

Fotodiyot Dizi Boyutunun Görünür Işıklı Haberleşme (VLC) Performansına Etkileri

Ramin ZOLFi¹, Yavuz EROL^{2*}

^{1,2} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ ramin.zolfi@yahoo.com, ^{2*} yerol@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/08/2023;

Kabul/Accepted: 30/08/2023)

Öz: Bu çalışmada görünür ışık haberleşme sistemlerinde fotodiyot dizisi kullanımının haberleşme performansına etkileri incelenmiştir. Optik verici kısmında farklı dalga boylarında ışımaya 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, opamp'li karşılaştırma devresi ve ortalama gerilim izleyici bloğu bulunmaktadır. Tasarlanan haberleşme sistemiyle LED akımının büyüklüğünün, lens açısının değerinin, optik verici ile optik alıcı arasındaki mesafenin veri transfer hızına etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Görünür Işıklı Haberleşmesi, VLC, Li-Fi, Fotodiyot Dizisi

Effects of Photodiode Array Size on Visible Light Communication (VLC) Performance

Abstract: In this study, the effects of the use of photodiode arrays in visible light communication systems on communication performance are investigated. In the optical transmitter part, there are new generation power LEDs with different wavelengths and lenses with different angles; in the optical receiver part, there is a sensor array consisting of photosensitive PIN photodiodes in the visible light band, a comparator circuit with an opamp and an average voltage tracking block. With the designed communication system, the effects of the magnitude of the LED current, the value of the lens angle, the distance between the optical transmitter and the optical receiver on the data transfer rate were investigated.

Key words: Visible Light Communication, VLC, Li-Fi, Photodiode Array

1. Giriş

Son yıllarda haberleşme sistemlerinde hızla yaşanan gelişmelerle birlikte özellikle mobil cihazların kullanımında çok hızlı bir artış olmuştur. Cihaz çeşitliliğinin ve kullanıcı sayısının artmış olması haberleşmenin önemimizdeki yıllarda radyo frekans (Radio Frequency, 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 bilim insanları 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 [1].

VLC sistemlerinde veri iletimi görünür ışık bandında yapılmakta olup, sinyal iletim hızından dolayı ışık seviyesindeki değişimleri göz algılayamamaktadır. Bu özelliğinden dolayı, aydınlatma amacıyla kullanılan ışık yayan diyot (Light Emitting Diode, 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. Yarıiletken 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 içeren ürünlere olan yönelimden dolayı ilerleyen süreçte görünür ışık haberleşmesinin de hızla yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

Görünür ışık haberleşme sistemleri, RF kablosuz haberleşme sistemlerine kıyasla önemli avantajlara sahiptir. Elektromanyetik spektrumda morötesi sınırdan başlayarak kızılötesine kadar uzanan bölge görünür ışık bölgesi olarak adlandırılır ve 380 nm ile 780 nm dalgaboyu aralığını kapsar. Bu aralık yaklaşık 400 THz'lik band genişliğine sahip olup lisans gerektirmeyen bir haberleşme kanalı sunmaktadır. Bununla birlikte, görünür ışık bandındaki elektromanyetik dalgalar duvarlardan geçemediği için haberleşme mesafesi RF sistemlerdeki

* Sorumlu yazar: yerol@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6606-2330, ² 0000-0001-6953-0630

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.

2. Literatür Taraması

2011 yılında Edinburgh Üniversitesinden Prof. Harald Haas tarafından yürütülen çalışmalarla, aydınlatma için kullanılan ışık kaynaklarının kablosuz veri aktarım cihazlarına dönüşmesinin temeli atılmıştır [2]. 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. Zhou ve arkadaşları tarafından görünür ışık temelli, yüksek performanslı bir IoT sistemi üzerinde çalışmalar yürütülmüştür [3]. Wang ve arkadaşları [4] sualtı görünür ışık iletişimi (Underwater Visible Light Communication, UVLC) amacıyla yürüttükleri çalışmada vericideki optik yoğunluğu arttırmak için ışık yayan diyotun yarı güç açısının daraltıldığı ve tek foton çığ diyotunun (Single-Photon Avalanche Diode, SPAD) kullanıldığı uzun mesafeli bir UVLC sistemi tasarlamıştır. Li ve arkadaşları VLC sistemleri için çok girişli çok çıkışlı (Multi Input Multi Output, MIMO) destekli bir ışık kısma (dimming) tasarımı oluşturmuştur ve bu sistemin bit hata oranını azalttığını göstermiştir [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 Arduino platformu kullanarak yüksek performanslı bir Li-Fi verici-alıcı sistemi tasarlamıştır [7]. 115200 bps hızda iletişim sağlayan sistemde MATLAB yazılımı kullanılmış ve optik olarak iletilen video sinyali Java arayüzü yardımıyla izlenmiştir. 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 verilmiş, dikgen frekans bölme (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) ve darbe genlik modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM) tekniklerinin deneysel karşılaştırması yapılmıştır [10]. Haigh ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada verici kısmında silikon LED, alıcı kısmında organik fotodiyot kullanılan, MIMO sistemi tasarlanmış, 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 modellenmiştir. Che ve arkadaşları tarafından VLC sistemleri için IEEE 802.15.7 standardına uyumlu yüksek verimli LED sürücü tasarımı yapılmıştır [13]. Yan ve arkadaşları fosforesans içeren beyaz LED'li VLC sistemi için bit hata oranını düşük seviyede tutan entegre sürücü devre tasarımı 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].

3. Görünür Işıklı Haberleşme Sisteminin Bileşenleri

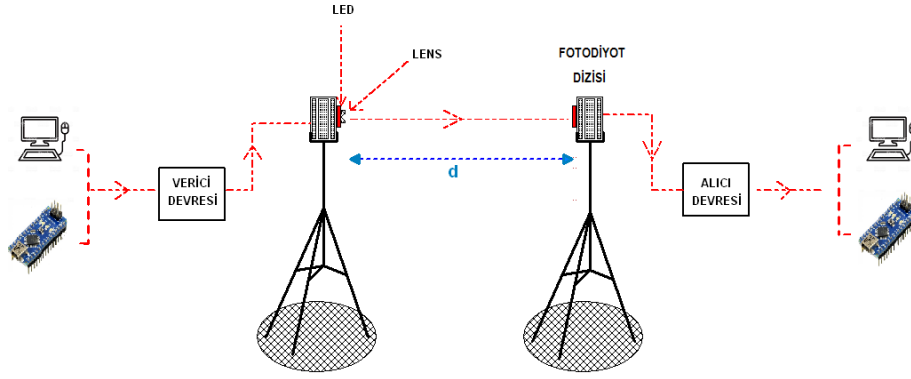
Günümüzde üretilen yarı iletken ışık kaynakları optik spektrumun morötesi bölgesinden başlayarak kızılötesi bölgesine kadar olan bölgeyi kapsamaktadır. LED'in ışık yayma mekanizması kuantum fiziği yasalarına dayanır ve P-N jonksiyonundan akım geçtiğinde ortama spektrumun görünür ışık bölgesine denk düşen frekansta ışık yayılır [16]. 380-780 nm aralığı, uluslararası aydınlatma komisyonu (CIE, Commission Internationale de l'Eclairage) tarafından görünür ışık bandı olarak kabul edilmektedir. Görünür ışık haberleşmesinde optik verici olarak SMD kılıflı, yüksek ışık salıncığına sahip, yeni nesil power LED'ler kullanılmaktadır. Bu LED'ler aynı zamanda ortamı aydınlatma görevi de üstlendiğinden LED çiplerinin ışık akıları yüksektir ve haberleşme sırasında yüksek anahtarlama frekanslarına çıkabilmek için jonksiyon kapasiteleri düşüktür. Genel aydınlatma için üretilen sıradan LED çiplerinin veri haberleşme hızından bir miktar taviz verilerek VLC haberleşme sistemlerinde kullanılması da mümkündür.

VLC sistemlerinin optik alıcı kısmında genellikle fotodiyot yer alır. Fotodiyot ışığa karşı çok hassastır ve ters yönde kutuplandığında üzerine düşen ışıkla sızıntı akımı değişir. Fotodiyotlar 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. Fotodiyodun tepki süresi LDR'den daha küçüktür. Örneğin LDR için ms seviyesinde olan tepki süreleri, fotodiyot için ns seviyelerindedir. Fotodiyot ışıktaki değişimlere karşı çok hızlı tepki verdiği için, görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde optik alıcı olarak fotodiyot tercih edilmektedir.

4. Donanım Tasarımı

4.1. Optik haberleşme sisteminin genel yapısı

Tasarlanan görünür ışık haberleşme sisteminde optik verici ve optik alıcı olmak üzere iki ayrı ünite bulunmaktadır. Her iki ünite de mikrodenetleyici kontrollüdür. Verici ve alıcı tarafında birer kişisel bilgisayar bulunmaktadır. Tasarlanan sistem ile, verici üniteye bağlı bilgisayardan gönderilen metin belgesi, resim ya da video dosyasının alıcı üniteye bağlı bilgisayarın ekranına iletilmesi hedeflenmiştir. Optik verici ve alıcı üniteleri tripod (uçayak) mekanizması üzerine monte edilmiştir. Prototip sistemin genel görünümü Şekil 1'de görülmektedir.



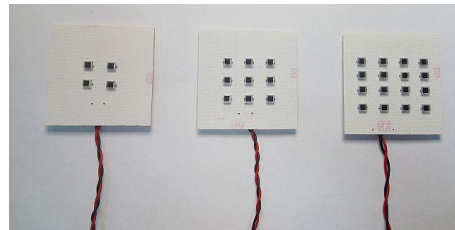
Şekil 1. Sistemin genel görünümü

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.

Sistemin tasarımında kullanılan power LED'ler, lensler ve fotodiyotlardan oluşan optik bileşenler Şekil 2'de görülmektedir. Power LED'lerin montajında termal macun ve alüminyum PCB kullanılmıştır. 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'de dizi yapıları görülmektedir.



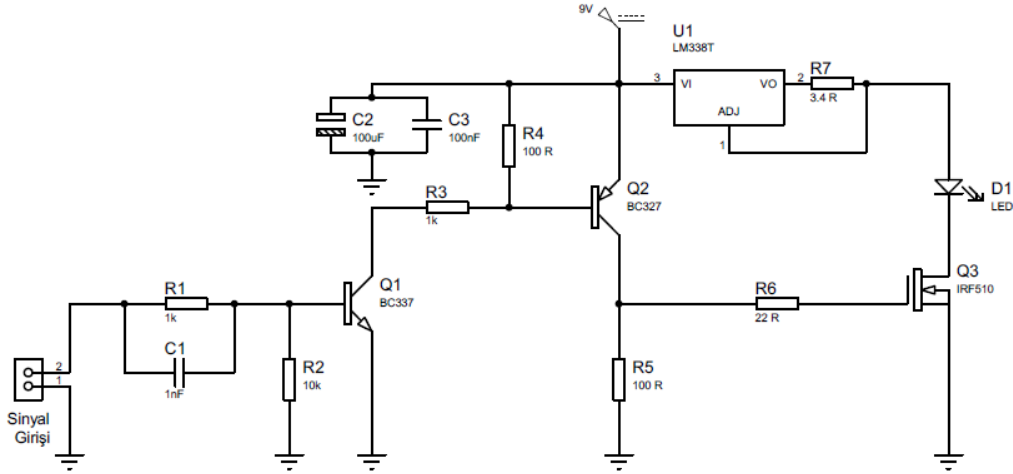
Şekil 2. Optik bileşenler



Şekil 3. 2x2, 3x3, 4x4 fotodiyot dizileri

4.2. Mikrodenetleyici kontrollü verici tasarımı

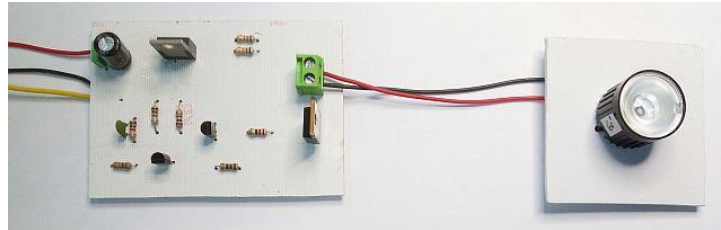
Tasarlanan verici devresi Şekil 4’de görülmektedir. Devrenin girişine kare dalga formunda TTL sinyal uygulanmaktadır. Girişteki C1 kondansatörü, sinyalin bozulmadan ve büyük zaman gecikmesi olmadan iletilmesi için gereklidir. Anahtarlama elemanı olarak IRF510 MOSFET kullanılmıştır. NPN ve PNP transistörden oluşan devre yapısı MOSFET sürücü olarak çalışmaktadır. LM338 ile oluşturulan akım regülatörü sayesinde power LED akımının sabit kalması sağlanır. Bu sayede LED’in ısınmasından veya farklı renklerde LED kullanıldığında ileri yön gerilimindeki değişimlerden LED akımı etkilenmemiş olur.



Şekil 4. Optik verici devre şeması

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.

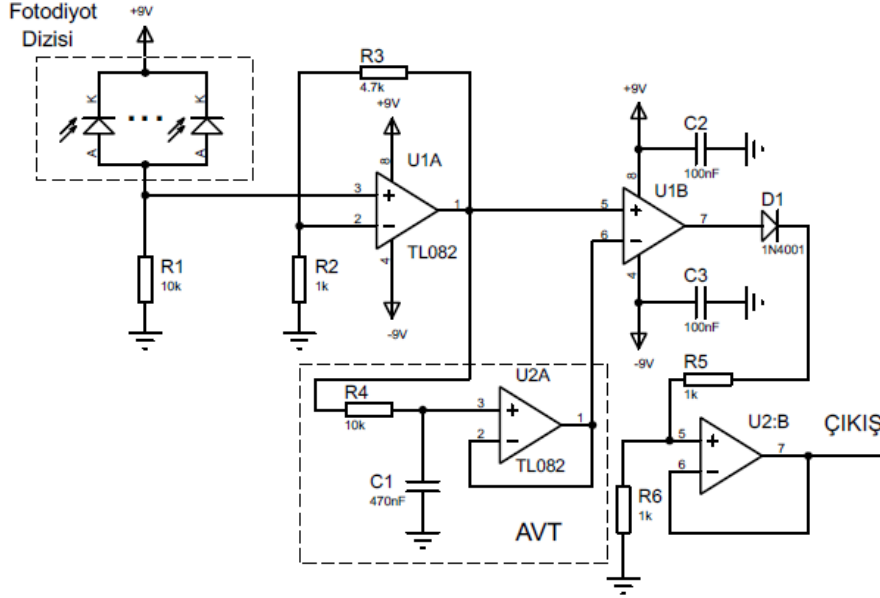
Devredeki R7 direnci ile LED akımının tepe değeri ayarlanabilmektedir. Direnç değeri 3.4 ohm seçildiğinde, LM338 kataloğunda belirtilen $1.25/R$ formülüne göre akım değeri 367 mA elde edilmiştir. Bu değer power LED’in güvenli çalışması için uygundur. Alıcı devresinin girişine pozitif sinyal uygulandığında 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 darbeleri bir akım geçer. Şekil 5’de optik verici devresinin monte edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 5. Verici devresinin genel görünümü

4.3. Mikrodenetleyici kontrollü alıcı tasarımı

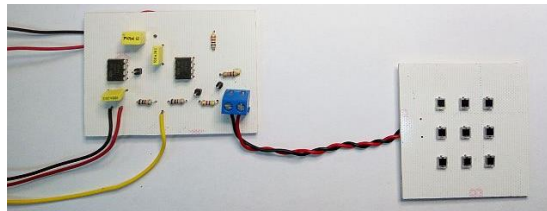
Tasarlanan optik alıcı devresi Şekil 6'da görülmektedir. Devrede BPW34 fotodiyot dizisi, TL082 opamp ile tasarlanan ters çevirmeyen kuvvetlendirici, ortalama gerilim izleyici (Average Voltage Tracking, AVT), karşılaştırıcı ve tampon (buffer) birimleri bulunmaktadır.



Şekil 6. Optik alıcı devre şeması

Devredeki R1 direnci yardımıyla fotodiyodun ters yönde kutuplanması 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. 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 görülmüştür. 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.

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, $(Vcc-0.7)/2$ seviyesine düşürülmüştür. Besleme geriliminin 9 V olması durumunda çıkış genliği 4 V seviyelerinde olmaktadır. Şekil 7'de alıcı devresine ait PCB tasarımları görülmektedir.

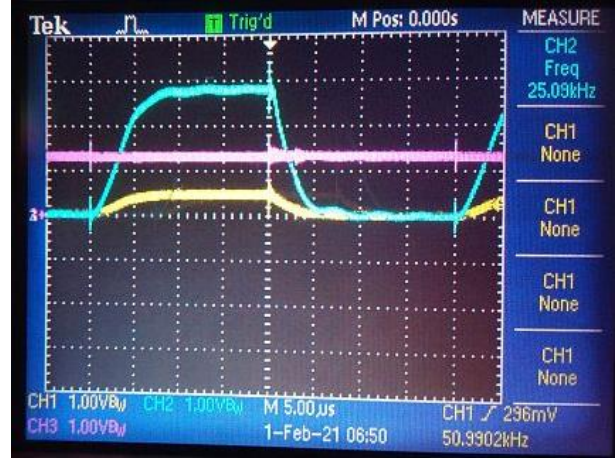


Şekil 7. Alıcı devresinin genel görünümü

Verici alıcı devrelerinin tripod mekanizması üzerine monte edilmiş hali Şekil 8’de görülmektedir. 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.



Şekil 8. Verici-alıcı sisteminin genel görünümü

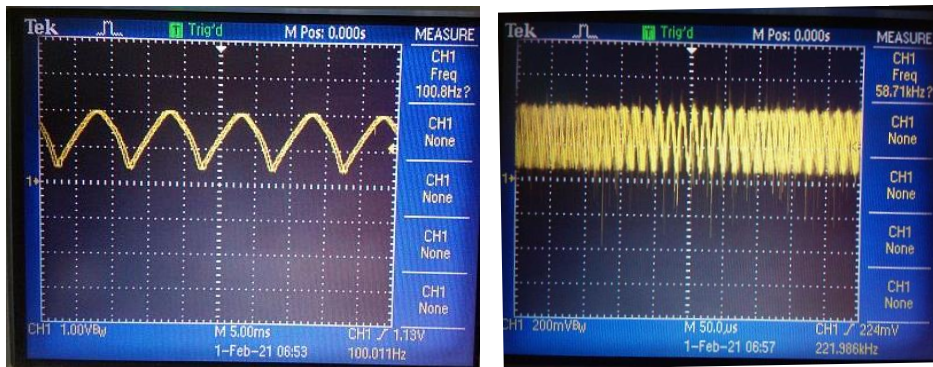


Şekil 9. Alıcı devresi dalga şekilleri

4.4. Dalga şekilleri

Verici devresinin girişine 25 kHz frekanslı kare dalga uygulandığında, alıcı devresindeki 3 farklı noktadaki gerilim dalga şekilleri Şekil 9’daki gibi olmaktadır. Ölçümler sırasıyla R1 direnci uçlarından (CH1), kuvvetlendirici çıkışından (CH2) ve ortalama gerilim izleyici (CH3) çıkışından yapılmıştır. Ortamdaki yapay ışık kaynakları alıcı devresi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. 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 10a ve Şekil 10b’deki gibi gözlenmektedir. Görüldüğü gibi floresan armatür 100 Hz frekanslı değişim oluştururken, lineer LED armatür 58 kHz frekanslı değişim oluşturmaktadır.

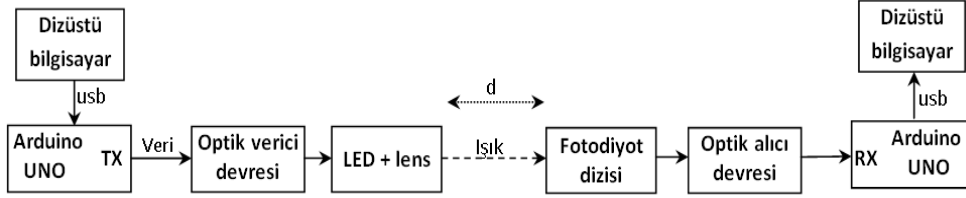
Verici devresindeki LED’in fotodiyot dizisine ilettiği ışık dışında, harici bir ışık kaynağı tarafından üretilen titreşimsiz bir ışık sisteme ulaştığında devrenin çalışmasında bir problem oluşmamaktadır. Alıcı devresinin çıkışı belirli bir frekansta kare dalga üretirken, fotodiyot dizisi üzerine harici 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 bu çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır.



Şekil 10. Ortamdaki armatürlerin etkisi a) Floresan armatür b) LED armatür

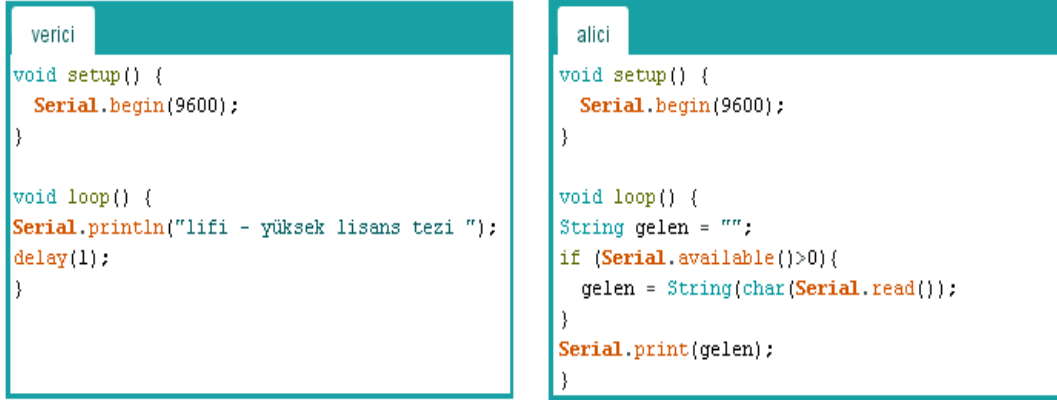
5. Testler

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 11’de test sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 11. Test sisteminin blok şeması

Verici ve alıcı kısmında birer dizüstü bilgisayar bulunmaktadır. Arduino arayüz programında verici ve alıcı ünite için Şekil 12’de verilen programlar yazılmıştır.



Şekil 12. 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 seri monitör aracılığıyla bilgisayar ekranından izlenebilmektedir. Bu ekran görüntüsü, veri paketinde ortaya çıkan bozulmalar ve düzgün veri akış durumu hakkında bilgi vermektedir. Böylece test sırasında programlardaki bps değerleri eş zamanlı olarak ayarlanarak lens tipi, fotodiyot dizi boyutu ve mesafe değeri değişimine göre veri paketinin doğru alınıp alınmadığı gözlenmiştir.

5.1. Lens açısının haberleşme performansına etkileri

Power LED’ler ile uyumlu lenslerin açıları ve ışık dağılım eğrileri firmalara göre değişiklik göstermektedir. Piyasada 8, 16, 20, 30, 45, 60, 90 derece açılıya sahip lensler bulmak mümkündür. Testler sırasında 16 ve 60 derecelik iki farklı lens kullanılmıştır. LED’lerin ışınma açısı yaklaşık 120 derece olduğundan, ek olarak lensiz durum da dikkate alınmıştır. Böylece dar açılı ve geniş açılı ışınma arasındaki farklılıklar ortaya konulmuştur.

Tablo 1’de 1W gücünde 6500 °K beyaz ışık yayan power LED kullanıldığı durum için farklı lenslere ait mesafe ve hız testi 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. 74880 bps değerinden daha yüksek hızlarda veri paketinin doğru alınabildiği mesafe önemli oranda düştüğünden tabloda bu hızlara yer verilmemiştir.

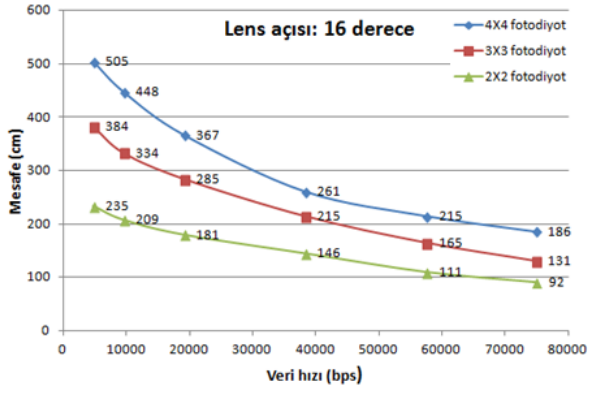
Tablo 1'deki değerler dikkate alındığında 60 derecelik lens ile elde edilen mesafe değerlerinin 16 derecelik lens ile elde edilen mesafe değerlerine göre daha kısa olduğu görülmektedir. Örneğin 4800 bps hızda 16 derece lens ile haberleşme mesafesi 505 cm olurken, 60 derece lens ile 257 cm olmuştur. Lens kullanılmadığı durumda ise bu mesafe 90 cm'ye kadar düşmüştür. Fotodiyot dizi boyutunun artması haberleşme mesafesini arttırmaktadır.

Tablo 1. Lens açısının, fotodiyot dizi boyutunun ve veri hızının mesafeye etkileri

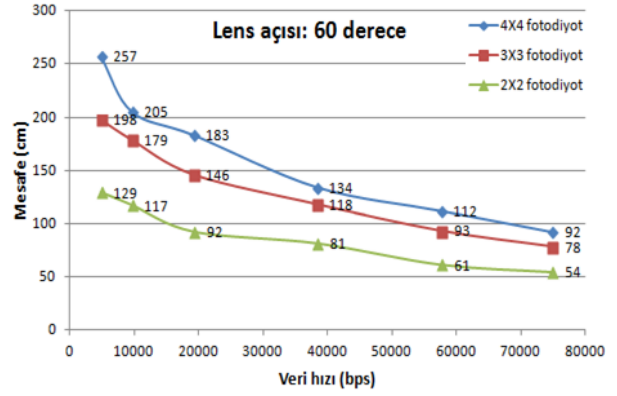
Veri hızı (bps)	Lens açısı	Haberleşme mesafesi (cm)		
		4x4 fotodiyot dizisi	3x3 fotodiyot dizisi	2x2 fotodiyot dizisi
74880	16°	186	131	92
	60°	92	78	54
	Lenssiz	34	29	20
57600	16°	215	165	111
	60°	112	93	61
	Lenssiz	36	33	22
38400	16°	261	215	146
	60°	134	118	81
	Lenssiz	43	41	29
19200	16°	367	285	181
	60°	183	146	92
	Lenssiz	60	52	36
9600	16°	448	334	209
	60°	205	179	117
	Lenssiz	77	58	43
4800	16°	505	384	235
	60°	257	198	129
	Lenssiz	90	69	47

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.

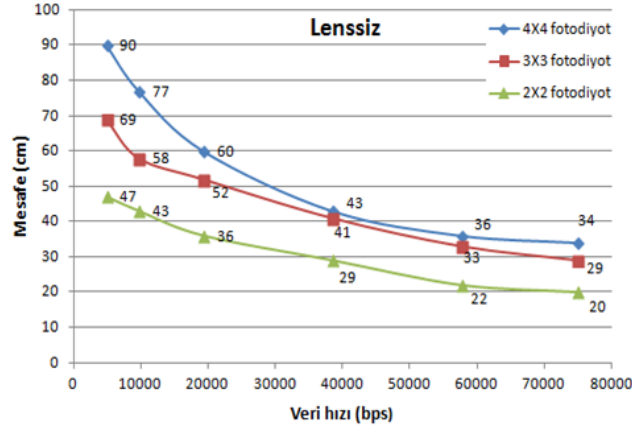
Tablo 1'deki değerler kullanılarak haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimleri Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurulabilmektedir. 4800 bps'de, 16 derece lens ve 4x4 fotodiyot dizisi ile yaklaşık 5 metre mesafeden haberleşme kurulabilirken, 2x2 fotodiyot dizisi ile mesafe 2.35 m olmaktadır. 60 derece lens kullanıldığında bu değerler sırasıyla 2.57 m ve 1.29 m'dir. Lenssiz durumda ise en düşük veri iletim hızında mesafe 47 cm ile 90 cm arasında değişmektedir.



Şekil 13. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (16 derecelik lens ile)



Şekil 14. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (60 derecelik lens ile)



Şekil 15. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (lenssiz durum)

5.2. LED akımının haberleşme mesafesine etkisi

LED akımının maksimum değeri, 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 1'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.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada optik verici ve optik alıcı performansını etkileyen donanım parametreleri üzerine yoğunlaşmıştır. Verici kısmında yer alan yeni nesil LED'lerin ışınma açısı, farklı açılarda lens kullanılmasının etkileri ve alıcı kısmında farklı yerleşim planına 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, lensiz durumda 77 cm olmuştur. Lensiz 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.

Teşekkür

Bu çalışma, Ramin ZOLFİ'nin "Fotodiyot Dizisi İle Görünür Işık Haberleşme Sistemi Tasarımı ve Gerçeklenmesi" isimli yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Ghassemlooy Z., Alves L.N., Zvanovec S., Khalighi M. A. Visible Light Communications: Theory and Applications, Birleşik Krallık: CRC Press, 2017.
- [2] Haas, H., Wireless Data From Every Light Bulb, New York, NY, USA: TED, 2011.
- [3] Zhou, H., Zhang M., Ren, X., Design and Implementation of Wireless Optical Access System for VLC-IoT Networks.in Journal of Lightwave Technology, 2023, vol. 41, no. 8, pp. 2369-2380.
- [4] Wang, C., Yu, H.Y., Zhu Y.J., A Long Distance Underwater Visible Light Communication System With Single Photon Avalanche Diode, *IEEE Photonics Journal*, 2016, vol. 8, no. 5, pp. 1-11.
- [5] Li, B., Zhang, R., Xu, W., Zhao, C., Hanzo, L., Joint Dimming Control and Transceiver Design for MIMO-Aided Visible Light Communication, *IEEE Communications Letters*, 2016, vol. 20, no. 11, pp. 2193-2196.
- [6] Wijayanto, B., Hadiyoso, S., Renggani, R., Prototype of Visible Light Communication Transceiver Using Array Photo Transistor for Real Time Digital Media Transfer, 2019, J. Phys.: Conf. Ser. 1201 012019.
- [7] Goswami, P. and Shukla, M., Design of a Li-Fi Transceiver. *Wireless Engineering and Technology*, 2017, 8, 71-86.
- [8] Do, T. and Yoo, M., An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems, School of Electronic Engineering, 2016, Soongsil University, Seoul 06978, Korea
- [9] Saadi M., Ahmad T., Kamran Saleem M., Wuttisittikulkij L., Visible light communication—an architectural perspective on the applications and data rate improvement strategies, *Trans Emerg Telecommun Technol.* 2019, 30(2):e3436.
- [10] Rajbhandari, S., Chun, H., Faulkner, G., et al., High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations , *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, Volume: 33, Issue: 9, Journal Article, Publisher: IEEE.
- [11] Haigh, P. A. et al., A MIMO-ANN system for increasing data rates in organic visible light communications systems, 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013, Budapest, Hungary, pp. 5322-5327.
- [12] Habib, B., Farhat, H., Channel hardware simulator design and implementation for MIMO time-varying 802.15.7 VLC indoor signals, 2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM), 2018, Jounieh, Lebanon, pp. 1-5.
- [13] Che, F., Wu, L., Hussain, B., Li X, and Yue, C. P., A Fully Integrated IEEE 802.15.7 Visible Light Communication Transmitter With On-Chip 8-W 85% Efficiency Boost LED Driver, *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 10, pp. 2419-2430.
- [14] Yan, D., Mao, X., Xie, S., Cong, J., Chen, H., Design Fully Integrated Driver Circuit for Phosphorescent White Light-Emitting-Diode High Speed Real-Time Wireless Communication, *IEEE Photonics Journal*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 1-10.
- [15] Zhu, Y., Chen, X., Visible Light Communication System Based on White LED, 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 2020, Dalian, China, pp. 1015-1018.
- [16] Erol, Y., Akım Regüleli LED Test Cihazı Tasarımı, ELECO'2010 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 2010, Bursa, 370-374.