KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİŞİM SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KISA MESAFE KABLOSUZ VERİ AKTARIMI İÇİN Lİ-Fİ TABANLI İLETİŞİM MODÜLÜ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

HAMDİ YILMAZ

KOCAELİ, 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİŞİM SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KISA MESAFE KABLOSUZ VERİ AKTARIMI İÇİN Lİ-Fİ TABANLI İLETİŞİM MODÜLÜ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

HAMDİ YILMAZ

Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM **Danışman, Kocaeli Üniv.**	**……**
Doç. Dr. Mustafa Hikmet Bilgehan UÇAR **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	**……**
Doç. Dr. Adem TUNCER **Jüri Üyesi, Yalova Üniv.**	**……**

Tezin Savunulduğu Tarih: 15.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

☒ Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Hamdi YILMAZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "***Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge***" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

Hamdi YILMAZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezin planlama ve gerçekleştirilme sürecinde hem değerli tecrübe ve bilgi birikimini hem de zamanını ayıran, farklı bakış açısıyla çalışmama yön veren, yüksek lisans eğitimi için beni teşvik eden, çok saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, çalışmalarım süresince tecrübesiyle çalışmama katkıda bulunan, değerli hocam Doç. Dr. Mustafa Hikmet Bilgehan UÇAR'a ve sabırla sorularıma katlanan değerli çalışma arkadaşım Öğr. Gör. Samet DİRİ'ye ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı gerçekleştirebilmem için bana laboratuvarlarının kapısını açan Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilişim Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'na da teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi, çalışmalarım sürecinde de desteğini esirgemeyen değerli eşim Tuğçe YILMAZ'a, bu süreçte varlığıyla bana moral kaynağı olan oğlum Ensar Ayaz YILMAZ'a ve aileme çok teşekkür ederim.

Haziran – 2022 Hamdi YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ÖZET vii
ABSTRACT viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. KABLOSUZ AĞLAR VE TARİHÇESİ 2
2.1. Kablosuz Ağların Avantajları 3
2.2. Kablosuz Ağların Dezavantajları 3
2.3. IEEE 802 Standartları 4
2.3.1. IEEE 802.11 Standartları 4
2.3.1.1. 802.11a Standardı 5
2.3.1.2. 802.11b Standardı 5
2.3.1.3. 802.11g Standardı 5
2.3.1.4. 802.11n Standardı 5
2.3.1.5. 802.11ac Standardı 6
2.3.1.6. 802.11ax Standardı 6
2.3.2. IEEE 802.15 Standartları 7
2.3.2.1. 802.15.1 Standardı 7
2.3.2.2. 802.15.4 Standardı 7
2.3.2.3. 802.15.6 Standardı 7
2.3.2.4. 802.15.7 Standardı 8
2.3.3. IEEE 802.16 Standardı 8
2.4. Kablosuz Ağ Çeşitleri 8
2.4.1. Kablosuz Kişisel Alan Ağları (WPAN) 9
2.4.1.1. Bluetooth 9
2.4.1.2. Kızılötesi (IrDA) 9
2.4.1.3. ZigBee 9
2.4.1.4. HomeRF 10
2.4.2. Kablosuz Yerel Alan Ağları (WLAN) 10
2.4.2.1. Wi-Fi 10
2.4.2.2. Li-Fi 10
2.4.3. Kablosuz Metropolitan Alan Ağları (WMAN) 10
2.4.3.1. WiMAX 11
2.4.3.2. HiperMAN 11
2.4.4. Kablosuz Geniş Alan Ağı (WWAN) 11
2.4.4.1. GSM 11
2.4.4.2. GPRS 12
2.4.4.3. 3G 12
2.4.4.4. 4G 12
2.4.4.5. 5G 12
3.Lİ-Fİ 13
3.1. Li-Fi Nedir? 13
3.1.1. Optik Kablosuz İletişim (OWC) 14

3.1.2. Serbest Alan Optik İletişimi (FSO) 15
3.1.3. Görünür Işık İletişimi 16
3.2. Radyo Frekans Spektrumu 18
3.2.1. RF Spektrumunun Yetersizliği 19
3.2.2. VLC-RF Karşılaştırılması 19
3.3. Bir Işık Kaynağı Olarak LED 20
3.4. Li-Fi Mimarisi ve Çalışma Prensibi 22
3.4.1. Li-Fi İçin OSI Referans Modeli 24
3.4.1.1. Fiziksel Katman 24
3.4.1.2. Veri Bağlantı Katmanı (DLL) 25
3.5. Modülasyon Teknikleri 25
3.5.1. Tek Taşıyıcılı Modülasyon (SCM) 25
3.5.2. Çoklu Taşıyıcılı Modülasyon (MCM) 26
3.5.3. Diğer Modülasyonlar 27
3.6. Li-Fi'nin Avantajları ve Dezavantajları 27
3.6.1. Avantajları 27
3.6.2. Dezavantajları 29
3.7. Uygulama Alanları 29
3.7.1. Hastaneler 29
3.7.2. Uçaklar 30
3.7.3. Sualtı Araştırmaları 31
3.7.4. Tehlikeli Madde Üretim Tesisleri/Enerji Santralleri 32
3.7.5. Trafik Yönetimi 32
3.7.6. Li-Fi Noktası (Hotspot) 33
3.7.7. Eğitim 33
3.7.8. Nesnelerin İnterneti (IoT) 33
3.8. Li-Fi ve Wi-Fi Karşılaştırması 34
3.8.1. Li-Fi ve Wi-Fi Kombinasyonu 36
3.9. Li-Fi'nin Bugünü ve Yarını 38
4. UYGULAMA 40
4.1. Devre Şemaları 41
4.1.1. LDR ve Fotodiyot Karşılaştırması 42
4.1.2. Uygulamanın Çalışma Prensibi ve UART 43
4.2. Alıcı ve Verici Devrelerin Gerçeklenmesi 45
4.3. Li-Fi Uygulaması 46
4.4. Li-Fi Uygulama Sonuçları 49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 52
KAYNAKLAR 54
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 60
ÖZGEÇMİŞ 61

KISA MESAFE KABLOSUZ VERİ AKTARIMI İÇİN Lİ-Fİ TABANLI İLETİŞİM MODÜLÜ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Yaşamın önemli bir yapı taşı olan ışık hayatımızda çok önemli bir konuma sahiptir. Bu derece önemli bir yere sahip olan ışığın aydınlatma özelliğinin yanı sıra, kablosuz haberleşmede de kullanılabilir olması, bu alanda birtakım gelişmelere olanak sağladığı söylenebilir. Kablosuz haberleşme teknolojisini kullanan cihazlardaki artışın, giderek bant genişliği yetersizliğine sebebiyet vermesi ve giderek kullanılabilecek frekans aralığının azalması ve buna bağlı olarak da ağ trafiğinin giderek artması gibi sorunlar, bilim insanlarını farklı bir kablosuz haberleşme yöntemi çalışmalarına yöneltmiştir. Li-Fi, radyo dalgaları yerine, gözlerimizin farkedemeyeceği kadar yüksek hızlarda yanıp sönebilen LED'ler vasıtasıyla iletim imkânı sunmaktadır. Li-Fi, görünür ışık spektrumunu kullanmaktadır. Ayrıca, görünür ışık spektrumunun radyo frekans spektrumuna göre 10.000 kat daha geniş olması bant genişliği sorununa çözüm sunabilmektedir. Bu tez çalışmasında, UART cihazları vasıtasıyla seri haberleşme kullanarak, iki bilgisayar arasında metin ve dosya paylaşımı yapmak amacıyla, birer alıcı ve verici çifti içeren fotodiyot tabanlı Li-Fi devreleri tasarlanmıştır. UART cihazını farklı baud hızlarında çalıştırarak, tasarlanan Li-Fi düzeneğinin aktarım hızı gözlemlenmiştir. Dosya transferi için XMODEM ve ZMODEM protokolleri kullanılmış ve farklı baud hızlarında her iki protokol arasındaki aktarım oranları ve süreleri kıyaslanmıştır. Bu çalışma neticesinde, Li-Fi ile, dosya aktarım protokolleri kullanarak metin ve dosya aktarımının başarılı bir şekilde gerçekleştirilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Görünür Işık İletişimi, Işık Doğruluğu, Li-Fi, VLC.

LI-FI BASED COMMUNICATION MODULE DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS FOR SHORT DISTANCE WIRELESS DATA TRANSMISSION

ABSTRACT

Light, which is an important building block of life, has a very important position in our lives. It can be said that the light, which has such an important place, can be used in wireless communication as well as its lighting feature, which enables some developments in this field. Problems such as the increase in devices using wireless communication technology, causing a lack of bandwidth, and the decrease in the frequency range that can be used gradually, and the increase in network traffic accordingly, led scientists to work on a different wireless communication method. Instead of radio waves, Li-Fi offers the possibility of transmission by means of LEDs that can blink at such high speeds that our eyes cannot detect it. Li-Fi uses the visible light spectrum. In addition, the visible light spectrum being 10,000 times wider than the radio frequency spectrum can offer a solution to the bandwidth problem. In this thesis, Li-Fi circuits with two receivers and transmitters are designed to share text and files between two computers using serial communication via UART devices. The transfer rate of the Li-Fi device was observed by operating the UART device at different baud rates. XMODEM and ZMODEM protocols were used for file transfer and the transfer rates and times between both protocols at different baud rates were compared. As a result of this study, it has been seen that text and file transfer can be successfully performed using file transfer protocols with Li-Fi.

Keywords: Visible Light Communication, Light Fidelity, Li-Fi, VLC.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ACO-OFDM : Asymmetrically Clipped Optical OFDM (Asimetrik Kırpılmış OFDM)
ADO-OFDM : Asymmetrically Clipped DC Biased Optical OFDM (Asimetrik Kırpılmış DC Tabanlı OFDM)
ASK : Amplitude-Shift Keying (Genlik Kaydırmalı Anahtarlama)
AUV : Autonomous Underwater Vehicle (Otonom Sualtı Aracı)
BAN : Body Area Network (Vücut Alan Ağları)
CRC : Cyclic Redundancy Check (Döngüsel Artıklık Denetimi)
CSK : Color-Shift Keying (Renk Kaydırmalı Anahtarlama)
DCO-OFDM : DC Biased Optical OFDM (DC Tabanlı Optik OFDM)
DDoS : Distributed Denial of Service (Dağıtık Hizmet Engelleme)
DLL : Data Link Layer (Veri Bağlantı Katmanı)
EMI : Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
ETSI : European Telecommunications Standard Institute (Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü)
FSO : Free Space Optics (Serbest Alan Optik)
GPRS : General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Servisi)
GSM : Global System for Mobile Communications (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem)
HiperMAN : High Performance Radio Metropolitan Area Network (Yüksek Performanslı Radyo Metropol Alan Ağı)
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IoT : Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IrDA : Infrared Data Association (Kızılötesi Veri Birliği)
ISI : Intersymbol Interference (Sembollerarası Girişim)
ISM : Industrial Scientific Medical Band (Sınai Bilimsel ve Tıbbi Cihaz Bandı)
ITU : International Telecommunication Union (Uluslararası Telekominikasyon Birliği)
LAN : Local Area Network (Yerel Alan Ağı)
LDR : Light Dependent Resistor (Işığa Duyarlı Direnç)
LED : Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
Li-Fi : Light Fidelity (Işık Doğruluğu)
LoS : Line of Sight (Görüş Hattı)
MAC : Media Access Control (Medya Erişim Kontrolü)
MCM : Multi-Carrier Modulation (Çoklu Taşıyıcılı Modülasyon)
MIMO : Multiple Input Multiple Output (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış)
MITM : Man in the Middle (Ortadaki Adam)
MM : Metameric Modulation (Metamerik Modülasyon)
MTBF : Mean Time Between Failure (Ortalama Hata Zamanı)
NLoS : None Line of Sight (Görüş Hattı Olmayan)
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama)
OOK : On-Off Keying (Açma-Kapama Anahtarlama)

OSI : Open System Interconnections (Açık Sistem Bağlantıları)
OSM : Optical Spatial Modulation (Optik Uzaysal Modülasyon)
OWC : Optical Wireless Communication (Optik Kablosuz İletişim)
OWLLC : Optical Wireless Logic Link Control (Optik Kablosuz Mantıksal Bağlantı Kontrolü)
OWMAC : Optical Wireless Media Access Control (Optik Kablosuz Medya Erişim Kontrolü)
PDA : Personal Data Assistant (Kişisel Veri Asistanı)
PHY : Physical Layer (Fiziksel Katman)
PPM : Pulse Position Modulation (Darbe Pozisyon Modülasyonu)
PSTN : Public Switched Telephone Network (Genel Aktarmalı Telefon Şebekesi)
RF : Radio Frequency (Radyo Frekansı)
ROV : Remotely Operated Vehicle (Uzaktan Yönetimli Araç)
SAN : Storage Area Network (Depolama Alan Ağı)
SCM : Single-Carrier Modulation (Tek Taşıyıcılı Modülasyon)
UART : Universal Asynchronous Reciever Transmitter (Evrensel Asenkron Alıcı Verici)
UWC : Underwater Wireless Communication (Sualtı Kablosuz İletişim)
UOWC : Underwater Optical Wireless Communication (Sualtı Optik Kablosuz İletişim)
UWSN : Underwater Wireless Sensor Network (Sualtı Kablosuz Sensör Ağı)
VLC : Visible Light Communication (Görünür Işık İletişimi)
WBAN : Wireless Body Area Network (Kablosuz Vücut Alan Ağı)
WDM : Wavelenght Division Multiplexing (Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama)
Wi-Fi : Wireless Fidelity (Kablosuz Doğruluğu)
WiMAX : Wordlwide Interoperability for Microwave Access (Dünya Çapında Birlikte İşleyen Mikrodalga Erişimi)
WLAN : Wireless Local Area Network (Kablosuz Yerel Alan Ağı)
WMAN : Wireless Metropolitan Area Network (Kablosuz Metropol Alan Ağı)
WPAN : Wireless Personal Area Network (Kablosuz Kişisel Alan Ağı)
WWAN : Wireless Wide Area Network (Kablosuz Geniş Alan Ağı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kablosuz ağ türleri 8
Şekil 3.1. Elektromanyetik Spektrum 17
Şekil 3.2. LED Yapısı 21
Şekil 3.3. WDM Prensibi 22
Şekil 3.4. Li-Fi Yapısı 23
Şekil 3.5. Li-Fi Sisteminin Blok Diyagramı 23
Şekil 3.6. Li-Fi OSI Referans Modeli 24
Şekil 3.7. Hastanelerde Li-Fi Kullanım Senaryosu 30
Şekil 3.8. Li-Fi'nin Uçaklarda Kullanımı 31
Şekil 3.9. Sualtı Kullanımında Li-Fi 32
Şekil 3.10. Li-Fi ile Trafik Yönetimi 33
Şekil 3.11. Li-Fi ve Wi-Fi'nin Birarada Kullanım Senaryosu 36
Şekil 3.12. a) Hibrit Teknik b) Birleştirilmiş Teknik 37
Şekil 3.13. Hibrit Teknik vs. Birleştirilmiş Teknik 37
Şekil 4.1. Gönderici Devre Şeması 41
Şekil 4.2. Alıcı Devre Şeması 42
Şekil 4.3. Alıcı Devre Şeması (LDR) 42
Şekil 4.4. UART Bağlantı Yapısı 43
Şekil 4.5. UART Paket Yapısı 44
Şekil 4.6. Li-Fi Alıcı ve Verici Devreleri 45
Şekil 4.7. Li-Fi Sisteminin Çalışma Anı 46
Şekil 4.8. Bilgisayarlarda Dosya Aktarım Anı 46
Şekil 4.9. Bilgisayarlarda UART Cihazı Bağlantısı 47
Şekil 4.10. TeraTerm Seri Port Ayarları 47
Şekil 4.11. XMODEM ile Dosya Transferi 48
Şekil 4.12. ZMODEM ile Dosya Transferi 48

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. 802.11 Standartları 6
Tablo 3.1. Radyo Frekans Alt Bantları 18
Tablo 3.2. Li-Fi'nin Avantajları 28
Tablo 3.3. Kablosuz Teknolojilerin Karşılaştırması 34
Tablo 3.4. Li-Fi ve Wi-Fi Karşılaştırması 35
Tablo 4.1. XMODEM Sembolleri 40
Tablo 4.2. Li-Fi'de XMODEM Dosya Aktarım Verileri 49
Tablo 4.3. Li-Fi'de ZMODEM Dosya Aktarım Verileri 50
Tablo 4.4. XMODEM ve ZMODEM Hız Karşılaştırması 50

1. GİRİŞ

Son yıllarda, kablosuz haberleşme teknolojisi kullanan cep telefonu, bilgisayar, tablet, akıllı televizyon ve uydu sistemleri gibi cihazların üretiminin artması, buna bağlı olarak, bu cihazları kullanan insanların sayısının giderek artmasına sebebiyet vermiştir. Kullanılan cihazların Wi-Fi, GPS, 3G, 4G ve 5G gibi kablosuz haberleşme teknlojilerini kullanıyor olması, radyo frekansının kullanımını arttırmış ve buna bağlı olarak da bant genişliğinin azalmasına neden olmuştur. Bu durum neticesinde, bilim insanları görünür ışık iletişimi (ing: Visible Light Communication -VLC) kullanan yeni teknolojiler geliştirmeye başlamışlardır. Bu çalışmanın ilk ürünü olan (ing: Light Fidelity -Li-Fi) Li-Fi, 2011 yılında, Edinburg Üniversitesi öğretim üyesi olan Prof. Harold Haas tarafından tanıtılmıştır.

Li-Fi, gözlerimizin fark edemeyeceği kadar hızlı bir şekilde yanıp sönen LED'ler kullanan, yüksek hızlarda haberleşme imkânı sunan bir teknolojidir. Bu teknoloji elektromanyetik spektrumunun görünür ışık aralığını kullanarak ışık ile veri iletimi sağlamaktadır.

Li-Fi, giderek İnternet ve dijital iletişimin önemli bir faktörü haline gelmeye başlamıştır. Bu teknoloji, radyo frekansı kullanımının tehlikeli ve zor olduğu; tehlikeli ve kimyasal madde üretim tesisleri, hastaneler, sualtı araştırmaları ve uçaklarda kullanılabilir. Bu teknolojinin gelecekte daha fazla yaygınlaşması yönündeki çalışmalar, geliştirilerek devam etmektedir.

Bu çalışmada, Li-Fi ile iletişim modülü tasarlanması ve bu modül aracılığıyla veri iletimi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Tezin ilk bölümünde kablosuz ağların tarihçesinden, ikinci bölümünde Li-Fi ile ilgili detaylı bilgilerden ve üçüncü bölümde ise tez kapsamında tasarlanan Li-Fi haberleşme düzeneği uygulamasından bahsedilmiştir.

2. KABLOSUZ AĞLAR VE TARİHÇESİ

Kablosuz ağlar günümüzün vazgeçilmez iletişim seçeneklerinden biri olmayı başarmış, hatta olmazsa olmazları haline gelmiş bir teknolojidir. Bu teknoloji bugün hemen hemen her evde, okulda, iş yerlerinde hatta ceplerimizde bile yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Kablosuz ağlar bilgisayarlar, tabletler, cep telefonları vb. cihazları, aralarında herhangi bir fiziksel bağlantı olmadan, birbirine bağlayan bir ağ türüdür.

Kablosuz ağ teknolojisinin tarihçesi çok eskilere, 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Bu alandaki tarihsel gelişmelerden bazıları aşağıda yer almaktadır (Gezgin ve Sakallı, 2013);

- Michael Faraday'ın indüksiyon kanunu (Faraday Yasası) (1830)
- Elektromanyetik dalgaların var olduğunun kanıtlanması (Heinrich Hertz, 1888)
- İlk kablosuz telgraf (telsiz-telgraf) sisteminin geliştirilmesi (Guglielmo Marconi, 1901)
- İlk kominikasyon sistemi TELSTAR'ın yörüngeye yerleştirilmesi (1962)
- ARPANET araştırmalarında kablosuz iletişim üzerine ilk savunma amaçlı gelişmeler (1968)
- GSM standardının ortaya çıkması (1980'lerin başı)
- ALOHAnet sisteminin geliştirilmesi (1971)
- IEEE tarafından 802.11 standardının geliştirilmesi (1997)
- Wi-Fi Birliğinin kurulması (1999).

Bu gelişmeler arasında en önemli yere sahip olanı, ALOHAnet'in geliştirilmiş olmasıdır. ALOHAnet, İkinci Dünya Savaşı sırasında Amerika Birleşik Devletleri ve onlarla aynı safta yer alan ülkeler arasında oldukça fazla kullanılmıştır. Bu durum Hawaii Üniversitesinden bir grup bilim insanına ilham kaynağı olmuş ve ilk paket tabanlı radyo iletişim ağının kurulmasına olanak sağlamıştır. Kurulan bu ağa ALOHAnet adı verilmiş ve böylelikle ilk (ing: Wireless Local Area Network) WLAN ağı oluşmuştur. (Gezgin ve Sakallı, 2013)

2.1.Kablosuz Ağların Avantajları

Kablosuz ağ teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, bu teknolojinin kullanım alanları ve iletişim tercihi olarak kullanılma sıklığı artmış bulunmaktadır. Bu gelişmeler kablolu ağlara nazaran, birçok avantaj da sağlamaktadır. Bunlar, bina içi ve binalar arası olarak ikiye ayrılabilir.

Bina içinde kullanıldığında:

- Serbest dolaşım: WLAN sistemlerde, kablodan bağımsız olarak bilgisayarı, cep telefonunu veya tableti sabitlemeye gerek yoktur. Dolaşımda iken de bağlantı mümkündür.
- Kurulum kolaylığı: Kablolu ağlarda kablolama planı gerekmektedir ve bu işlem ciddi zaman maliyetine neden olmaktadır. Ancak, kablosuz ağlarda bu işleme gerek duyulmadığından zaman tasarrufu sağlanmış olur. Ayrıca, kablo kurulumunun zor olduğu alanlarda ağa bağlanma imkânı sağlamış olur.
- Maliyet: Kablolu ağlarda olduğu gibi kablo maliyeti ve işçilik ücreti yoktur. Bu da kablolu ağlara göre daha az maliyetli olmasını sağlamaktadır.
- Ölçeklenebilirlik: Her yerden İnternet erişimi sağlanabilir. Ağa yeni kullanıcıların katılımı sırasında ilave malzeme ya da iş gücü gerektirmez ve bu da ağı genişletmede kolaylık sağlar (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011).

Binalar arasında kullanıldığında ise:

- Kablolu ağlara yakın hızlarda bağlantı hızı ile kablolu ağlara iyi bir alternatiftir.
- Bakım giderleri sabit olmakla birlikte en az düzeydedir.
- İletişim güvenliği şifreleme kullanımı ile sağlanabilmektedir.
- Dağınık yapıdaki kurumlar için binalar arası kablosuz bağlantı sağlanabilir (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011).

2.2.Kablosuz Ağların Dezavantajları

Kablosuz ağların avantajlarının yanısıra bazı dezavantajları ve riskleri de mevcuttur. Bunlardan bazıları:

- Girişim: Kablosuz telefonlar ve mikrodalgalar gibi farklı cihazlardan gelen sinyaller ağa girişimde (parazit) bulunabilir.
- Ağ güvenliği: Kablosuz ağlarda iletişim radyo frekansları ile sağlandığından dolayı, dışarıdan sızma girişimlerini mümkün kılmaktadır. Bu durumda, kablosuz ağın güvenliğini sağlamak amacıyla şifreleme ve kimlik doğrulaması gibi teknikler geliştirilip kullanılmaktadır.
- Teknoloji: Kablosuz ağ teknolojisi halen gelişmeye devam etmektedir. Kablosuz ağlar, şu an için kablolu ağların sunduğu hız ve güvenilirliği sağlayamamaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011).

2.3. IEEE 802 Standartları

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün (ing: Institute of Electrical and Electronics Engineers) (IEEE) LAN MAN Standartları Komitesi tarafından, kablosuz yerel alan ağı (WLAN), kablosuz metropolitan alan ağı (ing: Wireless Metropolitan Area Network) (WMAN) ve kablosuz kişisel alan ağı (ing: Wireless Personel Area Network) (WPAN) teknolojisi için standartlar geliştirilmektedir. Bu standartlar, kablosuz İnternet için altyapı geliştirilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca bu komite, IEEE Computer Society tarafından da desteklenmektedir (Marks ve diğ., 2001).

IEEE 802 Kablosuz Standartları Komitesi üç ana çalışma grubundan oluşmaktadır. Bunlar:

● IEEE 802.11 çalışma grubu, WLAN'lar için IEEE 802.11 standartlarını geliştirir.

● IEEE 802.15 çalışma grubu, WPAN'ler için IEEE 802.15 standartlarını geliştirir.

● IEEE 802.16 çalışma grubu ise WMAN'lar için IEEE 802.16 standartlarını geliştirir (Marks ve diğ., 2001).

2.3.1. IEEE 802.11 Standartları

IEEE tarafından geliştirilen ilk (1997) standarttır. Kablosuz yerel alan ağının temelini bu standart oluşturmaktadır. Bu standart, teknolojik gelişmeler neticesinde yetersiz hale gelmeye başlamasından dolayı 802.11x adı verilen standartlar geliştirilmeye başlanmıştır. Bunlardan en önemli ve yaygın olarak kullanılanları:

- 802.11a
- 802.11b
- 802.11g
- 802.11n

standartlarıdır (URL-1).

2.3.1.1. 802.11a Standardı

Bu standart 1999 yılında, 802.11 standardının yetersiz hale gelmesinden dolayı geliştirilmiştir. 5 GHz frekansında, 54 Mbps hızında 100 metreye kadar veri aktarımı sağlamaktadır. Daha çok yüksek veri iletim hızına ihtiyaç duyulan yerlerde tercih edilmektedir (URL-1).

2.3.1.2. 802.11b Standardı

802.11a ile birlikte 1999 yılında çıkış yapmıştır. Kablosuz ağ kullanımının yaygınlaşmasında büyük rol oynayan bu standart 2,4 GHz frekansında, 11 Mbps hızında iletim sağlamaktadır. Kapalı alanlarda yaklaşık 38 metre, açık alanlarda ise 150 metrelik bir alanı kapsayabilmektedir. Bu standart daha çok ofis ortamları, konferans salonları, çalışma alanları, hastane, fabrika gibi ortamlarda kullanılmaktadır (URL-1).

2.3.1.3. 802.11g Standardı

2003 yılında çıkış yapan bu standart, 2,4 GHz frekansında maksimum 54 Mbps hızında veri iletimi sağlamaktadır. Veri iletim hızı ve bant genişliğinde önemli ölçüde gelişme sağlanmıştır. Ayrıca, 802.11a ve 802.11b standartlarının etkin olduğu özelliklerinin birleştirilmiş halidir. 802.11b standardında olduğu gibi, kapalı alanlarda 38 metre, açık alanlarda ise 150 metrelik bir alanı kapsayabilmektedir. Bu standart, hem 802.11b ile çalışan cihazlarların uyum sorunu yaşaması hem de bu cihazlara göre daha pahalı olmasından dolayı çok fazla yaygınlaşamamıştır (URL-1, 2013).

2.3.1.4. 802.11n Standardı

Zamanla kullanıcı sayısındaki artış daha fazla bant genişliği, erişilebilirlik ve kapsama alanı ihtiyacına sebep olmuş ve bu nedenle IEEE tarafından 2009 yılında 802.11n

standardı geliştirilmiştir. MIMO protokolü sayesinde hem 2,4 GHz hem de 5 GHz frekanslarında yayın yapabilmektedir. Bu standarda sahip cihazlarda iki veya daha fazla anten bulunmaktadır. Bu da veri iletim hızı ve mesafesinin artması anlamına gelmektedir. Bu standartla birlikte, ortalama veri iletim hızı 130 Mbps, maksimum veri iletim hızı ise 600 Mbps seviyelerine çıkmıştır. Kapalı alanlarda 70 metre, açık alanlarda ise 250 metreye kadar iletim sağlamaktadır. En önemli avantajlarından birisi de önceki standartlarla uyumlu bir şekilde çalışmasıdır (URL-1, 2013).

2.3.1.5. 802.11ac Standardı

802.11ac standardı 5 GHz bandında eş zamanlı bağlantıyı destekleyen, son dönemlerde en çok kullanılan 802.11 standardıdır. Daha çok evlerde kullanılan kablosuz modemlerde bu standart kullanılmaktadır. Geriye dönük uyumluluğu da destekleyen bu standart 5 GHz bandında 3,5 Gbps'ye kadar veri iletim hızı sunmaktadır. Ayrıca, bu standartta birden fazla alıcı ve vericinin aynı anda çalışmasına imkan veren MIMO teknolojisi de kullanılmaktadır (URL-2, 2019).

2.3.1.6. 802.11ax Standardı

Bir diğer adı Wi-Fi 6 olan bu standart 2019 yılında Samsung ve Apple'ın amiral gemisi telefonlarında kullanıma sunulmuştur. 802.11ac standardına göre birçok önemli iyileştirme içeren bu standart, 2,4 GHz ile 5 GHz frekanslarında iletim yapmakta ve 160 MHz'e kadar bant genişliği de sunmasının yanı sıra, 10 Gbps'a kadar da veri iletim hızı sunmaktadır. Ayrıca OFDMA desteği sayesinde de aynı anda 8 cihaza hizmet verebilmektedir (URL-2, 2019).

Tüm bu standartların özellikleri Tablo 2.1'de özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.1. 802.11 Standartları (URL-1)

	802.11a	**802.11b**	**802.11g**	**802.11n**	**802.11ac**	**802.11ax**
Frekans	*5 GHz*	*2,4 GHz*	*2,4 GHz*	*2,4/5 GHz*	*5 GHz*	*2,4/5 GHz*
Max. Hız	*54 Mbps*	*11 Mbps*	*54 Mbps*	*600 Mbps*	*3,5 Gbps*	*10 Gbps*

Tablo 2.2. (Devam) 802.11 Standartları (URL-1)

	802.11a	**802.11b**	**802.11g**	**802.11n**	**802.11ac**	**802.11ax**
Ortalama Hız	*27 Mbps*	*5 Mbps*	*22 Mbps*	*130 Mbps*	--	--
Maksimum İletim Mesafesi	*100 m*	*150 m*	*150 m*	*250 m*	--	--

2.3.2. IEEE 802.15 Standartları

IEEE'nin 802 Standartları Komitesinin kablosuz kişisel alan ağı (WPAN) standartlarını belirleyen çalışma grubudur. Bu gruptaki standartlar düşük güçlü ağları oluşturmaktadır (URL-3, n.d.-a). Bu standart grubunda en yaygın olarak kullanılanlar 802.15.1, 802.15.4, 802.15.6 ve 802.15.7 standartlarıdır.

2.3.2.1. 802.15.1 Standardı

Bluetooth olarak da bilinen bu standart, daha çok mobil cihazlar arasında düşük güç tüketimi ile veri iletimi sağlayan bir kablosuz ağ standardıdır (URL-3, n.d.-b).

2.3.2.2. 802.15.4 Standardı

802.15.1 standardını kullanan Bluetooh cihazlarının yeniden şarj edilme gereksinimleri olduğundan, çok düşük güç tüketimi ile aylarca hatta yıllarca bağımsız olarak çalışabilmesi, düşük veri iletim hızı gerektiren uzun ömürlü sistemlerde kullanmaya elverişli bir standarttır. ZigBee teknolojisi de bu standart üzerinde çalışmaktadır (URL-3, n.d.-b).

2.3.2.3. 802.15.6 Standardı

Gerek insan vücuduna yerleştirilen sensörler gerekse de giyilebilir cihazlar arasında, düşük güç tüketimi ile veri iletimi sağlayarak insan sağlığını takip etmek amacıyla kurulan ağların kullandığı standarttır. Kablosuz vücut alan ağı (Wireless Body Area Network) (WBAN) olarak da bilinmektedir (URL-3, n.d.-a).

2.3.2.4. 802.15.7 Standardı

LED teknolojisindeki gelişmeler ile daha da etkin olarak kullanılan bu standart, görünür ışık spektrumunu kullanarak kısa menzilli optik kablosuz iletişimi ifade etmektedir. Işık kaynaklarının çeşitli modülasyonları ile 96 Mbps'ye kadar yüksek hızlı veri iletimi sağlamaktadır. Bu standart VLC teknolojisinin de temelini oluşturmaktadır (Rajagopal ve diğ., 2012).

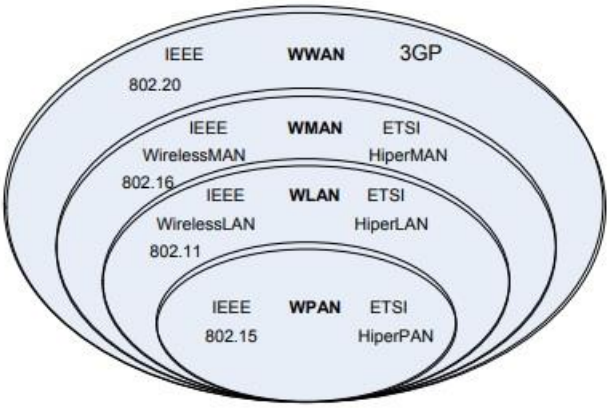
2.3.3. IEEE 802.16 Standardı

IEEE 802 Standartları Komitesi tarafından kablosuz metropol alan ağları için geniş bant standartları geliştirmek amacıyla kurulmuştur. Bu standart IEEE tarafından WirelessMAN olarak adlandırılmıştır. Ancak (ing: Wordlwide Interoperability for Microwave Access) WiMAX Endüstri Birliği tarafından "WiMAX" adı ile ticarileşmiştirilmiş ve dünya çapında bu isimle tanınmıştır (URL-4).

Bu standart, merkezi baz istasyonlarından, binaların çatılarındaki antenler aracılığıyla yüksek hızlı geniş bant kablosuz erişim imkanı sağlamaktadır (Marks ve diğ., 2001).

2.4. Kablosuz Ağ Çeşitleri

Kablosuz ağ türleri her ortam ve mesafeye göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bu yapılar aşağıdaki Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Şekil 2.1'de, kablosuz ağ türlerinin kapsadıkları alan büyüklük hiyerarşisi de görülmektedir. Bu hiyerarşi sıralaması WPAN < WLAN < WMAN < WWAN şeklinde yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Kablosuz ağ türleri (Güngör ve diğ., 2009)

2.4.1. Kablosuz Kişisel Alan Ağları (WPAN)

Genellikle bilgisayarlar, cep telefonu, tablet, akıllı televizyon gibi cihazlar arasında kısa mesafede ya da dar bir alanda kurulan ağ türüdür. IEEE 802.15 standardını kullanmaktadır. Bu ağların kurulmasına yarayan teknolojiler arasında; Bluetooth, Kızılötesi, ZigBee ve HomeRF gibi teknolojiler sayılabilmektedir (Gezgin ve Sakallı, 2013).

2.4.1.1. Bluetooth

Telefonları, tabletleri, bilgisayarları ve taşınabilir tüm cihazları birbirine bağlamak için tasarlanmış, yüksek hızlı veri iletimi sağlayan ve bunu düşük güç tüketimi ile gerçekleştiren kablosuz bağlantı teknolojisidir. 2,4 GHz frekansında, kısa mesafede resim, ses ve veri iletimini 10 metreye kadar sağlamaktadır (Yanxia ve diğ., 2009).

2.4.1.2. Kızılötesi (IrDA)

Düşük maliyetli, kullanımı kolay, kısa mesafede veri iletimini kızılötesi ışık ile sağlayan kablosuz iletişim teknolojisidir (Teixeira, 2008). Kızılötesi teknolojisini, görüş hattı ve yansıma yöntemi olarak iki türlü kullanmak mümkündür. Görüş hattı için doğrudan görüş ortamı sağlanmalıdır. Bu yöntemle, daha fazla veri iletimi sağlanmaktadır. Yansıma yöntemi ise, geniş alanda iletişimi sağlamak ve daha fazla kullanıcıya ulaşmak için kullanılmaktadır (Gezgin ve Sakallı, 2013).

2.4.1.3. ZigBee

Zigbee, IEEE tarafından tanımlanan 802.15.4 standardını kullanan, ZigBee Alliance tarafından tasarlanmış bir teknolojidir. Zigbee Alliance grubu, Ember, Freescale, Chipcon, Invensys, Mitsubishi, CompXs, AMI Semiconductors, ENQ Semiconductors gibi birçok firmadan oluşmaktadır. Bu teknoloji düşük veri hızı, düşük güç tüketimi ve düşük maliyet sağlamak için MAC ve fiziksel katmanı kullanmaktadır. Düşük güç tüketimi nedeniyle iletişim mesafesi 10 metreden azdır. Zigbee, akıllı ev sistemleri, güvenlik sistemleri, endüstriyel ağlar, tarım, askeri ve sağlık hizmetleri gibi birçok sektörde uygulama alanı bulmaktadır (Sittakul ve diğ., 2019).

2.4.1.4. HomeRF

Özellikle ev ve küçük ofislerde kullanılmak üzere tasarlanmış, 2,4 GHz ISM bandını kullanan kablosuz LAN teknolojisidir. Düşük hızda 1,6 Mbps, yüksek hızda ise 10 Mbps hızında veri iletimi sağlamaktadır. 50 metreye kadar veri iletimi mümkün kılmaktadır (Cho ve Song, 2003).

2.4.2. Kablosuz Yerel Alan Ağları (WLAN)

Daha çok üniversite kampüsleri, hastaneler, okul ya da kurumsal işletmeler gibi birçok bilgisayarın yer aldığı kurumsal alanlarda kullanılan ağlardır. IEEE 802.11 standardını kullanmaktadır. WLAN ağlar 25 m ila 100 m mesafeye kadar kapsama alanı sağlamaktadırlar (Gezgin ve Sakallı, 2013). Bu teknolojiye örnek olarak Wi-Fi ve henüz daha yeni bir teknoloji olan Li-Fi verilebilir.

2.4.2.1. Wi-Fi

Kablosuz bağlantı alanı anlamına gelen; cep telefonları, bilgisayarlar, tabletler, oyun konsolları, akıllı televizyonlar vb. cihazların kablosuz olarak birbirlerine bağlanmasını ve birbirleri arasında 100 metre mesafeye kadar veri iletimi sağlayan teknolojidir. IEEE 802.11 protokolüne bağlı olarak 2,4 GHz veya 5 GHz radyo frekanslarında çalışmaktadır (Ellinger, 2008).

2.4.2.2. Li-Fi

Li-Fi, Wi-Fi'daki radyo dalgalarının yerine görünür ışık ile haberleşme ve veri iletimi sağlayan bir kablosuz iletişim teknolojisidir. Li-Fi hakkında detaylı bilgi, bu çalışmanın ikinci bölümünde verilmektetir.

2.4.3. Kablosuz Metropolitan Alan Ağları (WMAN)

IEEE 802.16 standardını kullanan, 50 km ve üzerinde kapsama alanına sahip, görüş hattı gerektirmeyen ve 70 Mbps bağlantı hızı sunan bir kablosuz ağ türüdür. Bu ağ türüne örnek olarak WiMAX ve HiperMAN verilebilir (Tian ve Yuan, 2007).

2.4.3.1. WiMAX

WiMAX, Wi-Fi teknolojisinin çok daha büyük ve güçlü versiyonu olup, IP tabanlı kablosuz ağ teknolojisidir. Wi-Fi'den farklı olarak; daha fazla bant genişliği, lisanslı spektrum kullanımı, iletim için anteni doğrudan görmeye gerek olmaması, görüş hattına gerek olmadan iletişim (NLoS) gibi imkanlar sunmaktadır. Sabit istasyonlar için 50 km, mobil istasyonlar için ise 15 km'lik bir alanda 75 Mbps hızında İnternet erişimi sağlamaktadır (URL-5).

2.4.3.2. HiperMAN

HiperMan, Avrupa Haberleşme Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından geliştirilen, kablosuz iletişim sağlamak için kullanılan bir standarttır. WiMAX'ın Avrupa'da kullanılan alternatifidir. Birçok açıdan WiMAX ile aynıdır. Bu yüzden, WiMAX'ın sağladığı pek çok desteği de sağlamaktadır. Noktadan noktaya 2 ila 11 GHz frekans aralığında bağlantı kurulmasını sağlamaktadır (URL-5).

2.4.4. Kablosuz Geniş Alan Ağı (WWAN)

Bir ülke ya da kıta çapında, birbirinden çok uzak yerlerdeki bilgisayarları birbirine bağlayan ağlardır. İletişim genellikle uydular aracılıyla sağlanmaktadır. Bu ağ türü ise IEEE 802.20 standardını kullanmaktadır. Veri trafiğinin büyük bir kısmını sesli iletişim oluştursa da son yıllarda multimedya kullanımı ve İnternet bağlantıları bu ağdaki trafiğin büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. Bu ağ türüne örnek olarak; GSM, GPRS, 3G, 4G ve 5G verilebilir (Gezgin ve Sakallı, 2013).

2.4.4.1. GSM

Uzun mesafeler arasında cep telefonu ile ses ve veri iletimi sağlayan, dünyada en yaygın olarak kullanılan mobil iletişim protokolüdür (Gezgin ve Sakallı, 2013). Tüm (ing: Global System for Mobile Communications) GSM standartları (GSM 850-900-1800-1900-2100) hücresel ağ kullanır ve dolaşım sırasında hücreler arası geçiş yapma özelliğine sahiptir (URL-6).

2.4.4.2. GPRS

2G şebekesi üzerinden paket anahtarlamalı olarak veri iletimi sağlayan teknolojidir. Pratikte 30-50 Kbit'e kadar veri aktarımı sağlayabilmektedir (URL-7).

2.4.4.3. 3G

1G ve 2G teknolojilerindeki gibi ses iletiminin yanı sıra veri iletimi de sağlamaktadır. Böylelikle, multimedya iletimi de mümkündür. Ayrıca, 144 Kbps ile 2 Mbps aralığında bağlantı hızı sunmaktadır (Gezgin ve Sakallı, 2013).

2.4.4.4. 4G

Mobil telefonlar ile yüksek hızlı hizmetler sunmak için geliştirilen, IP tabanlı şebeke yapısına sahip dördüncü nesil mobil haberleşme teknolojisidir (URL-8). 3G ve 2G standartlarının devamıdır. Üçüncü nesildeki kapsama alanı sorunu gibi bazı sorunları çözmesi için tasarlanmış ve daha sonraları 4.5G (IMT Advanced), 4.5G/4.9G (LTE Advanced Pro) türleri geliştirilmiştir (URL-9).

2.4.4.5. 5G

4G teknolojisinin yaklaşık 10 katı kadar veri iletim hızı sağlayan yeni nesil kablosuz telefon teknolojisidir. Kullanılan cihaza göre 10 Gbps'a kadar bağlantı hızı sunmaktadır. Günümüz teknolojisiyle şebekelerde 4,7 Gbps hıza, laboratuvar ortamlarında ise 7,5 Gbps hızlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, 2025 yılına kadar da 5.5G çalışmaları ile 20 Gbps hızında indirme ve 10 Gbps hızında da yükleme hızına ulaşılması planlanmaktadır (URL-10).

3. Lİ-Fİ

3.1. Li-Fi Nedir?

Günümüzde kablosuz teknolojilerin artmasına bağlı olarak, radyo frekans spektrumunda daralmaların oluşması, ayrıca radyo frekans spektrumunun kullanımının ücretli olması dolayısıyla yeni bir kablosuz iletim teknolojisi arayışına girilmiştir. Bu arayış neticesinde, görünür ışık iletişimini temel alan, radyo frekans spektrumundan 10.000 kat daha fazla bant genişliği sunan, radyo dalgalarının yerine ışık kullanarak haberleşme imkânı sunan, Li-Fi teknolojisi geliştirilmeye başlanmıştır.

Li-Fi, Alman fizik bilim adamı Prof. Harald Haas tarafından, 2011 yılında gerçekleştirilen bir TED Konferansı'nda, bir büyük LED kullanılarak 10 Mbps hızında video aktarımı gerçekleştirilerek tanıtıldı (Khandal ve Jain, 2014). Bu tanıtım, cep telefonunda oynatılan bir videonun, Li-Fi düzeneğindeki LED ile ışık sinyallerine çevrilmesi ve belirli bir mesafede bulunan güneş paneli tarafından ışık sinyallerinin yakalanarak, demodülasyon işlemi sonucunda, videoya dönüştürüldükten sonra bilgisayar ekranında oynatılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde; Li-Fi teknolojisinin tanımına, çalışma prensibine ve uygulama alanlarına yer verilecektir.

Li-Fi, verilerin radyo sinyalleri yerine, insan gözünün farkedemeyeceği kadar hızlı yanıp sönebilen LED'lerden yayılan ışık aracılığıyla iletiminin sağlandığı kablosuz veri iletim teknolojisidir. Li-Fi aynı zamanda optik kablosuz iletişim (ing: Optical Wireless Communication) (OWC) kategorisinde yer almaktadır. OWC, görünür ışığın yanı sıra kızılötesi ve mor ötesi iletişimi de içermektedir (Hadi, 2016). Li-Fi yüksek hızlarda veri iletmek için VLC altyapısını kullanmaktadır. Diğer bir deyişle, ışık tabanlı Wi-Fi olarak da kabul edilebilir (Sarkar ve diğ., 2015). Li-Fi ismi Wi-Fi'de (Wireless Fidelity) olduğu gibi "Light Fidelity" teriminin kısaltılması ile oluşmaktadır.

3.1.1. Optik Kablosuz İletişim (OWC)

OWC, kablosuz bağlantı imkânı sunmak için kızılötesi, görünür ışık ve ultraviyole ışık bantlarını kullanmaktadır. Düzensiz spektrumda çalışma, düşük maliyet ve yüksek bant genişliği gibi özellikleri sayesinde mevcut kablosuz teknolojilere alternatif sunmaktadır (Uysal ve Nouri, 2014). Belirli uygulamalarda, RF tabanlı kablosuz iletişim uygulamaları için tamamlayıcı teknoloji olarak da görülmektedir. Gelecekteki 5. nesil iletişim ağları için, sistemin kapasitesini iyileştirme ve spektrum sıkışıklığını giderme açısından kabul görmektedir (Ghassemlooy ve diğ., 2017). OWC sistemleri, görünür ışık bandında 390-750 nm arasında çalışmakta olup, daha çok kısa ve orta menzilli iletişim için kullanılmaktadır (URL-11).

Optik kablosuz iletişim:

- Zorlu arazi koşullarında hızlı dağıtım,
- RF'e nazaran daha düşük maliyet,
- RF parazitinden arınmış olma,
- Doğal güvenlik (Işığın duvarlardan geçememesi),
- Yüksek enerji verimliliği

gibi avantajlar sunmaktadır (Ghassemlooy ve diğ., 2017).

OWC aşağıdaki gibi birçok alanda uygulanabilir:

- Binalar arası bağlantı ve elektronik ticaret: Boş alan optik iletişimi (ing: Free Space Optic) (FSO) ve görünür ışık iletişimi (VLC) hız, esneklik ve yüksek güvenlik sağlamaktadır.
- Ses ve video akışı: Televizyon programlarının canlı olarak yayınlanmasına olanak sağlar.
- İnsansız hava aracı ve su altı araçları: Askeri sistemler, araç trafiği izleme, afet bölgelerindeki hayati verilerin iletilmesinde kullanılabilir.
- Yeryüzü ile yörüngedeki uydular arasında yüksek miktarada veri iletimi sağlayabilir.
- Akıllı ulaşım sistemleri: Araçtan araca ve araçtan trafik sistemlerine güvenli iletişim için kullanılabilir.

- Tıbbi üretim: Kablosuz iletim özelliklerine sahip giyilebilir tıbbi cihazlar, insan sağlığının izlenebilmesi için kullanılabilir. Bu yüzden OWC, Vücut Alan Ağları (ing: Body Area Network) (BAN) için yüksek hızda veri iletimi sağlamaya yönelik uygun bir teknolojidir.
- Kablosuz sensör ağları: Su altı araştırmaları ve üretim sektörü için durum tabanlı izleme, makinelerin arıza teşhisi ve yeni gereksinimler için sensör verileri önem taşımaktadır (Ghassemlooy ve diğ., 2017).

3.1.2. Serbest Alan Optik İletişimi (FSO)

Verilerin optik bağlantı sayesinde, boş alanda ışık yayılımıyla iletildiği optik iletişim teknolojisidir. Bu teknolojide kabloya ihtiyaç yoktur. Çalışma şekli fiber optik kablo ağlarına benzemektedir, fakat aralarındaki tek fark optik ışınların cam fiber yerine hava yoluyla gönderilmesidir. FSO'da tam çift yönlü iletişim sağlamak için her iki tarafta optik alıcı-verici bulunması gerekir. Tam çift yönlü bağlatı ile veri, ses ve video iletiminde 10 Gbps hızlara ulaşmak mümkündür (Malik ve Singh, 2015).

İyi bir FSO sisteminin sahip olması gereken özellikler şunlardır:

- Daha uzun mesafelere ulaşabilmek için daha yüksek güç seviyelerinde çalışabilmelidir.
- Yüksek hızlara ulaşabilmek için yüksek hızda modülasyon yapabilmelidir.
- Sistem bakımı açısından, az yer kaplamalı ve düşük güç tüketimine sahip olmalıdır.
- Geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmelidir. Böylelikle, dış mekân sistemleri için performans kaybı en az seviyede olacaktır.
- FSO'da arızalar arasındaki ortalama süre (ing: Mean Time Between Failure) (MTBF) 10 yıldan fazla olmalıdır (Malik ve Singh, 2015).

FSO, çok çeşitli yerlerde birçok hizmet sağlamak için kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları:

- Dış mekân kablosuz erişim: Kablosuz servis sağlayıcıları tarafından iletişim için kullanılabilir. FSO kullanımı herhangi bir lisans gerektirmemektedir.

- Depolama alan ağı (SAN): (ing: Storage Area Network) SAN, birleştirilmiş, blok tabanlı veri depolama ve bu depolama birimleri arasında erişim imkânı sunan bir ağdır. FSO bağlantıları SAN oluşturmak için de kullanılabilir.
- Son kullanıcıya erişim: Fiber hattı kurulumu için kazı, kablo ve kablo döşeme maliyeti servis sağlayıcıları için oldukça maliyetli olduğundan, FSO kullanımı bu maliyetleri en aza indirecektir. Ayrıca, son kullanıcı için de yüksek hızda bağlantı sunmaktadır.
- Kurumsal erişim: FSO sistemlerinin kolay kurulum özellikleri sayesinde, kurumsal şirketlerin binaları arasında bağlantı kurulmasını sağlayabilir.
- Ana taşıyıcı: Hücresel telefon trafiğinin anten kulelerinden yüksek hızlarla tekrar (ing: Public Switched Telephone Network) PSTN'ye taşınmasında kullanılabilir ve böylelikle iletim hızının artması sağlanabilir.
- Noktadan noktaya erişim: Kısa mesafeli iletişim amacıyla noktadan noktaya, örneğin uçak ile yer veya uydu ile yer arasında, ya da noktadan çok noktaya bağlantı kurmak için kullanılabilir.
- Askeri erişim: Güvenli ve tespit edilmesi zor bir sistem olmasının yanı sıra, geniş alanları minimum sürede bağlayabildiğinden dolayı, askeri uygulamalar için uygun bir sistemdir (Malik ve Singh, 2015).

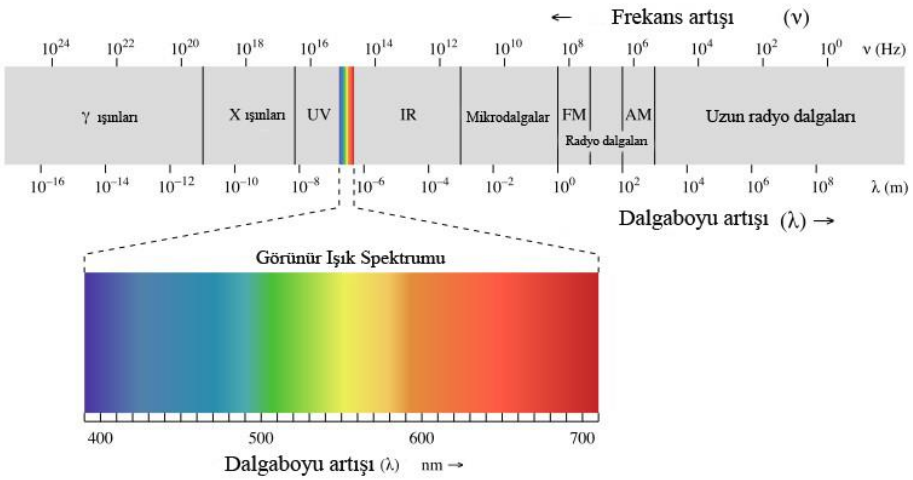
Yukarıda sayılanların yanı sıra, daha birçok alanda kullanılmaktadır.

3.1.3. Görünür Işık İletişimi

Günümüzde radyo frekansı kullanan kablosuz iletişim teknolojilerinin kullanımı bir hayli fazladır. Kablosuz teknolojilerde yaşanan gelişmeler neticesinde, bu teknolojiyi kullanan cihazların sayısının artması zamanla RF kıtlığına ve veri iletiminde kayıplara yol açmaktadır. Bu durum, yeni bir kablosuz haberleşme teknolojisi bulma konusunda bilim insanlarını çalışmaya yöneltmiştir. Bu çalışmalardan bir tanesi de görünür ışık haberleşmesi (VLC)'dir (Safaraliev ve diğ., n.d.).

Görünür ışık haberleşmesi, ilk olarak Toshihiki Komine tarafından 2004 yılında önerilmiştir. Bu tarihten itibaren LED'lerin geliştirilmesi ve kullanımı hızla artmıştır (He ve diğ., 2013).

VLC, LED'ler ile hem aydınlatma hem de haberleşme imkânı sunan kısa menzilli kablosuz iletişim teknolojisidir. 384 THz ile 789 THz frekans aralığına denk gelen 380 nm ile 780 nm dalga boylarında iletim yapmaktadır. Veri iletimi ve haberleşme işlemi, ışığın yoğunluğunun değiştirilmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu yoğunluk değişimi, insan gözünün fark edemeyeceği kadar hızlıdır (JGeorge ve diğ., 2014). Görünür ışık spekturumunun elektromanyetik spektrumdaki yeri Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Elektromanyetik Spektrum (R ve S, 2015)

VLC haberleşmesinde Wi-Fi veya mobil ağların yerini alması amaçlanmamaktadır. Daha çok, heterojen bir ağ ortamına ek bir yüksek hızlı veri katmanı olarak uygulanması ve radyo frekans kullanımının sakıncalı olduğu veya yetersiz kaldığı durumlarda, kablosuz haberleşme imkanı sağlaması amaçlanmaktadır (Grobe ve diğ., 2013).

Yukarıda sayılan özelliklerin yanı sıra, neden VLC kullanmalıyız sorusuna verilebilecek yanıtlar, sebepleriyle birlikte aşağıda listelenmiştir:

- Gama ışınlarının tehlikeli olması,
- X ışınlarının Gama ışınları gibi sağlık sorunları çıkarabileceği,
- Ultraviyole ışık kullanımının insan vücudu ve sağlığı için tehlikeli olması,
- Kızılötesi ışığın gözlere zarar vermesi nedeniyle sadece düşük güçte kullanılması (Kaur, 2014).

3.2. Radyo Frekans Spektrumu

Elektronik haberleşme amacıyla kullanılan, frekans aralığı 9 kHz ile 3000 GHz arasında değişen, uluslararası düzenleme yapılması durumunda 3000 GHz'in üzerindeki frekansları da kapsayan elektromanyetik frekans aralığını temsil etmektedir (URL-12). Radyo frekans spektrumu, elektromanyetik spekturumun küçük bir kısmını oluşturmaktadır.

Frekans spektrumundaki üç frekans bölgesi atmosferde iletişim için elverişlidir. Bunlar; radyo bölgesi, görünür ışık bölgesi ve kızıl ötesi bölgeleridir. Uluslararası Telekominikasyon Birliği (ing: International Telecommunication Union) (ITU) radyo frekans bandını çeşitli alt bantlara ayırmıştır. Tablo 3.1'de bu alt bantlar listelenmiştir.

Tablo 3.1. Radyo Frekans Alt Bantları (URL-13)

Frekans alt bandı	**Kısaltma**	**ITU Numarası**	**Frekans**
Aşırı düşük frekans	ELF	1	3 Hz – 10 Hz
Süper düşük frekans	SLF	2	30 Hz – 300 Hz
Ultra düşük frekans	ULF	3	300 Hz – 3 kHz
Çok düşük frekans	VLF	4	3 kHz – 30 kHz
Düşük frekans	LF	5	30 kHz – 300 kHz
Orta frekans	MF	6	300 kHz – 3 MHz
Yüksek frekans	HF	7	3 MHz – 30 MHz
Çok yüksek frekans	VHF	8	30 MHz – 300 MHz
Ultra yüksek frekans	UHF	9	300 MHz – 3 GHz
Süper yüksek frekans	SHF	10	3 GHz – 30 GHz
Aşırı yüksek frekans	EHF	11	30 GHz – 300 GHz
Terahertz radyasyonu	THF	12	300 GHz – 3 THz

LF-VHF frekansları radyo yayınlarında, VHF-UHF frekansları televizyon yayınlarında kullanılmaktadır (URL-13).

3.2.1. RF Spektrumunun Yetersizliği

2009 yılında ABD Federal İletişim Komisyonu spektrum krizi konusunda uyarıda bulunmuştur (Hossain ve diğ., 2014). Radyo frekansı kullanan teknolojilerin en büyük eksiklikliği spekturumun yetersizliğidir. Bu yetersizliğin en büyük sebeplerinden birisi, mobil kullanıcı sayısının giderek artıyor olması ve buna bağlı olarak da mobil veri trafiğinin artması gösterilebilir. CISCO raporlarına göre, 2023 yılına kadar küresel nüfusun %70'inden fazlasının mobil bağlantıya sahip olacağı öngörülmektedir. 2018 yılındaki rapora göre 5,1 milyar olan toplam mobil abone sayısının (küresel nüfusun %66'sı) 2023 yılında 5,7 milyar'a ulaşacağı (küresel nüfusun %71'i) belirtilmektedir. Ayrıca, 5G bağlantılı cihaz sayısının da 2023 yılına kadar küresel mobil cihazların %10'undan fazlasını oluşturacağı belirtilmektedir. Buna bağlı olarak, 2023'e kadar küresel mobil cihaz sayısının 13,1 milyara çıkması ve bunun 1,4 milyarını 5G uyumlu cihazların oluşturması öngörülmektedir (CISCO, 2020).

CISCO yıllık İnternet raporuna göre (2018-2023), Makineden Makineye (M2M) bağlantılarının 2023 yılına kadar küresel bağlı cihazların yarısı olması beklenmektedir. Makineden makineye bağlantıların payı 2018'de %33'ten 2023'e kadar yüzde %50'ye yani, 14,7 milyar M2M bağlantısı olacağı öngörülmektedir. M2M bağlantı kategorisi içerisinde IoT cihazların en büyük paya sahip olacağı, 2023 yılına kadar M2M payının yaklaşık yarısına sahip olacağı öngörülmektedir (CISCO, 2020).

Yine CISCO raporuna göre, kişi başına İnternete bağlı toplam cihaz sayısının 2023 yılına kadar 3,6, kişi başına mobil cihaz sayısının da 1,6 olması beklenmektedir (CISCO, 2020).

Bu gelişmeler doğrultusunda, kişi başına mobil bağlantıya sahip cihaz sayısındaki artış, mobil veri trafiğini de artırdığından Radyo Frekansı (RF) spektrumunu olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, cihaz sayısındaki artış elektromanyetik girişime de yol açmaktadır.

3.2.2. VLC-RF Karşılaştırılması

Radyo frekans iletişimi günümüzde en çok kullanılan teknoloji olmasına rağmen, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmektedir:

Kapasite: Veri iletmek için kullanılan radyo dalgaları, pahalı olduğu kadar da sınırlıdır. Radyo frekans teknolojilerinin giderek artmasına bağlı olarak kullanılabilecek boş frekans bulmak zorlaşmaktadır.

Verimlilik: Radyo dalgaları çok fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. VLC aynı anda hem iletim hem de aydınlatma yaptığı için enerji verimliliği konusunda öne çıkmaktadır.

Maliyet: VLC için kullanılan alıcı ve verici cihazları RF cihazlarına göre daha ucuzdur.

Güvenlik: Radyo dalgaları hastaneler, uçaklar, kimyasal tesisler ve nükleer üretim tesisleri gibi bazı alanlarda elektromanyetik girişim (ing: Electromagnetic Interference) (EMI) oluşturmaktadır. VLC, radyo dalgaları yerine ışık kullandığı için EMI oluşturmaz ve daha güvenlidir.

Veri Güvenliği: Radyo dalgaları duvarlardan geçebildiği için kesilmeye ya da zayıflamaya elverişlidirler. VLC'de ise ışık duvarlardan geçemediğinden dolayı sızma girişimlerine imkân vermemektedir.

İnsan Sağlığı: Radyo dalgalarının iletim gücü insanlar için bir takım sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Bu yüzden RF sinyal gücü belirli bir seviyenin üzerine çıkarılmamalıdır. VLC'de kullanılan görünür ışığın insan sağlığına herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamaktadır (JGeorge ve diğ., 2014).

RF'in bu dezavantajlarından dolayı VLC teknolojisinin gelişmesine de bağlı olarak, ilerleyen dönemlerde VLC kullanımında artış görülmesi kuvvetle muhtemeldir. Temel olarak Li-Fi'nin amacı, radyo frekansının yerini almak değil, onu tamamlamaktır (Saini ve Sharma, 2016).

3.3. Bir Işık Kaynağı Olarak LED

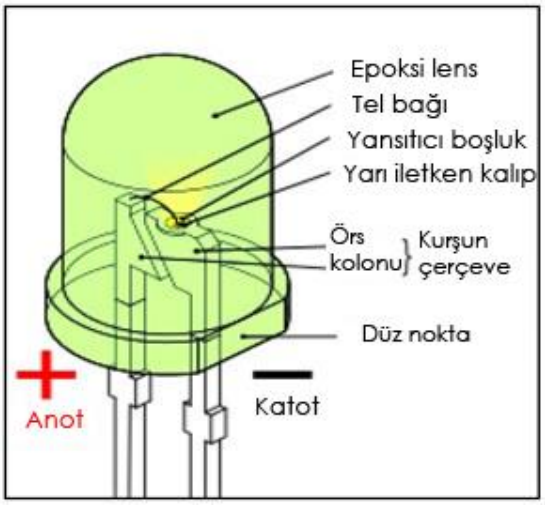
Günümüzde kullanılan LED'lerin verimliliği yaklaşık 100 lm/W'tır ve bu değerin 2025 yılı sonuna kadar 200 lm/W olması öngörülmektedir. Bu değer flüoresan ve akkor lambalara göre çok yüksektir. LED lambalar, akkor lambalara göre yaklaşık 40 kat kullanım ömrü sunmaktadır. Birçok ülke, akkor lambaların verimsiz aydınlatma sunması nedeniyle kullanımını yasaklamıştır. ABD, Avrupa Birliği, Rusya, Çin,

Japonya ve Brezilya gibi ülkeler 2012 yılı sonlarında 100 Watt'lık akkor lamba kullanımını yasaklamışlardır (R ve S, 2015).

Bir ışık kaynağının kablosuz iletişim teknolojilerinde kullanılmasının en önemli özelliği, çok kısa zaman dilimlerinde defalarca kez açılıp kapatılabilmesidir. LED'ler bu özellikleri sayesinde Li-Fi için en uygun ışık kaynaklarıdır. Akkor lambalar ile flüoresan lambalara nazaran daha iyi tasarım esnekliği, çevre dostu üretim, daha yüksek verim, gelişmiş spektrum performansı ve daha uzun ömürlü kullanım gibi avantajları bulunmaktadır (Sarkar ve diğ., 2015).

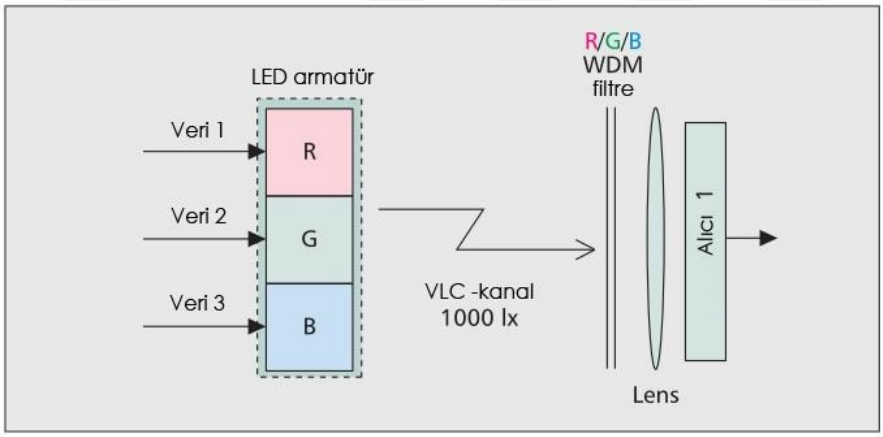
LED'ler, içerisinde bulunan yarı iletken diyottaki enerji seviyeleri değiştiğinde ışık yayarlar. Yayılan ışığın dalga boyu LED'i oluşturmak için kullanılan yarı iletken malzemenin türüne bağlıdır. LED'lerin katı hal tasarımı, 100.000 saatin üzerinde kullanım imkanının yanı sıra sık anahtarlama, titreşimler ve darbelere karşı dayanmalarını sağlamaktadır (Sarkar ve diğ., 2015).

Li-Fi teknolojisi için veri hızındaki değişimler LED boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Farklı büyüklükteki LED'ler ile farklı veri hızlarına ulaşılabilir. Normal büyüklükteki bir LED, ışık yoğunluğunu milyonlarca kez değiştirebilen mikro LED'lere dönüştürülebilir. Bir mikro LED ile 3,5 Gbps hızında veri iletimi gerçekleştirilebilirken, birden fazla mikro LED dizisi ile 10 Gbps'den daha yüksek hızlara erişmek mümkündür. Mikro LED'ler ışığın paralel yayılmasını sağlayarak Gbps seviyesindeki hızlarda iletim sağlayabilirler (Sarkar ve diğ., 2015).



Şekil 3.2. LED Yapısı (Sarkar ve diğ., 2015)

Genel anlamda aydınlatma için kullanılan fosforesan ve (ing: Red-Green-Blue) RGB olarak iki farklı LED türü bulunmaktadır. Fosforesan tür, mavi bir LED çipi ve sarı bir fosfor katmanından oluşmaktadır. Temel olarak, basit tasarımı nedeniyle uygun maliyetli kuruluma imkân vermekle birlikte fosforesan malzemenin yavaş tepki süresinden kaynaklanan dar bant genişliği sunmaktadır. RGB türü ise çoğunlukla kırmızı, mavi ve yeşil olmak üzere üç ayrı yongadan oluşmaktadır. RGB LED'ler, her biri 15 MHz bant genişliği sağlayan üç ayrı renk kanalına olanak sağlamaktadırlar. Üç yonganın paralel olarak kullanılması, dalga boyu bölmeli çoğullama (ing: Wavelenght Division Multiplexing) (WDM) ile gerçekleştirilebilir. Bunun sonucu olarak da toplam veri aktarım hızının artması avantaj olarak ortaya çıkmaktadır (Grobe ve diğ., 2013).



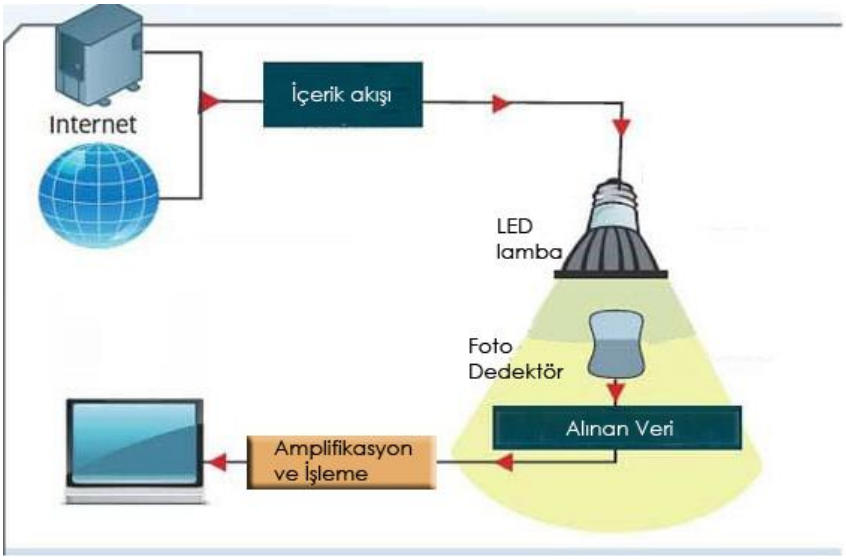
Şekil 3.3. WDM Prensibi (Grobe ve diğ., 2013)

3.4. Li-Fi Mimarisi ve Çalışma Prensibi

Li-Fi mimarisi çok sayıda LED'den, akıllı telefonlar, (ing: Personal Data Assistant) PDA'lar ve bilgisayarlar gibi birçok kablosuz cihazdan oluşabilmektedir. Bir Li-Fi projesi gerçekleştirirken dikkat edilmesi gereken temel faktörler şunlardır:

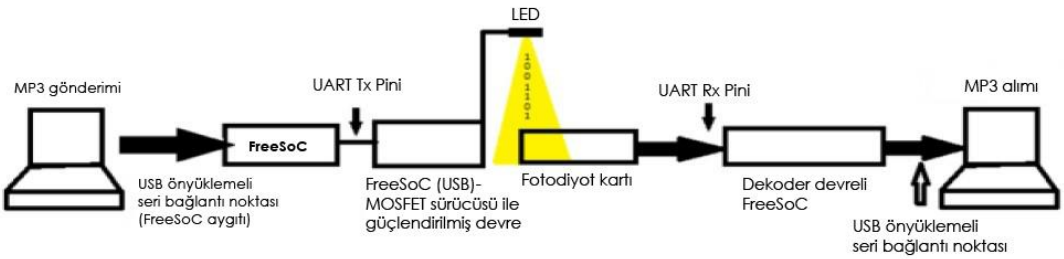
- LED
- Işık
- Görüş Hattı (ing: Line of Sight) (LoS).

Li-Fi'de verimli çalışabilmek için, şekilde görüldüğü üzere, içeriklerin sunucu ve İnternet ağı ile uygun entergrasyona sahip olması gerekmektedir (Kulkarni ve diğ., 2016).



Şekil 3.4. Li-Fi Yapısı (Ahlawat ve diğ., 2016)

Şekil 3.4'te klasik bir Li-Fi yapısı gösterilerek Li-Fi teknolojisinin çalışma düzeneği özetlenmiştir. Gönderici tarafında, bilgisayardan gelen dijital veri (1 ve 0 halinde) ve verinin ışık sinyallerine dönüştürülmesini sağlayan LED lamba bulunmaktadır. Işık sinyallerine dönüştürülen veriler LED vasıtasıyla iletilmektedir. LED, veri içerisindeki 1 ve 0'lara bağlı olarak elektrik voltajındaki değişimler sayesinde yanıp sönme işlemi gerçekleştirmektedir. Öyle ki, yanıp sönme işlemi insan gözünün göremeyeceği kadar hızlıdır.



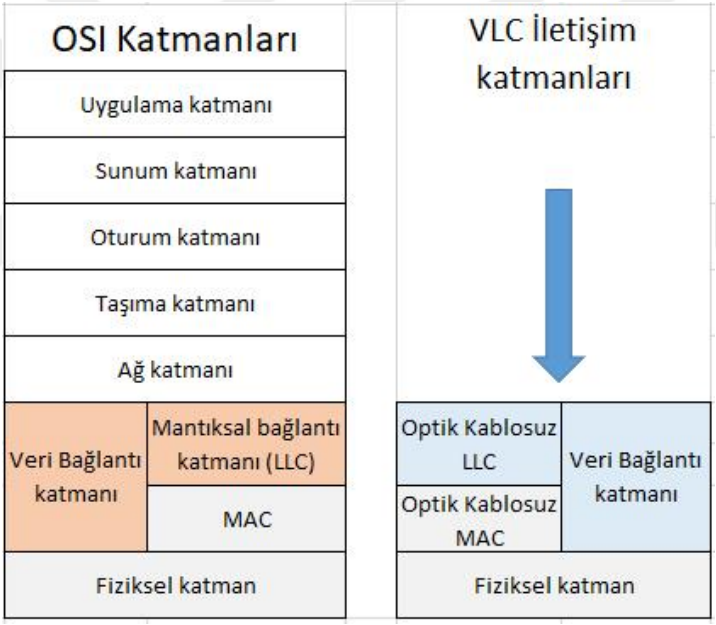
Şekil 3.5. Li-Fi Sisteminin Blok Diyagramı (Panda ve diğ., 2015)

Şekil 3.5'te Li-Fi sisteminin genel çalışma prensibinin özetlendiği blok diyagramı yer almaktadır. Görüldüğü üzere alıcı tarafta fotosensör ya da fotodetektör, LED'in yaydığı ışıktaki değişimleri (0 ve 1) yakalayarak ışık sinyallerini yeniden elektrik sinyallerine dönüştürmektedir. Alıcı cihaz bu sinyalleri işledikten sonra, veriyi orijinal haline geri

dönüştürmekte ve sonrasında görüntüleyici aygıta (Tablet, PC, akıllı telefon vs.) yansıtmaktadır. (Alfattani, 2021)

3.4.1. Li-Fi İçin OSI Referans Modeli

Ağlar için birincil mimari model, Açık Sistemler Bağlantısı (OSI) referans modelidir. Verilerin bir bilgisayardaki bir uygulamadan diğerine nasıl ve hangi kurallarla iletileceğini belirlemektedir. Li-Fi'deki OSI modelindeki en önemli katmanlar Fiziksel Katman (PHY) ve Veri Bağlantı Katmanı (DLL)'dır. Bu katmanlar ışık sinyalinin gönderilmesi ve alınması için önemlidir. Hem alıcı hem de verici için Medya Erişim Kontrolü (MAC) ve fiziksel katman aynıdır. Li-Fi için OSI katmanları aşağıda açıklanmıştır (Sahrawat, 2015):



Şekil 3.6. Li-Fi OSI Referans Modeli (Sahrawat, 2015)

3.4.1.1. Fiziksel Katman

Kullanılan donanımın elektriksel ve fiziksel özelliklerini tanımlamaktadır. Li-Fi'de de bu katman OSI modelinde olduğu gibi aynı şekilde çalışmaktadır. Fiziksel katman üzerindeki iletişim, paket adı verilen veri birimleriyle sağlanmaktadır. Fiziksel katman veri hızlarına göre aşağıdaki şekilde kategorize edilmiştir:

PHY1: Düşük veri hızına sahip katmandır (12-267 Kbps). Daha çok dış mekân uygulamaları için kullanılmaktadır.
PHY2: Orta veri hızına sahip katmandır (1,25-96 Mbps). İç mekân uygulamaları için kullanılmaktadır.
PHY3: Yüksek veri hızına sahip katmandır (12-96 Mbps). Işık kaynakları ve dedektörler için kullanılmaktadır (Sahrawat, 2015).

3.4.1.2. Veri Bağlantı Katmanı (DLL)

İletişim kanalı üzerinden verileri bitler halinde göndermek ve almak için fiziksel katman hizmetlerini kullanmaktadır. IEEE 802.15.7 standardında kullanılan mimariye göre bu katman iki alt katmana ayrılmıştır. Bunlar:

- Optik Kablosuz Mantık Bağlantısı Kontrolü (OWLLC): Bir ağa bağlı cihazlar arasındaki mantıksal bağlantıları onaylar ve kontrol eder. Veri bağlantı katmanı (DLL) ile diğer teknolojilerin birbirine bağlanmasına izin vermektedir ve ağ katmanına servis sağlamaktadır.
- Optik Kablosuz Ortam Erişim Kontrolü (OWMAC): İletişim ortamının tek yönlü, çift yönlü ve yarı çift yönlü olmasını sağlamaktadır. (ing: Optical Wireless Media Access Control) OWMAC ile terminaller ve bağlı cihazlar kontrol edilebilmektedir (Sahrawat, 2015).

3.5. Modülasyon Teknikleri

Hem ışık hem de radyo frekans dalgaları elektromanyetik dalgalar olduğundan, radyo frekans iletişimi için kullanılan modülasyon teknikleri Li-Fi sistemleri için de kullanılabilmektedir. Bunun yanı sıra Li-Fi, bazı benzersiz modülasyon tekniklerini de kullanmaktadır (Alfattani, 2021).

3.5.1. Tek Taşıyıcılı Modülasyon (SCM)

SCM (ing: Single-Carrier Modulation), kablosuz kızılötesi sistemlerde incelenen ve karşılaştırılan Açma-Kapama Anahtarlama (ing: On-Off Keying) (OOK) ve Darbe Pozisyon Modülasyonunu (ing: Pulse Position Modulation) (PPM) içermektedir. PPM daha fazla verimliliğe sahip olmakla birlikte daha az spektral etkinliğe sahiptir.

OOK, Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ing: Amplitude Shift Keying) (ASK) modülasyonunun en basit halidir. Bu modülasyonda belirli bir süre içerisinde maksimum genliğin varlığı ikili sistemde 1'leri, genliğin olmadığı durumda ise ikili sistemde 0'ları temsil etmektedir (Sklar, 1987).

2011 yılında yapılan bir çalışmada (Mesleh ve diğ., 2011) Optik Uzaysal Modülasyon (Optical Spatial Modulation) (OSM) adı verilen yeni bir modülasyon tekniği önerilmiş ve iç mekan kablosuz iletişim için hem güç hem de bant genişliği açısından verimli olduğu kanıtlanmıştır (Alfattani, 2021).

3.5.2. Çoklu Taşıyıcılı Modülasyon (MCM)

Çoklu taşıyıcılı modülasyon tekniği, dijital verilerin farklı taşıyıcı frekansları ile iletilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu tekniğin en önemli avantajı, girişim, solma ve zayıflama gibi şiddetli iletim ortamı koşullarıyla baş edebilmesidir. Ayrıca, semboller arası girişime (ing: Intersymbol Interference) (ISI) karşı da savunmasız olmakla birlikte darbe gürültülerinden kaynaklanan parazitlere karşı da SCM'ye göre daha az duyarlıdır. Bunlara ek olarak (ing: Multi-Carrier Modulation) MCM, yüksek frekanslı iletişimlerde zayıflama ile baş edebilme konusunda SCM'den daha iyidir. MCM, SCM'ye göre bant genişliği açısından daha verimli olduğundan dolayı yüksek hızlı optik kablosuz iletişimler için tercih sebebi olmaktadır.

MCM'de yaygın olarak kullanılan modülasyon tekniği, Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (ing: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) (OFDM) tekniğidir. Bu teknik sayesinde paralel veri akışı eşzamanlı olarak iletilebilmektedir.

Geleneksel OFDM tekniklerinde bazı değişikliklerin Li-Fi sistemlerinde kullanılması gerekmektedir. Bu modülasyon teknikleri arasında DC Eğilimli Optik OFDM (DCO-OFDM), Asimetrik Olarak Kırpılmış Optik OFDM (ACO-OFDM) ve Asimetrik Olarak Kırpılmış DC Eğilimli Optik OFDM (ADO-OFDM) yer almaktadır. Bu üç teknik arasındaki detaylı karşılaştırmaya Dissanayake ve diğ., 2013'de yer verilmiştir (Alfattani, 2021).

3.5.3. Diğer Modülasyonlar

Li-Fi vericileri, radyo vericilerindeki gibi iletişim işlevinin yanı sıra aydıtlama görevi de görmektedir. Çok renkli LED'lerle donatılmış armatürler, diğer modülasyon teknikleri için uygulama sunmaktadırlar.

Renk Kaydırmalı Anahtarlama (ing: Color Shift Keying) (CSK) modülasyonu, verileri ışık renginin çeşitlenmesi (Kırmızı, Mavi, Yeşil) sayesinde iletme yöntemine dayanmaktadır. Diğer modülasyonlara göre CSK, iki avantaj sağlamaktadır. İlki, ışığın dalgalanmaması ve ışık titreşimlerinin sağlık sorunlarına sebep olmaması, ikincisi ise aydınlatma yoğunluğu için LED'deki akımın sabit kalmasıdır.

Metamerik Modülasyon (ing: Metameric Modulation) (MM), CSK modülasyon tekniği baz alınarak geliştirilmiş bir modülasyon tekniğidir. Daha yüksek enerji verimliliğinin yanı sıra renk kalitesini kontrol etme yeteneğine de sahiptir (Alfattani, 2021).

3.6. Li-Fi'nin Avantajları ve Dezavantajları

Li-Fi'nin birçok avantajı bulunmaktadır. Herhangi bir LED lamba ile ağ bağlantısı kurmak mümkündür. Bu özelliği sayesinde, yoğun RF sinyallerinin olduğu veya RF sinyallerinin kullanımının sakıncalı olduğu alanlarda kullanılabilir. Daha az enerji tüketimi sağlaması ve uzun ömürlü olmalarından dolayı LED'ler, dünya genelinde CO_2 emilimini azaltma konusunda bir çözüm olarak görülmektedir (Hossain ve diğ., 2014).

3.6.1. Avantajları

Li-Fi'nin başta gelen avantajlarından birkaçı aşağıda verilmektedir:

- Kapasite: Görünür ışık spektrumunun radyo frekans spektrumundan 10.000 kat daha genişliğe sahip olması bant genişliğinin de bu oranda fazla olduğu anlamına gelmektedir.
- Verimlilik: Li-Fi'de verilerin paralel olarak iletilebilmesi verim konusunda avantaj sunmaktadır.
- Kullanılabilirlik: Işığın, her yerde bulunabilmesi kullanım bakımından kolaylık sağlamaktadır.

- Bant Genişliği: Kapasite özelliğinin getirdiği durumdan dolayı daha fazla bant genişliği imkânı vermektedir.
- Hız: Bant genişliği avantajından dolayı Gigabit seviyelerine varan hızlara ulaşılabilmektedir.
- Maliyet: LED kullanımı maliyeti düşürmektedir (Khandelwal ve Kumar, 2016).
- Güvenlik: Işığın engellerden geçememesi, ağımıza dışardan başkalarının bağlanmasına imkân vermemekte ve dolayısıyla sızma girişimleri gibi durumlara olanak sağlamamaktadır.

Aslında güvenlik Li-Fi'nin en büyük avantajlarındadır. Dağıtık Hizmet Engelleme (DDoS) ya da Ortadaki Adam (MITM) saldırılarının yanı sıra tüm siber saldırıların sayısı 2018 ve 2019 yılları arasında %776 artış gösterirken, Li-Fi kullanan şirketlerin sayısının artışı güvenli bir bağlantı için Li-Fi'yi çözüm olarak görmektedirler. Buna ek olarak her bir Li-Fi bağlantı noktasının bağlantı kalitesi ve güvenilirliği büyük beğeni toplamaktadır. (Bechadergue ve Azoulay, 2020)

Bunlara ilave olarak görünür ışık spektrumu kullanımının ücretsiz olması, Li-Fi'nin herhangi bir lisanslamaya gereksinim duymaması anlamına gelmektedir. Bu da maliyet konusunda ekstra bir avantaj sağlamaktadır. Li-Fi'nin diğer avantajlarına Tablo 3.2'de yer verilmiştir.

Tablo 3.2. Li-Fi'nin Avantajları (Sarkar ve diğ., 2015)

Işık	LED'ler akkor lambalardan daha fazla ışık üretmektedirler
Açma-Kapama Zamanı	LED'ler çok hızlı açıp kapanabilirler
Kirlilik	Florasan lambalardaki gibi LED'ler civa içermez
Sağlık	Radyo dalgalarının aksine ışığın insan üzerinde herhangi bir zararı bulunmamaktadır.
Spektrum Giderici	Li-Fi, radyo frekans spektrumundaki bant genişliği sorunlarına çözüm üretebilir.

3.6.2. Dezavantajları

Avantajlarının yanı sıra Li-Fi'nin birtakım dezavantajları da mevcuttur. Bunlardan temel birkaçı aşağıda listelenmiştir:

- Işığın nesnelerin ya da engellerin içinden geçemiyor olması Li-Fi'nin önündeki en büyük dezavantajdır. Bu sebeple, ışığın herhangi bir nedenle engellenmesi sinyalin kesilmesine sebep olacak ve haliyle veri kaybının oluşmasına neden olacaktır. Böyle durumların önüne geçmek amacıyla radyo dalgaları ile beraber kullanımı düşünülebilir.
- Güneş ışığı ve harici kaynaklardan yayılan ışık ya da ortamda bulunan parlak materyaller parazite sebep olmaktadır. Bu da verinin hatalı veya eksik aktarılmasına sebebiyet vermektedir.
- Halihazırda radyo frekansı kullanan Wi-Fi benzeri teknolojilere gereksinimimiz vardır. Çünkü engellerin ve duvarların olduğu ya da uzak bir mesafede hareket halinde bulunan bir nesneye veri aktarımı sağlayabilecek bir LED henüz mevcut değildir.
- Li-Fi'nin benimsenip kullanımının yaygınlaştırılması, bakım ücretleri, elektrik vb. gibi maliyetleri minimuma indirecektir (Tanwar ve Gupta, 2014).

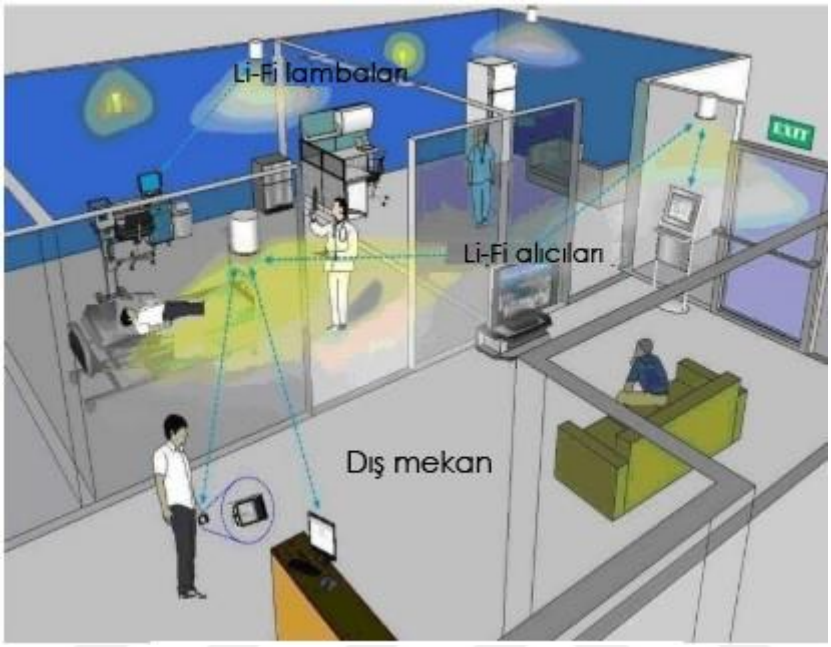
3.7. Uygulama Alanları

Radyo frekansının birçok alanda kullanımının tehlikeli ve sakıncalı olmasından dolayı Li-Fi'nin Wi-Fi'ye kıyasla daha çok uygulama alanı bulması olasıdır. Aşağıda bazı uygulama alanları listelenmiştir:

3.7.1. Hastaneler

Hastaların elektromanyetik alanlardan olumsuz yönde etkilendiği 1990'ların ortalarına doğru ortaya çıkmıştır. Kablosuz cihazların gelişmesinin yanı sıra radyo frekans spektrumu kullanımı da düzenli olarak artmaktadır. Bu durum üreme sistemi bozuklukları, kanser ve nörolojik hastalıklar gibi hastalıklara neden olmaktadır (Ankit Navalakha, 2014). Hastaneler gibi sağlık kuruluşlarında kullanılan Röntgen, MR ve Tomografi gibi radyo sinyali yayan cihazların bulunduğu mekanlarda mobil ağ ve Wi-Fi kullanımı sınırlandırılmıştır.

Bu nedenlerden dolayı, hastane ve sağlık kuruluşlarında radyo sinyallerine alternatif olarak Li-Fi özellikli cihazların kullanılması hem insan sağlığı hem de iletişimin devamlılığı konusunda önemlidir.



Şekil 3.7. Hastanelerde Li-Fi Kullanım Senaryosu (Ankit Navalakha, 2014)

3.7.2. Uçaklar

Uçaklarda, hassas cihazlarla etkileşime girme korkusu nedeniyle Wi-Fi veya cep telefonu kullanılması yasaklanmıştır. Birçok havayolu şirketi birkaç yıl önce çok yüksek ücretlerle yolcularına Wi-Fi ile internete erişim imkânı sunmuştur. Uçaklardaki yolcu okuma lambalarına Li-Fi düzenekleri yerleştirilerek, yüksek hızlarla ve olası bir elektomanyetik girişime neden olmadan, İnternete ulaşım olanağı sunmak için kullanılabilir (Alfattani, 2021).



Şekil 3.8. Li-Fi'nin Uçaklarda Kullanımı (Edwards, 2018)

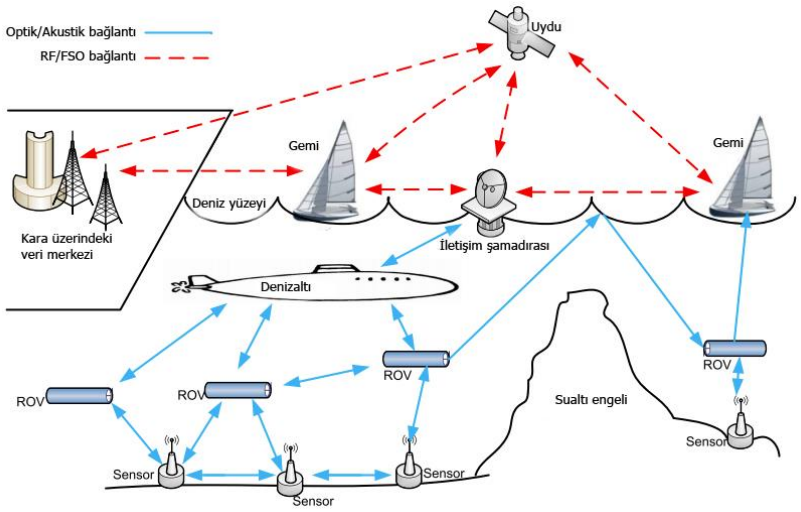
3.7.3. Sualtı Araştırmaları

Sualtı Kablosuz İletişim (ing: Underwater Wireless Communication) (UWC) teknolojisi, okyanus keşif sistemlerinin gerçekleştirilmesini sağlamasından dolayı son yıllarda büyük ilgi görmektedir. UWC, radyo frekansları, akustik dalgalar ve optik dalgalar ile su ortamında haberleşmeyi sağlayan iletişim sistemidir. Radyo dalgalarının ve akustik dalga yöntemlerinin sınırlı bant genişliği sunması ve yüksek hızlı veri iletimi ihtiyacı giderek artmasından dolayı Sualtı Optik Kablosuz İletişim (ing: Underwater Optical Wireless Communication) (UOWC) bir alternatif haline gelmiştir (Zeng ve diğ., 2018).

2010'ların başlarında, sadece sınırlı sayıda UOWC sistemi ticari hale getirilmiştir. Bu sistemler arasında 200 metre mesafeye 20 Mbps hızında veri iletimi yapabilen BlueComm UOWC sistemi ve 40 metre mesafeye 10 Mbps hızında iletim sağlayan Ambalux UOWC sistemi bulunmaktadır. Yakın tarihte yapılan bir çalışmada tek foton çığ diyodu kullanarak saf deniz suyunda 500 metrelik mesafeye LED tabanlı görünür ışık sistemi ile veri iletimi gerçekleştirilmiştir (Zeng ve diğ., 2018).

Sualtı keşfine yönelik artan taleplerden dolayı, araştırmacılar verimli ve yüksek bant genişliğine sahip kablosuz sensör ağları (ing: Underwater Wireless Sensor Network) (UWSN) kavramını ortaya koymuşlardır. UWSN'ler UOWC'nin gelişmesini büyük ölçüde kolaylaştırmıştır. UWSN'ler, deniz tabanına yerleştirilen sensörler, röle

şamandıraları, otonom sualtı araçları (ing: Autonomous Underwater Vehicle) (AUV) ve uzaktan kumandalı sualtı araçları (ing: Remotely Operated Vehicle) (ROV) gibi birçok düğümden oluşmaktadır. Bu düğümler, sualtında izleme, algılama, işleme ve iletişim görevlerini gerçekleştirmektedirler (Zeng ve diğ., 2018).



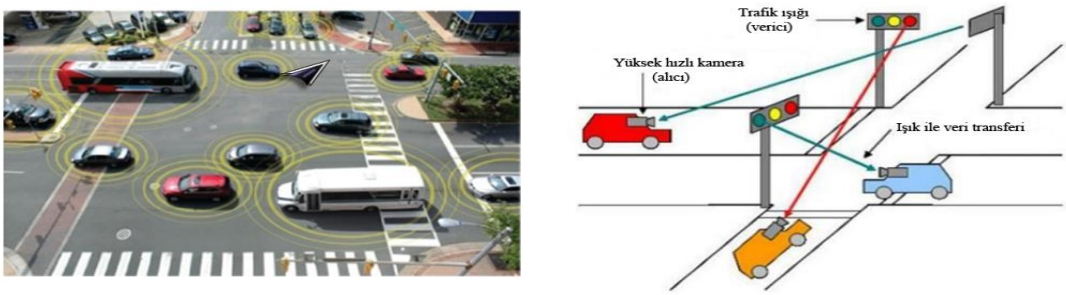
Şekil 3.9. Sualtı Kullanımında Li-Fi (Zeng ve diğ., 2018)

3.7.4. Tehlikeli Madde Üretim Tesisleri/Enerji Santralleri

Nükleer santraller, tehlikeli madde üretim tesisleri, enerji ve petro kimya tesisleri gibi hassas tesislerde radyo sinyallerinin kullanımı yasaklanmıştır. Ancak ışığın radyo sinyallerine göre daha güvenli olması, Li-Fi'nin, buna benzer tesislerde daha güvenli iletişim ve veri aktarımı sağlamasına ve bu tesislerin takibinin veya arıza tespitlerinin uzaktan da yapılabilmesine imkan sunmaktadır (Alfattani, 2021; Khandal ve Jain, 2014).

3.7.5. Trafik Yönetimi

Li-Fi düzenekleri ile donatılmış araba farları ve trafik lambaları sayesinde eş zamanlı olarak trafik kontrolü sağlanabilir ve araçların birbirleriyle iletişim halinde olmasını sağlayarak olası kaza risklerini minimuma indirilebilir (St ve St, 2017).



(a) (b)

Şekil 3.10. Li-Fi ile Trafik Yönetimi (a)-(Alfattani, 2021) (b)-(Bhut ve diğ., 2014)

3.7.6. Li-Fi Noktası (Hotspot)

Aydınlatma işlevine ek olarak, sokak lambaları İnternete erişim imkanı sağlamak için Li-Fi düzeneği ile donatılabilir (Bhut ve diğ., 2014). Ayrıca, sokak lambaları kameralarla da donatılabilir. Bu kameralar sayesinde yollar ve sokaklar izlenebilir ve olası bir tıkanıklık veya acil durum anında, hızlı müdahele etmek için bilgileri Li-Fi sistemi yardımıyla, hızlıca trafik yönetim merkezine iletebilir (Alfattani, 2021).

3.7.7. Eğitim

Li-Fi teknolojisi yüksek bant genişliği imkânı sunmasından dolayı İnternete erişim hızını da artırabilecektir. Bu sebeple eğitim kuruluşları Li-Fi'yi, çevrimiçi öğrenme, dijital eğitim ve video konferans ile çok sayıda öğrenciye, akademisyene ve öğretmene ulaşabilmek amacıyla tercih edebilirler (Kuppusamy ve diğ., 2016).

3.7.8. Nesnelerin İnterneti (IoT)

IoT cihazları, daha gelişmiş bir çalışma sayesinde Li-Fi ile uyumlu ve senkronize hale getirilebilir. IoT, birden çok erişim noktasına gereksinim duymaktadır. Li-Fi, iletişim için LED kullandığından dolayı, (ing: Internet of Things) IoT bağlantısının gerektirdiği biçimde birden fazla erişim noktasını kolaylıkla sağlayabilir. Li-Fi, evlerdeki elektronik aygıtlara ek olarak; tren istasyonları, otobüs durakları, turist bilgi kioskları ile sokak lambaları bütünleştirilerek IoT'yi mekândan bağımsız hale getirebilir. Araştırmacılar, IoT ve büyük veri kullanımının artması için uygulanabilir bir çözüm olarak Li-Fi'ye odaklanmakta ve daha akıllı, daha hızlı ve daha güvenilir bir veri aktarımı geliştirmek için çalışmalarını sürdürmektedirler (Pottoo ve diğ., 2018), (URL-14).

Yukarıda sıralanan kullanım alanlarına ek olarak Li-Fi, iç mekân konumlardırma, mağazalar, müzeler, giyilebilir teknolojiler, afet yönetimi gibi birçok alanda kullanılabilir.

Sonuç olarak tüm bu kullanım alanları göz önüne alındığında Li-Fi için ilk kullanım alanları devlet daireleri, savunma sanayii ve stratejik endüstri kuruluşları olacaktır. Li-Fi'nin anılan yerlere 2023 yılı itibariyle giriş yapacağı, ev ve ofis ortamları için ise 2025 yılı itibariyle kullanılmaya başlanacağı düşünülmektedir. (Bechadergue ve Azoulay, 2020)

3.8. Li-Fi ve Wi-Fi Karşılaştırması

Li-Fi önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi yüksek hızlı kablosuz iletişim için görünür ışık iletişimini (VLC) kullanan teknolojiyi tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu ismini, Wi-Fi'deki gibi, radyo yerine ışık kullanmasından dolayı almıştır. Wi-Fi daha çok evlerde ve iş yerlerinde, geniş bir kapsama alanı sunduğundan dolayı tercih edilmektedir. Li-Fi ise yüksek hızlarda veri aktarmak ve radyo sinyali girişimi sorunlarının üstesinden gelmek için idealdir. Bu açıdan iki teknolojinin birbirinin tamamlayıcısı olduğundan söz edilebilir (Khandal ve Jain, 2014).

Tablo 3.3. Kablosuz Teknolojilerin Karşılaştırması (Khandal ve Jain, 2014)

Teknoloji	**Hız**	**Veri Yoğunluğu**
Wireless (Bugünkü)		
Wi-Fi (802.11n)	150 Mbps	*
Bluetooth	3 Mbps	*
IrDA	4 Mbps	***
Wireless (Gelecekte)		
WiGig	2 Gbps	**
Giga-IR	1 Gbps	***
Li-Fi	>10 Gbps	****

Ayrıca günümüzde cihazlar arasında veri aktarımı için kullanılmakta olan Bluetooth ve (ing: Infrared Data Association) IrDa da Tablo 3.3'te yer almaktadır. Şu an için sadece Wi-Fi yüksek veri hızları sunmaktadır. Uygulamada IEEE 802.11n standardı 150 Mbps'ye kadar hız sunmaktadır, fakat pratikte bundan daha azını, yaklaşık 100 Mbps kadar almaktayız (Khandal ve Jain, 2014).

Li-Fi, enerji verimliliği, güvenlik ve kapasiteye yönelik faydaları da beraberinde getirmektedir (Hadi, 2016). Tablo 3.4'te Wi-Fi ve Li-Fi'nin kapsamlı karşılaştırması bulunmaktadır.

Tablo 3.4. Li-Fi ve Wi-Fi Karşılaştırması (Hadi, 2016)

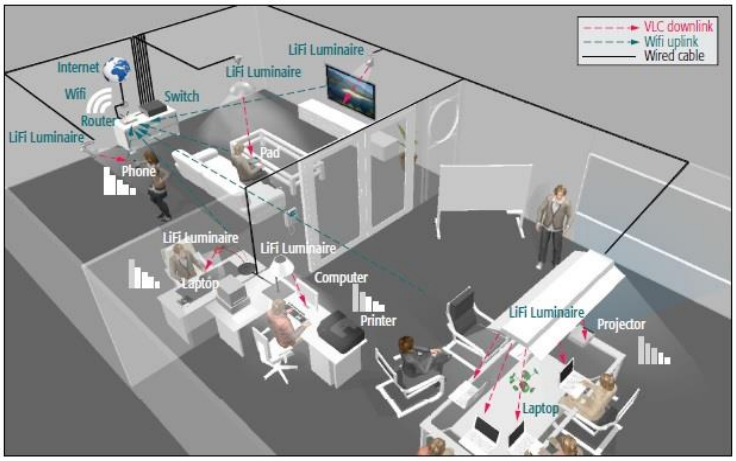
Özellik	Li-Fi	Wi-Fi
Kapasite	Radyo frekans spekturumundan 10.000 kat daha geniş spektrum aralığı	Görünür ışık spekturumuna göre radyo frekans spekturumu daha küçük bir bölümü kullanmaktadır.
Verimlilik	LED'lerin daha az enerji tüketmesinden dolayı daha verimlidir.	Baz istasyonlarının fazla enerji tüketmesinden dolayı bu istasyonları soğutmak için de ayrıca enerji tüketilmektedir. Bu yüzden verimlilik düşmektedir.
Kullanılabilirlik	LED ampüller aracılığıyla iletim sağladığından her yerde kullanımı mümkündür.	Radyo dalgalarının zararlı olmasından dolayı kullanımı da sınırlıdır. Ayrıca her yerde bulma imkânı da düşüktür.
Güvenlik	Işığın engellerden geçememesi güvenlik açısından avantajdır.	Radyo dalgalarının engellerden geçebilmesinden dolayı dışardan bağlanabilme imkânı sunmaktadır. Dolayısıyla daha az güvenliklidir.

Tablo 3.4. (Devam) Li-Fi ve Wi-Fi Karşılaştırması (Hadi, 2016)

Özellik	Li-Fi	Wi-Fi
Hız	10 Gbps ve üzeri	Yaklaşık 150 Mbps
Mesafe	10 metre	20-100 metre arası
IEEE Standardı	802.15.7	802.11n
Spektrum Aralığı	384 THz - 789 THz	3 Hz – 3000 GHz
İletişim	VLC'ye dayalı	RF'e dayalı
Altyapı Maliyeti	Az	Fazla
Girişim	Radyo sinyalleri herhangi bir parazit sorunu oluşturmaz.	Diğer radyo dalgaları girişimde bulunarak parazit oluşturabilir.
Güç Tüketimi	Az	Fazla

3.8.1. Li-Fi ve Wi-Fi Kombinasyonu

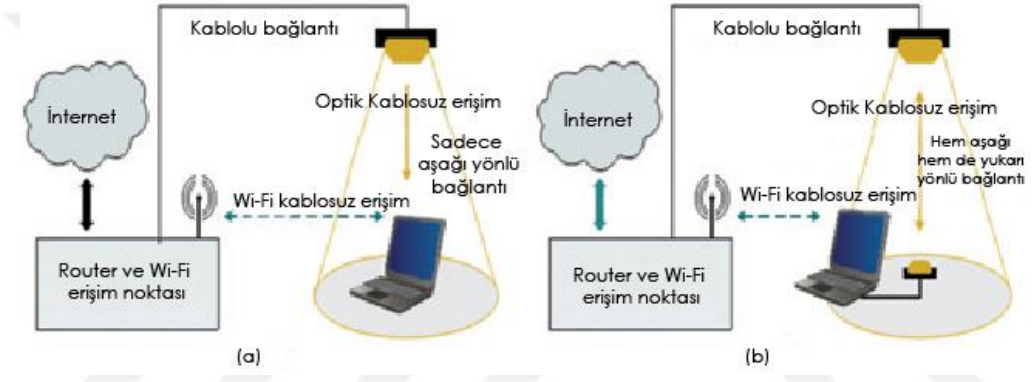
Li-Fi ve Wi-Fi teknolojilerinin kombine edilmiş hali birçok yeni özelliği beraberinde getirmektedir. Bu özellikler arasında yüksek veri hızı, daha geniş kapsama alanı, iyileştirilmiş iç mekân konumlandırma ve geliştirilmiş güvenlik yer almaktadır. Yüksek veri hızı, güvenlik Li-Fi teknolojisinden gelirken, kapsama özelliği Wi-Fi teknolojisinden gelmektedir. Bu iki teknolojinin birleştirilmesine yönelik bazı senaryolar (Ayyash ve diğ., 2016; Shao, Khreishah, Ayyash, ve diğ., 2015; Shao, Khreishah, Rahaim, ve diğ., 2015)'da verilmiştir (Alfattani, 2021).



Şekil 3.11. Li-Fi ve Wi-Fi'nin Birarada Kullanım Senaryosu (Ayyash ve diğ., 2016)

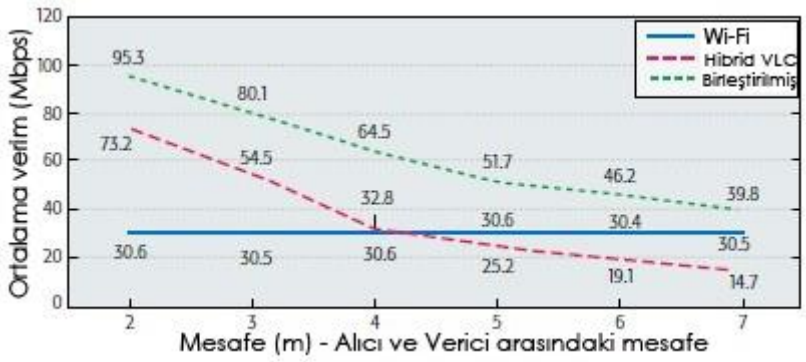
Şekil 3.11’de sabit kullanıcılar Li-Fi teknolojisi kullanırken, hareketli kullanıcılar Wi-Fi teknolojisini kullanmaktadırlar. Bu yaklaşım RF kullanan ağlardaki tıkanıklığı azaltacak ve gelecekte potansiyel talep artışına karşılık Wi-Fi sistem kapasitesini rahatlatacaktır (Alfattani, 2021).

Wi-Fi ve Li-Fi teknolojilerini birleştirmek için iki yaklaşım mevcuttur. Birincisi hibrit teknik, ikincisi ise birleştirilmiş tekniktir. Hibrit teknikte, uplink (sinyal gönderme) için Wi-Fi, downlink (sinyal alımı) için ise Li-Fi kullanılmaktadır. Birleştirilmiş teknikte ise Wi-Fi ve Li-Fi paralel olarak kullanılmaktadır. Bu iki tekniğin farkı Şekil 3.12’de gösterilmiştir (Alfattani, 2021).



Şekil 3.12. a) Hibrit Teknik b) Birleştirilmiş Teknik (Alfattani, 2021)

Bu iki tekniğin performans karşılaştırması Şekil 3.13’te verilmiştir. Karşılaştırma erişim noktası ile kullanıcı arasındaki farklı mesafelerde ölçülen ortalama veri hızları ile yapılmıştır (Alfattani, 2021).



Şekil 3.13. Hibrit Teknik vs. Birleştirilmiş Teknik (Ayyash ve diğ., 2016)

Li-Fi ve Wi-Fi kombinasyonunun, yalnızca Wi-Fi kullanmaya göre daha yüksek veri hızı sunduğu Şekil 3.13’te açıkça gösterilmiştir. Bu sonuçlar birleştirilmiş tekniğin

hibrit teknikten daha iyi olduğunu göstermektedir. Erişim noktası ile kullanıcı arasındaki mesafe arttıkça birleştirilmiş sistemin veri hızı büyük ölçüde düşmüştür. Bu hız düşüşü hibrit teknikte birleştirilmiş tekniğe göre daha fazla olarak görülmektedir (Alfattani, 2021).

3.9. Li-Fi'nin Bugünü ve Yarını

Işığın her yerde bulunmasının ve kullanımının serbest olmasından dolayı Li-Fi teknolojisinin kullanım olanakları büyük ölçüde artmaktadır. Bu teknoloji uygulamaya girdiğinde her bir LED ampul kablosuz veri iletmek için kullanılabilecektir. Li-Fi teknolojisinin kullanılması daha temiz, daha yeşil, daha güvenli bir çevreye ve geleceğe imkan verecektir (Saini ve Sharma, 2016).

Li-Fi tanıtıldığı 2011 yılından bu yana daha kullanılabilir ve daha verimli olması için sürekli geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Li-Fi'yi literatüre kazandıran isim olan Prof. Harald Haas, kendi çalışma grubu ve Oxford, Cambridge, Strathclyde ve St. Andrews Üniversitelerindeki araştırmacılarla birlikte Mühendislik ve Fiziksel Bilimler Araştırma Konseyi tarafından finanse edilen dört yıl süreli 5,8 milyon sterlinlik bir projede yer almaktadırlar. Birkaç metreden fazla uzaklığa yüksek bant genişliği sunabilmek için birden fazla renk kullanan ultra paralel VLC üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Haas'a göre, LED'ler önümüzdeki 25 yıl içinde ışık kaynaklarından daha fazlasına dönüşerek modern cep telefonlarının işlem gücüne sahip olacaklardır (Sarkar ve diğ., 2015).

Günümüzde VLC teknolojisi geliştiricisi olarak VLCC, OPTICWISE, Li-Fi Konsorsiyumu başta olmak üzere, Intel, Siemens, CASIO, Philips, Fraunhofer, Samsung ve ByteLight gibi birçok uluslararası şirket bulunmaktadır (Sarkar ve diğ., 2015). Ayrıca Microsoft, NASA ve ESA gibi büyük kuruluşlar da Li-Fi ile çalışan altyapılar üzerinde çalışmaya ve deneyler yapmaya başladılar (Grobe ve diğ., 2013; St ve St, 2017). Ayrıca TIME dergisi Li-Fi teknolojisini 2011 yılının en iyi 50 buluşundan biri olarak tanıtmıştır (Sarkar ve diğ., 2015).

Halen Edinburgh Üniversitesindeki araştırmacılar;

- Optik Çok Kullanıcılı MIMO
- Hücresel Li-Fi Ağlarında Girişim Yönetimi
- Nesnelerin İnterneti
- Li-Fi Mekânsal Modülasyon
- Li-Fi için Yeni Dijital Modülasyon Teknikleri

gibi birçok sorunu çözmek için Li-Fi üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar. (Sarkar ve diğ., 2015)

Yakın zamanda Oxford Üniversitesindeki araştırmacılar çift yönlü veri aktarımında 224 Gbps hıza ulaşmışlardır. Bu hız her biri 1,5 GB boyutunda 18 adet filmin bir saniyede indirilebilmesine imkân vermektedir. Bu araştırmada yüksek veri aktarım oranları ve bant genişliği sunabilen LED'ler kullanılmıştır. Bu hızlar Wi-Fi ile sunulan hızların çok ötesindedir (Sarkar ve diğ., 2015).

Li-Fi teknolojisinin uygulanma projesine örnek olarak; bir Fransız firması, Paris metrosunda aydınlatma üzerinden İnternet hizmeti sağlama ihalesini kazanmıştır. Bu proje günlük iki milyondan fazla yolcunun ışıkları İnternete bağlanmak için kullanmasına imkân vereceği ve bu teknolojinin kullanılacağı duraklardan biri olan La Defense istasyonunun Li-Fi altyapısı ile donatıldığı belirtilmektedir. Versailles Üniversitesinin bir yan kuruluşu olan Paris merkezli Oledcomm, Paris'teki 66 istasyona Li-Fi kurulumu gerçekleştirebilmek için 250.000`den fazla LED armatürü de içeren tedarik ihalesini kazanmıştır. (St ve St, 2017).

Şu anda Li-Fi teknolojisine ait çok az ürün ve prototip piyasaya sürülmektedir. Ancak avantajları göz önüne alındığında Li-Fi'nin yakın gelecekte daha yaygın ve kullanışlı olacağı tahmin edilmektedir (St ve St, 2017). Li-Fi teknolojisine ait güncel ürünlere https://purelifi.com/lifi-products-2/ adresinden ulaşılabilir. PureLiFi, Prof. Harold Haas tarafından kurulan bir şirkettir.

4. UYGULAMA

Bu tez çalışmasında, fiziken birbirine bağlı olmayan iki bilgisayar arasında, tasarlanan Li-Fi devreleri aracılığıyla kablosuz veri aktarımı sağlanmaya çalışılmıştır. Yapılan devrelerde farklı baud rate hızları ile metin ve dosya aktarımı sağlanmış ve aktarım süreleri arasında kıyaslama yapılmıştır. Dosya aktarımında üçüncü parti bir yazılım kullanılmış (TeraTerm) ve bu yazılımdaki XMODEM ve ZMODEM dosya aktarım protokolleri ile dosya aktarımı sağlanmıştır. Metin aktarımında ise yazılımın kendi arayüzü kullanılmıştır.

XMODEM, iki farklı bilgisayar arasında dosya aktarımı imkânı sunan bir protokoldür. Bu protokol verileri alıcıya gönderirken paketlere böler. Alıcı taraf bir paketin doğru alınıp alınmadığı bilgisini vericiye bildirir. Eğer paket aktarımında hata oluşur ise o paketi tekrar talep eder. Verici aynı paketi tekrar gönderir. Eğer paket bozuk ise aktarım kesilir. Tablo 4.1'de aktarım sırasında kullanılan çeşitli semboller ve açıklamaları gösterilmiştir (Chakraborty, 2020).

Tablo 4.1. XMODEM Sembolleri (Chakraborty, 2020)

Sembol	Açıklama
SOH	Start of Header (Başlık Başlangıcı)
EOT	End of Transmission (Taşıma Sonu)
ACK	Acknowledge (Alındı mesajı)
NAK	Not Acknowledge (Alınmadı mesajı)
ETB	End of Transmission Block (Taşıma Bloğunun Sonu)
CAN	Cancel (İptal)

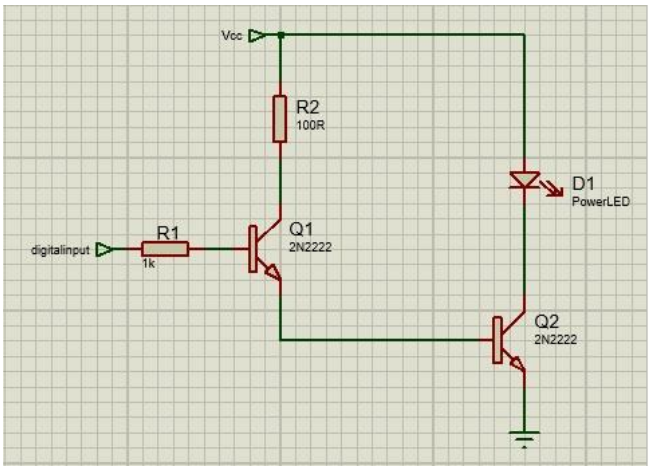
Aktarım alıcı tarafından başlatılır. Alıcı taraf ilk NAK sinyalini gönderene kadar gönderici herhangi bir veri paketi göndermemektedir. NAK sinyali alıcının hazır olduğu belirtir. Alıcının NAK sinaylini göndermesi çok uzun sürer veya bir hata oluşur ise verici beklemeyi durdurur ve zaman aşımına uğrar. Zaman aşımı sonrasında dosya aktarımı yeniden başlar (Chakraborty, 2020).

ZMODEM ise, XMODEM'e göre önemli ölçüde performans geliştirmesi, yeniden başlatılabilir transfer mekanizması ve hata tespit denetimi (ing: Cyclic Redundancy

Check) (CRC) gibi iyileştirmeler içeren dosya transfer protokolüdür (URL-15). ZMODEM büyük paket boyutlarını destekler ve bir iletişim arızası oluşması durumunda transferin kaldığı yerden devam etmesine izin verir (URL-16). Aktarım XMODEM'in aksine gönderici tarafından başlatılmaktadır. Her gönderilen paketten sonra ACK gönderimine ihtiyaç yoktur. Sadece, paket gönderiminin herhangi bir şekilde sekteye uğraması ya da başarısız olması durumunda NAK sinyali gönderilmektedir. Böylelikle, hangi paketin aktarılmadığı bilgisini içeren NAK sinyali sonrasında aktarım kaldığı yerden devam etmektedir. ZMODEM'de paket numarası aynı zamanda paketin konumunu da belirtmektedir (URL-15).

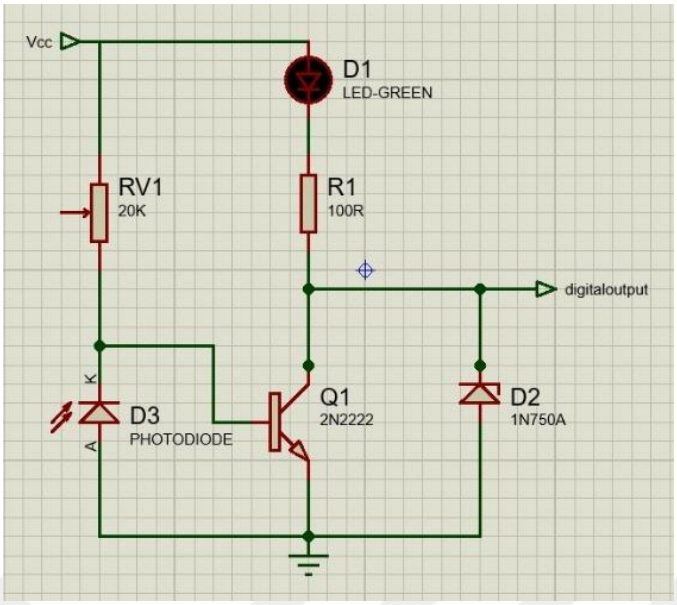
4.1. Devre Şemaları

Uygulamada kullanılan alıcı ve verici devrelerinin şemaları aşağıda gösterilmiştir. Gönderici devresinde (Şekil 4.1) 2 adet transistör, 1 adet power LED, 1 adet 100Ω direnç ve 1 adet de 1KΩ direnç kullanılırken, alıcı devrede ise 1 adet transistör, 1 adet 20K potansiyometre, 1 adet 4,7V zener diyot, 1 adet 100Ω direnç ve 1'er adet LDR ve fotodiyot kullanılmıştır. Karşılaştırma yapmak için alıcı devresi hem LDR'li (Şekil 4.2) hem de fotodiyotlu (Şekil 4.3) olarak iki adet tasarlanmıştır.

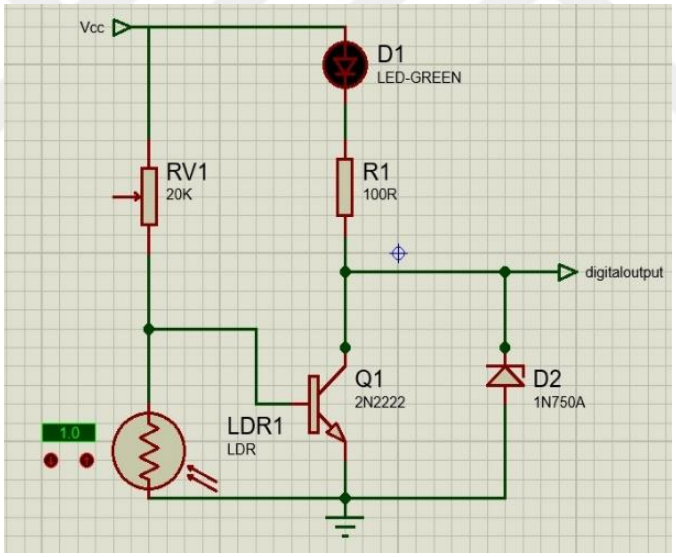


Şekil 4.1. Gönderici Devre Şeması (Altunay, 2020)

Gönderici devresinde OOK modülasyonu kullanılmıştır. Bu modülasyonda ikili (binary) olarak kodlanmış olan verideki 1 ve 0'a göre devredeki LED'in yanıp sönmesi sağlanır.



Şekil 4.2. Alıcı Devre Şeması (Fotodiyot)



Şekil 4.3. Alıcı Devre Şeması (LDR) (Altunay, 2020)

4.1.1. LDR ve Fotodiyot Karşılaştırması

LDR, ışığa duyarlı direnç olarak da bilinmektedir. Üzerine düşen ışık miktarı arttıkça direnci de o oranda düşmektedir. Dolayısıyla da daha fazla akım geçirmektedir. Yani direnç ile ışık şiddeti ters orantılıdır. LDR'nin ışığa maruz kaldıktan sonra direnç seviyesini değiştirme süresinden dolayı yanıt süresi uzundur. LDR'nin anot ya da katodu yoktur. Yani her iki yönde de geçirgendir. Fotodiyot ise ışığa maruz kaldığında

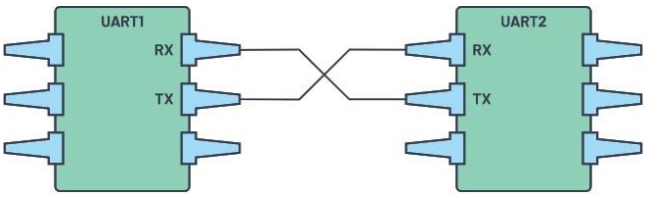
akım geçişine izin vermektedir. Şeffaf lensine düşen ışık şiddeti arttıkça akım da artmaktadır. LDR'nin aksine tepki süresi nanosaniye seviyelerindedir. Fotodiyot devreye ters polarma olarak bağlanmaktadır (Agnihotri, n.d.). LDR ve fotodiyot arasındaki bu farklara ilişkin bilgiler çalışmamızın sonuçlar kısmında detaylı olarak anlatılmaktadır.

Fotodiyotlar genellikle, kameralarda, görüntüleme ve tarama cihazlarında, CD ve DVD okuyucular, fiber optik iletişim, hareket algılama ve konumlandırma sensörleri gibi karmaşık uygulamalarda kullanılmaktadır (Agnihotri, n.d.). LDR'ler ise cep telefonları, gece lambaları ve fotoğraf makinelerinde kullanılmaktadır (URL-17).

4.1.2. Uygulamanın Çalışma Prensibi ve UART

Gönderici bilgisayarın USB portuna bağlanan (ing: Universal Asynchronous Reciever Transmitter) UART cihazı bilgisayardan gelen veriyi ikili kodlar halinde (1 ve 0) gönderici devreye iletir. Yani 1 geldiğinde 5 volt iletim yaparken, 0 geldiğinde de iletimi kesmektedir. Böylelikle LED'in yanıp sönmesi sağlanır.

UART, hızı ayarlanabilen, asenkron seri iletişim kullanan bir donanım iletişim protokolüdür. Buradaki asenkron terimi, gönderici cihazdan alıcı cihaza giden bitleri senkronize etmek için saat sinyali olmadığı anlamına gelmektedir (Peña ve Legaspi, 2020). UART cihazında veriler Tx pininden gönderilirken, Rx pininden de alınır. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi 1. UART cihazının Tx pinine takılan iletken 2. UART cihazının Rx pinine bağlanırken, 2. UART cihazının Tx pinine takılan iletken 1. UART cihazının Rx pinine bağlanır.



Şekil 4.4. UART Bağlantı Yapısı (Peña ve Legaspi, 2020)

Böylelikle iki cihaz arasında bağlantı sağlanır ve veri iletimi gerçekleştirilir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta her iki cihazın da aktarım hızlarının (baud rate) aynı olmasıdır. Aksi takdirde iletim gerçekleşmez.

Baud hızı (Baud rate) terimi saniyede aktarılan sembol sayısını ifade etmektedir. Yani şöyleki; A bir sembol ise, A'yı oluşturan ASCII kodun karşılığındaki 1000001 ikili kod dizilimi de bir sembol grubudur. Buradan yola çıkarak baud hızı, 1 adet karakter aktarımı için geçen süreyi ifade etmektedir de denilebilir. 1 sembolün sadece 1 bitten oluşması durumunda saniyede aktarılan bit sayısı ile baud hızı birbirine eşit olacaktır (Frenzel, 2012).

UART'ta veriler paketler halinde iletilirler. Paketlerin yapısı Şekil 4.5'te de gösterildiği gibi bir başlangıç biti, veri çerçevesi (verinin kendisi), bir eşlik biti ve bitiş bitinden oluşur (Peña ve Legaspi, 2020). Eşlik (parity) bitinin kullanımı zorunlu değildir. Eşlik bitinin kullanılmasının istenmediği durumda cihazın arayüz ayarlarından ilgili ayarın "None" seçilmesi yeterlidir.

Eşlik biti iletim esnasında veride bir değişim olup olmadığını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu duruma; baud oranlarının aynı olmaması, iki UART cihazı arasındaki mesafenin uzun olması ve elektromanyetik etkileşim sebep olabilir. Bu işlem veri paketindeki 1'lerin sayısı sayılarak yapılmaktadır. Eğer eşlik biti "0" seçilir ise veri paketindeki bitlerin sayının çift olduğu, "1" seçilir ise tek olduğu belirtilir. Seçilen eşlik biti ile 1'lerin toplam sayısı eşleşmiyor ise UART cihazı veride bir hata olduğunu algılar (Kaya, 2019).

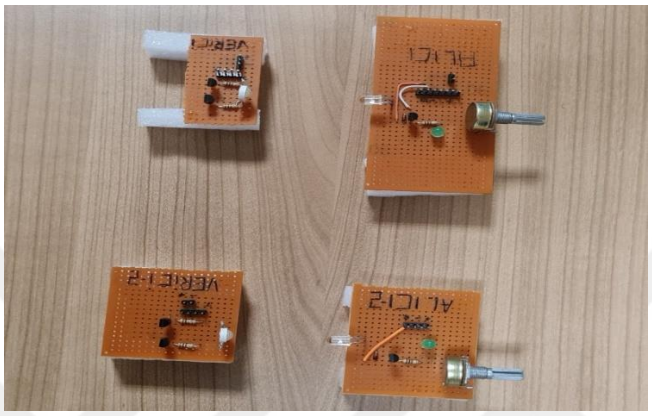


Şekil 4.5. UART Paket Yapısı (Peña ve Legaspi, 2020)

UART cihazının veri aktarımını kısaca özetleyecek olursak; klavyenizden H tuşuna bastığınızda ikili kod karşılığı olarak 1001000 kod dizilimi üretilir. UART cihazı bu dizilimin başına bir start biti, sonuna da stop biti ekleyerek veriyi seri porta iletir. Diğer UART cihazı da start bitinden sonraki 8 bitlik kodu okuyarak veriyi tekrar H karakterine çevirir. Böylelikle veri aktarımı gerçekleşmiş olur.

4.2. Alıcı ve Verici Devrelerin Gerçeklenmesi

Çalışmada kullanılan devreler, prototip olması amacıyla öncelikle breadboardlarda kurulmuştur. Çalışmayla ilgili tüm varyasyonlar (LDR, Fotodiyot, farklı baud hızları) denendikten ve sonuçlar alındıktan sonra Şekil 4.6'daki gibi delikli pertanaks kartlara kalıcı olarak kurulumu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Li-Fi Alıcı ve Verici Devreleri

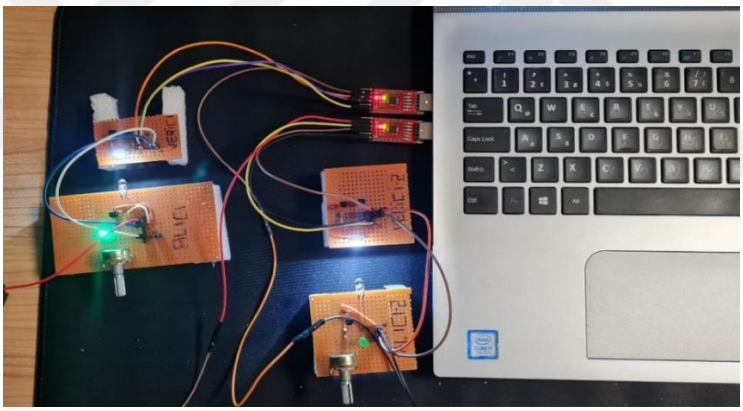
Devre kurulumu ilk etapta Işığa Bağımlı Direnç (ing: Light Dependent Resistor -LDR) ile yapılmış, fakat LDR'nin 600 baudun üstündeki hızlara yanıt verememesinden dolayı fotodiyot kullanımına geçilmiştir. LDR'nin direnç seviyesini değiştirme süresi uzun olmasından dolayı yanıt süresi de uzundur. O yüzden 600 baudun üstündeki hızlarda LED'lerin daha sık ve hızlı yanmaya başlamasından dolayı LDR bu hızlara yetişememektedir. Dolayısıyla da 600 baudun üstündeki hızlara yanıt verememektedir. Bu yüzden, LDR ile maksimum 600 baud hızında metin ve dosya aktarımı başarı ile gerçekleştirilmiştir. Daha önce 2020 yılında yapılan bir Li-Fi çalışmasında ise (Altunay, 2020) LDR ile 200 baud hızında veri gönderimi sağlanmıştır.

Alıcı devrelerde LDR ve fotodiyot'un hassasiyetini ayarlamak ve ortam aydınlatmasından etkilenmemesi, yani paraziti en aza indirmek amacıyla potansiyometre kullanılmıştır. UART cihazını anlık elektriksel akım değişikliklerinden kaynaklanabilecek hasarlardan korumak için de zener diyot kullanılmıştır. Potansiyometre, verici ile aradaki mesafeye bağlı olarak fotodiyotun yeteri kadar akım geçirebilmesi için gerekli olan gerilimi ayarlamaktadır. Buradaki yeşil LED ise veri aktarımı sırasında yanıp sönmektedir.

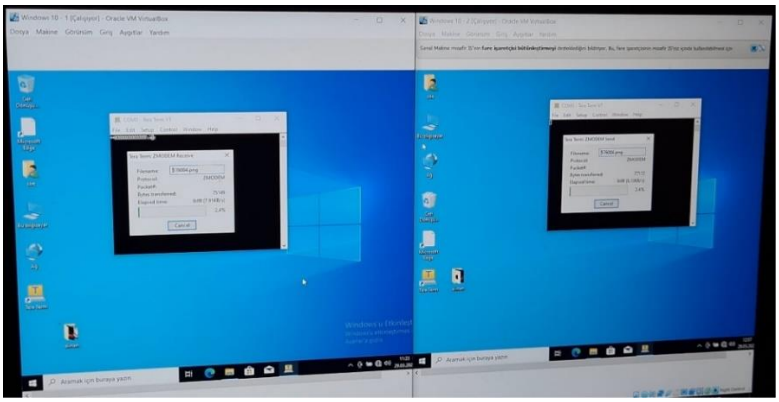
4.3. Li-Fi Uygulaması

Çalışmada bir bilgisayara kurulu iki sanal makine arasında Li-Fi düzenekleri aracılığıyla dosya gönderimi yapılmıştır. Aktarım işlemi ortam ışığı altında gerçekleştirilmiştir. Veri aktarımı sırasında aktarım hızlarının herhangi bir donanımsal farklılıktan etkilenmemesi amacıyla bir laptopa iki ayrı sanal makine kurulmuştur. Sanal makinelerden ilki kurulduktan sonra klonlanarak ikincisi oluşturulmuştur. Böylelikle donanım farklılığı oluşmasının önüne geçilmiştir.

Uygulama anında Li-Fi devreleri ile dosya transferi gerçekleştirileceği için birer adet alıcı ve verici devre çifti tasarlanmıştır. Çünkü, dosya transferi bir çift alıcı ve verici ile gerçekleştirilememektedir. Bunun sebebi dosya trasnferinin başlaması için öncelikle alıcı tarafın "hazır" mesajı iletmesi gerekmektedir. Uygulama anında devrelerin ve sanal makinelerin çalışma durumu Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

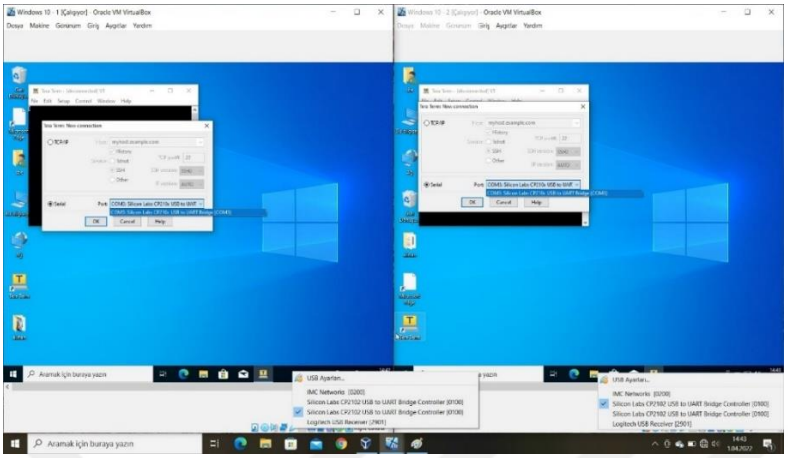


Şekil 4.7. Li-Fi Sisteminin Çalışma Anı



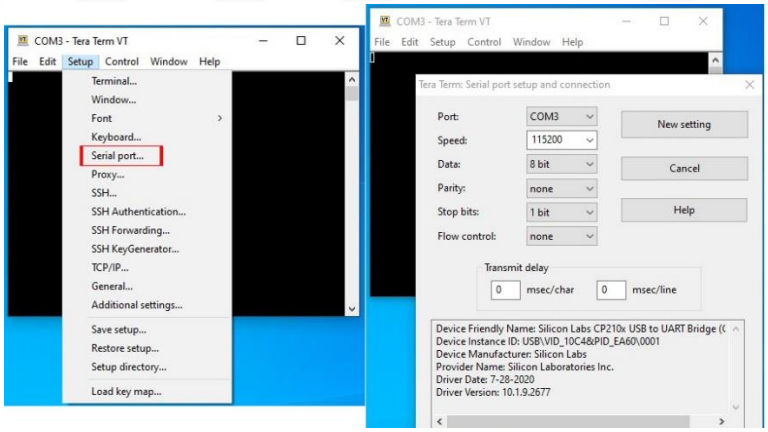
Şekil 4.8. Bilgisayarlarda Dosya Aktarım Anı

Uygulamada fiziki bilgisayarın iki ayrı USB portuna takılı olan UART cihazlarından birincisi sanal makinelerden birine, ikincisi ise diğerine atanmıştır.



Şekil 4.9. Bilgisayarlarda UART Cihazı Bağlantısı

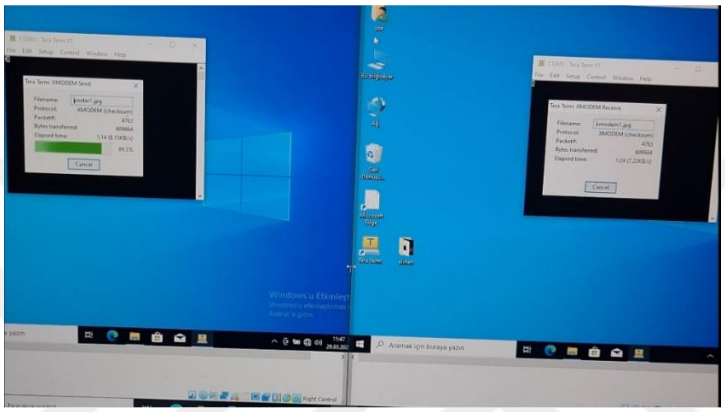
Uygulamada seri port ile dosya transferi gerçekleştirileceği için TeraTerm programı tercih edilmiştir. TeraTerm programı, açık kaynak kodlu bir terminal emülatör programıdır. Ücretsiz olması da bir diğer tercih sebebidir. TeraTerm programında öncelikle seri port ayarlarının yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.10. TeraTerm Seri Port Ayarları

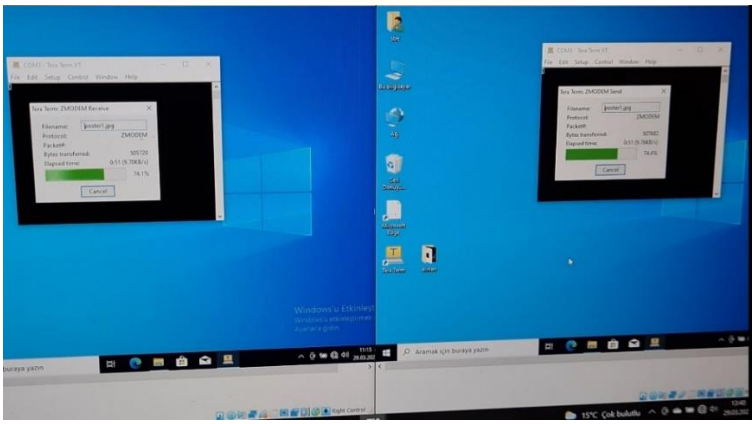
Baud hızı ayarı “Speed”, veri uzunluğu ayarı “Data”, durdurma biti ayarı ise “Stop bits” alanlarından yapılmaktadır. Uygulama esnasında eşlik biti (parity) kullanılmadığından ilgili ayar “none” olarak bırakılmıştır. Tüm ayarlamalar yapıldıktan sonra “New setting” butonu ile ayarlar kaydedilmelidir. Ayarlar yapılmadığı takdirde varsayılan olarak baud hızı 9600, veri uzunluğu 8 bit, eşlik biti “none”, durdurma biti ise 1 bit olarak ayarlanmaktadır.

Gerekli ayarlar yapıldıktan sonra dosya transferi gerçekleştirilebilir. Eğer XMODEM ile gönderim yapılacak ise öncelikle alıcı tarafta File > Transfer > XMODEM > Recieve adımları izlenerek dosyanın kaydedileceği dizin ve dosya adı belirlenmelidir. XMODEM'de dosya transferi alıcı tarafından başlatıldığından dolayı öncelikle alıcı tarafta işlem yapılmaktadır. Ardından da gönderici tarafında da File > Transfer > XMODEM > Send adımları izlenerek gönderilecek olan dosya seçilir ve Şekil 4.11'deki gibi dosya gönderimi başlamış olur.



Şekil 4.11. XMODEM ile Dosya Transferi

Eğer ZMODEM ile gönderim gerçekleştirilecek ise öncelikle gönderici tarafında File > Transfer > ZMODEM > Send adımları izlenerek gönderilcek dosya seçilmelidir. ZMODEM protokolünde dosya transferi gönderici tarafından başlatıldığı için öncelikle gönderici tarafında işlem yapılmaktadır. Daha sonra alıcı tarafında da File > Transfer > ZMODEM > Receive adımları izlenerek Şekil 4.12'deki gibi dosya gönderimi başlatılmış olur.



Şekil 4.12. ZMODEM ile Dosya Transferi

XMODEM protokolündeki gibi dosyayı göndermeden önce dosyanın kaydedileceği dizin ve dosya adı kullanıcı tarafından belirlenmektedir. ZMODEM protokolünde ise, TeraTerm programı tarafından varsayılan olarak belirlenen dizine dosya transfer edilmekte ve gönderilen dosyanın adını olduğu gibi karşı tarafa iletmektedir.

4.4. Li-Fi Uygulama Sonuçları

Uygulamada 660 KB, 1 MB ve 3 MB'lık dosyaların Li-Fi düzeneği aracılığı ile hem XMODEM hem de ZMODEM protokolleri kullanılarak 115200, 57600 ve 38400 baud hızlarında gönderimi gerçekleştirilmiştir. 115200 baud hızının üstündeki hızlarda, fotodiyodun yetersiz kaldığı görülmüş ve bu yüzden maksimum 115200 baud hızı kullanılmıştır. Gönderimlere ait sonuçlar Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2'de XMODEM protokolü ile dosya transferine ait sonuçlar görülmektedir. 38400 baud hızında 3,29 KB/sn, 57600 baud hızında 4,45 KB/sn ve 115200 baud hızında ise 8,15 KB/sn hızlarında dosya aktarımı gerçekleşmiştir.

Tablo 4.3'de ise ZMODEM protokolü ile dosya transferine ait sonuçlar yer almaktadır. 38400 baud hızında 3,65 KB/sn, 57600 baud hızında 5,45 KB/sn ve 115200 baud hızında ise 10,65 KB/sn hızlarında dosya aktarımı gerçekleşmiştir.

Tablo 4.2. Li-Fi'de XMODEM Dosya Aktarım Verileri

Baud Hızı	**Dosya Boyutu**		
	660 KB	**1 MB**	**3 MB**
38400	3,29 KB/sn 3 dk 27 sn	3,29 KB/sn 5 dk 25 sn	3,29 KB/sn 15 dk 54 sn
57600	4,26 KB/sn 2 dk 40 sn	4,45 KB/sn 4 dk	4,50 KB/sn 11 dk 24 sn
115200	8,15 KB/sn 1 dk 23 sn	8,15 KB/sn 2 dk 10 sn	8,15 KB/sn 6 dk 30 sn

Tablo 4.3. Li-Fi'de ZMODEM Dosya Aktarım Verileri

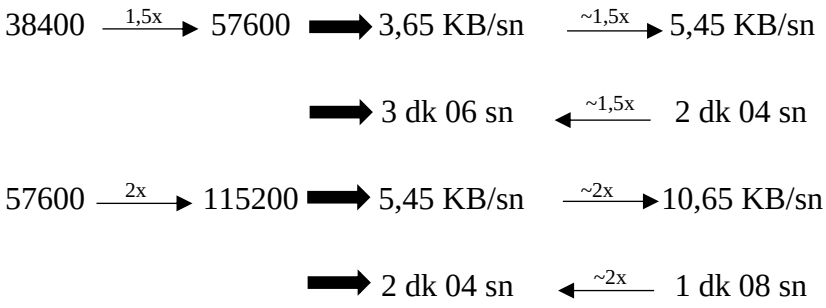
Baud Hızı	**Dosya Boyutu**		
	660 KB	**1 MB**	**3 MB**
38400	3,65 KB/sn 3 dk 06 sn	3,65 KB/sn 4 dk 54 sn	3,65 KB/sn 14 dk 25 sn
57600	5,45 KB/sn 2 dk 04 sn	5,45 KB/sn 3 dk 16 sn	5,45 KB/s 9 dk 38 sn
115200	10,65 KB/sn 1 dk 08 sn	10,65 KB/sn 1 dk 38 sn	10,65 KB/sn 4 dk 54 sn

Tablo 4.4. XMODEM ve ZMODEM Hız Karşılaştırması

Protokol	**Baud Hızları**		
	38400	**57600**	**115200**
XMODEM	3,29KB/sn	4,45 KB/sn	8,15 KB/sn
ZMODEM	3,65 KB/sn	5,45 KB/sn	10,65 KB/sn

Bu sonuçlar neticesinde ZMODEM protokolünün XMODEM protokolüne göre 38400 baud hızında yaklaşık %10, 57600 baud hızında yaklaşık %20 ve 115200 baud hızında ise yaklaşık %30 oranında daha hızlı aktarım yaptığı görülmüştür. Gönderim işleminde pdf, jpeg, png gibi farklı dosya türleri kullanılmış ve gönderilen dosyaların hiçbirinde herhangi bir bozulma ya da hata ile karşılaşılmamıştır. Bunun neticesinde, gönderilen tüm dosyaların boyutunun korunduğu görülmüş olup, görüntü içeren dosyaların görüntülerinde bozulma olmadığı, metin içeren dosyalarda ise metin içeriklerinde herhangi bir harf ya da karakter eksikliği olmadığı görülmüştür.

Ayrıca, baud hızları arasındaki oranların hem aktarım hızları hem de aktarım süreleri arasında da korunduğu görünmektedir.



Aynı aktarımlar, Li-Fi düzenekleri devre dışı bırakılarak, yani her iki UART cihazı direkt olarak birbirlerine bağlanarak gerçekleştirilmiş ve Tablo 4.4'te belirtilen hızların tekrarlandığı görülmüştür. Bu doğrultuda Li-Fi ile aktarımda hız kaybı yaşanmadığı ve kablo ile aktarımla aynı oranda ve sürede aktarım gerçekleştiği görülmüştür. Böylelikle kablo karmaşasının ortadan kaldırılması ve daha sade bir görüntü adına Li-Fi kullanılması ayrı bir avantaj getirmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, donanımsal olarak aynı olan iki bilgisayar arasında Li-Fi düzenekleri ile metin ve dosya gönderimi başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Dosya gönderim işlemi XMODEM ve ZMODEM protokolleri aracılığıyla yapılmıştır. Her iki protokol için, Li-Fi düzenekleri ile 38400, 57600 ve 115200 baud hızlarındaki dosya aktarım hızları ve süreleri kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama neticesinde ZMODEM protokolünün XMODEM protokolüne göre tüm baud hızlarında daha hızlı aktarım yaptığı görülmüştür. Aynı dosyalar Li-Fi düzeneği devre dışı bırakılarak, her iki UART cihazı doğrudan kablolar aracılığıyla birbirlerine bağlanarak, aktarım işlemi tekrar edilmiş ve Li-Fi düzeneklerindekine benzeyen hız ve sürelerde aktarım gerçekleştiği görülmüştür. Böylelikle Li-Fi kullanımında kablolu aktarıma göre herhangi bir hız ve veri kaybı yaşanmadığı anlaşılmıştır. Bu durum kablolu aktarıma göre Li-Fi'yi bir adım daha öne çıkararak tercih sebebi haline getirmektedir.

Çalışmada Li-Fi veri aktarımı için öncelikle LDR kullanılmış, fakat LDR'nin 600 baud hızının üstündeki hızlara yanıt verememesinden dolayı LDR kullanımından vazgeçilmiş ve onun yerine daha iyi ve hızlı yanıt verebilen fotodiyot kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen hızlara Li-Fi düzeneklerinde fotodiyot kullanılarak erişilmiştir.

Li-Fi düzeneklerinde kullanılan elektronik devre elemanlarının fiyatlarının düşük olması böyle bir sistemin toplam maliyetinin de düşük olmasını sağlamıştır. Bu durum önceki bölümlerde belirtilen Li-Fi'nin düşük maliyet özelliğini göstermiştir.

Çalışmada kullanılan Li-Fi düzenekleri ile maksimum Kbps seviyelerinde hızlara ulaşılabilmiştir. Daha yüksek hızlara ulaşılabilmesi, alıcı ve verici arasındaki mesafeye, LED yerine LED dizileri ya da daha güçlü LED kullanımına, daha hassas fotodedektör ya da fotosel kullanımı ve farklı modülasyon teknikleri kullanımı gibi daha birçok faktöre bağlıdır. Daha güçlü LED'ler ile daha uzak mesafelere iletim sağlanabilir. Işık şiddetinin artması bant genişliğini de arttıracağından daha güçlü LED'lerin ya da LED dizilerinin kullanılması daha hızlı veri aktarımı sağlayacaktır.

Gelecekte, Ethernet portuna bağlı bir Li-Fi düzeneği ile bilgisayarlar arasında ya da İnternet erişim noktası ile bilgisayar arasında İnternet paylaşımı konusunda bir çalışma

gerçekleştirilebilir. Yine Li-Fi kullanılarak stream tabanlı ses ve görüntü aktarımı da ayrı bir çalışmanın konusu olabilir.

Li-Fi kullanımının yaygınlaşmasına bağlı olarak, LED'lerin kullanımının da yaygınlaşması, daha sağlıklı ve güvenli bir geleceğe imkan sunacaktır. Ayrıca, yine Li-Fi'nin yaygınlaşması kablosuz haberleşme maliyetini minimuma indirebilir ve radyo frekans bant kıtlığına da bir çözüm olabilir. Bu teknolojinin, önceki bölümlerde de bahsediliği gibi, birçok alanda uygulanabileceği aşikardır. Li-Fi'nin yaygınlaşması Wi-Fi gibi kablosuz teknolojileri tamamen ortadan kaldırmayacaktır. Fakat, böyle bir teknolojinin yaygınlaşması radyo frekansı kullanan teknolojilere olan eğilimi azaltabileceğinden, radyo frekans band kullanımını önemli ölçüde rahatlatacaktır. Bu da radyo frekans kıtlığı yaşanmasını uzun bir süre öteleyecektir. Işık kullanımının yetersiz veya iletilmesinin imkansız olduğu yerlerde, Wi-Fi ile birlikte hybrid bir kullanım da uygulanabilir.

Li-Fi'nin yaygınlaşması büyük dosyaların aktarım sürelerini kısaltacağı, video akış hizmeti sunan sistemler için daha iyi bir hizmet sağlayabileceği, daha güvenli ve hızlı bir bağlantı sağlayabileceği öngörülmektedir. Bütün bu yararları sağlayabilmesindeki en önemli faktör, görünür ışık spektrumunun radyo frekans spekturumuna göre daha fazla bant genişliği sunmasıdır. Li-Fi'nin daha verimli olması yönünde çalışmalar sürdürülmekte ve Li-Fi'ye olan ilgi giderek artmaktadır.

KAYNAKLAR

Agnihotri, N. *Light sensors - LDR, Photodiode, Phototransistor, Solar Cells*, https://www.engineersgarage.com/light-sensors-ldr-photodiode-phototransistor-solar-cell/ (Ziyaret tarihi: 19 Mart 2022)

Ahlawat, H. D., Menon, G., Chhabra, G. (2016). Advanced Light Fidelity (Li-Fi) System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, *03*(04), 2632–2635.

Alfattani, S. (2021). Review of LiFi Technology and Its Future Applications. *Journal of Optical Communications*, *42*(1), 121–132. https://doi.org/10.1515/joc-2018-0025

Altunay, Ö. (2020). Host to Host TCP/IP Connection Over Serial Ports Using Li-Fi For Internet Connection. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 621175

Ankit Navalakha, N. M. (2014). Data Services of Li- Fi in Hospital Management. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, *3*(8), 1631–1633.

Ayyash, M., Elgala, H., Khreishah, A., Jungnickel, V., Little, T., Shao, S., Rahaim, M., Schulz, D., Hilt, J., Freund, R. (2016). Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: Concepts, opportunities, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, *54*(2), 64–71. https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7402263

Bechadergue, B., Azoulay, B. (2020). An Industrial View on LiFi Challenges and Future. *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CSNDSP 2020*, *March*. https://doi.org/10.1109/CSNDSP49049.2020.9249584

Bhut, J. H., Parmar, D. N., Mehta, K. V. (2014). LI-FI Technology – A Visible Light Communication. *International Journal of Engineering Development and Research*, *2*(1), 25–28.

Chakraborty, A. (2020). *XMODEM File Transfer Protocol*, https://www.geeksforgeeks.org/xmodem-file-transfer-protocol/ (Ziyaret tarihi: 12 Mart 2022)

Cho, J. H., Song, H. K. (2003). Reliability Improvement Techniques for HomeRF System. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, *49*(2), 321–327. https://doi.org/10.1109/TCE.2003.1209520

CISCO. (2020). CISCO Annual Internet Report (2018-2023). In *Computer Fraud & Security* (Vol. 2020, Issue 3). https://doi.org/10.1016/s1361-3723(20)30026-9

Dissanayake, S. D., Member, S., Armstrong, J., Member, S. (2013). *Comparison of ACO-OFDM , DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM / DD Systems*. *31*(7), 1063–1072.

Edwards, C. (2018). *Let there be Li-Fi: managing high-speed internet above radio frequencies,* https://eandt.theiet.org/content/articles/2018/09/let-there-be-li-fi-managing-high-speed-internet-above-radio-frequencies/ (Ziyaret tarihi: 26 Mayıs 2021)

Ellinger, F. (2008). *Radio Frequency Integrated Circuits and Technologies* (2nd ed.). (15). Dresden: Springer.

Frenzel, L. (2012). What's The Difference Between Bit Rate And Baud Rate? In *Electronic Design*, http://electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-bit-rate-and-baud-rate (Ziyaret tarihi: 21 Mart 2022)

Gezgin, D. M., Sakallı, F. B. (2014). *Kablosuz Ağ Teknolojileri ve Şifreleme*. (1. baskı). Edirne: Paradigma Akademi Yayınları.

Ghassemlooy, Z., Zvanovec, S., Khalighi, M. A., Popoola, W. O., Perez, J. (2017). Optical wireless communication systems. *Optik*, *151*, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.052

Grobe, L., Paraskevopoulos, A., Hilt, J., Schulz, D., Lassak, F., Hartlieb, F., Kottke, C., Jungnickel, V., Langer, K.-D. (2013). High-speed visible light communication systems. *IEEE Communications Magazine*, *51*(12), 60–66. https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6685758

Güngör, M., Tekin, A., Yılmaz, R. (2009). *WiMAX: Diğer Genişbant Telsiz Erişim (GTE) Teknolojileri ile Karşılaştırılması*, 6.

Hadi, M. A. (2016). Wireless Communication Tends to Smart Technology Li-Fi and its Comparison with Wi-Fi. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, *5*(5), 40–47.

He, Y., Ding, L., Gong, Y., Wang, Y. (2013). Real-time Audio & Video Transmission System Based on Visible Light Communication. *Optics and Photonics Journal*, *03*(02), 153–157. https://doi.org/10.4236/opj.2013.32B037

Hossain, S., Islam, S., Abadin, a F. M. Z., Hossain, A. (2014). Methodology to Achieve Enhanced Data Transmission Rate using Li-Fi in VLC Technology. *International Journal of Engineering Research*, *3*(12), 803–806.

JGeorge, J., Hayder Mustafa, M., Mahjoub Osman, N., Hashim Ahmed, N., Mohammed Hamed, D. (2014). A Survey on Visible Light Communication. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, *3*(2), 3905–3908. http://www.hindawi.com/journals/ijo/2015/945483/

Kaur, R. (2014). Light Fidelity (LI-FI)-A Comprehensive Study. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, *3*(4), 475–481.

Kaya, H. (2019). *UART Nedir, Çalışma Yapısı ve Seri Haberleşme*. https://www.hakankaya.kim/blog/uart-temelleri-uart-nedir-calisma-yapisi-ve-seri-haberlesme/ (Ziyaret tarihi: 23 Mart 2022)

Khandal, D., Jain, S. (2014). Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless communication. *International Journal of Information & Computation Technology*, *4*(16), 1687–1694.

Khandelwal, K., Kumar, S. (2016). A Review Paper on Li - Fi Technology. *National Conference on Innovations in Micro-Electronics, Signal Processing and Communication Technologies (V-IMPACT-2016), February*, 3–6.

Kulkarni, S., Darekar, A., Joshi, P. (2016). A survey on Li-Fi technology. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2016*, *January*, 1624–1625. https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2016.7566413

Kuppusamy, P., Muthuraj, S., Gopinath, S. (2016). Survey and challenges of Li-Fi with comparison of Wi-Fi. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2016*, 896–899. https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2016.7566262

Malik, A., Singh, P. (2015). Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges. *International Journal of Optics*, *2015*(c), 1–7. https://doi.org/10.1155/2015/945483

Marks, R. B., Gifford, I. C., O'Hara, B. (2001). Standarts in IEEE 802 Unleash the Wireless Internet. *Microwave*, *7*(2), 46–56.

Mesleh, R., Elgala, H., Haas, H. (2011). Optical Spatial Modulation. *Journal of Optical Communications and Networking*, *3*(3), 234. https://doi.org/10.1364/JOCN.3.000234

Milli Eğitim Bakanlığı. (2011). *Kablosuz Ağ Sistemleri*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı.

O'Brien, C. (2019). *Air France and Oledcomm partner on first commercial flight with Li-Fi*. https://venturebeat.com/2019/11/01/air-france-and-oledcomm-partner-on-first-commercial-flight-with-li-fi/ (Ziyaret tarihi: 07 Nisan 2022)

Panda, S., Soyaib, M., Jeyasekar, D. A. (2015). Li-Fi Technology – Next gen data transmission through visible light communication. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, *4*(11), 144–151.

Peña, E., Legaspi, M. G. (2020). UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. *AnalogDialogue*, *54*(4).

Pottoo, S. N., Wani, T. M., Dar, M. A., Mir, S. A. (2018). IoT Enabled by Li-Fi Technology. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, *4*(1), 106–110.

R, K., S, B. (2015). Wireless Communication using Li-Fi Technology. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, *2*(3), 7–14.

https://doi.org/10.14445/23488549/ijece-v2i3p107

Rajagopal, S., Roberts, R. D., Lim, S. K. (2012). IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support. *IEEE Communications Magazine*, *50*(3), 72–82. https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6163585

Safaraliev, S., Vahaplar, K., Aybar, A. *Led'li Aydınlatma Armatürleri ile Görünür Işık Haberleşmesi*.

Sahrawat, P. K. (2015). Li-Fi : Future of Wireless Comunication. *Proceedings of National Conference on Innovative Trends in Computer Science Engineering*, *April*, 15–18.

Saini, S., Sharma, D. Y. K. (2016). Li-Fi the Most Recent Innovation in Wireless Communication. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, *6*(2), 347–351.

Sarkar, A., Agarwal, P. S., Nath, D. 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.

Shao, S., Khreishah, A., Ayyash, M., Rahaim, M. B., Elgala, H., Jungnickel, V., Schulz, D., Little, T. D. C., Hilt, J., Freund, R. (2015). Design and analysis of a visible-light-communication enhanced WiFi system. *Journal of Optical Communications and Networking*, *7*(10), 960–973. https://doi.org/10.1364/JOCN.7.000960

Shao, S., Khreishah, A., Rahaim, M. B., Elgala, H., Ayyash, M., Little, T. D. C., Wu, J. (2015). An indoor hybrid WiFi-VLC internet access system. *Proceedings - 11th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, MASS 2014*, 569–574. https://doi.org/10.1109/MASS.2014.76

Sittakul, V., Pasakawee, S., Kovintavewat, P. (2019). Data Transmission of Zigbee over Fiber. *34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, ITC-CSCC 2019*, 3–6. https://doi.org/10.1109/ITC-CSCC.2019.8793406

Sklar, B. (1987). Digital Communications. In *Transportation Research Record* (2nd ed., Issue 1132). Los Angeles: Pearson.

St, A. C., St, A. N. (2017). Latest advancement in Light Fidelity (Li-Fi) Technology. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, *5*(12), 47–53.

Tanwar, K., Gupta, S. (2014). Smart Class Using Li-Fi Technology. *The International Journal Engineering And Science (IJES)*, *3*(7), 16–18.

Teixeira, B. (2008). IrDA: Past, Present and Future. *IEEE Control Systems*, *28*(2), 16–18. https://doi.org/10.1109/MCS.2008.4472371

Tian, C., Yuan, D. (2007). A Novel Cross-Layer Scheduling Algorithm for IEEE 802.16 WMAN. *2007 International Workshop on Cross Layer Design*, 70–73. https://doi.org/10.1109/IWCLD.2007.4379040

URL-1: https://bidb.itu.edu.tr/seyir-defteri/blog/2013/09/07/kablosuz-ağ-standartları (Ziyaret tarihi: 10 Mart 2021)

URL-2: https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/wi-fi-standartlari/22023#ad-image-0 (Ziyaret tarihi: 30 Mart 2021)

URL-3: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15#IEEE_802.15.4:_Low_Rate_WPAN (Ziyaret tarihi: 10 Mart 2021)

URL-4: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16 (Ziyaret tarihi: 10 Mart 2021)

URL-5: https://bidb.itu.edu.tr/seyir-defteri/blog/2013/09/07/wimax (Ziyaret tarihi: 07 Mart 2021)

URL-6: https://tr.wikipedia.org/wiki/GSM (Ziyaret tarihi: 05 Mart 2021)

URL-7: https://tr.wikipedia.org/wiki/GPRS (Ziyaret tarihi: 05 Mart 2021)

URL-8: https://www.btk.gov.tr/4-5g-nedir (Ziyaret tarihi: 05 Mart 2021)

URL-9: https://tr.wikipedia.org/wiki/4G (Ziyaret tarihi: 05 Mart 2021)

URL-10: https://tr.wikipedia.org/wiki/5G (Ziyaret tarihi: 07 Mart 2021)

URL-11: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_wireless_communications (Ziyaret tarihi: 23 Mart 2021)

URL-12: https://www.btk.gov.tr/spektrum_yonetimi (Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2021)

URL-13: https://tr.wikipedia.org/wiki/Radyo_spektrumu (Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2021)

URL-14: https://lifi.co/lifi-and-iot/ (Ziyaret tarihi: 26 Mayıs 2021)

URL-15: https://en.wikipedia.org/wiki/ZMODEM (Ziyaret tarihi: 19 Mart 2022)

URL-16: https://www.techopedia.com/definition/1805/zmodem (Ziyaret tarihi: 19 Mart 2022)

URL-17: https://www.aydinlatma.org/ldr-ve-fotodiyot-arasindaki-fark-nedir.html (Ziyaret tarihi: 19 Mart 2022)

URL-18: https://electronics360.globalspec.com/article/13233/smart-corner-for-autonomous-driving-earns-ces-2019-innovation-award (Ziyaret tarihi: 07 Nisan 2022)

Uysal, M., Nouri, H. (2014). Optical wireless communications - An emerging

technology. *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–7. https://doi.org/10.1109/ICTON.2014.6876267

Yanxia, L., Shufen, L., Liting, C. (2009). Application of Bluetooth Communication in Digital Photo Frame. *2009 Second ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, CCCM 2009*, *4*, 370–373. https://doi.org/10.1109/CCCM.2009.5270428

Zeng, Z., Fu, S., Zhang, H., Dong, Y., Cheng, J. (2018). A Survey of Underwater Optical Wireless Communications. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, *19*(1), 7–21. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78942-2_2

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Hamdi, Y. (2021). Li-Fi ve Uygulama Alanları. *International Marmara Science And Social Science Congress (IMASCON 2021),* Kocaeli, Türkiye, 10-11 Aralık 2021

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini İstanbul Bahçelievler Bağlar Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında Hitit Üniversitesi Bilgisayar Teknolojileri ve Programlama bölümüne başladı ve 2008 yılında mezun oldu. 2008 yılında Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi İşletme bölümüne kaydoldu ve buradan da 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılının Haziran ayında Artvin Çoruh Üniversitesi'nde devlet memuru olarak göreve başladı. 2013 yılında DGS ile Kocaeli Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünü kazandı. Bu süre içerisinde Kocaeli Üniversitesi'ne tayin oldu ve eğitimine burada devam etti ve buradan da 2017 yılında mezun oldu. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Bilişim Sistemleri Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Evli ve bir çocuk babasıdır.