

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



**FOTODİYOT DİZİSİ İLE GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME
SİSTEMİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ**

Ramin ZOLFİ

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Elektronik Bilim Dalı

ŞUBAT 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

FOTODİYOT DİZİSİ İLE GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME SİSTEMİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Tez Yazarı
Ramin ZOLFİ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Yavuz EROL

ŞUBAT 2021
ELAZIĞ

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Fotodiyot Dizisi ile Görünür Işık Haberleşme Sistemi Tasarımı ve Gerçeklenmesi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

3/2/2021

Ramin ZOLFİ



Önsöz

Bu tezin hazırlanmasında teknik desteğini esirgemeyen ve beni yönlendiren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yavuz EROL'a ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ramin ZOLFİ
ELAZIĞ, 2021



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Görünür Işık Haberleşmesi Kavramı	1
1.2. Tezin Kapsamı	2
1.3. Literatür Taraması	3
2. GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ	5
2.1. Optik Vericiler	5
2.1.1. LED'lerin Çalışma Prensibi	5
2.1.2. Monokromatik ve Polikromatik Işık Kaynakları	6
2.1.3. LED Akım-Gerilim Karakteristiği	6
2.1.4. Işık Şiddeti, Işık Akısı ve Işıma Açısı	9
2.2. Optik Alıcılar	10
2.2.1. Işıkla Direnci Değişen Eleman	10
2.2.2. Fotovoltaik Hücre	11
2.2.3. Fotodiyot	12
3. DONANIM TASARIMI	14
3.1. Optik Haberleşme Sisteminin Genel Yapısı	14
3.2. Mikrodenetleyici Kontrollü Verici Tasarımı	16
3.3. Mikrodenetleyici Kontrollü Alıcı Tasarımı	17
3.4. Dalga Şekilleri	21
4. TESTLER	24
4.1. Lens Açısının Haberleşme Performansına Etkileri	25
4.2. Fotodiyot Dizi Boyutunun Etkileri	29
4.3. LED Akımının Haberleşme Mesafesine Etkisi	31
4.4. Işık Dalgaboyunun Haberleşme Performansına Etkileri	31
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	33
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Fotodiyot Dizisi ile Görünür Işık Haberleşme Sistemi Tasarımı ve Gerçeklenmesi

Ramin ZOLFİ

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2021, Sayfa: xi + 37

Bu tez çalışmasında görünür ışık haberleşme sistemlerinde fotodiyot dizisi kullanımının haberleşme performansına etkileri incelenmiştir. Optik verici kısmında farklı dalga boylarında ışığa yeteneğine sahip yeni nesil power LED'ler ve farklı açılı lensler; optik alıcı kısmında ise görünür ışık bandında ışığa duyarlı PIN fotodiyotlardan oluşan bir algılayıcı dizisi, opampli karşılaştırma devresi ve ortalama gerilim izleyici (AVT) bloğu bulunmaktadır. Tasarlanan haberleşme sistemi ile LED'in ışık renginin, LED akımının, lens açısının, optik verici ile optik alıcı arasındaki mesafenin veri transfer hızına etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Görünür Işık Haberleşmesi, VLC, Li-Fi, Fotodiyot Dizisi

ABSTRACT

Design and Implementation of Visible Light Communication System with Photodiode Array

Ramin ZOLFI

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

February 2021, Pages: xi + 37

In this thesis, a design which will increase the performance of visible light communication systems is given by using photodiode array. The optical transmitter features a new generation of power LEDs with different wavelengths and lenses with different beam angles. In the optical receiver section there is a sensor array consisting of photosensitive PIN photodiodes in the visible light band, the opamp comparator circuit and average voltage tracking (AVT) block. With the designed communication system, the effects of LED's light color, LED current, lens angle, distance between optical transmitter and optical receiver on the data transfer rate have been investigated.

Keywords: Visible Light Communication, VLC, Li-Fi, Photodiode Array

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum	2
Şekil 1.2. Görünür ışık haberleşmesinin örnek kullanımı	2
Şekil 2.1. LED'in iç yapısı	5
Şekil 2.2. P-N jonksiyonunun oda sıcaklığındaki akım-gerilim eğrileri.....	7
Şekil 2.3. Çeşitli renkler için LED'in akım gerilim eğrileri	8
Şekil 2.4. Luxeon beyaz LED için akım gerilim eğrisi	9
Şekil 2.5. LED'lerin ışımaya diyagramları	10
Şekil 2.6. LDR çeşitleri	10
Şekil 2.7. LDR karakteristiği.....	11
Şekil 2.8. Fotodiyot yapısı.....	12
Şekil 2.9. Fotodiyot ters yön karakteristiği.....	13
Şekil 3.1. Sistemin genel görünümü.....	14
Şekil 3.2. Sistemin blok şeması.....	15
Şekil 3.3. Optik bileşenler	15
Şekil 3.4. 2x2, 3x3, 4x4 fotodiyot dizileri	16
Şekil 3.5. Optik verici devre şeması	16
Şekil 3.6. Verici devresinin genel görünümü	17
Şekil 3.7. Optik alıcı devre şeması	18
Şekil 3.8. İntegratörün geçici rejim cevabı (0-25ms)	19
Şekil 3.9. Alıcı devresinin genel görünümü	19
Şekil 3.10. Verici-alıcı sisteminin genel görünümü	20
Şekil 3.11. Ölçüm cihazları	20
Şekil 3.12. Alıcı devresi dalga şekilleri.....	21
Şekil 3.13. Ortamdaki armatürlerin etkisi a) Floresan armatür b) LED armatür	22
Şekil 3.14. Sinyal frekansına bağlı değişen dalga şekilleri.....	22
Şekil 3.15. Görev periyoduna bağlı değişen dalga şekilleri	23
Şekil 4.1. Test sisteminin blok şeması.....	24
Şekil 4.2. Verici ve alıcı için Arduino programları	24
Şekil 4.3. Seri monitör ekran görüntüsü	25
Şekil 4.4. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (16 derece lens ile).....	27
Şekil 4.5. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (60 derece lens ile).....	28

Şekil 4.6. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değimi (lenssiz durum)	29
Şekil 4.7. Mesafe değerlerinin oranı.....	30
Şekil 4.8. BPW34 fotodiyodun spektral duyarlılığı.....	32



TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Renklerine göre kullanılan yarı iletken malzemeler ve dalga boyları.....	6
Tablo 2.2. LED'in önemli elektriksel ve optik parametreleri	8
Tablo 4.1. 16 derece lens için ölçüm sonuçları	26
Tablo 4.2. 60 derece lens için ölçüm sonuçları	27
Tablo 4.3. Lenssiz durum için ölçüm sonuçları	28
Tablo 4.4. Oranlar	30
Tablo 4.5. Farklı renkli LED'ler ile test sonuçları	31

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Amper
°C	: Santigrad derece
GHz	: Gigahertz
K	: Kelvin
kB	: Kilobayt
kbps	: Bir saniyedeki kilobit sayısı
kHz	: Kilohertz
°	: Derece (açısal)
*	: Eşlenik
lm	: Lümen
m	: Metre
mA	: Miliamper
Mbps	: Bir saniyedeki megabit sayısı
MHz	: Megahertz
Ω	: Ohm
s	: Saniye
t	: Zaman
V	: Volt
W	: Watt
λ	: Dalga boyu
cd	: Kandela
T _{AIR}	: LED etrafındaki ortam sıcaklığı
T _J	: LED kılıfı içerisindeki jonksiyon sıcaklığı
T _{SP}	: LED'in altındaki termal pad sıcaklığı

Kısaltmalar

BER	: Bit Error Rate
CCT	: Correlated Color Temperature
CRI	: Color Rendering Index
CIS	: Bakır indiyum selenid
CIGS	: Bakır indiyum galyum selenid
CIE	: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
CDS	: Kadmiyum sülfid
CDSE	: Kadmiyum selenid
FPGA	: Field Programmable Gate Array
IR	: Kızılötesi
LED	: Işık yayan diyot
LDR	: Light Dependent Resistor
Li-Fi	: Light Fidelity
MIMO	: Multiple Input Multiple Output
MPEG	: Motion Pictures Experts Group
MCPCB	: Metal kaplı baskılı devre kartı
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAM	: Pulse Amplitude Modulation
PCB	: Baskılı devre kartı
PV	: Fotovoltaik
RGB	: Red-Green-Blue
RF	: Radyo Frekans
SNR	: Signal-to-Noise-Ratio
SPAD	: Single photon avalanche diode
UVLC	: Underwater visible light communication
VLC	: Visible light communication

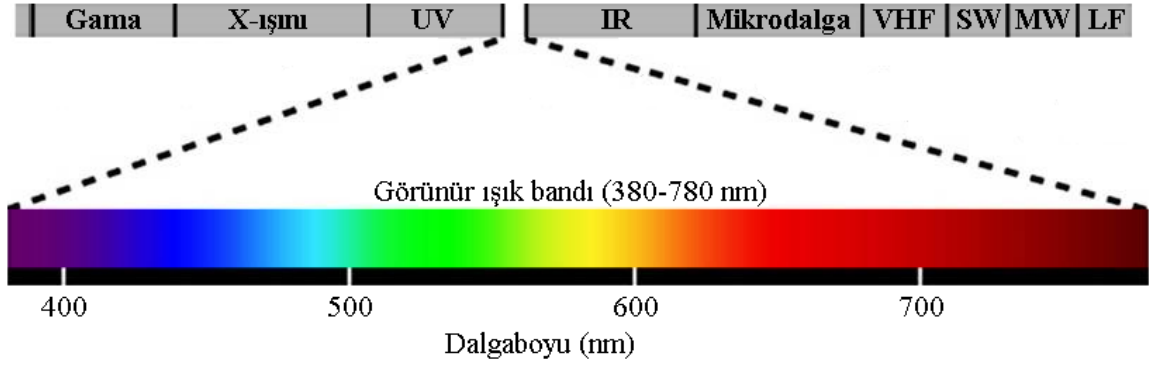
1. GİRİŞ

1.1. Görünür Işık Haberleşmesi Kavramı

Haberleşme sistemlerinde son yıllarda yaşanan gelişmelerle birlikte özellikle mobil cihazların kullanımında çok hızlı bir artış olmuştur. Cihaz çeşitliliğinin ve kullanıcı sayısının artmış olması haberleşmenin önümüzdeki yıllarda radyo frekans (RF) bandında sürdürülmesini zorlayacak niteliktedir. Kablosuz mobil haberleşme sistemlerinin çalışması için tahsis edilen frekans bandlarının yetersiz kalmaya başlamasıyla birlikte dünya çapında haberleşme teknolojileri üreten firmalar ve akademisyenler tarafından RF bandı dışında haberleşmeyi sağlayabilecek yeni teknolojiler geliştirilmeye başlanmıştır. RF kablosuz haberleşme sistemlerine duyulan ilgi dışında, görünür ışık haberleşmesi kavramı ön plana çıkmaktadır. Literatürde görünür ışık haberleşmesi VLC (Visible Light Communication), OWC (Optical Wireless Communication) veya Li-Fi (Light Fidelity) olarak adlandırılmaktadır.

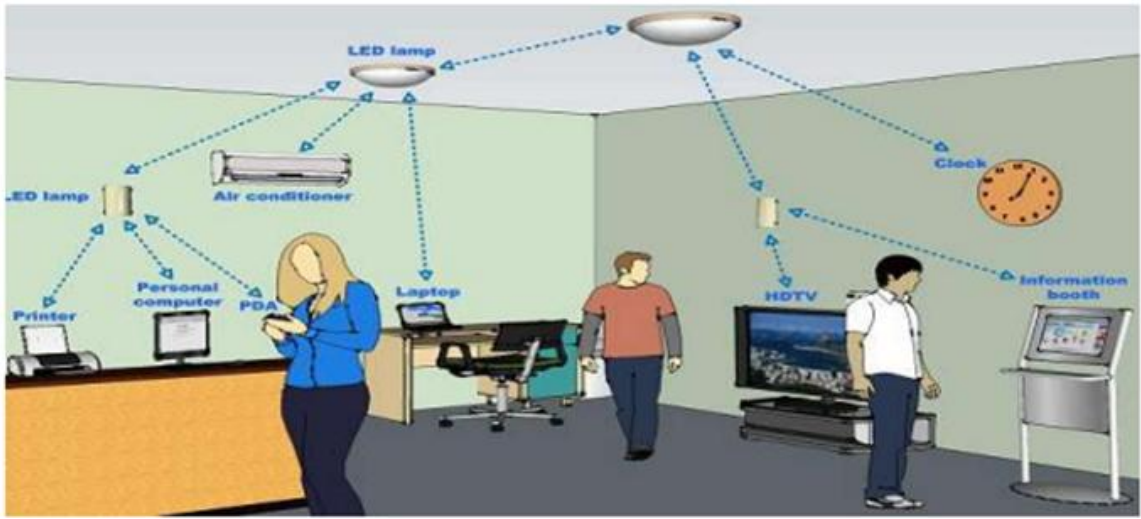
VLC sistemlerinde veri iletimi görünür ışık bandında yapılmakta olup, sinyal iletim hızından dolayı ışık seviyesindeki değişimleri göz algılayamamaktadır. Bu özelliğinden dolayı, aydınlatma amacıyla kullanılan LED armatürlerin birer haberleşme ünitesine dönüşmesi söz konusudur. Yüksek hızlarda veri haberleşmesi sağlanabilmesi için ışık kaynağı olarak görev yapan yeni nesil LED'lerin yüksek frekansta anahtarlanması gereklidir. Yarı iletken LED teknolojisi bu gereksinimi karşıladığı için akkor filamanlı, halojen veya floresan armatürlerin sahip olmadığı bu teknik özellik LED teknolojisini bir adım öne çıkarmaktadır. Son yıllarda aydınlatma sektöründe LED'li ürünlere olan yönelimden dolayı ilerleyen süreçte görünür ışık haberleşmesinin de hızla yaygınlaşacağı ön görülmektedir.

Görünür ışık haberleşme sistemleri, RF kablosuz haberleşme sistemlerine kıyasla önemli avantajlara sahiptir. Şekil 1.1'de verilen elektromanyetik spektrumda morötesi sınırından başlayarak kızılötesine kadar uzanan bölge görünür ışık bölgesi olarak adlandırılır ve 380 nm ile 780 nm aralığını kapsar. Bu aralık yaklaşık 400 THz'lik band genişliğine sahip olup lisans gerektirmeyen bir haberleşme kanalı sunmaktadır. Görünür ışık bandındaki elektromanyetik dalgalar duvarlardan geçemediği için haberleşme mesafesi RF sistemlerdeki gibi uzun değildir. Görünür ışık haberleşme sistemleri, yüksek bilgi taşıma kapasitesi ve sağlık açısından olumsuz etkiler oluşturmaması özelliklerinden dolayı önümüzdeki yıllarda haberleşme alanındaki gereksinimleri karşılayabilecek teknolojik bir çözüm sunmaktadır. Mevcut RF bandları ile girişim (enterferans) oluşturmaması nedeniyle bu iki teknoloji birlikte kullanılabilir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum

Görünür ışık haberleşmesinde Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, aydınlatma armatürleri birer bilgi iletim ünitesi olarak çalışmaktadır. Sabit alıcıların yanı sıra hareketli (mobil) alıcıların da bulunmasından dolayı tasarlanacak optik verici-alıcı sistemlerinde sinyal kalitesinin yüksek olması hedeflenmektedir. Kullanım alanı olarak, ev, ofis ortamlarında cihazlar arası iletişim, trafik sinyalizasyon sistemleri ile araçlar arasındaki bilgi aktarımı, sokak lambaları ile internet bağlantısı sunulması örnek olarak verilebilir.



Şekil 1.2. Görünür ışık haberleşmesinin örnek kullanımı [1]

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışmasında görünür ışık haberleşme sistemlerinde fotodiyot dizisi kullanımının haberleşme performansına etkileri incelenmiştir. Optik verici kısmında farklı dalga boylarında ışığa yeteneğine sahip yeni nesil power LED’ler ve farklı açılı lensler; optik alıcı kısmında ise görünür ışık bandında ışığa duyarlı PIN fotodiyotlardan oluşan bir algılayıcı dizisi, opampli

karşılaştırma ve ortalama gerilim izleyici bloğu bulunmaktadır. Tasarlanan haberleşme sistemi ile vericideki LED'in ışık renginin, LED akımının, lens açısının, optik verici ile optik alıcı arasındaki mesafenin veri transfer hızına etkileri incelenmiştir.

1.3. Literatür Taraması

Elektromanyetik spektrumun insan gözüyle tespit edilebilen dalga boyu aralığına kısaca görünür ışık denmektedir. Son yıllarda üretilen bilginin artması nedeni ile büyük hacimdeki bilginin işlenmesi, güvenli olarak saklanması ve bir noktadan diğer bir noktaya iletimi için ciddi sorunlarla karşılaşmaktadır.

Günümüzde bilgi transferi, radyo dalgalarını kullanan kablosuz mobil haberleşme sistemleriyle sağlanmaktadır. Fakat bu kadar büyük kapsamlı ve yüksek hızda bilginin iletilebilmesi için elektromanyetik spektrumda çok daha yüksek frekans bandlarına çıkılması gerekmektedir. Optik spektrum çok yüksek bilgi taşıma kapasitesine sahip olduğundan dolayı, LED'lerin bu amaç için büyük bir potansiyel kaynak olduğu anlaşılmıştır.

1880 yılında Graham Bell tarafından photophone olarak adlandırılan bir cihaz yardımıyla güneş ışığı demeti ile modüle edilen ses sinyalinin 213 metre uzağa gönderilmesi ile görünür ışıkla haberleşmenin temelleri atılmıştır [2]. VLC ortaya çıktığında pek ilgi görmemiştir. 2011 yılında Edinburgh Üniversitesi araştırmacıları tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda Purelifi olarak adlandırılan bir teknoloji sunulmuştur. Bu alandaki gelişmeler LED'lerin ilerleyen zamanlarda görünür ışıkla haberleşme için yeni bir potansiyel kaynak olduğunu göstermektedir.

Yüksek hızda bilgi transferinin Li-Fi sistemi tarafından gerçekleştirilebilmesi için herhangi bir LED ampul ile fotodiyot içeren bir optik alıcının kullanılması yeterlidir. Li-Fi teknolojisi, LED'li aydınlatma armatürünü optik haberleşme sistemine dönüştürmektedir. Vericide, elektriksel sinyal formatında bilgi taşıyan veri bitleri LED aydınlatmasıyla ışığa dönüştürülerek ve alıcı birimde ise fotodiyotlar vasıtasıyla ışıkla taşınan bilgi sinyali yeniden geri elde edilerek haberleşme sağlanmaktadır.

Literatürde VLC konusu üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Arıoğlu tarafından yürütülen çalışmada, çok taşıyıcılı görünür ışık haberleşmesi için tamamen özgün alıcı ve verici tasarımı gerçekleştirilmiş olup 1.8 m ile 3 m mesafe aralığında 3.5 kbps veri iletim hızında haberleşme hatasız bir şekilde gerçekleştirilmiştir [3].

Wang ve arkadaşları [4] sualtı görünür ışık iletişimi (UVLC) amacıyla yürüttükleri çalışmada vericideki optik yoğunluğu arttırmak için ışık yayan diyotun (LED) yarı güç açısının daraltıldığı ve tek bir foton çıkış diyotunun (SPAD) kullanıldığı uzun mesafeli bir UVLC sistemi tasarlamıştır.

Li ve arkadaşları, VLC sistemleri için çok girişli çok çıkışlı (MIMO) destekli bir ışık kısma (dimming) tasarımı vermiştir. Bu sistemin bit hata oranını azalttığı gösterilmiştir [5].

Wijayanto ve arkadaşları tarafından yapılan VLC tasarımında, fototransistör dizisi kullanılarak 134 cm uzaktan mesaj, resim, MPEG formatında video ve WAV/MP3 formatında ses dosyası gönderilmesi sağlanmıştır. Prototip sistemin veri iletim hızı 9600 bps seviyesindedir [6].

Goswami ve arkadaşları tarafından Arduino platformu kullanılarak tasarlanan yüksek performanslı bir Li-Fi verici-alıcı sistemi verilmiştir [7]. 115200 bps hızda iletişim sağlayan sistemde MATLAB yazılımı kullanılmış ve optik olarak iletilen video sinyali Java arayüzü üzerinde izlenebilmiştir.

Do ve arkadaşları görünür ışık haberleşmesi temeline dayanarak konum belirlenmesi konusunda literatürde yapılan çalışmaları ayrıntılı olarak incelemiştir [8].

Saadi ve arkadaşları [9], görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde veri hızının iyileştirilmesi için stratejiler sunmuştur.

Rajbhandari ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, optik verici kısmında LED dizisi, optik alıcı kısmında fotodiyot dizisi kullanılarak, yaklaşık 1 Gbps hıza çıkabilen bir haberleşme sistemi tasarımı verilmiştir. OFDM ve PAM modülasyon tekniklerinin deneysel karşılaştırması da verilmiştir [10].

Haigh ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada verici kısmında silikon LED, alıcı kısmında organik fotodedyektör kullanılan, çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistem tasarımı verilmiştir. Çalışmada, yüksek veri hızlarına ulaşabilmek için hata düzeltme algoritmaları sunulmuştur [11].

Habib ve arkadaşları [12], Xilinx firmasının Virtex-VII model FPGA donanımını kullanarak iç mekanda propagasyon kanalları modellemiştir.

Başer, MOSFET'leri anahtar olarak kullanıp VLC'de çok seviyeli modülasyonlar kullanarak veri gönderilmesini sağlamıştır [13].

Altunay, bilgisayarların seri portlarını kullanarak, görünür ışık haberleşme sisteminden yararlanarak iki bilgisayar arasında veri iletişimini gerçekleştirmiştir [14].

Yanyan Zhu ve Xiao Chen 2020 yılında yaptıkları çalışmada, optik verici kısmında beyaz power LED ve OPA2614 serisi opamp, optik alıcı kısmında PIN fotodiyot ve OPA657 serisi opamp kullanarak bir Li-Fi haberleşme sistemi tasarlamışlardır [15].

Literatürde VLC sistemleri ile farklı alanlarda uygulama çalışmaları da yer almaktadır. 5G üzerinden veri aktarımı konusunda [16,17], optik verici ünitesinde RGB LED ile beyaz ışığın üretiminde [18,19], lazer verici kullanarak veri aktarımında [20,21], fotodiyot dizisi konusunda [22,23] ve sinyal gürültü oranı (SNR) konusunda [24,25] çalışmalar örnek olarak verilebilir.

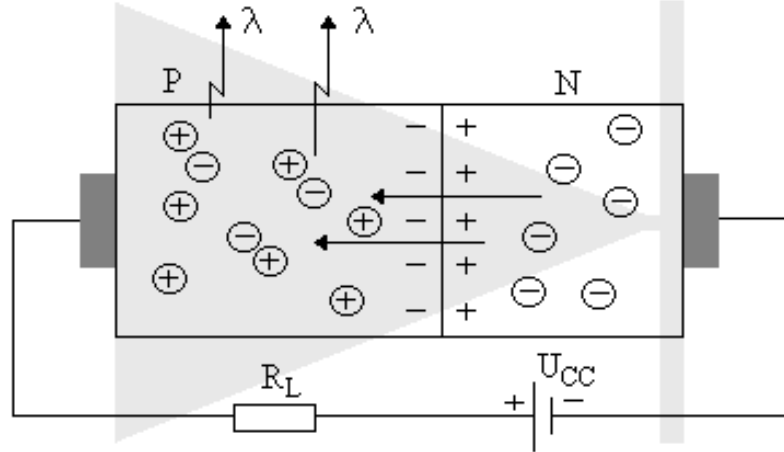
2. GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ

2.1. Optik Vericiler

Günümüzde üretilen yarı iletken ışık kaynakları optik spektrumun morötesi bölgesinden başlayarak kızılötesi bölgesine kadar olan bölgeyi kapsamaktadır [26,27]. 380-780 nm aralığı, uluslararası aydınlatma komisyonu (CIE) tarafından görünür ışık bandı olarak kabul edilmektedir. Yarı iletken optik vericilerin farklı optik özellikleri olmakla birlikte elektriksel özellikleri aynıdır [28]. Görünür ışık haberleşmesinde optik verici olarak SMD kılıfa sahip, yüksek verimli, yeni nesil power LED'ler kullanılmaktadır. Bu LED'ler aynı zamanda ortamı aydınlatma görevini de üstlendiğinden LED çiplerinin ışık çıktıları fazla ve haberleşme sırasında yüksek anahtarlama frekanslarına çıkabilmek için jonksiyon kapasiteleri düşüktür.

2.1.1. LED'lerin Çalışma Prensibi

Işık yayan diyot olarak adlandırılan LED'ler, özel yarıiletken katkılı P-N jonksiyonuna sahip bir diyot türüdür. Bu tür diyotlar ileri yönde biaslandığında ışık yayımına geçerler. Başka bir deyim ile akımı doğru yönde geçirirken, ters yönde engelleyeceği anlamına gelir. İşlevi ise, bir elektron bir katmandan ayrıldığında, serbest bırakılan enerjisinin ışık haline gelmesidir. Bu ışık çeşitli renklerde görülebilir. LED'in yayacağı ışık yoğunluğu LED'den geçen akım ile orantılıdır.



Şekil 2.1. LED'in iç yapısı [27]

LED çipinin iç yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Yarı iletken diyottan iletim yönünde akım geçtiğinde P bölgesindeki delikler ve N bölgesindeki elektronlar P-N tipi yarı iletken malzemenin jonksiyonuna doğru sürüklenir. Bir elektron-delik çiftinin birleşmesi halinde fazladan enerji bir foton olarak dışarı verilir [27].

2.1.2. Monokromatik ve Polikromatik Işık Kaynakları

LED'ler yaydıkları ışığın spektrumuna ve dalga boyuna bağlı olarak morötesi (ultraviolet-UV), görünür (visible) ve kızılötesi (infrared-IR) olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar. LED'ler monokromatiğe yakın spektruma sahiptirler. LED çipi üreticileri farklı dalga boylarında ışık yayacak şekilde üretimler yapmaktadır. Bunlardan bazıları monokromatik (tek renkli), bazıları da farklı renkte ışık yayan LED çiplerinin aynı kılıfa yerleştirilmesi yoluyla polikromatik (çok renkli) olabilmektedir. İstenen dalga boyunda ışık elde etmek için, farklı yarı iletken malzemeler kullanılır. Tablo 2.1'de elde edilebilecek renk değerlerine göre kullanılan yarı iletken malzemeler ve dalga boyları verilmiştir.

Tablo 2.1. Renklerine göre kullanılan yarı iletken malzemeler ve dalga boyları [27]

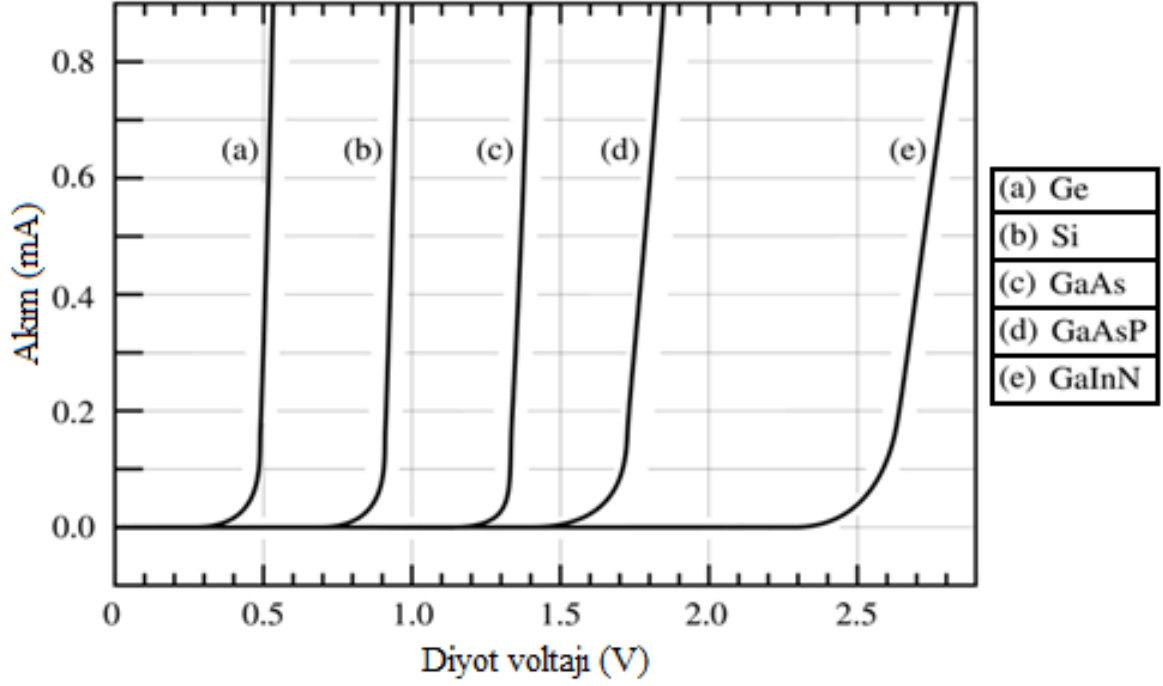
Işık Rengi	Malzeme	Maksimum Dalga Boyu (nm)
Kızılötesi	GaAlAs/GaAs	940
Kızılötesi	GaAlAs	880
Parlak kırmızı	GaP	700
Ultra kırmızı	GaAlAs/GaAs	660
Kırmızı	GaAsP/GaAs	655
Yüksek verimli kırmızı	GaAsP/GaP	635
Turuncu	GaAsP/GaP	610
Sarı	GaAsP/GaP	585
Yüksek verimli yeşil	GaP	568
Ultra yeşil	InGaAl/SiC	523
Ultra yeşil	InGaN/SiC	502
Saf mavi	InGaN/SiC	470
Ultra mavi	GaN/SiC	430

Al: Aluminium, Ga: Gallium, As: Arsenide, P: Phosphide, N: Nitride, In: Indium, Si: Silicon, C: Carbide

2.1.3. LED Akım-Gerilim Karakteristiği

LED'li bir devre tasarımında LED'in akım-gerilim karakteristiğinin mutlaka dikkate alınması gerekir. Çünkü LED'in ileri yön gerilimi LED'den geçen akıma bağlıdır. Akımın değerine göre akım sınırlayıcı direncin değeri seçilir. LED'den geçen akım artınca ileri yön gerilimi de artar. Eşik geriliminden sonra akım hızla yükselir. LED'in bozulmasını önlemek için, akım sınırlayıcı bir direnç veya sabit akım kaynağı kullanmak gerekir [27].

Şekil 2.2’de farklı yarı iletkenlerden yapılmış diyot ve LED çeşitlerine ait akım gerilim karakteristikleri görülmektedir. Görüleceği gibi gerilim değeri eşik değerini aşmadığı sürece yarı iletken üzerinden akım akışı olmaz. Eşik değerinin germanyum diyotta yaklaşık 0.3 V, silisyum diyotta yaklaşık 0.7 V, GaAs yapısından oluşmuş LED’lerde (kızılötesi-kırmızı arası) yaklaşık 1.2 V, GaAsP yapısından oluşmuş LED’lerde (kırmızı-sarı arası) yaklaşık 1.5 V ve GaInN yapısından oluşmuş LED’lerde (yeşil-mavi arası) yaklaşık 2.4 V olduğu görülmektedir.



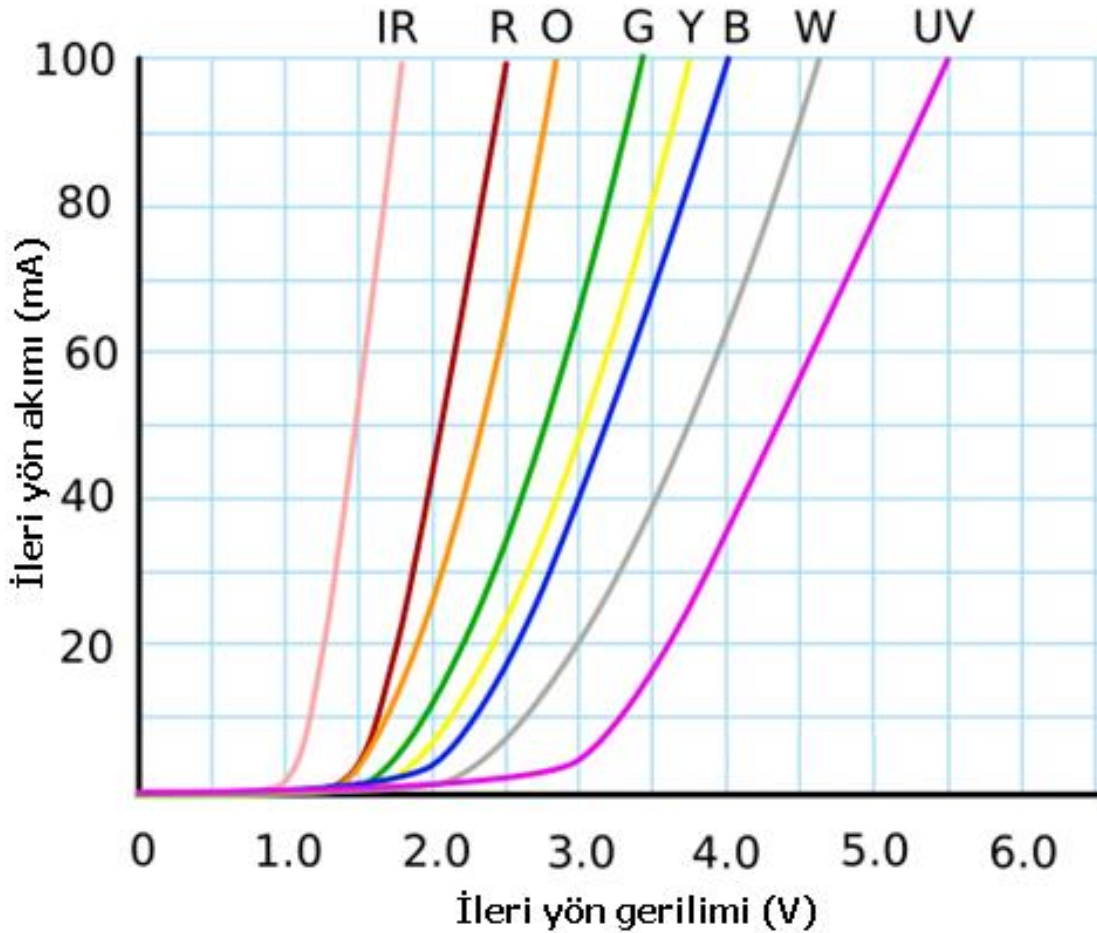
Şekil 2.2. P-N jonksiyonunun oda sıcaklığındaki akım-gerilim eğrileri [29]

LED’in önemli elektriksel ve optik parametreleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Burada I_f LED’in nominal DC akımıdır. Bu akım görünür ışık yayan düşük güçlü LED’ler için 5 mA ile 20 mA arasındadır. Kızılötesi ışık veren LED’ler için ise 5 mA ile 350 mA arasında değişmektedir [27]. Özellikle aydınlatma uygulamalarında LED’in verdiği ışığın şiddetinin mümkün olduğu kadar fazla olması istenir. LED’in ışık şiddeti, içinden geçen akımla orantılı olduğundan akım arttıkça daha fazla ışık şiddeti elde edilebilmektedir.

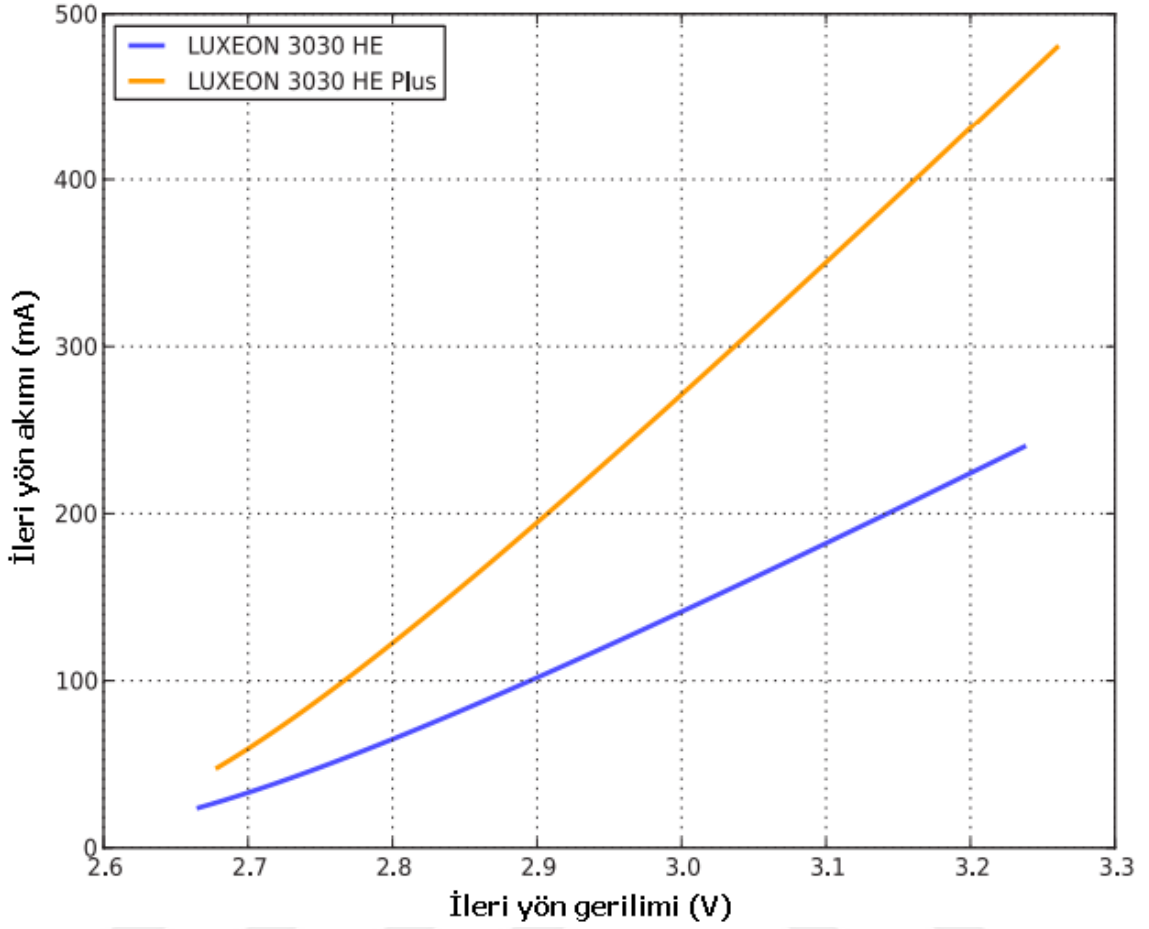
Tablo 2.2. LED'in önemli elektriksel ve optik parametreleri [27]

Parametre	Sembolü	Birimi
İleri yön akımı	I_f	mA
İleri yön gerilimi	V_f	V
Ters yön gerilimi	V_R	V
Tepe dalga boyu	λ_p	nm
Spektrum karakteristiğinin genişliği	$\Delta\lambda$	nm
Güç tüketimi	P_{tot}	mW
İletime ve kesime gitme süreleri	t_r, t_f	ns
Jonksiyon kapasitesi	C_j	pF
Işık şiddeti	I_e	mW/sr

Şekil 2.3'de kızılötesi (IR), kırmızı (R), turuncu (O), yeşil (G), sarı (Y), mavi (B), beyaz (W) ve morötesi (UV) LED'ler için akım-gerilim eğrileri kıyaslamalı olarak verilmiştir. Şekil 2.4'de ise Luxeon marka 2700-6500 °K renk sıcaklığına sahip, 3030 kılıflı, yüksek verimli LED'e ait akım-gerilim eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.3. Çeşitli renkler için LED'in akım gerilim eğrileri [30]

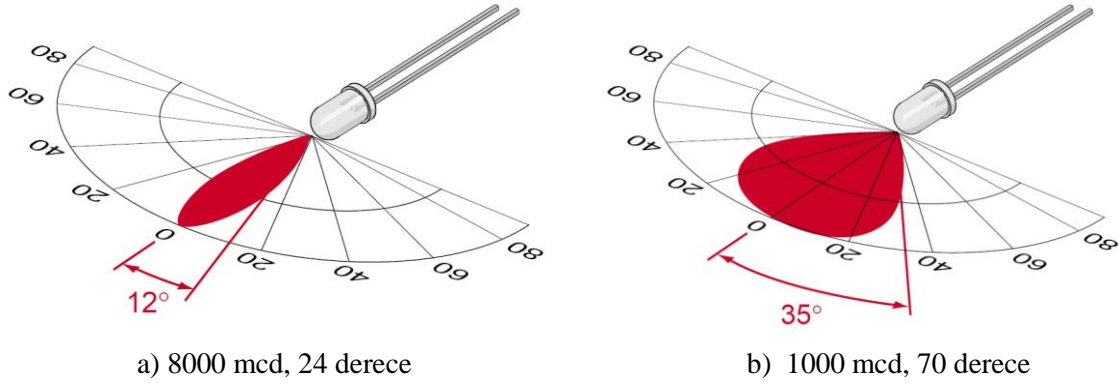


Şekil 2.4. Luxeon beyaz LED için akım gerilim eğrisi [31]

2.1.4. Işık Şiddeti, Işık Akısı ve Işıma Açısı

LED'li sistemlerde elde edilmek istenen en önemli çıktı değeri ışıktır. LED'in dış kılıfına monte edilen lens veya optik malzemeler aracılığıyla ışık şiddetini ve ışıma açısını değiştirmek mümkün olsa da toplam ışık akısı değişmez. Uygulamanın türüne göre uygun optik özelliklerde LED seçmek gerekir. Reflektörlü lambaların ve armatürlerin ışık şiddetlerinin dağılımı, bir grafik üzerinde gösterilen eğrilerle belirlenir. Bu eğrilere ışık dağılım eğrileri adı verilir ve eğriler polar koordinat sisteminde çizilir.

Aşağıda farklı ışıma açlarına sahip LED ışıma diyagramları görülmektedir. Dar açılı LED'in ışık şiddetinin geniş açılı olana göre 8 kat fazla olması nedeniyle Şekil 2.5a'daki LED göz tarafından çok daha parlak algılanacaktır. Fakat LED'lerin ürettikleri ışık akısı hesaplandığında aralarında büyük fark olmadığı ve 1 lümenlik ışık akısına sahip oldukları görülür. Görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde kullanılacak LED'lerin ışıma açılarının uygulamaya uygun şekilde seçilmesi gerekir.



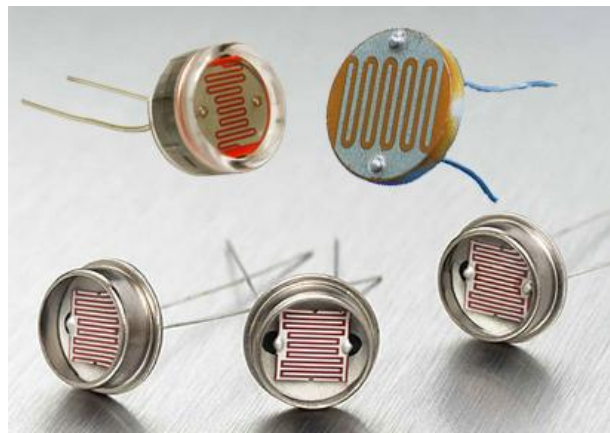
Şekil 2.5. LED'lerin ışık diyagramları [32]

2.2. Optik Alıcılar

Optoelektronik alanında devre tasarımlarında farklı tipte optik alıcılar kullanılmaktadır. Yarı iletken yapıdaki bu alıcıların çalışma prensipleri birbirinden farklıdır. Bazı uygulamalarda ışık ile direnç değerinin değişmesine ihtiyaç duyulurken, bazı uygulamalarda ışık ile orantılı akım veya gerilim bilgisi üretilmesi gerekmektedir. Aşağıda kısaca optik alıcılar hakkında bilgi verilmiştir.

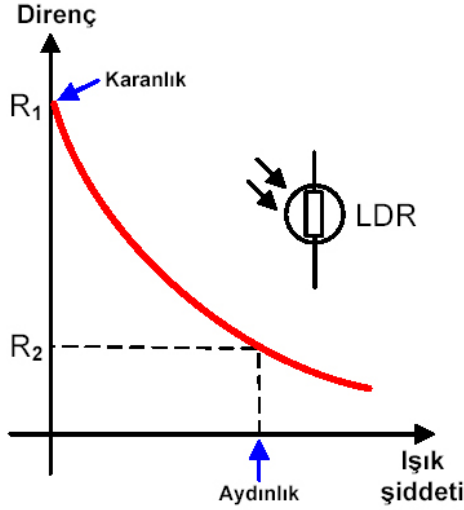
2.2.1. Işıklı Direnç Değişen Eleman

Işık şiddetine bağlı olarak direnci değişen optoelektronik devre elemanı LDR, ışığa duyarlı direnç veya foto direnç olarak adlandırılır. Şekil 2.6'da görülen görünür ışık spektrumunda çalışan LDR modellerinde genellikle kadmiyum sülfid (CdS) ve kadmiyum selenid ($CdSe$) kullanılır.



Şekil 2.6. LDR çeşitleri

Bir yarı iletken foto direncin üzerine ışık düşerse, ışığın seviyesine bağlı olarak foto direncin iletkenliği değişir. Şekil 2.7’de ışık şiddetine göre LDR direncinin değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.7. LDR karakteristiği

Şekilden görüldüğü gibi, direnç değişimi doğrusal değildir. Ortam karanlık iken LDR'nin direnci yüksek ve malzeme içindeki serbest taşıyıcı yoğunluğu düşüktür. LDR üzerine ışık düştüğünde malzeme içerisinde serbest taşıyıcılar oluşur ve taşıyıcı yoğunluğu artar. Işık şiddetine göre LDR'nin direnci birkaç ohm ile birkaç megaohm arasında değişebilmektedir. Bu nedenle aydınlık ve karanlık ortamlarda yapılan ölçümler arasında büyük fark vardır. Uygun tasarlanmış elektronik devreler ile direnç değerindeki bu değişim algılanabilir.

LDR'nin önemli bir dezavantajı tepki süresinin uzun olmasıdır. Rise time ve fall time olarak adlandırılan yükselme ve düşme zamanları genellikle ms seviyesindedir ve yüksek hızlı haberleşme sistemleri tasarımında kısıtlayıcı bir etkiye sahiptir. Bu nedenle görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde LDR kullanımı uygun olmamaktadır.

2.2.2. Fotovoltaik Hücre

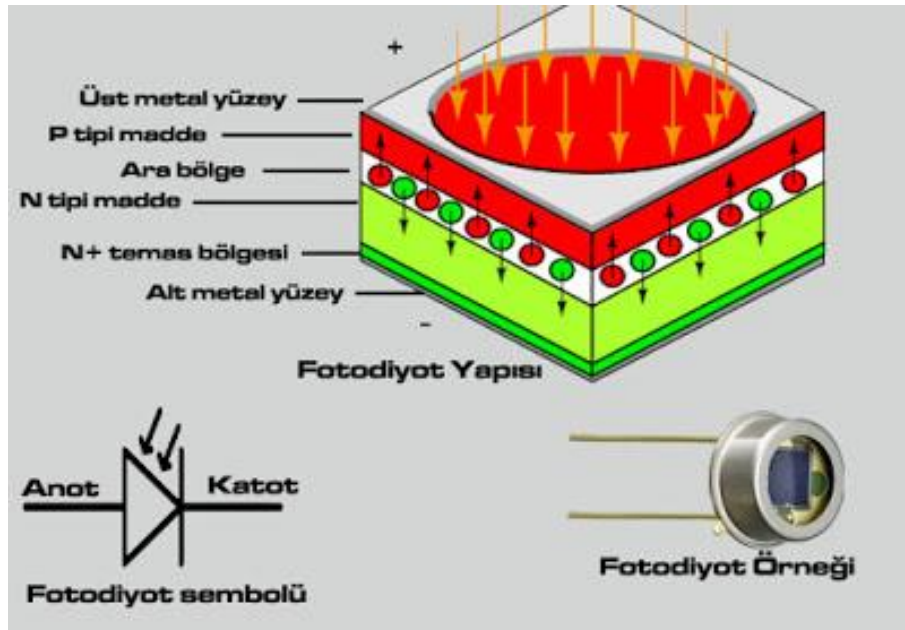
Fotovoltaik güneş pilleri, güneşten yeryüzüne ulaşan ışınlarla elektrik enerjisi üretir ve kısaca PV olarak adlandırılır. Fotovoltaik sistemler, yarı iletken özellikteki güneş hücrelerinden oluşur. Geometrik şekilleri kare, dikdörtgen ve daire gibi farklı şekillerde olabilir. Güneş hücresi yapımında en çok tercih edilen yarı iletken malzemeler silisyum, amorf silisyum, kadmiyum tellür, bakır indiyum selenid (CIS), bakır indiyum galyum selenid (CIGS) olabilmektedir. Bir fotovoltaik hücrenin çalışma mantığı, hücrelerin ara yüzüne gelen fotonların elektron koparması ve dış yörüngede bu elektronların hareket etmesi esasına dayanır. Fotovoltaik hücrenin çıkış

gerilimi yaklaşık olarak 0.5 Volt seviyesindedir. Mono kristal silisyum malzemeler, güneş pillerinin üretiminde yüksek verim sağlayan malzemelerden biri olsa da, üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle poli kristalli malzemeler daha yaygın kullanılmaktadır.

Görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde optik alıcı olarak fotovoltaiik hücreler kullanılabilir. Panel çıkışındaki gerilim seviyesi, uygun kuvvetlendiriciler ile yükseltildikten sonra filtreleme ve demodülasyon işlemleri ile bilgi sinyalinin elde edilmesi mümkündür.

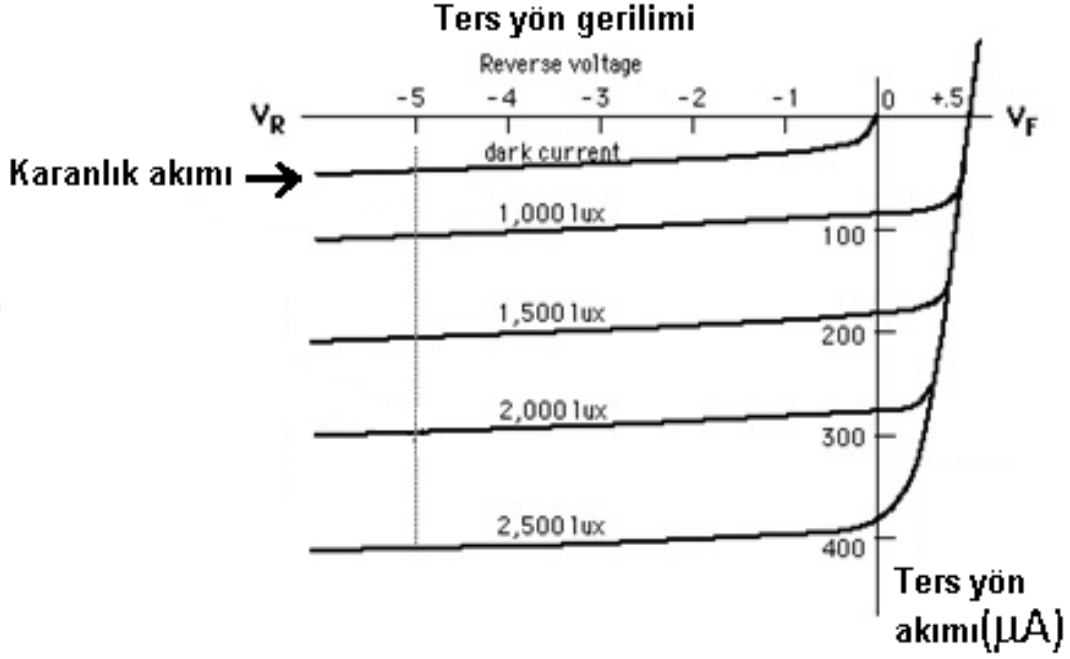
2.2.3. Fotodiyot

Fotodiyot, ışığı elektrik akımına veya voltaja dönüştürmek için kullanılan bir tür ışık dedektörüdür. Fotodiyotlar ters yönde biaslandığında üzerine düşen ışıkla sızıntı akımı değişen yarı iletken devre elemanıdır. Bir fotodiyot, ışığa karşı çok hassastır ve ışık yüzeyine çarptığında, onu hemen bir elektrik akımına dönüştürür. İleri yönde biaslama ile normal diyot gibi çalışır [33]. Bu tip diyot, optik filtreler, dahili lensler ve yüzey alanlarından oluşur. Bu diyotta, dış yüzey arttıkça tepki süresi daha yavaştır [34]. Fotodiyot da diyot gibi bir P-N jonksiyonu olduğundan yarıiletken diyodun elektriksel davranışı hakkında bilinenler fotodiyot için de geçerlidir. Jonksiyon üzerine düşen ışık şiddeti arttığında P-N yüzey birleşimindeki direnç azalır ve fotodiyot üzerinden geçen akım artar. Benzer şekilde ışık şiddeti azaldığında P-N yüzey birleşimindeki direnç artar ve fotodiyot üzerinden geçen akım azalır [35]. Şekil 2.8’de fotodiyot yapısı görülmektedir.



Şekil 2.8. Fotodiyot yapısı [36]

Fotodiyot üzerine ışık düşmediği durumda, fotodiyottan akan akım ısı yoldan üretilmiş olan azımlık taşıyıcılarının oluşturduğu akımdır. Bu akıma karanlık akımı (dark current) denir. Fotodiyot üzerine düşen ışık arttıkça, ters yön akımı da artar. Şekil 2.9'da farklı aydınlık seviyeleri için ters yön gerilimine bağlı ters yön akımının değişimi verilmiştir.



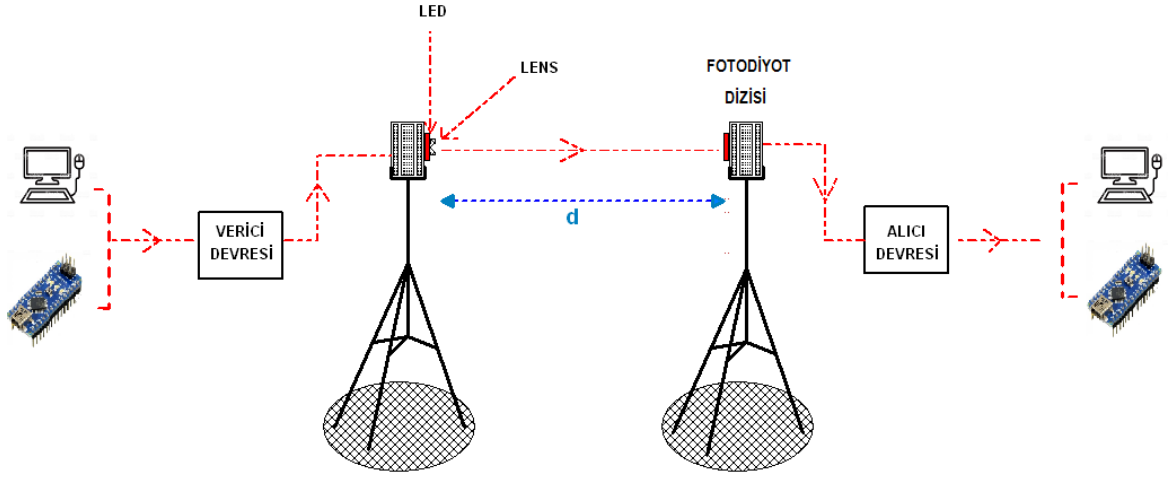
Şekil 2.9. Fotodiyot ters yön karakteristiği [37]

Fotodiyodun tepki süresi LDR'den daha küçüktür. Örneğin LDR için ms seviyesinde olan tepki süreleri, fotodiyot için ns seviyelerindedir. Fotodiyot ışıktaki değişimlere karşı hızlı tepki verdiği için, görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde optik alıcı olarak fotodiyot tercih edilmektedir.

3. DONANIM TASARIMI

3.1. Optik Haberleşme Sisteminin Genel Yapısı

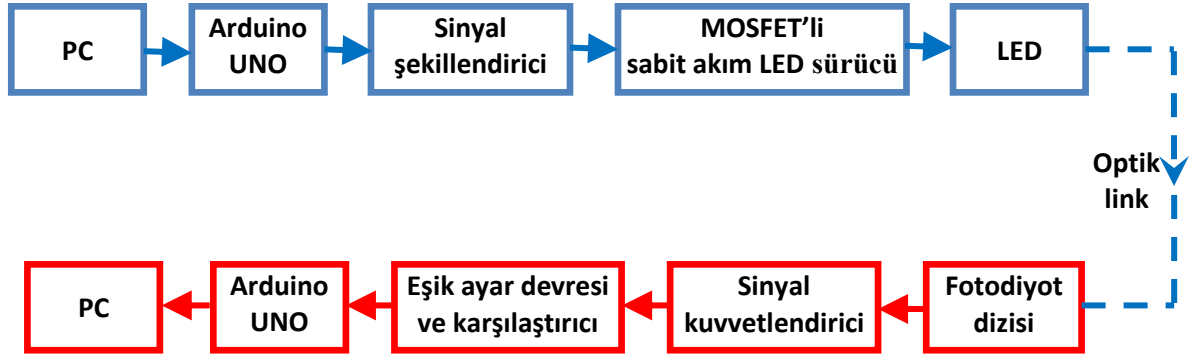
Tez kapsamında tasarlanan görünür ışık haberleşme sisteminde optik verici ve optik alıcı olmak üzere iki ayrı ünite bulunmaktadır. Her iki ünite mikrodenetleyici kontrollüdür. Verici ve alıcı tarafında birer kişisel bilgisayar bulunmaktadır. Verici üniteye bağlı bilgisayardan gönderilen metin belgesi, resim ya da video dosyasının alıcı üniteye bağlı bilgisayarın ekranına iletilmesi hedeflenmektedir. Optik verici ve alıcı üniteleri tripod (uçayak) mekanizması üzerine monte edilmiştir. Prototip sistemin genel görünümü Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Sistemin genel görünümü

Verici kısmında yüksek ışıksal etkinliğe sahip yeni nesil power LED ve ışınma açısını değiştirmek amacıyla LED kılıfıyla uyumlu lens kullanılmıştır. Farklı dalga boylarında sistemin davranışını görebilmek amacıyla verici devresine kırmızı, mavi, yeşil, beyaz, günışığı LED’ler bağlanabilmektedir. Lens açıları 8, 16, 30, 45, 60 derece seçilebilmektedir. Alıcı ünitesi üzerinde ise 2x2, 3x3 veya 4x4 formunda dizilmiş fotodiyot dizisi yer almaktadır.

Bilgi aktarma amacıyla verici ve alıcı kısmında Arduino UNO ve veri paketlerinin izlenmesi amacıyla seri monitör (serial monitor) arayüzü kullanılmıştır. Şekil 3.2’de sistemin blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.2. Sistemin blok şeması

Sistemin tasarımında kullanılan power LED'ler, lensler ve fotodiyotlardan oluşan optik bileşenler Şekil 3.3'de görülmektedir. Power LED'lerin montajında termal macun ve alüminyum PCB kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Optik bileşenler

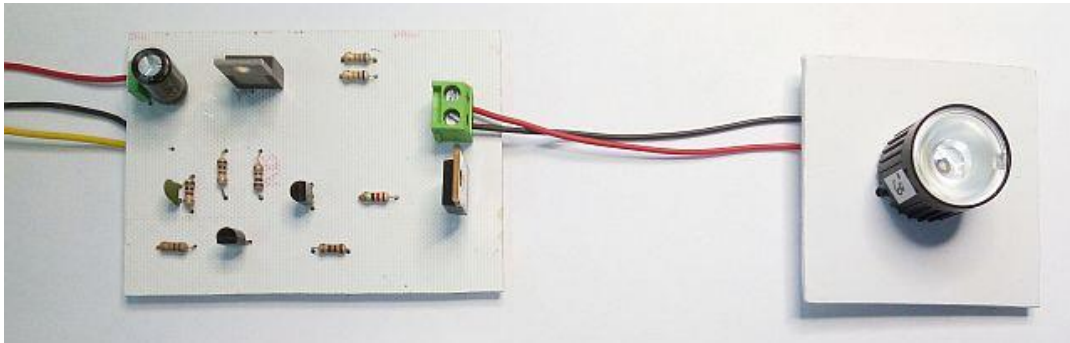
Optik alıcı kısmında farklı sayılarda BPW34 serisi fotodiyotlar ile oluşturulan fotodiyot dizileri bulunmaktadır. Testler sırasında kullanılmak üzere paralel bağlı 4, 9 ve 16 fotodiyottan oluşan 2x2, 3x3, 4x4 formunda alıcı üniteler yapılmıştır. Şekil 3.4'de dizi yapıları görülmektedir.

Devredeki eleman değerleri, en yüksek veri iletim hızını elde etmek üzere sinyal dalga şekilleri osiloskop ile izlenerek belirlenmiştir. Q1 transistörü olarak BC107, BC109, BC237, BC238, BC547 ve BC337 ile denemeler yapıldığında, en iyi sonuç BC337 ile alınmıştır. Q1 transistörünün kolektör ucunun toprağa göre gerilimi ölçüldüğünde, 100 kHz'lik giriş sinyali için zaman gecikmesi 200-300 ns civarında iken BC337 kullanıldığında 100 ns gecikme elde edilmiştir. Q3 MOSFET'i için IRF510, IRFZ44N, IRF840, IRL540N, ZXMN20B28KTC ile denemeler yapıldığında, anahtarlama sırasında oluşan zaman gecikmesi IRF510 ile en düşük seviyede kalmıştır. Osiloskop ile MOSFET'in drain ucunun toprağa göre gerilimi ölçüldüğünde, 100 kHz'lik giriş sinyali için giriş ile çıkış arasındaki zaman gecikmesi IRF510 kullanıldığı durumda 500 ns elde edilmiştir. Bu değer IRF840 için 1 μ s, IRL540N için 2.6 μ s ölçülmüştür. Girişteki 1 nF kapasiteli C1 kondansatörü yokken 100 kHz frekanslı giriş sinyali için giriş-çıkış zaman gecikmesi 1.75 μ s olurken, 1 nF'lık kondansatör varken bu süre 500 ns seviyesinde kalmaktadır. Böylece eleman değerlerinin veri iletim hızına büyük oranda etkilerinin olduğu ve parametreleri doğru seçilmiş elemanlarla tasarım yapılmasının büyük önem arzettiği görülmüştür.

Devredeki R7 direnci ile LED akımının tepe değeri ayarlanabilmektedir. Direnç değeri 3.4 ohm seçildiğinde, LM338 katalogunda belirtilen $1.25/R$ formülüne göre akım değeri 367 mA elde edilmiştir. Bu değer power LED'in güvenli çalışması için uygundur.

Alıcı devresinin girişine pozitif sinyal uygulandığında Q1 ve Q2 iletime geçerek MOSFET'in gate ucuna darbe (pals) uygular. MOSFET'in iletime geçmesiyle, tepe akım değeri sabit olacak şekilde power LED'den darbeli bir akım geçer.

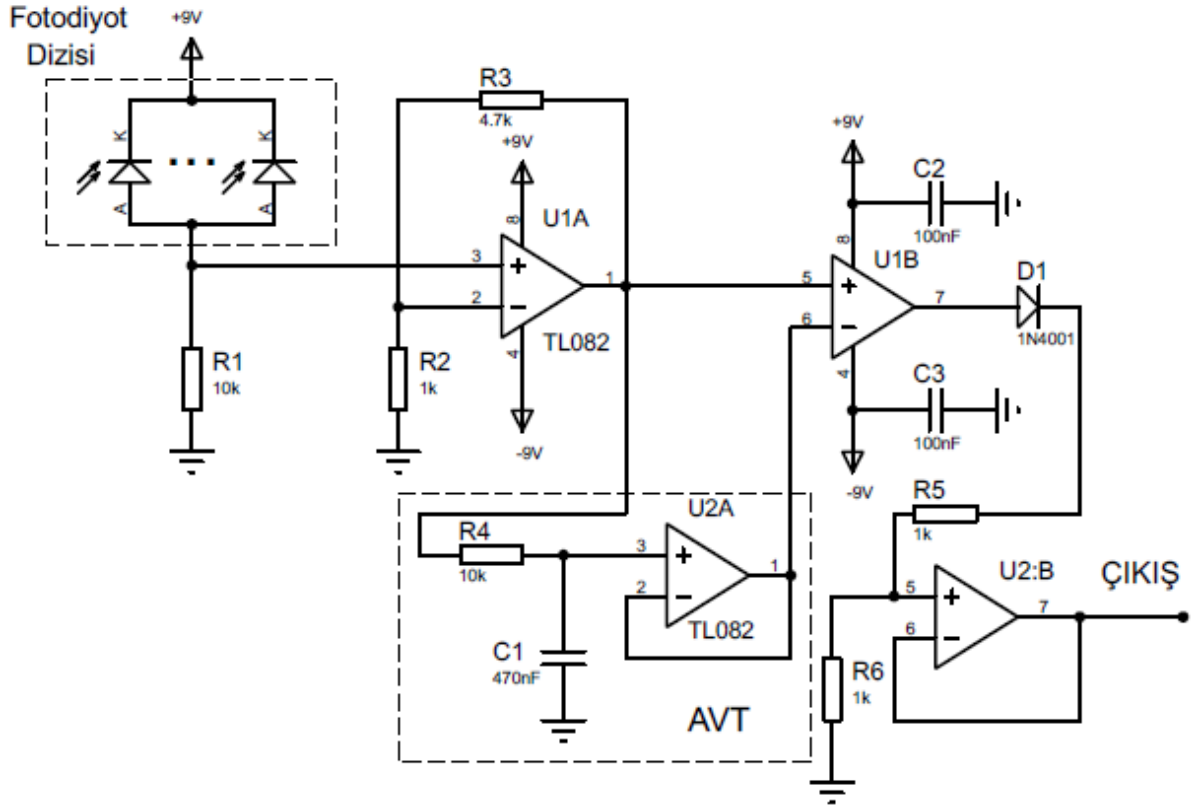
şekil 3.6'da optik verici devresinin monte edilmiş hali görülmektedir.



şekil 3.6. Verici devresinin genel görünümü

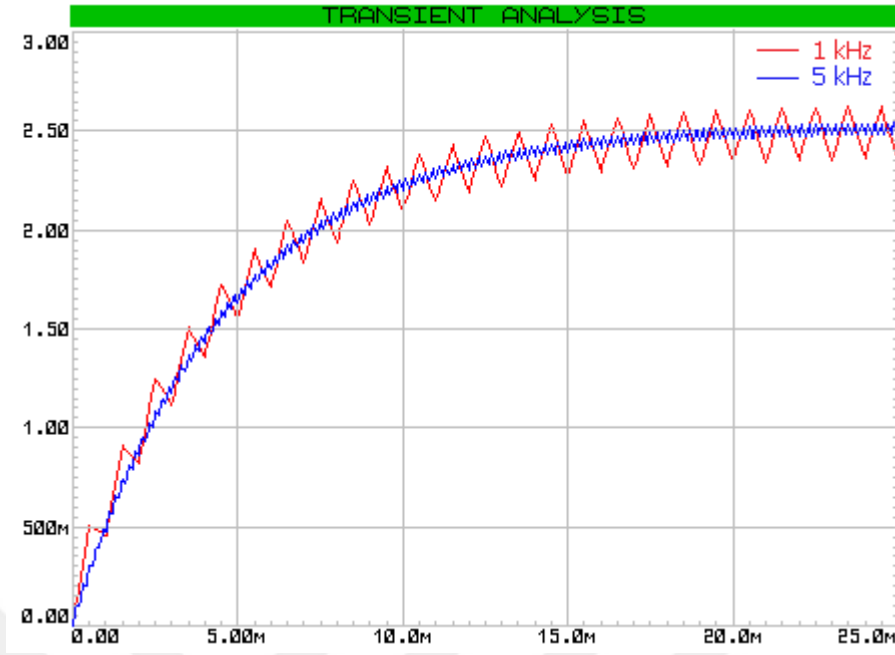
3.3. Mikrodenetleyici Kontrollü Alıcı Tasarımı

şekil 3.7'de optik alıcı devresi görülmektedir. Devrede BPW34 fotodiyot dizisi, TL082 opamp ile tasarlanan ters çevirmeyen kuvvetlendirici, ortalama gerilim izleyici (Average Voltage Tracking, AVT), karşılaştırıcı ve tampon (buffer) birimleri bulunmaktadır.



Şekil 3.7. Optik alıcı devre şeması

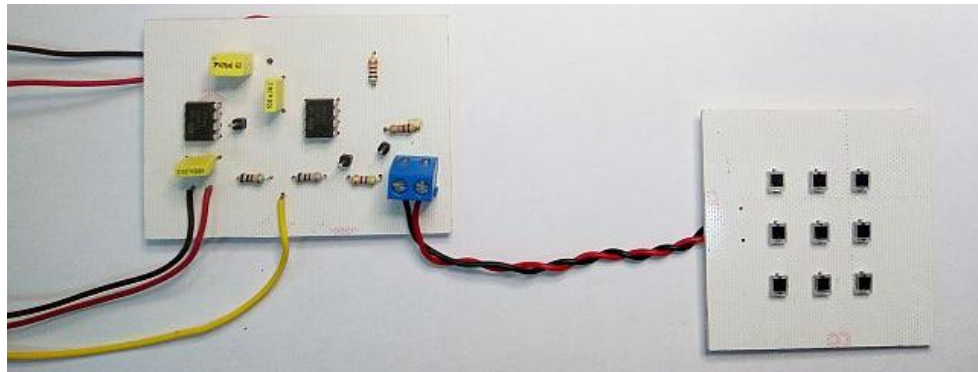
Devredeki R1 direnci yardımıyla fotodiyodun ters yönde biaslanması sağlanmıştır. Fotodiyot üzerine düşen ışığın yoğunluğuna bağlı olarak ters yön sızıntı akımı değiştiğinden, R1 uçlarındaki gerilim optik bilgi sinyalinin formundadır. Sinyal genliği düşük olduğu için öncelikle U1A ve R2, R3 dirençleri yardımıyla $1+R3/R2$ formülüne göre sinyal 5.7 kat kuvvetlendirilmiştir. U1A opampının çıkışındaki sinyal hem U1B karşılaştırıcısının (+) girişine, hem de AVT devresinin girişine uygulanmıştır. R4 ve C1'den oluşan RC integratör devresi, AVT girişine uygulanan sinyalin ortalama değerini almaktadır. Şekil 3.8'de RC integratör devresinin davranışı gösterilmiştir. Girişe 5 V genlikli 1 kHz ve 5 kHz frekanslı iki farklı kare dalga sinyal sırayla uygulandığında, kondansatör uçlarındaki gerilimin 20 ms gecikmenin ardından girişin ortalama değeri olan 2.5 V seviyesini yakaladığı geçici rejim analizi sonucunda görülmektedir. Giriş frekansı 1 kHz seçildiğinde dalgalanma 250 mV iken, 5 kHz seçildiğinde 50 mV olmaktadır. Li-Fi sistemlerinde alıcıya ulaşan sinyal frekansı çok daha yüksek seviyelerde olduğundan AVT devresinin çıkışındaki dalgalanmanın birkaç mV civarında olması beklenir.



Şekil 3.8. İntegratörün geçici rejim cevabı (0-25ms)

U1B opampı ile oluşturulan karşılaştırıcı devresi, (+) uca uygulanan analog sinyal ile (-) uca uygulanan ortalama değeri karşılaştırmaktadır. Ters çevirmeyen girişin gerilim seviyesi ters çeviren girişin gerilim seviyesinden büyük olduğunda U1B çıkışı +Vcc, tersi durumda -Vcc olmaktadır. D1 diyodu yardımıyla sinyalin negatif alternansı çıkışa yansıtılmamaktadır. R5, R6 gerilim bölücü dirençleri ve U2B tampon devresi ile karşılaştırıcı devresinin çıkışındaki +Vcc seviyesindeki gerilim, $(V_{cc}-0.7)/2$ seviyesine düşürülmüştür. Besleme geriliminin 9 V olması durumunda çıkış genliği 4 V seviyelerinde olmaktadır.

Şekil 3.9’da alıcı devresine ait PCB tasarımları görülmektedir.



Şekil 3.9. Alıcı devresinin genel görünümü

Verici alıcı devrelerinin tripod mekanizması üzerine monte edilmiş hali Şekil 3.10’da görülmektedir.



Şekil 3.10. Verici-alıcı sisteminin genel görünümü

Şekil 3.11’de testler sırasında kullanılan laboratuvar ölçüm cihazları görülmektedir.

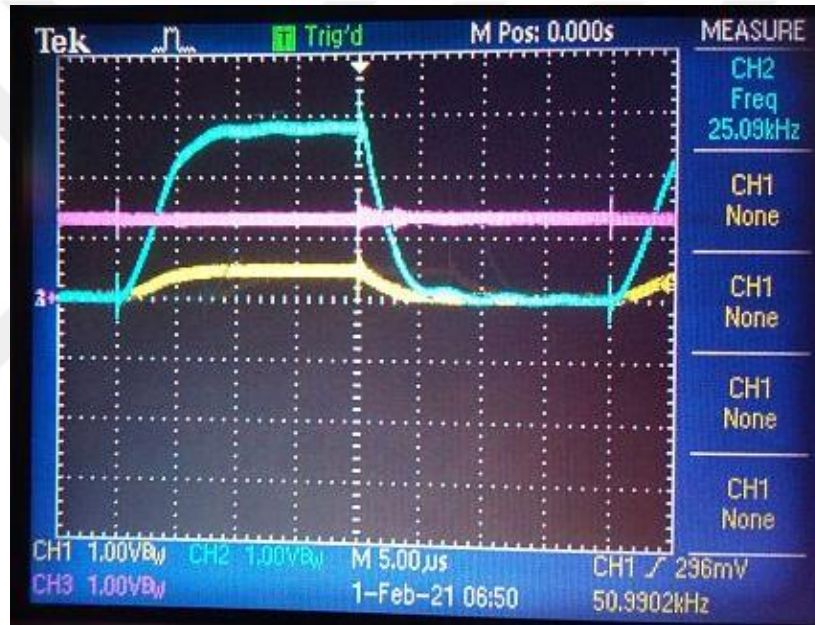


Şekil 3.11. Ölçüm cihazları

Verici ve alıcı devrelerinin beslenmesi için AATECH APS-3303DD ve SANTECH 33010 model güç kaynakları, TTL sinyal gönderme testleri için GWINSTEK SFG-212 model sinyal jeneratörü, dalga şekillerini izlemek için TEKTRONIX TPS 2024 model osiloskop kullanılmıştır.

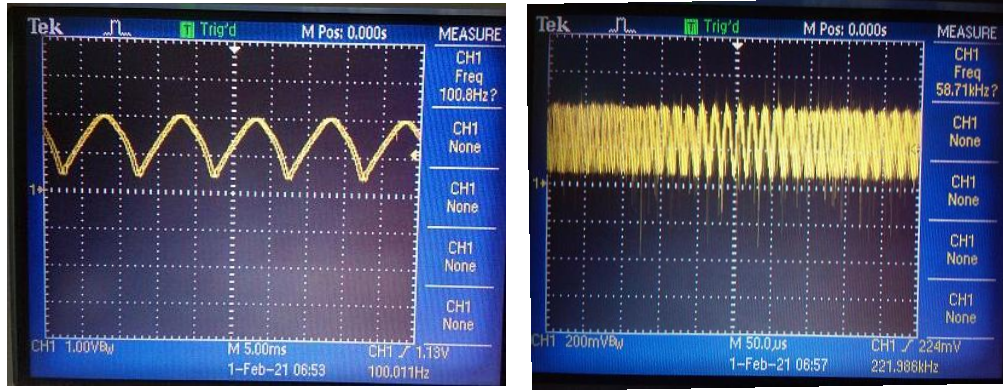
3.4. Dalga Şekilleri

Verici devresinin girişine 25 kHz frekanslı kare dalga uygulandığında, alıcı devresindeki 3 farklı noktadaki gerilim dalga şekilleri Şekil 3.12'deki gibi olmaktadır. Ölçümler sırasıyla R1 direnci uçlarından (CH1), kuvvetlendirici çıkışından (CH2) ve ortalama gerilim izleyici (CH3) çıkışından yapılmıştır.



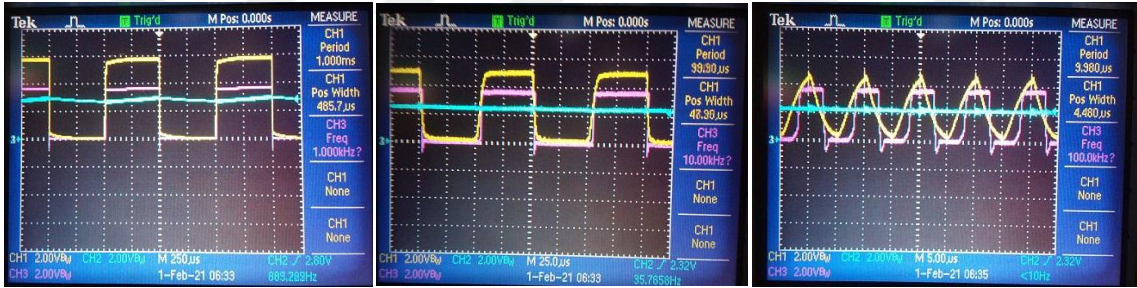
Şekil 3.12. Alıcı devresi dalga şekilleri

Ortamdaki yapay ışık kaynaklarının alıcı devresi üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler, Şekil 3.12'de görülmektedir. Verici devresi çalışmadığı durumda, ortamdaki 4x18W floresan armatürün ve lineer LED armatürün yaydığı ışıkların fotodiyot üzerine düşmesi sonucu, kuvvetlendirici çıkışında görülen dalga şekilleri sırasıyla Şekil 3.13 a ve b'deki gibi gözlenmektedir. Görüldüğü gibi floresan armatür 100 Hz frekanslı değişim oluştururken, lineer LED armatür 58 kHz frekanslı değişim oluşturmaktadır.



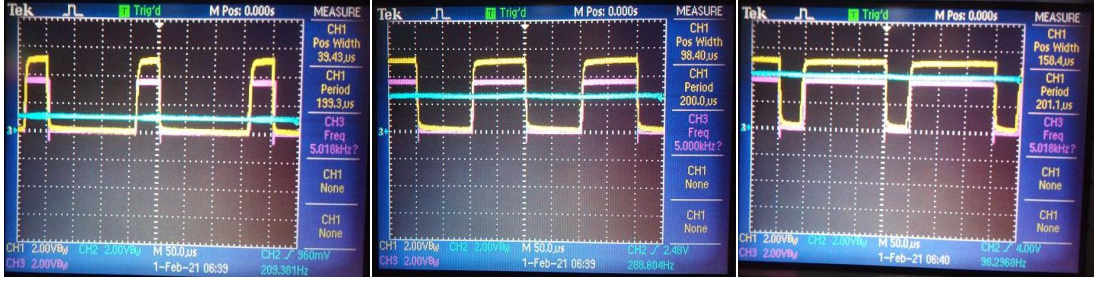
Şekil 3.13. Ortamdaki armatürlerin etkisi a) Floresan armatür b) LED armatür

Şekil 3.14’de verici devresindeki sinyal jeneratörü sırasıyla 1 kHz, 10 kHz ve 100 kHz frekanslı kare dalga sinyal ürettiğinde, ortamda harici ışık kaynağı olmadığı durumda alıcı devresinde elde edilen dalga şekilleri görülmektedir. Kuvvetlendirici çıkışındaki sinyal ile ortalama gerilim izleyici devresinin çıkışındaki yavaş değişen sinyal karşılaştırıcı ile kıyaslanmaktadır. Frekans değeri 1-100 kHz aralığında değiştirilmesine rağmen, karşılaştırıcı çıkışında vericideki sinyal frekansı ile aynı frekansta kare dalga sinyal üretildiği görülmektedir. Bu durum AVT devresinin eşik gerilimini otomatik ayarlaması sayesinde olmaktadır.



Şekil 3.14. Sinyal frekansına bağlı değişen dalga şekilleri

Şekil 3.15’de sinyal jeneratörünün ürettiği kare dalganın görev periyodu 0.2, 0.5 ve 0.8 seçilmesi durumunda alıcı devresindeki ölçüm noktalarından gözlenen dalga şekilleri verilmiştir. 5 kHz frekanslı kare dalga için ortalama gerilim izleyici (AVT) devresinin farklı görev periyotlu sinyallere göre ortalama değeri otomatik olarak izlediği ve karşılaştırıcı devresinin bu eşik gerilimine göre çıkış ürettiği görülmektedir.

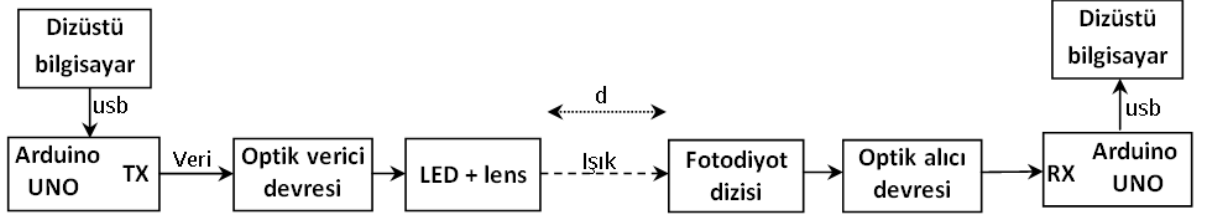


Şekil 3.15. Görev periyoduna bağlı değişen dalga şekilleri

Verici devresindeki LED'in fotodiyot dizisine ilettiği ışık dışında, harici bir ışık kaynağı tarafından üretilen titreşimsiz bir ışık sisteme ulaştığında devrenin çalışmasında bir problem oluşmamaktadır. Alıcı devresinin çıkışı belirli bir frekansta kare dalga üretirken, fotodiyot dizisi üzerine harici bir ışık kaynağı yardımıyla farklı yoğunlukta ışıklar düşürüldüğünde, AVT devresinin yeni duruma göre eşik gerilimi değerini hızla değiştirdiği ve her durumda alıcı devresinin çıkışında kare dalga sinyal olduğu gözlenmiştir. Bu test yoğun gün ışığı altında yapıldığında fotodiyotlar saturasyona girdiğinden dolayı alıcı çıkışındaki sinyal bozulmaktadır. Li-Fi sistemlerinin temel bir sorunu günışığından kaynaklanan sinyal bozulmaları olup tez kapsamında bu durum dikkate alınmamıştır.

4. TESTLER

Tasarlanan görünür ışık haberleşme sisteminin performansını gözlemek amacıyla Arduino tabanlı bilgi gönderme ve alma devresi kullanılarak çeşitli testler yapılmıştır. Lens açısının, fotodiyot dizi boyutunun, LED ışık şiddetinin ve haberleşme hızının verici-alıcı arasındaki mesafeye etkileri incelenmiştir. Şekil 4.1’de test sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 4.1. Test sisteminin blok şeması

Verici ve alıcı kısmında birer dizüstü bilgisayar bulunmaktadır. Arduino arayüz programında verici ve alıcı ünite için Şekil 4.2’de verilen programlar yazılmıştır.

```
verici
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  Serial.println("lifi - yüksek lisans tezi ");
  delay(1);
}

alici
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  String gelen = "";
  if (Serial.available()>0){
    gelen = String(char(Serial.read()));
  }
  Serial.print(gelen);
}
```

Şekil 4.2. Verici ve alıcı için Arduino programları

Veri olarak “lifi – yüksek lisans tezi “ adlı karakter dizisi belirlenmiştir. Vericideki Arduino 1 ms aralıkla bu diziyi optik verici devresinin girişine göndermektedir. Haberleşme hızı için her iki programda aynı bps değeri girilmektedir. Alıcı kısmındaki Arduino sürekli olarak seri porttan veri gelip gelmediğini kontrol etmekte, alınan verileri string türündeki “gelen” isimli diziye yazmaktadır. Alınan veri paketi Şekil 4.3’de görüldüğü gibi seri monitör aracılığıyla bilgisayar ekranından izlenebilmektedir. Bu ekran görüntüsü, veri paketinde ortaya çıkan bozulmalar ve düzgün veri akışı durumu hakkında bilgi vermektedir. Böylece test sırasında

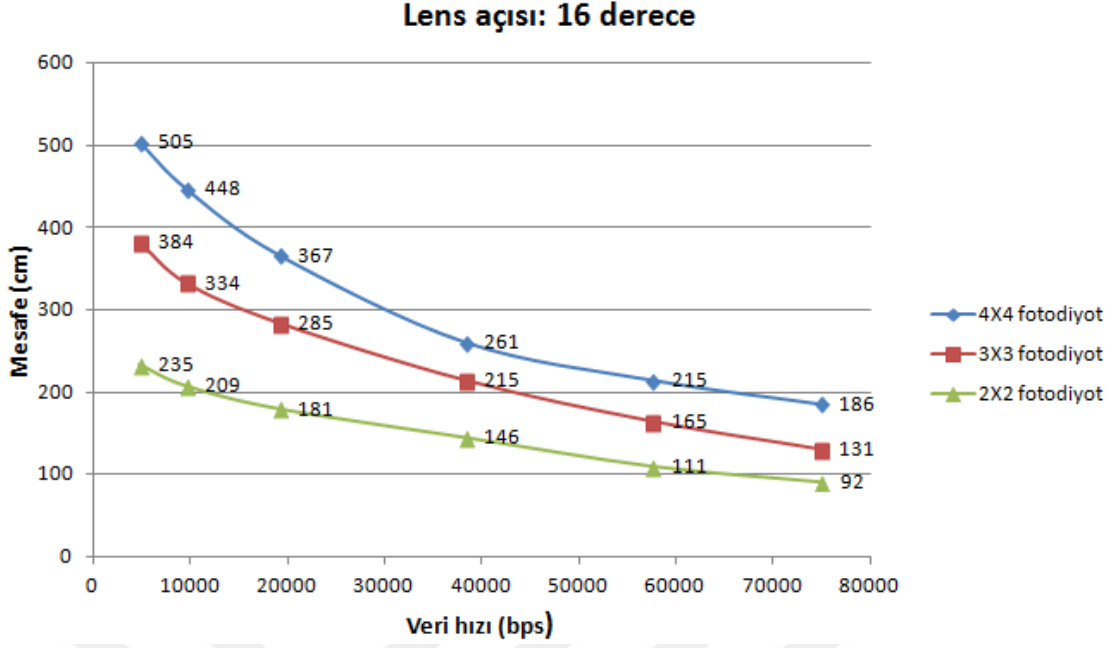
Tablo 4.1’de 1W gücünde 6500 °K beyaz ışık yayan power LED ve 16 derecelik lens kullanıldığı durum için test sonuçları verilmiştir. Haberleşme hızına bağlı olarak haberleşme mesafesinin değişimi 3 farklı fotodiyot dizisi için ölçümler yoluyla belirlenmiştir. Tablodaki mesafe değerleri, alıcı ünitenin bağlı olduğu seri monitör ekranından izlenen veri paketinin ardarda hatasız şekilde alındığı en uzak değer olarak not edilmiştir.

Tablo 4.1. 16 derece lens için ölçüm sonuçları

Veri hızı (bps)	Haberleşme mesafesi (cm)		
	4x4 fotodiyot dizisi	3x3 fotodiyot dizisi	2x2 fotodiyot dizisi
74880	186	131	92
57600	215	165	111
38400	261	215	146
19200	367	285	181
9600	448	334	209
4800	505	384	235

Tablo 4.1’deki değerler kullanılarak veri hızına bağlı mesafenin değişim çizdirilmiştir. Şekil 4.4’deki grafiklerden görüldüğü gibi veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurulabilmektedir. 4800 bps’de 4x4 fotodiyot dizisi ile yaklaşık 5 metre mesafeden haberleşme kurulabilirken, 2x2 fotodiyot dizisi ile mesafe 2.35 m olmaktadır.

Testler sırasında ortam karanlık olup, harici bir ışık kaynağı bulunmamaktadır. Ayrıca verici devresindeki LED akımını sınırlayan R7 direnci 3.4 ohm yerine 110 ohm kullanılarak LED akımının maksimum değerinin 11.3 mA olması sağlanmıştır. Düşük akım değeri sayesinde mesafe testini 6 m x 6 m ölçülerindeki bir oda içerisinde gerçekleştirmek mümkün olmaktadır. Grafikten görüldüğü gibi fotodiyot dizi boyutunun artması mesafeyi arttırmaktadır. 74880 bps değerinden sonra veri paketinin doğru alınabildiği mesafe önemli oranda düştüğünden tabloda bu hızlara yer verilmemiştir.



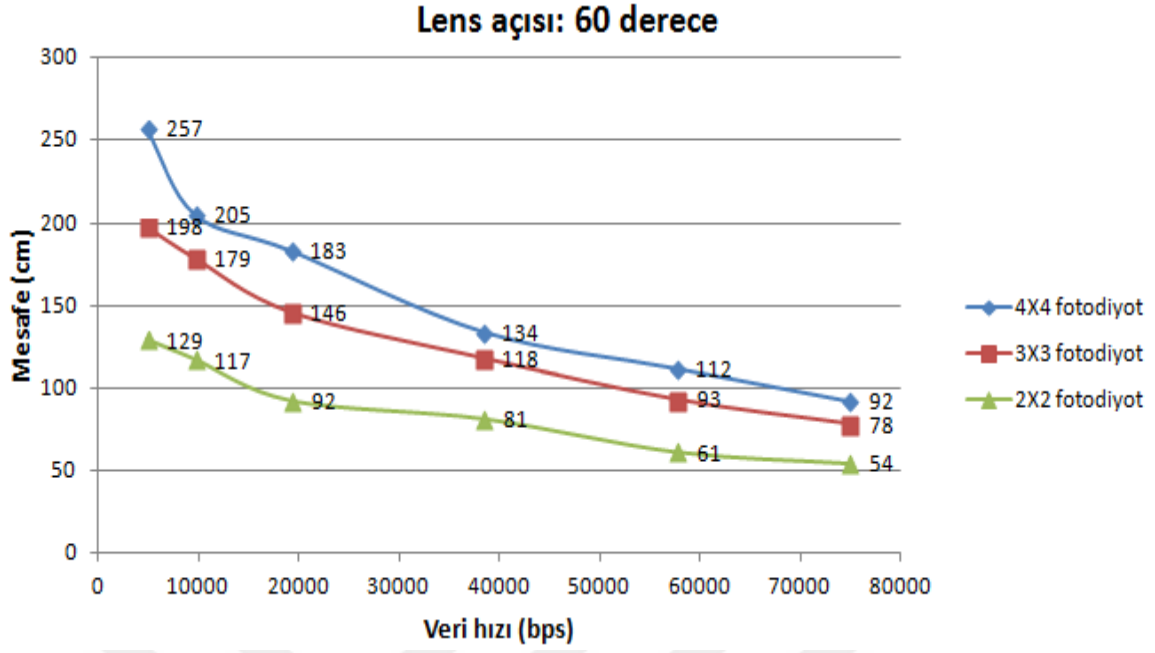
Şekil 4.4. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değimi (16 derece lens ile)

Tablo 4.2’de 60 derecelik lens ile yapılan test sonuçları verilmiştir. Mesafe değerlerinin dar açılı lens ile yapılan testlere göre düştüğü görülmektedir. Örneğin 4800 bps’de 16 derece lens ile 505 cm olan mesafe değeri 60 derece lens ile 257 cm olmuştur.

Tablo 4.2. 60 derece lens için ölçüm sonuçları

Veri hızı (bps)	Haberleşme mesafesi (cm)		
	4x4 fotodiyot dizisi	3x3 fotodiyot dizisi	2x2 fotodiyot dizisi
74880	92	78	54
57600	112	93	61
38400	134	118	81
19200	183	146	92
9600	205	179	117
4800	257	198	129

Şekil 4.5’de grafik olarak değişimler görülmektedir. Önceki test sonuçlarına benzer şekilde, veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurmak mümkün olmaktadır.



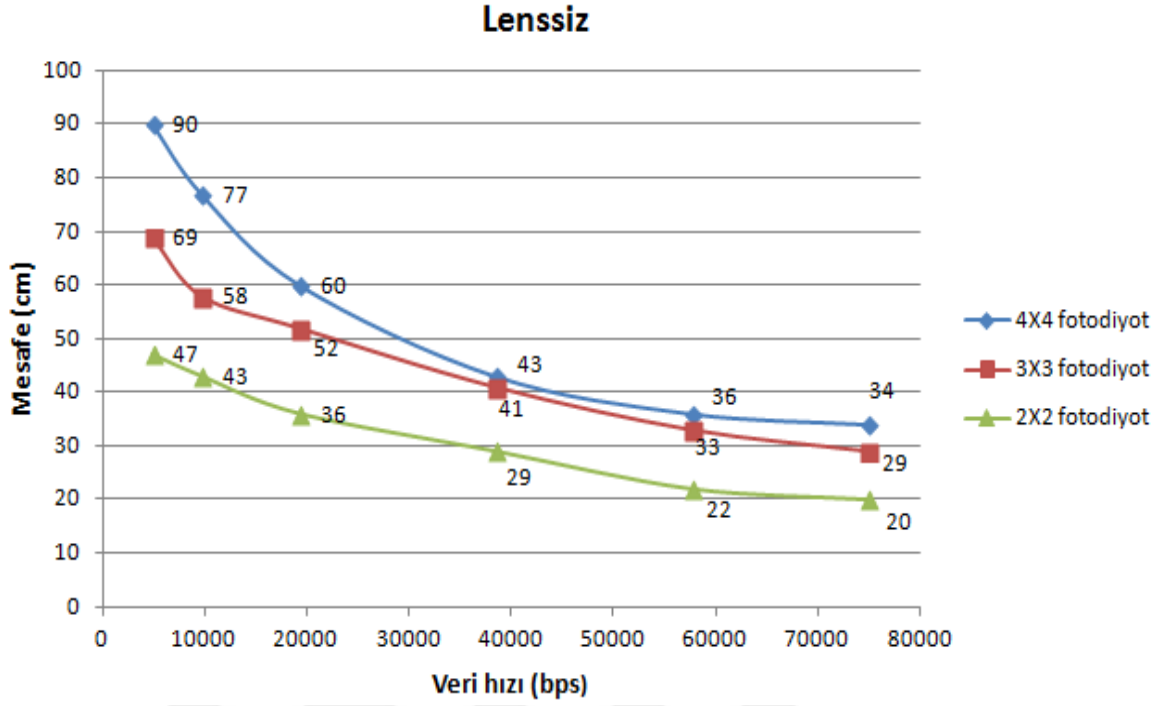
Şekil 4.5. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (60 derece lens ile)

Tablo 4.3’de lens kullanılmadığı durumda test sonuçları verilmiştir. LED’in ışınma açısı 120 derece civarında olduğundan, ışığın geniş açıyla ortama yayılması durumunda mesafe değerlerinin diğer test sonuçlarına göre büyük oranda düştüğü gözlenmiştir. 4800 bps’de 16 ve 60 derece lens ile sırasıyla 505 cm ve 257 cm olan değer, lenssiz durumda 77 cm olmuştur.

Tablo 4.3. Lenssiz durum için ölçüm sonuçları

Veri hızı (bps)	Haberleşme mesafesi (cm)		
	4x4 fotodiyot dizisi	3x3 fotodiyot dizisi	2x2 fotodiyot dizisi
74880	34	29	20
57600	36	33	22
38400	43	41	29
19200	60	52	36
9600	77	58	43
4800	90	69	47

Şekil 4.6’da verilen grafikten görüldüğü gibi, lenssiz durumda da veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurmak mümkün olmaktadır.



Şekil 4.6. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değimi (lenssiz durum)

4.2. Fotodiyot Dizi Boyutunun Etkileri

Yukarıda verilen test sonuçları incelendiğinde, dizilerdeki fotodiyot sayılarının oranının karekökü ile mesafe değerlerinin oranı arasında bir benzerlik görülmektedir. Denklem 4.1'e göre 4x4 fotodiyot dizisindeki toplam fotodiyot sayısının, 3x3 fotodiyot dizisindeki toplam fotodiyot sayısına oranının karekökü 1.333'dür. Benzer şekilde Denklem 4.2 ve 4.3'de görüldüğü gibi 4x4'lük dizi ile 2x2'lik dizi arasındaki oran 2, 3x3'lük dizi ile 2x2'lik dizi arasındaki oran 1.5'dir.

$$\frac{16}{9} = \sqrt{\frac{16}{9}} = 1.333 \quad (4.1)$$

$$\frac{16}{4} = \sqrt{\frac{16}{4}} = 2 \quad (4.2)$$

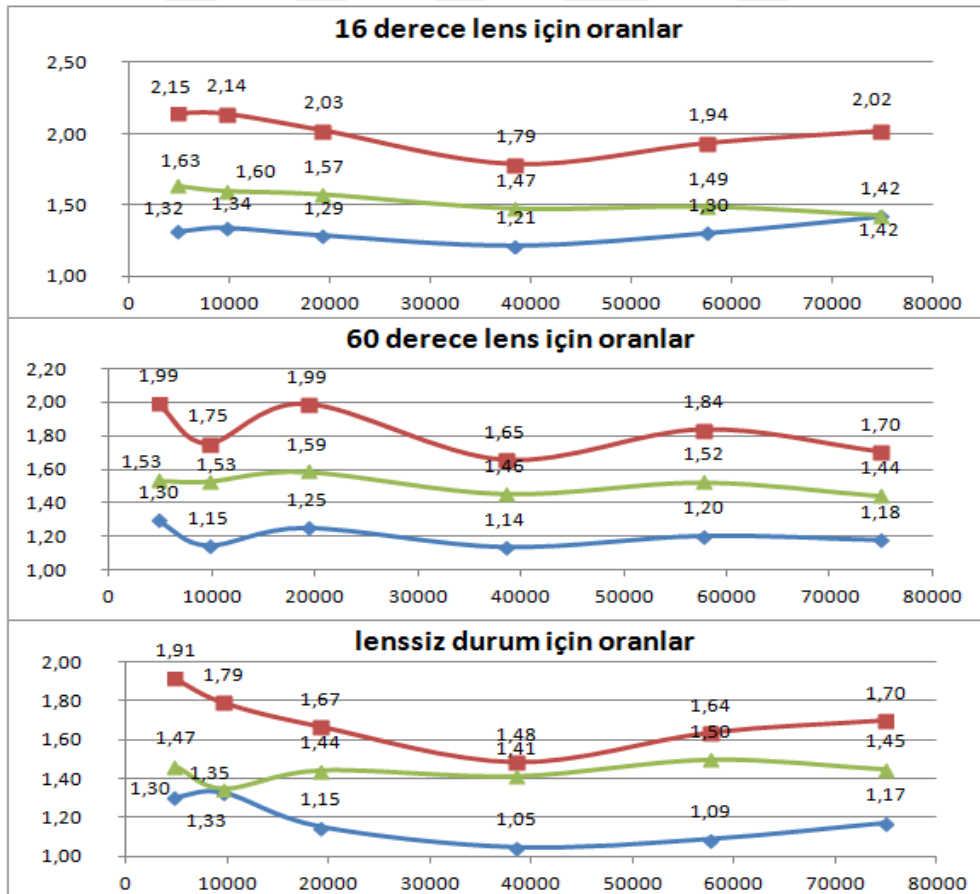
$$\frac{9}{4} = \sqrt{\frac{9}{4}} = 1.5 \quad (4.3)$$

Fotodiyot sayılarının oranı ile elde edilen katsayılar, mesafe değerlerinin oranlanması yoluyla da yaklaşık olarak elde edilebilmektedir. Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3'deki mesafe değerleri kendi içlerinde oranlandığında Tablo 4.4'deki oranlar elde edilmektedir. Bu katsayı oranlarının Denklem 4.1, 4.2 ve 4.3'de verilen oranlara yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4. Oranlar

bps	4x4 / 3x3 dizi oranı			4x4 / 2x2 dizi oranı			3x3 / 2x2 dizi oranı		Lensesiz z
	16°	60°	lensesiz	16°	60°	lensesiz	16°	60°	
74880	1.42	1.18	1.17	2.02	1.70	1.70	1.42	1.44	1.45
57600	1.30	1.20	1.09	1.94	1.84	1.64	1.49	1.52	1.50
38400	1.21	1.14	1.05	1.79	1.65	1.48	1.47	1.46	1.41
19200	1.29	1.25	1.15	2.03	1.99	1.67	1.57	1.59	1.44
9600	1.34	1.15	1.33	2.14	1.75	1.79	1.60	1.53	1.35
4800	1.32	1.30	1.30	2.15	1.99	1.91	1.63	1.53	1.47

Şekil 4.7’de bu oranların grafik hali görülmektedir. Mesafe değerlerinin tespit edilmesinde daha hassas ölçümler yapılması durumunda, oran değerlerinin denklem yoluyla elde edilen değerlere çok daha yaklaşması mümkün olacaktır. Bu katsayılar aynı zamanda ölçümlerin doğruluğunu test etmede bir parametre olarak kullanılabilir. Veya örnek olarak 2x2 fotodiyot dizisi için 4800 bps hızda mesafe değeri 129 cm ölçüldükten sonra, 4x4 fotodiyot dizisi için ölçüm yapılmadan mesafe değeri $129 \times 2 = 258$ cm olarak tahmin edilebilir.



Şekil 4.7. Mesafe değerlerinin oranı

4.3. LED Akımının Haberleşme Mesafesine Etkisi

LED akımının maksimum değeri, Şekil 3.5’de verilen optik verici devresindeki R7 direnci ile ayarlanmaktadır. Yukarıda verilen testler sırasında 110 ohm’luk direnç kullanılarak maksimum akım değerinin 11.3 mA olması sağlanmıştır. Test sonuçlarını gösteren tablolar incelendiğinde, veri haberleşme hızının en yüksek olduğu durumda haberleşme mesafesinin en kısa değerde olduğu görülmektedir. Örneğin Tablo 4.3’e göre, lens kullanılmadığı durumda 4x4 fotodiyot dizisi ile 74880 bps’de test yapıldığında haberleşme mesafesi 34 cm’dir. LED akımının haberleşme mesafesine etkisini görmek amacıyla R7 direnci 110 ohm yerine 3.4 ohm seçilmiştir. Bu durumda akımın tepe değeri 367 mA olmaktadır. Bu akım değeri ile test tekrarlandığında, sorunsuz şekilde haberleşme yapılabilen mesafenin 34 cm’den 174 cm’ye çıktığı görülmüştür. Bu değer, Li-Fi haberleşme sistemlerinde tavanda kullanılan LED armatür ile masa düzlemi arasındaki mesafeye yakın bir değer olduğundan, oda içerisinde lens kullanılmadan yüksek veri iletim hızlarında haberleşmenin mümkün olabileceği söylenebilir.

4.4. Işık Dalgaboyunun Haberleşme Performansına Etkileri

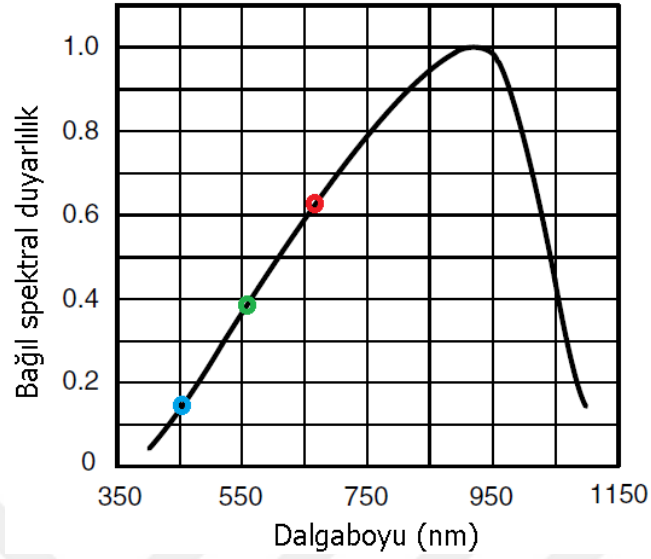
Işık dalgaboyunun etkilerini görmek amacıyla 74880 bps hızda, 4x4 fotodiyot dizisi kullanılarak 367 mA LED tepe akımı için testler yapılmıştır. Test sırasında beyaz, günışığı, kırmızı, yeşil ve mavi renkte 1W power LED’ler kullanılmıştır. Tablo 4.5’de test sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.5. Farklı renkli LED’ler ile test sonuçları

Işık rengi	Haberleşme mesafesi (cm)
Beyaz	174
Günışığı	134
Kırmızı	141
Yeşil	119
Mavi	180

Test sonuçlarına göre haberleşme mesafesinin 119 cm ile 180 cm arasında değiştiği görülmektedir. Kullanılan LED’lerin lümen seviyeleri eşit olmadığı için yapılan bu test dalgaboyunun mesafeye etkisini tam olarak kıyaslama imkanı vermemektedir. Yapılan bu testler trafik sinyalizasyonunda kullanılan kırmızı, sarı, yeşil renkli LED lambalar yardımıyla araçlara bilgi aktarılabilceğini göstermektedir. Fotodiyot dizisinde kullanılan BPW34 serisi fotodiyodun

spektral duyarlılığı incelendiğinde, Şekil 4.8’de görüldüğü gibi en yüksek hassasiyet 900 nm kızılötesi bölgesindedir.



Şekil 4.8. BPW34 fotodiyodun spektral duyarlılığı

Görünür ışık haberleşme bölgesindeki duyarlılık sıralaması büyükten küçüğe kırmızı, yeşil ve mavi şeklindedir. Yani optik verici kısmında kullanılan LED’lerin eşit lümen seviyesine sahip olması durumunda, fotodiyot üzerine düşen ışığın dalgaboyu foto alıcıda önemli derecede farklılık oluşturabilmektedir. Örneğin kırmızı renk için duyarlılık yaklaşık 0.6 iken, mavi renk için 0.15 civarındadır. Bu olumsuzluğu gidermek üzere duyarlılığın az olduğu dalgaboylarındaki LED’lerin lümen seviyeleri diğerlerinden yüksek seçilebilir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında tasarımı yapılan görünür ışıkla haberleşme sistemi, ayrıntılı bir teknik analiz içermektedir. Literatürde genellikle haberleşme protokolleri üzerinde algoritma tasarımları yer alırken, bu tezde optik verici ve optik alıcı performansını etkileyen donanım parametreleri üzerinde çalışılmıştır. Verici kısmında yer alan yeni nesil LED'lerin monokromatik olup olmaması, ışığın dalga boyu, LED'in ışın açısı, farklı açılarda lens kullanılmasının etkileri, alıcı kısmında tek bir fotodiyot veya farklı yerleşim planlarına sahip fotodiyot dizisi kullanımının etkileri incelenmiştir.

Yapılan testler sonucunda BPW34 serisi PIN fotodiyot dizisinin 2x2, 3x3 ve 4x4 yapısında olduğunda, dizi boyutlarına bağlı olarak mesafe değerinin değiştiği, fotodiyot sayısının fazla olması durumunda daha uzaktan sinyal algılanabildiği görülmüştür. Vericinin gönderdiği sinyalin saniyedeki bit sayısı (bps) arttıkça mesafe değerinin düştüğü ve mevcut tasarım ile yaklaşık 75 kbps hızlara ulaşılabildiği tespit edilmiştir. 6500 K beyaz LED kullanıldığında ve lens açısı 45 derece olduğunda iletişim mesafesinin 225cm'ye ulaştığı gözlenmiştir.

4800 bps'de 16 derece lens ve 4x4 fotodiyot dizisi ile yaklaşık 5 metre mesafeden haberleşme kurulabilirken, 2x2 fotodiyot dizisi ile mesafe 235 cm olmaktadır. 16 derece lens kullanıldığında 4800 bps'de 505 cm olan mesafe değeri 60 derece lens ile 257 cm olmuştur. Veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurmak mümkün olmaktadır. Işığın geniş açıyla ortama yayılması durumunda mesafe değerlerinin diğer test sonuçlarına göre büyük oranda düştüğü gözlenmiştir. 4800 bps'de 16 ve 60 derece lens ile sırasıyla 505 cm ve 257 cm olan değer, lenssiz durumda 77 cm olmuştur. Lenssiz durumda da veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurmak mümkün olmaktadır.

Dizilerdeki fotodiyot sayılarının oranının karekökü ile mesafe değerlerinin oranı arasında bir benzerlik tespit edilmiştir. Fotodiyot sayılarının oranı ile elde edilen katsayılar, mesafe değerlerinin oranlanması yoluyla da yaklaşık olarak elde edilebilmektedir. Bu katsayılar aynı zamanda ölçümlerin doğruluğunu test etmede bir parametre olarak kullanılabilir.

Veri haberleşme hızının en yüksek olduğu durumda haberleşme mesafesinin en kısa değerinde olduğu görülmektedir. Örneğin lens kullanılmadığı durumda 4x4 fotodiyot dizisi ile 74880 bps'de test yapıldığında haberleşme mesafesi 34 cm'dir. LED akımının haberleşme mesafesine etkisini görmek amacıyla akım regülasyonu devresindeki direnç 110 ohm yerine 3.4 ohm seçildiğinde akımın tepe değeri 367 mA olmaktadır. Bu akım değeri ile test yapıldığında mesafenin 34 cm'den 174 cm'ye çıktığı görülmüştür. Bu değer, Li-Fi haberleşme sistemlerinde tavanda kullanılan LED armatür ile masa düzlemi arasındaki mesafeye yakın bir değer olduğundan, oda içerisinde lens kullanılmadan yüksek veri iletim hızlarında haberleşmenin mümkün olabileceği söylenebilir.

Işık dalgaboyunun etkilerini görmek amacıyla 74880 bps hızda, 4x4 fotodiyot dizisi kullanılarak 367 mA LED tepe akımı için testler yapılmıştır. Test sırasında beyaz, günışığı, kırmızı, yeşil ve mavi renkte 1W power LED'ler kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre haberleşme mesafesinin 119 cm ile 180 cm arasında değiştiği görülmektedir. Kullanılan LED'lerin lümen seviyeleri eşit olmadığı için yapılan bu test dalgaboyunun mesafeye etkisini tam olarak kıyaslama imkanı vermemektedir. Yapılan bu testler trafik sinyalizasyonunda kullanılan kırmızı, sarı, yeşil renkli LED lambalar yardımıyla araçlara bilgi aktarılabilceğini göstermektedir.

Tez kapsamında yapılan incelemelerin günümüzde aydınlatma amacıyla kullanılan LED armatürlerin haberleşme performansının iyileştirilmesine ve bu konu üzerinde çalışma yapacak araştırmacılara katkı sağlayacağı öngörülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] <https://www.embedic.com/applications/details/led-visible-light-communication-led-visible-light-communication-technology-led-visible-light-communication-transmission-distance>, Erişim: 12 Ocak 2021.
- [2] D. L. Hutt, K. J. Snell, and P. A. Belanger,(1993). "Alexander Graham Bell's Photophone," Optics & Photonics News 4(6).
- [3] Arıoğlu, Ö.(2018). Çok Taşıyıcılı Görünür Işık Haberleşme İçin Sistem Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Cerrahpaşa Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- [4] Wang Hong, C., Yi-Jun, Y, (2016). A Long Distance Underwater Visible Light Communication System With Single Photon Avalanche Diode, Volume 8, Number 5, DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2602330
- [5] Li, B., Zhang, R., Xu, W., Zhao, CH., Hanzo, L.(2016).Joint Dimming Control and Transceiver Design for MIMO-Aided Visible Light Communication, Volume: 20, Issue: 11 | Journal Article | Publisher: IEEE
- [6] Wijayanto, B., Hadiyoso, S ve Renggani, R.(2019).Prototype of Visible Light Communication Transceiver Using Array Photo Transistor for Real Time Digital Media Transfer, International Conference on Electronics Representation ve Algorithm , ICERA
- [7] Goswami, P. and Shukla, M. (2017) Design of a Li-Fi Transceiver. Wireless Engineering and Technology, 8, 71-86. doi: 10.4236/wet.2017.84006.
- [8] Do, T ve Yoo, M. (2016). An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems , School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea
- [9] Saadi, M., Ahmad, T., Saleem, K. (2018).Visible Light Communication – An Architectural Perspective On The Applications And Data Rate Improvement Strategies, DOI: 10.1002/ett.3436
- [10] Rajbhandari, S., Chun, H., Faulkner, G, et al. (2015).High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations , IEEE Journal on Selected Areas in Communications , Volume: 33, Issue: 9 , Journal Article, Publisher: IEEE
- [11] Haigh, P., Ghassemlooy, Z.; Papakonstantinou, I.; Tedde, F.; Tedde, S.; Hayden, O.; Rajbhandari, S.(2013).A MIMO-ANN System for Increasing Data Rates in Organic Visible Light Communications Systems, IEEE International Conference on Communications (ICC)
- [12] Habib, B ve Farhat, H.(2018).Channel Hardware simulator Design and Implementation for MIMO Time-Varying 802.15.7 VLC indoor signals, IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)
- [13] Başer, O.(2020). Görünür Işık Haberleşmesinde Çok Seviyeli Modülasyon Türleri İçin Mosfetli LED Sürücü Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Kara Deniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

- [14] Altunay, Ö.(2019). Host-ro-host TCP/IP Connection Over Serial Ports Using Li-Fi for İnternet Connection, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- [15] Yanyan Zhu, Xiao Chen,(2020),Visible Light Communication System Based on White LED,IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)
- [16] S. Wu., H. Wang ve C.H. Youn.(2014).Visible Light Communications for 5G Wireless Networking Systems: from Fixed to Mobile Communications, IEEE Network, vol. 28, no. 6, pp. 41–45.
- [17] Basar, E. (2016). Index Modulation Techniques for 5G Wireless Networks, IEEE Communication Magazine., 57, 7.
- [18] Cossu, G. (2012).3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED, Optics Express, 20.
- [19] Wu, F.M. (2013). Performance Comparison of OFDM Signal and CAP Signal Over High Capacity RGB-LED-Based WDM Visible Light Communication, Photonics Journal, IEEE, Volume: 5, Issue: 4, Article: 7901507.
- [20] Borogovac, T., Little, T.(2012).Laser visible light communications, Photonics Society Summer Topical Meeting Series, IEEE, Page(s): 117-118.
- [21] You. X., Chen. J., Yu. C. (2017). The concept of location-based equalization for indoor visible light communications. In Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Singapore, Singapore, (pp. 1-3).
- [22] Lee, J. H., Song, D. W., ve Jung, S. Y. (2014). Interference analysis of visible light communication based on PD array. Electronics, Information and Communications (ICEIC), International Conference on (pp. 1-2). IEEE.
- [23] Praneeth , V., Sushma, R., Sharma, V., Kumar, A. Ve Sharma, G. (2017). Power allocation for uniform illumination with stochastic LED arrays.Optics Express, 25 (8).
- [24] Wang, L., Wang, C., Chi, X., Zhao, L ve Dong, X. (2017). Optimizing SNR for indoor visible light communication via selecting communicating LEDs. Optics Communications, 387, 174-181.
- [25] Rahaim, M. ve Little.(2017). T. D., Reconciling Approaches to SNR Analysis in Optical Wireless Communication, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, CA, USA, 1–6.
- [26] Klingshiru, C.(1995).Semiconductor optics, Springer, Berlin, 184s.
- [27] Musa, E.(2008).Optoelektronik Teori ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi, Ankara
- [28] ETMD Dergisi.(2004).Aydınlatma Uygulama Bilgileri Dizisi, Yapay Işıklı Aydınlatma
- [29] Coldren, L., Corzine, S.(1995).Diode lasers and photonic integrated circuits, Wiley, New York, 110s.
- [30] <http://lednique.com/current-voltage-relationships/iv-curves/>, Erişim: 20 Aralık 2020
- [31] <https://www.lumileds.com/wp-content/uploads/files/DS267-luxeon-3030-he-datasheet.pdf>, Erişim: 20 Aralık 2020

- [32] Erol, Y., “Akım Regüleli LED Test Cihazı Tasarımı”, ELECO'2010 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 370-374, 2-5 Aralık 2010.
- [33] Gültekin, Ç.(2020).Cuo ve Nio Arayüzeyi Fotodiyotların Üretimi ve Elektriksel Karakterizasyonu, yüksek lisans tezi, İğdır üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [34] <https://namatek.com/wp-content/uploads/2021/02/%D9%81%D8%AA%D9%88-%D8%AF%DB%8C%D9%88%D8%AF.pdf>, Erişim: 20 Aralık 2020
- [35] Öztürk, E.(2003).Fotodiyodun Anahtarlama Sürelerinin Darbeli Yüksek Işık Şiddetleri İçin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [36] <http://elektrikelektronikegitimi.blogspot.com/2018/03/fotodiyot-sembolu-yaps-calsmas-ve.html>, Erişim: 20 Aralık 2020
- [37] <https://www.eeeguide.com/photodiode-operation-and-characteristics/>, Erişim: 20 Aralık 2020.



ÖZGEÇMİŞ

Ramin ZOLFI

KİŞİSEL BİLGİLER

Araştırmacı Bilgileri

■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■
■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans : Fırat Üniversitesi, Müh. Fak., Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, 2014
Lise : Meslek Rafiyan Lisesi, Marand, 2007

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ IP kamera sistemleri donanım ve yazılımları
 - ✓ C++, Arduino, Proteus, 80286 assembly
 - ✓ PROTEUS, Multisim, MATLAB
-