



**Li-Fi ALICI VE VERİCİ SİSTEMİ
TASARIMI**

Bengüsu Alkım BALTAKESMEZ

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

**2021
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Li-Fi ALICI VE VERİCİ SİSTEMİ TASARIMI

Bengüsu Alkım BALTAKESMEZ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2021

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.

25 / 06 / 2021

Bengüsu Alkım BALTAKESMEZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Li-Fi ALICI VE VERİCİ SİSTEMİ TASARIMI

Bengüsu Alkım BALTAKESMEZ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

VLC, görünür ışık iletişiminin kısaltmasıdır ve görünür ışığı yüksek hızlı iletim ortamı olarak kullanan tüm teknolojileri kapsamaktadır. Light Fidelity (Li-Fi) teknolojisi, Wireless Fidelity (Wi-Fi) teknolojisine meydan okuyan bir kablosuz görünür ışık iletişim teknolojisidir. Li-Fi, radyo frekans (RF) spektrumunun bant genişliğinin sınırlı olması ve yüksek veri hızları talebini karşılayamaması sebebiyle Wi-Fi kısıtlamalarına bir çözüm olarak kabul edilir. Bu tez çalışmasında, kullanıma hazır elektronik bileşenler ve iki Arduino kartı kullanılarak metin verilerini iletebilen üç farklı Li-Fi alıcı-verici devresi tasarlanmıştır. Arduino kartlarının her biri, bir alıcı-verici (Rx / Tx) olarak kullanılmıştır. Verici kısım, beyaz ışık yayan diyotun (LED) insan gözü tarafından fark edilemeyecek kadar hızlı yanıp sönmeye ile verileri aktarırken, alıcı kısım bir fotodiyot vasıtasıyla verileri yakalamaktadır. Bu özellik, LED'lerin hem aydınlatma hem de iletişim sağlama amaçlarına hizmet edebileceği anlamına gelmektedir. Veriler, bir bilgisayardan diğer bir bilgisayara UART seri iletişimi kullanılarak iletilmektedir. Çalışmada, kullanılan devre topolojisine göre haberleşme hızlarının değiştiği gözlemlenmiştir.

2021, 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: Light Fidelity (Li-Fi), Görünür Işık İletişimi (VLC), Işık Yayan Diyot (LED)

ABSTRACT

MS. Thesis

DESIGN OF A Li-Fi RECEIVER AND TRANSMITTER SYSTEM

Bengüsu Alkım BALTAKESMEZ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

VLC is the abbreviation of visible light communication and covers all of technologies that use visible light for a high-speed transmission medium duty. The Light Fidelity (Li-Fi) technology is a wireless visible light communication technology that challenges the Wireless Fidelity (Wi-Fi). Li-Fi is considered a solution to Wi-Fi restrictions due to the limited bandwidth of the Radio Frequency (RF) spectrum and the inability to meet the demand for high data rates. In this thesis, three different Li-Fi transceiver circuits that can transmit text data using ready-to-use electronic components and two Arduino cards were designed. Each of the Arduino cards was used in a (Rx / Tx) transceiver function. The transmitting part transmits data by flashing a white light emitting diode (LED) too fast to be noticed by the human eye, while the receiving part captures data via a photodiode. This means that LEDs can serve both lighting and communication purposes. Data is transmitted from one computer to another computer using UART serial communication. It was observed that communication rates changed according to the circuit topology used in this study.

2021, 65 page

Keywords: Light Fidelity (Li-Fi), Visible Light Communication (VLC), Light Emitting Diode (LED)

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini ve zamanını benden esirgemeyerek her fırsatta çalışmamla ilgilenen, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım, saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte kendisine ne zaman danışsam bana faydalı olabilmek için elinden geleni yapan, bilgi ve tecrübesiyle çalışmama katkı sağlayan saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu yola beraber çıktığım, çalışma arkadaşlarım Ahmet YILMAZ ve Büşra AYDIN’a ve ayrıca tez yazım sürecinde desteğini gördüğüm arkadaşım Yasin NUHOĞLU’na çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım esnasında tüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan ETÜ Kristal Girişimcilik Merkezi’ne teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren hayattaki en büyük şansım, aileme teşekkür ederim.

Bengüsu Alkım BALTAKESMEZ
Haziran 2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tarihçe.....	2
1.2. Li-Fi Teknolojisi	3
1.2.1. Li-Fi teknolojisinin uygulama alanları.....	5
1.2.2. Li-Fi teknolojisinin avantajları.....	8
1.2.3. Li-Fi teknolojisinin dezavantajları	11
1.2.4. Li-Fi ve Wi-Fi karşılaştırması.....	12
2. KAYNAK ÖZETLERİ	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM	23
3.1. LED (Işık Yayan Diyot).....	23
3.2. Fotodiyot	28
3.3. Arduino Kartı	32
3.4. VLC (Görünür Işık İletişimi)	33
3.5. Li-Fi çalışma prensibi	38
3.5.1. Li-Fi modülasyon teknikleri.....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	44
4.1. Sistem Dizaynı	44
4.2. Devre Şeması	44
4.3. Alıcı ve Verici Devre Tasarımı	45
4.4. Sistem Uygulaması	48
4.5. Sistem Testi ve Sonuçlar	49
4.6. Sistemin Farklı Alıcı Devreler ile Uygulanması ve Sonuçlar	52
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

Bps	Saniyede bit sayısı
c	Işık hızı
E	Foton enerjisi
Eg	Yasak enerji bant aralığı
eV	Elektron volt
h	Planck sabiti
Hz	Hertz
V	Voltaj değeri
λ	Dalga boyu
ν	Foton frekans
Ω	Ohm

Kısaltmalar

ADC	Analog Dijital Dönüştürücü (Analog to Digital Converter)
AES	Gelişmiş Şifreleme Standardı (Advanced Encryption Standard)
ASCII	Bilgi Değişimi İçin Amerikan Standart Kodlama Sistemi (American Standard Code for Information Interchange)
ASK	Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (Amplitude Shift Keying)
CBC	Şifreleme Bloğu Zincirleme (Cipher Block Chaining)
CSK	Renk Kaydırma Modülasyonu (Colour Shift Keying)
DAC	Dijital Analog Dönüştürücü (Digital to Analog Converter)
DC	Doğru Akım
FOV	Görüş Alanı (Field of View)
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array)
GPS	Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
ICSP	Devre Seri Programlama (In-Circuit Serial Programming)

IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IR	Kızılötesi (Infrared)
IrDA	Kızılötesi İletişim Teknolojisi (Infrared Data Association)
LAZER	Işınının Uyartılmış Emisyon Yoluyla Yükseltilmesi (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
LCD	İnce tabakalı transistör- sıvı kristal ekran (Thin-Film-Transistor Liquid-Crystal Display)
LED	Işık Yayan Diyot (Lighting Emitting Diode)
Li-Fi	Light-Fidelity
LOS	Görüş Mesafesi (Line of Sight)
LSB	En Küçük Değerlikli Bit (Least Significant Bit)
MCM	Çoklu Taşıyıcı Modülasyonu (Multi Carrier Modulation)
MSB	En Büyük Değerlikli Bit (Most Significant Bit)
OF	Optik Fiber
OFDM	Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OOK	Açma-Kapama Anahtarlama (On-Off Keying)
OTA	İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (Operational Transconductance Amplifier)
PAM	Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation)
PC	Kişisel Bilgisayar (Personal Computer)
PPM	Darbe Pozisyonu Modülasyonu (Pulse Position Modulation)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
SCM	Tek Taşıyıcı Modülasyonu (Single Carrier Modulation)
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
TED	Teknoloji, Eğlence, Dizayn (Technology, Entertainment, Design)
TTL	Transistör-Transistör Lojik (Transistor–Transistor Logic)
UART	Donanım Seri Bağlantı Noktası (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
USB	Evrensel Seri Veriyolu (Universal Serial Bus)
VLC	Görünür Işık İletişimi (Visible Light Communications)
Wi-Fi	Wireless-Fidelity

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bir sunucudan son kullanıcı cihazlara giden veri yolunu gösteren mevcut altyapıda Li-Fi uygulaması.....	4
Şekil 3.1. LED'in yapısı	23
Şekil 3.2. LED'lerin spektrum karakteristikleri.....	25
Şekil 3.3. LED'in akım – gerilim karakteristiği	26
Şekil 3.4. LED'in ışımaya diyagramı	27
Şekil 3.5. Akım- ışık şiddeti karakteristiği	27
Şekil 3.6. Fotodiyot polarlanması, devresi ve simgesi.....	30
Şekil 3.7. Tipik bir fotodiyotun ters akım- ışık yoğunluğu grafiği.....	31
Şekil 3.8. Tipik bir fotodiyotun I-V grafiği	31
Şekil 3.9. Arduino Uno kartı.....	32
Şekil 3.10. Arduino Uno üzerindeki dijital pinler	33
Şekil 3.11. Elektromanyetik spektrum bölgeleri.....	33
Şekil 3.12. VLC sisteminin şematik gösterimi	35
Şekil 3.13. OOK modülasyon tekniği.....	41
Şekil 4.1. Li-Fi veri iletim sistemi blok şeması	44
Şekil 4.2. Alıcı ve verici devresi proteus çizimi	45
Şekil 4.3. Li-Fi verici devresi	46
Şekil 4.4. Li-Fi birinci alıcı devresi	47
Şekil 4.5. Delikli plaketa üzerinde alıcı ve verici devre	47
Şekil 4.6. Laboratuvar ortamında Li-Fi alıcı-verici sistemi kurulumu	48
Şekil 4.7. Gönderilen metin verisi	49
Şekil 4.8. Alınan metin verisi	50
Şekil 4.9. Gönderilen ve alınan dijital sinyallerin proteus görüntüsü.....	51
Şekil 4.10. Gönderilen ve alınan dijital sinyallerin osiloskop görüntüsü	51
Şekil 4.11. İkinci alıcı devre proteus çizimi	52
Şekil 4.12. Li-Fi ikinci alıcı ve verici devresi.....	53
Şekil 4.13. İkinci sistemde gönderilen metin verisi.....	53
Şekil 4.14. İkinci sistemde alınan metin verisi	54
Şekil 4.15. İkinci sistemde gönderilen ve alınan dijital sinyallerin osiloskop görüntüsü.....	54

Şekil 4.16. Üçüncü alıcı devre proteus çizimi	56
Şekil 4.17. Li-Fi üçüncü alıcı ve verici devresi	56
Şekil 4.18. Üçüncü sistemde gönderilen metin verisi.....	57
Şekil 4.19. Üçüncü sistemde alınan metin verisi	57
Şekil 4.20. Üçüncü sistemde gönderilen ve alınan dijital sinyallerin osiloskop görüntüsü.....	58



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Li-Fi ve Wi-Fi karşılaştırması	12
Çizelge 3.1. Şekil 3.2 'de gösterilen spektrum karakteristiklerinin parametreleri.....	26
Çizelge 4.1. Li-Fi devreleri karşılaştırma tablosu.....	58



1. GİRİŞ

Verilerin bir yerden başka bir yere aktarılması günlük faaliyetlerin en önemlilerinden biridir. Son yıllarda, dünya çapında veri ve dijital hizmetlere olan talebin önemli ölçüde artmasıyla, küresel internet trafiği de bir o kadar artmıştır (Swacha and Ittermann 2017). İnternete eriştiğimiz mevcut kablosuz ağlar, birden fazla cihaz olma durumunda yavaşlamaktadır. İnternete bağlanan cihazların sayısı arttıkça, mevcut sabit bant genişliği, güvenli bir ağa bağlanmayı ve yüksek veri hızlarından yararlanmayı giderek zorlaştırmaktadır. Günümüzde herkes cep telefonunu, dizüstü bilgisayarını Wireless-Fidelity (Wi-Fi) sistemleri üzerinden diğer insanlarla iletişim kurmak için kullanıyor ve bu teknolojinin kullanım süresi ev, kafeler, oteller ve havalimanları gibi ortamlarda her yıl katlanarak artmaktadır. Ancak kablosuz iletişim için halihazırda kullanılan Radyo Frekansı (RF) bant genişliğinin kısıtlı olması nedeniyle kapasite düşmektedir. Bant genişliğindeki sınırlama, yüksek veri hızlarına ve çok sayıda iletişim sistemine olan talebin büyümesini destekleyememektedir (Egjam and Zarka 2015). Kablosuz iletişimin en önemli gerekliliklerinden biri geniş spektrum bandıdır. Teknolojideki ilerlemeler ve kullanıcı sayısı ile birlikte, mevcut radyo dalgası spektrumu bu ihtiyacı karşılayamamaktadır (Karthika and Balakrishnan 2015). Her ne kadar, verileri aktarmak için yüksek frekanslar kullandığımızda veri iletim sıkıntısı azalsa da bu pratik bir çözüm değildir, çünkü spektrumun bu kısmı karmaşık ekipman gerektirir ve yüksek maliyetli sistemlere neden olur. Günümüzde geliştirilen görünür ışık iletişim teknolojileri bu kısıtlamaların bazılarının üstesinden gelebilir ve yeni fırsatlar doğurabilir.

Light Fidelity (Li-Fi) adıyla ünlenecek bu yeni teknoloji 2011 yılında, optik kablosuz iletişim uzmanı Profesör Harald Haas tarafından ortaya çıkarılmış olan ve LED'den yayılan ışığa dayalı kısa menzilli bir kablosuz iletişim sistemidir. Wi-Fi'de olduğu gibi geleneksel RF taşıyıcı yerine bir sinyal taşıyıcı olarak görünür ışığı kullanılır (Swacha and Ittermann 2017). Yani Wi-Fi elektromanyetik spektrumun 2,4-5 GHz frekans bandını kullanırken, Li-Fi spektrumun 385 ile 790 THz arası frekans bandını yani görünür frekans bölgesini kullanır (Lorenz and Hamada 2020). Li-Fi, mevcut radyo dalgalarına görünür ışık spektrumundan yeni ve kullanılmamış bir bant genişliği eklediği için halihazırda kablosuz sistemlerin karşılaştığı ağır yüklerin hafifletilmesinde önemli bir rol oynayabilir. Böylece, RF iletişimlerinde mevcut olandan çok daha büyük frekans

bandı sunar. Aydınlatma ve iletişim hizmetlerinin aynı kaynaktan entegrasyonu da altyapı karmaşıklığını ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır (Albraheem et al. 2018). Li-Fi, dizüstü bilgisayarlar, akıllı telefonlar ve tabletler için verilerin bir odadaki ışık yoluyla aktarılacağı geleceğin teknolojisi olabilme potansiyeline sahiptir (Sharma et al. 2014).

1.1. Tarihçe

Optik iletişim, uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışık amplifikasyonunun (lazer) geliştirilmesine kadar fazla popülerlik kazanmamıştır. 1970 yılında, Corning Incorporated, ticari amaçlar için düşük zayıflamaya sahip olan fiber optik kabloları başarıyla geliştirmiştir. GaAs yarıiletken lazer de o dönemde uzun mesafeli iletişim için fiber optik kablolarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Optik Fiber (OF) amplifikatörünün (1980) icadı, 20. yüzyılın sonlarında telekomünikasyon alanındaki devrimin temelini oluşturmuştur. 2003 yılında ise Japonya Keio Üniversitesi Nakagawa Laboratuvarı'nda veri iletimi için LED'ler kullanılmaya başlanmıştır (Khan 2017). Bu süreç VLC teknolojisini araştırma alanı haline getirmiştir.

Genel "Li-Fi" kavramı, 1880'lerden beri görünür ışık iletişimi (VLC) terimi altında incelenmiştir. Fakat VLC, bir noktadan noktaya veri iletişim sistemidir, Li-Fi ise iki yönlü, çok kullanıcıli iletişimi içeren bir kablosuz ağ sistemidir. Li-Fi, birden fazla erişim noktası içerir, tam kullanıcı hareketliliği sağlar ve mevcut heterojen kablosuz ağlar içinde yeni bir katman oluşturur (Anonymous 2021). Li-Fi terimi ilk olarak Birleşik Krallık'taki, Edinburgh Üniversitesi'nden Profesör Harald Haas tarafından yapılan 2011'deki TED küresel konuşmasında tanıtıldı. Li-Fi fikri, TED küresel sitesinde "2011'in en iyi 50 icadından biri" olarak değerlendirildi. Bu fikri anlatan ilk proje ise D-Light projesiydi. Ocak 2010'dan Ocak 2012'ye kadar Edinburgh Dijital İletişim Enstitüsü'nde Profesör Haas tarafından finanse edildi (Egjam and Zarka 2015). Işığın olduğu her yerde veri vardır fikrinin öncüsü olan Dr. Haas TED konuşmasında masa lambası kullanarak projektöre bir çiçek videosu aktardı. Video içeriğini engellemek için ışık kaynağını eliyle bloke ederek bunu başarılı bir şekilde gösterdi (Anonymous 2011). Sistem, yaklaşık 10 Mbps'lik bir veri aktarım hızına sahipti. İki ay sonra 123 Mbps hıza ulaşıldı. Ekim 2011'de, bir dizi şirket ve endüstri grubu, yüksek hızlı optik kablosuz masa

sistemleri desteklemek ve elektromanyetik spektrumun tamamen farklı bir bölümünü kullanarak sınırlı miktardaki radyo tabanlı kablosuz spektrumun üstesinden gelmek için Li-Fi Konsorsiyumu'nu kurdu (Alao OD et al. 2016).

Li-Fi konsorsiyumunun üyeleri, optik iletişim teknolojisi alanında önde gelen uluslararası teknoloji şirketleri ve araştırma enstitüleri grubudur. Grup, akademik araştırmadan çok ürün geliştirme ve Li-Fi teknolojisinin gerçek uygulamaları ile ilgilenmektedir. 2012 yılında konsorsiyum, gigabit sınıfı iletişim ve Li-Fi bulutu gibi farklı optik iletişim türleri için bir yol haritası belirledi. Ağustos 2013'te adını daha sonra PureLiFi olarak değiştiren PureVLC, tek renkli bir LED üzerinde 1,67 Gbps'ye kadar veri hızı gösterdi. Yıl sonuna kadar yeşil, kırmızı ve mavi kanalların her birinde 2 Gbps'ye ulaşmayı bekliyorlardı. Nisan 2014'te Rus şirketi "Stins Coman" tarafından geliştirilen BeamCaster modülü 1.25 Gbps veri hızı sağladı. Aynı yıl, Li-Fi veri hızında büyük bir iyileştirme, LED lambaları kullanarak 10 Gbps'ye kadar hızda veri aktarımı, Meksikalı yazılım geliştirme şirketi Sisoft tarafından elde edildi. 2015 yılında Edinburgh Üniversitesi'ndeki Li-Fi merkezi, alıcıları zayıf sinyaller için daha hassas hale getirerek uzun mesafeli optik iletişim için bir çözüm buldu. Aynı yıl, Prof. Haas, LED ışık ve güneş pilleri kullanarak internet verilerinin iletilmesini gösterdiği yeni bir TED konuşması yaptı. Bu teknolojinin ilerlemesi her geçen gün artıyor. Görüldüğü gibi, birkaç endüstriyel grup bu teknolojiyi geliştirmek ve Li-Fi ürünlerini tanıtmak için çalışmaktadır (Alfattani 2018).

1.2. Li-Fi Teknolojisi

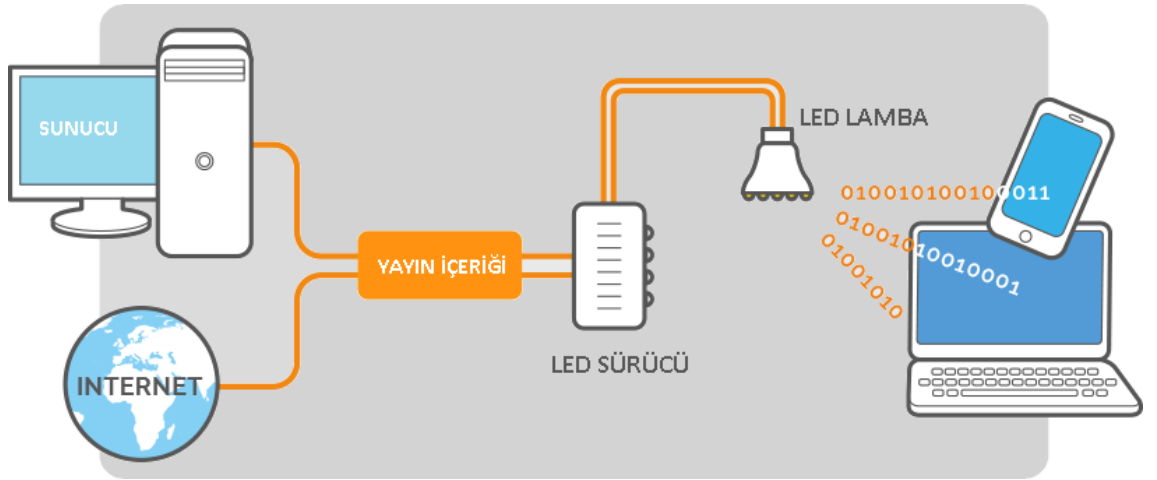
Li-Fi terimi, ışık doğruluğu anlamına gelen bir kısaltmadır. Terim, Wi-Fi teknolojisinin optik versiyonunu temsil edecek şekilde seçilmiştir. Dijital veriyi modüle etmek ve bir anten aracılığıyla iletmek için RF bandını kullanmak yerine, veriler ışık frekansı bandında modüle edilmekte ve LED ışığı yoluyla gönderilmektedir (Alfattani 2018).

Li-Fi teknolojisi, aydınlatma ve veri iletimi için LED ampuller kullanan bir VLC teknolojisidir. VLC, iletişim için görünür ışığı kullanan bir veri iletişim sistemidir. Elektromanyetik spektrumda 380 nm'den 750 nm'ye kadar olan bandı kaplar bu da 430–

1. GİRİŞ

790 THz frekans spektrumuna karşılık gelir. Görünür ışık spektrumu, RF spektrumundan 10.000 kat daha büyük olduğundan, VLC, RF bant genişliği sınırlamalarına bir çözüm olarak kabul edilir. RF bandının en büyük kısıtlarından biri, sınırlı bant genişliği nedeniyle kablosuz iletişim ve yüksek veri hızlarının büyük talebini karşılayamamaya neden olan “**spektrum krizi**” dir. Dahası, parazit sorunları, düşük veri oranları ve insan güvenliği endişeleri, RF bandının diğer önemli sorunlarıdır. Bu nedenle, alternatifleri keşfetmek bir zorunluluktur ve Li-Fi bu amaç için uygun bir aday olarak sunulmuştur (Albraheem et al. 2018).

Ek olarak VLC, yüksek bant genişliği yanı sıra ultra hızlı veri iletimi sunduğu için de radyo frekansları üzerinde üstünlüğe sahiptir. Işığın saniyede 300.000 km gittiği göz önüne alındığında, ışık kaynağı yoluyla iletişim neredeyse anlıktır. Her veri türü, düşük veya yüksek sinyaller olarak deşifre edilebilen tek bir ve sıfırlara bölünebilir. VLC'nin çalışması için bir alıcı, bir verici ve iletişim kanalı gerekir. Görünür ışık spektrumunda çalışan LED, aydınlatma ve iletişimin ikili amacına hizmet ederek, VLC'yi iç ve dış mekân kablosuz iletişimde tercih edilen bir seçenek haline getirmiştir (Singh 2020). Şekil 1.1'de Li-Fi sisteminin uygulama şematığı gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Bir sunucudan son kullanıcı cihazlara giden veri yolunu gösteren mevcut altyapıda Li-Fi uygulaması (Sezer et al. 2020)

1.2.1. Li-Fi teknolojisinin uygulama alanları

Li-Fi, radyo dalgalarının veri aktarımı için kullanılmadığı veya radyo frekanslarına duyarlılığın sorun teşkil ettiği herhangi bir duruma çözüm olarak kullanılabilir. Ayrıca çok fazla kullanıcının Wi-Fi kullandığı yüksek yoğunluklu kablosuz iletişimin olduğu bölgelerde bir alternatif olarak da düşünülebilir. Bu durumda kullanıcılar düşük erişim hızlarına sahip olacaktır. Li-Fi, Wi-Fi yükünün bir kısmını paylaşmak için de kullanılabilir. Li-Fi teknolojisi iç mekân kablosuz iletişim ve veri iletimi için çok uygundur (Sarkar et al. 2015).

Mobil bağlantı

Li-Fi, özellikle video ve ses indirmeleri, canlı akış gibi pek çok popüler internet içeriği için uygundur. Li-Fi kullanılarak, akıllı telefonlar, tabletler, dizüstü bilgisayarlar ve diğer mobil cihazlar doğrudan birbirine bağlanabilir. Kısa menzilli bağlantılar kullanmak çok yüksek veri hızları ve güvenlik sağlar (Perwej 2017).

Sağlık hizmetleri

Radyasyona ilişkin endişeler nedeniyle, ameliyathaneler Wi-Fi'ye izin vermez çünkü bilgisayarlardan ve cep telefonlarından yayılan radyasyon tıbbi ekipmanları olumsuz etkileyebilir. Li-Fi, hasta sağlığını tehlikeye sokan bu sorunları çözer. Işıklar, ameliyathanelerin önemli bir kısmını oluşturduğundan modern tıbbi aletler için Li-Fi uygulanabilir. Dahası, Li-Fi elektromanyetik parazit yaymadığı için herhangi bir tıbbi cihazla parazit oluşturmaz (Sarkar et al. 2015).

Eğitim sistemi

Li-Fi, dünyada çapında okullar ve kolejler için hızla zorunlu hale gelen yeni akıllı sınıf teknolojisinde uygulama bulabilir. Bu teknolojiyi kullanarak, öğretmenler sınıfa geniş bir ekranda 2D / 3D bir animasyon gösterebilir. Farklı konuları açıklayabilir, önemli ayrıntıları göstermek için yakınlaştırabilir ve uygun vurgu için dondurup açıklama ekleyebilirler. Çocuklar neyin, nerede, ne zaman ve nasıl olduğu konusunda görsel girdi

alır ve kavramlar iyice anlaşılabilir. Li-Fi tabanlı akıl sınıflar için iletim kaynağı olarak yüksek parlaklıkta beyaz LED, alıcı olarak bir silikon fotodiyot ve sunucu olarak akıllı sınıf için ihtiyaç duyulan tüm verileri depolayan bir veri tabanı yeterlidir. Etkileşimli pano bir giriş cihazı ve monitör görevi görerek, panele dokunmak suretiyle uygulamayı kontrol etmemizi sağlar. Bilgisayar, akıllı sınıf uygulamalarını yükler ve etkileşimli tahtaya, sunucuya ve projektöre bağlanır. Projektör görüntüyü interaktif olarak tahtaya yansıtır (Sarkar et al. 2015).

Havayolları ve havacılık

Pilotların seyir sistemlerine müdahale edebileceği için radyo dalgalarını kullanan Wi-Fi uçaklarda yasaktır. Uçak ışıklarının Li-Fi özellikli kurulumu, herhangi bir elektromanyetik girişim olmaksızın yolculara yüksek hızlı bağlantı sağlamak için imkân sağlar. Li-Fi, uçağın içinde bulunan baş üstü okuma lambası gibi ışık kaynakları aracılığıyla internet sağlayabilir yani uçakta, tepe lambaları veri iletimi için kullanılabilir (Alao OD et al. 2016). Ayrıca Li-Fi kullanımı aşırı kablolamayı da azaltacaktır (Yaqub et al. 2016).

Sualtı uygulamaları

Sudaki güçlü sinyal Emilimi nedeniyle, RF kullanımı bu ortamlar için uygun değildir. Sualtı uzaktan kumandalı araçları, güçlerini sağlayan ve pilotlarından sinyal almalarına izin veren büyük kablolarla çalışır. Ancak bu araçlarda kullanılan kablo bağlantıları, araçların daha geniş alanları keşfetmelerine izin verecek kadar uzun değildir. Kabloların yüksek güçlü bir lambadan gelen ışıkla değiştirilmesi onların daha özgürce dolaşmalarını sağlar. Farlarını birbirleriyle iletişim kurmak, verileri otonom olarak işlemek ve bulgularını periyodik olarak yüzeye göndermek için kullanabilirler. Li-Fi, su altı gibi Wi-Fi'nin tamamen devre dışı kaldığı yerlerde bile çalışabilir (Alao OD et al. 2016).

Trafik yönetimi

Li-Fi, araçların farlarına, arka lambalarına ve trafik ışıklarına LED ışıklar olarak entegre edilmek üzere kullanılabilir. Arabalar arasında iletişim kurulabilir ve bilgi alışverişi yapılarak kazalar önlenir. Bu, akıllı ulaşım trafik sistemi, daha fazla yol güvenliği ve trafik kontrolü ile sonuçlanacaktır (Rabia et al. 2020).

Afet yönetimi

Deprem veya tsunami gibi kriz veya afet durumlarında Li-Fi, özellikle metro istasyonları ve tüneller gibi ölü bölgelerdeki insanlara acil durum iletişimi sağlamak için daha etkin bir şekilde kullanılabilir. Li-Fi ampuller, caddenin her köşesinde uygun maliyetli yüksek hızlı internet erişimi sağlayabilen sokak lambası olarak kullanılabilir. Li-Fi teknolojisinin kullanımıyla doğal afetten sonra iletişim sistemi canlı tutulabilir (Rabia et al. 2020).

Enerji santralleri ve tehlikeli ortamlar

Her türlü radyasyon, enerji santrallerinde kullanılmak için tehlikelidir. Li-Fi, radyasyon veya elektromanyetik girişim dezavantajı olmadan şebeke bütünlüğü, talep ve çekirdek sıcaklığı gibi parametreleri izlemek amacıyla birbirine bağlı veri sistemlerine hızlı erişim sağlamak için kullanılabilir (Rabia et al. 2020). Li-Fi, petrokimya tesisleri ve madenler gibi ortamlarda radyo dalgalarından kaynaklanan elektromanyetik girişime güvenli bir alternatif sunar (Sarkar et al. 2015).

Akıllı aydınlatma:

Sokak lambaları da dahil olmak üzere özel veya kamusal aydınlatma, Li-Fi bağlantı noktaları oluşturmak için kullanılabilir. Aynı iletişim ve sensör altyapısı, verileri izlemek ve kontrol etmek amacıyla uygulanabilir (Perwej 2017).

GPS kullanımı

Uydu navigasyonu, son 50 yılın en önemli teknolojik gelişmelerinin içinde yer almaktadır. Sistemler ne kadar iyi olursa olsun, zamanımızın çoğunu geçirdiğimiz yerlerde çalışmadıkları durumlara rastlanılmaktadır. Byte Light adlı bir firma, cihazlara doğru konum verilerini sağlamak amacıyla LED aydınlatma kullanan bir sistemle bu durumu değiştirmeye çalışmaktadır. Byte Light'ın iç mekân konum sistemi, LED'lerin darbelerini insan gözü tarafından algılanamayacak (yüzlerce hertz aralığında çalışır) ancak bir akıllı telefon veya tablet kamerası tarafından algılanabilecek şekilde modüle ederek çalıştırır. Cihaz, LED modülasyonundan toplanan verileri kullanarak çalışır ve yapının neresinde olduğunu bulmak için istemci tarafında hesaplamalar yapar. Ağ bağlantısı bir sorun olmadığından sistem Wi-Fi gerektirmez. Bu hesaplamalar ise cihaz üzerinde hızlı bir şekilde gerçekleştirilir (Khandal and Jain 2014).

Savunma sistemleri

Savunma sistemleri için güvenli iletişimin sağlanması oldukça önemlidir. Son derece gizli veri aktarımı için Li-Fi uygulanabilir. Jammer, iletişim sisteminin bloklanmasına neden olan radyo frekans sinyali engelleyebilir. Li-Fi teknolojisinde sinyal bozucu tarafından engellenemeyen ışık kullanılır (Swami and Moghe 2020).

1.2.2. Li-Fi teknolojisinin avantajları

Hız ve kapasite

Li-Fi verileri ağı 1 GB / sn'ye varan hızlarda bağlanma kapasitesine sahiptir (Al Hwaitat 2020). Görünür ışık spektrumu, tüm RF spektrumunun 10.000 katı olan yüzlerce THz lisanssız bant genişliği içerdiğinden (Leba et al. 2017), Li-Fi veri aktarımı Wi-Fi'e oranla 100 kat daha hızlıdır. 224 Gb/s'lik veri hızına sahip olan bir Li-Fi sisteminde birkaç saniye içinde yüksek çözünürlüklü bir video yayınlanabilmektedir (Dinesh and Chourasia 2021).

Verimlilik

LED ampullerin her zaman her yerde bulunması ve daha az enerji tüketmesi sebebiyle, Li-Fi enerji verimli ve daha ucuz bir sistem olma potansiyeline sahiptir (Dinesh and Chourasia 2021). Günümüz kablosuz iletişiminin bakımında veri iletiminden daha büyük miktarlarda enerji harcanmaktadır. Örneğin baz istasyonlarını soğutmak için çok fazla enerji harcanırken, Li-Fi’da erişim noktası görevi görebilecek 60 W’lık basit bir LED ampule ihtiyacımız vardır (Yaqub et al. 2016). Genellikle, iç mekân ışıklarının çoğu zaman açık olduğu göz önünde bulundurulduğunda, iletişim için kullanılan enerji, aydınlatma verilerinin üst üste konulmasının bir sonucu olarak pratikte sıfır olacaktır (Leba et al. 2017). LED’ler enerji açısından verimli ve yüksek düzeyde kontrol edilebilir ışık kaynakları olduğundan, Li-Fi çevre dostu yeşil iletişim teknolojisine aittir (Stevanović 2017).

Kullanılabilirlik

Li-Fi, verileri aktarmak için bir araç olarak LED’leri kullanır, bu da hem odalarımızı aydınlatmamıza hem de bilgi gönderip almamıza imkân sağlar. LED ampulleri Li-Fi uyumlu LED ampullerle değiştirirsek Li-Fi’ye her yerden erişilebilir (Bhatnagar and R.Kukreti 2019). İnternet bağlantısı ışık varlığında yapıldığından, artık Wi-Fi özellikli herhangi bir bölgede olmanıza gerek kalmaz. Erişim noktalarının bu kolay kullanılabilirliği, internet kullanım ücretlerini azaltacaktır (Yaqub et al. 2016). Dünya çapında bu teknolojiyi kullanmak her sokak lambasının ücretsiz bir veri erişim noktası olmasını sağlayacaktır. (Khandal and Jain 2014). Görünür ışık bina duvarlarından veya diğer opak malzemelerden geçmediğinden ve istenen çalışma alanına yönlendirilebildiğinden, Li-Fi yüksek derecede mekansal yeniden kullanım sergileyebilir. Bitişik alanlardaki, odalardaki veya apartman birimlerindeki Li-Fi sinyalleri birbirini engellemeyecek, dolayısıyla potansiyel olarak RF ile elde edilebileceğinden çok daha yüksek bir uzamsal iletişim yoğunluğu oranı elde edilecektir (Stevanović 2017).

Güvenlik

Işık dalgaları duvarlara nüfuz edemez, belirli bir alan içerisinde kalmaları, bilgi akışının korunmasını sağlar. Böylelikle veriler durdurulamaz ve kötü amaçlı kullanılamaz (Albraheem et al. 2018). Bu özellik, güvenlik açısından oldukça kullanışlıdır. Wi-Fi'deki gibi veriler, odanın, binaların veya diğer kamusal alanların dışına sızma tehlikesi taşımaz. Hatta bazı alanlar, kendi Li-Fi ağları sayesinde yüksek güvenli olarak tanımlanabilir, bu da o alanları diğer yerlerden ayırır ve olası zararlı erişim cihazlarını en aza indirir veya durdurur. Buna ek olarak, herhangi bir Li-Fi cihazından gelen görünür ışık sınırlı olduğundan erişim noktalarının bölünmesi daha hassas ve güvenli hale getirilebilir. Yasal kullanıcılar tarafından gerçekleştirilen faaliyetlerin izlenmesi, basit kullanıcı adı / şifre ve fiziksel bir alan veya konum atama gibi faktörlerle daha etkili olacaktır. Ekstra bir güvenlik katmanı, her mobil cihazı yerleştirerek ve yerleştirilmiş cihazı farklı erişim noktaları arasında sürekli olarak izleyerek de desteklenebilir. Kullanıcılar başka bir erişim noktasına hareket ettiklerinde ilgili alan erişim noktalarına bağlanmaları gerekecektir (Rabia et al. 2020).

Düşük gecikme

Bir cihazda gecikme, zaman gecikmesinin bir ölçüsüdür. Li-Fi, Wi-Fi'ye kıyasla üç kat daha az gecikme süresine sahiptir, bu da otomasyon, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik gibi radikal teknolojileri teşvik edecektir (Dinesh and Chourasia 2021).

Sağlık

Bilimsel olarak kanıtlanmamış olsa bile, radyo frekansı sinyallerinin insan sağlığına tehdit oluşturduğu bilinmektedir (Yaqub et al. 2016). Ancak aydınlatma koşullarında, prensip olarak görünür ışığın sağlık açısından herhangi bir tehlikesi yoktur (Stevanović 2017).

Girişim

Radyo dalgaları, uçaklarda ve hastanelerde elektrikli aletlerin ve ekipmanın normal çalışmasını bozabilen elektromanyetik girişim oluşturur ve özellikle güç / nükleer üretim veya petrol ve gaz sondajı gibi endüstriyel bölgelerde tehlikelidir (Stevanović 2017). Li-Fi, radyo frekansı sinyalleri yerine ışık kullanır, bu nedenle parazitlere neden olmaz (Khandal and Jain 2014). Havayolları sinyallerine müdahale etmediğinden Li-Fi, uçaklar için güvenle kullanılabilir. Bu teknoloji radyo dalgaları içermediğinden tıbbi cihazlara ve hastanelere entegre edilebilir, bu nedenle bluetooth, kızılötesi, Wi-Fi ve internetin yaygın olarak bulunduğu tüm yerlerde kolayca kullanılabilir. Denizde su altında Wi-Fi hiç çalışmaz, ancak ışık kullanılabilir bu nedenle deniz altı keşifleri artık kolay bir şekilde yapılabilir (Alao OD et al. 2016).

1.2.3. Li-Fi teknolojisinin dezavantajları

Işığın nesnelerin içinden geçemiyor oluşu bu teknolojinin temel dezavantajlarından biridir. Bu sebepten alıcının herhangi bir şekilde engellendiği durumlarda sinyal hemen kesilecektir. Yani ışık sinyali bloke edilirse, radyo dalgalarına geri dönülebilir.

Güvenilirlik ve ağ kapsamı, VLC hizmetleri sağlanırken şirketler tarafından dikkate alınması gereken temel hususlardır. Güneş ışığı, normal ampuller gibi harici ışık kaynaklarının sebep olduğu parazitler ve iletim yolundaki opak malzemeler iletişimde kesintiye neden olur (Sarkar et al. 2015).

VLC sisteminin ilk kurulum maliyetleri yüksektir, ancak büyük ölçekte uygulandığında maliyet, elektrik faturaları, daha az bakım ücretleri ve daha az operasyonel personel ihtiyacı gibi daha düşük işletme maliyetleri ile bu oran azaltılabilir.

VLC sistemi için görüş hattı şarttır, çünkü ışık opak yüzeylerden geçemez, bu nedenle aralarında bağlantı kurmak için verici ve alıcının hizalanması gerekir.

Bir bağlantı başlatmak için ışığın mevcudiyeti şarttır(Yaqub et al. 2016).

1. GİRİŞ

Bilim adamları, gelecekte Li-Fi'nin geleneksel teknolojilerin yerini tamamen alamayacağını, yalnızca bir arada var olabileceğini ve özel alanlarda kullanılabileceğini öngörmektedir (Al Hwaitat 2020). Yani hala Wi-Fi'ye ihtiyacımız var. Çünkü engellerin olduğu uzak alanlara veya yüksek hızlı hareket eden nesnelere veri sağlayan bir ışık kaynağımız henüz mevcut değil (Sarkar et al. 2015). Ancak teknolojiye mevcut eğilimler ve insanların cihazların bağlanabilirliğine olan bağımlılığı ve yüksek veri hızı talebine dayanarak, Li-Fi'nin yakın geleceğin en popüler teknolojisi olacağı sonucuna varabiliriz. Akıllı şehirlerin altyapısı için omurga olarak çalışacak ve kullanıcıların sağlığını etkilemeden yüksek hızlarda hizmet verecektir. Gelecekte üreticiler, Li-Fi sistemlerine bağlanmak için bir Li-Fi arayüzüne sahip cihazları üretmeye başlayacak, tıpkı şu anda hemen hemen her elektronik cihazda yer alan Bluetooth ve Wi-Fi gibi (Yaqub et al. 2016).

1.2.4. Li-Fi ve Wi-Fi karşılaştırması

Wi-Fi ve Li-Fi karşılaştırması aşağıdaki çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Li-Fi ve Wi-Fi karşılaştırması (Dinesh and Chourasia 2021), (Yaqub et al. 2016)

Özellik	Li-Fi	Wi-Fi
Tam Ad	Light Fidelity	Wireless Fidelity
IEEE standardı	IEEE 802.15.7	IEEE 802.11
İcadı	2011'de Alman bilim insanı Prof.Harald Haas tarafından icat edilmiştir.	1991 yılında Dr. O'Sullivan ve arkadaşları tarafından icat edilmiştir.
Kullanılan Spektrum	Görünür Işık	Radyo Frekansı

Çizelge 1.1. (devam)

Çalışma Frekansı	Radyo spektrumunun 10.000 katı frekans aralığı	2,4 GHz, 4,9 GHz ve 5 GHz
Kullanım	LED ampuller aracılığı ile verileri ışık kullanarak iletir.	Yönlendirici veya modem desteği ile elektromanyetik radyasyon kullanarak veri iletir.
Girişim	Radyo frekansı dalgalarına benzer herhangi bir parazit sorunu yaşamaz.	Wi-Fi ağının çalışması birkaç radyo paraziti kaynağı tarafından engellenebilir
Veri aktarım hızı	Çok yüksek hız (>1 Gbps)	150 Mbps
Veri yoğunluğu	Li-Fi son derece yoğun bir ortamda çalışır.	Girişimle bağlantılı sorunlar nedeniyle daha az yoğun ortamlarda çalışır.
Veri iletimi	Doğrudan bitler kullanılarak gerçekleşir.	Radyo dalgaları kullanılarak gerçekleşir.
Gizlilik	Li-Fi durumunda, ışık genellikle bir duvar veya başka bir nesne tarafından engellenir. Bu nedenle daha kararlı veri iletimi sağlanır.	Wi-Fi'de, RF sinyali duvarlar boyunca hareket eder ve bu nedenle korumalı veri iletimini sağlamak için tekniklerin kullanılması gerekir.
Mesafe Kapsama Aralığı	Işık yoğunluğuna göre yaklaşık 10 metreye ulaşabilir.	Radyo yayılımına ve girişime bağlı olarak 32 metreye kadar ulaşabilir.
Maliyet	Işık dalgaları spektrumu, lisans gerektirmeyen bir bant olduğundan Wi-Fi'den daha ucuzdur.	Wi-Fi'de radyo spektrumu kullandığından, Li-Fi'e göre pahalıdır.
Sistem Bileşenleri	Li-Fi sistemi, LED ampul (lamba) ve fotodedektörden oluşur.	Wi-Fi yönlendirici ve abone istasyonları kullanır.
Ağ topolojisi	Noktadan noktaya ağ topolojisini kullanır	Noktadan çok noktaya ağ topolojisini kullanır
Kullanılabilirlik	Işığın olduğu her yerde neredeyse mevcut	Bulunabilirliği çok düşük

Tezin amacı

Yakın gelecekte yaygın bir iletişim aracı haline gelecek olan Li-Fi sistemini kullanıma hazır elektronik aygıtlarla gerçekleştirmek ve Li-Fi teknolojisini kullanarak metin verilerini ileten alıcı ve verici devreleri tasarlamaktır.

Tezin kapsamı

Birinci bölümde, Li-Fi teknolojisi, mevcut Wi-Fi problemleri ve bunların önemi açıklanmaktadır. Bu bölüm tezin motivasyonu ve sorunu çözmek için kullanılan amaçlanan metodolojiyi içerir.

İkinci bölümde, Li-Fi teknolojisi üzerine yürütülen araştırmaların bir özeti sunulmuştur.

Üçüncü bölümde Li-Fi alıcı ve verici devresi tasarımında kullanılan malzemelerle ilgili temel kavramlara yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, gerçekleştirilen Li-Fi alıcı ve verici devre tasarımları, metin veri aktarım sistemi, testi ve sonuçları anlatılmıştır.

Beşinci bölümde ise, elde edilen sonucun değerlendirilmesine ve önerilere yer verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Nagdev et al.(2013) tarafından yapılan çalışma alıcı tarafta fototransistör, verici tarafta LED ile bir görüntüyü bir bilgisayardan diğerine seri iletişim kullanarak aktarmayı amaçlamıştır. Prototip dört aşamada; işletim sisteminde çalışacak ve görüntüyü bir girdi olarak alıp piksellere bölecek ve ardından seri bağlantı noktasından iletecek özel bir program, verileri bilgisayardan seri olarak almak ve daha sonra bu ikili veri akışlarını optik veri akışlarına dönüştürmek için özel bir donanım, RS 232 sinyalini TTL mantık sinyaline ve TTL mantık sinyalini tekrar RS 232 sinyaline dönüştürmek için bir sinyal dönüştürücü ve diğer uçta, seri olarak alınan bu piksel verilerini bir görüntüye geri dönüştürmek ve daha sonra bilgisayarda görüntülemek için özel bir programdan oluşturulmuştur. Bu süreçleri geliştirmek için MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda iletim aracı olarak ışık kullanılarak alıcı terminale kablosuz olarak ikili görüntü aktarılmıştır. Çıktı görüntüsünün %90 doğruluğa sahip olduğu bulunmuştur.

Mahendran (2016) tarafından yapılan çalışma, LED dizisi, fotodiyot, bilgisayar, mikrodenetleyici, RS232 seviye değiştirici, veri modülasyon ve demodülasyon birimi içermektedir. Mikrodenetleyici, PWM yöntemi ile sinyalleri modüle ederek LED dizisi için bir giriş değeri elde etmek üzere dijital forma dönüştürmektedir. LED ışık dizisinden gelen veriler, fotodedektör tarafından yakalanır ve ışık sinyalleri elektrik sinyallerine dönüştürülür. Ardından veri demodüle edilerek ve alıcı bilgisayarda gerekli uygun çıktıyı elde etmek amacıyla filtrelenir. Çalışmada nihai voltaj sinyalinin; daha sonra nihai kod çözücü bloğunda kodu çözülen, böylece dijital verileri çıkaran, alınan ışık darbelerine karşılık geldiği gözlemlenmiştir.

Bhateley et al.(2016) tarafından yapılan çalışma, yollardaki araç çarpışmalarına karşı koruma sağlayan Li-Fi teknolojisini kullanan akıllı bir araç iletişim sistemi geliştirmektedir. Otomobillerde kullanılan farlar çoğunlukla yüksek güçlü beyaz LED'lerdir. Hız ölçer okuması, bir mikroişlemci yardımıyla LED'lere giriş değeri sağlayan dijital forma dönüştürülür. LED'ler, kablosuz bir kanalda fotodiyota giden dijital bilgi dizisi üretir. Fotodiyot tarafından üretilen akımın kodu, ADC kullanılarak dijital bir diziye çözülür ve hızını ileten aracın ardından araçtaki sürücüyü uyarmak için kullanılan bilgiyi taşır. Verici kısmında, hız ölçerden gelen analog hız, hızı düşük, orta veya yüksek

olarak sınıflandıran mikroişlemciye iletilir. Verilerin dijital forma dönüştürülmesi ile verici işlevindeki LED'i çalıştıran PWM sinyali oluşturulur. Beyaz LED'lerin uygun maliyetli ve verimli oluşu otomobillerde kullanımını yaygınlaştırır. Her LED 3.6 V DC voltaj gerektirir ve 30 mA akım kullanır ve 100 mW güç değerine sahiptir. Bunun yanı sıra LED'lerin yönlü doğası nedeniyle, belirli bir yöne verimli bir şekilde ışık iletildiğinden reflektörlere ve difüzörlere olan ihtiyaç azalır. Üretilen güç, imalat için kullanılan yarı iletken malzemeye bağlı olarak değişir ve bu, giriş akımına doğrusal olarak bağlı olduğu için LED'i çalıştıran PWM sinyalini sağlar. Alıcı kısımda fotonları algılayan fotodiyot, harici devrede akım meydana getirir. Elde edilen akım paralel fotodiyot dizisi oluşturularak artırılabilir. Üretilen akımı voltaja dönüştüren bir trans-empedans amplifikatörü kullanılır. Bir ADC ile iletilen sinyal alıcı tarafta geri kazanılır. Çalışmada LED'ler tarafından dijital sıra biçiminde gönderilen verilerin fotodiyot tarafında hatasız olarak alındığı sonucuna varılmıştır. Böylece, bu tasarımın çarpışmaları önlemek amacıyla otomobillere uygulanabileceği bildirilmiştir. Sürücüyü uyaran araçların, yolları daha güvenli hale getirebileceği ve can kaybı riskini azaltabileceği bildirilmiştir.

Choudhari and Devane (2017) yaptıkları çalışmada veriler, LED'i çalıştıran (beslendiği) verici devresine iletilir. Daha sonra veri kablosuz kanal boyunca hareket eder ve optik sinyali 38 kHz frekanslı elektrik sinyaline dönüştüren fotodedektör tarafından algılanır. Alınan veriler daha sonra USB'den TTL'ye iletişim protokolü aracılığıyla iletilir. Bu sistem ile ses ve metin verileri aktarımı yapılabilmektedir.

Vinnarasi and Aarthy (2017) tarafından yapılan çalışma, Li-Fi kullanarak ses ve metin iletimi içerir. Metin iletiminde LED ve fototransistör bir Arduino ile arayüz oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada veriler, seri monitör kullanılarak arduinoya iletildiğinde, LED'in ışık yoğunluk seviyeleri değişmektedir. Foto algılayıcı tarafından yakalanan bu değişimler orijinal verilere dönüştürülür. Algoritmayı oluşturan ikili değerler, LED ampullerin açık ve kapalı durumu arasındaki geçişine dayanmaktadır. LED, veri girişi olduğunda girilen veriye göre yanıp söner. Bu yanıp sönmeleri foto algılayıcı algoritmaya girilen ikili değerlere göre çözümler. Böylelikle bir mikro denetleyici ile veriler aktarılır ve diğer bir seri iletişim noktasından alınır. IR tek yönlü PC'den PC'ye aktarım, iki Arduino Uno kartı kullanılarak sağlanır. Her Arduino kartı, bilgisayarın COM bağlantı noktalarını kullanarak bir PC'ye bağlanır. Verici kısımda

program derlenip, yüklenir ve Arduino'nun seri monitörüne iletilecek olan metin girilir. Girilen veriler, Arduino Uno kartında mevcut olan mikroişlemci Atmega 328 tarafından işlenir. Alıcı, vericiden gelen ikili değerleri yakalar ve işlemcisi bu ikili bitleri ASCII karakterlerine dönüştürür. Alıcı tarafında, kodda, alınan ASCII koduna göre alfanümerik karakteri yazdıran bir sözlüğe sahiptir. Alıcı Arduino kartının seri monitöründe bu alfanümerik karakter görüntülenebilir. Kızılötesi verici ve alıcı 2 cm'den fazla iletişim kuramadığından, prototip yalnızca LOS durumunda çalışır. Ses sinyalinin iletimi, dijital sinyali bir analog sinyale dönüştürecek 3,5 mm'lik jak kullanarak, verici ucundaki bir telefon aracılığıyla yapılmıştır. Bu analog sinyal güçlendirilir ve devreye bağlanan LED dizisine gönderilir. LED dizisine bir güç kaynağı da bağlanır. Bu güç kaynağı, 3,5 mm jake ve LED dizisine bağlı bir 9 V pil ile sağlanır. Işık yoğunluğundaki bu değişiklik, bir fotodedektör görevi gören güneş paneli tarafından yakalanır. Tüm varyasyonları yakalar ve alınan sinyali önceden güçlendirilmiş hoparlöre gönderir. Çalışmada verici ile alıcı arasına odaklanma merceği eklenerek 1 m mesafede yüksek kaliteli ses iletiminin sağlanabileceği bildirilmiştir.

Vijayalakshmi et al. (2018) tarafından yapılan sistem, ışık ortamını kullanarak baz istasyonundan gelen sinyali algılamak için bir Li-Fi RF sürücüsüne sahiptir ve cihazdaki fotodedektör, sinyali yakalayarak bilgileri yolculara iletir. LED açıksa "1" iletilir; kapalıysa, iletilen çıkış "0" dır. Li-Fi, geleneksel radyo frekansı kullanımının yerini tamamen alamaz, ancak hız açısından tren içinde kablosuz veri iletiminin gelişimini artırabilir ve birden fazla kullanıcıya kesintisiz bir kablosuz sinyal göndermeyi kolaylaştırabilir. Verici bölümü, veri girişinin verildiği bilgisayardan oluşmaktadır. Verilen giriş, Manchester kodlamasıyla şifrelenmiştir. Şifrelenmiş veriler, düşük güçlü mikrodenetleyicide saklanır. Mikrodenetleyicide depolanan veriler daha sonra sürücü devresi ve LED'den oluşan Li-Fi modülüne beslenir. LED'e verilen akım değişince, optik çıkış da yüksek hızda değişir. Böylece bilgisayardan gelen ikili veri, elektrik sinyalinin ışık sinyaline dönüştürüldüğü Li-Fi modülüne verilir. Ardından fotodedektörden oluşan alıcı taraf ışık sinyalini elektrik sinyaline çevirir. Daha sonra fotodedektörden gelen ikili veri, şifre çözme işleminin yapıldığı bilgisayara gönderilir. Böylece kullanıcı, dosyaların orijinal biçimini görüntüleyebilmektedir. Çalışma kapalı alanda yapılmış ve 50 cm mesafede 9,6 kbps hızında video dosya aktarımı sağlanmıştır.

Ghosh et al. (2019) tarafından yapılan prototipte, her biri ilgili Arduino Uno çipine bağlı olan, verici olarak bir led dizisi ve alıcı olarak bir PIN diyot (BPW34) dizisi kullanılmıştır. Verici bölümde Arduino kodu, giriş metnini (alfanümerik) ikili forma dönüştürür ve 6 veya 7 bitlik paketler halinde gönderir. Metindeki her sembol önce ASCII formuna ve ardından 6 veya 7 bit uzunluğundaki ikili bilgiye dönüştürülür. Alıcı bölümde bir fotodiyot dizisi, değişken bir direnç ve Arduino Uno ile bir voltaj bölücü devresine bağlanır. Değişken direnç, alıcının hassasiyetini kontrol eder. Fotodiyot gelen dalgalanmayı algılar, Arduino 0 mı yoksa 1 mi olduğuna karar verir. Alıcı sadece belirli dalgalanma frekansına cevap verdiği için, sistem ortam ışığı dalgalanmalarına karşı dayanıklıdır (ortam ışığı çok parlak olmadığı sürece). Mevcut prototipin yalnızca 1 fitlik bir mesafede etkili bir şekilde çalışabildiği ve mevcut etkin veri aktarım hızının 100 bit / saniye olduğu bildirilmiştir.

Ramananda et al. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada verici bloğunda Atmega328P mikrodenetleyici, iletilecek verilerin ön işleme ve modülasyonu için sistem işlemcisi olarak kullanılır. İletilecek veriler görüntü, metin, ses vb. içerebilir. LED sürücü devresi, modüle edilmiş verileri optik kanaldan iletmek için optik sinyale dönüştürmek amacıyla tasarlanmıştır. Alıcı bloğunda fotodiyot, ışık modülasyonlarını sistem işlemcisinde tetiklenebilen elektriksel uyarılara dönüştürmek için kullanılır. Transistör tabanlı yükselteç devresi, sinyal gücünü artırmak için tasarlanmıştır. Atmega328P mikrodenetleyici, kodlanmış veri bitlerinin demodülasyonu ve işlenmesi için sistem işlemcisi olarak kullanılır. Yazılım bloğunda, veri bitlerinin modülasyonu ve demodülasyonu gerçekleştirilir. Bu çalışmada, veri bitlerini kodlamak için Manchester kodlama ve OOK modülasyon tekniği uygulanmıştır. Ortam aydınlatma koşulları altında 10 Kbps'ye kadar uydu-yer bağlantısı veri hızlarına ulaşıldığı bildirilmiştir.

Lorenz and Hamada (2020) tarafından yapılan çalışma, kablosuz ses sinyallerini aktarmak amacıyla tasarlanmış bir görünür ışık ses bağlantısını açıklamaktadır. Bu sistemde ses sinyallerinin aktarımı 4 metreye kadar mümkün olabilmektedir. Prototipte her LED lamba bir LED sürücü ile beslenmiştir. LED sürücüsü internet sunucusundan bilgi almış ve veriler sürücüde kodlanmıştır. Bu şifrelenmiş verilere dayanarak, LED lamba insan gözü tarafından takip edilemeyecek kadar yüksek bir hızda titreşecektir. Alıcı taraf, fotodetektör tüm titreşimleri okuyabilecek ve verileri amplifikasyon ve işlemeden sonra

deşifre edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Alıcı tarafa aktarılan sinyali dinlemek amacıyla bir 8 ohm hoparlör veya kulaklık bağlanmıştır. Işığı yakalamak adına alıcı kısımda güneş paneli, fototransistör veya fotodiyot kullanılmıştır. Çalışmada ışık sinyallerini üretmenin ve yakalamanın yanı sıra, bu sinyalleri filtrelemek ve yorumlamak için ek donanıma ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Örneğin, istenen frekanslara sahip olmayan sinyalleri filtrelemek amacıyla uygun bir bant geçiren filtre kullanılabilir; diğer dalga boylarındaki ışığı engellemek adına bir optik filtre, iyi bir çözüm olabilir. Işık yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda gelen ışığı odaklayan bir lens, faydalı olabilir. Dijital veri aktarımı koşulunda, gelen ve giden verileri işlemek amacıyla sistemin her iki tarafına bir dijital sinyal işlemcisi gerekliliği bildirilmiştir.

Sofia and Salim (2020) tarafından yapılan verici devresinde emisyon seviyesinde, Li-Fi yayıcının çalışması için 12 V'luk LED'ler kullanılmıştır. Arduino 5 volt güç sağladığından, gücü geçebilmek ve LED'in Arduino üzerinden kontrolünü sağlamak amacıyla 12 V'luk bir harici güç kaynağı ve bir transistör (BD139) kullanılmıştır. Alıcı devrede, bir karşılaştırmacı, fotodedektör boyunca voltajı ayarlanabilir bir referans voltajı ile karşılaştırmaktan sorumlu işlemsel yükselteç (LM393) kullanılmıştır. Hızlı anahtarlama için 2N2222 transistör ve ışık seviyesine göre açma eşiğini ayarlamak için potansiyometre kullanılmıştır. Çalışma, metin verilerini Li-Fi iletişimi aracılığı ile Arduino Uno kartı kullanılarak bir bilgisayardan diğerine iletir. Arduino kartları bilgisayarlara COM bağlantı noktaları vasıtasıyla bağlanmaktadır. Verici tarafta kullanıcının metni Arduino seri monitörüne girmesi öncesi program derlenip karta yüklenir. İşlenen veriler, ASCII karakterlerini bitlere dönüştürür ve bu da LED'in yanıp sönmesini sağlar. Alıcı kısımdaki fotodedektör yanıp sönmeleri algılar. Alıcı, bu bitleri ASCII karakterlerine çevirir. Alıcı, kod her alfanümerik karakteri alınan ASCII koduyla eşleştiren bir sözlüğe sahiptir. İletim sonunda alıcının seri monitöründe karakterler görüntülenebilir. Veri güvenliğini sağlamak için önerilen sistemde bir kriptografik algoritma uygulanmaktadır. Verilerin şifrelenmesi ve şifresinin çözülmesi için AES (Gelişmiş Şifreleme Standardı) ve CBC (Şifreleme Bloğu Zincirleme) algoritması kullanılmıştır. Gerçekleştirilen sistemin, 2 metreye kadar iletişime izin verdiği bildirilmiştir.

Surajudeen-bakinde et al.(2020) tarafından yapılan çalışmada, LED, LM358N işlemsel yükselteç ve bir fotodiyottan oluşan bir giriş/çıkış devresi ile bir mikrodenetleyiciye (ATmega16L) sahip gömülü bir sistem kullanılmaktadır. Ayrıca, Java programlama ile bir kullanıcı (alıcı PC) arayüzü geliştirilerek, aktarılan örnek veriler (metin) izlenmiş ve sistemin hızı, verimliliği, güvenliği ve kapasitesi incelenmiştir. Gönderilen ve alınan örnek metin, kodlama aşamasından geçmiştir (kodlama, metnin karakterlerinin ASCII kodlarında ayrı ayrı belirlenmesi ve ardından ışık sinyalleri olarak iletilmeden önce tek tek ikili bitlere dönüştürülmesini içerir). Gönderilen metin, alıcı bilgisayarda ortalama 2 µs hızında görüntülenmiştir. Sonuçların, en iyi, Li-Fi alıcısı ile vericisi arasındaki mesafe 2,5 m'den fazla olmadığına açıklandığı görülmüştür.

Tsaqifurrosyid et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada Li-Fi teknolojisi ile veri gönderme simülasyonu yapılmış ve veri gönderme sürecini görselleştirebilen bir uygulama olan Visual Studio kullanılmıştır. Bu sistemde amaç veri gönderme sürecini parça parça görebilmektir. Bu şekilde kullanıcı tarafından veri gönderme başarısı tespit edilebilir olacaktır. LED'ler verici kısımda görüntü verilerinin ileticisi olarak işlev görmektedir. Alıcı taraf, veri iletişim sinyali görevinde olan LED ışığını yakalayacak ve sonrasında sinyal, alıcının monitöründe görüntülenmek üzere Arduino Uno tarafından işlenecektir. Sistemde ADC işlemi Arduino Uno ile gerçekleştirilmektedir. 9600 baud hızı kullanarak 10 cm'lik bir alıcı-verici mesafesinden görüntüler 22,2 KB boyutunda iletilmiştir ve vericiden alıcıya veri göndermek için gereken sürenin 3 dakika 34 saniye olduğu görülmüştür. Bu şekilde farklı dosya boyutlarıyla yapılan testler farklı iletim süreleri ile sonuçlanmıştır. Bu sonuçlar neticesinde, gönderilen verilerin boyutu ile iletim süresinin doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Visual stüdyo kullanarak gerçekleştirilen bu uygulamada, ışık yoluyla iletilen her bit izlenebilir ve böylece veri aktarım hatası süreci önlenir. Yapılan çalışmada 50 cm mesafeden maksimum 20 kB dosya boyutu ile görüntü verileri başarıyla iletilebilmektedir. Görüntü alıcı tarafta 1200 baud hızı ile 30 saniyede görüntülenmektedir. Bu sonucun, vericinin alıcıya ne kadar uzun süre ihtiyaç duyduğunu gösterdiği bildirilmiştir.

Rajendran et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada ev veya işyeri otomasyonları için Li-Fi yoluyla ses ve veri iletimi sağlayacak bir prototip gerçekleştirilmiştir. Verici kısmında transformatör ve doğrultucu (Güç stabilizasyonu), PIC-Mikro Denetleyici (Veri

işleme sinyali oluşturma), bluetooth modülü (Ses kaynağını elde etmek için), LCD ekran, LED kaynağı (titreyen ışık sinyali) ve anahtarlar (alıcı tarafındaki cihazları kontrol etmek için) kullanılmıştır. Alıcı kısım ise transformatör ve doğrultucu (Güç stabilizasyonu), PIC-Micro kontrolör, fotodedektör (Işık sinyalini alır), amplifikatör, hoparlör (Ses çıkışı) ve röle modülleri (cihazları kontrol etmek için ortam) içermektedir. Sistem çalıştığı ilk anda kullanıcıya aktarımın veri mi yoksa ses mi olduğunu sorarak anahtarlar aracılığıyla kullanıcıya bir seçim yaptırmaktadır. Seçim veri iletimi ise alıcı tarafındaki cihazları kontrol etmek için verici modülünde bulunan anahtarları kullanılır ve alıcı tarafında LCD ekranda rölenin durumu gösterilir. Seçim ses ise harici cihaz önce bluetooth modülüne bağlanır ve iletimden sonra ses, ışık yoluyla gönderilir ve alıcı ucunda alınır. Doğal ışık koşulları sebebiyle ses sinyali %10 daha zayıf haliyle iletilebilmektedir. Gerçekleştirilen Li-Fi alıcı ve verici sistemi aydınlık durumda 2 metreye, karanlık durumda 5 metreye kadar veri iletebilir. Çalışmada yüksek yoğunluklu LED'ler ve yüksek duyarlı fotodedektörler kullanılarak iletim ve alım menziline artırılabilceği önerilmektedir.

Dinesh and Chourasia (2021) tarafından yapılan çalışmada Covid-19 hastaları için mevcut Wi-Fi iletişiminden daha hızlı, daha güvenilir ve radyasyon içermeyen bir iletişim ağı sağlamak amacıyla kalp atışı sensörleri, sıcaklık sensörleri veya basınç sensörleri gibi farklı vücut sensörlerini kullanarak Li-Fi vericiden Li-Fi alıcısına veri aktarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen bu çalışma, Li-Fi teknolojisi tekniklerini kullanarak hastanelerde Covid-19 hastaları için gerçek zamanlı bir izleme sistemi olarak kullanılabilir. Verici kısmı DC güç kaynağı, transformatör, köprü doğrultucu, voltaj regülatörü ve bir filtre kapasitöründen oluşur. Basınç, sıcaklık ve kalp atışı sensörlerin her biri, PIC 16F877A yüksek performanslı mikrodenetleyicisine bağlıdır. Sinyal Li-Fi vericisi vasıtasıyla aktarılmakta olup verici kaynağı LED'dir. Bu veriler, LED tarafından üretilen ışığın gücü modüle edilerek çeşitli sensörlerden iletilecektir. Alıcı kısımda ışığı elektrik sinyaline dönüştüren bir fotodiyota ek olarak sinyali taşıyıcı dalgadan demodüle etmek ve yüksek frekanslı gürültüyü ortadan kaldırmak için bir alçak geçiren filtre kullanılır. Sıcaklık sensörü, kalp atışı sensörü ve basınç sensörü hastaların vücuduna takılmıştır. Her hasta ilgili sensörler tarafından algılanır. Her sensörden üretilen analog sinyal dijital forma dönüştürülür ve bu dijital sinyaller mikrodenetleyicide saklanır. Mikrodenetleyiciden veriler, basit beyaz LED'den fotodetektöre bir ortam görevi gören

ışık yardımı ile iletilir. Çalışmada Li-Fi teknolojisi ile hastaların ateş, kalp atışı ve kan basıncının otomatik ve sürekli olarak ölçülebileceği bildirilmiştir.

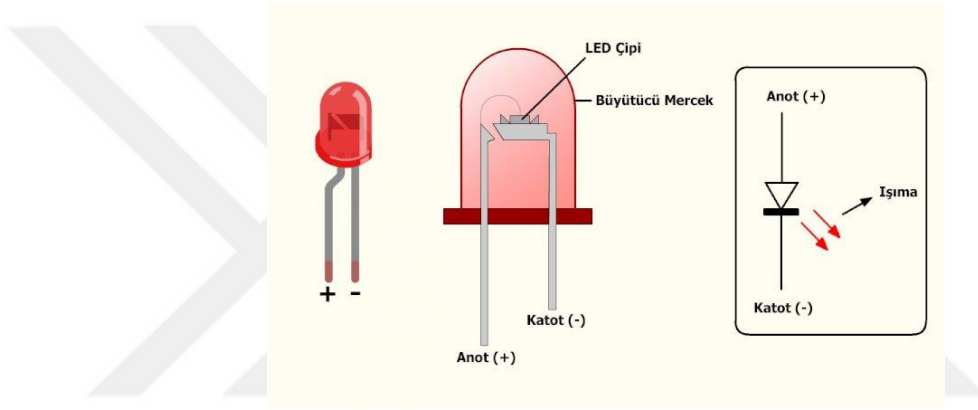


3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde Li-Fi prototip sistemimizde kullanılan ana bileşenler anlatılmaktadır.

3.1. LED (Işık Yayan Diyot)

Işık Yayan Diyotlar (LED'ler), mevcut olan yarı iletken diyot çeşitleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan diyotlardır. LED'ler, elektrik enerjisini ışık enerjisine dönüştürmede kullanılan yarı iletken aygıtlardır (Anonymous 2015).



Şekil 3.1. LED'in yapısı

LED'ler ileri yönde kutuplanması durumunda, değerlik bandındaki boşluklar (hole) ile iletim bandındaki serbest elektronlar yeniden birleşerek ışık şeklinde bir enerji açığa çıkarmaktadır. Elektrik akımının akışına ya da güçlü elektrik alanına cevap olarak ışık yayma sürecine elektrolüminesans adı verilmektedir. Normal P-N diyotlar, elektrik akımına sadece bir yönde yani ileri yönde kutuplandığında izin vermektedir. Bu nedenle, LED'ler yalnızca ileri yönde kutuplanması durumunda çalışır.

LED'in yapısı, silisyum veya germanyum malzemeleri yerine galyum, fosfor ve arsenik malzemelerinin kullanılması dışında normal P-N diyotuna benzer. Normal P-N diyotlarında, sıcaklığa daha az duyarlı olduklarından yaygın olarak silikon kullanılır. Fakat germanyum veya silisyum diyotlar LED'lerin aksine, ışık şeklinde değil ısı şeklinde enerji salınımı yaparlar. Bu nedenle, LED'lerin yapımında silisyum veya germanyum kullanılmaz (Anonymous 2015).

LED nasıl ışık yayar?

LED bir yarı iletken P-N diyotun iletim yönünde kutuplanması ile belirli bir dalga boyunda ışık yayar. Yarı iletken diyottan iletim yönünde akım geçirildiği zaman P bölgesindeki boşluklar (hole) ve N bölgesindeki elektronlar P ve N tipi yarı iletken malzemenin birleşim yerine (eklem, jonksiyon) doğru itilirler. Eklem bölgesinde birbirini karşılaştıran elektron ve boşluklar birleşip yok olurlar. Bir elektron-boşluk çiftinin birleşmesi halinde eğer yarı iletken malzeme direkt enerji bant yapılı bir malzeme ise bu birleşme sonucunda ortaya çıkan enerji bir foton olarak dışarı verilir (Anonymous 2015).

Böylelikle her bir elektron-boşluk rekombinasyonu bir miktar ışık enerjisi açığa çıkaracaktır. Bu fotonun enerjisi aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

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

Bu eşitlikte h Planck sabiti ν ise fotonun frekansıdır (birimi Hz=1/saniye). Bu enerji yaklaşık olarak yarı-iletken malzemenin bant genişliğine eşittir.

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

Yarı-iletkenin bant genişliği arttıkça salınan fotonun frekansı yükselir. Bir fotonun frekansı ile dalga boyu arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$\nu = c / \lambda \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte c ışık hızı, λ ise dalga boyudur. Görünür ışık aralığı mor ışık ile yani yaklaşık $\lambda=400$ nm'de, başlar ve kırmızı ışık ile, yani yaklaşık 700 nm'de biter (Çil 2014).

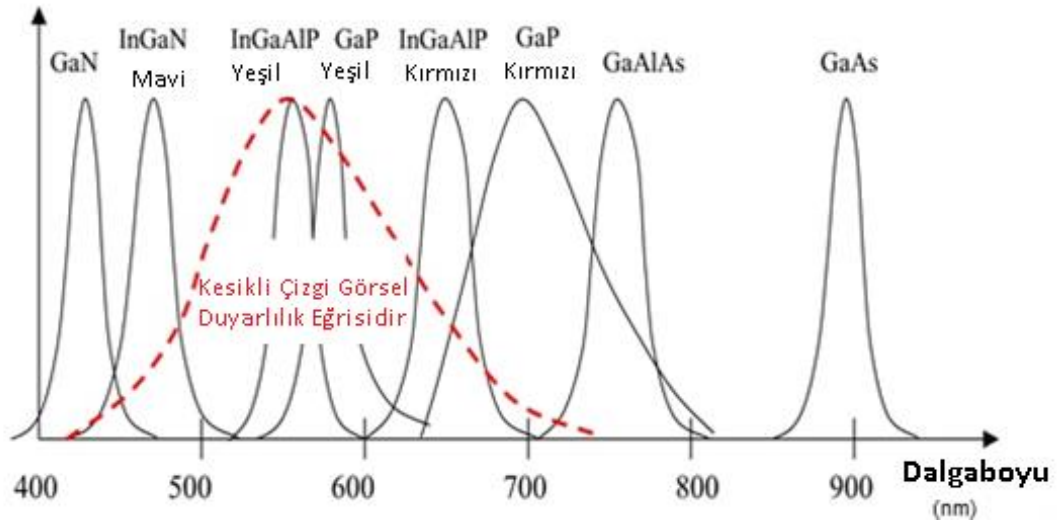
Diyotların tamamı ışık veya foton yayılımı yapmasına rağmen tüm diyotlar görünür ışık yaymaz. Işık yayan diyotlar, yüksek hızlarda (1 ns gibi) açılıp kapatılabilme özelliğine sahiptir. Salınan fotonların dalga boyu, ışık spektrumunun görünür alanı içinde kalacak biçimde belirlenen malzemelerle LED yapısı oluşmaktadır (Anonymous 2015).

Bir LED'in rengini ne belirler?

LED'in yapımında kullanılan malzeme rengini belirler. Başka bir ifadeyle, yayılan ışığın rengi veya dalga boyu, malzemenin enerji bant aralığı ile doğrudan ilişkilidir. Farklı malzemeler kullanıldığında farklı renklerde ışık yayılımı gerçekleşir (Anonymous 2015).

Örneğin, GaAs bir yarı iletken bileşik olup direkt bant geçişlidir ve enerji bant aralığı yaklaşık 1.4 eV seviyesindedir. GaAs P-N eklemine bir elektron boşluk çifti birleştiğinde bir kızıl ötesi (infrared) foton açığa çıkar. GaN yarı iletken kullanıldığında ise, bu yarı iletkenin bant aralığı yeterince büyük olduğundan (3.4 eV), diyotun P-N eklemine bir elektron ve boşluk çifti birleştiğinde bu kez mavi renkli foton elde edilir (Çil 2014).

Işık Yoğunluğu



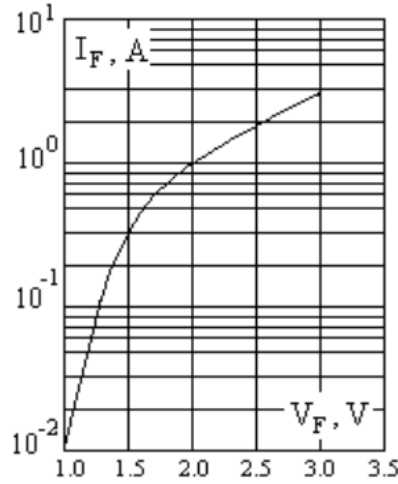
Şekil 3.2. LED'lerin spektrum karakteristikleri (Anonymous 2021)

Çizelge 3.1. Şekil 3.2 'de gösterilen spektrum karakteristiklerinin parametreleri. (Anonymous 2021)

Malzeme	Enerji Bant Aralığı (eV)	Dalgaboyu (λ)	Renk
GaAs	1.4	885 nm	Kızılötesi
GaP	1.8 ile 2.26	549 ila 700 nm	Yeşilden kırmızıya
InGaAlP	1.9 ile 2.3	539 ila 653 nm	Yeşilden kırmızıya
GaN	3.4	365 nm	Morötesi ile mavi
InGaN	2.1 ile 3.2	388 ila 590 nm	Morötesi ile yeşil

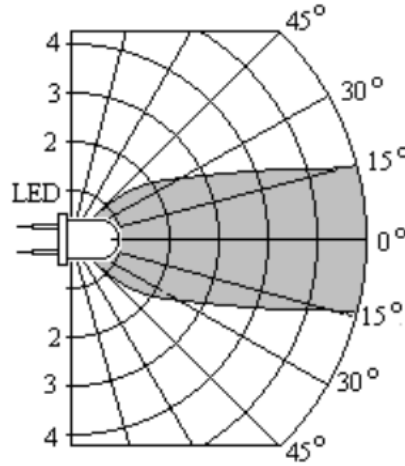
LED karakteristikleri

Işık yayıcı olarak kullanılan LED'lerin önemli karakteristikleri: Akım-Gerilim karakteristiği, Akım-Işık Şiddeti karakteristiği ve Işıma Diyagramı olarak belirlenebilir. Örnek olarak Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de bu karakteristikler gösterilmiştir.



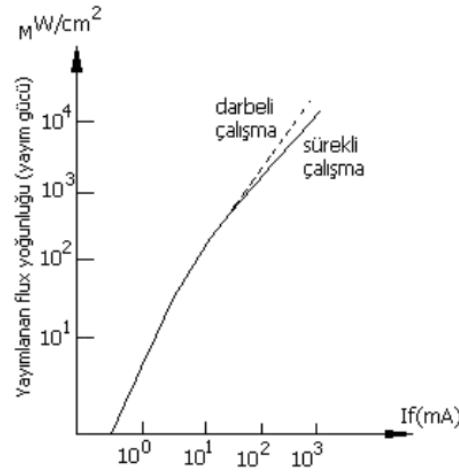
Şekil 3.3. LED'in akım – gerilim karakteristiği

Şekil 3.3 grafiğinden anlaşılmaktadır ki bir LED'in akımı ile gerilimi arasındaki bağıntı lineer değildir (Eldar 2017).



Şekil 3.4. LED'in ışıma diyagramı

Şekil 3.4'de LED'in ışıma diyagramının bir örneği verilmiştir. Işıma diyagramının açısı LED tipine göre değişmektedir (Eldar 2017).



Şekil 3.5. Akım- ışık şiddeti karakteristiği

LED'den geçen akım ile LED in yaydığı ışık bir noktaya kadar doğru orantılı olarak ilerler ve daha sonra grafik bükülür. Bu doğrusallığın bozulma sebebi artan akımın diyotun aşırı ısınmasına neden olması ve lineer olmayan etkilerin ortaya çıkmasıdır (Anonymous 2005).

LED ile aydınlatma

Var olan ticari beyaz LED'ler, iki temel kategoriye farklı spektral bileşenlere göre ayrılmaktadır. İlkinde floresan lambalarda olduğu gibi mavi renkli LED çipinin, sarı renkli fosforla kaplanması yoluyla beyaz ışık elde edilir. İkincisinde RGB diye adlandırılan; kırmızı, yeşil ve mavi renkli ışıkların uygun oranda karışımı ile beyaz ışık elde edilir. Birinci tür LED'lerde, sarı fosforun yavaş tepki hızı nedeniyle, LED modülasyon bant genişliği çok düşüktür. Diğer tür olan RGB karışımı beyaz LED ise henüz VLC sistem tasarımında yaygın olarak kullanılmamaktadır. Çünkü yüksek spektral bant genişliği sağlamasına rağmen modülasyon devresi karmaşık ve yüksek maliyetlidir (Chi 2018).

LED'lerin sürekli gelişen ve mevcut diğer aydınlatma kaynaklarından çok yüksek olan etkinlikleri, renk kaliteleri, civa içermemeleri, yüksek hızlarda anahtarlanabilmeleri, elektronik kontrolünün kolay olması, aç ve kapa sinyali uygulandığında gecikme olmaksızın açılıp kapanabilmeleri, mekanik hareketli kırılğan parçalardan oluşmayıp sağlam olmaları (robust), ışık şiddetlerinin çok büyük bir aralıkta ayarlanabilmesi (dimming), çok uzun olan ömürleri (100.000 saate kadar), alçak ve yüksek ortam sıcaklıklarında çalışabilmeleri gibi özellikleri onları aydınlatma uygulamalarında kullanmak için ideal bir seçenek kılmıştır (Çil 2014).

3.2. Fotodiyot

Fotodiyotlar, fotonlara ve yüksek enerjili parçacıklara duyarlı yarı iletken aygıtlar olarak tanımlanır. Bu aygıtlar, fotonların veya yüklü parçacıkların emilmesiyle çalışarak, gelen güçle orantılı bir şekilde harici devrede bir akım akışı oluşturmaktadır. Bu aygıtlar, ışık varlığını veya yokluğunu az miktarlarda olsa dahi tespit edebilirler ve 1 pW/cm^2 'den az yoğunluklardan 100 mW/cm^2 'nin üstündeki yoğunluklara kadar son derece duyarlı ölçümler için kalibre edilebilmektedir. Silikon fotodiyotlar, spektroskopi, fotoğrafçılık, analitik enstrümantasyon, optik konum sensörleri, ışın hizalama, yüzey karakterizasyonu,

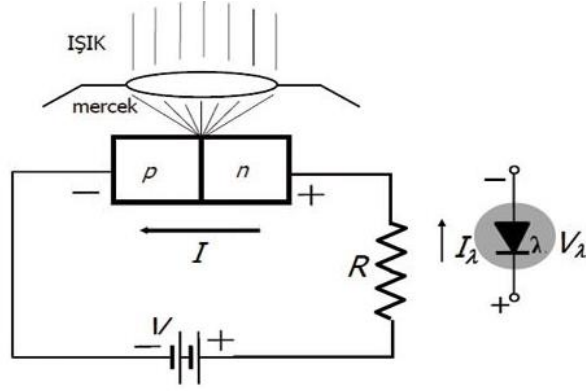
lazer mesafe bulucu, optik iletişim ve tıbbi görüntüleme cihazları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Anonymous 2020).

Fotodiyot nasıl çalışır?

Normal bir P-N diyotu, ters polarlama durumunda çok az miktarda elektrik akımına izin verir. Ters polarlama koşullarında elektrik akımını artırmak için, daha fazla azınlık taşıyıcı üretilmesi gerekir. P-N diyotuna uygulanan harici ters voltaj, azınlık taşıyıcılarına enerji sağlar, ancak azınlık taşıyıcılarının popülasyonunu artırmaz. Bununla birlikte, harici ters öngerilim voltajı nedeniyle az sayıda azınlık taşıyıcı üretilir. N tarafında veya P tarafında üretilen azınlık taşıyıcılar, bağlantı noktasını geçmeden önce aynı malzemede yeniden birleşeceklerdir. Sonuç olarak, bu yük taşıyıcılar nedeniyle elektrik akımı akmaz (Anonymous 2015).

Bu sorunu çözebilmek için, daha fazla yük taşıyıcısı üretimini sağlamak adına harici enerjinin direkt olarak eklem bölgesine uygulanması gerekmektedir. Eklem bölgesinde daha fazla miktarda yük taşıyıcısı üretmek için tasarlanan bu özel diyotlar fotodiyot olarak adlandırılmaktadır. Bu diyotlar, eklem bölgesinde harici enerji olarak ışık veya foton kullanımı ile yük taşıyıcılarını oluştururlar (Anonymous 2015).

Işık enerjisini kullanarak elektron-boşluk çifti oluşturma mekanizması, iç fotoelektrik etki olarak bilinir. Eklem bölgesindeki azınlık taşıyıcılar, eklem bölgesi elektrik alanı ve dış elektrik alanı nedeniyle kuvvete maruz kalır. Yani eklem bölgesindeki serbest elektronlar, eklem bölgesinin kenarında P ve N tarafında bulunan negatif ve pozitif iyonlardan itici ve çekici kuvvete maruz kalır. Böylece, N bölgesine doğru bir serbest elektron akışı meydana gelir ve N bölgesine ulaşan serbest elektronlar kaynağın pozitif kutuplarına yönelir. Benzer şekilde boşluklar (hole) ters yönde hareket eder (Anonymous 2015).



Şekil 3.6. Fotodiyot polarlanması, devresi ve simgesi (Anonymous 2021)

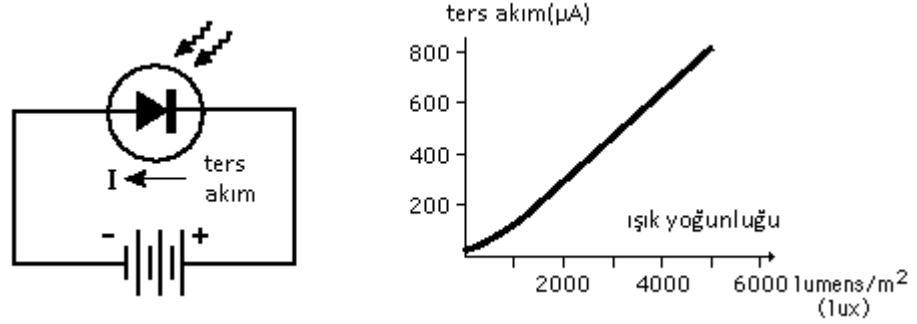
Fotodiyot çalışma modları

Fotodiyotlar, Fotovoltaik veya Fotoiletken mod. olmak üzere iki moddan birinde çalıştırılabilmektedir. Tolere edilebilen karanlık akım miktarına ve uygulamanın hız gereksinimlerine göre bir fotodiyotun çalışma modu seçimi değişebilmektedir.

Fotovoltaik çalışma durumunda, harici voltaj fotodiyota uygulanmaz. Fotovoltaik modda karanlık akım çok düşüktür ve çalıştırılan fotodiyotların tepki hızı düşüktür. Düşük ışık seviyelerinin tespiti veya düşük hızlı uygulamalarda, fotodiyotlar genellikle Fotovoltaik modda çalıştırılmaktadır.

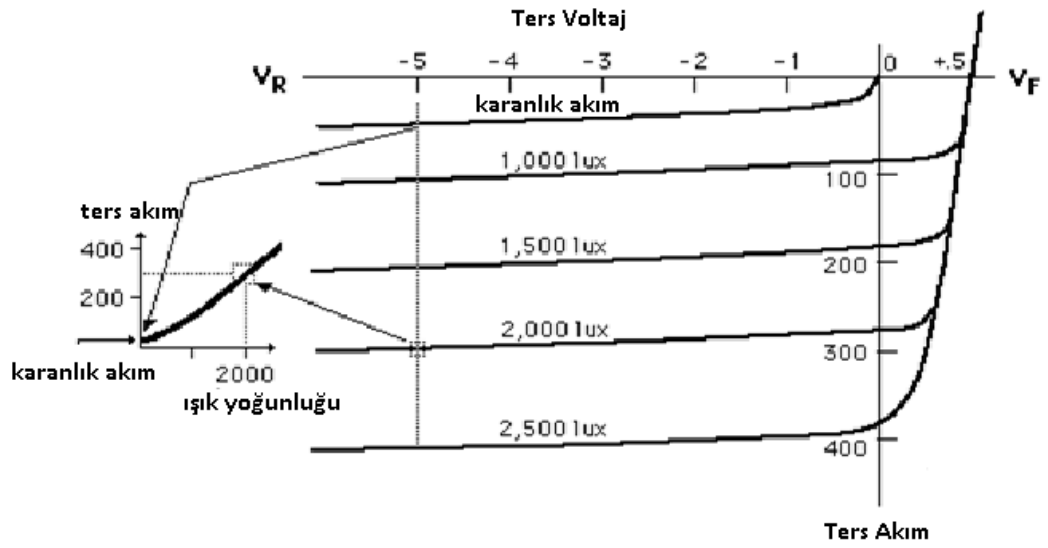
Fotoiletken çalışma koşulunda ise fotodiyota harici bir ters öngerilim voltajı uygulanmaktadır. Uygulanan bu voltaj, eklem bölgesinin genişliğini artırmakta ve artan tepki hızı ile neticelenen bağlantı kapasitansını azaltmaktadır. Aynı zamanda, ters öngerilim karanlık akımını da artırmaktadır. Ayrıca fotodiyottan akan ters doyum akımı sebebiyle Fotoiletken modda çalıştırılan fotodiyotlar, yüksek bir gürültü akımına sahip olmaktadır (Anonymous 2015).

Fotodiyot karakteristiği



Şekil 3.7. Tipik bir fotodiyotun ters akım- ışık yoğunluğu grafiği (Anonymous 2016)

P-N eklemine ışık düştüğünde, aydınlatma ile orantılı bir ters akım akar (Anonymous 2016).



Şekil 3.8. Tipik bir fotodiyotun I-V grafiği (Anonymous 2016)

Fotodiyot, ters polarlama koşulunda çalışır. Foto akımın uygulanan ters öngerilim voltajından neredeyse bağımsız olduğu Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Ters akım, ışık aydınlatması olmadığı durumda, hemen hemen sıfırdır. Nanoamper seviyesindeki minimum akım miktarına karanlık akım denir. Optik güç (ışık miktarı) arttığında, ters akım da doğrusal olarak artar (Anonymous 2016).

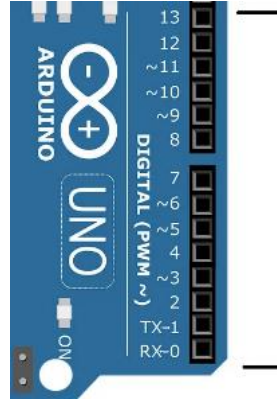
3.3. Arduino Kartı

Arduino Uno, bir 8-bit ATmega328P tabanlı mikrodenetleyici kartıdır. Mikrodenetleyiciyi desteklemek amacıyla ATmega328P ile birlikte seri iletişim, kristal osilatör, voltaj regülatörü gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Arduino Uno kartında USB bağlantısı, güç girişi, bir ICSP başlığı, sıfırlama düğmesi ve ek olarak 14 adet dijital giriş/çıkış pini (6 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir), 6 adet analog giriş pini, bulunmaktadır (Anonymous 2018).



Şekil 3.9. Arduino Uno kartı

Arduinolar, diğer Arduino kartları, mikro denetleyiciler veya bir bilgisayarla iletişim kurmak amacıyla kullanılabilir. ATmega328P mikrodenetleyici, TTL (5V) seri iletişim için dijital pin 1 (Tx) ve dijital pin 0 (Rx) kullanmaktadır. Bilgisayardaki yazılıma sanal bir COM bağlantı noktası şeklinde görünen seri iletişim, USB üzerinden yönlendirilmektedir. Arduino yazılımında Arduino kartına metinsel verilerin iletilmesine olanak sağlayan bir seri monitör bulunur. Arduino kartında, USB'den seri çipe ve bilgisayara USB bağlantısı aracılığıyla veri aktarılırken yanıp sönen iki adet Rx ve Tx LED'i vardır (Anonymous 2018).

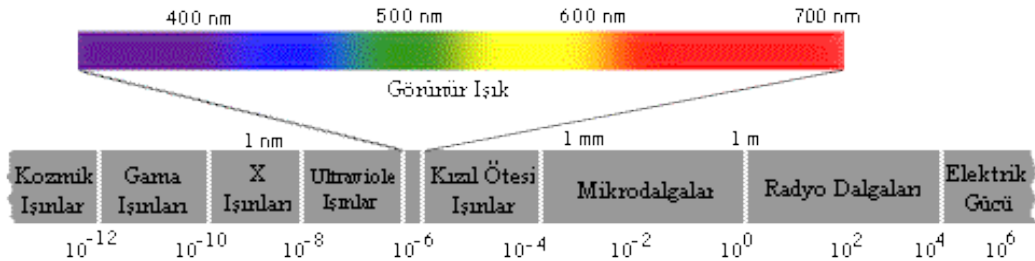


Şekil 3.10. Arduino Uno üzerindeki dijital pinler

Arduino Uno kartında 0-13 pinleri dijital giriş/çıkış pinleridir. Arduino dijital pinleri sadece voltaj sinyali olma ve olmama şeklinde iki durumu okuyabilmektedir. Bu türden girdilere genellikle dijital (ikili-binary) bilgi denir. Bu durumlar ise 1 ve 0 ya da YÜKSEK ve DÜŞÜK şeklinde tanımlandırılır (Anonymous 2020).

3.4. VLC (Görünür Işık İletişimi)

Görünür ışık iletişimi (VLC), yaklaşık 400 ile 800 THz (780-375 nm) frekans bandında (Şekil 3.11) görünür ışık kullanan bir veri iletişim versiyonudur. Optik kablosuz iletişim teknolojisinin bir alt alanı olan VLC, bilgiyi ışığı modüle ederek taşımaktadır (Haas 2015). İletişim sinyali aydınlatma ışığının üzerinde kodlanmıştır. Spektrumun görünür ışık bölgesinde çalışan yüksek güçlü LED'lerin yaygınlaşmasıyla VLC'ye duyulan ilgi artmıştır (Aron 2015).



Şekil 3.11. Elektromanyetik spektrum bölgeleri

Günümüzde mevcut akkor ve flüoresan lambalar hızlı bir şekilde LED'ler ile değiştiriliyor. Son derece yüksek enerji verimliliğinin yanı sıra, LED'lerin zararlı

kimyasallar kullanmadan daha uzun ömür, daha düşük ısı üretimi ve iyileştirilmiş renk oluşturma gibi avantajları mevcuttur. LED'ler aynı zamanda farklı ışık yoğunluklarına çok hızlı bir oranda geçiş yapabilmektedirler. Bu işlevsellik, LED'lerin yüksek hızlı veri iletimi için kullanılabildiği yeni bir iletişim teknolojisini (VLC) meydana getirmiştir (Pathak et al. 2015). Aydınlatma ışığını iletişim için kullanma motivasyonu hem enerji tasarrufu sağlayacak hem de radyo frekansı (RF) teknolojisine kıyasla sağlığa zararı olmayan “yeşil” bir haberleşme teknolojisi sunacaktır. Yüksek hızlı kablosuz bağlantı talebindeki neredeyse üstel büyümenin neticesinde ek bir kablosuz iletişim teknolojisi geliştirme gereksinimi duyulmuştur (Aron 2015).

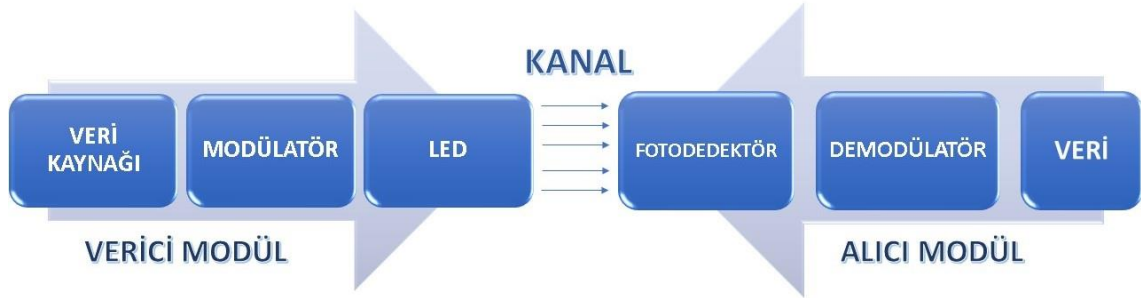
VLC; maliyeti düşük, bulunabilirliği yüksek LED ve fotodiyotlar ile veri iletişimi sağlamak amacıyla hızla büyüyen bir teknolojidir. Işık üreten cihazlar (iç/dış mekân lambaları, TV'ler, ticari ekranlar, araba farları/arka lambaları) her yerde kullanıldığından, VLC bilgi işlem için bir iletişim ortamı olarak her yere uygulanabilir. VLC'nin özelliklerinden bir diğeri de tam bant genişliği sağlamasıdır. RF frekanslarının tüketimine kıyasla yaklaşık 10.000 kat daha fazla bant genişliğini garanti eder (Owolabi 2018). Mobil bağlantıda kısıtlı radyo frekans (RF) spektrumuna alternatif olan VLC teknolojisi sayesinde ampuller, kullanıcılar için birer baz istasyonu haline gelir.

VLC iki akıllı cihaz arasında yüksek hızlı veri bağlantılı güvenli bir iletişim sağlar. Hastaneler ve sağlık hizmetlerinde RF sinyalleri özellikle tarayıcıların çevresinde ve ameliyathanelerde istenmez. VLC teknolojisi bu sorun için de bir çözümdür. VLC spektrumu RF spektrumuna müdahale etmemesi nedeniyle hastanelerde kullanmak için uygundur. Havacılıkta da parazit riskini azaltmak ve yolculara sürekli iletişim hizmetleri sağlamak için, uçak kabinlerinde Wi-Fi yerine VLC kullanılabilir. Bilindiği üzere su altı ortamlarında RF sinyalleri yayılımı verimsizdir Bunun nedeni, iletilen sinyalin hızlı zayıflamasıdır. Görünür ışığın yayılması su altı veri aktarımının kalitesini artıracığından VLC su altı iletişiminde kullanılabilir. VLC sinyalleri duvarlara etki edemez. Bu nedenle, güvenliğin büyük önem taşıdığı uygulamalar için de tercih edilecektir. Ek olarak, petrokimya veya madencilik gibi tehlikeli ortamlarda RF sinyali kullanımı yüksek patlama riskine sebep olabilir. RF sinyali, bir buhar-hava karışımını tutuşturarak patlamaya yol açabilecek yoğunlukta bir kıvılcım üretebilir. Bu nedenle VLC teknolojisi böyle ortamlar

için uygundur (Ndjiongue et al. 2015). Uygulama kolaylığı ve düşük maliyet avantajına da sahiptir.

VLC sistemi

Bir VLC sistemi, esas olarak, LED'ler tarafından üretilen ışığı modüle eden bir VLC vericiden ve ışıktan modüle edilmiş sinyali çıkarmak için kullanılan ışığa duyarlı bir elemana dayalı bir VLC alıcısından oluşur. VLC kanalı vasıtasıyla birbirine bağlanan verici ve alıcı fiziksel olarak birbirinden ayrıdır (Cailean 2015). Kullanılan LED'lerin sayısı, şekli ve dalga boyu, kullanılan ışık dedektörlerinin sayısı ve türü (fotodirenç, fotodiyot, ters taraflı LED vb.), kodlama yöntemi, modülasyon şekli (OOK, PPM, OFDM, vb.) ve LED'ler ile ışık dedektörü arasındaki senkronizasyon ve mesafe önemlidir (Sandoval-Reyes 2019). VLC sistemleri için verici ve alıcı arasında görüş hattı (LOS) zorunlu bir koşuldur (Cailean 2015).



Şekil 3.12. VLC sisteminin şematik gösterimi

VLC kanalı

İletişimde kanal, verici ile alıcı arasındaki boşluğu temsil eder. Taşıyıcı sinyali iletme kabiliyeti ile karakterize edilir ve zayıflama, parazit ve gürültü gibi birçok faktörden etkilenir (Ndjiongue et al. 2015). Gündüz vakti en önemli gürültü kaynağı güneştir. Diğer gürültü kaynakları, veri aktarım yetenekleri olan veya olmayan herhangi bir ışık kaynağı ile temsil edilir. Farklı dinamik koşullar da VLC kanalını öngörülemez hale getirebilir. Dış mekân VLC uygulamaları durumunda, hava nedeniyle öngörülemezlik daha da büyüktür. Yağmur, kar veya yoğun sisten kaynaklanan su

parçacığı, verileri içeren ışığın dağılmasına neden olacağından VLC bağlantısını etkileyebilir. Çok sayıda gürültü kaynağı, özellikle uzun mesafedeki düşük sinyallerle birlikte, VLC'deki SNR'yi önemli ölçüde etkiler (Cailean 2015). LED ve fotodiyot arasındaki açıklık VLC teknolojisinin kanalıdır. VLC iletişim sistemleri iki tür kanala sahiptir; tek bir LED ve fotodiyotu kapsayan tek VLC kanalı ve vericinin çok renkli LED'lerden oluştuğu çok kanallı VLC sistemleri. İkinci durumda, fotodiyot her biri vericiden gelen bir renge duyarlı olan birden fazla dedektörden yapılmıştır (Ndjiongue et al. 2015).

VLC vericisi

VLC vericisi, verileri boş alan optik ortamı üzerinden görünür ışık vasıtasıyla gönderilebilen mesajlara dönüştürmektedir. Sistemde hem ışık yaymak hem de veri iletmek amaçlanır. Aynı zamanda, veri iletimi, aygıtın birincil görevi olan aydınlatma işlevini etkilememelidir. Bu sebepten VLC vericisi aydınlatma gereksinimlerine uyumlu olmalıdır. Ayrıca, VLC verici herhangi bir gözle görülür titremeye neden olmamalıdır (Cailean 2015). Dolayısıyla, VLC sisteminin performansı vericinin tasarımına bağlı olarak değişebilmektedir. İç ve dış mekân uygulamalarında en sık kullanılan aydınlatma beyaz ışıktır. Bunun nedeni, beyaz ışık altında görülen nesnelerin renklerinin (renk oluşturma olarak da bilinir) aynı nesnelerin doğal ışık altındaki renklerine çok benzemesidir.

VLC sistemlerinde verici görevindeki LED armatür; bir LED lamba, balast, muhafaza ve diğer bileşenlerden oluşan eksiksiz bir aydınlatma ünitesidir. Bir LED lamba birden fazla LED içerebilir. Ayrıca lamba, LED'lerden akan akımı kontrol etmek amacıyla bir sürücü devresi içermektedir. Verici sistemde bilgi bir Açma-Kapama Anahtarlama modülasyonunda, veri biti "0" ve "1", iki farklı ışık yoğunluğu seviyesi belirlenerek iletilebilmektedir (Pathak et al. 2015). Bir VLC vericideki diğer önemli husus verileri modüle edilmiş bir mesaja dönüştüren kodlayıcılardır. Bu işlem LED'lerin ayarlanan veri hızına ve ikili verilere göre anahtarlanmasını yönetmektedir. Böylelikle ikili veriler genlik modülasyonlu bir ışık demetine çevrilir.

LED'ler tarafından üretilen ışık, genellikle Açma-Kapama Anahtarlama (OOK) modülasyonu ile modüle edilir. Mikro denetleyici kullanımı kodlayıcı için uygun maliyetli bir çözümdür. Pek çok durumda yüksek performans gösterirler. Bununla birlikte, daha karmaşık uygulamalarda, mikro denetleyici, dijital sinyal işleme tekniklerinin yardımıyla gelişmiş performanslar sağlayabilecek bir FPGA ile değiştirilebilir (Cailean 2015).

Vericinin performansı esas olarak LED'lerin özellikleriyle sınırlıdır. Vericinin kapsama alanı aydınlatma modeli (emisyon açısı) ve iletim gücü ile ilişkiliyken veri hızı (aktarım frekansı) LED'lerin anahtarlama kapasitesine bağlıdır (Cailean 2015).

VLC alıcısı

VLC alıcısının görevi verileri modüle edilmiş ışık demetinden çıkarmaktır. Gelen ışığı, kod çözücü modülü aracılığıyla demodüle ederek bir elektrik sinyaline dönüştürür. Gereken performans ve maliyet sınırlamalarına bağlı olarak, mikro denetleyici veya bir FPGA kod çözücü olarak kullanılabilir. VLC alıcısı, iletişim aralığını ve parazitlere karşı direnci belirlediğinden VLC sisteminin performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. VLC alıcıları genellikle yüksek hızlı iletişim ve bant genişliği imkânı sağlayan ışığa duyarlı öğelere dayanmaktadır. Bununla birlikte, gelen ışık yalnızca yayıcıdan değil, aynı zamanda diğer ışık kaynaklarından (yapay veya doğal) etkilendiğinden, alıcı önemli parazitlere maruz kalır. VLC alıcısının performansları, bir optik filtre ile istenmeyen spektrum bileşenler (IR bileşeni gibi) engellenerek artırılabilir. Ayrıca, beyaz LED'lerin kullanıldığı yüksek hızlı uygulamalarda, optik filtre yalnızca mavi renge karşılık gelen dar bantlı bir radyasyonun geçişine izin verir. Bu seçimin nedeni, beyaz ışığın mavi LED'lerden ve sarı fosfordan elde edilmesi ve mavi LED'lerin geçiş sürelerinin daha kısa olması nedeniyle daha yüksek veri hızlara ulaşılmasıdır. Hizmet alanını etkileyen alıcı görüş alanını (FOV) daraltarak gürültü etkisi azaltılabilir. Geniş bir hizmet alanı için geniş bir FOV gerekmektedir. Fakat bu durum SNR bozulmalarına sebep olan, daha fazla gürültü yakalama dezavantajıyla birlikte gelmektedir. Aynı zamanda, kısa menzilli iç mekân uygulamaları daha çok hareketlilik gerektirir ve çoğu durumda FOV'u daraltma olasılığı önemsenmez. Öte yandan, aralığın küçük açılara neden olduğu dış mekân uzun menzilli uygulamalar için dar FOV etkili bir

çözümdür. Teorik ve deneysel çalışmalar, dar bir FOV'un, gün ışığı veya VLC vericilerinden kaynaklanan gürültüye karşı dayanıklılık durumunu iyileştirdiğini açıklamaktadır. Alıcı FOV'u, bir lens yardımıyla ışığı fotodedektör üzerine odaklayan optik sistemin FOV'u vasıtasıyla saptanır (Cailean 2015). Işık radyasyonunu toplayan fotodedektörler VLC alıcılarının esas elemanıdır (Ndjiongue et al. 2015).

Fotodedektör, fotoiletken modda çalışarak gelen ışıkla orantılı bir akım meydana getiren aygıtlardır. Foto akımın değeri, fotodedektörlerin spektral duyarlılığına bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple de sistem performansını artırmak için daha büyük fotodedektör alanı oluşturulabilir. Bununla birlikte, fotodedektörün alanı kapasitansını güçlü bir biçimde etkiler ve bu da bant genişliğini etkiler. Bu koşullarda, fotodedektörlerin alanını seçmek, SNR ve bant genişliği arasında bir tercihi temsil eder. Daha sonra, üretilen foto akımın küçük değerleri nedeniyle, bu akımı bir voltaja dönüştürmek için bir transempedans devresi kullanılır. Transempedans devresi tarafından sağlanan voltaj yükseltilir; yüksek ve düşük frekanslı gürültüyü ve ayrıca DC bileşenini gidermek için filtrelendir. Tüm bu işlemler nihayetinde orijinal sinyal eldesi gerçekleştirilmiş olur (Cailean 2015).

3.5. Li-Fi çalışma prensibi

Li-Fi sisteminin mimarisi iki temel optoelektronik ayağına dayanır: LED ampuller ve fotodedektörler

Li-Fi teknolojisinin kalbi, yüksek parlaklığa sahip bir LED ampuldür ve veri iletilicileri olarak işlev görür. Herhangi bir temel LED ampul bu amaç için kullanılabilir, aynı anda hem kablosuz olarak veri iletebilmesi hem de aydınlatması en gerekli unsurdur. Aydınlatmanın her yerde bulunması ve aydınlatma için standart akkor ve kompakt flüoresan lambalar yerine LED ampulleri kullanmaya doğru geçiş, Li-Fi'nin ek avantajlarıdır.

Li-Fi vericisi

İletim için verilerin ışığa kodlanması, LED'in ışık yoğunluğu seviyelerinin değiştirilmesiyle sağlanmaktadır ve bu durum LED'in çok yüksek bir hızda yanıp sönmesine sebep olmaktadır. Bu yanıp sönmeler (titreşimler), verilerin iletilmesi anlamına gelmektedir. LED AÇIK seviyesi, mantıksal olarak "1" iletimini temsil ederken KAPALI seviyesi mantıksal olarak "0" iletimini göstermektedir. 1'ler ve 0'ların kombinasyonu farklı veri dizileri oluşturur. Bunun yanı sıra, titreşim hızı o kadar yüksektir ki, LED insan gözüne sabit bir ışık gibi görünür ve göze zarar vermez (Albraheem et al. 2018).

Titreyen bir ışık son derecede rahatsız edici olabilir, fakat tam olarak kablosuz veri aktarımında ışığın kullanılmasına olanak sağlayan unsur budur. LED'ler çok hızlı bir şekilde açılıp kapanabilir ve insan gözü bunu algılayamaz yani aslında 'titriyor' olsa bile sürekli açık olma durumunu korumaktadır (Suganya and Subhalakshmi 2015). Li-Fi sistemindeki veri hızı LED'lerle doğrudan bağlantılı olduğundan LED seçimi önemli bir rol oynamaktadır. LED'lerin sayısı ve anahtarlanma hızı haberleşme verilerini etkileyebilmektedir. Verilerin 1'ler ve 0'lar şeklinde yüksek hızlarda iletilmesi LED'in yüksek AÇMA-KAPAMA hızıyla ilişkilidir. Ayrıca sistemde aktarılan veri LED sayısı ile doğru orantılıdır.

Li-Fi alıcısı

İşığa duyarlı bir cihaz; fotodedektör veya fotosensör, ışığı algılar ve elektrik sinyaline dönüştürmektedir. LED AÇIK koşulunda, fotodedektör bir dijital 1 kaydeder; aksi halde, bir dijital 0 kaydeder. Sonraki aşamalar alınan verileri kuvvetlendirmek, işlemek ve kullanıcıya aktarmaktır (Albraheem et al. 2018).

3.5.1. Li-Fi modülasyon teknikleri

Li-Fi’da veri göndermek için görünür ışık kullandığından, veriyi iletilebilecek bir sinyale dönüştürmek gerekir. Bu sinyaller ışık atımlarından oluşmaktadır (Gelani and Pandi 2017).

Genel olarak hem ışık hem de RF dalgaları elektromanyetik dalgalar olduğundan, RF iletişimleri için kullanılan tipik modülasyon teknikleri (tek taşıyıcılı modülasyon veya çoklu taşıyıcı modülasyonu) Li-Fi sistemleri için de kullanılabilir. Bununla birlikte, ışık sinyali özellikleri nedeniyle, Li-Fi’de bazı benzersiz modülasyon teknikleri de kullanılmaktadır (Alfattani 2018).

Li-Fi’de üç tip modülasyon kullanılmaktadır: Tek Taşıyıcı Modülasyonu (SCM), Çoklu Taşıyıcı Modülasyonu (MCM) ve Renk Modülasyonu veya Renk Kaydırma Anahtarlama (CSK) (Swami and Moghe 2020).

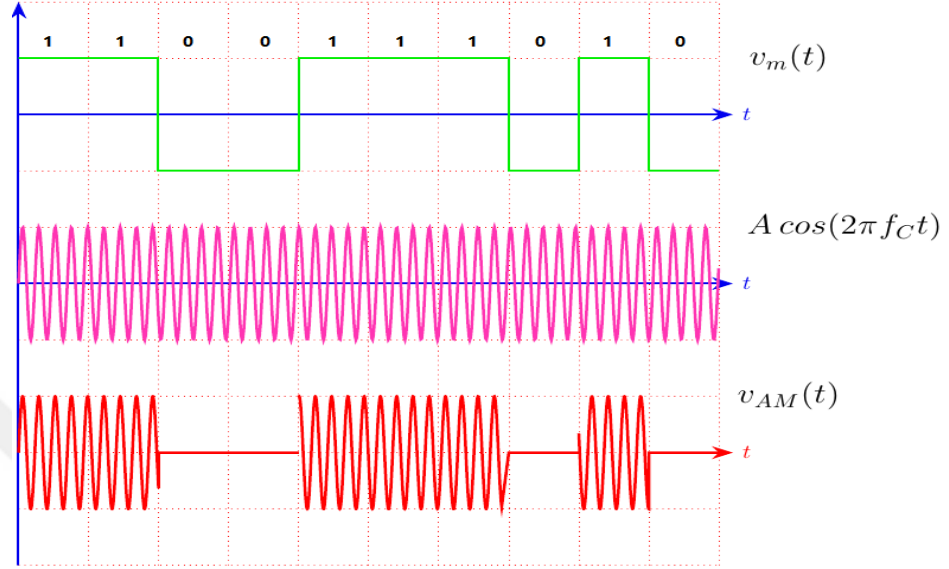
Tek taşıyıcı modülasyonu (SCM)

SCM, düşük ve orta veri hızlarına sahip uygulamalar için daha elverişlidir. Bu modülasyon, herhangi bir sayıda sinyalin alınabildiği fakat hepsinin farklı frekanslarda ayrı ayrı modüle edildiği bir tekniktir. SCM’de, veriler tek bir temel taşıyıcı aracılığıyla taşınmaktadır. Çoklu taşıyıcı modülasyonuna oranla daha verimlidir. Kablosuz iletişimde en fazla kullanım alanı bulan tek taşıyıcı modülasyon teknikleri, Açma-Kapama Anahtarlama (OOK), Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM), Darbe Genlik Modülasyonu (PAM) ve Darbe Pozisyonu Modülasyonudur (PPM) (Swami and Moghe 2020).

Açma-kapama anahtarlama (OOK)

Dijital verileri bir taşıyıcı dalganın varlığı veya yokluğu olarak temsil eden en basit genlik kaydırma anahtarlama (ASK) modülasyonu anlamına gelir (Aneja and Sharma 2016).

En temel haliyle, bir dijital "1", ışık "açık" durumunu temsil ederken, bir dijital "0", ışık "kapalı" durumunu ile temsil etmektedir. Bu tekniğın avantajı, oluşturmanın ve kodunu çözenin basit olmasıdır (Gawande et al. 2016).



şekil 3.13. OOK modülasyon tekniğı

şekil 3.13’de gösterildiğı gibi, $V_m(t)$ gönderilecek dijital sinyaldır (bilgi ışareti), $A \cdot \cos(2\pi f_C t)$ taşıyıcı sinyal ve $V_{AM}(t)$ OOK ile modüle edilmiş taşıyıcı sinyaldir. OOK modülasyonunda dijital 0 iletimi sırasında taşıyıcı yoktur, taşıyıcı dijital 1 bilgisini iletir (George et al. 2019).

Darbe genişlik modülasyonu (PWM)

Bu modülasyon tekniğinde, modüle edilmiş sinyal darbeler tarafından kare dalga şeklinde taşınır. Veriler darbelerin süresine kodlayarak iletir. Her darbe içinde birden fazla veri biti taşınabilir (Gelani and Pandi 2017).

Darbe pozisyonu modülasyonu (PPM)

Verileri, darbenin pozisyonunu kullanarak belirli bir süre içerisinde kodlayan modülasyon tekniğidir. Darbe içeren periyodun süresi, farklı konumların tanımlanmasına müsaade edecek kadar uzun olmalıdır (Sarkar et al. 2015).

Darbe genlik modülasyonu (PAM)

Bu modülasyon tekniğinde, bilgiyi taşıyan mesaj, bir dizi sinyal darbesinin genliği üzerinde kodlanmaktadır (George et al. 2019).

Çoklu taşıyıcı modülasyonu (MCM)

Bilgiyi daha yüksek veri hızlarında iletmek için kompleks işlemler gerektiriyor oluşu SCM'nin dezavantajıdır. Daha yüksek veri hızları için MCM geliştirildi (George et al. 2019). Dijital verilerin farklı taşıyıcı frekansları ile aktarımını çoklu taşıyıcı modülasyonu (MCM) sağlamaktadır. Girişim ve zayıflama gibi kanal koşullarıyla başa çıkabilmesi bu tekniğin ana avantajıdır. Ayrıca, darbe gürültüsünün neden olduğu girişime SCM'den daha az duyarlıdır. MCM, çift yan bant modülasyon tekniklerinden daha yüksek spektral verimliliğe sahiptir ve zaman senkronizasyon hatalarına karşı daha az hassastır. Bu sebeple, MCM, SCM'ye kıyasla yüksek bant genişliğine sahiptir ve yüksek hızlı optik kablosuz iletişim için tercih edilmektedir. MCM genellikle SCM'ye göre daha düşük enerji verimlidir ve frekans senkronizasyon sorunlarına daha hassastır (Alfattani 2018).

İki tür MCM vardır: Ortogonal Frekans Bölmeli Modülasyon (OFDM) ve Renk Kaydırma Modülasyonu veya Renk Kaydırma Anahtarlama (CSK)

Dikgen frekans bölmeli çoklama (OFDM)

Bu modülasyon, genellikle verici olarak birden fazla cihaz kullanıldığında uygulanır (George et al. 2019). OFDM, çok sayıda taşıyıcı frekansta dijital verilerin kodlanması için kullanılan bir yöntemdir. Birkaç paralel veri akışı veya kanalı üzerinde veri taşıma amaçlı çok miktarda yakın mesafeli ortogonal alt taşıyıcı sinyal kullanılmaktadır. Her bir alt taşıyıcı, aynı bant genişliğindeki geleneksel tek taşıyıcı modülasyon şemalarına benzer toplam veri hızlarını koruyarak, düşük bir sembol hızında geleneksel bir modülasyon şeması ile modüle edilir (Gelani and Pandi 2017). Bir OFDM modülatörü, bir ters ayrık Fourier dönüşüm bloğu ve ardından bir dijital analog dönüştürücü (DAC) içerir. OFDM tarafından üretilen sinyal karmaşık ve iki kutupludur. Bu nedenle, Li-Fi ağ çalışmalarında geleneksel OFDM tekniklerinde bazı modifikasyonların yapılması gerekir (Alfattani 2018).

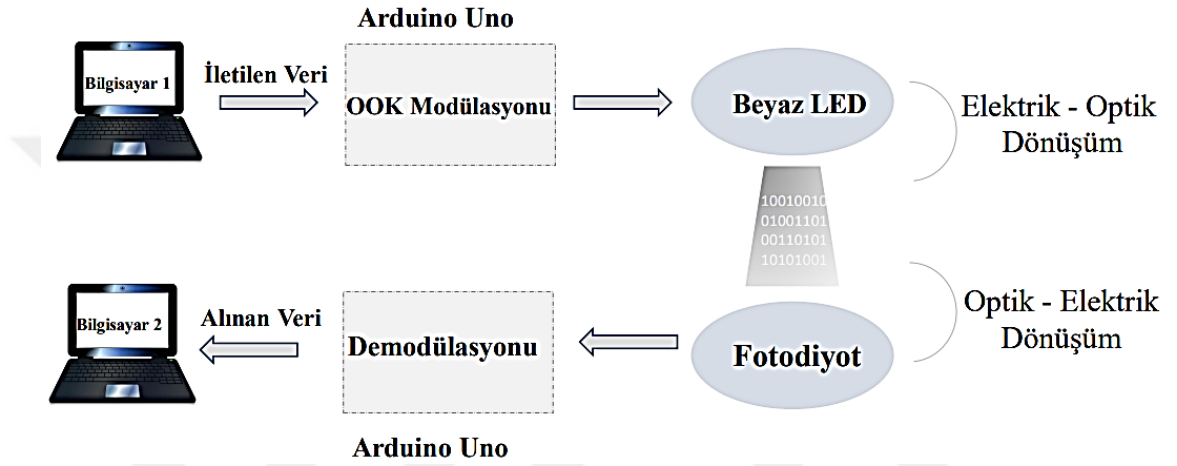
Renk kaydırma modülasyonu (CSK)

Renk kaydırma modülasyonu, farklı dalga boylarına sahip farklı ışık renkleri kullanarak farklı verileri iletmek için kullanılır. Kırmızı, Mavi ve Yeşil (RGB) LED'ler farklı bilgiler taşıyan verileri göndermek için kullanılır. Alıcı, mesajların farklı dalga boylarını tanımlayacak ve bunların kodunu çözecek şekilde programlanmıştır (George et al. 2019). Beyaz ışığın mavi renkli LED çipi ve sarı fosfor ile üretimi LED'in anahtarlama hızını yavaşlatır. Üç farklı LED (kırmızı, mavi ve yeşil)'in birleşimi beyaz ışık elde etmenin diğer bir yoludur. CSK, kaynağındaki bu üç rengin yoğunluğunu kullanmak suretiyle iletişim sinyalini modüle etmektedir (Swami and Moghe 2020). Verici ve alıcının kompleks yapısı bu sistemin dezavantajıdır (Sharma et al. 2014).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Sistem Dizaynı

Bu sistemde bilgisayarların seri portları kullanılarak, fiziken birbirine bağlı olmayan iki bilgisayar arasında ışık aracılığıyla veri iletimi sağlanmıştır. Sistem farklı alıcı devreler ile çalıştırılıp üç ayrı devre için veri iletim hızları incelenmiştir.

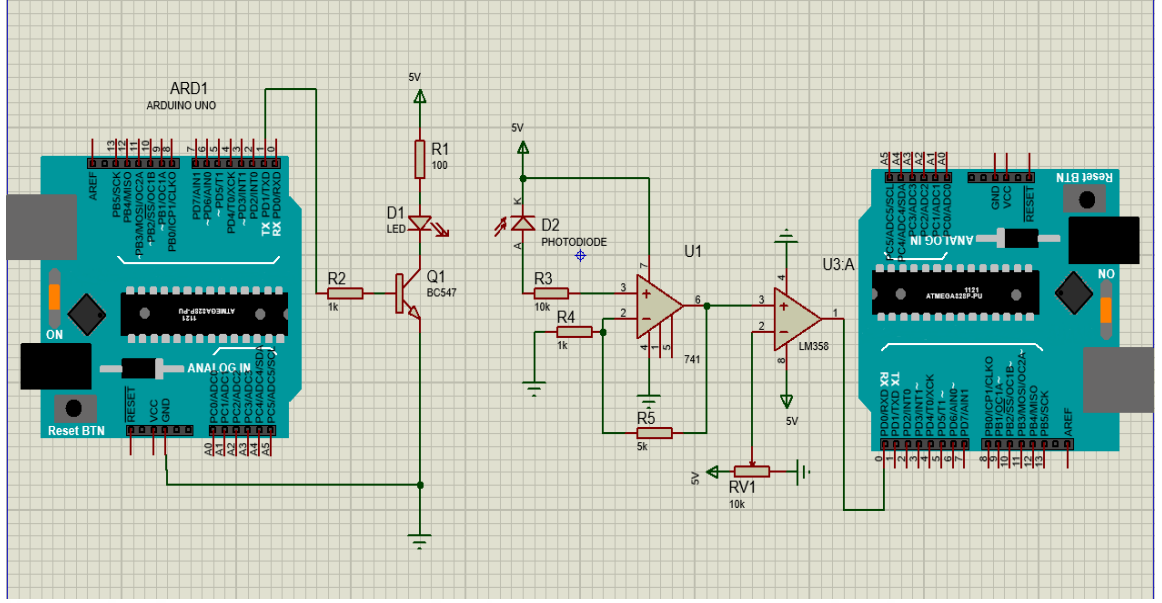


Şekil 4.1. Li-Fi veri iletim sistemi blok şeması

Şekil 4.1 'deki blok diyagram, Li-Fi veri iletim sürecini göstermektedir. Sistemde kullanıcıdan alınan veriler bir mikrodenetleyici tarafından bitlere dönüştürülür. Daha sonra açma-kapama anahtarlama (OOK) modülasyon tekniği uygulanarak ışık kaynağından ışık darbeleri üretilir. Sistemde, LED aracılığıyla iletilen ve fotodiyot tarafından yakalanan verilerin kodlanması ve kodunun çözülmesi Arduino mikrodenetleyicileri ile yapılmıştır.

4.2. Devre Şeması

Li-Fi sisteminin devre şeması, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi iki ana bölümden oluşur. Veri iletimi için sistemin donanım bileşenlerinin nasıl bağlandığı gösterilmiştir. Bu şematik, Proteus Tasarım Aracı (sürüm 8) kullanılarak yapılmıştır.



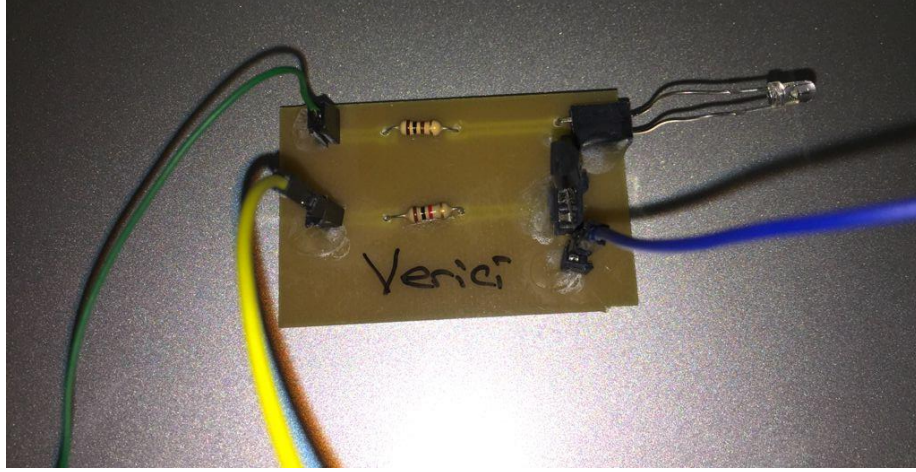
Şekil 4.2. Alıcı ve verici devresi proteus çizimi

Devre şemasında gösterildiği gibi Li-Fi sistemi için donanım bölümü, iki mikro denetleyici (Arduino Uno), bir transistör (BC547), Op-Amp (LM358N), Op-Amp (741), 5 mm LED, 5 mm fotodiyot, güç kaynağı, çeşitli dirençler ve bir potansiyometreden (10 kΩ) oluşmaktadır.

4.3. Alıcı ve Verici Devre Tasarımı

Verici devre tasarımı

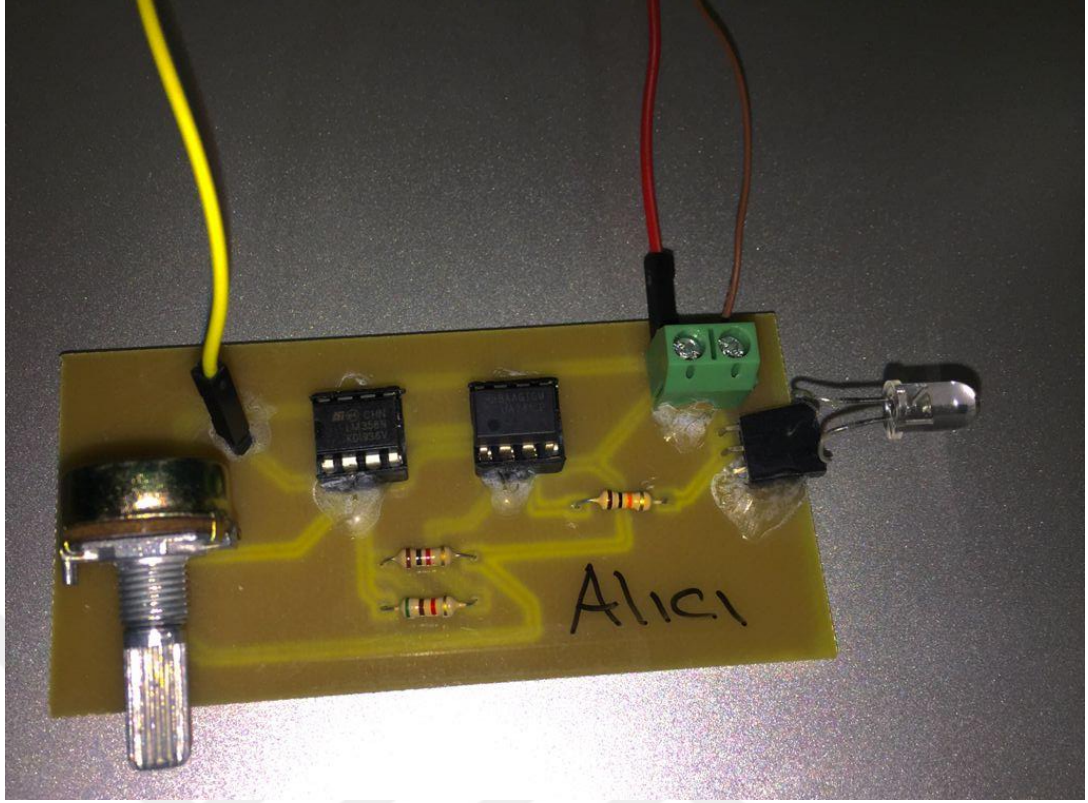
Verici, dijital verileri görünür ışığa dönüştürmeyi sağlamaktadır. LED, akım ve ışık yoğunluğu arasındaki nispeten doğrusal ilişkisi sebebiyle uygun bir bileşendir. Bu sistemde ışık yoğunluğu iletilen sembole karşılık geleceğinden LED'in ışık yoğunluğunun modüle edilmesi gerekir. LED'ler çok hızlı yanıp sönmek için aşırı ani (spike) akım çekmek zorunda kalabilir. Fakat Arduino portları, ışık yoğunluğunu yeterince güçlü ve hızlı hale getirmek için doğru miktarda akımı sağlama yeterliliğine sahip değildir. Bu problemin üstesinden gelmek için, anahtarlama elemanı olarak bir transistör (BC547) kullanılır ve bu, daha büyük bir akımı daha hızlı değiştirmeyi mümkün kılar. Yani transistör ile akım artırımına gidilerek LED'i 5V'un üstünde sürme imkânı sağlanır. Devre tasarımı gereği anahtarlama transistörünü doyum bölgesinde çalıştırmak için 1 kΩ baz direnci yeterli gelmektedir.



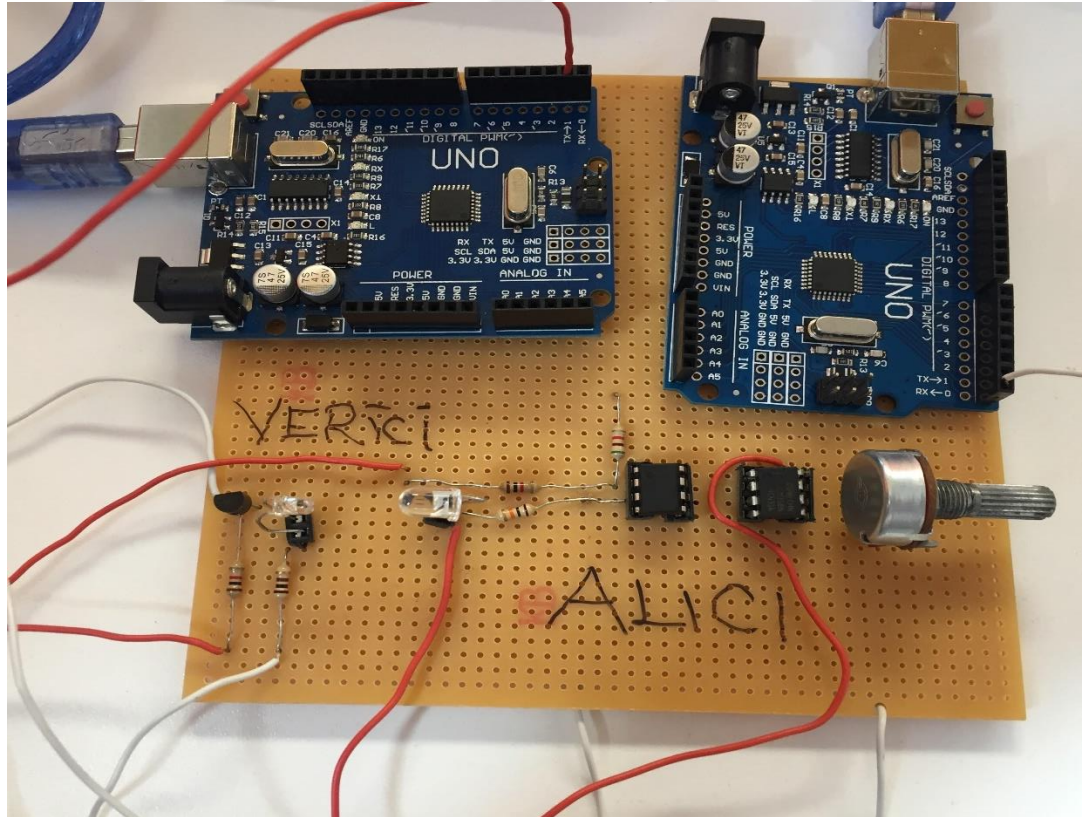
Şekil 4.3. Li-Fi verici devresi

Birinci alıcı devre tasarımı

Alıcı, temelde gelen ışığı bir fotodiyot vasıtasıyla elektrik sinyaline dönüştürür ve sinyale yükseltme ve karşılaştırma işlemi uygulayarak Arduino'nun Rx pinine verir. Bilindiği üzere fotodiyotlar ters kutuplama altındayken belirli ışık spektrumlarına maruz kaldıklarında üzerlerinden akım geçmesine müsaade ederler. Alıcı devrede fotodiyot opampın giriş empedansına seri bağlı olduğu için üzerine düşen belirli ışık spektrumlarında düşük empedans gösterecek ve opampın terslemeyen giriş ucunda bu ışığa bağlı olarak değişken bir sinyal oluşturacaktır. Fakat bu değişken sinyalin genliği düşük olacağından kuvvetlendirme ihtiyacı doğacaktır. 741 opampı fotodiyot tarafından üretilen haberleşme kaynaklı bu elektrik sinyalini altı kat kuvvetlendirir. 10 k Ω potansiyometre (ayarlı direnç) ise gün ışığından kaynaklanan gürültü voltajını elimine etmek için LM358N opampına referans sağlamada kullanılmıştır. Potansiyometre devrede, gerilim bölücü olarak çalışır. LM358N opampı ise potansiyometreden alınan sinyal ile 741 opampından gelen sinyali karşılaştırma görevi icra eder. Arduino'dan önce sinyalin dijital forma bürünmesi için kullanılır.



Şekil 4.4. Li-Fi birinci alıcı devresi



Şekil 4.5. Delikli plakette alıcı ve verici devre

Devreler atlama kabloları (jumper) yardımıyla hem delikli plaket hem de baskı devre üzerine kuruldu ve devrenin sürekliliğini noktadan noktaya test etmek için bir multimetre kullanıldı. İlk olarak sistemin uygun şekilde test edilmesini sağlamak ve hatalara yatkınlığını ortadan kaldırmak için, verici ve alıcı devreleri tek bir devre tahtasında kuruldu. Bu şekilde LED ve fotodiyot arası sabit bir mesafe oluşturuldu. Birkaç testten sonra, devre tahtasındaki bileşenler Şekil 4.3 ve 4.4'te gösterilen ayrı baskı devre kartlarında aynı devre konfigürasyonu kullanılarak dikkatlice lehimlendi. Lehimlemeden sonra bağlantıların sürekliliği multimetre ile test edildi. Bu işlem devreyi çalıştırmadan önce iletimi optimize etmek adına hata nedenlerini analiz etmeye yardımcı olmuştur.

4.4. Sistem Uygulaması



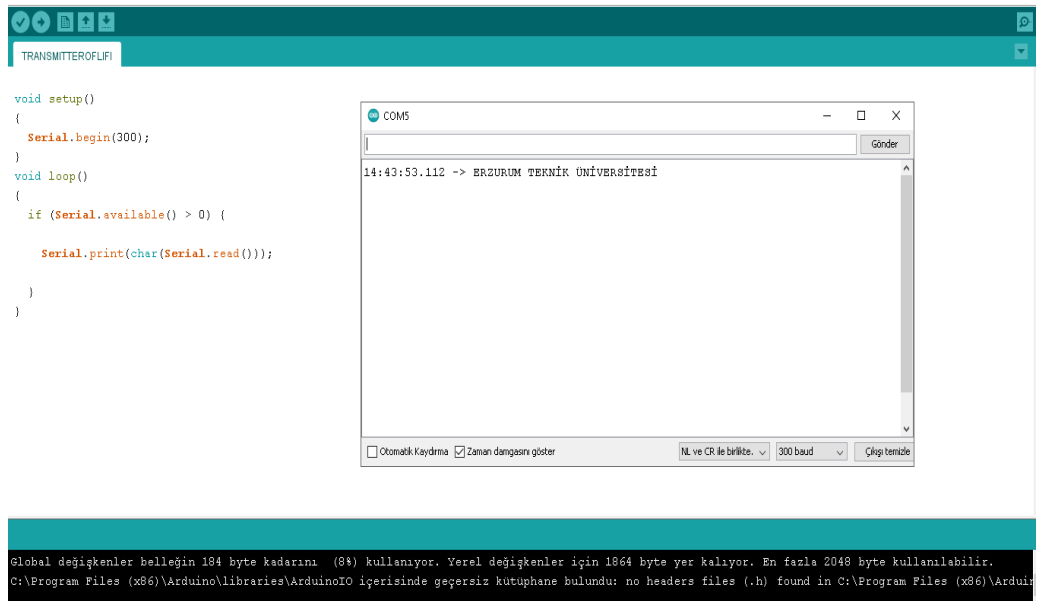
Şekil 4.6. Laboratuvar ortamında Li-Fi alıcı-verici sistemi kurulumu

Bu çalışmada PC'den devreye veya devreden PC'ye veri göndermek için Arduino kartı üzerinde Rx ve Tx pinlerinin bağlı bulunduğu UART donanımı kullanılmaktadır. Verici tarafı, PC olan terminal, metin verilerini ikili (binary) formata dönüştürür ve daha sonra ikili (binary) dönüşümü alıcıya LED aracılığıyla iletir. Alıcı taraf ise bu işlemin tersini gerçekleştirir. LED'den yayılan ışık, sensör görevi gören fotodiyot tarafından yakalanır ve ikili (binary) girişi izleyen karşılaştırmacıya iletir. Bu ikili (binary) gösterimde LED AÇIK konumda ise, bir dijital “1” iletilir ve LED KAPALI ise, dijital bir sıfır “0” iletilir. Bu modülasyon tekniği OOK olarak bilinir. LED'in sürekli yanıp sönmesi, verilerin bir terminalden diğerine geçmesine yardımcı olur.

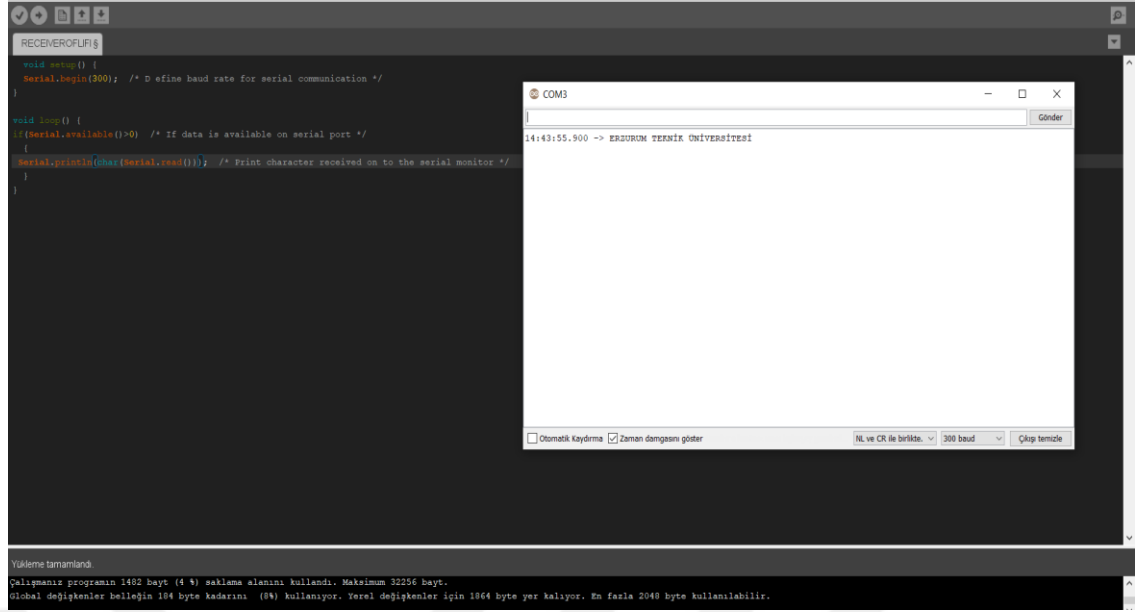
Sistemin verici tarafı bir güç kaynağı, LED ve Arduino ana bileşenleri ile elektrik dalgalarını optik darbelere dönüştürür. İletilen verinin her karakteri 7 bitlik bir kombinasyonla tanımlanır. LED'ler yüksek bir titreşim oranına sahiptir. Bu nedenle, LED'ler son derece düşük bir zaman gecikmesinde (birkaç milisaniye) açılıp kapanacak şekilde ayarlanabilir, böylece süreç insan gözü tarafından algılanamaz. Bu sayede hem aydınlatma hem de bilgi aktarımı aynı anda gerçekleştirilebilir.

4.5. Sistem Testi ve Sonuçlar

Arduino tabanlı Li-Fi sisteminin verici ve alıcı sonuçları bu bölümde açıklanmıştır. Program, metnin iki PC arasında iki Arduino Uno kartı kullanılarak bir Li-Fi iletişimi aracılığıyla gönderilmesine izin verir. Her Arduino kartı, COM bağlantı noktaları aracılığıyla bir PC'ye bağlanır. Verici tarafında, program derlendikten ve karta yüklendikten sonra, kullanıcı metni bir Arduino seri monitörüne girer. İşlenen veriler, ASCII karakterlerini bitlere dönüştürür ve bu da LED'in yanıp sönmeye neden olur. Yanıp sönmeye, alıcı taraftaki fotodedektör tarafından yakalanır. Alıcı, ikili değerleri kabul eder ve işlemcisi bu bitleri ASCII karakterlerine dönüştürür. Alıcı, kodda her alfanümerik karakteri alınan ASCII koduyla eşleştiren bir sözlüğe sahiptir. Bu karakterler alıcının seri monitöründe görüntülenebilir.



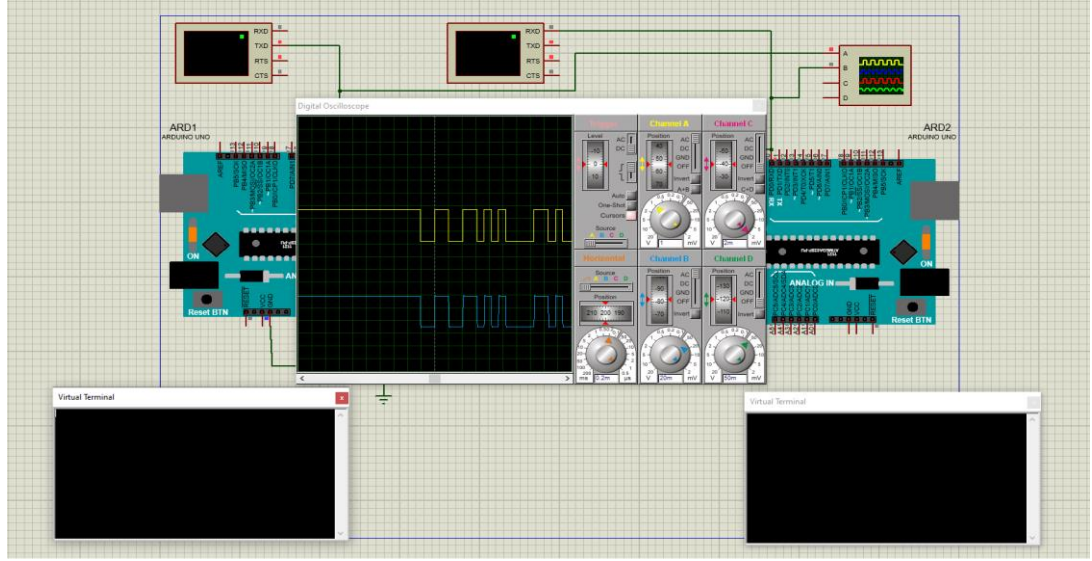
Şekil 4.7. Gönderilen metin verisi



Şekil 4.8. Alınan metin verisi

Şekil 4.7 ve şekil 4.8 metin gönderilirken ve alınırken Arduino'nun seri monitörünün pencerelerini gösterir. Her karakter sekiz veri biti (genişletilmiş ASCII kodu) olarak iletilir. Buna, alıcıyı senkronize etmek için kullanılan bir "başlatma" biti ve bir "durdurma" biti eklenmiştir. Başlangıç biti "0" değeridir, durdurma biti ise "1"e eşittir. Örneğin, ASCII kodu "01100001" olan "a" karakterini gönderirken iletim sırasında bir başlatma ve durdurma biti eklenecektir. LSB (Least Significant Bit) en sağdaki bit olan "1" iken MSB (Most Significant Bit) en soldaki bit olan "0" dır.

Şekil 4.7 ve 4.8'den, verici devreye bağlı bilgisayardan "ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ" veri dizisinin **300** bps hızında "COM port 5" den iletildiği ve alıcı devreye bağlı bilgisayardan **300** bps hızında "COM port 3" üzerinden alındığı görülmektedir. Bu veri aktarımı, LED'den gelen ışık fotodiyot tarafından uygun seviyeye ulaştığında sorunsuz çalışmaktadır.



Şekil 4.9. Gönderilen ve alınan dijital sinyallerin proteus görüntüsü



Şekil 4.10. Gönderilen ve alınan dijital sinyallerin osiloskop görüntüsü

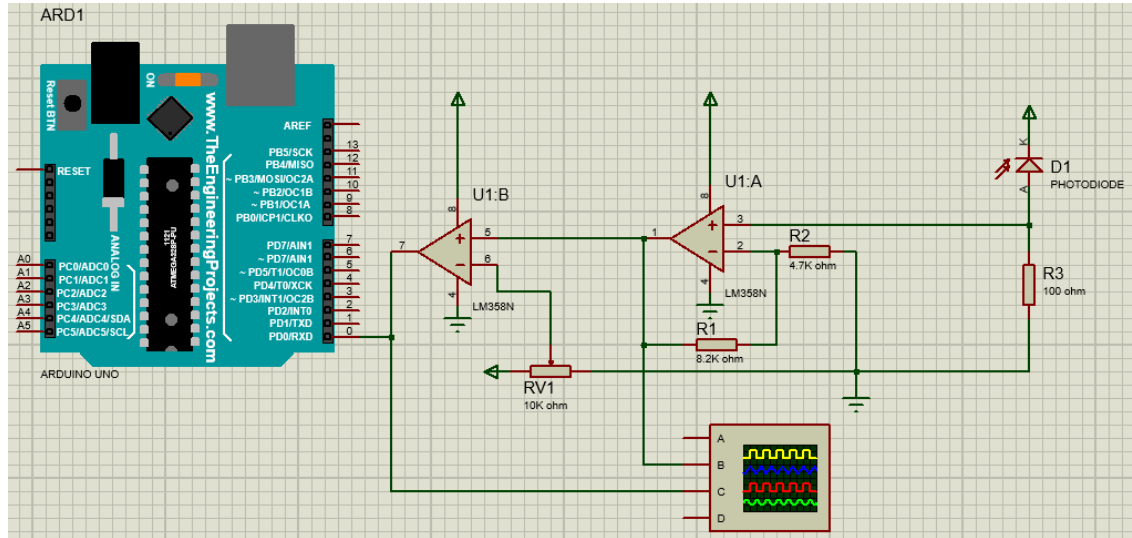
Şekil 4.10, Arduinolardan gönderilen ve alınan sinyalleri göstermektedir. Ortaya çıkan osiloskop sonuçları gönderilen sinyal ile alınan sinyalin neredeyse aynı olduğunu göstermektedir. Gönderilen ve alınan sinyal arasında küçük bir faz farkı ve darbe genişlemesi vardır. Bunun nedeni kablosuz kanaldaki gürültü, yayılma gecikmesi ve kapasitif etkilerdir. Osiloskop sonuçlarımız Goswami and Shukla (2017) tarafından yapılan çalışmalar ile uyumludur.

4.6. Sistemin Farklı Alıcı Devreler ile Uygulanması ve Sonuçlar

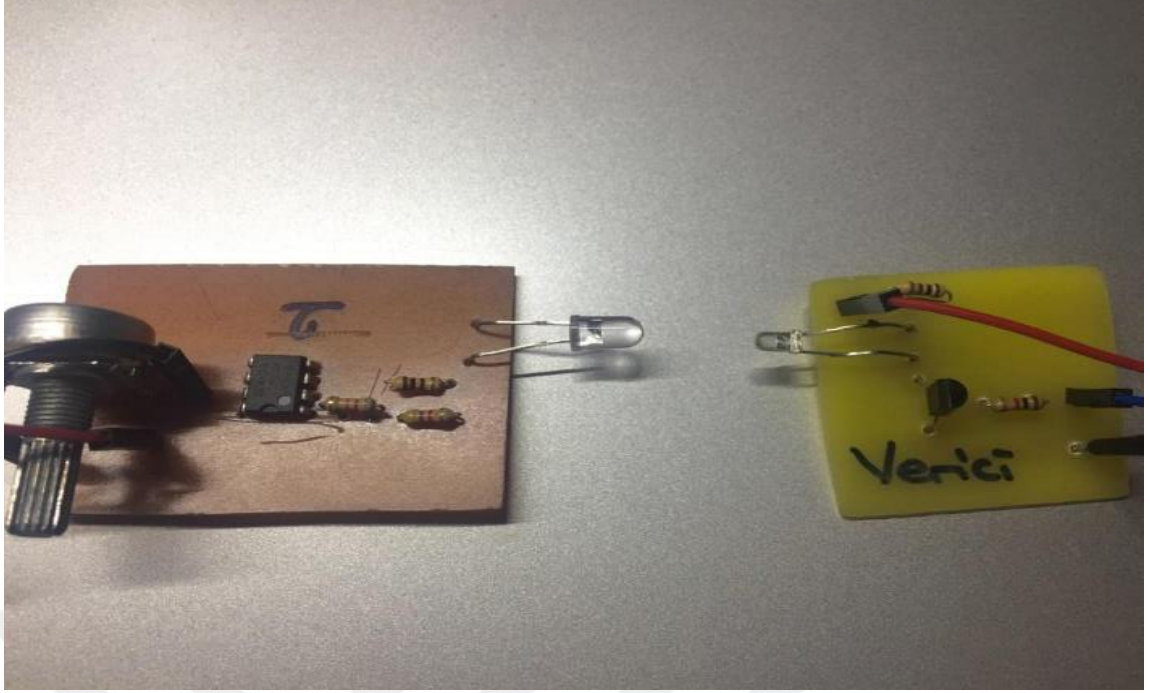
Sistem, verici devre kısmı aynı kalacak şekilde farklı alıcı devreler ile çalıştırılıp, metin iletim hızları incelenmiştir.

İkinci alıcı devre tasarımı

Alıcı devre fotodiyot tarafından üretilen haberleşme kaynaklı elektrik sinyalini yükseltmek ve karşılaştırmak için akımı voltaja dönüştürmektedir. Bu devrede giriş gerilimini belli bir çıkış gerilimine yükseltme ve karşılaştırma işlemleri LM358N entegresi ile yapılmaktadır. Bu entegre simetrik besleme ihtiyacını ortadan kaldırarak Li-Fi alıcı devresini daha basit ve uygun maliyetli hale getirmektedir. Ayrıca LM358N entegresinin büyük DC voltaj kazancına (yaklaşık 100 dB) ve büyük çıkış voltajı salınımlarına (slew rate) sahip olması fotodiyot tarafından üretilmesi beklenen kararsız ve düşük sinyal nedeniyle önemlidir. Bu devrede fotodiyot tarafından üretilen elektrik sinyali yaklaşık 2,5 kat kuvvetlendirilmektedir. Arduinodan önce sinyalin dijital kararlı seviyede olması için düşük offset değerine sahip LM358N karşılaştırıcısı kullanılmıştır. Surajudeen-bakinde et al. (2020) tarafından tasarlanan devre gerçekleştirilmiştir.



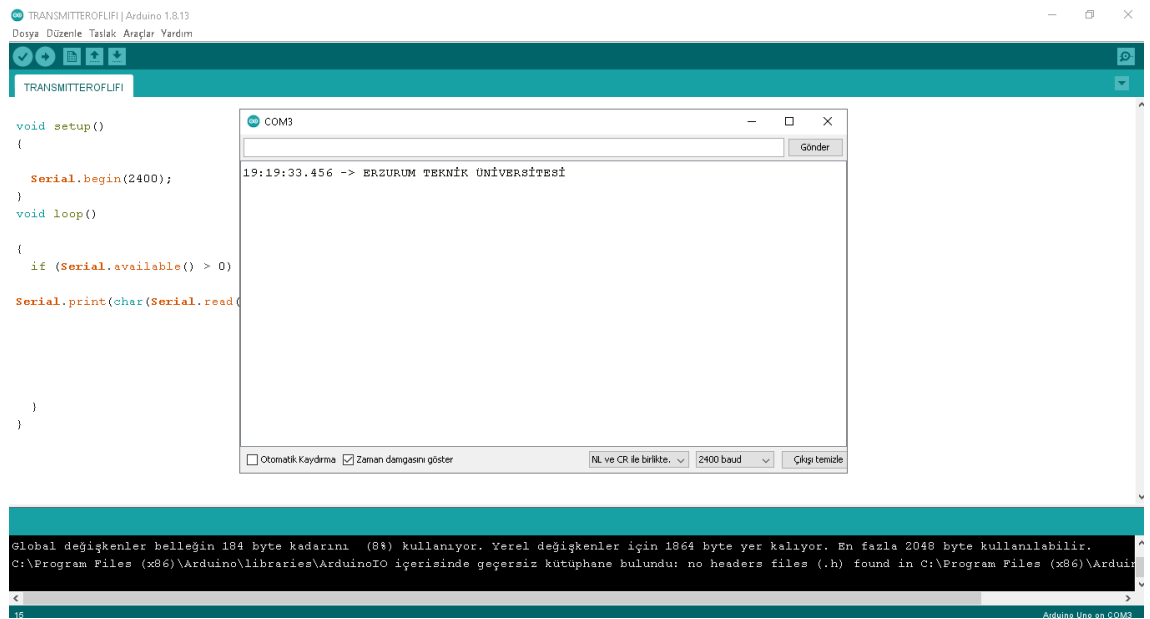
Şekil 4.11. İkinci alıcı devre proteus çizimi



Şekil 4.12. Li-Fi ikinci alıcı ve verici devresi

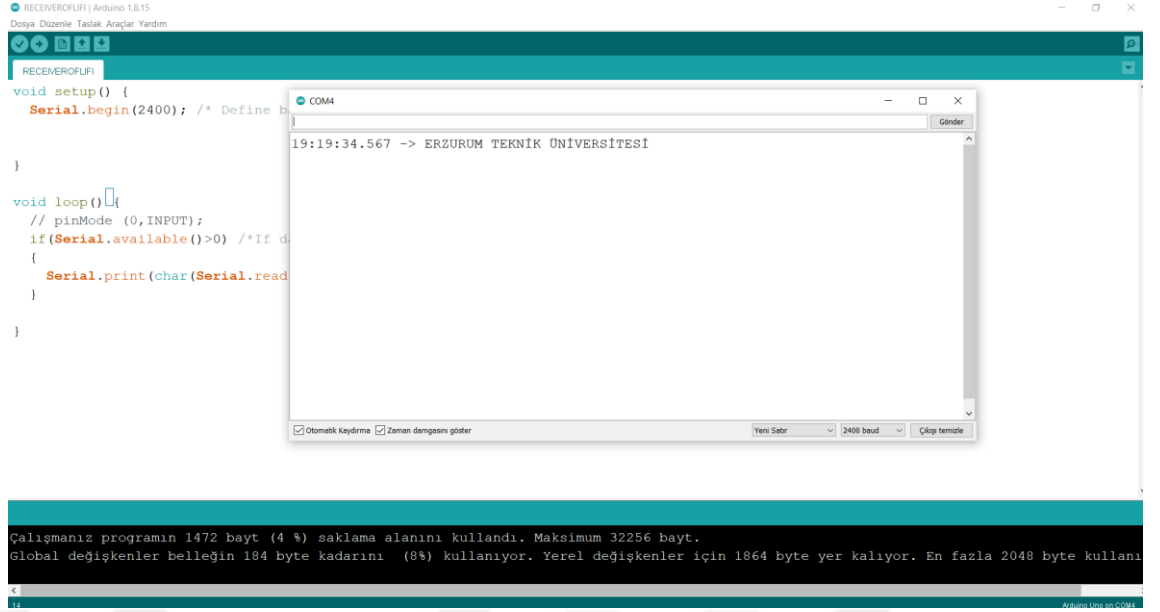
İkinci devre için sistem testi ve sonuçlar

Arduino tabanlı Li-Fi sisteminin aynı verici ve ikinci alıcı devre kullanılarak elde edilen sonuçları bu bölümde açıklanmıştır.



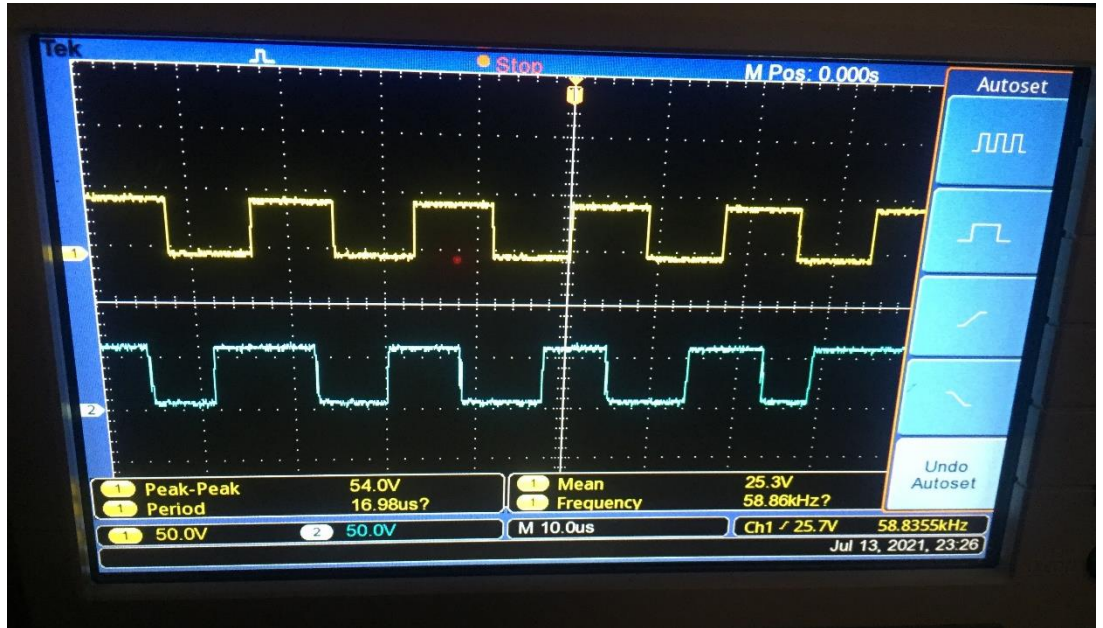
Şekil 4.13. İkinci sistemde gönderilen metin verisi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.14. İkinci sistemde alınan metin verisi

Şekil 4.13 ve şekil 4.14 metin gönderilirken ve alınırken Arduino'nun seri monitörünün pencerelerini göstermektedir. Verici devreye bağlı bilgisayardan "ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ" veri dizisinin **2.400** bps hızında "COM port 3" üzerinden iletildiği ve alıcı devreye bağlı bilgisayardan **2.400** bps hızında "COM port 4" üzerinden alındığı görülmektedir. Bu veri aktarımı, LED'den gelen ışık fotodiyot tarafından uygun seviyeye ulaştığında sorunsuz çalışmaktadır.



Şekil 4.15. İkinci sistemde gönderilen ve alınan dijital sinyallerin osiloskop görüntüsü

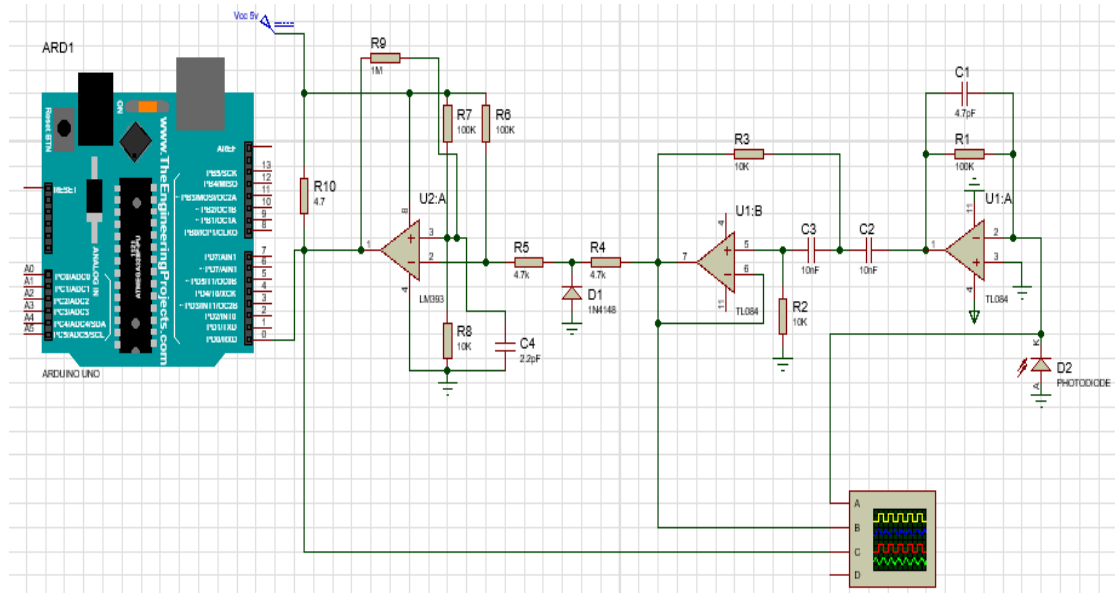
Üçüncü alıcı devre tasarımı

Tasarımını yaptığımız bu devre üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm transempedans yükselteci, ikinci bölüm yüksek geçiren filtre, üçüncü bölüm ise karşılaştırıcı görevindedir.

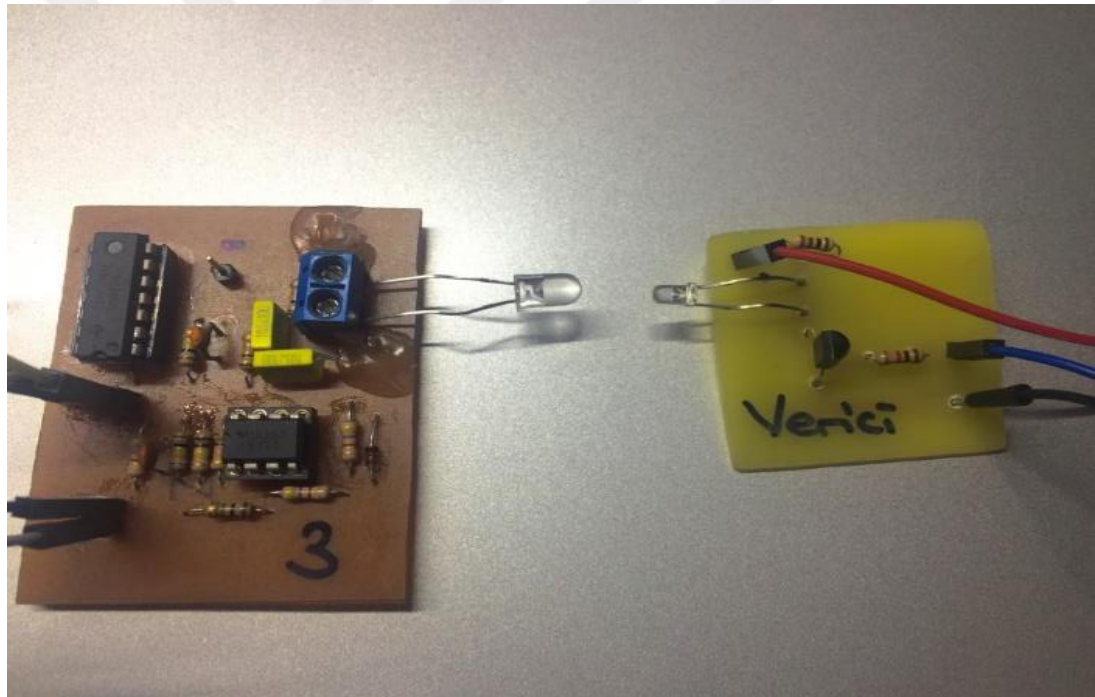
Devrede yüksek açık çevrim kazancı ve fotodiyotun daha kararlı çalışmasını sağlayacak olan yüksek giriş empedansı avantajından dolayı TL084 entegresi kullanılmıştır. Devrenin kararlı çalışması adına fotodiyotun akımını referans alarak çıkış üreten OTA (İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi) kullanılmıştır. Fotodiyot darbeli ışınlarla sürüldüğünde fotodiyotun eklem kapasitansı OTA katında türev etkisi oluşturmaktadır. Bu da OTA katında kararsızlığa sebep olabilmektedir. Kararlılığı arttırabilmek için sisteme bir kondansatör (C1) eklenmiştir.

Sistemde meydana gelen DC bileşeni elimine etmek ve karşılaştırıcı katına referans olarak 0 volt gerilim verebilmek için devrenin ikinci bölümünde bir yüksek geçiren filtre kullanıldı. Li-Fi sistemlerinde alıcı ünitenin bulunduğu bölgede verici devrede üretilen ışık dışında herhangi bir ışık kaynağı olmayacağı için ışın temelli bastırılması gereken bir gürültü üretilmemektedir. Bu sebepten bant geçiren filtre tercih edilmemiştir. D1 diyotu ise karşılaştırıcı girişine negatif gerilim gelmesini engellemek için kullanılmıştır.

Devrede sinyal R5 direnci üzerinden LM393 karşılaştırıcısının negatif girişine uygulanmaktadır. Karşılaştırıcının pozitif girişine R7 ve R8 dirençleri aracılığıyla bir gerilim uygulanmaktadır. Bu iki direnç devrede gerilim bölücü gibi çalışır. Karşılaştırıcı gelen sinyalin bu eşik geriliminden büyük olup olmadığına bakarak 0 ile 5 volt arası bir çıkış vermektedir. Karşılaştırma katındaki 1M ohm'luk direnç pozitif geri besleme sağlamaktadır. Bu da Schmitt Trigger (tetikleyici) çalışma sağlayarak karşılaştırıcının gürültü bağışıklığını arttırmaktadır. C4 kondansatörü kararlılığı arttırmak için, R10 direnci ise LM393 karşılaştırıcısının çıkışı açık kollektör olduğundan, çıkışın "lojik 1"e çekilebilmesi için kullanılmıştır.



Şekil 4.16. Üçüncü alıcı devre proteus çizimi

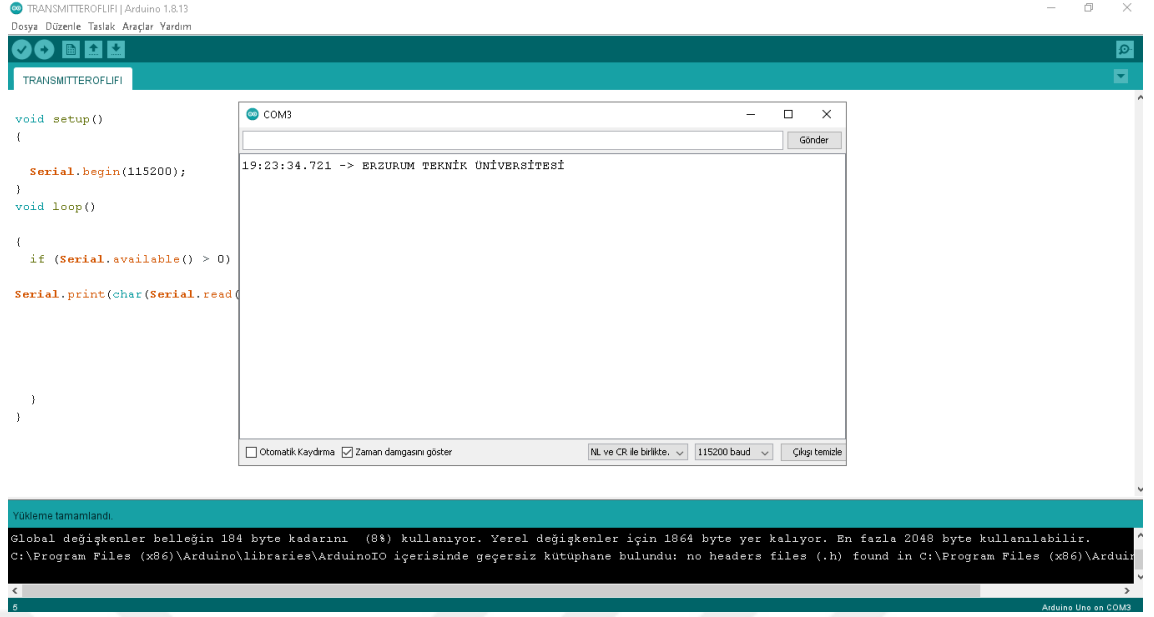


Şekil 4.17. Li-Fi üçüncü alıcı ve verici devresi

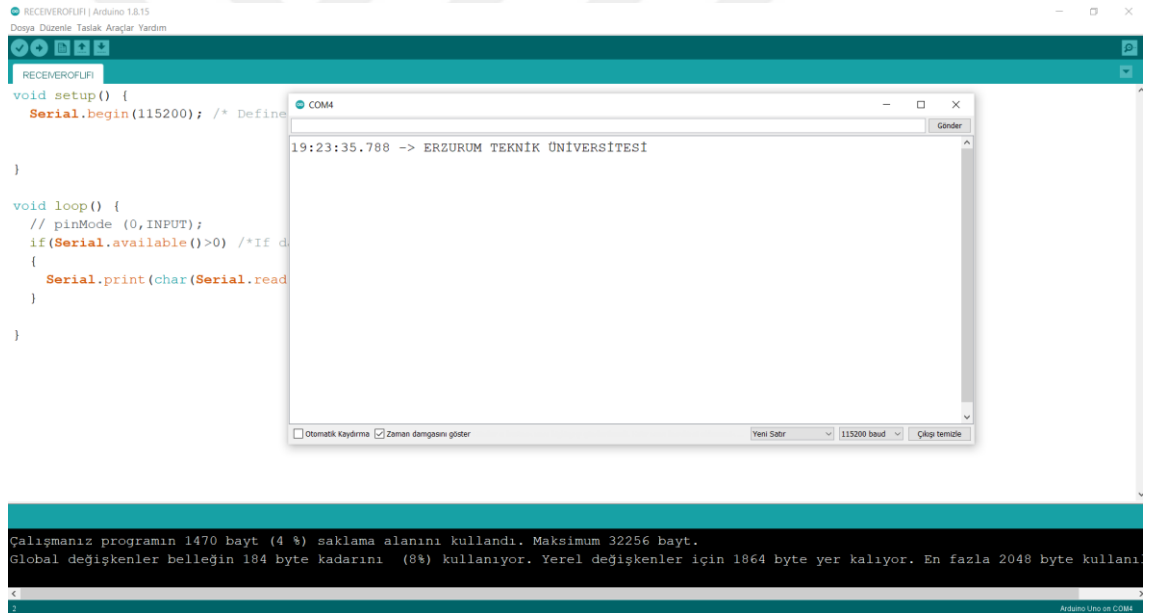
Üçüncü devre için sistem testi ve sonuçlar

Arduino tabanlı Li-Fi sisteminin aynı verici ve üçüncü alıcı devre kullanılarak elde edilen sonuçları bu bölümde açıklanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

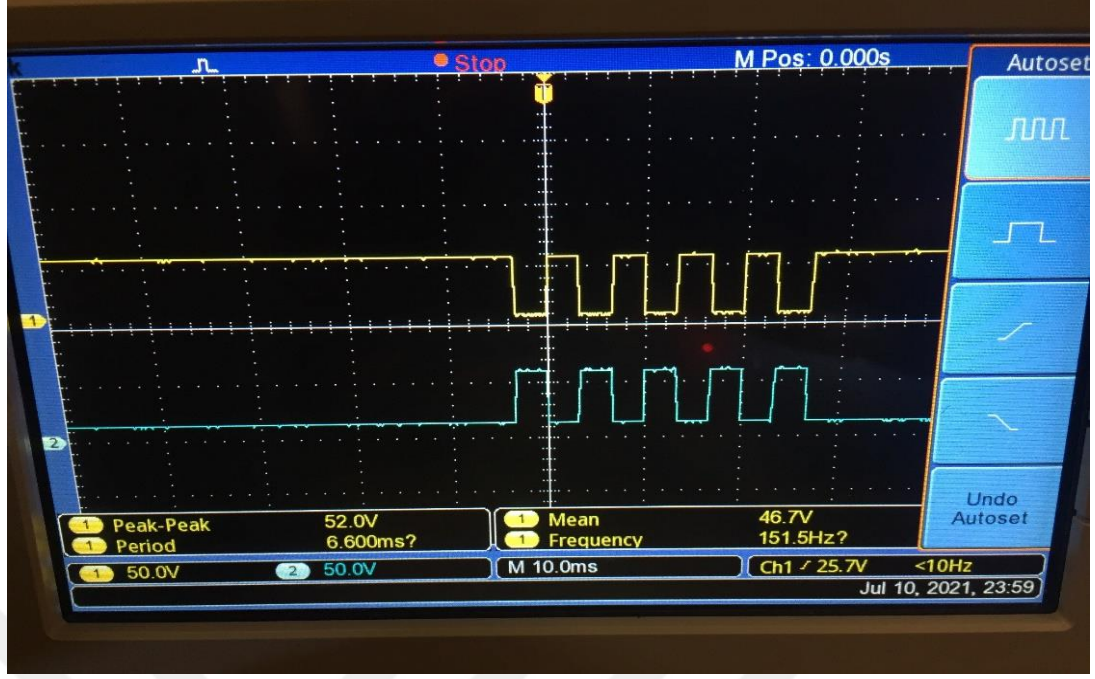


Şekil 4.18. Üçüncü sistemde gönderilen metin verisi



Şekil 4.19. Üçüncü sistemde alınan metin verisi

Şekil 4.18 ve şekil 4.19 metin gönderilirken ve alınırken Arduino'nun seri monitörünün pencerelerini göstermektedir. Verici devreye bağlı bilgisayardan "ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ" veri dizisinin 115.200 bps hızında "COM port 3" üzerinden iletildiği ve alıcı devreye bağlı bilgisayardan 115.200 bps hızında "COM port 4" üzerinden alındığı görülmektedir. Bu veri aktarımı, LED'den gelen ışık fotodiyot tarafından uygun seviyeye ulaştığında sorunsuz çalışmaktadır.



Şekil 4.20. Üçüncü sistemde gönderilen ve alınan dijital sinyallerin osiloskop görüntüsü

Şekil 4.20, Arduinolardan gönderilen ve alınan sinyalleri göstermektedir. Ortaya çıkan osiloskop sonuçları gönderilen sinyal ile alınan sinyallerin birbirini iyi derecede takip ettiğini ve devre tasarımı gereği aralarında 180° 'lık bir faz kayması olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1. Li-Fi devreleri karşılaştırma tablosu

Devreler	Led	Fotodiyot	Modülasyon	Alıcı devre entegreleri	Veri hızı (bps)
Birinci	5mm beyaz	5mm	OOK	741, LM358N	300
İkinci	5mm beyaz	5mm	OOK	LM358N	2.400
Üçüncü	5mm beyaz	5mm	OOK	TL084,LM393	115.200

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada bir bilgisayardan başka bir bilgisayara veri (metin dizileri) göndermek için bir Li-Fi prototip modeli başarıyla uygulanmıştır. Test edildiğinde, LED'in verileri dijital sıra biçiminde ilettiği ve fotodiyotun dijital diziye minimum hatayla aldığı görülmektedir. Çalışmadaki Li-Fi prototipleri uygun maliyetlidir ve çalışmanın ana amacı olan kullanıma hazır elektronik bileşenlerle Li-Fi prototipi gerçekleştirme iddiasını karşılamaktadır. Uygulanan üç farklı prototip modeli ile ortam ışığı koşulları altında iç mekânda 300 bps, 2.400 bps ve 115.200 bps veri aktarım hızlarına ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar devre üzerinde transempedans yükselteç ve filtre uygulamasının veri iletim hızını artırdığını göstermektedir. Tasarlanan sistemde birtakım sınırlamalar mevcuttur. Li-Fi prototip sistemlerinin başarısı; kullanılan LED'lerin sayısı, şekli ve dalga boyu, kullanılan fotodedektörlerin sayısı ve türü, kodlama yöntemi, modülasyon şekli ve LED ile fotodedektör arasındaki senkronizasyon ve mesafe gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu çalışmanın sınırlamaları haberleşmeye yönelik, daha işlevsel bileşenler kullanılarak giderilebilir.

Sınırlamaların üstesinden gelmek için verici ile alıcı arasına odaklanma merceği ekleyerek daha iyi kalitede veri aktarımının sağlanabileceği iyileştirmeler yapılabilir. Ek olarak, veri aktarım hızı, hızlı anahtarlama çoklu LED'ler veya daha iyi işlemciler kullanılarak geliştirilebilir. LED dizileri kullanılarak daha geniş alanda iletişim sağlanabilir. İletim mesafesi, daha yüksek parlaklığa sahip LED'ler kullanılarak daha da artırılabilir.

VLC ilkelerine dayanan Li-Fi teknolojisi, spektrum kullanılabilirliği, yüksek verimlilik, güvenli ve yüksek hızlı veri iletimi açısından Wi-Fi teknolojisine göre avantajlıdır. Li-Fi teknolojisi, görünür ışık spektrumunun geniş bant aralığı avantajı ile, yaklaşan RF spektrumu krizine karşı güçlü bir kablosuz ağ çözümüdür. Li-Fi sistemini kullanarak iki yönlü noktadan noktaya iletişim pratik olarak gerçekleştirilebilir. Li-Fi teknolojisi, güvenlik özellikleri ve çoğu durumda amacına hizmet etmek için kullanılan görünür ışık spektrumunun akıllıca kullanılması sayesinde çeşitli endüstrilerde, ofislerde, hastanelerde ve hatta evlerde yüksek hızlı veri aktarımı için büyük uygulama alanları bulacaktır.

Bu teknolojinin pratik uygulamalarında, kablosuz verileri iletmek için her LED lamba bir Wi-Fi etkin noktası olarak düşünülebilir. Teknoloji ve bilimin çıkmazları yoktur. Böylece hem radyo dalgaları hem de ışık sinyal ve verileri iletmek için eş zamanlı kullanılabilir. Li-Fi teknolojisi, Wi-Fi tabanlı kablosuz sistemlere verimli ve gerçek alternatifler sunduğundan şu an büyük ilgi görmektedir.



KAYNAKLAR

- Al Hwaitat, A. K. 2020. A survey on lifi technology and internet of things (IOT). International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9(1), 225–232. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/34912020>
- Alao, OD., Joshua, JV., Franklyn, AS. ve Komolafe, O. 2016. Light fidelity (li-fi): an emerging technology for the future. IOSR Journal of Mobile Computing & Application (IOSR-JMCA), 3(3), 18–28. <https://doi.org/10.9790/0050-03031828>
- Albraheem, L. I., Alhudaithy, L. H., Aljaser, A. A., Aldhafian, M. R. ve Bahliwah, G. M. 2018. Toward designing a li-fi-based hierarchical iot architecture. IEEE Access, 6, 40811–40825. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2857627>
- Alfattani, S. 2018. Review of lifi technology and its future applications. Journal of Optical Communications, 42(1), 121–132. <https://doi.org/10.1515/joc-2018-0025>
- Aneja, A. ve Sharma, A. 2016. Light fidelity (lifi): future of wireless technology. International Journal of Computer Science Trends and Technology (IJCT), 4(2), 343–345.
- Anonim, 2005. Web Sitesi: <https://www.emo.org.tr> , Erişim Tarihi: 12.05.2021
- Anonymous, 2011. Web Sitesi: <https://www.ted.com> , Erişim Tarihi: 20.05.2021
- Anonim, 2021. Web Sitesi: <https://diyot.net> , Erişim Tarihi: 12.04.2021
- Anonymous, 2018. Web Sitesi: <https://components101.com>, Erişim Tarihi: 04.04.2021
- Anonymous, 2015. Web Sitesi: <https://www.physics-and-radio-electronics.com>, Erişim Tarihi: 05.06.2021
- Anonymous, 2016. Web Sitesi: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>, Erişim Tarihi: 08.04.2021
- Anonymous, 2020. Web Sitesi: <https://www.osioptoelectronics.com>, Erişim Tarihi: 15.05.2021
- Anonymous, 2021. Web Sitesi: <https://toshiba.semicon-storage.com>, Erişim Tarihi: 04.05.2021
- Aron, S. 2015. Visible-Light-Communication-Shlomi-Arnon (Ben-Gurion). Cambridge University Press.
- Bhateley, P., Mohindra, R., Balaji, S. 2016. Smart vehicular communication system using Li Fi technology. 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC), 222–226. <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2016.7557199>
- Bhatnagar, A. ve Kukreti, R. 2019. Data Transmission Through Li-Fi (May). Jaypee University of Information Technology Waknaghat, India.

- Cailean, A. 2015. Etude et réalisation d ' un système de communications par lumière visible (VLC / LiFi). Application au domaine automobile . Alin Cailean To cite this version : HAL Id : tel-01156468 pour obtenir le grade de Docteur De l ' Université de Versailles Saint-.
- Chi, N. 2018. Signals and Communication Technology LED-Based Visible Light Communications, 15–16. <http://www.springer.com/series/4748>
- Choudhari, Z. P. ve Devane, S. R. 2017. High Sensitivity Universal Lifi Receiver For Enhance Data Communication. Proceedings of 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies, IC-GET 2016, 1–5. <https://doi.org/10.1109/GET.2016.7916619>
- Çil, C. Z. 2014. Işık Yayan Diyotlar (LED'ler) ve Aydınlatmada Kullanımı, 1–6.
- 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>
- Eldar, M. Led – led sisteminin araştırılması ve uygulamaları, 2017. Web Sitesi: <https://docplayer.biz.tr/44822831-Led-led-sisteminin-arastirilmasi-ve-uygulamalari.html>, Erişim Tarihi: 29.05. 2021
- Gawande, P., Sharma, A. ve Kushwaha, P. 2016. IJARCCE Wireless sensor network (wsn): applications in oil & gas and agriculture industries in nigeria. IJARCCE International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 5(3). <https://doi.org/DOI 10.17148/IJARCCE>
- Gelani, B. ve Pandi, G. 2017. Li-Fi (Light Fidelity): Data Communication Using Visible Light. Ijariie, 3(6), 8.
- George, R., Vaidyanathan, S., Rajput, A. S. ve Deepa, K. 2019. Lifi for vehicle to vehicle communication - A Review. Procedia Computer Science, 165, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.066>
- Ghosh, D., Chatterjee, S., Kothari, V., Kumar, A., Nair, M. ve Lokesh, E. 2019. An application of Li-Fi based Wireless Communication System using Visible Light Communication. 2019 International Conference on Opto-Electronics and Applied Optics (Optronix), 1–3. <https://doi.org/10.1109/OPTRONIX.2019.8862366>
- Goswami, P. ve Shukla, M. K. 2017. Design of a li-fi transceiver. Wireless Engineering and Technology, 8(4), 71–86. <https://doi.org/10.4236/wet.2017.84006>
- Haas, H. 2015. Visible Light Communication. Optical Fiber Communication Conference, Tu2G.5. <https://doi.org/10.1364/OFC.2015.Tu2G.5>

- Khan, L. U. 2017. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3(2), 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2016.07.004>
- Khandal, D. ve Jain, S. 2014. Li-Fi (light fidelity)-the future technology in wireless communication. *International Journal of Information & Computation Technology*, 4(16), 1688–1694.
- Leba, M., Riurean, S. ve 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>
- Lorenz, P. ve Hamada, L. 2020. LiFi towards 5G: Concepts Challenges Applications in Telemedicine. 2020 2nd International Conference on Embedded and Distributed Systems (EDiS), 123–127. <https://doi.org/10.1109/EDiS49545.2020.9296435>
- Mahendran, R. 2016. Integrated LiFi (Light Fidelity) for smart communication through illumination. 2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT). 53-56 [doi:10.1109/icaccct.2016.7831599](https://doi.org/10.1109/icaccct.2016.7831599)
- Nagdev, J., Sher, D., Nathani, R. ve Kalwani, G. 2013. Wireless data transfer using light fidelity. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2(6), 106–108.
- Ndjiongue, A. R., Ferreira, H. C. ve Ngatched, T. M. N. 2015. Visible Light Communications (VLC) Technology. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1–15. [doi:10.1002/047134608x.w8267](https://doi.org/10.1002/047134608x.w8267)
- Owolabi, Y. K. 2018. Design And Construction Of A Data Transmission System Using Li – Fi Technology. Project submitted to the Department of Electrical and Electronics Engineering , University of Ilorin
- Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P. ve Mohapatra, P. 2015. Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2047–2077. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2476474>
- Perwej, Y. 2017. The next generation of wireless communication using Li-Fi (light fidelity) technology. *Journal of Computer Networks*, 4(1), 20–29. <https://doi.org/10.12691/jcn-4-1-3>
- 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>
- Rabia, Naveed, A., Shahzaib, A., Ahthasham, S. ve Afia, Z. 2020. A security review over w1-fi and li-fi. *Information Management and Computer Science*, 3(1), 01–09. <https://doi.org/10.26480/imcs.01.2020.01.09>
- Rajendran, A., Aashik, K., Dhinesh, N., Hari Prakash, B. ve Soundhar, J. 2021. Advanced Li-Fi technology for data and voice transmission with device control. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(4), 9933–9939.

- Ramananda, D., Michael Sequeira, A., Raikar, S. R. ve Kumar Shanbhag, C. 2019. Design and Implementation of LiFi Communication System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 594(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/594/1/012041>
- Ramkumar, K. 2020. Up-and-coming Li-Fi technology under visible light communication to transfer the data among multiple users in train up-and-coming li-fi technology under visible light communication to transfer the data among multiple users in train. International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume, 119(16), 1587–1598.
- Sandoval-Reyes, S. 2019. Transmission and reception of text and images using visible light. Research in Computing Science, 148(10), 335–345. <https://doi.org/10.13053/rscs-148-10-28>
- Sarkar, A., Agarwal, S. ve Nath, A. 2015. Li-Fi technology : data transmission through visible light. International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies, 3(6), 1–12.
- Sezer, Ö., Daldal, N. ve Yücedağ, İ. 2020. Realization Of Microprocessor Based Visible Light Communication. Techno-Science, 3(3), 95–102.
- Sharma, R. R., Raunak. ve Sanganal, A. 2014. Li-Fi technology transmission of data through light. International Journal of Computer Technology and Applications, 5(1), 150–154.
- Sharma, R. R., Sanganal, A., Pati, S. ve Mumbai, N. 2014. Implementation of a simple li-fi based system. International Journal of Computing and Technology, 1(9), 437–443.
- Singh, R. 2020. A Review Paper on Li-Fi (Light Fidelity) Technology. Sardar patel University, Balaghat, Madhya Pradesh.
- Sofia, C. ve 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>
- Stevanović, I. 2017. Light Fidelity (Li-Fi) Technology (April). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21460.30082>
- Surajudeen-bakinde, N., Ifada, E., Faruk, N., Mohammed, O. O. ve Smart, I. 2020. Li-Fi based technology for pc-pc data transmission li-fi based technology for pc-pc data transmission. International Journal of Information Processing and Communication (IJIPC), 8(1), 153–162.
- Swacha, J. ve Ittermann, R. 2017. Engineering Management in Production and Services. 13(1), 63–64.
- Swami, K. T. ve Moghe, A. A. 2020. A Review of LiFi Technology. 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2020, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE51050.2020.9358340>

- Tsaqifurrosyid, A., Rosmiati, M. ve Rizal, M. F. 2020. Image transmission using visible light communication in data communication. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(4), 1771–1776. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V18I4.14892>
- Suganya, U. ve Subhalakshmipriya, C. 2015. Li-Fi (light fidelity) technology. *International Journal Of Research In Computer Applications And Robotics*, 3(1), 26–32. <https://doi.org/10.9790/2834-0923115118>
- Vinnarasi, A. ve Aarthy, S. T. 2017. *ijpam.eu. International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 117(17), 179–186.
- Vijayalakshmi, B. A., Ramkumar, K. ve Aruna, A. 2018. Up-and-coming li-fi technology under visible light communication to transfer the data among multiple users in train. *International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume*, 119(16), 1587–1598.
- 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.