilir ve radyasyon içermeyen bir iletişim sistemi oluşturulması amaçlanmıştır. Bir mikrodenetleyici vasıtasıyla sensörlerden elde edilen veriler, LED üzerinden alıcıya modüle edilmiş ışık vasıtasıyla iletilmekte ve alıcıda demodüle edilerek

işlenmektedir. Bu çalışma ile, günümüzde laboratuvar ortamında kullanılabilen Li-Fi sisteminin gerçek dünya senaryosu gerçekleştirilmiştir.

Frank (1991) tarafından A.B.D. Ordusu Hijyen Ajansı (U. S. Army Environmental Hygiene Agency) için yaptığı çalışması, göz sağlığı için güvenli olan ışıma aralığını kapsamaktadır. Bu çalışmada, 1400nm'den (orta ila uzak kızılötesi) daha uzun çalışma dalga boylarına sahip lazerlere, göz sağlığı için güvenli olarak atıfta bulunulmuştur. Belirtilen spektrumdaki dalga boyları, gözün ön kısımlarında (kornea) emilmekte ve bu nedenle asla gözün daha derin segmentlerine (retina) ulaşamamaktadır. Bu spektrum, gözün ön kısımlarının yüksek geçirgenlik ve kırılma gücüne sahip olduğu 400–1400nm (görünür ve yakın kızılötesi) optik spektrumun göze zararlı kısmının aksinedir. Işınım seviyeleri, görünür ve yakın kızılötesi (NIR) dalga boyları için tipik olarak retinada, korneadakinden 5 kat daha büyüktür. Ancak 1400nm'den daha uzun dalga boyları retina ile etkileşime girmese bile, cilt veya kornea ile etkileşime girebilir ve termal yaralanmaya neden olabilir.

Söderberg et al. (2016) tarafından yapılan çalışma, morötesi (UV) veya kızılötesi ışımların göz sağlığı üzerine etkilerini kapsamaktadır. Gün ışığında, insan gözü, uzun dalga boylu ultraviyole radyasyona (UVR), görünür radyasyona ve kısa dalga boylu kızılötesi radyasyona (IRR) maruz kalmaktadır. Korneadaki kısmi geçirgenlikten sonra UVR ve IRR dalga bandının bir kısmı göz merceğinde emilmektedir. Böylece güneş ışığına veya yapay kaynaklara maruziyet, fotokimyasal veya termal olarak biyolojik hasara neden olabilmektedir. Epidemiyolojik çalışmalar, kısa dalga boylu UVR ile kortikal katarakt arasında doza bağlı bir ilişki olduğunu ve günlük yüksek yoğunluklu kısa dalga boylu IRR maruziyetinin, yaşa bağlı katarakt olasılığının daha yüksek olduğunu düşündürmektedir.

Talebizadeh et al. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada şunlardan bahsedilmiştir; güneşin yüksek sıcaklığı nedeniyle, geniş bir dalga bandında elektromanyetik radyasyon yayılır. Güneşte, UVR dalga boylarından, IRR dalga boylarına ve ardından daha uzun bir seviyeye doğru ilerleyen görünür radyasyonun (VIR) emisyonu vardır. Güneşten yayılan bu radyasyon, dünyanın yüzeyine ulaşmadan önce atmosferde spektral olarak zayıflar. Atmosfer, bu etkisi ile 290nm'nin altındaki ve

2. KAYNAK ÖZETLERİ

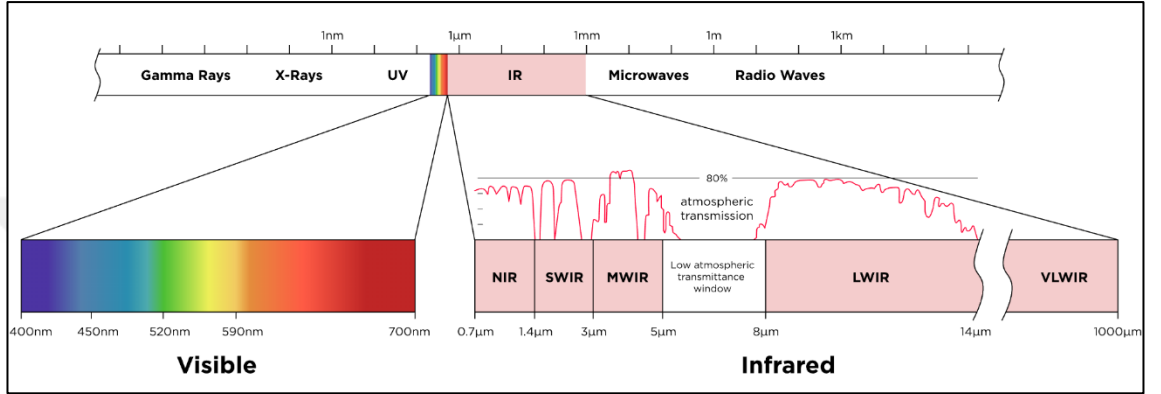
2500nm'nin üzerindeki ve bu aralıkta kalan bazı spesifik dalga boylu ışımaların yeryüzüne ulaşmasını engeller.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde IRLC ve VLC Li-Fi sistemi tasarımında kullanılan materyaller ve yöntemler açıklanmaktadır.

3.1. IRLC ve VLC Sistemleri



Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrum

VLC, bilgi sinyalini 400nm–700nm aralığında ışıma yapan, görünür ışıkla modüle ederek veri iletişimine olanak sağlayan kablolu optik veri iletim teknolojidir. Son yıllarda Li-Fi teknolojinin popülerleşmesi ile ve var olan aydınlatma kaynaklarının veri iletişimi içinde kullanılabilir hale getirilerek kurulum maliyetini düşürme potansiyelinden dolayı VLC teknolojisi literatür çalışmalarının odak konusu haline gelmiştir (Haas et al. 2018).

Sağladığı avantajlara rağmen VLC beraberinde şu sorunları da getirmektedir;

- Çeşitli ışık kaynaklarının (TV, monitör, projeksiyon, telefon gibi) ve hatta gün ışığının bozucu girişim etkisinden yüksek seviyede etkilenme,
- Aydınlatma kaynağının gece – gündüz sürekli aktif bırakılması nedeniyle enerji tüketiminde artış ve ortamdaki kişileri rahatsız etmesi,
- Kullanıcı cihazında veri aktarımı için kullanılacak görünür ışığın kullanıcıyı rahatsız etmesi

Belirtilen sorunları gidermeye yönelik bu tez çalışması kapsamında görünür ışık yerine IR ışığın kullanımı önerilmektedir. IR spektrumu, dalga boyu 750nm ile 1mm arasında değişen ve insanların görebildiği dalga boyu aralığının dışında kalan elektromanyetik radyasyondur.

IRLC sistemleri VLC'nin aksine, bilgi sinyalini, görünür ışık yerine IR ışığı modüle ederek iletişime olanak sağlamaktadır. Görünür ışık yerine IR ışığın tercih edilmesi sebebiyle, VLC' de karşılaşılan;

- Aydınlatma kaynağının gece–gündüz sürekli aktif bırakılması nedeniyle enerji tüketiminde artış ve ortamdaki kişileri rahatsız etmesi,
- Kullanıcı cihazında veri aktarımı için kullanılacak görünür ışığın kullanıcıyı rahatsız etmesi,

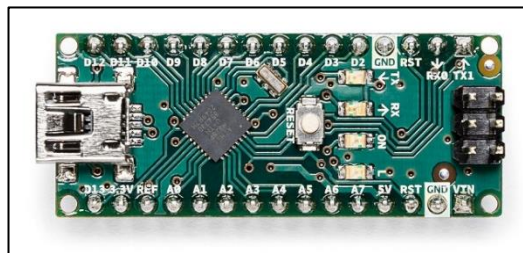
sorunları doğrudan çözüme kavuşmuş olmaktadır.

- Çeşitli ışık kaynaklarının (TV, monitör, projeksiyon, telefon gibi) ve hatta gün ışığının bozucu girişim etkisinden yüksek seviyede etkilenme,

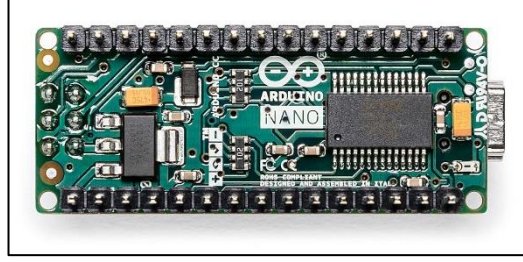
sorununun çözümü için araştırma ve çalışmalar detaylı şekilde, “4.1. Kullanılabilir IR Dalga Boylarının Araştırılması” başlığı altında incelenmiştir.

3.2. Mikrodenetleyici Kartı

Sistem tasarımında ihtiyaç duyulan kontrolcü ihtiyacını gidermek için Arduino Nano mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Arduino Nano mikrodenetleyici kartı üstten görünüşü

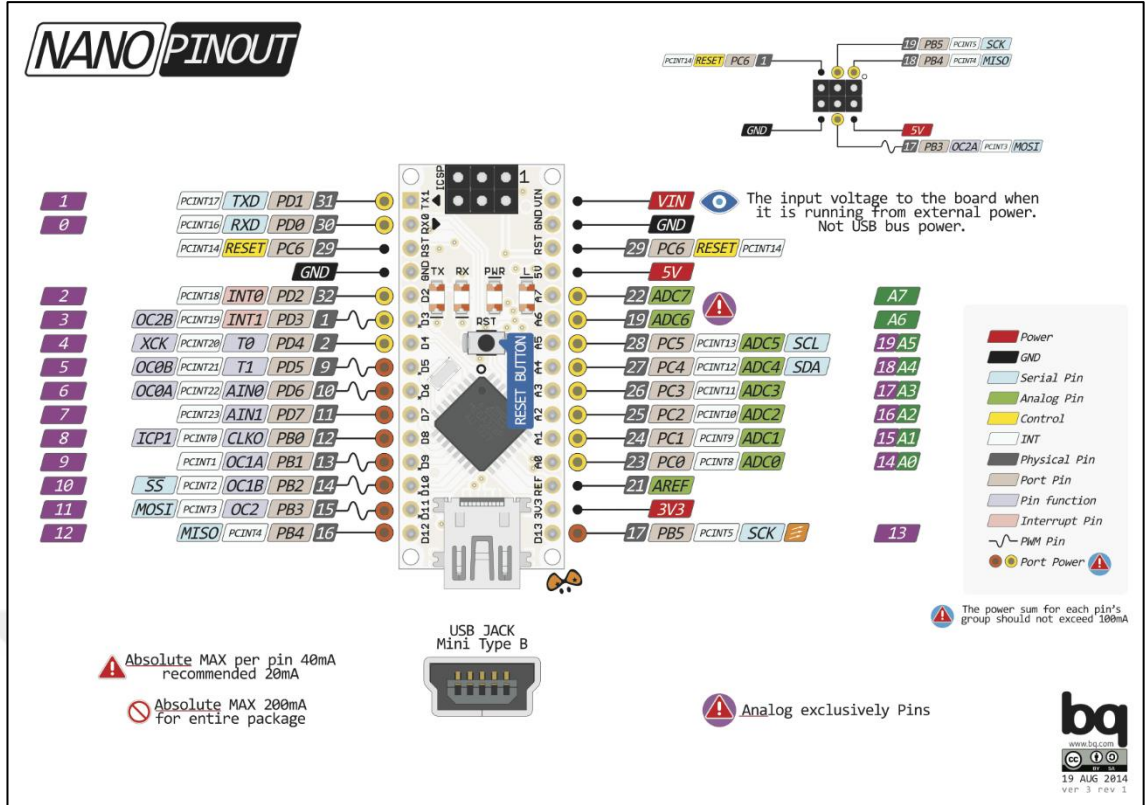


Şekil 3.3. Arduino Nano mikrodeneleyici kartı alttan görünüşü

Arduino Nano, küçük boyutlu ATmega328P tabanlı 8-bitlik bir mikrodeneleyici kartıdır. Seri iletişim arayüzü, kristal osilatör, voltaj regülatörü dahili olarak kart üzerinde bulunmaktadır. Ayrıca 22 dijital giriş-çıkış pini (6'sı PWM destekli), 8 analog giriş pini, sıfırlama (reset) butonu, seri iletişim gösterge ledleri, güç gösterge ledi, durum gösterge ledi, ICSP başlığı, Mini-B USB konektörü ve devre tahtasına (bread-board) kolay bağlantı sağlayan pin başlıklarıyla birlikte gelir. Detaylı teknik bilgiye Çizelge 3.1. den ulaşılabilir.

Çizelge 3.1. Arduino Nano teknik bilgileri

MİKROKONTROLÇÜ	ATmega328
MİMARİSİ	AVR
ÇALIŞMA VOLTAJİ	5 V
FLASH BELLEK KAPSİTESİ	32 KB (2 KB'ı bootloader tarafından kullanılır)
SRAM KAPSİTESİ	2 KB
SAAT HIZI	16 MHz
ANALOG GİRİŞ PİN SAYISI	8
EEPROM KAPSİTESİ	1 KB
I/O PİNLERİ BAŞINA DC AKIM	40 mA
GİRİŞ VOLTAJ ARALIĞI	7-12V
DİJİTAL I/O PİN SAYISI	22 (6'sı PWM destekli)
PWM ÇIKIŞLARI SAYISI	6
GÜÇ TÜKETİMİ	19 mA
PCB KART BOYUTU	18 x 45 mm
AĞIRLIK	7 g



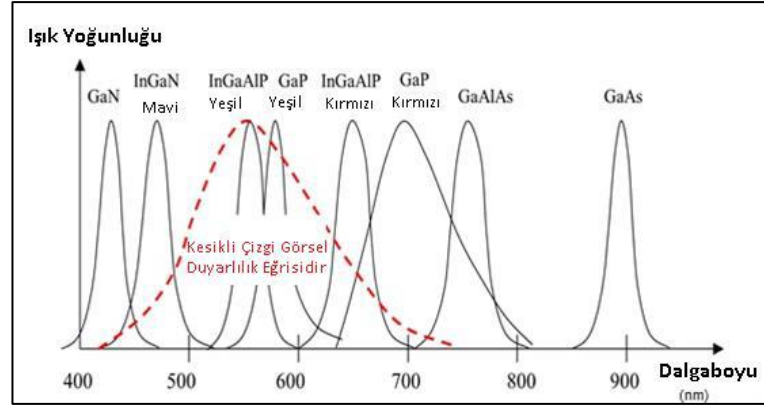
Şekil 3.4. Arduino Nano mikrodeneleyici pin diyagramı

Şekil 3.4. de Arduino Nano pin diyagramı görülmektedir. 0 - 19 şeklinde gösterilen pinler, dijital giriş-çıkış pinleri olarak kullanılabilir. A0 - A7 şeklinde gösterilen pinler analog giriş pinleri olarak kullanılabilir. RXD ve TXD olarak gösterilen pinler, donanım tanımlı seri iletişim pinleridir.

3.3. LED (Işık Yayan Diyot)

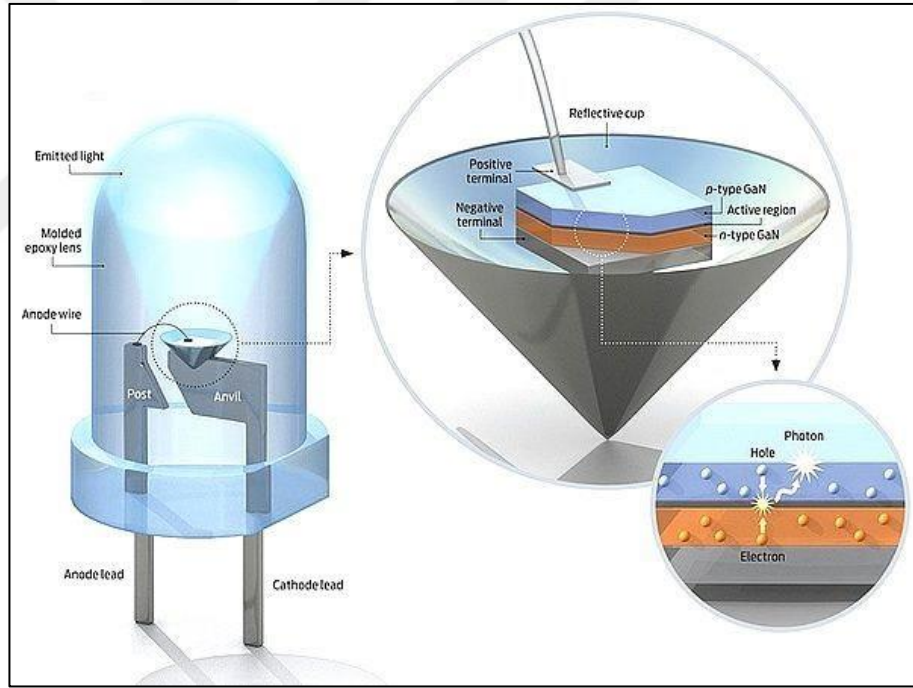
Elektrik enerjisini ışığa dönüştüren LED (Light Emitting Diode), ışık yayan yarı iletken bir diyot çeşididir. Şekil 3.5. te görüleceği üzere, LED'ler üretildikleri bileşenlerine göre, farklı renklerde, yani dalga boylarında ışık yayma yeteneğine sahiptirler.

Standart P-N eklemli diyotların yapıları, sıcaklığa daha duyarlı olduklarından silisyum veya germanyumdan oluşmaktadır. Bu tipteki diyotlar ışık yerine ısı yadıkları için LED'lerde fosfor, arsenik, galyum, indiyum gibi bileşenler kullanılır (Anonymous 2015).



Şekil 3.5. LED’lerin üretildikleri malzemelere göre yaptıkları ışımaya dalga boyları

P-N eklemli diyotların üzerinden akım geçebilmesi için ileri yönde kutuplanmaları gerekmektedir. Dolayısıyla LED’lerden ışık elde edebilmek için ileri yönde kutuplandırılmaları gerekmektedir.



Şekil 3.6. LED’lerin yapısı ve ışımalarının oluşum mekaniği

LED’ler ileri yönde kutuplandıklarında, Şekil 3.6. da görüleceği üzere, değerlik bandındaki boşluklar (hole) ile iletim bandındaki serbest elektronlar yeniden birleşirler ve bu esnada ışık formunda bir enerji ortaya çıkar. Bu olaydaki gibi, elektrik akımının akışına ya da elektrik alanına tepki olarak ışımanın oluşması, elektrolüminesans olarak adlandırılmaktadır.

Bu olay sonucunda ortaya çıkan fotonun enerjisi 3.1 numaralı eşitlikle ifade edilmektedir:

$$E=h \times \nu \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte ν fotonun frekansı, h ise Planck sabitine ($h = 6,3 \times 10^{-34} \text{ joule.sn}$) karşılık gelmektedir. Aynı zamanda, eşitlik 3.2 de görüleceği üzere, bu enerji yaklaşık olarak LED'in yapımında kullanılan malzemenin bant genişliğine eşittir (Eg yasak enerji aralığı / bant genişliği).

$$E= E_g \quad (3.2)$$

Kullanılan malzemeye göre bant genişliği azaldıkça saçılan fotonun da frekansı azalmaktadır. 3.3 temel ışık hızı eşitliğinden hareketle bir fotonun frekansı ile dalga boyu ters orantılı olmaktadır ($c (\text{ışık hızı}) = 3 \times 10^8 \text{ m/sn}$, λ dalga boyu, f frekansı ifade etmektedir).

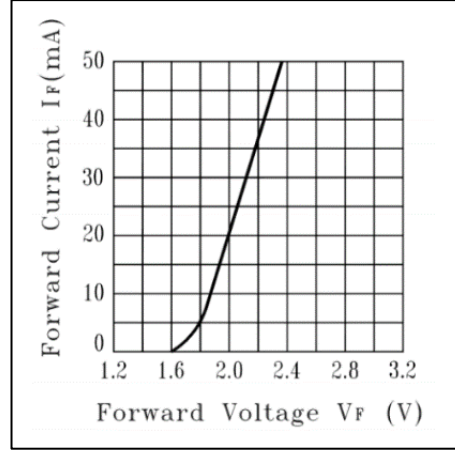
$$c=\lambda \times f \quad (3.3)$$

Tüm bu denklkler, Şekil 3.5. te görülen, farklı malzemelerden üretilen LED'lerin farklı dalga boylarında, yani farklı renklerde ışımaya yapmasını kanıtlar niteliktedir.

3.3.1. LED karakteristiği

LED'ler için kullanılan önemli karakteristik bilgileri şu şekildedir;

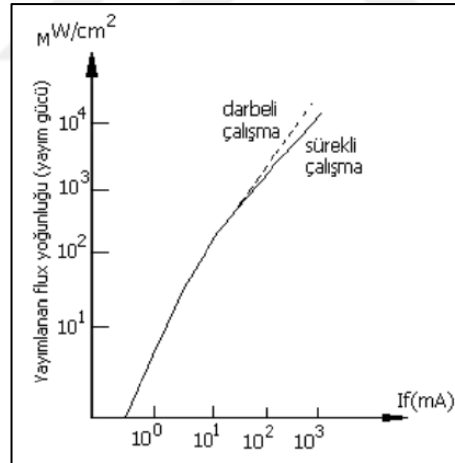
- Akım – gerilim karakteristiği;



Şekil 3.7. Standart bir LED'in akım – gerilim karakteristiği

Doğru polarmada tipik bir LED'in I-V grafiği incelendiğinde; belirli bir eşik gerilimine kadar LED'in iletme geçmediği ve belirli bir üst gerilim eşiğinden sonra akımın, gerilime bağlı doğrusal olarak artmadığı (doyuma ulaştığı) gözlenmektedir.

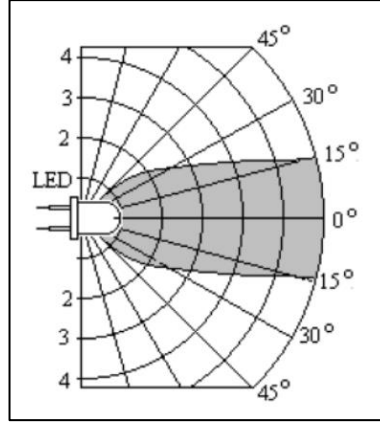
- Işık şiddeti – akım karakteristiği;



Şekil 3.8. Standart bir LED'in ışık şiddeti – akım karakteristiği

Doğru polarmada tipik bir LED'in ışık şiddeti – akım grafiği incelendiğinde; Akım-Gerilim karakteristiği ile örtüşen sonuçlar elde edilmektedir. LED'in iletme geçtiği belirli bir eşik akımına kadar ışımanın olmadığı ve doyum akımına yaklaştıkça ışıma şiddetinin de doyuma yaklaştığı görülmektedir.

- Açısal ışıma diyagramı;



Şekil 3.9. Standart bir LED'in açısal ışıma diyagramı

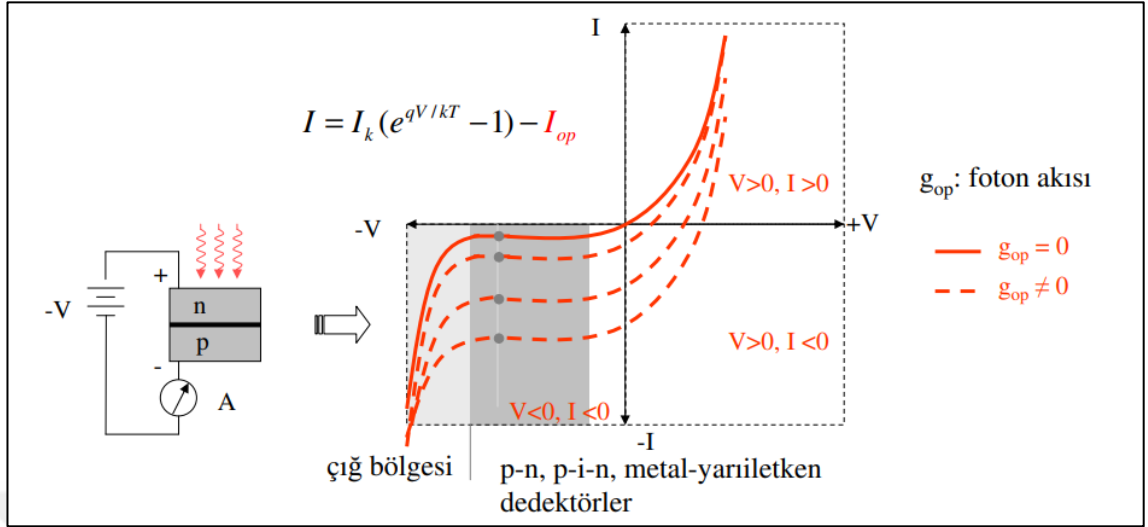
LED'lerin açısal ışıma diyagramı incelendiğinde; yaptıkları emisyon açısının, LED'in yarıiletken yapısına ve lensinin türüne göre değiştiği gözlenmektedir.

3.4. Fotodedektörler (Işık Algılayıcıları)

Fotodedektörler, ışığı algılamaya ve ölçülebilir büyüklüklere dönüştürmeye yarayan devre elemanlarıdır. Temelde iki farklı prensibe göre çalışırlar;

- 1) Isıl (termal) fotodedektörler: Foton enerjisini ısıya çevirerek ölçen dedektörlerdir. Bu tür dedektörler, verimsiz, yavaş ve elektronik teknoloji ile tümleşemediklerinden optoelektronikte kullanılmazlar. Isıl dedektörlere örnek olarak şunlar verilebilir;
 - Termoelektrik dedektörler
 - Bolometre dedektörler
 - Pyroelektrik dedektörler
- 2) Fotoelektrik dedektörler: Fotoelektrik etkiye dayanarak geliştirilen dedektörlerdir. İç fotoelektrik etkiye (metal yerine yarıiletken) ve yarıiletken teknolojisine dayanan bu dedektörler, verimli, hızlı ve elektronikte kolayca tümleştirilebildikleri için fotonikte, optoelektronikte çok yaygın olarak kullanılırlar (Anonim 2022).

3.4.1. Fotoelektrik dedektörler



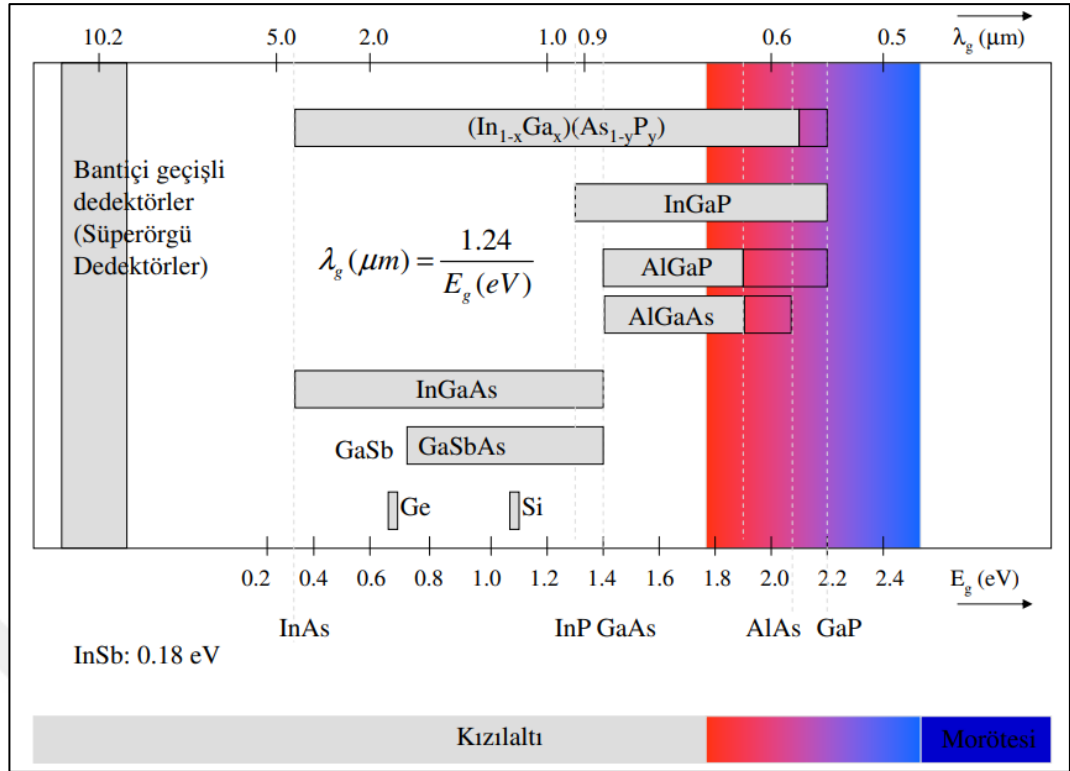
Şekil 3.10. Fotoelektrik dedektörlerin çalışma bölgeleri

Uygun şekilde tasarlanan bir p-n eklemine üzerinden geçen akım, ters gerilim altında (III. Bölge – ($V < 0, I < 0$)) eklem üzerine düşen ışık şiddeti ile orantılı olarak modüle edilebilir.

III. bölgede iki farklı I-V davranışı gözlenir:

- Akımın gerilimden bağımsız, optik şiddet ile orantılı olduğu bölge
- Akımın gerilimle üstel olarak arttığı bölge (Zener ve çığ bölgesi)

Yarıiletken fotodedektör üretiminde kullanılan malzemeler ve çeşitli özellikleri Şekil 3.11. ve Çizelge 3.2. de gösterilmiştir.



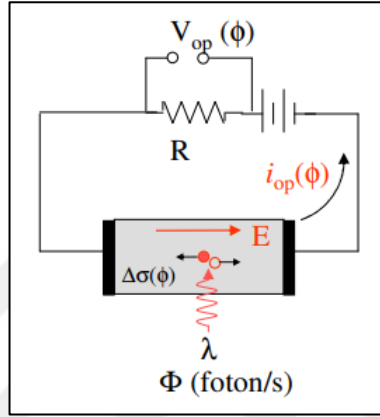
Şekil 3.11. Fotoelektrik dedektör üretiminde kullanılan malzemeler ve algıladıkları dalga boyları aralığı.

Çizelge 3.2. Fotoelektrik dedektörlerin üretildikleri malzemelere göre çeşitli özellikleri

Malzeme	Yasak Bant Aralığı (eV)	Yasak Bant Dalga Boyu λ (μm)	Devingenlik (elektron) $cm^2/V - s$	Dedektör Bölgesi
InSb	0,18	6,880	10^5	Kızılaltı
CdS	2,42	0,512	-	Görünür Bölge
Ge	0,67	1,850	3900	Kızılaltı
Si	1,12	1,106	1600	Kızılaltı
GaAs	1,43	0,867	8500	Kızılaltı
Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs	$E_g(GaAs) + 1,429x - 0,14x^2$	07-0,87	-	Kızılaltı
In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP	0,75	1,65	-	Yakın Kızılaltı
Hg_xCd_{1-x}Te	1,5-6,0	3,0-17,0	-	Kızılaltı
In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y/InP	-	0,92-1,7	-	Kızılaltı
InAs	0,354	3,502	-	Kızılaltı

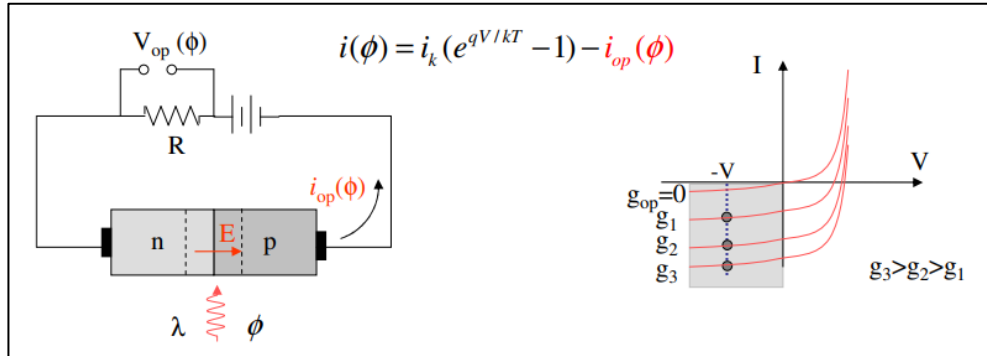
3.4.2. P-N fotodetektörler

Uygun bir yarıiletken üzerine düşen foton, iletim bandında bir elektron, değerlik bandında ise bir hole (delik) oluşturur. Oluşan elektron-hole çiftleri taşıyıcı yoğunluğunu, dolayısı ile iletkenliği (σ) artırır. Dış devrede dolaşan akım (veya devreye bağlı seri direnç üzerindeki gerilim) foton akısına bağlı olarak değişir.



Şekil 3.12. Fotoelektrik dedektör kutuplanması ve devre bağlantısı

Tüketim bölgesinde elektron-hole çiftinin oluşturulması esasına dayalı ışık algılayıcılarına Tüketim Bölgesi Işık Algılayıcıları (Depletion Layer Photodiode) denir.

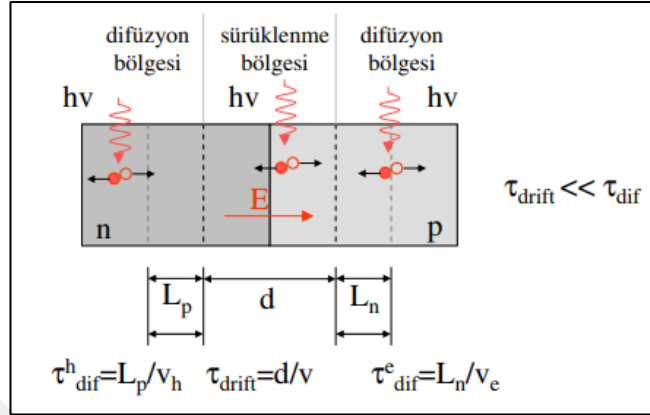


Şekil 3.13. Fotoelektrik dedektör üzerine düşen foton akısı ile orantılı iletim seviyesi

P-N yapının üstünlükleri:

- Yapı ters beslenerek çalıştırılır: yüksek ters gerilim, tüketim bölgesinde güçlü elektrik alan oluşturduğundan taşıyıcı sürüklenme hızı artar (dolayısı ile tepki süresi iyileştirilir).

- Ayrıca tüketim bölgesinin genişliği artacağından kapasitif etkiler de azalır (dolayısı ile tepki süresi iyileştirilmiş olur).
- Ters gerilimle tüketim bölgesi genişlediğinden daha geniş bir alanda fotonlar soğrulur.



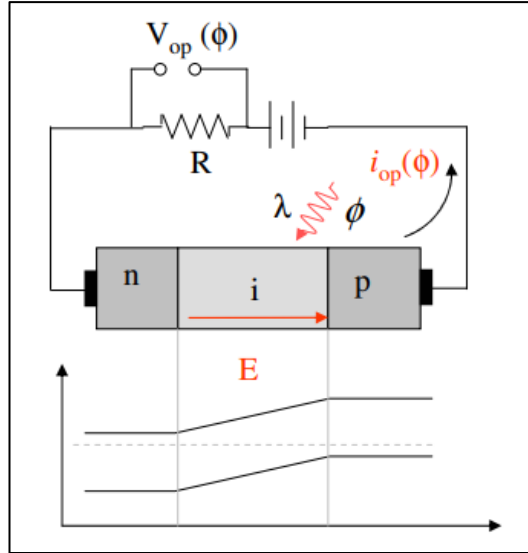
Şekil 3.14. Fotoelektrik dedektör bölgeleri

Tepki süresi:

- Tüketim bölgesindeki güçlü yapısal elektrik alandan dolayı bu bölgedeki taşıyıcıların hareketi hızlı olduğundan fotoiletkenlere göre tepki süresi daha iyidir.
- Tüketim bölgesinin dışında oluşturulan e-h çiftlerinin difüzyon yolu ile hareketi uzun zaman alacağından bu tepki süresini olumsuz etkiler.
- p-n yapı yerine p-i-n yapıdaki diyotlar kullanılarak tepki süresi daha da iyileştirilebilir.

3.4.3. P-i-N fotodedektörler

P-N yapı arasına katkılanmamış bir katman konarak tüketim bölgesinin genişliği kontrollü olarak genişletilir.



Şekil 3.15. PiN fotodedektör yapısı ve enerji seviyeleri

Uygulanan ters gerilim tümüyle i-bölgesinde (saf bölge, intrinsic, katkılanmamış bölge veya çok az katkılı) görülür. Fazlalık taşıyıcılarının yarı ömrü yeterince uzun ise oluşan elektron-hole çifti n ve p bölgelerine ulaşarak toplanır.

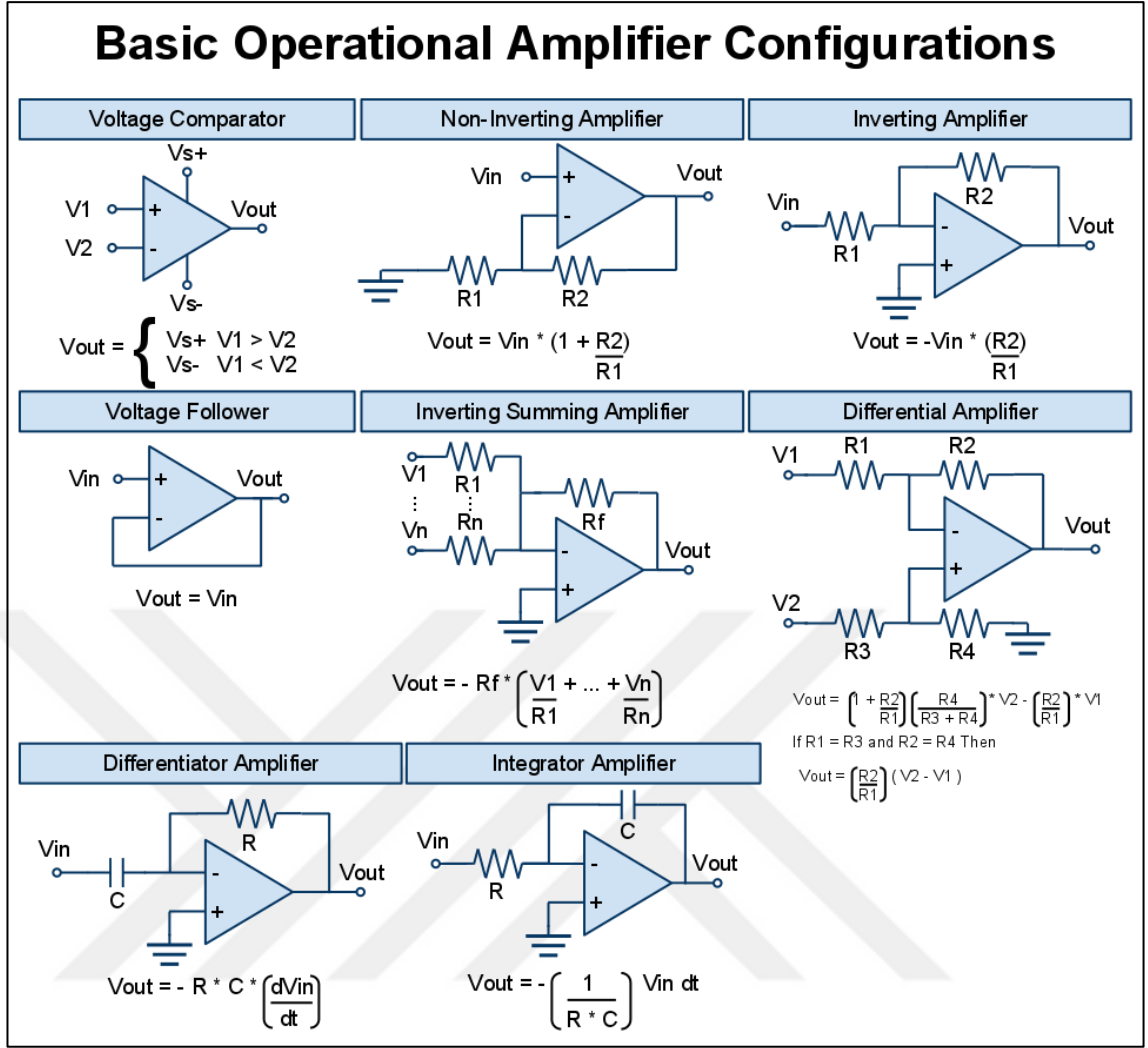
P-i-N yapının üstünlükleri:

- Tüketim bölgesi çok geniş olduğundan daha fazla foton toplanır,
- Tüketim bölgesinin kalınlığı kontrol edilebilir,
- Geniş tüketim bölgesi, küçük C, küçük RC sabiti, yüksek tepki süresi,
- Pikosaniye (ps) tepki süresi

3.5. İşlemsel Yükselteçler (Opamp)

Elektronik devrelere, matematiksel işlemler yapabilme, karşılaştırmacı görevi görme, akım – gerilim kazancı sağlama, empedans dönüştürme gibi işlevler kazandıran DC beslemeli elektronik aygıtlardır.

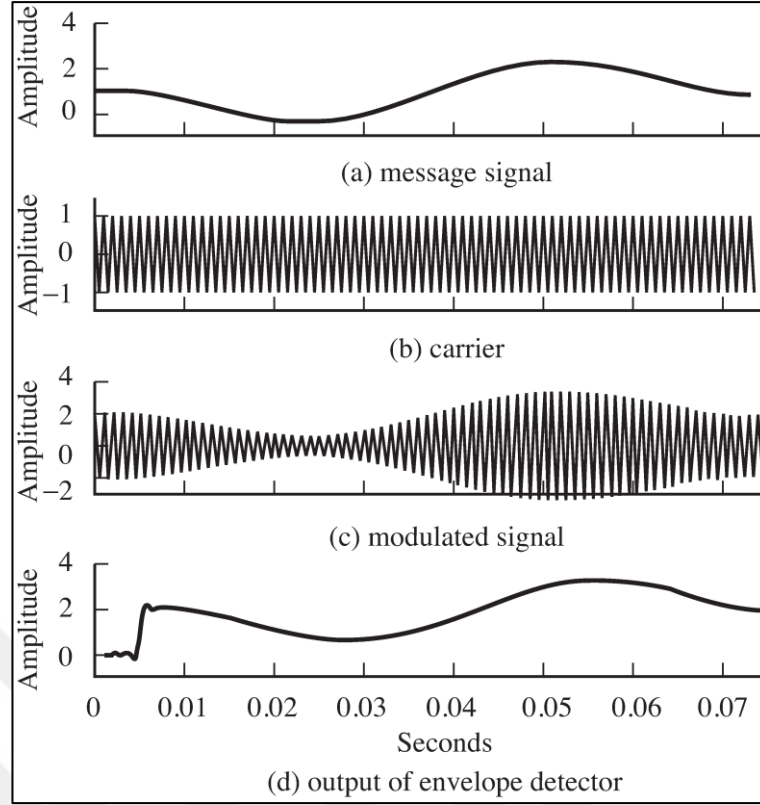
Tüm bu işlevleri yerine getirebilmeleri için farklı şekillerde konfigüre edilmeleri gerekmektedir. Şekil 3.16. da temel opamp konfigürasyonları gözükmemektedir.



Şekil 3.16. İşlemsel yükselteçlerin (opamp) farklı çalışma modları için konfigürasyonları

3.6. Modülasyon – Demodülasyon

Veri iletişim teknolojilerinde iletilmek istenilen bilgi, parazitlerden etkilenmenin azaltılması, bozulmanın ve girişimin en aza indirilmesi, bilgiyi daha uzak mesafelere iletebilme gibi nedenlerle, çeşitli teknikler kullanarak, taşıyıcı bir sinyal ile (modülasyon türüne bağlı olarak, genellikle bilgi içeren sinyalden daha yüksek frekansa sahip bir sinyal) kombine edilerek alıcıya iletilmektedir. Bu işlem kipleme veya modülasyon olarak adlandırılmaktadır (Anonim 2019). Alıcıya ulaşan modüle edilmiş bu sinyalden, demodülasyon ismi verilen teknikler kullanılarak, ham bilgiye ulaşılması sağlanmaktadır. Şekil 3.17. de modülasyon ve demodülasyon örneği gözükmektedir.



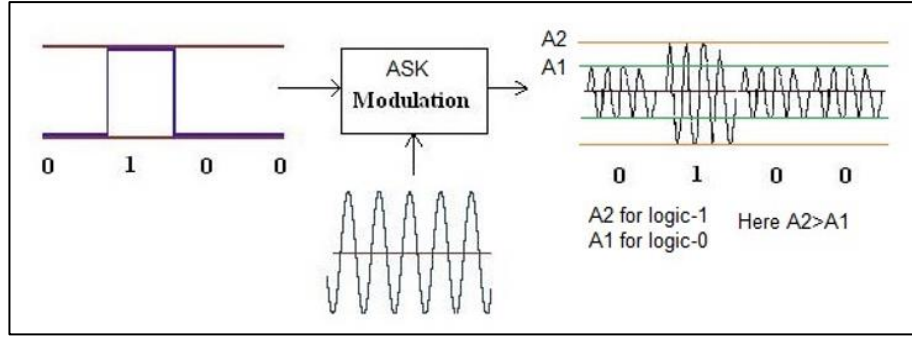
Şekil 3.17. Genlik modülasyonu – demodülasyonu için örnek grafik
a) bilgi sinyali, b) taşıyıcı sinyal, c) modüle edilmiş sinyal, d) demodüle sonucu elde edilen bilgi sinyali.

3.6.1. Sayısal modülasyon

Sayısal modülasyon, sayısal bilgiye göre analog taşıyıcının karakteristik özelliklerinin değiştirilmesidir. Sayısal sinyalleri haberleşme kanallarına uygun dalga formlarına dönüştürmek için kullanılır.

3.6.2. ASK modülasyon

Şekil 3.18. de görülen, ASK (Amplitude Shift Keying, Genlik Kaydırmalı Anahtarlama) modülasyonda, taşıyıcı sinyal genliği, bilgi sinyaline göre şekillendirilir; bilgi sinyalinde bulunan lojik-0 değeri için düşük genlik, lojik-1 değeri için yüksek genlik uygulanır.



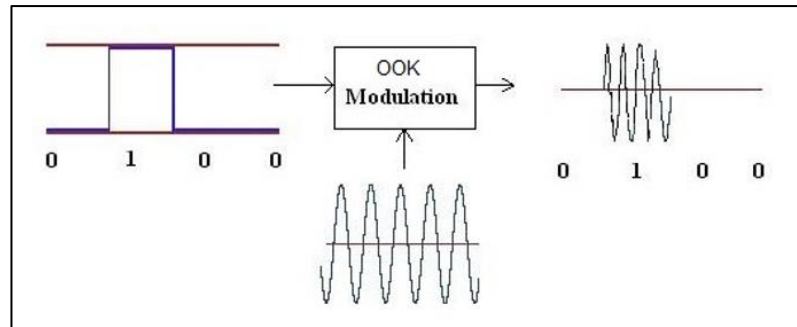
Şekil 3.18. Genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK) modülasyon diyagramı

Çizelge 3.3. Genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK) modülasyonun avantajları, dezavantajları ve kullanım alanları.

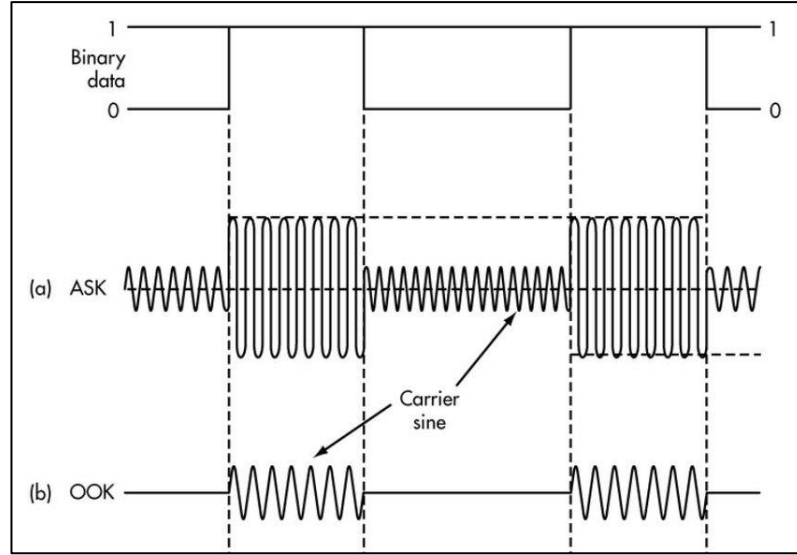
Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanları
Ucuz ve basit	Gürültüye duyarlı	Fiberoptik
Yüksek bant genişliği ve verimliliği	Düşük güç verimliliği	1.200bps'e kadar telefon hatlarında

3.6.3. OOK modülasyon

Şekil 3.19. da görülen, OOK (On-Off Keying, Açma-Kapama Anahtarlama) modülasyonu, ASK modülasyonun modifiye edilmiş halidir. ASK da olduğu gibi taşıyıcı sinyal genliği, bilgi sinyaline göre şekillendirilir. Ancak, Şekil 3.20. de görülebileceği gibi bilgi sinyalinde bulunan lojik-0 değeri için taşıyıcı yoktur (genlik sıfırdır).



Şekil 3.19. Açma-kapama anahtarlama (OOK) modülasyon diyagramı



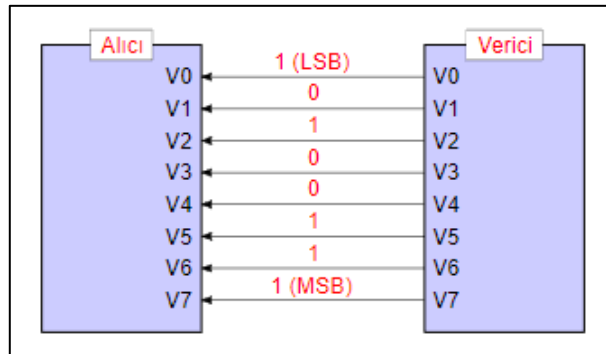
Şekil 3.20. Genlik kaydırmalı anahtarlama – açma-kapama anahtarlama (ASK–OOK) modülasyonları sinyal görüntüsü.

Avantaj ve dezavantajları ASK ile aynı olmakla birlikte, lojik-0 durumunda genliğin sıfır olması, ASK'ya oranla güç verimliliği açısından fayda sağlamaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilecek deneyde OOK modülasyon kullanılması planlanmaktadır.

3.7. Dijital İletişim Teknikleri

Dijital verilerin notadan noktaya iletilmesi esnasında farklı iletişim teknikleri kullanılabilmektedir. En bilinen iletişim teknikleri seri iletişim ve paralel iletişimidir (Anonim 2018).

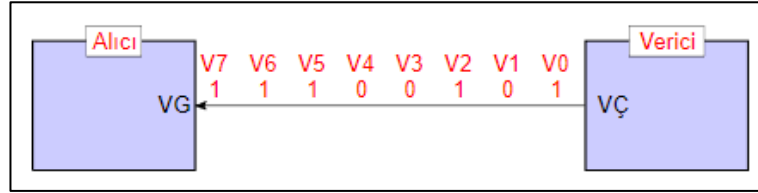
3.7.1. Paralel iletişim tekniği



Şekil 3.21. Paralel iletişim diyagramı (LSB = en düşük değerlikli bit, MSB = en büyük değerlikli anlamlı bit).

Paralel iletişimde gönderilmek istenen her bir bit, alıcı – verici arasında farklı kanallar üzerinden iletilmektedir. Kablolu bir paralel iletişim sistemi düşünüldüğünde bu durum, 8bitlik bir bilgi paketinin iletilmesi için alıcı – verici arasında 8 ayrı iletişim kablосуna ihtiyaç duyulduğunu ifade etmektedir.

3.7.2. Seri iletişim tekniğı



Şekil 3.22. Seri iletişim diyagramı

Paralel iletişimin aksine, seri iletişimde bütün veri tek bir kanal üzerinden 1 bitlik parçalar halinde sırayla gönderilir. Tek kanal üzerinden veri iletişimine olanak sağlaması ve senkronizasyon problemlerine kolay çözüm sağlaması nedeniyle günümüzde, çoğunlukla paralel iletişim yerine seri iletişim tercih edilmektedir.

- Senkron seri iletişim;

Senkron seri iletişim tekniğinde, senkronizasyonu sağlama adına, alıcı ve verici, ortak saat sinyali kullanırlar. Bu sinyali iletmek için fazladan bir kanala daha ihtiyaç vardır. Genellikle sürekli veri transferi yapılan alanlarda kullanılırlar.

- Asenkron seri iletişim;

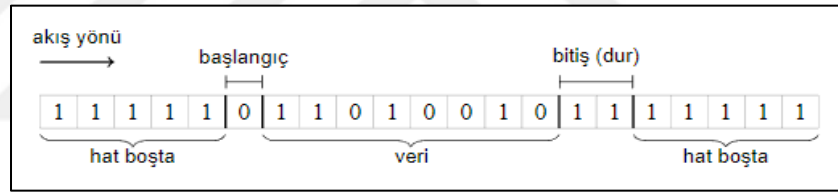
Yaygın kullanımından dolayı, seri iletişim denildiğinde aslında akla asenkron seri iletişim gelmektedir. Senkron seri iletişimin aksine bu iletişim tekniğinde saat sinyali ortak bir merkezden sağlanmaz. Bundan dolayı asenkron seri iletişimde senkronizasyonu ve kararlılığı sağlamak için bazı gereksinimler önem arz etmektedir;

1. İletişim hızı;

Alıcı – verici arasındaki veri iletişim hızını belirlemek için kullanılmaktadır. Bit per second (bps) birimi ile ifade edilirler. Yaygın olarak kullanılan iletişim hızları 9600bps, 57000bps, 115200bps dir. Asenkron seri iletişimde ortak saat sinyali kullanılmadığından iletişim senkronizasyonu sağlamak için hem alıcıda hem de verici de aynı iletişim hızına göre konfigürasyon sağlanmalıdır.

2. Senkronizasyon bitleri;

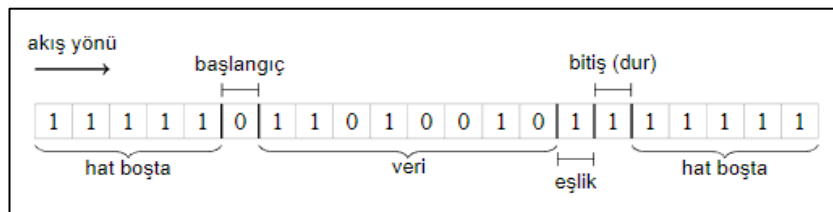
Asenkron seri iletişimde, iletişim boşa iken lojik-1 seviyesindedir ve toplam veri, paketlere bölünerek alıcıya iletilmektedir. Alıcıda yakalanan paketleri birbirinden ayırt edebilmek amacıyla veri paketiyle birlikte 1 bit başlangıç biti ve 1 veya 2 bit durdurma biti gönderilir.



Şekil 3.23. Veri paketi yapısı

3. Eşlik (parity) bitleri;

Eşlik bitleri hata denetimi için veri paketine dahil edilen bitlerdir. Gönderilen veri paketindeki bitlerin toplamını çift veya tek sayıya tamamlar. Eşlik biti çift sayıya tamamlanacak şekilde belirlendiyse, alıcıda bu durum kontrol edilerek basit düzeyde hata denetimi sağlanmış olur.



Şekil 3.24. Eşlik biti eklenmiş veri paketi yapısı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Kullanılabilir IR Dalga Boylarının Araştırılması

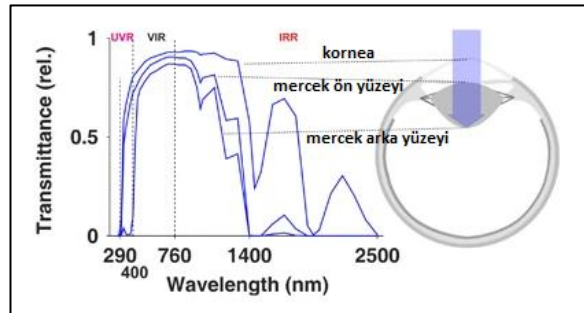
VLC’de karşılaşılan, “çeşitli ışık kaynaklarının (TV, monitör, projeksiyon, telefon gibi) ve hatta gün ışığının bozucu girişim etkisinden yüksek seviyede etkilenme” problemini, önerilen IRLC sisteminde en aza indirgeyecek uygun IR dalga boyunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu dalga boyunu belirlerken göz önünde bulundurulması gereken temel iki konu bulunmaktadır;

- IR kaynağın insan sağlığı üzerine etkileri
- Gün ışığının kızılötesi iletişim üzerine etkileri

4.1.1. IR kaynağın insan sağlığı üzerine etkileri

Her ne kadar insan gözü ile algılanamasa da, Li-Fi sisteminde aktif olarak kullanılacak, yani insanların sürekli olarak maruz kalacağı bir IR kaynağın, doğrudan veya termal aktarım vasıtasıyla, insan sağlığı üzerine olumsuz etkileri bulunmaktadır (Söderberg et al. 2016).

IR ışımanın insan sağlığı üzerindeki en büyük etkisi göz sağlığı üzerinde olmaktadır. Söderberg et al. (2016) tarafından yapılan çalışmada, gözün segmentlerinin çeşitli dalga boylarını geçirgenliği incelenmiş ve özellikle merceğin arka yüzeyine ulaşan IR ışımanın göz sağlığı açısından zararlı olduğu, çeşitli göz hastalıklarına sebep olabileceği belirtilmiştir.



Şekil 4.1. Fotoelektrik dedektör üzerine düşen foton akısı ile orantılı iletim seviyesi

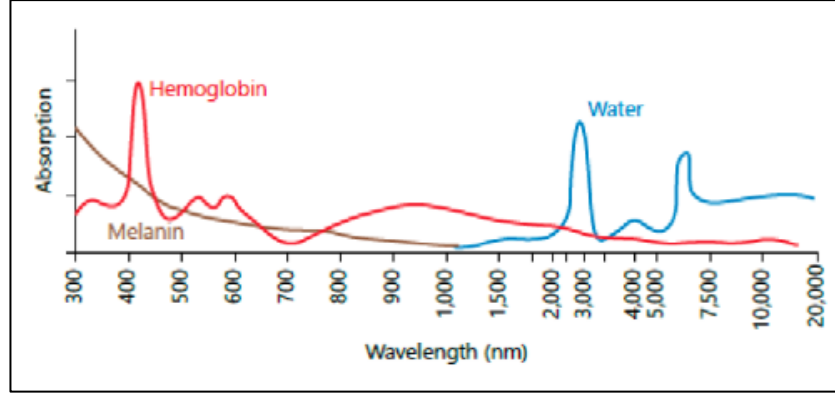
Şekil 4.1 de görülen geçirgenlik – dalga boyu grafiğinde 290-2.500nm aralığı ile UV, IR ve görünür ışık spektrumları dikkate alınmıştır. Yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla görülen eğriler, korneaya, merceğin ön yüzeyine ve merceğin arka yüzeyine ulaşabilen dalga boyları seviyesini ifade etmektedir. Grafikten hareketle;

1. 400–760nm aralığında doğal olarak gözün tüm segmentleri yüksek geçirgenliğe sahiptir. (Görünür ışık bandı)
2. 760–1.400nm aralığında geçirgenlik azalmaya başlamakta ve 1.400nm de merceğin ön ve arka yüzeyine geçirgenlik, sıfır olmaktadır. Korneanın ise geçirgenliği oldukça düşük duruma gelmiştir.
3. Yaklaşık 2.000nm de gözün tüm segmentlerinde geçirgenlik sıfır olmaktadır.

Sonuç olarak, göz sağlığı açısından, gözün tüm segmentlerinden geçirgenliğin sıfıra ulaştığı en uygun IR dalga boyunun 2.000nm olduğunu söylemek uygundur. Ancak yayında belirtilen ifade dikkate alındığında, gözün tüm segmentlerinden ziyade merceğin arka yüzeyine ulaşan IR ışımının sıfır olması, göz sağlığı açısından yeterli olmaktadır. Dolayısıyla 1.400nm seviyesi de bu anlamda göz sağlığı açısından uygun kabul edilmektedir.

Frank (1991) ın A.B.D. Ordusu Hijyen Ajansı (U. S. Army Environmental Hygiene Agency) için yaptığı çalışması bu çıkarımı destekler niteliktedir. Bu çalışma da 1.400nm'den (orta ila uzak kızılötesi) daha uzun çalışma dalga boylarına sahip lazerlere, göz sağlığı için güvenli olarak atıfta bulunulmuştur.

2019'da yapılan farklı bir çalışmada, insan cilt sağlığı dikkate alınmıştır. Bu çalışmada insan cildi tarafından çeşitli maddelerin emiliminin – dalga boyu ile ilişkisi incelenmiştir ve özellikle enzimlerin doğal yapısını bozma etkisi bulunan melanin pigmentine dikkat çekilmiştir (Anonymus 2019).



Şekil 4.2. Farklı dalga boylarında ışımalara maruz kalan insan cildinin bazı maddeleri emilim seviyesi.

Şekil 4.2 de, melanin, hemoglobin ve suyun, 300–20.000nm aralığında ışımaya maruz kalan insan cildindeki emilim seviyeleri verilmiştir. Grafikten hareketle;

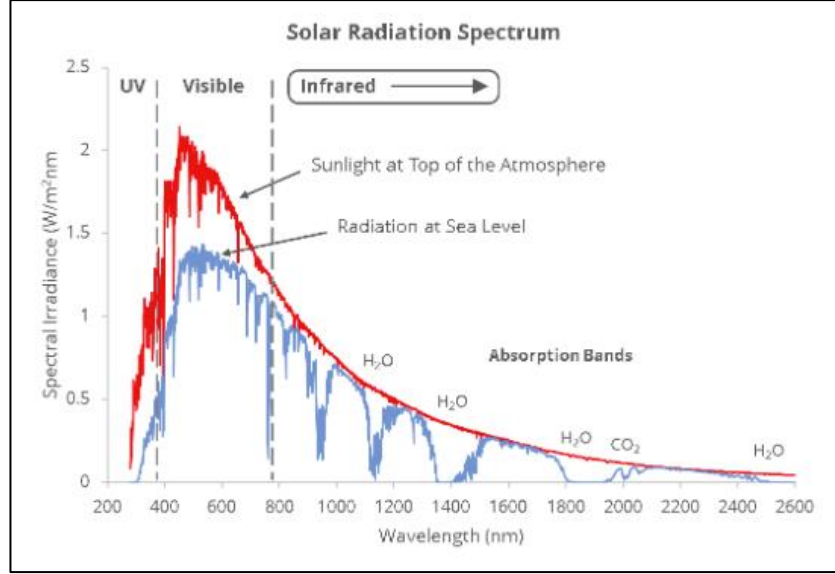
1. Melanin emilimi, yaklaşık 1.200nm seviyelerinde sıfıra düşmektedir.
2. Hemoglobin emilimi, 700nm civarında ve 5.000nm den sonra sıfıra yaklaşmaktadır.
3. Suyun emilimi, yaklaşık 1.000nm ye kadar sıfır gözükmemektedir.

Melanin emilimi dikkate alındığında, 1.200nm üzerindeki IR ışımların cilt sağlığı açısından uygun olduğu gözükmemektedir.

Dolayısıyla, göz sağlığı açısından uygun bulunan 1.400nm ve 2.000nm seviyeleri cilt sağlığı açısından da uygun bulunmaktadır.

4.1.2. Gün ışığının kızılötesi iletişime etkileri

Bu çalışmada, gün ışığının bozucu girişim etkilerinden kaçınmak amacıyla IR verici kullanımı önerilmektedir. Ancak yeryüzüne ulaşan güneş ışığı spektrumunun en bol kısmını (~%54 ile) IR spektrum oluşturmaktadır. Bu durumda IR iletişimin, görünür ışık iletişimine göre gün ışığından etkilenme oranının daha yüksek olması düşüncesi oluşmaktadır.



Şekil 4.3. Çeşitli dalga boylu ışımaların atmosfer ve yeryüzüne ulaşma seviyeleri (Amerikan Test ve Malzeme Derneği Standart Tablosu G-159).

Ancak, Şekil 4.3. de 200–2.600nm aralığındaki ışımaların atmosfer yüzeyine (kırmızı eğri) ve deniz seviyesindeki yeryüzüne (mavi eğri) ulaşma enerji seviyeleri grafiği incelendiğinde;

- 1- Yeryüzüne ulaşan, görünür ışık spektrumunun enerjisi UV ve IR spektrumlarına nazaran çok daha büyüktür. Bu çıkarım, VLC sistemlerinde gün ışığının bozucu etkisinin neden yüksek seviyede olduğunu kanıtlar niteliktedir.
- 2- IR spektrumun enerjisinin diğer spektrumlara göre çok daha düşük olduğu ve hatta 1.400nm civarındaki ve 1.800–2.000nm aralığındaki ışımaların yeryüzüne ulaşamadığı görülmektedir.

Dolayısıyla, bu çalışmanın çözmeye çalıştığı, “gün ışığının bozucu etkilerini azaltmak” ana problemi için, yine bu çalışmanın önerdiği “Li-Fi sistemlerinde görünür ışık yerine IR spektrumun kullanılması” fikri gerçekten uygulanabilir bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

4.1.3. Kullanılacak IR dalga boyunun belirlenmesi

Hem insan sağlığı açısından hem de gün ışığından etkilenmenin azaltılması açısından uygun bulunan IR dalga boyları (1.400nm ve 2.000nm) birbiriyle örtüşmektedir. Peki hangi dalga boyunu tercih etmek daha uygun olacaktır? Bu soruya cevap verebilmek için 4.1 ve 4.2 numaralı temel ışık hızı eşitliklerinden yararlanılabilir.

$$C = \lambda \cdot f \quad (4.1)$$

$$C = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{C}{\lambda} \quad (4.2)$$

$$C \cong 3 \times 10^8 \text{ m/sn} \quad (4.3)$$

OOK modülasyon kullanılan iki farklı iletişim sisteminde, anahtarlama frekansı haricindeki tüm parametreler ve sınırlamalar göz ardı edildiğinde, anahtarlama frekansı yüksek olan sistem, aynı süre zarfında diğer sisteme nazaran daha fazla veri aktarımı, yani daha hızlı iletişim gerçekleştirecektir. Bununla birlikte, anahtarlama frekansı en fazla ışığın doğal frekansı kadar olabilir. Bu bilgiden yola çıkarak, doğal frekansı yüksek olan ışığın kullanımı tercih sebebi olacaktır.

1.400nm için hesap yapıldığında;

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/sn}}{1400 \times 10^{-9} \text{ m}} \cong 214,285 \text{ THz} \quad (4.4)$$

2.000nm için hesap yapıldığında;

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/sn}}{2000 \times 10^{-9} \text{ m}} = 150 \text{ THz} \quad (4.5)$$

Elde edilen sonuçlardan, frekansı büyük olan, yani 1.400nm dalga boylu IR ışığın kullanımının daha performanslı olacağı sonucuna ulaşılmaktadır.

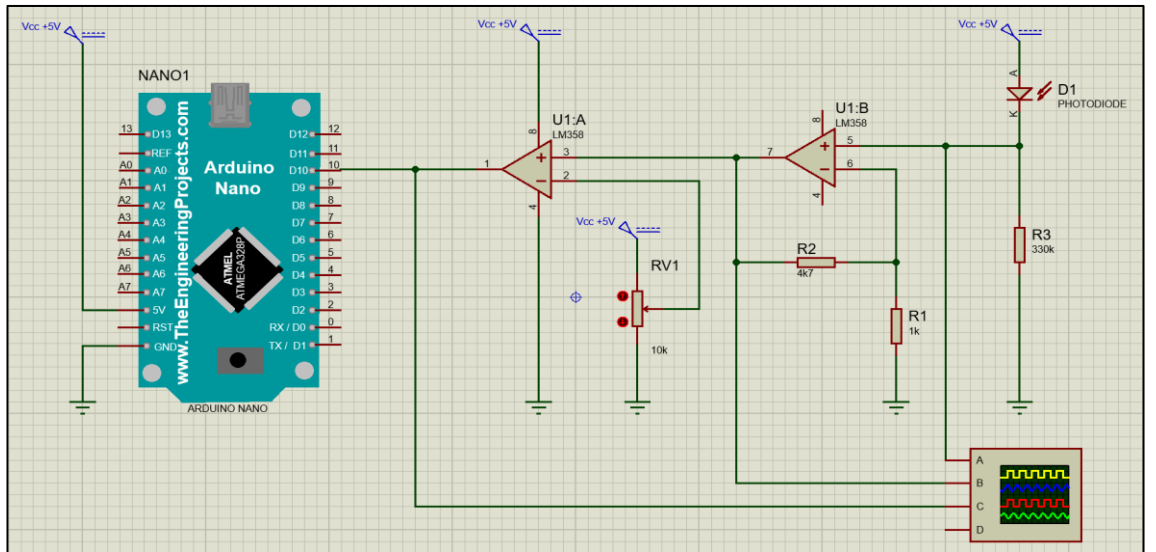
4.2. Deney Düzenegi

Literatürde yapılan çalışmalar genellikle VLC sistemleri ile kablosuz iletişim teknolojilerini kıyaslamakta ve VLC sistemlerinin performansını, kararlılığını ve verimini artırmaya yönelik olmaktadır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, farklı ışık koşullarında ve mesafelerde IRLC ve VLC sistemleri test edilecektir. Her iki sistemi, sadece kullandıkları ışığın türünü ele alıp diğer parametreleri göz ardı ederek, eşit koşullar altında değerlendirebilmek için, alıcı devresinde fotodiyot ve verici devresinde LED dışında büyük değişikliklere gidilmemiştir.

4.1.3. başlığı altında belirlenen 1400nm dalga boylu IR alıcı verici çiftlerinin üretimi özel amaçlar için olmaktadır. Dolayısıyla bu cihazlara erişmek zor ve yüksek maliyetlidir. Bundan dolayı bu çalışmada, ulaşılması kolay olan 940nm IR alıcı – verici çifti ile test yapılacaktır.

Veri iletişiminin, OOK modülasyonu ile asenkron seri iletişim tekniği üzerinden, 8 veri biti + 1 başlangıç biti + 1 sonlandırma biti olmak üzere 10 bitlik veri paketleri halinde gönderilmesi planlanmaktadır. Alıcı – verici devreleri ve kontrolcü programı buna göre tasarlanmıştır. Temel alıcı – verici deney düzenekleri şu şekildedir;

4.2.1. Alıcı deney devresi



Şekil 4.4. Alıcı devre proteus devre şeması

Şekil 4.4. te görülen, alıcı devre düzeneğinde kontrolcü olarak Arduino Nano, D₁ ile gösterilen fotodedektör (IRLC için BPW41N, VLC için BPW34), U₁ le gösterilen LM358 iki katlı opamp entegresi (işlemsel yükselteç), RV₁ ile gösterilen potansiyometre ve çeşitli değerlerde dirençler kullanılmıştır.

D₁ fotodiyotu, çalıştırılmak için ters polarmaya maruz bırakılmıştır. Fotodiyot üzerine düşen ışık akısına oranla üzerinden akım geçmesine müsaade edecektir. Akı gibi analog büyüklükleri elektriksel olarak değerlendirebilmek için, sağladığı kolaylıklar açısından akım yerine voltaja dönüştürerek ele almak tercih sebebidir. Bu dönüşümü sağlamak için fotodiyot – şase arasına, 330kohm luk R₃ direnci seri olarak bağlanmıştır. Fotodiyot üzerinden geçen akım miktarına bağlı olarak R₃ direnci üzerinde gerilim düşümü oluşması sağlanmıştır.

Ancak fotodiyot üzerine odaklı şekilde ışık akısı uygulansa bile üzerinden geçen akım miktarı miliamper (mA) ler seviyesinde, oldukça küçük olmaktadır. Fotodiyota seri bağlı R₃ direnci üzerinden aynı akım geçeceği için, R₃ üzerindeki gerilim düşümü de (temel elektriksel eşitlik 4.6 dan hareketle) milivolt (mV) lar seviyesinde, oldukça küçük olacaktır.

$$V=IxR \quad (4.6)$$

Arduino Nano mikrodenetleyicisinde lojik-1 değeri 5V, lojik-0 değeri 0V olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca arada kalan, ancak belirli bir eşik gerilimin üzerindeki değerler (~2,5V) lojik-1, altında kalan değerler ise lojik-0 olarak değerlendirilir. Dolayısıyla OOK modülasyonu kullanacak deney düzeneğinde verilerin doğru değerlendirilebilmesi için, Arduino Nano'nun fotodiyottan (R₃ direnci aracılığıyla) okuyacağı voltaj değerlerinin belirtilen lojik-1 ve lojik-0 voltaj değerleri aralığında olması gerekmektedir. Ancak R₃ direnci üzerinden okunan değerler yukarıda belirtildiği gibi milivoltlar seviyesindedir. Bundan dolayı fotodiyota iletilen her türlü bilgi, eşik voltaj değerinin altında kaldığı için, lojik-0 olarak değerlendirilecek ve Li-Fi iletişimini olanaksız kılacaktır.

Bu sorunu çözmek için, yine eşitlik 4.6 dan hareketle, “R₃ direncinin büyüklüğü ne kadar yüksek olursa (sınırsız olmamakla birlikte), üzerinde oluşacağı gerilim düşümü de o derece büyük olacaktır” çıkarımı yapılabilir. Bundan dolayı R₃ direnci 330kohm gibi büyük bir değerde tercih edilmiştir. Buna rağmen, R₃ direnci üzerinde oluşan gerilim düşümü 0,1V – 0,7V aralığında (yaklaşık 200lux lük az aydınlatılmış ortamda) olmaktadır. Yani voltaj değeri yükseltilmiş olmakla birlikte (küçük R₃ direnci kullanımına nazaran), yine de istenilen aralığa ulaştırılamamıştır.

Voltaj değerini istenilen aralığa yükseltebilmek için, iki işlemsel yükselteç devresi barındıran U₁ LM358 entegresi kullanılmıştır. Entegrenin U₁:B opamp devresi, evirmeyen yükselteç modunda çalıştırılmış ve 5 numaralı evirmeyen bacağına yükseltilmesi hedeflenen R₃ direnci üzerindeki voltaj değeri iletilmiştir.

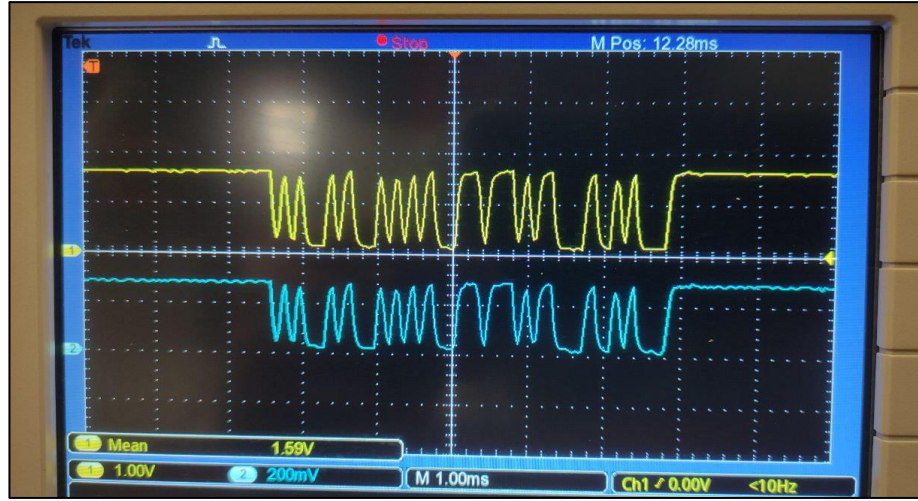
$$V_{out}=V_{in} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.7)$$

Opamp evirmeyen yükselteç eşitliği 4.7 den hareketle:

$$V_{out}=V_{in} \times \left(1 + \frac{4,7kohm}{1kohm}\right) = V_{in} * 5,7 \quad (4.8)$$

5 numaralı bacağı iletilen gerilim değeri, eşitlik 4.8 de görüleceği üzere, 5,7 kat yükseltilerek 7 numaralı bacadan elde edilmiştir. Şekil 4.5. te görüleceği üzere, 0,1V-0,7V olan gerilim aralığı, 0,57V – 3,99V aralığına yükseltilmiştir.

Fotodiyot çıkış sinyali ve yükseltilmiş çıkış sinyali, belirgin gösterilebilmek için farklı ölçekte çizilmiştir.



Şekil 4.5. Fotodiyot çıkış sinyali ve yükseltilmiş çıkış sinyali osiloskop görüntüsü

İstenilen voltaj aralık değerlerine ulaşılmıştır. Ancak farklı ortamlardaki gün ışığı akıları fotodiyot üzerinden farklı miktarlarda akımın geçmesine sebep olacaktır. Dolayısıyla sistem, bulunduğu ortam aydınlatmasına göre dinamik davranmaktadır. Sistemin çalışma kararlılığını artırmak ve farklı ortam aydınlatmaları için değişken eşik gerilim değeri belirlemek adına, LM358 entegresinde yer alan diğer opamp $U_1:A$, voltaj karşılaştırıcı modunda çalıştırılmıştır. 10kohm'luk RV_1 potansiyometresi, $V_{cc} +5V$ beslemesi üzerinden gerilim bölücü olarak çalıştırılmış ve $U_1:A$ opampına ortam aydınlatmasına karşılık gelen referans voltaj değeri sağlamak için kullanılmıştır. $U_1:B$ opampının çıkışından yükseltilmiş olarak elde edilen sinyal, $U_1:A$ opampı üzerinde, bu referans voltaj değeri ile karşılaştırılmıştır.

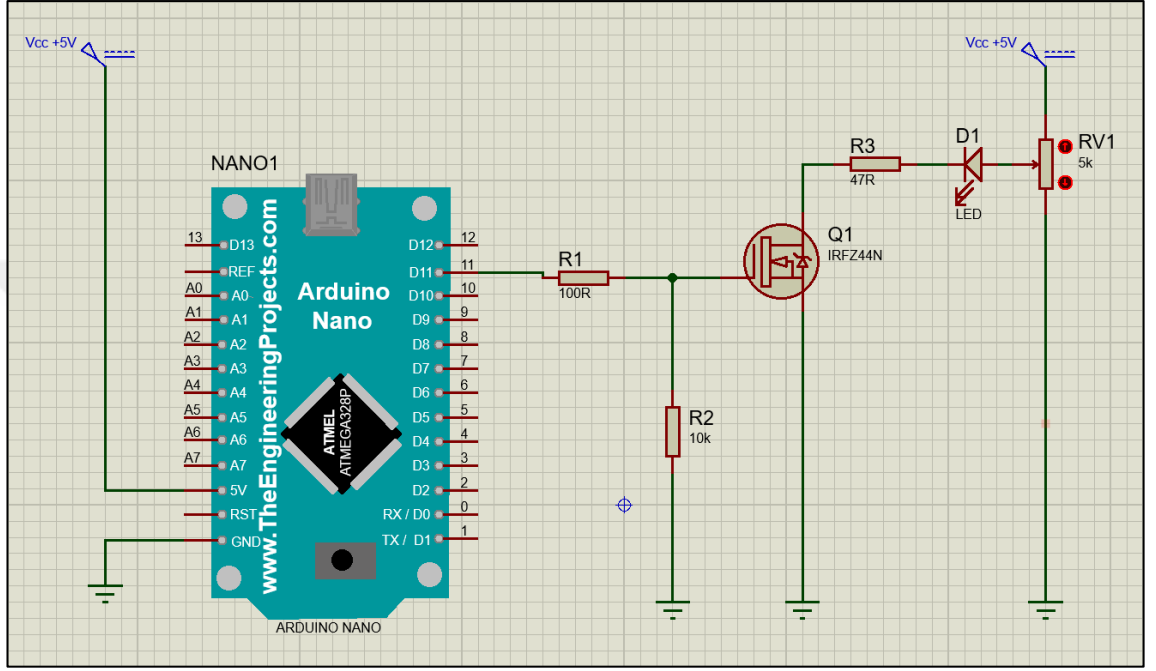
Opamp voltaj karşılaştırıcı eşitliği 4.9 dan hareketle;

$$V_{out} = \begin{cases} V_{s+}, & V_1 > V_2 \\ V_{s-}, & V_1 < V_2 \end{cases} \quad (4.9)$$

bilgi sinyali eğer ortam aydınlatmasına bağlı referans voltaj değerinden daha büyükse $U_1:A$ opampının çıkışından $V_{cc} +5V$, tersi durum geçerliyse 0V elde edilecektir (LM358P V_{s+} ve V_{s-} bağlantıları $V_{cc} +5V$ ve ground (şase) hattına yapılmıştır).

Böylece hem ortam aydınlatmasına göre dinamik şekilde ayarlanabilen hem de lojik-1 ve lojik-0 değerlerini daha keskin şekilde ifade edebilen bir alıcı sistem elde edilmiş olmaktadır.

4.2.2. Verici deney devresi



Şekil 4.6. Verici devre proteus devre şeması

Şekil 4.6. da görülen, verici devre düzeneğinde, kontrolcü olarak Arduino Nano, D1 ile gösterilen LED (IRLC sistemi için TSAL6100 5mm IR LED, VLC sistemi için 5mm görünür ışık beyaz LED), Q₁ le gösterilen IRFZ44N N-kanal mosfet, RV₁ ile gösterilen potansiyometre ve çeşitli değerde dirençler kullanılmıştır.

Arduino Nano kontrolcüsü pin başına en fazla 20mA çıkış akımı sağlamaktadır. Ancak verici devrede kullanılacak D₁ LED'i çok daha yüksek (~100mA) akımların kullanımına müsaade etmektedir. Yüksek akımların kullanımı LED'in daha parlak ışmasına, dolayısıyla iletişimin daha uzak mesafelerde gerçekleştirilebilmesini ve iletişim kalitesinin artmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı LED'i harici besleyebilecek ve yüksek anahtarlama hızına ulaşabilecek Q₁ IRFZ44N mosfeti kullanılmaktadır.

R_1 ve R_2 dirençleri gerilim bölücü olarak kullanılmakta ve Q_1 mosfetine anahtarlama için yeterli gate voltajını sağlamaktadır. R_2 direnci aynı zamanda anahtarlama parazitlerini önlemeye yönelik pull-down direnci işlevi görmektedir.

Farklı ortamlarda aydınlatma miktarı da değişkenlik gösterdiğinden, LED'in parlaklığının dinamik olarak ayarlanabilmesi tercih edilmektedir. RV_1 potansiyometresi $V_{cc} + 5V$ üzerinden gerilim bölücü görevi görerek LED'e uygulanan gerilimin, dolayısıyla parlaklığının ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. 47ohm luk R_3 direnci akım sınırlayıcı olarak kullanılmakta ve LED üzerinden geçecek maksimum akımı (~80mA) belirleyerek LED'i korumaktadır.

4.3. Deney Programları

4.3.1. Kontrolcü programı

```
1 #include <SoftwareSerial.h>
2
3 #define rx_pin 10
4 #define tx_pin 11
5
6 SoftwareSerial lifi_serial(rx_pin, tx_pin);
7
8 void setup() {
9     // Start: Serial Connection
10    Serial.begin(9600);
11    while (!Serial) {} // wait till Serial
12    Serial.println("Communication Started!");
13
14
15    lifi_serial.begin(9600);
16 }
17
18 void loop() {
19     if (lifi_serial.available()) {
20         Serial.write(lifi_serial.read());
21     }
22     if (Serial.available()) {
23         lifi_serial.write(Serial.read());
24     }
25 }
```

Şekil 4.7. Kontrolcü programı

Arduino Nano kontrolcüsünün donanım tanımlı seri iletişim pinleri D1/TX ve D0/RX pinleridir. Kontrolcünün programlanması sırasında bu pinler aktif rol almaktadır. Her ne kadar çevresel birimlerle seri iletişim arayüzü olarak da kullanılabilir olsalarda,

kontrolcünün programlanması sırasında seri iletişim ilişkisi bulunan çevresel bağlantıların kesilmesini gerektirmektedir. Bu durum, geliştirme sürecini uzatmakta ve zahmetli hale getirmektedir. Bundan kaçınmak için, SoftwareSerial kütüphanesi aracılığıyla kullanıcının tanımlayabileceği pinler aracılığıyla, yazılımsal seri iletişim portları da belirlenebilir.

Sağladığı kolaylığa karşın, seri iletişim portlarının (yazılımsal ve donanımsal) sayısı ve bps ile ifade edilen veri aktarım hızı, kontrolcünün ve elektronik bileşenlerin limitlerinden dolayı sınırsız değildir. Bu sınırların ihlali, veri iletişiminde kararsızlığa ve bozulmalara sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada Li-Fi alıcı verici birimleri arasında iletişimi sağlamak için D11 ve D10 pinleri, sırasıyla yazılımsal seri iletişim pinleri TX ve RX olarak belirlenmiştir (Şekil 4.7. de 1. ve 6. satırlar arasında görülmektedir). Li-Fi birimleri ve bilgisayar arasında verilerin aktarılması noktasında ise donanım tanımlı D1/TX, D0/RX seri iletişim portu kullanılmaktadır (Şekil 4.7. de 18. ve 25. satırlar arasında görülmektedir).

Hem donanım hem de yazılım tanımlı iki seri iletişim portu arasında veri aktarımını sağlıklı şekilde sağlayabilmek için, her iki portun da senkron yani aynı baudrate hızında çalışmaları gerekmektedir. Bu sebeple, testler sırasında her iki seri iletişim portunda aynı hızda çalışacak şekilde (Şekil 4.7. de görülen 10. ve 15. satırlarda) yapılandırılmıştır.

4.3.2. Bit-hata oranı (BER) tespit programı

Sayısal iletişim tekniklerinde, iletişim doğruluğunu ve kalitesini değerlendirebilmek için, BER tekniği kullanılabilir. Bu teknikte, gönderilen ve alından bitler karşılaştırmaya tabi tutularak, hatalı olarak alınan bit sayısının, transfer edilen toplam bit sayısına oranına bakılmaktadır.

BER tespiti için kontrolcü programına eklentiler yapılabilir. Ancak kontrolcüye, veri alışverişi dışında ekstra bir işlem yaptırmak, iletişim hızının olumsuz etkilenmesine

sebeplere olacağından, kontrolcü programında değişikliğe gidilmemiş, BER tespiti için ayrı bir python programı yazılmıştır.

The image shows a screenshot of a Python script named 'ber.py' in a code editor. The script calculates the Bit Error Rate (BER) by comparing a sent text with a received text. It converts each character to its ASCII binary representation and then compares the two binary strings bit by bit. The script includes comments in Turkish and uses variables like 'sendedText', 'receivedText', 'sendedBin', 'receivedBin', 'err', and 'ber'. The final output is printed as 'BER: %' followed by the calculated BER value.

```
ber.py > ...
1  sendedText = "ETU - Hasan Eren Emir"
2  receivedText = "Efu - Hasac Eren2Emir!4"
3
4  sendedBin = ' '.join(format(ord(s), 'b') for s in sendedText)
5  receivedBin = ' '.join(format(ord(r), 'b') for r in receivedText)
6
7  err = 0
8  ber = 0
9
10 if len(sendedBin) > len(receivedBin):
11     for i in range(len(sendedBin) - len(receivedBin)):
12         receivedBin = receivedBin + ' '
13 if len(sendedBin) < len(receivedBin):
14     for i in range(len(receivedBin) - len(sendedBin)):
15         sendedBin = sendedBin + ' '
16
17 for i in range(len(sendedBin)):
18     if sendedBin[i] != receivedBin[i]:
19         err+=1
20
21 ber = 100 * err / len(sendedBin)
22
23
24 print('BER: % ' + str(ber))
```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL

PS C:\Users\hasanerenemir\Desktop\string_to_ascii-bin> & C:/Python3/python.exe c:/Users/hasanerenemir/Desktop/string_to_ascii-bin/ber.py
BER: % 11.363636363636363

Şekil 4.8. BER tespit programı

Şekil 4.8. de görülen BER tespit programında, alınan ve transfer edilen tüm karakterler 1. ve 2. satırlarda girilmekte ve bu değerler kontrolcü programının yaptığı tam aksine, 4. ve 5. satırlarda önce ASCII ondalık karşılıklarına, ardından binary değerlere dönüştürülmektedir.

BER tespit programı, her bir karakterin ASCII binary karşılıklarından yola çıkarak 17. – 19. satırlar arasında, alınan ve transfer edilen tüm bitleri birbiri ile karşılaştırmakta ve 21. satırda yüzde olarak BER hesabı yapmaktadır.

Hatalı yakalanan bitlerin dışında, bozucu etkiler sonucunda eksik veya fazla yakalanan bit değerleri de BER' e etki edeceğinden, 10. – 15. satırlar arası bu bitlerinde hatalı olarak değerlendirilebilmesi için yazılmıştır.

Şekil 4.8. de görüleceği üzere alınan ve transfer edilen karakterlerde uyumsuzluk söz konusu ise BER değeri yükselmektedir. Ters durumda birbiriyle tamamen eşleşiyorsa, BER değeri %0 olarak hesaplanmakta, yani hatasız bir iletişim sağlandığı

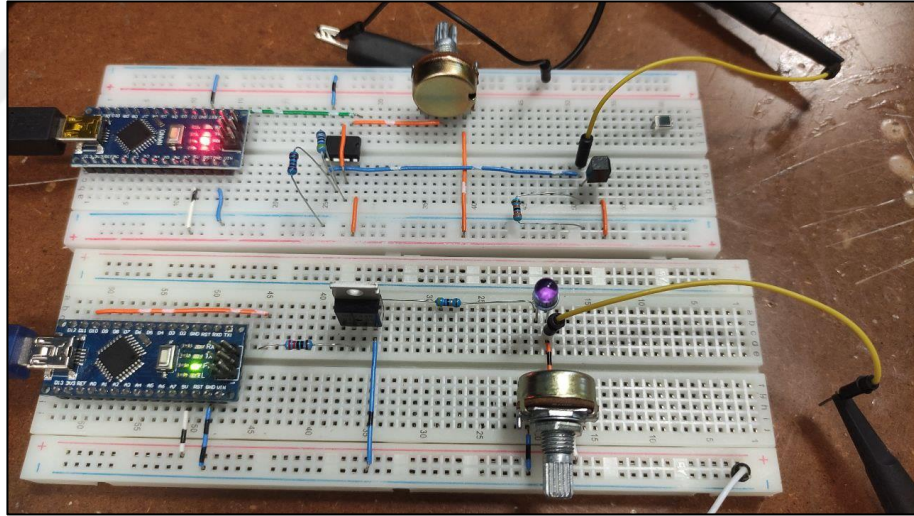
tespit edilmektedir. Dolayısıyla kaliteli bir iletişim sağlayabilmek için BER'in %0 da tutulabilmesi hedeflenmektedir.

4.4. Farklı Gün Işığı Koşulları Altında Deney Düzeneklerinin Test Edilmesi

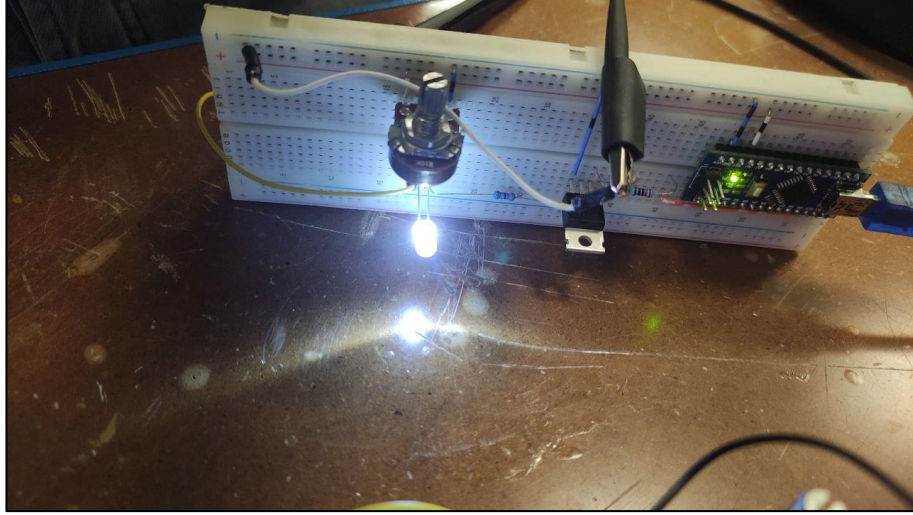
Devre çizimleri belirtilen IRLC ve VLC alıcı – verici sistemleri Şekil 4.9., Şekil 4.10. ve Şekil 4.11. de görülen bread-board prototipleri haline getirilmiştir.

Oluşturulan prototipler, USB portları üzerinden bir bilgisayara bağlanmış ve açık kaynak kodlu seri iletişim monitör yazılımı Termite ile iletişime geçirilmiştir.

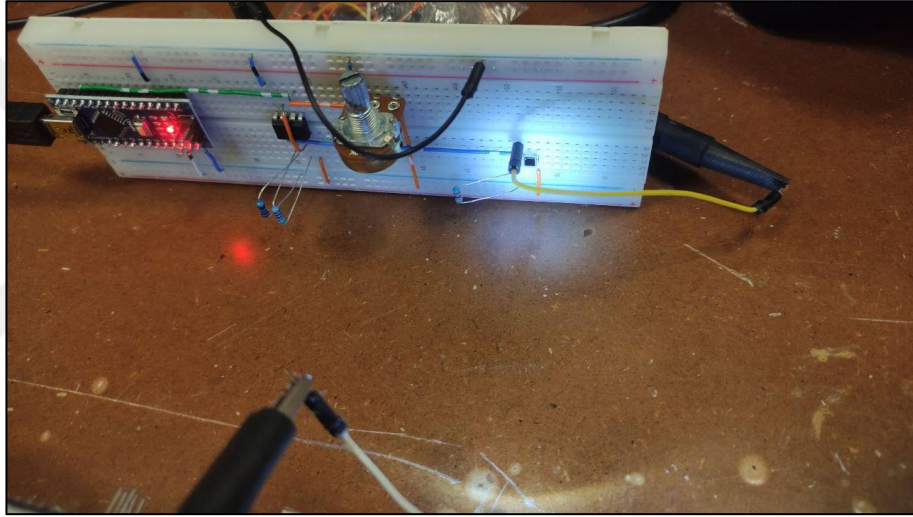
Prototipler, Şekil 4.12. ve Şekil 4.13. te görülebileceği gibi, farklı gün ışığı koşulları altında, farklı mesafelerde ve %0 BER'i koruyacak şekilde test edilmeye ve bu testlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmeye çalışılmıştır.



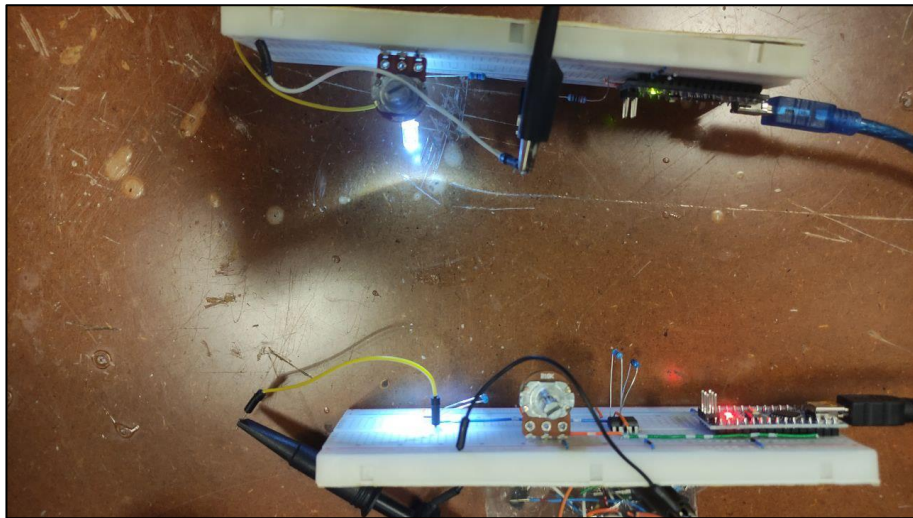
Şekil 4.9. IRLC alıcı – verici prototipi



Şekil 4.10. VLC verici prototipi



Şekil 4.11. VLC alıcı prototipi



Şekil 4.12. VLC iletişim mesafe testi



Şekil 4.13. IRLC iletişim mesafe testi

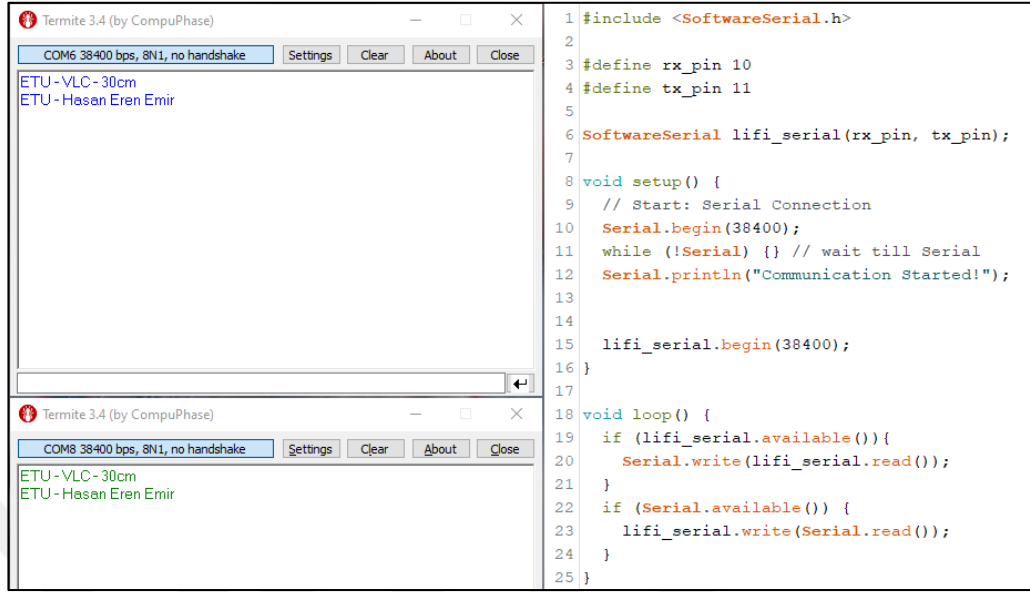
4.4.1. 50lux aydınlatma altında test

Yaklaşık 50lux'lük oldukça düşük aydınlatmalı bir mekanda hem VLC hem de IRLC sistemleri, farklı alıcı – verici arası mesafelerde ve farklı iletişim hızları ile test edilmiştir (COM6 verici, COM8 alıcı portunu ifade etmektedir).

Bu test sonucunda VLC sistemi;

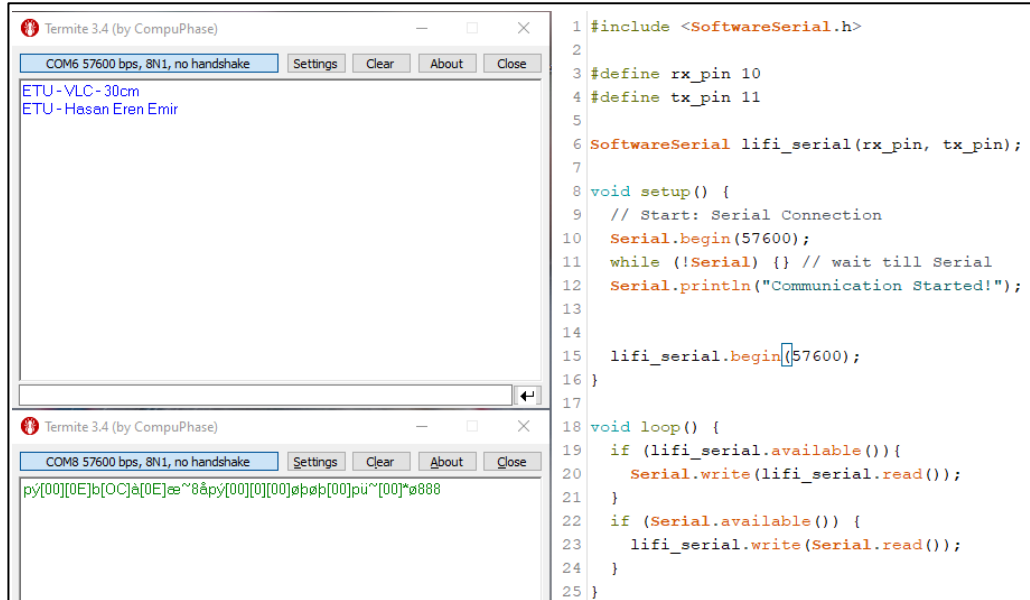
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

- 1) Şekil 4.14. te görüleceği üzere, maksimum 30cm mesafede, maksimum 38.400bps veri hızı ve %0 BER ile başarılı şekilde veri iletişimi sağlayabilmektedir.



Şekil 4.14. VLC sistemi, alıcı-verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 38.400bps, 50lx

- 2) Şekil 4.15. te görüleceği üzere, alıcı – verici arasındaki mesafe aynı tutulsa veya kısaltılsa dahi bu hızın üzerinde veri iletişimi gerçekleştirilememiştir.



Şekil 4.15. VLC sistemi, alıcı-verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 57.600bps, 50lx

Şekil 4.16.da görüleceği üzere, bu sistem için BER sonucu %72,3214 olarak hesaplanmıştır.

```
ber.py > ...
1  sentedText = 'ETU - VLC - 30cm\nETU - Hasan Eren Emir'
2  receivedText = 'pý[00][0E]b[0C]à[0E]æ~8âpý[00][0][00]øpøb[00]pü~[00]*ø888'
3
4  sentedBin = ''.join(format(ord(s), 'b') for s in sentedText)
5  receivedBin = ''.join(format(ord(r), 'b') for r in receivedText)
6
7  err = 0
8  ber = 0
9
10 if len(sendedBin) > len(receivedBin):
11     for i in range(len(sendedBin) - len(receivedBin)):
12         receivedBin = receivedBin + ' '
13 if len(sendedBin) < len(receivedBin):
14     for i in range(len(receivedBin) - len(sendedBin)):
15         sendedBin = sendedBin + ' '
16
17 for i in range(len(sendedBin)):
18     if sendedBin[i] != receivedBin[i]:
19         err+=1
20
21 ber = 100 * err / len(sendedBin)
22
23
24 print('BER: % ' + str(ber))
```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL

PS C:\Users\hasanerenemir\Desktop\string_to_ascii-bin> & C:/Python3/python.exe c:/Users/hasanerenemir/Desktop/string_to_ascii-bin/ber.py
BER: % 72.32142857142857

Şekil 4.16. BER hesabı sonucu, VLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 57.600bps, 50lx.

Aynı ortamda IRLC sistemi VLC sistemine benzer sonuçlar vermiştir;

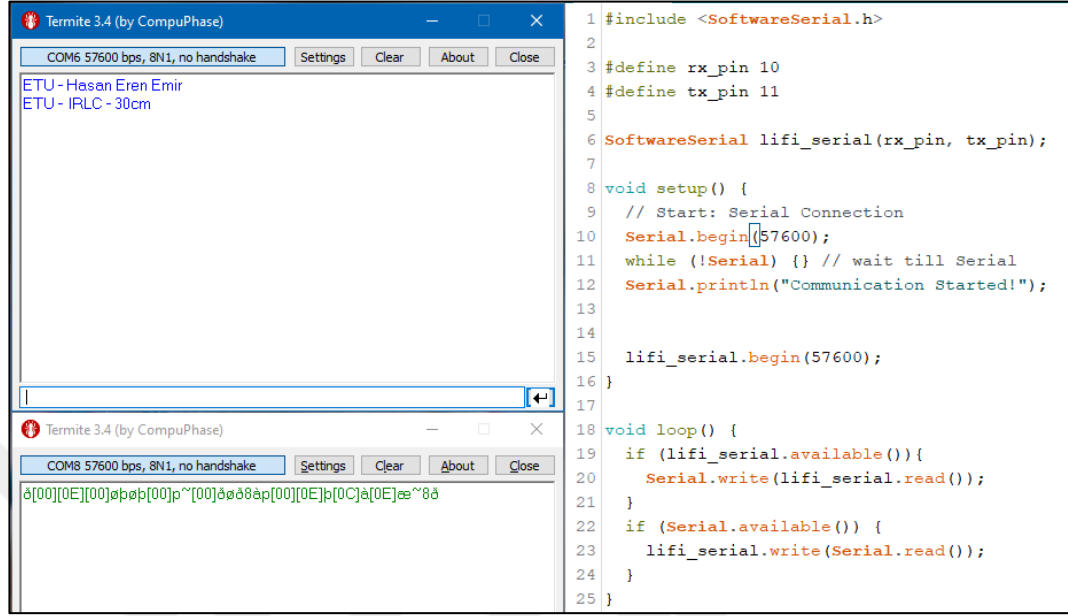
- 1) Şekil 4.17. de görüleceği üzere, maksimum 30cm mesafede 38.400bps veri hızı ve %0 BER ile başarılı şekilde veri iletişimi sağlayabilmiştir.

Termit 3.4 (by CompuPhase)
COM6 38400 bps, 8N1, no handshake
Settings Clear About Close
ETU - IRLC - 30cm
ETU - Hasan Eren Emir

```
1 #include <SoftwareSerial.h>
2
3 #define rx_pin 10
4 #define tx_pin 11
5
6 SoftwareSerial lifi_serial(rx_pin, tx_pin);
7
8 void setup() {
9     // Start: Serial Connection
10    Serial.begin(38400);
11    while (!Serial) {} // wait till Serial
12    Serial.println("Communication Started!");
13
14
15    lifi_serial.begin(38400);
16 }
17
18 void loop() {
19     if (lifi_serial.available()){
20         Serial.write(lifi_serial.read());
21     }
22     if (Serial.available()) {
23         lifi_serial.write(Serial.read());
24     }
25 }
```

Şekil 4.17. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 38.400bps, 50lx

- 2) Şekil 4.18. de görüleceği üzere, alıcı – verici arasındaki mesafe aynı tutulsa veya kısaltılsa dahi bu hızın üzerinde veri iletişimi gerçekleştirilememiştir.



Şekil 4.18. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 57.600bps, 50lx

Bu düzenek için BER sonucu %65,5660 olarak hesaplanmıştır. Bit düzeyinde yaklaşık %35 lik bir doğruluk olmasına ve VLC ile aynı koşullar altında daha iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen, binary ifadeler karakter dizisine dönüştürüldüğünde, anlamlı bir metin oluşturmak yine de mümkün olmamaktadır.

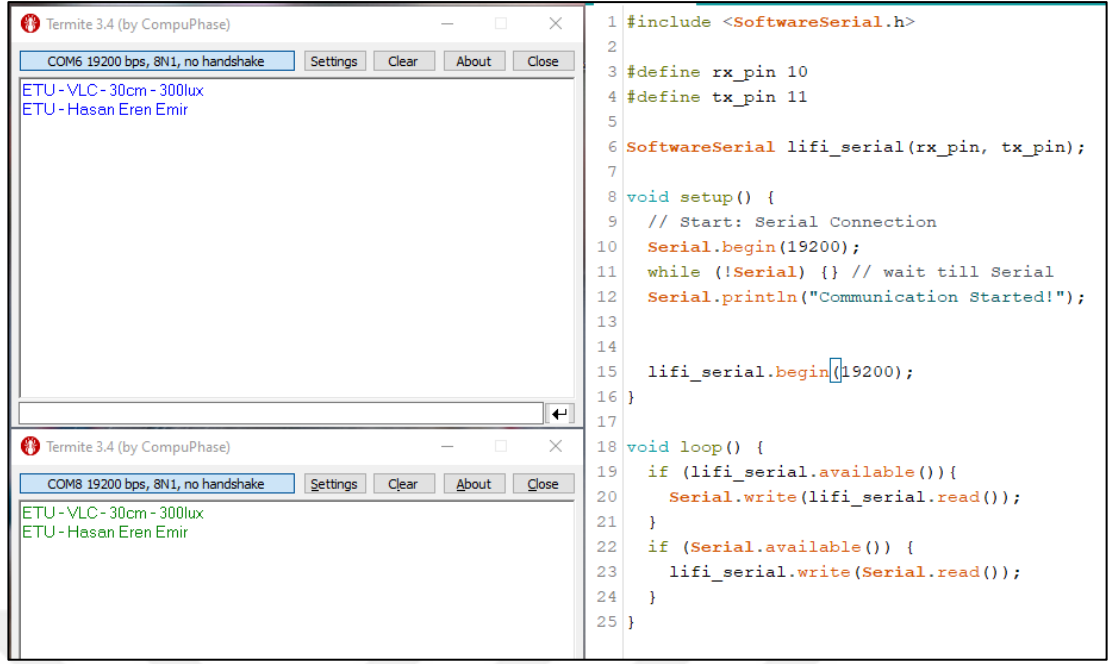
4.4.2. 300lux aydınlatma altında test

Yaklaşık 300lux’lük orta aydınlatmalı bir mekanda hem VLC hem de IRLC sistemleri, farklı alıcı – verici arası mesafelerde ve farklı iletişim hızları ile test edilmiştir (COM6 verici, COM8 alıcı portunu ifade etmektedir).

Bu test sonucunda VLC sistemi;

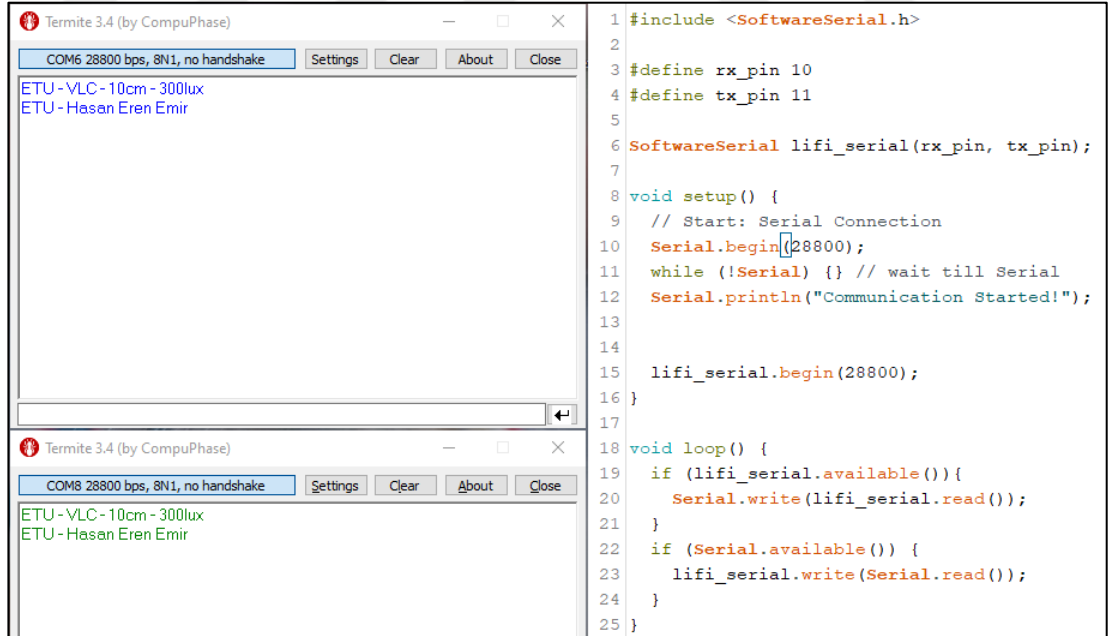
- 1) Şekil 4.19. da görüleceği üzere, maksimum 30cm mesafede, maksimum 19.200bps veri hızı ve %0 BER ile başarılı şekilde veri iletişimi sağlayabilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.19. VLC sistemi, alıcı-verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 19.200bps, 300lx

- 2) Şekil 4.20. de görüleceği üzere, mesafe 10cm ye düşürüldüğünde, %0 BER in korunduğu maksimum iletişim hızının 28.800bps olduğu gözlenmiştir.

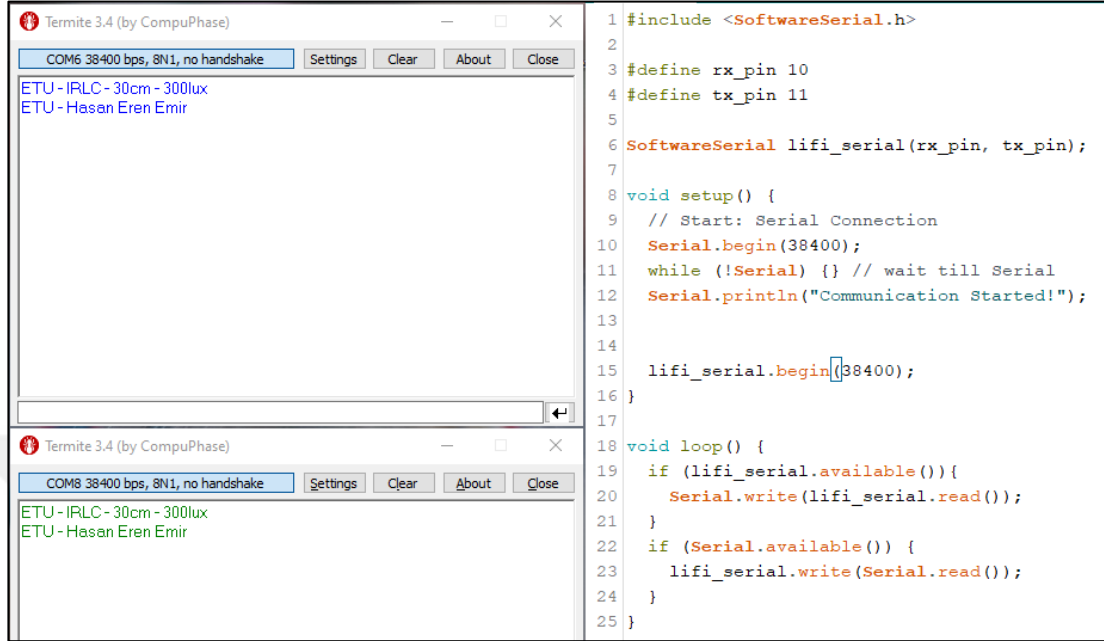


Şekil 4.20. VLC sistemi, alıcı-verici arası mesafe 10cm, iletişim hızı 28.800bps, 300lx

Aynı ortamda IRLC sistemi VLC sistemine nazaran daha iyi performans sergilemiştir;

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

- 1) Şekil 4.21. de görüleceği üzere, maksimum 30cm mesafede, maksimum 38.400bps veri hızı ve %0 BER ile başarılı şekilde veri iletişimi sağlayabilmiştir.



Şekil 4.21. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 38.400bps, 300lx

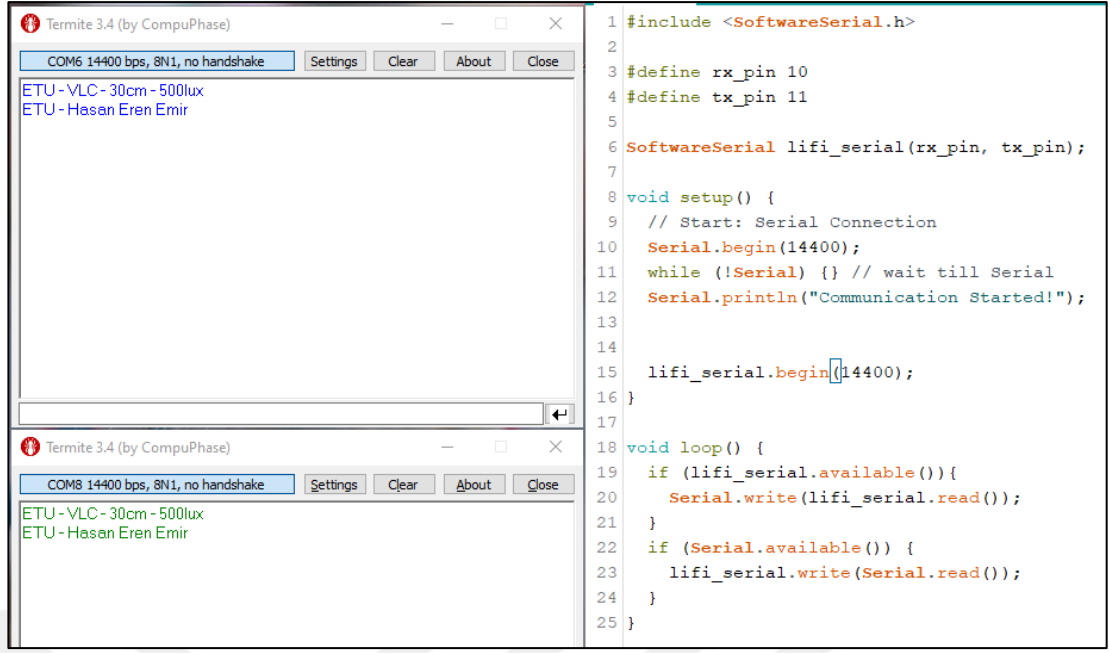
- 2) Mesafe küçültülse dahi, 38.400bps üzerinde veri iletişimi gerçekleştirilememiştir.

4.4.3. 500lux aydınlatma altında test

Yaklaşık 500lux’lük iyi aydınlatmalı bir mekanda hem VLC hem de IRLC sistemleri, farklı alıcı – verici arası mesafelerde ve farklı iletişim hızları ile test edilmiştir (COM6 verici, COM8 alıcı portunu ifade etmektedir).

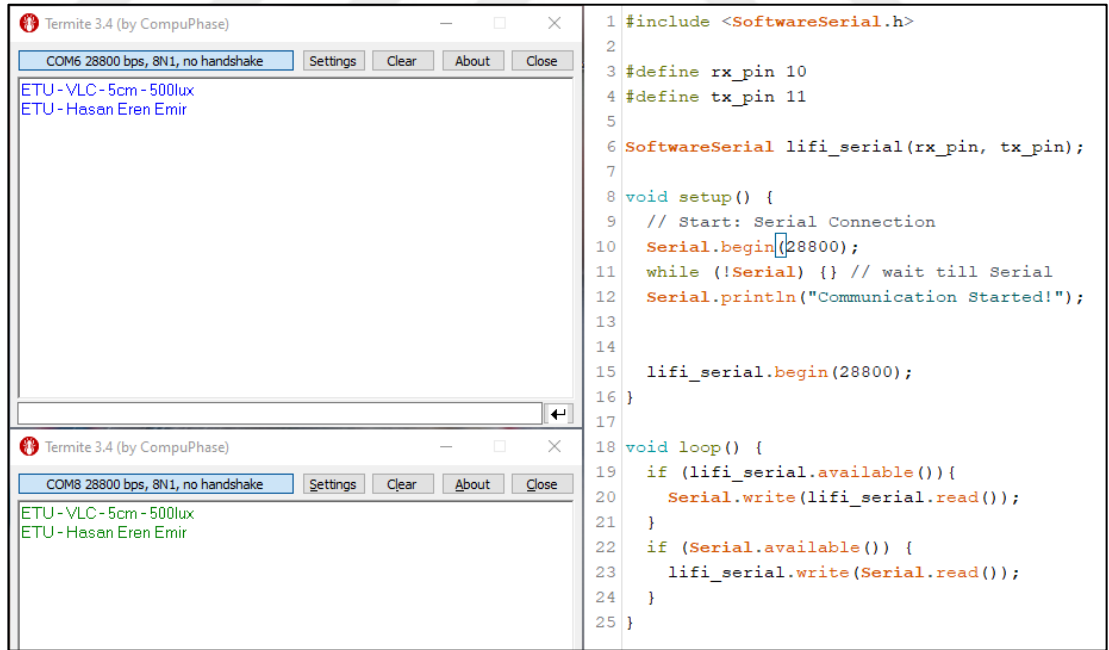
Bu test sonucunda VLC sistemi;

- 1) Şekil 4.22. de görüleceği üzere, maksimum 30cm mesafede, maksimum 14.400bps veri hızı ve %0 BER ile başarılı şekilde veri iletişimi sağlayabilmiştir.



Şekil 4.22. VLC sistemi, alıcı-verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 14.400bps, 500lx

- 2) Şekil 4.23. te görüleceği üzere, mesafe 5cm ye kadar küçültüldüğünde, %0 BER in korunduğu maksimum iletişim hızının 28.800bps olduğu gözlemlenmiştir.

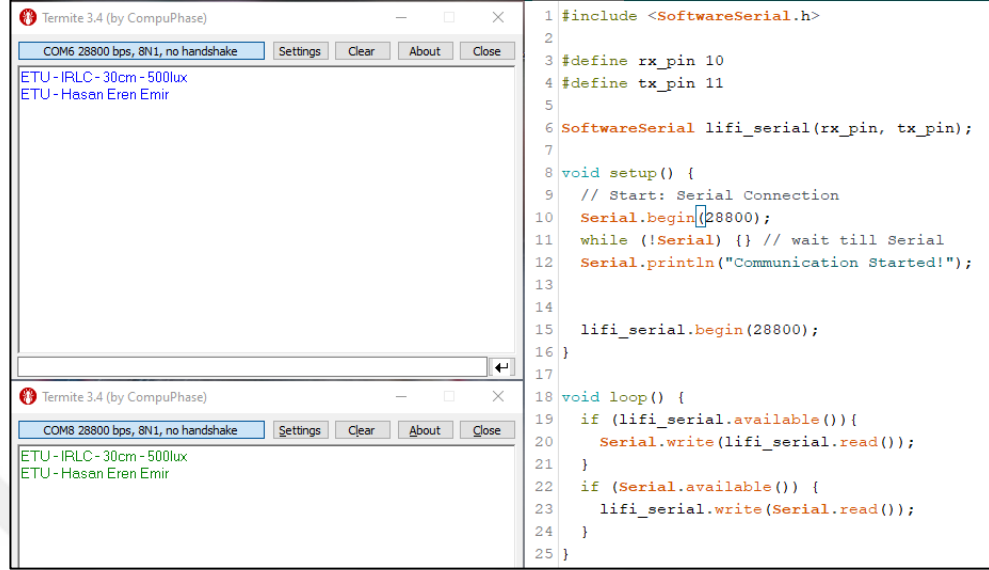


Şekil 4.23. VLC sistemi, alıcı-verici arası mesafe 5cm, iletişim hızı 28.800bps, 500lx

Aynı ortamda IRLC sistemi VLC sistemine nazaran daha iyi performans sergilemiştir;

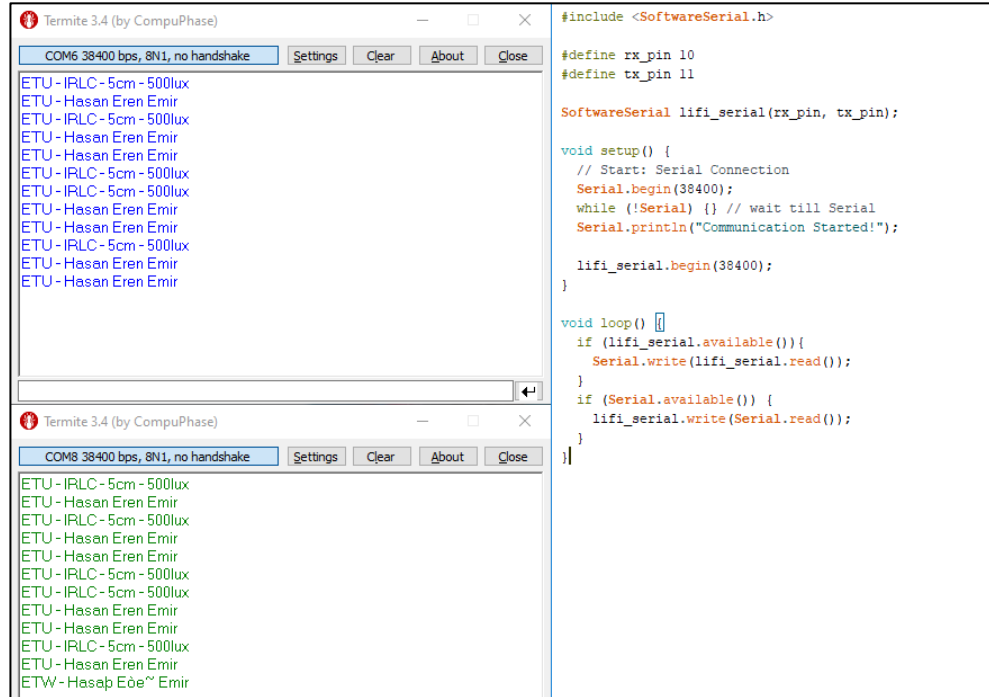
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

- 1) Şekil 4.24. te görüleceği üzere, maksimum 30cm mesafede, maksimum 28800bps veri hızı ve %0 BER ile başarılı şekilde veri iletişimi sağlayabilmiştir.



Şekil 4.24. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 30cm, iletişim hızı 28800bps, 500lx

- 2) Şekil 4.25. te görüleceği üzere, mesafe 5cm ye kadar küçültüldüğünde, 38.400bps iletişim hızına ulaşılmış, ancak gönderilen birçok data paketi arasından çok küçük bir miktarda bozulma olduğu gözlemlenmiştir. %2,4859 BER hesaplanmıştır.



Şekil 4.25. IRLC sistemi, alıcı–verici arası mesafe 5cm, iletişim hızı 38.400bps, 500lx

4.4.4. Çıktıların karşılaştırılması

Çizelge 4.1. 50lx aydınlatma altında IRLC – VLC iletişim hızları, mesafe ve BER karşılaştırması.

50lx	Mesafe	Baudrate	BER	Durum
VLC	30cm	38.400bps	%0	Başarılı
IRLC	30cm	38.400bps	%0	Başarılı
VLC	30cm	57.600bps	%72,3214	Başarısız
IRLC	30cm	57.600bps	%65,5660	Başarısız

Alıcı–verici arası 30cm mesafede ve 50lux lük düşük aydınlatma koşulları altında VLC ve IRLC sistemi benzer sonuçlar vermiştir. Kullanılan mikrodenetleyici ve devre elemanları ile maksimum 38.400bps veri aktarım hızına ulaşılmıştır.

Çizelge 4.2. 300lx aydınlatma altında IRLC – VLC iletişim hızları, mesafe ve BER karşılaştırması.

300lx	Mesafe	Baudrate	BER	Durum
VLC	30cm	19.200bps	%0	Başarılı
IRLC	30cm	38.400bps	%0	Başarılı
VLC	10cm	28.800bps	%0	Başarılı
IRLC	10cm	38.400bps	%0	Başarılı

300lux aydınlatma altında, alıcı–verici arası mesafe 30cm ve 10cm olacak şekilde yapılan deneyde %0 BER’i koruyacak şekilde, IRLC sistemi VLC sistemine nazaran daha yüksek iletişim hızında veri iletişim gerçekleştirmiştir.

Alıcı–verici arası mesafe küçültüldüğünde VLC sistemi performansında iyileşme gözlenmiş, ancak kullanılan mikrodenetleyici ve devre elemanları ile maksimum 38400bps veri aktarım hızına ulaşılabildiği için IRLC sisteminde bu iyileşme gözlenememiştir.

Çizelge 4.3. 500lx aydınlatma altında IRLC – VLC iletişim hızları, mesafe ve BER karşılaştırması.

500lx	Mesafe	Baudrate	BER	Durum
VLC	30cm	14.400bps	%0	Başarılı
IRLC	30cm	28.800bps	%0	Başarılı
VLC	5cm	28.800bps	%0	Başarılı
IRLC	5cm	38.400bps	%2,4859	Kısmen Başarılı

500lux aydınlatma altında, alıcı–verici arası mesafe 30cm olacak şekilde yapılan deneyde %0 BER’i koruyacak şekilde, IRLC sistemi VLC sistemine nazaran daha yüksek hızlarda veri iletişimi gerçekleştirmiştir.

Sistem kararlılığının test edilmesi için tüm deneylerde veri paketleri tekrar tekrar gönderilerek BER değerleri incelenmiş ve Çizelge 4.1., Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3. buna göre oluşturulmuştur.

Mesafe 5cm ye düşürüldüğünde hem IRLC hem de VLC sisteminin iletişim hızları artmıştır. IRLC sistemi bu durumda da daha iyi performans sergilemiştir. Ancak sistem kararlılığı testi için veri paketleri tekrar tekrar gönderildiğinde BER değeri zaman zaman yaklaşık %2,5 e yükselmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Literatürde yapılan çalışmalar VLC sistemlerini kablosuz iletişim teknolojileri ile kıyaslamakta ve VLC'nin performansını, verimini ve kararlılığını artırmaya yönelik olmaktadır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada VLC sistemlerinin sorunlarını giderecek ve VLC yerine kullanılabilecek yeni bir optik iletişim alternatifi incelenmiştir.

“Li-Fi sistemlerinde gün ışığının bozucu etkilerini azaltmak için kızılötesi alıcı – verici kullanımı” önerisi hem teorik hem de deneysel çalışmalarla test edilmiştir. Elde edilen bulgulardan hareketle;

- İstenilen özelliklerde IR alıcı – verici kullanılamamasına rağmen, aynı koşullar altında, IRLC sistemlerinin VLC sistemlerine oranla daha iyi performans sergilediği ve VLC de belirtilen problemlere çözüm sunduğu gözlemlenmiştir.
- VLC’ de ortam aydınlatması güçlendikçe %0 BER’i korumak için veri aktarım hızı azaltılmaktadır. %0 BER’de veri aktarım hızını sabit tutmak veya yükseltebilmek için alıcı – verici arasındaki mesafenin kısaltılması gerekmektedir.
- IRLC’de ortam aydınlatması güçlendikçe veri aktarım hızı ve BER değeri VLC’ ye oranla çok daha az etkilenmektedir. Veri aktarım hızı ve BER mesafeye bağlı olarak yükselmektedir.

VLC teknolojisinin IRLC teknolojisine karşı en büyük avantajı, hali hazırda kurulu olan aydınlatma sistemlerine entegrasyon sağlayarak maliyeti minimum düzeyde tutmasıdır. Ancak gün ışığından etkilenme probleminden olumsuz etkilenen olan VLC’nin, kararlılığını ve performansını iyileştirici ek devrelere ihtiyaç duyulabileceği bu çalışmada fark edilmiştir. Bu ek devrelerin ortaya çıkaracağı maliyet, VLC’nin maliyet avantajını azaltmaktadır.

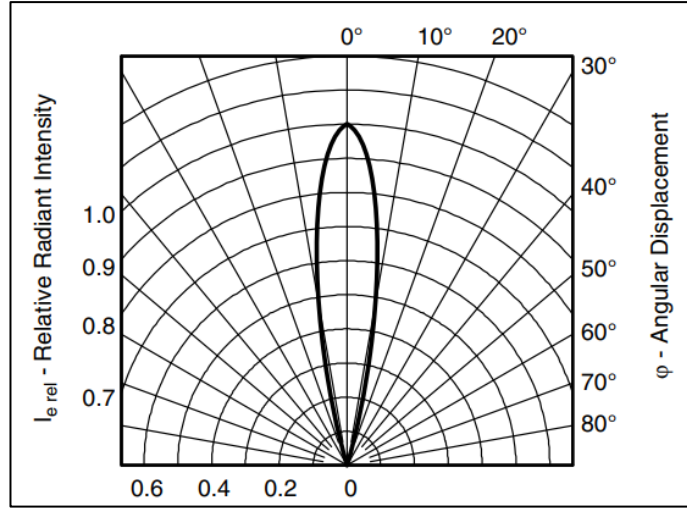
Bir iletişim sisteminin, kalitesini, verimini ve performansını elbette sadece taşıyıcı sinyal frekansı / anahtarlama frekansı ile ölçmek mantıklı ve doğru bir yaklaşım değildir.

Bunun yanında kullanılacak elektronik komponentlerin limitleri, modülasyon tekniği, iletim ortamı, girişim ve parazit gibi birçok parametrenin etkisi vardır. Nitekim, bu çalışmada kullanımı uygun bulunan, 1.400nm IR alıcı – verici çifti ile gerçekleştirilecek bir sistemin yüzlerce THz mertebesinde veri iletimi gerçekleştirmesi, günümüz şartlarında başta elektronik komponentlerin limitlerini aşmaktadır. Ancak, gelecekte bu limitlerin genişletilmesi ve yeni tekniklerin keşfi sağlandıkça, IRLC sistemleri tam kapasitesi ile çalışabilir hale gelecektir. Günümüz şartlarında ise radyo veya mikrodalga sinyallerin kullanılamadığı alanlarda sağladığı yeniliklerle ve üstelik taşıyıcı frekansının limitlerini de ciddi derecede genişletmiş, güçlü bir alternatif ortaya çıkmaktadır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada kullanımı uygun bulunan 1.400nm IR alıcı – verici (LED) çiftinin üretimi genellikle özel amaçlar (tıbbi kullanım gibi) için olmaktadır. Dolayısıyla, bu komponentlere erişmek zor ve maliyetli olmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışma bölümünde istenilen değerlerde komponent kullanılamamıştır. Gelecek çalışmalarda belirtilen komponentlere daha kolay erişilebilmesi halinde, daha yüksek hassasiyetli sonuçlara ulaşabilmek için, bu çalışmanın tekrarlanıp veya geliştirilip uygulanması önerilmektedir.

1.400nm dalga boylu lazerlere ulaşmak, LED'lere ulaşmaktan nispeten daha kolaydır. Ancak lazerlerin karakteristiği gereği yaptıkları emisyon LED'lere nazaran daha noktasal olmaktadır. Dolayısıyla, veri iletişimi için lazer kullanılan sistemlerde alıcı – verici çiftinin çok daha hassas konumlandırılması veya verici sayısının ciddi oranda artırılması gerekmektedir. Son kullanıcı cihazlarında hassas konumlandırma işleminin yapılması kullanımı oldukça olumsuz etkileyeceğinden veya verici sayısının artırılması maliyeti artıracığından Li-Fi sistemlerinde doğrudan lazer kullanımı önerilmemektedir. Bunun yerine lazer verici önüne difüzör ve lensler konularak LED'lerde görülen spontane emisyonla benzer şekilde daha geniş açılara ulaşan emisyonla bu sorunun önüne geçilmesi sağlanabilir.



Şekil 5.1. TSAL6100 IR LED' in açısal ışıma diyagramı

Şekil 5.1. de görüldüğü üzere, deney düzeneğinde kullanılan TSAL6100 IR LED'in spot açıklığı dardır. Bundan dolayı, deney esnasında odaklama ihtiyacı görülmüştür. Odaklama ihtiyacını gidermek için gelecek çalışmalarda daha geniş açılarda emisyonu olanak sağlayan LED'lerin kullanımı önerilmektedir.

Arduino Nano mikrodenetleyici kartının, küçük boyutu, düşük maliyetli oluşu, kolay programlanabilmesi gibi avantajlarına rağmen saat frekansı 16MHz ile sınırlıdır. Gelecek çalışmalarda daha yüksek iletişim hızlarına ulaşılabilmesi için daha yüksek saat hızları sunabilen kontrolcü tercih edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonymous, 2015. Web Sitesi: <https://www.physics-and-radio-electronics.com>, Erişim Tarihi: 07.05.2022
- Anonymous, 2018. Web Sitesi: <https://www.ledsmagazine.com>, Erişim Tarihi: 12.05.2021
- Anonymous, 2019. Web Sitesi: <https://horizonsoptical.com/infrared-radiation-lenses>, Erişim Tarihi: 20.04.2021
- Anonim, 2018. Web Sitesi: <https://www.bariscelik.com>, Erişim Tarihi: 20.06.2022
- Anonim 2019. Web Sitesi: <https://www.yalova.edu.tr>, Erişim Tarihi: 16.10.2021
- Anonim, 2022. Web Sitesi: <https://acikders.tuba.gov.tr>, Erişim Tarihi: 20.07.2022
- Bao, X., Yu, G., Dai, J., Zhu, X. 2015. Li-Fi: Light fidelity-a survey. Wireless Networks, 21(6), 1879-1889.
- Bell, A. G. 1880. On the Production and reproduction of sound by light. American Journal of Science (1880-1910), 20(118), 305.
- Chi, Y. C., Hsieh, D. H., Lin, C. Y., Chen, H. Y., Huang, C. Y., He, J. H., Lin, G. R. 2015. Phosphorous diffuser diverged blue laser diode for indoor lighting and communication. Scientific reports, 5(1), 1-9
- Dinesh, S. ve Chourasia, B. 2021. Light fidelity (li-fi) technology: will it be an eco-friendly for monitoring the covid-19 patients in hospital. 2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), 7, 234–238. <https://doi.org/10.1109/ICACITE51222.2021.9404680>
- Egjam, A. ve Zarka, N. 2015. Light fidelity (Li-Fi) technology. April. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1440.0080>
- Franks, J. K. 1991. What is eye safe in eyesafe lasers: Components, Systems, and Applications SPIE (2-8), 1419
- Haas, H. 2015. Visible light communication. Optical Fiber Communication Conference, Tu2G.5. <https://doi.org/10.1364/OFC.2015.Tu2G.5>
- Haas, H. 2018. LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. Reviews in Physics, 3, 26-31.
- Karthika, R. ve Balakrishnan, S. 2015. Wireless communication using Li-Fi technology. International Journal of Electronics and Communication Engineering, 2(3), 32-40. <https://doi.org/10.14445/23488549/ijece-v2i3p107>
- Lee, K., Park, H. Barry, J. R. 2011. Indoor channel characteristics for visible light communications. IEEE Communications Letters, 15(2), 217-219.

- Leba, M., Riurean, S. & Lonica, A. 2017. LiFi — The path to a new way of communication. 2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Vlc, 1–6. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2017.7975997>
- Netsianda, R. E., Ouahada, K. ve Ndjiongue, R. A. 2017. Comparative study of different modulations for visible light communications. Sixth International Conference on Advances in Computing, Control and Networking – ACCN, 44–47 <https://www.doi.org/10.15224/978-1-63248-117-7-10>
- Sofia, C., Salim, A. 2020. Design and realization of a visible light communication system for Li-Fi application. CCSSP 2020 - 1st International Conference On Communications, Control Systems and Signal Processing, 30–35, <https://doi.org/10.1109/CCSSP49278.2020.9151780>
- Söderberg, P. G., Talebizadeh, N., Yu, Z., Galichanin, K. 2016. Does infrared or ultraviolet light damage the lens. Eye, 30(2), 241-246.
- Tsonev, D., Videv, S., Haas, H. 2014. Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking. In Broadband Access Communication Technologies VIII, SPIE, 9007–900702
- Yaqub, H., Misbah, M., Mahjabeena, R., And, S. ve Pervez, S. 2016. LiFi : The future for indoor wireless data lifi : the future for indoor wireless data communication. International Journal of Scientific & Engineering Research, 7(8), 823–829.