



LED DİZİLERİ KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI Li-Fi SİSTEM TASARIMI

Büşra AYDIN

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN**

2021

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

LED DİZİLERİ KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI Li-Fi SİSTEM TASARIMI

Büşra AYDIN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

23 / 06 / 2021

İmzası

Büşra AYDIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LED DİZİLERİ KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI Li-Fi SİSTEM TASARIMI

Büşra AYDIN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

Light Fidelity (Li-Fi), ışık yayan diyotların (light emitting diode-LED) veri aktarım aracı olarak kullanıldığı gelişmiş bir görünür ışık iletişimi (Visible Light Communication-VLC) teknolojisidir. VLC teknolojisinin tüm potansiyelinden yararlanmak ve uygulama alanlarını arttırmak için sistemin veri iletim hızında önemli bir artış sağlayacak atılımlara ihtiyaç vardır. Bu tez çalışmasında yüksek hızlı Li-Fi sistem tasarımı için yüksek optik güç imkânı sunan LED dizileri kullanılmıştır. Tasarlanan sistemin, aydınlatma ve veri iletimi açısından semboller arası girişim (InterSymbol Interference-ISI) göz önünde bulundurularak temel analizleri yapılmıştır. Literatürdeki modelleme çalışmalarında yaygın olarak OOK-NRZ kullanılmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak OOK-NRZ kullanılan sistemin performansı incelenmiş daha sonra çalışmalar bir adım ileri taşınarak OOK-RZ ve 4-PPM uygulanmış böylece sistemin ISI etkisi azaltılmıştır. Sisteme OOK-NRZ uygulandığında 60° FOV açısı için çıkılabilecek en yüksek veri hızı 100Mbps'dir. OOK-RZ ve 4-PPM uygulandığında ise ISI etkisi azaltılıp iletişim hızı aynı FOV açısı için 500Mbps'ye yükseltilmiştir. Gerçekleştirilen veri hızı analizleri BER, SNR ve RMS gecikme yayılımı değerleri baz alınarak yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda Li-Fi sistemlerin kullanılabilirliğini arttırarak, Li-Fi kullanımının yaygınlaşmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda OOK-RZ ve 4-PPM modülasyonla çalıştırılan LED dizileri için BER ve RMS gecikme yayılımının daha önce incelenmediği görülmüştür ve bu çalışma Li-Fi sistemleri için literatürdeki bu eksikliği gidermektedir.

2021, 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bit Hata Oranı, Çok Yollu Yansımalar, Görünür Işık Haberleşmesi, LED Dizileri ile Görünür Işık Haberleşme, Li-Fi, RMS Gecikme Yayılımı, Semboller Arası Girişim, Sinyal Gürültü Oranı

ABSTRACT

MS. Thesis

HIGH SPEED Li-Fi SYSTEM DESIGN USING LED ARRAYS

Büşra AYDIN

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Çağlar DUMAN

Light Fidelity (Li-Fi) is an advanced visible light communication (VLC) technology in which light emitting diodes (LEDs) are used as data transfer tools. Significant increase in the data transmission rate is a need for full potential of VLC technology and to increase its application areas. In this thesis, LED arrays with high optical power are used for high speed Li-Fi system design. Fundamental analyzes of the designed system are made by considering Inter-symbol Interference (ISI) in terms of illuminating room and data transmission. OOK-NRZ is widely used in VLC modeling studies in the literature. In this study, firstly, the system performance is analyzed when OOK-NRZ is used and the studies are taken one step further by applying OOK-RZ and 4-PPM. By this way ISI effect of the system are reduced. When OOK-NRZ is applied to the system, the highest data rate achieved for 60° FOV angle as 100Mbps. When OOK-RZ and 4-PPM are applied, the effect of ISI is reduced and the speed is increased to 500Mbps for same FOV angle. The data rate analyzes are performed based on BER, SNR and RMS delay spread values. The purpose of this study is to contribute widespread usage of Li-Fi by increasing the usability of Li-Fi systems. It is seen from literatür research that OOK-RZ and 4-PPM modulation are not studied for LED arrays in term of BER and RMS delay spread. This study fills this gap in the literature.

2021, 75 page

Keywords: Bit Error Rate, Inter-Symbol Interference, Visible Light Communication with LED Arrays, Li-Fi, Multi-Path Reflections, Visible Light Communication, RMS Delay Spread, Signal To Noise Ratio

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı üstlenerek bilgi ve tecrübeleri ile her zaman yolumu aydınlatan ve zorlu pandemi koşullarına rağmen laboratuvar ortamındaki çalışmalarında da değerli desteğini esirgemeyen, danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans, yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi, tecrübe ve hoşgörüsünü esirgemeyen çalışmalarım sırasında kıymetli vaktini benim için harcayan değerli hocam sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında yardım ve desteğini esirgemeyen ETÜ Kristal Girişimcilik Merkezi koordinatör yardımcısı Arş. Gör. Gürkan KALINAY'a teşekkürlerimi sunarım. Arkadaşım ve meslektaşım olarak hiçbir konuda değerli yardımlarını esirgemeyen Gelişim Üniversitesi Arş. Gör. Ahmet Fetullah YILMAZ'a ve Elektrik Elektronik Mühendisi Bengüsü Alkım BALTAKESMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Sevgi ve destekleri ile her zaman yanımda olan annem Cemile AYDIN, babam Abdulmutalip AYDIN ve kardeşlerime beni bugünlere taşıdıkları için teşekkürü borç bilirim. Desteklerinden dolayı ablam Bilgisayar Mühendisi Hümeysra AYDIN'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Büşra AYDIN
Haziran 2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	12
3.1. Li-Fi	12
3.2. VLC Vericiler	15
3.3. VLC Alıcılar.....	18
3.4. Li-Fi Modülasyonda Karşılaşılan Zorluklar	20
3.5. Li-Fi Sistemleri ve Aydınlatma Gereksinimleri.....	21
3.6. Li-Fi Sistemlerinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri	22
3.6.1. Tek taşıyıcılı modülasyon	25
3.6.2. Çok taşıyıcılı modülasyon	28
3.6.3. CSK modülasyonu	29
3.7. Li-Fi Sistem Modeli	30
3.7.1. LED ışıklarının temel özellikleri	31
3.7.2. Parlaklığın hesaplanması.....	32
3.7.3. Işık kaynakları tarafından iletilen optik güç.....	34
3.7.4. Optik kanal dürtü yanıtı	37
3.7.5. Sinyal gürültü oranı.....	38
3.7.6. Ortalama Karekök Gecikme Yayılımı	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	45
4.1. Kapalı Ortam Görünür Işık Kablosuz İletişim Sisteminin Modellenmesi	45
4.2. Gerçek Zamanlı Li-Fi Deney Düzenneği.....	61
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	66



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$^{\circ}$	Derece
A	Dedektörün fiziksel alanı
B	Eşdeğer gürültü bant genişliği
B_a	Amplifikatör bant genişliği
c	Işığın boşluktaki hızı
γ	Dedektör duyarlılığı
d_0	Alıcı-verici arasındaki mesafe
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_0	Direkt aydınlanma
e	Elektron yükü
eV	Elektronvolt
G	Açık döngü gerilim kazancı
Γ	FET kanal gürültü faktörü
g_m	FET transkondüktansı
$g(\psi)$	Optik yoğunlaştırıcının kazancı
η_{cap}	Fotodedektörün sabit kapasitans değeri
η	Kuantum verimliliği
$H(0)$	Optik kanal DC kazancı
Hz	Hertz
$h(t)$	Kanal dürtü yanıtı
I_{bg}	Arka plan akımı
$I(\phi)$	Aydınlatma yoğunluğu
$I(0)$	Işık şiddeti
i_{am}	Amplifikatör gürültü yoğunluğu
K_m	Maksimum görünürlük
k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin
λ	Dalga boyu
lx	Lüks

lm	Lümen
m	Lambertyan yayılım derecesi
M	Çarpım faktörü
Ω	Uzamsal açı
P_d	Doğrudan alınan optik güç
ϕ_i	i. LED için ışıma açısı
Φ_e	Enerji akısı
ϕ	Işıma açısı
Φ	Işık akısı
P_n	Ortam ışığının gürültü gücü
P_r	Alınan toplam optik güç
P_t	LED optik gücü
ψ	Geliş açısı
Ψ_c	Görüş alanı
q	Elektrik yük
R	Çığ fotodiyotun hassasiyeti
R_b	Veri iletim hızı
τ_0	Ortalama gecikme süresi
τ_{RMS}	RMS gecikme yayılımı
T	Mesaj sinyalinin periyodu
T_k	Mutlak sıcaklık
$T(\psi)$	Optik filtrenin geçirgenliği
ν	Frekans
V	Volt
V_b	Kırılma voltajı
$V(\lambda)$	Parlaklık eğrisi
$Y(t)$	Fotodedektörden alınan akım

Kısaltmalar

ACO-OFDM	Asimetrik olarak kırılmış optik OFDM
AWGN	Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
BER	Bit hata oranı
bps	Saniye başına bit
CAP	Taşıyıcısız genlik ve faz modülasyonu
CSK	Renk kaydırmalı anahtarlama
DCO OFDM	DC bileşenin eklendiği optik OFDM
FOV	Görüş alanı
FSK	Frekans kaydırma anahtarlama
IDFT-S OFDM	Ters ayrık Fourier transform-yayılmış OFDM
IFFT	Ters hızlı Fourier dönüşüm
IM	Yoğunluk modülasyonu
IM/DD	Yoğunluk modülasyonu/Doğrudan algılama
ISI	Semboller arası girişim
LED	Işık yayan diyot
Li-Fi	Işık uzantılı
LDFT-S OFDM	Lokalize fourier transform-yayılmış OFDM
MCM	Çok taşıyıcılı modülasyon
MIMO	Çoklu giriş çoklu çıkışlı
OFDM	Dikgen frekans bölmeli çoklama
OOK	Açık kapalı anahtarlama
OOK-NRZ	Sıfıra dönüşlü olmayan açık kapalı anahtarlama
OOK-RZ	Sıfıra dönüşlü açık kapalı anahtarlama
OWC	Optik kablosuz haberleşme
PAM	Darbe genlik modülasyonu
PAPR	Düşük tepe ortalama güç oranlı
PPM	Darbe konum modülasyonu
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
RGB LED	Kırmızı yeşil mavi LED
RMS	Ortalama karekök
SCM	Tek taşıyıcılı modülasyon
SNR	Sinyal gürültü oranı

VLC

Görünür ışık iletişimi

Wi-Fi

Kablosuz bağlantı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Fotofon.....	4
Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrum.....	14
Şekil 3.2. Li-Fi sistem şeması.....	15
Şekil 3.3. Modülasyon işlemi ($m(t)$ = mesaj sinyali, $c(t)$ = taşıyıcı sinyal, $s(t)$ = modüle edilmiş sinyal)	22
Şekil 3.4. Li-Fi sistemlerinde kullanılan bazı modülasyon teknikleri	23
Şekil 3.5. OOK için iletilen dalga formu: (a) NRZ ve (b) RZ	25
Şekil 3.6. PAM-PWM-PPM tekniklerinin gösterimi.....	27
Şekil 3.7. CIE 1931 kromatiklik şeması	30
Şekil 3.8. IM/DD tekniği kullanılan VLC sistem blok diyagramı.....	31
Şekil 3.9. Beyaz LED kullanılarak gerçekleştirilen Görünür ışık haberleşmesi.....	31
Şekil 3.10. Tek LED’li sistem modeli	33
Şekil 3.11. Dizi LED kullanılan sistem modeli.	35
Şekil 3.12. Gelen ışının yayılım modeli.....	36
Şekil 3.13. Sinyal gücü ve semboller arası girişim (ISI) güç diyagramı	41
Şekil 4.1. Kapalı ortam için tasarlanan görünür ışık kablosuz iletişim sistemi modeli.....	45
Şekil 4.2. Direkt aydınlanma yayılımı.	46
Şekil 4.3. Doğrudan alınan optik güç dağılımı	47
Şekil 4.4. Yansımali yoldan alınan optik güç dağılımı.....	48
Şekil 4.5. Alınan toplam optik güç dağılımı.....	49
Şekil 4.6. Sinyal gürültü oranı dağılımı	49
Şekil 4.7. FOV açısına bağlı SNR değişimi.....	50
Şekil 4.8. (0,01, 0,01, 0,85) koordinatı için normalize optik kanal dürtü yanıtı.....	51
Şekil 4.9. Alınan sinyal gücü P_{signal} dağılımı	51
Şekil 4.10. Semboller arası girişimin neden olduğu optik güç P_{ISI} dağılımı	52
Şekil 4.11. SNR’ın semboller arası girişimle dağılımı (OOK-NRZ)	53
Şekil 4.12. OOK-NRZ kullanıldığında bit hata oranı dağılımı (BER)	53
Şekil 4.13. FOV açısına bağlı semboller arası girişim ile alınan SNR değişimi (OOK-NRZ)	54
Şekil 4.14. FOV ve veri iletim hızı değerlerine bağlı semboller arası girişim ile alınan ortalama SNR değişimi (OOK-NRZ).....	55

Şekil 4.15. FOV ve veri iletim hızı değerlerine bağlı semboller arası girişim ile alınan ortalama SNR değişimi (OOK-RZ)	56
Şekil 4.16. OOK-RZ uygulandığında bit hata oranı dağılımı (BER)	56
Şekil 4.17. FOV ve veri iletim hızı değerlerine bağlı semboller arası girişim ile alınan ortalama SNR değişimi (4-PPM)	57
Şekil 4.18. 4-PPM uygulandığında bit hata oranı dağılımı (BER)	58
Şekil 4.19. OOK-NRZ, OOK-NRZ ve 4-PPM formatları uygulandığında elde edilen SNR-BER değerleri.....	59
Şekil 4.20. Ortalama gecikme süresinin dağılımı	59
Şekil 4.21. RMS gecikme yayılımının dağılımı	60
Şekil 4.22. Veri iletim hız dağılımı.....	61
Şekil 4.23. Li-Fi deney düzeneği	61
Şekil 4.24. Gönderilen mesaj	62
Şekil 4.25. Alınan mesaj	63
Şekil 4.26. Li-Fi deney düzeneğinin verici ve alıcı baskı devre kartları	63
Şekil 4.27. Li-Fi deney düzeneğinin verici girişi ve alıcı çıkışından alınan sinyaller	64
Şekil 4.28. Li-Fi deney düzeneğinin verici ve alıcı şemaları.....	64
Şekil 4.29. Gönderilen veri paketleri	65
Şekil 4.30. Matlab R2020b ve Arduino Uno mikrodenetleyici kart kullanılarak iletilen fotoğraf (a) Gönderilen Fotoğraf. (b) Alınan Fotoğraf.	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Li-Fi ve Wi-Fi sistemlerinin karşılaştırması.....	15
Çizelge 3.2. LED’lerin, floresan ve akkor lambalar ile karşılaştırılması.....	16
Çizelge 3.3. LED’de kullanılan yarıiletken türüne bağlı olarak elde edilen renkler	17
Çizelge 4.1. Direkt aydınlatma hesabı için kullanılan sistem parametreleri.....	46
Çizelge 4.2. Alınan optik güç hesabı için kullanılan sistem parametreleri.....	47
Çizelge 4.3. SNR hesabı için kullanılan sistem parametreleri.....	50



1. GİRİŞ

Günümüzde beşinci nesil (fifth generation-5G) geleceğin teknolojileri için destek sağlamaya yönelik bir yarış var. Görünür ışık iletişimi, iç mekân uygulamalarının ötesinde eşsiz bir performans sunma potansiyeline sahip lider teknolojiler arasındadır (Gismalla et al. 2019). Doyuma giden kablosuz bağlantı (wireless fidelity-Wi-Fi) teknolojisine alternatif olarak görülen VLC teknolojisi umut vaat eden bir teknolojidir. Elektromanyetik spektrumun görünür ışık dalga boyu aralığını (380-750nm) veri iletimi için kullanır. VLC'nin ilk örneği 1880 yılında Alexander Graham Bell'in icadı olan fotofon kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bell 1880). Fakat teknoloji asıl ününü 2011 yılında Li-Fi'nin tanıtılması ile kazanmıştır. Li-Fi teknolojisi aydınlatma sistemlerinde kullanımı yaygın hale gelen LED'ler ile veri iletimini gerçekleştirir. Bu durum aydınlatma sistemlerini Li-Fi sistemleri için uygun altyapı haline getirir. Li-Fi teknolojisinin sistem parametrelerinin iyileştirilebilmesi halinde internet erişimi için de kullanılması hedeflenmektedir (Haas et al. 2015).

Li-Fi sistemleri alıcı ve verici olarak kullanılan materyalin kolay temin edilebilmesi, maliyetlerinin düşük olması, veri iletimine ek olarak aydınlatma için de kullanılabilmesi, yüksek hızlı veri iletim imkânı sunmaları gibi diğer çağdaş teknolojilere göre çok çeşitli avantajlara sahiptir (Sarkar et al. 2015).

Wi-Fi, RF dalgalar kullandığı için iyonlaştırıcı olmayan radyasyon yayar (Zora 2020). Yayılan radyasyonun sağlığa zararlı olabileceği endişesiyle maruz kalınan doz en aza indirilmeye çalışılır (Bozbiyık vd. 2002). Bu nedenle ameliyathanelerde Wi-Fi kullanımına izin verilmez. Cep telefonlarından gelen sinyaller de izleme ekipmanlarından gelen sinyalleri engelleyebilir. Li-Fi ise görünür ışık dalga boyunu kullandığı için radyasyon yaymaz ve izleme ekipmanlarının sinyallerini engellemez. Bu durum aydınlatmanın da önemli olduğu ameliyathaneler için Li-Fi teknolojisini avantajlı hale getirmektedir. Wi-Fi'nin kullandığı radyo dalgaların bir diğer dezavantajı güçlü sinyal soğurması nedeniyle suda kullanılamamasıdır dolayısıyla kısa menzilli su altı iletişimi için Li-Fi, bir çözüm olacaktır (Sarkar et al. 2015). Ayrıca Wi-Fi'nin yasak olduğu ve iyi bir şekilde aydınlatılan uçaklarda da Li-Fi ideal bir veri iletişim teknolojisi

Kablosuz optik haberleşme ağına dışardan erişim söz konusu değildir. Çünkü bilgi optik sinyallerle taşınır ve ışık duvar benzeri engellerden geçemez. Dolayısıyla Li-Fi iletişimin gizlenmesi gereken uygulamalar için son derece yararlıdır. Bu uygulamalar çeşitli askeri ve savunma temelli veri aktarımlarının yanı sıra hastanelerdeki iletişimlerini de içerir. Kısa mesafelerde çok yüksek veri iletim hızları ve artırılmış veri güvenliği için mobil cihazlarda da Li-Fi kullanılabilir (Sarkar et al. 2015).

Gelecek, gerçek dünya nesnelerini akıllı sanal nesnelere dönüştürecek olan Nesnelerin İnterneti'dir (Internet of Things-IoT). IoT, dünyamızdaki her şeyi ortak bir altyapı altında birleştirmeyi amaçlar. Nesnelerin birbirleriyle ve daha büyük sistemlerle haberleşmesi yaşam biçimini olumlu yönde değiştirebilir. Li-Fi, düşük enerji tüketimi, yüksek veri hızları ve güvenli bağlantı sağlayarak IoT'nin yaygınlaşmasına çok büyük katkı sağlayabilir (Pottoo et al. 2018).

Yukarıda belirtilen alanlarda henüz Li-Fi teknolojisi yaygın olarak kullanılamamaktadır. Li-Fi, hala gelişmekte olan bir teknolojidir ve iyileştirilmesi gereken kısa menzil ve engel müdahalesi benzeri bazı dezavantajlara sahiptir (Sarkar et al. 2015). Yapılan çalışmalarda Li-Fi sistemlerinin yaygın kullanımı için maruz kaldığı bozucu etkiler azaltılıp yok edilmeye çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında LED dizilerinin kullanıldığı yüksek hızlı bir Li-Fi sistem tasarımı ve temel analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen bu tasarımda kare prizma şeklindeki bir oda için aydınlatma ve optik kanal parametrelerine dair hesaplamalar yapılarak LED dizilerinin kullanımı ve uygulanan modülasyon teknikleri ile Li-Fi sistem parametrelerindeki iyileşmeleri gözlemlemek hedeflenmiştir.

Literatürdeki modelleme çalışmalarında yaygın olarak OOK-NRZ kullanılmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak OOK-NRZ kullanıldığında sistem performansı incelenmiş daha sonra çalışma bir adım ileri taşınarak OOK-RZ ve 4-PPM modülasyon uygulanmış böylece sistemin ISI etkisi azaltılmış ve görüş alanı açısı (Field of View, FOV) 60° iken elde edilen hız 100Mbps'den 500Mbps'ye çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda OOK-RZ ve 4-PPM modülasyonla

çalıştırılan LED dizileri için BER ve RMS gecikme yayılımının daha önce incelenmediği görülmüştür ve bu çalışma Li-Fi sistemleri için literatürdeki bu eksikliği gidermesi beklenmektedir.

Yapılan çalışma beş ana bölüm şeklinde sunulmuştur. Giriş bölümünde görünür ışık iletişim sistemlerine neden ihtiyaç duyulduğu ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir. İkinci bölümde ise literatürdeki görünür ışık iletişiminin gelişimine katkı sağlayan çalışmalara yer verilmiştir.

Materyal ve Yöntem bölümünde detaylı olarak Li-Fi sistemlerine, alıcı ve verici yapılarına, kullanılan modülasyon tekniklerine, aydınlatma gereksinimlerine, Li-Fi sistem tasarımında kullanılan tüm hesaplamalara, kullanılan materyallere ve sistem tasarımına yer verilmiştir.

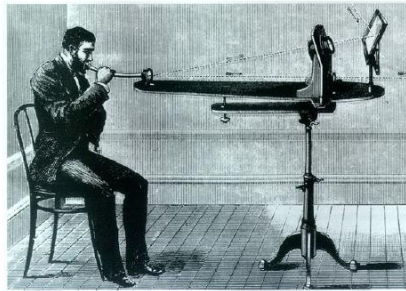
Dördüncü bölümde kapalı ortamda görünür ışık kullanılarak gerçekleştirilen veri iletimi sırasında ortamın direkt aydınlatma, iletilen güç, veri iletim kalitesi, hata oranı, hızı ve gecikme yayılımının dağılımı hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Tasarlanan sisteme farklı modülasyon teknikleri uygulanarak elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Ayrıca gerçek zamanlı veri iletimi gerçekleştirme imkânı sunan bir Li-Fi düzeneği kullanılarak veri iletimi incelenmiştir.

Sonuç ve öneriler bölümünde ise tasarlanan benzetim sonuçları ve gerçek zamanlı Li-Fi düzeneği yorumlanmış ve yapılan çalışmanın daha ileriye taşınabilmesi için uygulanabilecek yöntemlere değinilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kablosuz mobil iletişim sistemleri kullanıma sunulduğundan beri çok büyük bir yayılım göstermiştir ve bugün kablosuz mobil iletişim sistemlerine yönelik yoğun bir talep mevcuttur. Her geçen yıl biraz daha artan bu talep sonucunda ağ spektral verimliliğinin yeni getirilen standartlara ve alandaki büyük teknolojik ilerlemelere rağmen doyuma ulaşması kaçınılmazdır. Tsonev et al. (2014) çalışmalarında, Office of Communications tarafından 2013’de yayınlanan raporda yaklaşan bir “RF (Radyo Frekans) spektrum krizinden bahsedildiğini aktarmışlardır. Elektromanyetik spektrumun RF bölgesine alternatif olabilecek parçalarını keşfetmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışma alanlarından biri VLC yani görünür ışık iletişimidir.

Graham Bell 1880 yılında modüle edilmiş güneş ışığını kullanarak telefon konuşmasını kablosuz bir şekilde iletmeyi başarmıştır. Bu çalışma VLC’nin en önemli örneklerindendir. Bell, sesli mesajı kendi icadı olan fotofon ile iletmıştır. Fotofon, sesi bir enstrüman aracılığıyla esnek bir aynaya yansıtır ve aynanın titreşmesine neden olur. Aynadaki titreşimler, aynadan yansıyan ışığın değişmesine neden olur. Alıcı tarafta bu ışık yakalanır ve hassas bir selenyum kristali tarafından tekrar sese dönüştürülür. Yapılan çalışmayla görünür ışık iletişim menzilinın yüzlerce metreden fazla olabileceği kanıtlanmıştır. Fakat görünür ışık kablosuz iletişiminin hayatımıza girmesi gerekli teknolojik cihazlar geliştirilene kadar beklemek zorunda kalmıştır (Bell 1880).



Şekil 2.1. Fotofon (Komine 2005).

Tanaka et al. (2000) tarafından kapalı alanlarda kablosuz bağlantı için beyaz renkli LED’lerin kullanıldığı bir optik iletişim sistemi önerilmiştir. Bu çalışmada beyaz renkli LED’lerin yüksek güç çıkışına sahip olduğu ve gelecek için yeni nesil ışık

kaynağı olarak kabul edildiği ayrıca önerilen sistemin özel ağlar için uygun olduğu rapor edilmiştir.

Gerçekleştirilecek veri iletiminin performansı açısından modülasyon önemli bir etkindir. Tek taşıyıcı modülasyon teknikleri ilk olarak kızılötesi iletişime dayalı yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (intensity modulation/direct detection-IM/DD) optik kablosuz iletişim için önerilmiştir (Kahn and Barry 1997). Pang et al. (1999) ise bir veya daha fazla LED'in modüle edildiği ve sesli mesajlarla kodlandığı bir ses bilgi sistemini tanıtmış ve görünür ışığın modülasyonundan bahsetmişlerdir.

2004 yılında yapılan bir çalışmada, beyaz LED'ler kullanılan bir iç mekân görünür ışık iletişim sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemde, LED'ler sadece odayı aydınlatmak için değil, optik kablosuz iletişim sistemi için de kullanılmıştır. Oda içerisine çok sayıda ışık kaynağı yerleştirilmiştir. Yayılan ışıkların izlediği optik yol farkları dikkate alınarak müdahalenin ve yansımanın etkisi ile ilgili analizler yapılmıştır (Komine and Nakagawa 2004).

Açık kapalı anahtarlama (on off keying-OOK), darbe genlik modülasyonu (pulse amplitude modulation-PAM), darbe genişlik modülasyonu (pulse width modulation-PWM) ve darbe konum modülasyonu (pulse position modulation-PPM) gibi modülasyon tekniklerinin Li-Fi sistemlerinde uygulanması kolaydır. Sugiyama et al. (2007) çalışmalarında, PWM tekniğini kullanarak 4,8Kbps veri iletim hızı elde etmişlerdir. Park (2007) yaptığı çalışmada, ilk kez beyaz LED ile sıfıra dönüşlü olmayan açık kapalı anahtarlama (non returned to zero on off keying-OOK-NRZ) kullanılmasını önermiştir ve bir VLC bağlantısı üzerinden 10Mbps hız ile veri iletimi gerçekleştirmiştir. Le Minh et al. (2008) tarafından yapılan çalışmada ise beyaz LED tabanlı VLC sistemlerinin modülasyon bant genişliğini önemli ölçüde arttırabilen bir çoklu rezonans sürüş eşitleme tekniği uygulanmıştır. 16 LED kullanan deneyde 2m mesafe ve 0,5m kapsama yarıçapına sahip bir bağlantı için 40Mbps'de 25MHz bant genişliği ve düşük hata oranına sahip veri iletimi ve ofis için gerekli seviyelerde oda aydınlatması sağladığı rapor edilmiştir.

Komine et al. (2009) yılında yaptıkları çalışmada, ISI sorununun üstesinden gelmek için uyarlanabilir bir dengeleyici kullanımı önerilmiştir. Veri hızı 700Mbps'yi aşarken ISI'nin neden olduğu bozucu etki büyük oranda azaltılmıştır.

2009 yılında yapılan bir çalışmada, OOK kullanarak 5m mesafede 125Mbps'de fosforesan (phosphorescent) beyaz LED'lere dayalı bir iç mekân görünür ışık bağlantısı elde edilmiştir (Vucic et al. 2009a). Yine aynı yıl bu kez dikgen frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing-OFDM) kullanılarak bir fosforesan beyaz LED ışık kaynağı ile 0,7m uzaklıktan 200Mbps'dan daha fazla iletim hızında çalışan görünür ışık bağlantısı ilk kez gösterilmiştir (Vucic et al. 2009 b). Vucic et al. (2010a)'un yaptığı çalışmada, optik alıcı olarak PIN fotodiyotlar yerine çığ fotodiyot (avalanche photodiode-APD) kullanılarak performansın daha da iyileştirilebileceğini rapor etmişlerdir. ADP ve OOK-NRZ kullanılarak elde edilebilen veri hızının 230Mbps olduğu bir sistem tasarlamışlardır. Vucic et al. (2010b)'un yaptığı başka bir çalışmada, OFDM tabanlı sistemin veri hızı 513Mbps'ye yaklaşmıştır ve yapılacak iyileştirmeler ile hızın 1Gbps olabileceği bildirilmiştir.

2011 yılında ise Harald Haas tarafından duyurulan Li-Fi ile VLC tanınırlık kazanmıştır. TED'in global görünür ışık iletişimi konulu konuşmasında tanıttığı bu teknolojinin isim mucidi de kendisidir (Haas et al. 2015).

2010 yılında yapılan bir çalışmada, iç mekân için 2×1 beyaz LED dizisi ve 3×3 fotodedektör dizisinden oluşan yüksek hızlı çoklu giriş çoklu çıkışlı bir (Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing- MIMO-OFDM) optik kablosuz iletişim sisteminin tasarımı sunulmuştur. 1m mesafede 220Mbps iletim elde edilmiştir (Azhar et al. 2010).

Nguyen et al. (2010) iç mekân görünür ışık iletişim ortamı için MATLAB ve Simulink tabanlı bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçlar hazırlanan program, vericilerin konumlarını ve her duvardaki yansımaları dikkate alınarak tasarlanmıştır. Simülasyonla, odada oluşacak aydınlanma dağılımları ve ortalama karekök gecikme yayılımı analiz edilmiştir. Tasarlanan sistemde OOK-NRZ modülasyon şeması kullanılarak 20Mbps hızda veri iletimi yapılabileceği belirtilmiştir.

Lee et al. (2011) yaptıkları çalışmada, tekli ve çoklu fosfor tabanlı beyaz LED'lerin özelliklerini ve görünür spektrumdaki yansımaları dikkate alarak iç mekân çok yönlü dağılım özelliklerini analiz etmişlerdir. Barry modeli kullanılan bu çalışmada VLC'nin kızılötesi iletişimden daha büyük bant genişliği sunduğu gösterilmiştir.

2012 yılında yapılan bir çalışmada ise optimize edilmiş koşullarda ayrık çoklu ton (Discrete Multi-Tone-DMT) modülasyonu kullanılarak 1Gbps'lık veri hızı elde edilmiştir. LED'in sınırlı kullanılabilir bant genişliğinden verimli bir şekilde yararlanmak için bit ve güç yükleme teknikleri uygulanmıştır. 10lx'lük çok düşük bir aydınlatma seviyesinde bile, 640Mbps'lık yüksek hızlı bir VLC bağlantısının elde edilebileceği gösterilmiştir (Khalid et al. 2012).

Xi et al. (2012) basit modülasyon tekniklerine dayanan yüksek veri iletim hızına sahip VLC sistemi uygulamasını yapmışlardır. Bu tür tekniklerin, veri iletimi için bit başına daha düşük enerji, basit alıcı-verici tasarımı ile sonuçlandığını ve aydınlatma seviyelerini kontrol etmek için aydınlatma sistemlerine uygulanan darbe genişlik modülasyonunun, karartma kontrol şemalarıyla uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmada 16 seviyeli bir PAM şeması önerilmiş ve 4×4 LED dizisini kullanarak VLC'ye dayalı bir video iletim sisteminin deneysel bir gösterimi gerçekleştirilmiştir. Veri aktarım hızı 10Mbps'den 40Mbps'ye yükseltilebilmiştir.

2012 yılında Azhar et al.'in yaptığı bir çalışmada, 1m uzaklıktan, 1,1Gbps hızında veri iletimi 4 kanallı MIMO-OFDM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde 4×4 lük bir LED dizisi ve 3×3 lük bir alıcı dizisi kullanılmıştır (Azhar et al. 2012). Başka bir çalışmada ise mavi filtreleme ve eşitleme devresi ile OOK-NRZ modülasyon kullanılan sistemde, 340Mbps'a kadar data iletim hızına ulaşılmıştır ve 151MHz'lik bir bant genişliği elde edilmiştir. VLC bağlantısı 1W beyaz LED kullanılarak 43cm mesafede çalışmaktadır. Sistemin bit hata oranı (bit error rate-BER) 2×10^{-3} olarak rapor edilmiştir (Li et al. 2013).

Ghassemlooy et al. (2013) yaptıkları çalışmada, verici ve alıcı olarak bir LED ve düşük bant genişliğine sahip bir fotodedektör kullanılan VLC'nin deneysel bir gösterimi sunmuş ve 4Mbps iletişim hızı elde etmişlerdir. ISI etkisi nedeniyle yüksek veri

hızlarına ulaşmak için bir yapay sinir ağı (YSA) dengeleyici gereklidir. Bu çalışmada, OOK-NRZ ve 4-PPM dijital modülasyon teknikleri test edilmiştir. Dengeleyici olmadan, 4-PPM ve OOK için sırasıyla 200Kbps ve 300Kbps veri hızları elde edilmiştir. YSA dengeleyici ile OOK ve 4-PPM için sırası ile 2,8Mbps ve 3.75Mbps veri hızları elde edilmiştir.

Wu et al. (2014) yaptıkları çalışmada, daha düşük tepe ortalama güç oranlı (peak to average power ratio-PAPR) OFDM çok taşıyıcılı sistemin faydalarını göstermişlerdir. VLC'deki lokalize Fourier dönüşüm-yayılmış dik frekans çoğullama (localized DFT Spread- LDFT-S OFDM) ve ters ayırık Fourier dönüşüm-yayılmış dik frekans çoğullamanın (interleaved DFT Spread-IDFT-S OFDM) hem PAPR'yi önemli ölçüde azalttığını hem de önemli bir bit hata oranı iyileştirmesi sağladığı sonucuna varılmıştır.

Haigh et al. (2015) yayınladıkları çalışmada, Li-Fi için bir taşıyıcısız genlik ve faz modülasyonunu (Carrier-Free Amplitude and Phase Modulation-CAP) önerilmişlerdir. CAP hesaplama açısından karmaşık olmasına rağmen, bant sınırlı Li-Fi kanalında yüksek spektral verimlilik elde edilmiştir.

Çoğalan (2015) ise Li-Fi sistemlerinde bir bileşik verici ve iletilen sinyalin negatif olmayan özelliği kullanılarak yeni birçok kullanıcı iletim yöntemi önermiştir. Kanalin tersini veya öz vektörlerini bulmayı gerektiren vericide ön kodlama yerine, bir LED seçim algoritmasına dayanan güç tahsis yaklaşımı sunulmuştur. Simülasyon sonuçları, önerilen çok kullanıcı iletim yönteminin yeterli ortalama BER performansına ulaştığını göstermiştir.

Diğer bir çalışmada ise iç mekân VLC ortamlarında çift yönlü bir Li-Fi sistemi için yeni bir kullanıcı tahsis şeması önerilmiştir (Sewaiwar et al. 2015). Kullanıcılara kırmızı, yeşil ve mavi renk kümeleri olarak tanımlanan ayrı spektral bantlar tahsis ederek minimum girişimle iki yönlü veri iletişimi sağlanmıştır. Kullanıcı verileri karesel genlik modülasyonlu DC bileşenin eklendiği optik ortogonal frekans bölmeli çoklu erişim (Quadrature amplitude modulation-DC biased optical-orthogonal frequency division multiple access-QAM-DCO-OFDMA) ile modüle edilmiş ve kullanıcılara üç farklı renk kümesinin ayırt edici yoğunlukları atanarak iletişim

sağlanmıştır. Önerilen çift yönlü iletişim şemasının tipik bir iç mekân VLC ortamında verimli ve güçlü olduğu sonucuna varılmıştır.

2015 yılında yapılan bir çalışmada, OOK, CSK ve PPM modülasyon şemaları için yapılan çalışmalar incelenerek karşılaştırma tablosu oluşturulmuş ve PPM'nin en yüksek veri hızına sahip olduğu bildirilmiştir (Shinwasusin et al. 2015).

Ferreira et al. (2016) tarafından yapılan çalışmada, VLC ve polimer fiber optik sistemler için iki yeni mikro LED tasarımı sunulmuştur. Tasarlanan LED'lerin 800MHz'i aşan bant genişliklerine sahip olduğu bildirilmiştir. Ayrıca tasarlanan mikro LED'lerle DC bileşenin eklendiği optik OFDM (DC biased optical OFDM- DCO OFDM) kullanılarak sırasıyla 5Gbps ve PAM kullanılarak 3,5Gbps veri hızları elde edilmiştir.

Spektral verimlilik ve enerji verimliliğini arttırıp, hesaplama karmaşıklığını azaltarak performans iyileştirilmesi amacı ile birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda çeşitli optik OFDM şemaları tasarlanmıştır. Wang et al. (2017)'in yaptığı çalışmada, optik OFDM çeşitlerinin performanslarını karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, DCO-OFDM'in DC bileşen ekleme nedeniyle enerji verimliliği bakımından dezavantajlı olduğunu belirtmiştir. ACO-OFDM'in ise PAM-DMT, U-OFDM, Flip OFDM ve DCO-OFDM ile karşılaştırıldığında spektral verimliliğinin düşük olduğunu bildirmiştir.

2017 yılında yapılan bir çalışmada ise VLC teknolojisi için frekans kaydırma anahtarlama (frequency shift keying-FSK) ve OOK kullanılan farklı modülasyon şemalarını karşılaştırılmıştır. OOK kullanılan sistemin hem maliyet hem de bit hata oranı açısından daha iyi bir performans sergilediği bildirilmiştir (Netsianda et al. 2017).

Goswami ve Shukla (2017)'nin yaptıkları çalışmada, iki adet Arduino Uno mikrodenetleyici kartı ve iki bilgisayar kullanılarak OOK modülasyon tabanlı basit bit Li-Fi deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan bu düzenek ile 115,200bps hızında veri iletimi gerçekleştirilmiştir.

2017 yılında yapılan başka bir çalışmada, dizi LED armatürlü gerçekçi bir VLC sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca Raptor kod tabanlı haberleşme hızının sinyal kalitesine bağlı olarak kesintisiz şekilde değişebileceği hız uyarlamalı bir sistem önerilmiştir (Albayrak and Türk 2017).

Feng et al. (2018) yaptıkları çalışmada, VLC kanalları için yol kaybı ve RMS gecikme yayılımına ilişkin ayrıntılı analizler yapmışlardır. VLC'nin çalışma frekansı arttıkça, sızma oranı ve RMS gecikme yayılımının azaldığını dolayısıyla daha güvenli ve gecikmesi daha düşük sistemlerin tasarlanabileceğini aktarmışlardır. Bu sonuçlara bağlı olarak VLC'nin 5G çağında gelecek vaat eden bir teknoloji olduğunu belirtmişlerdir.

Kurniawan et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada, sıfıra dönüşlü açık kapalı anahtarlama (Returned to zero on off keying-OOK-RZ) ve OOK-NRZ modülasyon tekniklerinin performansları alıcı pozisyonundaki değişiklikler yoluyla değerlendirilmiştir. OOK-NRZ'nin, OOK-RZ'dan daha geniş kapsama alanına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

2019 yılında yapılan bir çalışmada, bir optik hücresel ağ konfigürasyon modeli önerilmiştir. Veri hızı ve BER performansı açısından değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca sistem iyileştirmeleri için çeşitli modülasyon şemaları uygulanmıştır. Kabul edilebilir BER değerinde 100Gbps veri iletim hızına ulaşılmıştır (Gismalla et al. 2019).

2019 yılında yapılan başka bir çalışmada, gizli dinleme saldırılarına karşı yeni bir VLC yapısı önerilmiştir. Çalışmada çok kullanıcılı VLC ağındaki LED'in yarı açısı azaltılmış ve gizli dinleyicilerin kısıtlanması için alıcı çevresinde bir korunan bölge oluşturulmuştur. Alınan optik güç ve sinyal gürültü oranı (Signal to noise ratio-SNR) bakımından sistem performansı değerlendirilmiş ve önerilen model kullanılarak VLC'nin gizlilik performansının iyileştirilebileceği gösterilmiştir (Shaaban et al. 2019).

2020 yılında yapılan bir çalışmada ise GaN tabanlı seri kutuplamalı mikro ışık yayan diyot (μ LED) dizisi ve ortogonal frekans bölmeli çoğullama kullanılmıştır.

Çalışmada kablosuz uzak mesafe uygulamaları için yüksek hızlı bir VLC sistemi deneysel olarak gösterilmiştir. 0,3, 2, 5, 10, 15 ve 20m mesafelerde sırasıyla 11,74, 11,72, 10,11, 6,58, 2,84 ve 1,61Gbps hıza ulaşılabilmektedir (Xie et al. 2020) .

Zhang et al. (2020) çalışmalarında, ilk yansıyan ışığı göz önünde bulundurarak konvansiyonel yerleşim modeli ile klasik iç mekân görünür ışık iletişim modeline dayalı olarak hesapladıkları kanal kalitesinin, optimal olması için gerekli yerleşim şeklini belirlemek amacıyla Q parametresini kullanan bir yöntem önermişlerdir.

Nor (2021) tarafından yapılan çalışmada, milimetre dalga haberleşmesi (millimeter wave-mmWave), Wi-Fi ve Li-Fi kullanılarak oluşturulacak hibrit sistemlerden ve bu sistemlerin performanslarının incelenmesinden söz edilmiştir. Bu hibrit ağlar kullanıcı sayısının fazla olduğu ortamlar için tasarlanmıştır. Kullanıcı ekipmanlarının (user equipment-UE), ağ erişim noktalarıyla (access point-AP) verimli bir şekilde ilişkilendiren iki aşamalı bir yaklaşım önerilmiştir. İlk aşamada her UE mmWave, Wi-Fi ve Li-Fi ağlarından bağımsız olarak en uygun AP'sini seçmiştir. İkinci aşamada her UE, bir bulanık mantık (fuzzy logic -FL) algoritmasına dayalı olarak belirli bir ağa atanmıştır. Sistemin kullanıcı verimi ve memnuniyeti açısından geleneksel tasarımlardan daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde LED dizileriyle yüksek hızlı Li-Fi sistem tasarımı ve sonuçların analizi için kullanılan materyal ve yöntemler hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Dizi LED armatürleriyle yüksek optik güç elde edilmesi ve veri hızının artırılması planlanmıştır. Fakat görünür ışık iletişim sistemleri, haberleşme ve aydınlatma sistemleridir. Bu nedenle LED sayısı artırılırken sistem gereksinimlerinden olan aydınlatma miktarının Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (International Organization for Standardization-ISO) tarafından belirlenen standartlara uygunluğu test edilmelidir. Standartlara uygun aydınlatma sağlanıyorsa sistemin veri iletimi incelenir. Li-Fi sisteminde veri, LED'ler kullanılarak optik darbeler şeklinde alıcıya iletilir. Dolayısıyla gönderilen yüksek optik güç, sinyalin gürültü oranının artmasını ve bit hata oranının azalmasını sağlayacaktır. Artan SNR ve azalan BER uzak mesafeler ve yüksek hızlarda iletişim imkânı sunar.

Gönderilen optik sinyallerin, haber sinyalinin bir bitinin iletimi tamamlandıktan sonra alıcıya ulaşması semboller arası girişime neden olmaktadır. ISI sinyal girişimi nedeniyle haberleşme kalitesini düşüren bozucu bir etkidir. Modellenen sistemin çok yollu yansımalarından dolayı normalleştirilmiş gecikme süresinin tahmini için RMS gecikme yayılımı hesaplanır.

Bahsedilen parametreler modellenen sistemin temel analizleri için bilinmelidir. Bölümün devamında direkt aydınlatma, alınan optik güç, SNR, BER, ISI ve RMS gecikme yayılımının hesaplanması için izlenebilecek yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca sistem çalışmasının iyileştirilmesi için uygulanabilecek modülasyon teknikleri detaylı olarak açıklanmıştır.

3. 1. Li-Fi

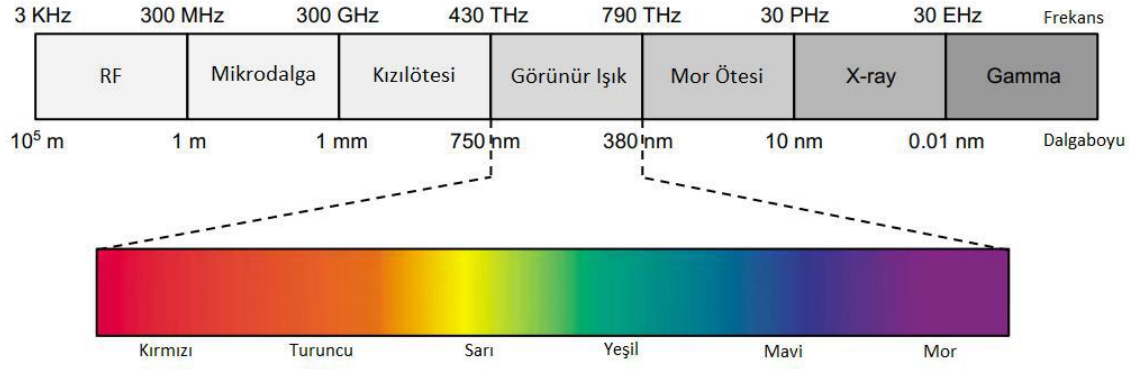
RF teknolojisi piyasaya sürüldüğü günden beri pek çok açıdan geliştirilmiş ve günümüzde kablosuz iletişim için yaygın olarak kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. Artan talep sonucu mevcut RF bant genişliği yetersiz kalabilir. Bu durum araştırmacıları

alternatif çözümler aramaya yöneltmiştir. Görünür ışık dalga boyu kullanılarak yapılan çalışmalarda ümit vaat eden sonuçlar elde edilmiştir (Ergül et al. 2015).

Bu çalışmalardan birisi görünür ışık haberleşmesidir (VLC). VLC, görünür ışığın aydınlatmanın yanı sıra haberleşme için kullanıldığı eski bir tekniktir. Veri iletişimini gerçekleştirmek amacı ile görünür ışık dalga boyunun kullanıldığı çalışmaların temeli 1970'li yıllara dayanmaktadır (Gfeller and Bapst 1979). Fakat bu yıllarda kullanılan ışık kaynaklarının anahtarlama hızlarının ve kullanım ömürlerinin düşük olması verimli sistem tasarımını engellemiştir (Küçük 2021).

VLC, Li-Fi teknolojisinin Harald Haas tarafından tanıtılması ile popülerlik kazanmıştır. Bir Li-Fi sisteminin çalışma mantığı göz önünde bulundurulduğunda, Li-Fi terimini ışık uzantılı olarak tercüme etmek yerinde olacaktır. Li-Fi, elektromanyetik spektrumda kızılötesi, görünür ve ultraviyole frekanslarını kullanarak kablosuz veri iletim imkânı sunan kablosuz optik haberleşmenin (optical wireless communication-OWC) bir alt dalıdır.

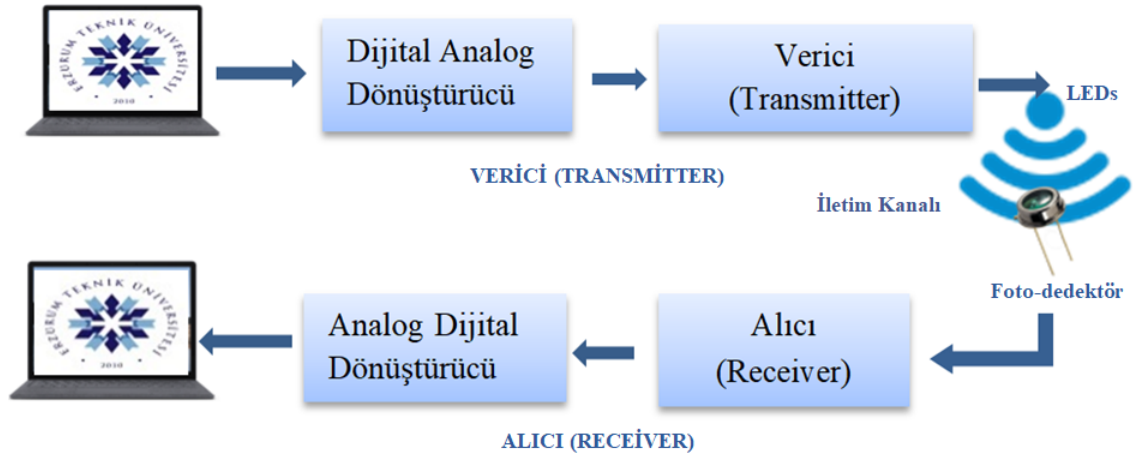
Li-Fi, yüksek hızlı veri iletişimi için görünür ışık spektrumu ve enerji verimli aydınlatma sağlayan ışık yayan diyotları (LED) kullanan gelişmiş bir kablosuz iletişim teknolojisidir. Haberleşme LED'ler art arda açık ve kapalı konuma getirilerek gerçekleştirilebilir. LED'ler çok hızlı anahtarlanabildiğinden veri iletimi de hızlı bir şekilde gerçekleşir. Kullanılan ışığın geniş spektrumu sayesinde büyük miktarlarda verinin hızlı bir şekilde aktarımı gerçekleştirilebilir. Şekil 3.1'den de görüleceği üzere görünür ışık spektrumu tüm RF spektrumundan 10.000 kat daha fazla bant genişliği içerir (Sarkar et al. 2015).



Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrum.

İletim için LED'lerin kullanılması her yerleşim ortamına entegre edilmiş ve gelişmiş altyapılar sunar. Aydınlatma ve iletişim işlevlerini birleştirmek muazzam maliyet tasarrufu ve karbon ayak izi azaltma potansiyeli sunmaktadır. Ayrıca aydınlatma çoğu işyerinde gündüz de açık olduğundan, iletişim için kullanılan enerji pratikte sıfıra olacaktır. Elbette bu her mekân için geçerli değildir. Gündüz aydınlatmanın gerekli olmadığı durumlar da mevcuttur. Li-Fi haberleşme sistemlerinin ışıkların görsel olarak kapalı olduğu ancak veri iletişimine izin verecek şekilde kullanıldığı yoğunluk modülasyonu (IM) teknikleri ile enerji verimli kullanımı mümkündür (Elgala et al. 2011).

Li-Fi sistemleri verici ve alıcı olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Şekil 3. 2'de basit bir Li-Fi sistem uygulaması gösterilmektedir. Bu sistemde gönderilecek ikili yapıdaki bilgi dijital analog dönüştürücü ile LED'lerin anahtarlanması için kullanılır. Alıcı taraftaki fotodedektörler optik darbeleri algılar ve analog dijital dönüştürücü marifeti ile alıcı bilgisayarda orijinal bilgi tekrar oluşturulur (Goswami and Shukla 2017).



Şekil 3.2. Li-Fi sistem şeması.

Li-Fi teknolojisi, doyuma ulaşacağı düşünülen Wi-Fi sistemleri için alternatif olarak düşünülmektedir. Li-Fi teknolojisi Wi-Fi ile karşılaştırıldığında Çizelge 3.1’de belirtilen avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülür (Sarkar et al. 2015).

Çizelge 3.1. Li-Fi ve Wi-Fi sistemlerinin karşılaştırması (Sarkar et al. 2015).

Özellik	Li-Fi	Wi-Fi
Güvenlik	Veri güvenliği daha yüksektir.	Güvenliği daha azdır.
Araç	Veri aktarımı için görünür ışık kullanılır.	Radyo dalgaları veri aktarımı için kullanılır.
Aralık	Menzil 10m ile sınırlıdır.	Menzil büyüktür, 100m’ye kadar uzatılabilir.
Maliyet	Işığı kullandığı için daha ucuzdur.	Radyo spektrumu kullandığı için pahalıdır.
Teknoloji	Noktadan noktaya ağ topolojisi kullanır.	Noktadan çok noktaya ağ topolojisini kullanır.
Veri Yoğunluğu	Veri yoğunluğu çok yüksektir.	Veri yoğunluğu nispeten çok düşüktür.
Değer	Piyasa değeri düşüktür.	Piyasa değeri yüksektir.
Veri aktarımı	Verilerin iletimi doğrudan bitler kullanılarak yapılır.	Verilerin iletimi radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilir.
Engel müdahalesi	Engel müdahalesi çok yüksektir.	Engel müdahalesi düşük veya neredeyse göz ardı edilebilir.
Kullanılabilirlik	Işık bulunan hemen hemen her yerde mevcuttur.	Kullanılabilirliği düşüktür.

3.2. VLC Vericiler

Optik haberleşme sistemlerinde kullanılacak ışık kaynaklarının hızlı biçimde anahtarlanabilmelerine ihtiyaç duyulur. LED’ler, floresan lambalara ve akkor lambalara

3. MATERYAL ve YÖNTEM

göre yüksek verimlilik, çevre dostu üretim, tasarım esnekliği ve uzun kullanım ömrü gibi birçok avantaja sahiptir. LED'ler tipik olarak 100.000 saatten uzun kullanım ömrüne sahiptir (Sarkar et al. 2015). Çizelge 3.2'de LED'lerin, floresan ve akkor lambalar ile karşılaştırılması sunulmaktadır.

Çizelge 3. 2. LED'lerin, floresan ve akkor lambalar ile karşılaştırılması (Şenyer 2016).

Özellik	LED	Akkor lamba	Floresan lamba
Elektrik kullanımı	6-8W	60W	13-15W
Cıva içeriği	Hayır	Hayır	Evet
*RoHS uyumluluğu	Evet	Evet	Hayır
CO ₂ yayılımı	451Libre/yıl	4500Libre/yıl	1051Libre/yıl
Neme duyarlılık	Yok	Az miktarda	Evet
Ani olarak açılma	Evet	Evet	Hayır
Açma/kapama döngüsü etkisi	Yok	Az miktarda	Evet
Kırılabilirlik	Dayanıklı	Dayanıksız	Dayanıksız
Isı yayılımı	3,4btu/saat	85btu/saat	30btu/saat
Hata modları	Tipik değil	Az miktarda	Evet

*RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directive-Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama Yönetmeliği)

Yayılan ışığın dalga boyu, Çizelge 3.3'de gösterildiği gibi LED çipini oluşturmak için kullanılan yarıiletken malzemenin türüne bağlıdır (Eldar 2017).

Çizelge 3.3. LED’de kullanılan yarıiletken türüne bağlı olarak elde edilen renkler (Eldar 2017).

Dalga boyu (nm)	Renk	Yarıiletken malzeme
940	Kızıl ötesi	GaAlAs/GaAs
880	Kızıl ötesi	GaAlAs
700	Parlak kırmızı	GaP
660	Ultra kırmızı	GaAlAs/GaAs
655	Kırmızı	GaAsP/GaAs
635	Kırmızı	GaAsP/GaP
610	Turuncu	GaAsP/GaP
585	Sarı	GaAsP/GaP
568	Yeşil	GaP
523	Ultra yeşil	InGaAl/SiC
502	Ultra yeşil	InGaP/SiC
470	Saf Mavi	InGaP/SiC
430	Ultra mavi	GaN/SiC
385	Ultraviyole	GaN

LED’lerin boyutlarının küçültülmesi ve açılıp kapanma hızlarının artırılması Li-Fi teknolojisi için çok önemlidir. Farklı boyutlardaki LED’lerle farklı veri iletim hızlarına ulaşılabilir. Normal boyutlu LED ampuller, ışık yoğunluğunda milyonlarca varyasyonu sahip olan mikro LED’lere indirgenebilir (Sarkar et al. 2015).

Beyaz ışık altında nesnelerin renklerinin doğal ışık altındaki renklerine çok benzediğinde hem iç hem de dış mekân aydınlatmalarında en çok beyaz ışık tercih edilir (Pathak et al. 2015). LED kullanılan aydınlatmalarda, beyaz ışık iki şekilde üretilir.

Fosforlu mavi LED yapılarında, sarı fosfor kaplamalı mavi bir LED kullanılır ve sarı kaplamadan geçen mavi ışıkla beyaz renk elde edilir. Farklı fosfor tabakası kalınlıkları beyaz ışığın farklı tonlarının (renk sıcaklıklarının) elde edilmesini sağlar.

Ayrıca beyaz ışık, kırmızı, yeşil ve mavi ışığın birleştirilmesiyle de üretilir. Bu yöntemde üç ayrı LED kullanıldığı için fosforlu mavi LED yöntemine göre daha maliyetlidir.

İletişim açısından değerlendirildiğinde fosfor kaplamalı mavi LED'lerin, fosfor kaplaması nedeni ile anahtarlama hızları düşüktür. Kırmızı, yeşil ve mavi LED (RGB LED) kombinasyonun kullanıldığı beyaz ışık üreten LED'lerde ise üç farklı dalga boyuna sahip ışık kullanıldığından renk kaydırmalı anahtarlama (CSK-Color Shift Keying) yapılabilir. Bu özelliği nedeniyle VLC haberleşme sistemlerinde genellikle RGB LED'ler tercih edilir (Pathak et al. 2015).

3.3. VLC Alıcılar

Görünür ışık haberleşme sistemlerinde fotodedektörler veya görüntüleme sensörü (optik kameralar) alıcı olarak kullanılabilir (Pathak et al. 2015). Fotodedektör, alınan ışığı akıma dönüştüren yarıiletken bir cihazdır. Hali hazırda kullanılan fotodedektörler, aldıkları ışığı onlarca MHz hızlarında kolayca örneklebilirler.

Video ve görüntüleri yakalamak için kullanılan görüntüleme sensörleri, mobil cihazları ulaşılması kolay Li-Fi alıcılarına dönüştürmektedir. Görüntüleme sensörü, entegre bir devre üzerinde yer alan birçok fotodedektörden oluşur. Fotodedektörlerin sayısı görüntü sensörü tarafından yakalanabilen saniyedeki kare sayısını (frame Per second-fps) önemli ölçüde etkiler. Akıllı telefonlarda yaygın olarak kullanılan görüntü sensörlerinin saniyelik algıladığı görüntü sayısı 40fps değerini geçememektedir. Fakat bağımsız fotodedektörlerin daha yüksek hızlar elde ettiği araştırmalarda rapor edilmiştir (Pathak et al. 2015).

Fotodedektör olarak kullanabileceğimiz yapıların PIN fotodiyotlar ve çığ fotodiyot olmak üzere iki ana fotodiyot türü vardır. Düşük frekanslı modülasyonların kullanıldığı ve kısa mesafede veri iletimi gerçekleştiren haberleşme sistemlerinde PIN fotodiyotlar kullanılır. Çığ fotodiyotlar ise yüksek hızlı modülasyon şemalarının kullanıldığı ve alıcı verici arası mesafenin fazla olduğu haberleşme sistemlerinde tercih edilir (Franz and Jain 2000).

PIN fotodiyot, p ve n tipi aşırı katkılı yarıiletken bölgelerden ve bunların arasındaki katkısız bir yarıiletken tabaka ile oluşturulur. Işık diyotun p bölgesine

düşer ve soğrulur. Dedektörün üzerine düşen ışığı akıma çevirmesi için gelen ışığın dalga boyunun kesim dalga boyundan (cut-off wavelength) büyük olması gerekir. Kesim dalga boyu, Denklem 3.1’de gösterildiği gibi eV (elektronvolt) cinsinden ifade edilen bant aralığı (band gap) enerjisine bağlıdır (Franz and Jain 2000). Bu denklemde h Planck sabitini ve c ise ışığın boşluktaki hızını ifade eder. E_g yasak enerji bant aralığıdır.

$$\lambda_c = \frac{h.c}{E_g} = \frac{1,24}{E_g} \quad (3.1)$$

Bir fotodedektörün birim giriş gücü ve ürettiği akımın oranı hassasiyetini (conversion efficiency-OE) verir ve R ile gösterilir. Birimi A/W’dır. Denklem 3.2’de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$R = \frac{I_0}{P_0} (A/W) = \frac{e.\eta}{h.v} \quad (3.2)$$

Bu ifadede I_0 dedektör devresinde oluşan akımı P_0 ise dedektör üzerine düşen optik gücü, η kuantum verimliliğini, e elektron yükünü ve v frekansı temsil eder. Fotodiyot gürültüsünün sıfırlanması mümkün değildir ve bu gürültü, haberleşme sisteminin sinyal gürültü oranının azalmasına neden olur. Görünür ışık haberleşme sistemlerinde sinyal gürültü oranı, alıcı girişindeki işaret gücünün, gürültü gücüne oranıdır ve Denklem 3.3’deki gibi ifade edilir (Franz and Jain 2000).

$$SNR = \frac{S}{N} \quad (3.3)$$

Çığ fotodiyot akım yükseltme işlemini yükselteç devresinden önce kendi içinde yapar. Bu sebeple PIN fotodiyotların yerine daha hassas bir alıcı elde etmek için kullanılabilirler. Yüksek hassasiyette çalıştıkları için sınırlı gücün söz konusu olduğu haberleşme sistemlerinde kullanılırlar. Çığ fotodiyotun, p bölgesine düşen ışığın soğurulması ile serbest elektronlar oluşur ve oluşan elektronlar hızlanıp diğer atomları

etkiler ve yeni serbest elektronlar oluşmasına neden olurlar. Bu durum devam ettikçe daha fazla taşıyıcı ortaya çıkar ve çıkış etkisi gerçekleşir (Franz and Jain 2000).

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_b}\right)^n} \quad (3.4)$$

$$R = \frac{I_0}{P_0} (A/W) = \frac{M.e.\eta}{h.v} \quad (3.5)$$

3.4 denkleminde verilen M değeri çarpım faktörü olarak adlandırılır. V terimi ters besleme voltajını, V_b kırılma voltajını ve 2,5 ile 7 arasında bir değer alan n (characterstic index) malzemeye bağlı bir sabiti ifade eder. (Franz and Jain 2000).

3. 4. Li-Fi Modülasyonunda Karşılaşılan Zorluklar

Görünür ışık temelli veri iletim sistemleri LED'ler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kullanılan LED'ler seri üretim ürünü olmaları nedeniyle doğru karakterizasyondan yoksundur.

Li-Fi'de ışık, ışık yoğunluğundaki küçük değişikliklere göre modüle edilir, dolayısıyla veri iletimi voltaj-parlaklık karakteristiğinin doğrusal olmamasından etkilenecektir. Doğrusal olmayan distorsiyonu azaltmak için Elgala (2009) çalışmasında ön bozulma yöntemi (predistortion techniques-PD) tekniklerini önermiştir. Ayrıca LED sıcaklığı artmasıyla da voltaj-parlaklık (V-L) karakteristiğinde bozulmalar meydana gelir. LED karakteristiğinin doğrusal olamaması durumu hala araştırmalara konu olan bir sorundur .

Li-Fi iletişim kanalının sınırlı bant genişliğine sahip olması yüksek veri hızlarında semboller arası girişime sebep olur. Piyasada bulunan ve çalışmalarda kullanılan LED'lerin çoğunda frekans yanıtının sabit kabul edilebileceği modülasyon bant genişliği yaklaşık 2-20MHz aralığındadır (Elgala et al. 2009; Cossu et al. 2012). Buna ek olarak Li-Fi'deki kullanılabilir bant genişliği 3dB'lik kesme frekansına

geniştirilebilir (Islim and Haas 2019). Bu nedenle yüksek spektral verimliliğe sahip modülasyon teknikleri tercih edilir.

3. 5. Li-Fi Sistemleri ve Aydınlatma Gereksinimleri

Li-Fi sistemlerinin entegre haberleşme ve aydınlatma sistemleri olması nedeniyle veri iletiminde tercih edilen modülasyonun yüksek bir aydınlatma imkânı sunması beklenir. Bu nedenle Li-Fi sistemi kullanılarak aydınlatılan ortamda algılanan ışıqla ilgili kontrol edilmesi gereken bazı gereksinimler vardır. Bu gereksinimler, karartma desteği ve titreşim azaltma ile karakterize edilir. Sistemin karartma, aydınlatma seviyesi kontrolü ve titreme gibi özellikleri Li-Fi sisteminin ikincil parametreleri olarak değerlendirilir.

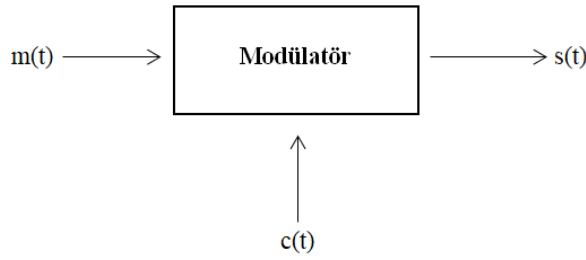
Aydınlatma seviyeleri kullanım amacına göre farklılık gösterir. Örneğin, 30-100lx aralığında bir aydınlatma, kamusal alanlarda gerçekleştirilen basit görsel görevler için yeterlidir. Fakat ofis veya konut uygulamalarında daha yüksek aydınlatma seviyesi gerektirir. LED sürücü devrelerindeki gelişmelerle LED'lerin aydınlatma miktarını keyfi bir seviyeye düşürmek ve enerji tasarrufu için sağlamak mümkün hale gelmiştir (Pathak et al. 2015; Zukauskas et al. 2002). İnsan gözü, göz bebeğini büyütürken daha düşük aydınlatmaya uyum sağlar. Bu, görünür ışıqla haberleşmesi kullanılan sistemler açısından önemlidir, çünkü bir kullanıcı uygulamaya veya enerji tasarrufuna bağlı bir karartma seviyesi seçebilir, ancak iletişim karartmadan etkilenmemelidir. Başka bir deyişle, veriler, istenen herhangi bir karartma seviyesi desteklenecek şekilde modüle edilmelidir (Pathak et al. 2015).

Görünür ışıqla ile haberleşme sağlayan bir sistem için dikkat edilmesi gereken diğer bir gereklilik titreşimin azaltılması yani ışıqla parlaklığında insan tarafından algılanabilir dalgalanmaların olmamasıdır. Berman (1991)'ın çalışmasında titremenin insanlarda ciddi zararlı fizyolojik etkilere neden olabileceği ifade edilmiştir. Bu nedenle ışıqla yoğunluğundaki değişikliklerin insan gözünün algılayabileceğinden daha hızlı olması gerekir. IEEE 802.15.7 standardı, zararlı etkilerden kaçınmak için titremenin (veya ışıqla yoğunluğundaki değişimin) 200Hz'den daha hızlı olması gerektiğini belirtmektedir (Anonim 2011).

Ayrıca Li-Fi sistemlerinin çalışmasını yüksek yol kaybı ve ortamdaki ışıklardan kaynaklanan gürültüler etkileyebilir. Sistem, kullanılan optoelektronik aygıtların (LED, fotodetektör gibi) hızlarından da etkilenebilir. Li-Fi sisteminin performansı çevre koşullarına, veri hızına, teknik çözümlere ve tasarlanan sisteme bağlı olarak değişir (Uzun 2019). Sonuç olarak görünür ışık temelli bir haberleşme sisteminin performansını iyileştirebilmek için doğru modülasyonun seçilmesi önemlidir.

3. 6. Li-Fi Sistemlerinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri

Verilerin, LED'ler aracılığıyla gönderilebilmesi için bir taşıyıcı sinyale modüle edilmesi gerekir (Sarkar et al. 2015). Modülasyon mesaj sinyalini taşıyıcı sinyal üzerine bindirerek alıcıya iletme tekniğidir (Ugweje 2000). Şekil 3.3'de modülasyon işleminin blok diyagramı gösterilmektedir.

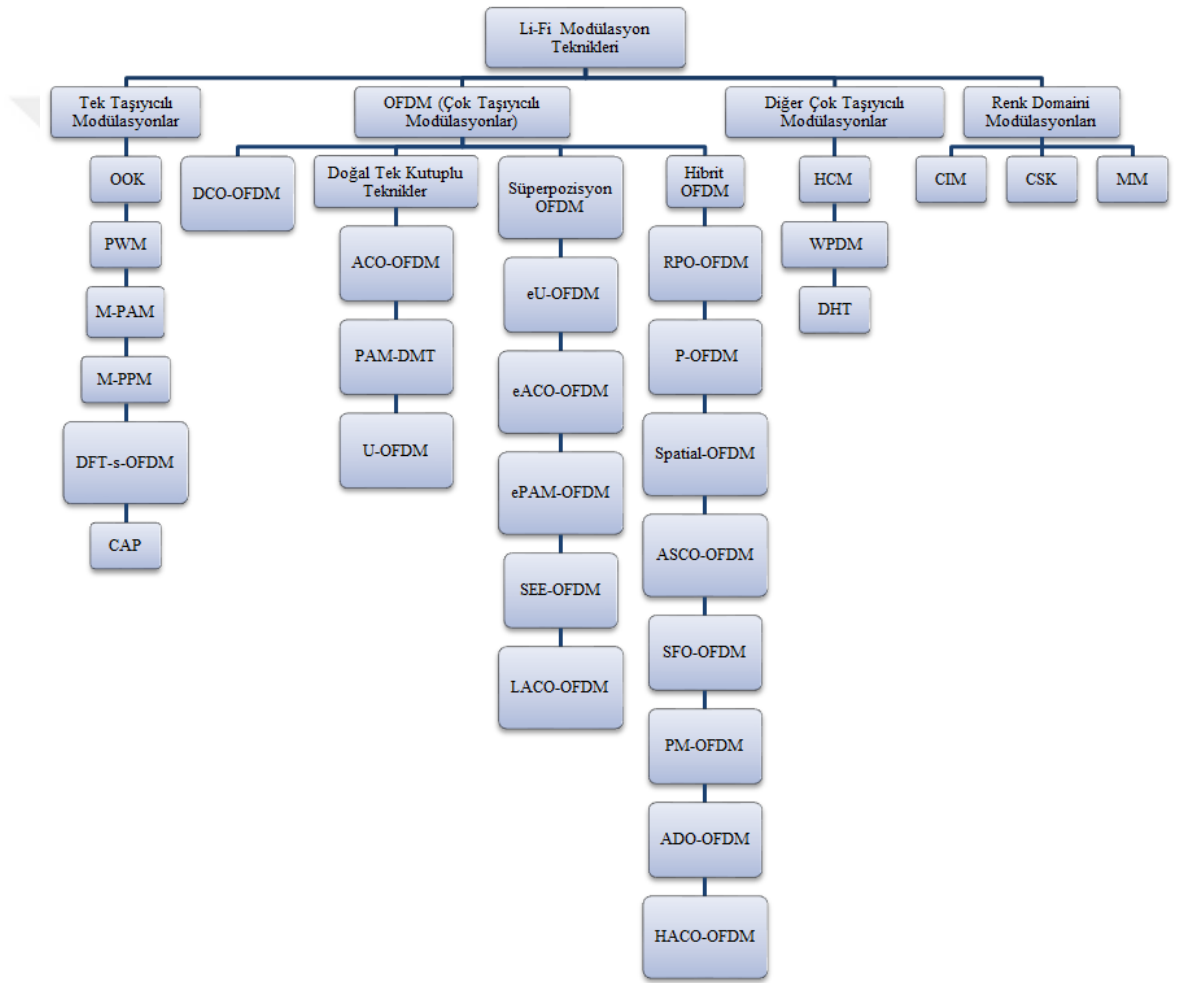


Şekil 3.3. Modülasyon işlemi ($m(t)$ = mesaj sinyali, $c(t)$ = taşıyıcı sinyal, $s(t)$ = modüle edilmiş sinyal).

Li-Fi ve RF haberleşme sistemleri arasındaki en büyük fark, Li-Fi sistemlerinde verilerin ışık sinyallerinin fazı veya genliğinin kodlanması ile gönderilmemesidir (Tsonev et al. 2014). Faz ve genlik modülasyon teknikleri Li-Fi sistemlerinde uygulanamaz ve bilginin, ışık dalgasının değişen yoğunluğuyla kodlanması gerekir. Demodülasyon, alıcıda doğrudan algılamaya bağlıdır. Bu modülasyon ve demodülasyon teknikleri yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (IM/DD) olarak adlandırılır (Pathak et al. 2015). RF haberleşme sistemleri ve Li-Fi sistemleri arasındaki bir diğer fark ise sinyallerin gerçel ve pozitif değerli olmasıdır (Yeşilkaya ve ark. 2015).

Li-Fi'de uygulanan modülasyon teknikleri taşıyıcılarına göre tek taşıyıcılı, alt taşıyıcılı ve çok taşıyıcılı modülasyonlar olmak üzere gruplandırılır (Netsianda et al.

2017). Tek taşıyıcılı modülasyon (Single carrier modulation-SCM) teknikleri olan OOK, PPM ve PAM ve benzeri modülasyon tekniklerinin Li-Fi sistemlerine kolaylıkla uygulanabilir. Diğer taraftan çok taşıyıcılı modülasyon (Multiple carrier modulation-MCM) teknikleri, özellikle, OFDM tabanlı modülasyon teknikleri, güç ve spektral verimlilik (SE) açısından daha avantajlıdır. Ayrıca SCM tekniklerinin, MCM tekniklerine göre daha karmaşık dengeleme süreci hesaplamaları vardır (İslim and Haas 2019). Şekil 3.4’de Li-Fi sistemlerinde kullanılan bazı modülasyon teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Li-Fi sistemlerinde kullanılan bazı modülasyon teknikleri (İslim and Haas 2019)

Şekil 3.4’de verilen modülasyon isimlerinin açılımları aşağıdaki gibidir. Yaygın olarak kullanılan modülasyon çeşitleri, ilerleyen kısımlarda detaylı olarak açıklandığı için burada yer almamaktadır.

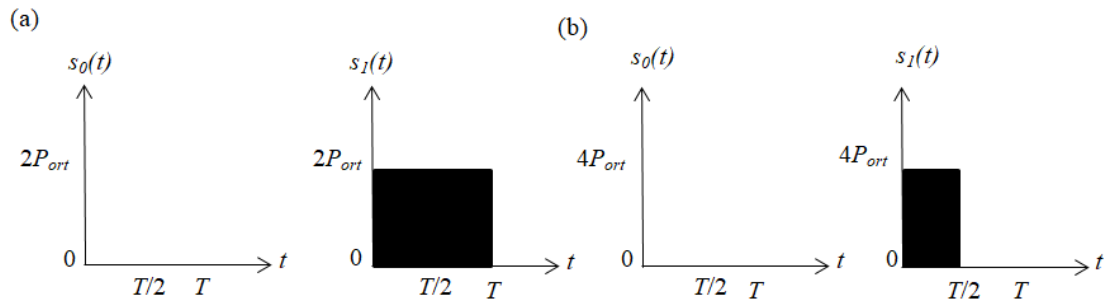
- A. Tek taşıyıcılı modülasyon çeşitleri
 - i. M-PAM: Çok düzeyli PAM
 - ii. M-PPM: Çok düzeyli PPM
- B. OFDM (çok taşıyıcılı modülasyon şekilleri)
 - i. Süper pozisyon OFDM
 - 1. eACO-OFDM: Geliştirilmiş ACO-OFDM
 - 2. ePAM-DMT: Geliştirilmiş PAM-DMT
 - 3. eU-OFDM: Geliştirilmiş tek kutuplu OFDM
 - 4. SEE-OFDM: Spektral ve enerji verimli OFDM
 - 5. LACO-OFDM: Katmanlı ACO-AFDM
 - ii. Hibrit OFDM
 - 1. RPO-OFDM: Ters kutuplu optik OFDM
 - 2. P-OFDM: Kutuplu OFDM
 - 3. ASCO-OFDM: Asimetrik ve simetrik kırılmış DC bileşenli optik OFDM
 - 4. SFO-OFDM: Spektral çarpanlara ayrılmış OFDM
 - 5. PM-OFDM: Konum modülasyonu OFDM
 - 6. ADO-OFDM: Asimetrik kırılmış DC bileşenli optik OFDM
 - 7. HACO-OFDM: Hibrit asimetrik kırılmış optik OFDM
- C. Diğer çok taşıyıcılı modülasyonlar
 - i. HCM: Hadamard kodlu modülasyon
 - ii. WPDM: Dalga boyu paketlerine bölmeli çoğullama
 - iii. DHT: Ayırık Hartley dönüşümü
- D. Renk Domaini Modülasyonları
 - i. CIM: Renk yoğunluk modülasyonu
 - ii. MM: Metameric modülasyon

3. 6. 1. Tek taşıyıcılı modülasyon

Tek taşıyıcı modülasyon teknikleri ilk olarak kızılötesi iletişim temelli IM/DD optik kablosuz iletişimler için önerilmiştir (Kahn 1997). Tek taşıyıcılı modülasyon

teknikleri genellikle düşük ila orta veri hızına sahip Li-Fi uygulamaları söz konusu iken kullanılır (Islim and Haas 2019) .

OOK modülasyon tekniğinde LED bit 1 için açılır ve bit 0 için kapanır (Dimitrov and Haas 2015). Hem RZ hem de NRZ şemaları uygulanabilir NRZ şemasında, bit süresine eşit süreli bir darbe 1'i temsil etmek üzere iletilirken, RZ şemasında darbe bitin yalnızca kısmi süresini kaplar. Görev döngüsünün 0,5 olduğu durum için iletilen dalga formları Şekil 3.5'deki gibidir (Ghassemlooy et al. 2013).



Şekil 3.5. OOK için iletilen dalga formu: (a) NRZ ve (b) RZ (Ghassemlooy et al. 2013).

OOK-RZ'nın kazancı, sistemi semboller arası girişime daha az duyarlı hale getiren, bir bit yuvası içindeki sıfıra dönüşlü darbelerden oluşmasıdır. Sonuç olarak, RZ formatının performansı daha çok algılama gürültüsü ve sinyal enerjisi arasındaki filtre kaynaklı reddetme arasındaki denge tarafından belirlenirken, NRZ formatının performansı algılanan gürültü reddi (detection noise rejection) ve ISI arasındaki denge tarafından belirlenir (Astar et al. 2010).

OOK'nın avantajı basitliği ve uygulama kolaylığıdır (Pathak et al. 2015). IEEE 802.15.7 standardına göre, OOK modülasyon kullanıldığında karartma desteği sağlamanın iki yolu vardır (Anonim 2011). Bunlardan biri LED'in açık kapalı seviyelerine farklı ışık yoğunlukları atanarak istenen karartma seviyesine ulaşılmasıdır. OOK-NRZ modülasyonu ile elde edilebilen veri hızı korunabilir fakat karartma seviyesi düşürüldüğünde iletişimin gerçekleştirilebileceği mesafe azalır. Bu metodun önemli bir dezavantajı ise açık, kapalı seviyelerde daha düşük yoğunlukların kullanılmasından dolayı LED'den yayılan ışığın rengindeki değişiktir (Muthu and Gaines 2003). İkinci yol dengeleme süresidir. Bu metotta modülasyonun açık ve kapalı

seviyeleri aynı kalır, ancak LED kaynağı tamamen açıldığında veya kapandığında ek dengeleme süreleri eklenir. Dengeleme süreleri yapılacak aydınlatma türüne göre tercih edilecek kısma miktarıyla bağlantılıdır.

PAM, verilerin sinyalin genlik seviyesine göre modüle edildiği temel bir modülasyon şemasıdır (Dimitrov and Haas 2015). Bu teknik, LED'lerin doğrusal olmayan yanıtları ve sürücüdeki akımın değişimleri nedeniyle renk sıcaklığında kaymalara neden olur.

PWM darbeler modüle edilmiş sinyali dalga katarı biçiminde taşırlar. Sinyal belirli genişlikteki darbeler kullanılarak iletilir ve LED, bu darbeler sırasında tam parlaklıkta çalışır. Modüle edilmiş sinyalin veri hızı, kısma gereksinimine göre ayarlanmalıdır. PWM'nin avantajlarından biri darbelerin yoğunluk seviyesini değiştirmeden karartmayı başarmasıdır. Bu avantaj OOK modülasyon açıklamasında yer verdiğimiz LED'deki renk kaymasını önleyebilir (Pathak et al. 2015). PWM kullanılan sistemleri kısıtlayan özellik veri hızının sınırlı olmasıdır. Bu dezavantaj ortak karartma kontrolü ve PWM'yi DMT ile birleştirerek ortadan kaldırılabilir (Ntogari et al. 2011).

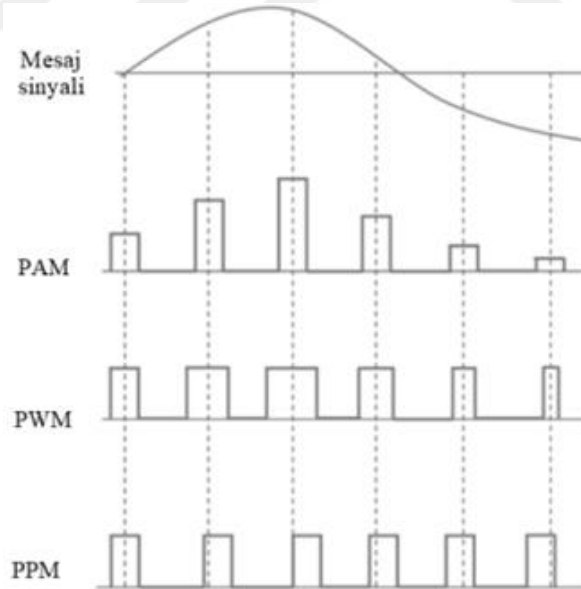
PPM'de darbenin konumuna bağlı olarak data iletimi sağlanır. PPM tekniğinde sembol süresi eşit t zaman dilimlerine bölünür ve her bir zaman diliminde bir darbe iletilir (Pathak et al. 2015). Görünür ışık haberleşmesi ile ilgili ilk çalışmalarda uygulanması basit olduğu için PPM kullanılmıştır (Ntogari et al. 2011). PPM'nin güç verimliliği OOK'dan daha yüksektir fakat daha fazla bant genişliği gerektirir (Islim and Haas 2019). OWC bağlantılarında, bant genişliği gereksinimi önemli bir endişe kaynağı değildir ve PPM birçok uygulama için iyi bir seçenektir. PPM, ortogonal bir modülasyon tekniğidir ve darbe modülasyonu tekniklerindendir (Ghassemlooy et al. 2013).

Bir L-PPM kısaltması, L adet olası zaman dilimi içinde bir zaman dilimini kaplayan ve kalan zaman dilimleri boş olan sabit güçlü bir darbeyi ifade eder. $L = 2^M$ 'dir ve burada bit çözünürlüğü $M > 0$ bir tam sayıdır. Bilgi, darbenin konumuna göre kodlanır ve darbenin konumu, M-bitlik giriş verilerinin ondalık değerine karşılık gelir. OOK ile

aynı verimi elde etmek için, PPM bit süresi T_{s_PPM} , OOK bit süresi T_b 'den Denklem 3.6'daki gibi bir M/L faktörü kadar kısa olmalıdır (Ghassemlooy et al. 2013).

$$T_{s_PPM} = \frac{T_b M}{L} \quad (3.6)$$

Güç kazançları veya spektral verimlilik için diferansiyel PPM (DPPM) kullanılmıştır (Shiu and Kahn 1999). Sistemde meydana gelebilecek titremeyi önlemek içinse değişken PPM (VPPM) kullanılmıştır (Delgado et al. 2010). VPPM sinyali modüle etmek için PPM tekniğini kullanırken istenilen karatma seviyesini elde etmek için PWM tekniğini kullanır. Dolayısıyla VPPM, PPM ve PWM tekniklerinin kombinasyonu olarak düşünülebilir. VPPM'den daha yüksek spektral verimliliğe sahip olan M seviyeli PPM (MPPM) geliştirilmiştir (Lee et al. 2015). PAM ve PPM'nin avantajları birleştirilerek darbe genliği ve pozisyon modülasyonu (PAPM) elde edilmiştir (Zeng et al. 2008a). Şekil 3.6'da bir mesaj işaretine PAM-PWM-PPM modülasyon şemaları uygulandığında oluşan sinyaller gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. PAM-PWM-PPM tekniklerinin gösterimi (Miller and Beasley 2007).

3. 6. 2. Çok taşıyıcı modülasyon

Tek taşıyıcı modülasyon teknikleri kullanıldığında, frekans seçici Li-Fi kanallarında karmaşık hesaplar gereklidir. Bununla birlikte, genel olarak, artan ISI nedeniyle veri hızları arttıkça tek taşıyıcı modülasyon tekniklerinin performansı bozulur. MCM modülasyon teknikleri, bilgi iletmek için paralel ve eşit bant genişliğine sahip alt kanallar kullanırlar (Garg 2007). Ortogonal taşıyıcı kullanan MCM teknikleri güç kazancı ve spektral verimlilik açısından Li-Fi çalışma performansını iyileştirir (Islim and Haas 2019). Li-Fi sistemlerinde özellikle, OFDM tabanlı çok taşıyıcı modülasyon teknikleri tercih edilir (Gawende et al. 2016). OFDM'nin yüksek hızlı veri aktarımına izin vermesi önemli bir avantajdır (Armstrong and Lowery 2006). Ancak PAPR, faz gürültüsüne ve frekans kaymasına duyarlı olmak gibi dezavantajlara sahiptir (Islim and Haas 2019). Tipik optik olmayan OFDM sistemlerinde, sinyal hem pozitif hem de negatif değerlere sahiptir (Armstrong 2009). IM/DD tekniğinde ise ışık şiddeti yalnızca pozitif ve gerçel değerler almaktadır.

Optik OFDM sistemleri pozitif ve gerçel değerler barındırma dezavantajından dolayı bir takım ön işlemlere tabi tutulur. Alt-taşıyıcılar aracılığıyla iletilen sinyaller Hermisyen (Hermitian) simetrik olacak biçimde seçilerek OFDM çerçevesinin (frame) bant verimliliği yarı oranda azaltılır ve optik kanal üzerinden aktarılan sinyalin gerçel değerli olması sağlanır. Hermisyen simetri, ters hızlı Fourier dönüşüm (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT) işleminden sonra frekans bölgesi sembollerine uygulanır. Literatürde, elde edilen gerçel değerli sinyallerin aynı zamanda pozitif değerli olması için bazı yöntemler önerilmiştir.

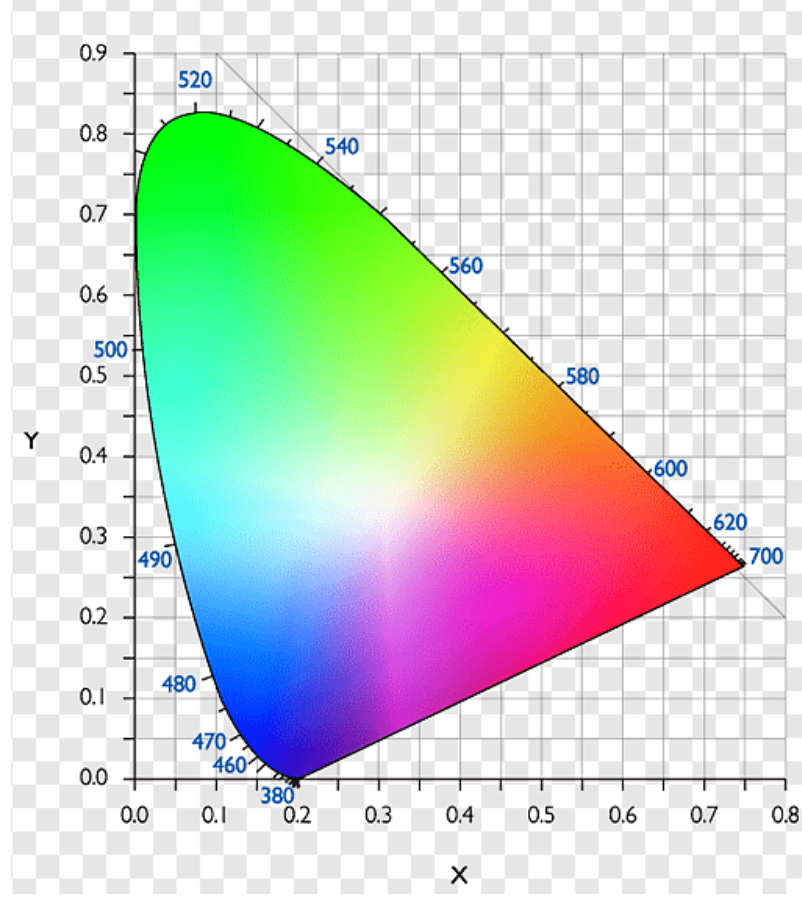
Bu yöntemlerden biri asimetrik olarak kırpılmış optik OFDM'dir (Asymmetrically Clipped Optical OFDM - ACO-OFDM). ACO-OFDM'de modüle edilen sinyaller sadece simetrik zaman alanı sinyaline yol açan tek alt taşıyıcılardır (Armstrong and Lowery 2006). Bir diğer alternatif DCO-OFDM yöntemidir. Bu yöntemde alt taşıyıcılar modüle edilir fakat sinyali tek kutuplu yapmak için sinyale pozitif doğru akım bileşeni eklenir (Armstrong and Lowery 2006). Ancak DC bileşen ekleme enerji verimliliği bakımından dezavantaj oluşturur. Wang et al. (2017), belirli

bir BER ve veri hızı elde etmek için ACO OFDM'in, DCO-OFDM göre daha düşük bir ortalama optik güce ihtiyacı olduğunu göstermiştir.

3. 6. 3. CSK modülasyonu

CSK modülasyon LED tarafından yayılan kırmızı, yeşil ve mavi ışığın yoğunluklarının değiştirilmesi ile elde edilen bir modülasyondur. Yani modülasyon sırasında frekans yerine renk yoğunlukları değiştirilir. RGB-LED benzeri LED'ler kullanılarak her bir LED'e uygulanan akım yoğunluğa göre LED'den farklı renkler elde edilebilir (Yaklaf and Tarmissi 2019). CSK modülasyon IEEE 802.15.7 standardında ana hatlarıyla belirtilmiştir (Anonim 2011).

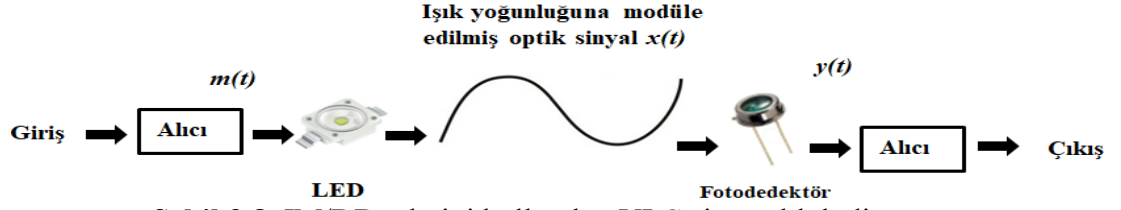
Bu modülasyon tekniği VLC için geliştirilmiştir ancak Li-Fi için de kullanılmaktadır. Gelen bitler renk kodları ile eşleştirilir. İnsan gözünün renk algısı için yaygın olarak Şekil 3. 7'de verilen CIE 1931 renk uzayı kromatiklik şeması kullanılır. CIE 1931'de yedi renk kodu görünür ışık spektrumunu bölen yedi bandın merkez değerlerine karşılık gelir. Modeldeki herhangi bir renk, kromatiklik boyutu $[x, y]$ ile temsil edilir (Hermann 2001; Yaklaf and Tarmissi 2019).



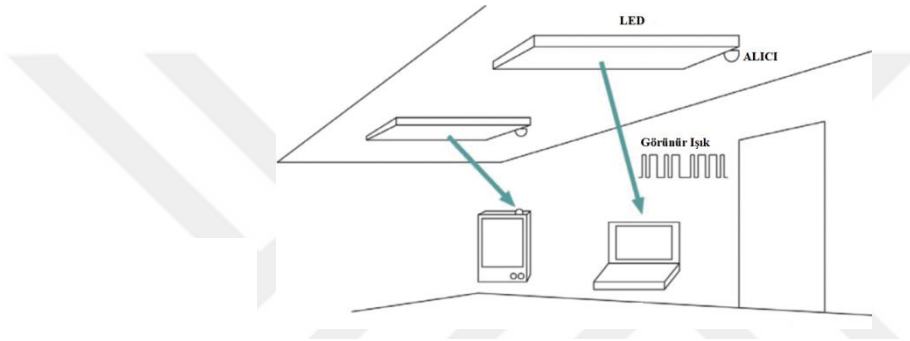
Şekil 3. 7. CIE 1931 kromatiklik şeması.

3. 7. Li-Fi Sistem Modeli

Diğer optik haberleşme sistemlerinde olduğu gibi görünür ışık haberleşmesinde de IM/DD iletim tekniği kullanılabilir. IM/DD yöntemi karmaşık olmaması ve maliyetinin düşük olması nedeni ile tercih edilmektedir. Sistemde LED'ler tarafından üretilen ışığın anlık yoğunluğu iletilecek mesaj olan $x(t)$ sinyali ile orantılı olarak modüle edilip optik kanal ortamından iletilmektedir. Alıcı taraftaki fotodiyot optik yoğunluklu sinyali algılayıp $y(t)$ ile ifade edilen elektriksel bir akıma çevirir (Mamus vd. 2016). Şekil 3.8'de IM/DD'li bir görünür ışık haberleşme sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Kapalı bir ortamda beyaz LED kullanılarak gerçekleştirilen görünür ışık haberleşmesi Şekil 3.9'daki gibi gösterilebilir.



3. 7. 1. LED ışıklarının temel özellikleri

LED ışığının iki temel özelliği vardır: ışık yoğunluğu ve iletilen optik güç. Işık yoğunluğu, LED'in parlaklığını ifade etmek için kullanılır. İletilen optik güç ise LED'den yayılan toplam enerjiyi ifade eder ve optik iletişimin bir parametresidir (Komine and Nakagawa 2004). LED'in ışık yoğunluğu Denklem 3.7 ile hesaplanır.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3.7)$$

Bu ifadede Ω uzamsal açıyı (spatial angle), Φ ise enerji akısından türetilen ışık akısının ifade etmektedir. Φ_e enerji akısını göstermek üzere ışık akısı Denklem 3.8'deki gibi hesaplanır.

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (3.8)$$

Bu ifadede λ dalga boyunu, V parlaklığı, K_m ise maksimum görünürlüğü ifade eder. Dalga boyunun 555nm olması durumunda ışık akısı yaklaşık olarak 683lm/W olarak hesaplanır.

LED'ler lazerler gibi noktasal kaynak değildirler ve etki alanları sonludur. Ev ve ofis benzeri yaşam alanlarında akkor telli lambalar yerine kullanılan LED'ler ise daha küçüktür ve sonlu etki alanları ihmal edilebilir. Bu tarz LED lambalar noktasal kaynak gibi düşünülebilir (Çavdar 2019).

3. 7. 2. Parlaklığın hesaplanması

Aydınlanma, aydınlatılmış bir yüzeyin parlaklığını ifade eder. $I(\phi)$ aydınlatma yoğunluğu ϕ ışın açısının kosinüsü ve $I(0)$ ışık şiddetinin çarpımıdır ve Denklem 3.9'daki gibi hesaplanabilir.

$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi) \quad (3.9)$$

LED çipinin Lambert ışınım modeline sahip olduğu varsayılırsa: ışınım yoğunluğu, ışınım açısına bağlı olur. m Lambertian yayılım derecesidir ve LED'in yarı aydınlıktaki güç açısı $\phi_{1/2}$ kullanılarak Denklem 3.10'dan elde edilebilir (Gfeller and Bapst 1979; Kahn and Barry 1997; Komine and Nakagawa 2004).

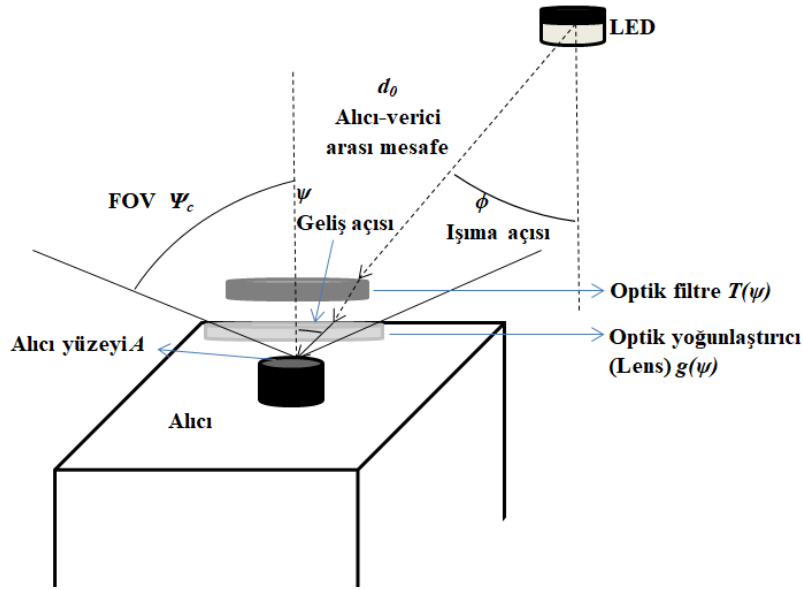
$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2}) \quad (3.10)$$

Işık kaynakları kullanılarak veri iletiminin gerçekleştirileceği ortamda oluşturulan direkt aydınlanma E_0 ile ifade edilir. E_0 her bir LED için hesaplanan aydınlatma yoğunluğu ve ψ geliş açısının kosinüsü ile doğru orantılı ve alıcı-verici arasındaki d_0 mesafesi ile ters orantılıdır. Birden fazla ışık kaynağı bulunması

durumunda direkt aydınlanmaların toplamı olarak Denklem 3.11’de gösterildiği gibi hesaplanır. Direkt aydınlanma birimi Lüks (lx)’dür (Mamus vd. 2016).

$$E_0 = \sum_{i=1}^{n_s} I(0) \cos^m(\phi_i) \cos(\psi) / d_{0i}^2 \quad (3.11)$$

3.11 denkleminde n_s toplam LED sayıdır. Tüm ışık kaynakları belirli bir merkezi $I(0)$ aydınlatma şiddetine sahiptir. ϕ_i her bir LED için ışınma açısıdır. ψ alıcı yüzeyiyle normal ekseninin yaptığı açıdır ve geliş açısı olarak isimlendirilir. d_{0i} ise her bir LED ile dedektörün yüzeyi arasındaki mesafedir (Gfeller and Bapst 1979; Kahn and Barry 1997; Komine and Nakagawa 2004). Şekil 3.10’da tek LED’li sistem modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Tek LED’li sistem modeli (Zeng et al. 2008b).

LED aydınlatma yapılırken ISO standartları dikkate alınmalıdır. ISO standartlarına göre ofisler için gerekli olan aydınlatma 300 ile 1500lx aralığında olmalıdır (Komine and Nakagawa 2004).

3. 7. 3. Işık kaynakları tarafından iletilen optik güç

Optik güç alıcı veya yansıtıcı yüzeydeki bir noktaya ulaşabilir. Yansıtıcı yüzeydeki noktaya düşen optik güç, bu noktanın, noktasal ışık kaynağı gibi davranmasına neden olur. Alıcıya iletilen optik güç hesabında doğrudan görüş hattı optik kanal DC kazancı $H(0)$ ve yansımali yol üzerindeki optik kanal kazancı $dH(0)_{yansima}$ olmak üzere iki temel bileşen vardır. Doğrudan görüş hattı üzerindeki optik kanalın DC kazancı $H(0)$ Denklem 3.12 ile hesaplanır (Gfeller and Bapst 1979; Kahn and Barry 1997). Optik kanalın DC kazancı geliş açısının değeri alıcının FOV açısı Ψ_c 'dan büyük olduğu durumlarda 0 olacaktır. Çünkü geliş açısının FOV'dan büyük olduğu durumda alıcı, üzerine gelen ışığı algılayamaz.

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d_0^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi \geq \Psi_c \end{cases} \quad (3.12)$$

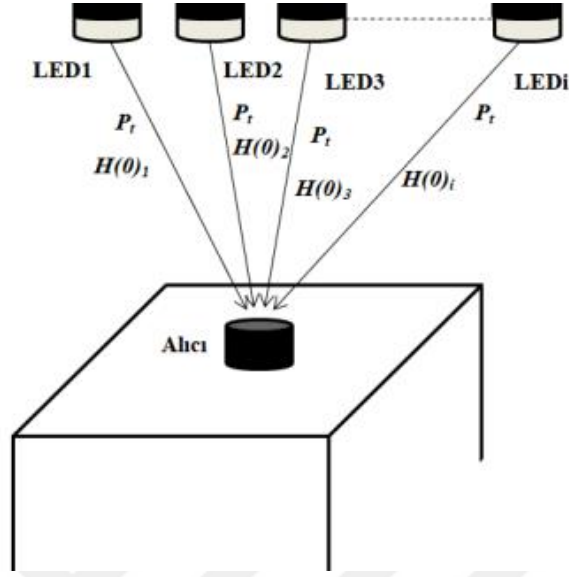
Bu ifadede A dedektörün fiziksel alanı, $T(\psi)$ optik filtrenin geçirgenliği ve $g(\psi)$ optik yoğunlaştırıcının kazancıdır. Optik yoğunlaştırıcı kazancı, Denklem 3.13'den görüldüğü üzere n kırılma indisinin görüş alanı açısının sinüsüne oranının karesine eşittir. Geliş açısının değeri alıcının FOV açısından büyük olduğu durumlarda optik yoğunlaştırıcı kazancı da tıpkı optik kanalın DC kanal kazancı gibi 0 olacaktır (Kahn and Barry 1997).

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi \geq \Psi_c \end{cases} \quad (3.13)$$

Alınan optik güç P_d 'nin ışık kaynakları tarafından iletilen optik güç P_t 'e oranı optik kanal kazancına eşittir ve Denklem 3.14 ile ifade edilir.

$$P_d = H(0).P_t \quad (3.14)$$

Şekil 3.11’de dizi LED kullanılan durum için görünür ışık haberleşme sistem modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Dizi LED kullanılan sistem modeli (Zeng et al. 2008b).

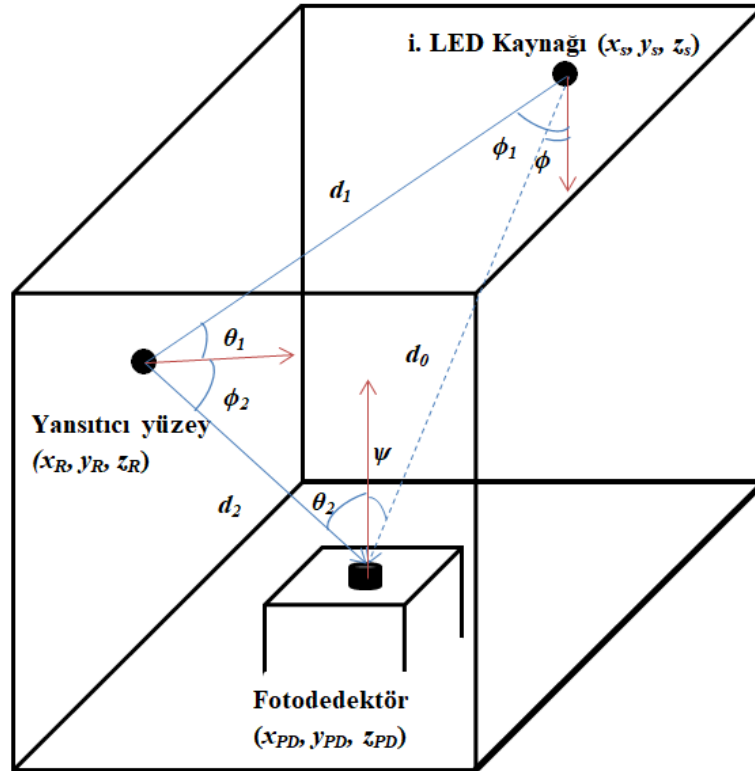
Duvarlardan yansımaları dikkate alındığı durumda ise gelen ışık önce yansıtıcı noktaya gelir daha sonrasında yansıtıcı nokta noktasal ışık kaynağı gibi davranarak üzerine düşen ışığın yansıtma faktörü ile çarpılmış halini alıcıya iletir. Bu durumda alınan toplam güç P_r doğrudan görüş hattı optik kanal DC kazancı $H(0)$ ve yansımalı yol üzerindeki optik kanal kazancı $dH(0)_{yansima}$ ’nın toplamı olarak Denklem 3.15’deki gibi hesaplanır (Komine and Nakagawa 2004).

$$P_r = \sum_{LEDs} \left\{ P_t H(0) + \int_{duvarlar} P_t dH_{yansima}(0) \right\} \quad (3.15)$$

$dH(0)_{yansima}$ ’nin değeri ışık geliş açısının değeri göz önünde bulundurularak Denklem 3.16’den elde edilebilir (Gfeller and Bapst 1979).

(3.16)

Denklem 3.16’da d_1 herhangi bir LED ile yansıtıcı nokta arasındaki mesafeyi, d_2 bu yansıtıcı nokta ile alıcı arasındaki mesafeyi, ρ yansıtma faktörünü temsil etmektedir. dA_{duvar} küçük bir bölgenin yansıtıcı alanıdır. θ_1 yansıtıcı noktaya gelen ışık ve yansıtıcı noktanın normali arasındaki açıdır. ϕ_2 yansıyan ışının yansıtıcı nokta normali ile yaptığı açıyı gösterirken, θ_2 ise yansıyan ışının alıcıya geliş açısını ifade eder. Şekil 3.12’de bu ışının yayılım geometrisi şematize edilmiştir.



Şekil 3.12. Gelen ışının yayılım modeli.

LED kaynağı, reflektör (yansıtıcı nokta) ve alıcı (PD) için koordinatlar sırasıyla (x_s, y_s, z_s) , (x_R, y_R, z_R) ve (x_{PD}, y_{PD}, z_{PD}) ile gösterilirse, Şekil 3.12'deki mesafeler ve açı değerleri Denklem 3.17'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
d_0 &= \sqrt{(x_s - x_{PD})^2 + (y_s - y_{PD})^2 + (z_s - z_{PD})^2} \\
d_1 &= \sqrt{(x_s - x_R)^2 + (y_s - y_R)^2 + (z_s - z_R)^2} \\
d_2 &= \sqrt{(x_R - x_{PD})^2 + (y_R - y_{PD})^2 + (z_R - z_{PD})^2} \\
\cos(\phi) &= |z_s - z_{PD}| / d_0 = \cos(\psi) \\
\cos(\phi_1) &= |z_s - z_R| / d_1 \quad \cos(\theta_1) = |x_s - x_R| / d_1 \\
\cos(\phi_2) &= |x_R - x_{PD}| / d_2 \quad \cos(\theta_1) = |z_R - z_{PD}| / d_2
\end{aligned} \tag{3.17}$$

3. 7. 4. Optik Kanal dürtü yanıtı

Kanal dürtü yanıtı $h(t)$, Denklem 3.18’de gösterildiği gibi kanal dürtü yanıtının görüş hattı (Line-of-sight-LOS) bileşeni $h_{LOS}(t)$ ve görüş hattı dışı (Non-line-of-sight-NLOS) bileşeni $h_{NLOS}(t)$ ’nin toplamıdır.

$$h(t) = h_{LOS}(t) + h_{NLOS}(t) \tag{3.18}$$

Görünür ışık haberleşmesinde doğrudan alıcıya ulaşan ışık bilginin elde edilmesi için önemlidir. İletimin ve aydınlatmanın yapıldığı ortamda belirli bir açı ile doğrudan alıcıya ulaşan sinyalin gücü, yansıma sonrası aynı açı ile alıcıya ulaşan sinyalin gücünden daha fazladır. Kanal dürtü yanıtının LOS bileşeni Şekil 3.12 göz önüne alınarak Denklem 3.19’daki gibi ifade edilir.

$$h_{LOS} = \frac{(m+1)A\cos^m(\phi)T_s(\psi)g(\psi)\cos(\psi)}{2\pi d_0^2} \delta(t - \frac{d_0}{c}) \tag{3.19}$$

Bu ifadede t_0 ışığın alıcıya doğrudan ulaşma süresidir ve kanal dürtü yanıtının t_0 anında LOS bileşeni vardır. t_0 süresi Denklem 3.20’de gösterildiği gibi LED ile alıcı arasındaki d_0 mesafesinin c ışık hızına oranıdır. Bu süre ev ve ofis benzeri aydınlatma ortamları için nanosaniyeler mertebesinde.

$$t_0 = \frac{d_0}{c} \tag{3.20}$$

t_0 anındaki LOS bileşeninin genliği L ise Denklem 3.21'deki gibi ifade edilir (Tanaka et al. 2001).

$$L = \frac{(m+1)A \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi)}{2\pi d_0^2} \quad (3.21)$$

Kablosuz haberleşme sistemleri NLOS sinyallerle de iletim gerçekleştirirler. Yansıyan sinyaller, yansıtıcı yüzeyde bir miktar enerji kaybına uğrarlar. Kanal dürtü yanıtının her bir yansıtıcı yüzey için yansıma sayısı (k) kadar NLOS bileşeni vardır. k . yansıma için kanal dürtü yanıtı hesabı Denklem 3.22'de gösterildiği gibi ifade edilir (Kahn and Krause; Dong et al. 2010). Işık kaynağından çıkan ışığın çok sayıda yansımaya uğraması hem sinyalin genliğini azaltmakta hem de alıcı tarafa ulaşma süresini geciktirmektedir.

$$\begin{aligned} h_{NLOS}(t) &= \sum_{i=1}^k h_{NLOS}(i, t) \\ h(k, t) &= [L_1 L_2 \dots L_{k+1}] [\rho_1 \rho_2 \dots \rho_{k+1}] \delta(t - \frac{d_1 + d_2 \dots + d_{k+1}}{c}) \\ L_1 &= \frac{(m+1)dA_{duvar} \cos^m(\phi_1) \cos(\theta_1)}{2\pi d_1^2} \\ L_2 &= \frac{(m+1)dA_{duvar} \cos^m(\phi_2) \cos(\theta_2)}{d_2^2} \\ &\dots \\ L_{k+1} &= \frac{(m+1)dA_{duvar} \cos^m(\phi_{k+1}) \cos(\theta_{k+1})}{d_{k+1}^2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

3. 7. 5. Sinyal gürültü oranı

Görünür ışık kanalı, toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise-AWGN) kanalı olarak modellenir (Kahn and Barry 1997; Komine and Nakagawa 2004; Komine et al. 2009). Sinyallerin neden olduğu atış gürültüsü ihmal edilebilir ve ortamın neden olduğu atış gürültüsü Gauss olarak modellenebilir (Gagliardi and Karp 1976). Optik kablosuz kanal modeli Denklem 3.23'deki gibi ifade edilir:

$$Y(t) = \gamma X(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (3.23)$$

Bu ifadeye göre fotodedektörden alınan akım $Y(t)$, γ dedektör duyarlılığı ve iletilen optik darbe $X(t)$ ile dürtü tepkisi $h(t)$ 'nin evrişimine, AWGN $N(t)$ eklenerek elde edilir (Komine and Nakagawa 2004). Ortalama iletilen optik güç P_t Denklem 3.24'den elde edilebilir.

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (3.24)$$

BER değerleri SNR dağılımına bağlı olduğundan SNR iyileştirilerek sistem optimize edilebilir. OOK-NRZ, OOK-RZ ve L-PPM için BER ifadeleri 3.25, 3.26, 3.27 numaralı denklemlerdeki gibidir (Gismalla et al. 2019).

$$BER_{NRZ-OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR}\right) \quad (3.25)$$

$$BER_{RZ-OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{SNR}\right) \quad (3.26)$$

$$BER_{L-PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR \frac{L}{2} \log_2 L}\right) \quad (3.27)$$

BER, SNR'ın Q fonksiyonudur. Q fonksiyonu standart normal dağılım'ın kuyruk olasılığıdır. Gauss hata fonksiyonu erfc cinsinden Denklem 3.28'deki gibi ifade edilir.

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.28)$$

Kararlı bir iletişim bağlantısı için alıcıda SNR 13,6dB olmalıdır. Sinyal bileşeni S , Denklem 3.29'dan elde edilebilir (Komine and Nakagawa 2004). Denklem 3.29'daki γ fotodedektör dönüştürme verimliliğini ifade etmektedir.

$$S = \gamma^2 P_{rsignal}^2 \quad (3.29)$$

İstenen sinyal gücü $P_{rsignal}$ ise Denklem 3.30'da gösterildiği gibi kanal dürtü yanıtı ve mesaj sinyalinin evrişiminin, integralidir. Denklemde verilen T mesaj sinyalinin periyodunu ifade etmektedir.

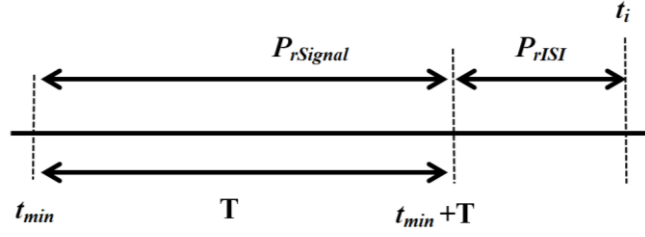
$$P_{rsignal} = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^{LEDs} h_i(t) \otimes X(t) \right) dt \quad (3.30)$$

Komine ve Nakagawa (2004)'nin çalışmasında açıklandığı üzere görünür ışık haberleşme sistemlerinde gürültü, toplam N varyansı olan Gaussian gürültü olarak modellenir. Atış gürültüsü $\sigma_{atış}$, termal gürültü σ_{termal} ve ISI gürültüsü bileşenlerinin toplamı N varyansa eşittir ve Denklem 3.31'deki gibi ifade edilir.

$$N = \sigma_{atış}^2 + \sigma_{termal}^2 + \gamma^2 P_{rISI}^2 \quad (3.31)$$

Atış gürültüsü, elektronik cihazlardaki aktif bileşenlerden kaynaklanır ve düzensiz elektron emisyonu sonucu oluşur. LED aydınlatmanın neden olduğu fotoakım ve ortam aydınlatmasının neden olduğu karanlık akımdan kaynaklanır. Termal gürültü ise, elektronik cihazlardaki pasif bileşenlerden kaynaklanır ve elektronik Brownian hareketinden kaynaklanır. Geri besleme dirençlerinden ve alan etkili transistörlerden kaynaklanır. Termal gürültüye direnç gürültüsü de denir (Xiangyang et al. 2020).

ISI gürültüsü semboller arası girişimden kaynaklanır. Bir VLC sisteminde, alıcı tarafından alınan güç, sinyal gücü ve ISI gücü olarak ikiye ayrılır. Bir sinyal iletilindiğinde, ilk gelen sinyal periyodu süresince tüm yollardan alıcıya ulaşabilen optik güç toplamı, sinyal gücüdür. İlk gelen sinyalin periyodu tamamlandıktan sonra diğer yollardan alıcıya ulaşan optik güç, gelen sonraki sinyal ile girişime neden olacaktır ve oluşan bu semboller arası girişim gücü Şekil 3.13'de gösterildiği gibi ISI gücüdür ve Denklem 3.32'de gösterildiği gibi toplam mesaj sinyali ve dürtü tepkilerinin evrişimlerinin integralidir (Xiangyang et al. 2020).



Şekil 3. 13. Sinyal gücü ve semboller arası girişim (ISI) güç diyagramı.

Şekil 3.13'deki t_{min} optik ışınların alıcıya ilk ulaşmaya başladığı süredir, t_i ise tüm mesaj sinyalinin alıcıya ulaşması için geçen süredir. T mesaj sinyalinin periyodudur.

$$P_{rISI} = \int_T^{\infty} \left(\sum_{i=1}^{LEDs} h_i(t) \otimes X(t) \right) dt \quad (3.32)$$

Atış gürültüsünün varyansı Denklem 3.33'deki gibi ifade edilir. Denklemde verilen q , elektrik yükü, B eşdeğer gürültü bant genişliğidir. I_{bg} arka plan akımıdır ve doğrudan güneş ışığından ölçülen bir değerdir. I_2 ve I_3 parametreleri ise gürültü bant genişliği faktörleridir (Komine and Nakagawa 2004).

$$\sigma_{atış}^2 = 2q\gamma(P_{rsignal} + P_{rISI})B + 2qI_{bg}I_2B \quad (3.33)$$

Termal gürültünün varyansı ise 3.34 numaralı denklemden hesaplanabilir. Denklem 3.34'deki k Boltzmann sabit, T_k mutlak sıcaklık, G açık döngü gerilim kazancıdır. η_{cap} , fotodetektörün birim alandaki sabit kapasitans değeri, Γ FET kanal gürültü faktörü ve g_m FET'in transkondüktans değeridir (Komine and Nakagawa 2004).

$$\sigma_{termal}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G} \eta_{cap} A I_2 B + \frac{16\pi^2 k T_k \Gamma}{g_m} \eta_{cap}^2 A^2 I_3 B^3 \quad (3.34)$$

Literatürdeki çalışmalarda SNR analizi için termal gürültünün ve P_{rISI} ihmal edildiği, atış gürültüsü ve amplifikatör gürültüsünün, gürültü bileşenlerini oluşturdu alternatif bir hesaplama önerilmiştir (Shaaban et al. 2019). SNR hesabı için izlenecek

alternatif yöntemde sinyal bileşeni iletilen toplam optik güç P_r 'ye bağlı olarak Denklem 3.35'deki gibi ifade edilir.

$$S = \gamma^2 P_r^2 \quad (3.35)$$

Atış gürültüsü ve amplifikatör gürültüsünün bileşenlerinin toplamı N varyansı verir ve Denklem 3.36'daki gibi hesaplanır.

$$N = \sigma_{atış}^2 + \sigma_{am}^2 \quad (3.36)$$

Atış gürültüsünün varyansı 3.37 ve 3.38 numaralı denklemlerden elde edilir.

$$\sigma_{atış}^2 = 2q\gamma(P_r + P_n)B_n \quad (3.37)$$

$$B_n = I_2^2 R_b \quad (3.38)$$

Verilen denklemlerde q elektronik yükü, B_n eşdeğer gürültü bant genişliğini, P_n ortam ışığının gürültü gücünü ve I_2 gürültü bant genişliği faktörünü temsil eder. R_b ise sistemin veri iletim hızıdır. Amplifikatör gürültüsünün varyansı ise i_{am} amplifikatör gürültü yoğunluğu ve B_a amplifikatör bant genişliğine bağlı olarak Denklem 3.39'daki gibi ifade edilir. (Shaaban et al. 2019).

$$\sigma_{am}^2 = i_{am} B_a \quad (3.39)$$

3. 7. 6. Ortalama Karekök Gecikme Yayılımı

Kanalın ortalama karekök (Root Mean Square-RMS) gecikme yayılımı, çok yollu kanalların zaman dağılım özelliklerini belirlemek için kullanılan bir terimdir. Yansıma gecikmelerinin standart sapma (veya ortalama karekök) değeridir. Kanal modeli NLOS kanala sahip ise çok yollu sinyaller de alıcıya ulaşacaktır ve böyle bir durum kanalın zaman dağılım özelliklerinin bilinmesini gerektirir. Görünür ışık

haberleşmesindeki tek optik kaynak için oluşan RMS gecikme yayılımı, kızılötesi optik haberleşmesindekinden daha düşüktür. Çünkü görünür ışık haberleşmesindeki yansıyan sinyallerin genliği daha düşüktür (Nguyen et al. 2010). Bir kanalın RMS gecikme yayılımı, kanalın dürtü yanıtının belirli zamana bağımlılığından bağımsız olarak, ISI kaynaklı SNR azalmasının oldukça doğru bir tahmincisidir. RMS gecikme yayılımı τ_{RMS} , 3.40 numaralı denklemdeki gibi kanal dürtü yanıtı kullanılarak hesaplanır (Komine et al. 2009; Ghassemlooy et al. 2013).

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau_0)^2 h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt}} \quad (3.40)$$

Ortalama gecikme süresi τ_0 de kanal dürtü yanıtına bağlı olarak Denklem 3.41'deki gibi hesaplanır (Komine et al. 2009; Ghassemlooy et al. 2013).

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} t \cdot h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt}} \quad (3.41)$$

Dürtü yanıtı $h(t)$ ve RMS gecikme yayılımı, τ_{RMS} verici, alıcı ve araya giren yansıtıcıların konumları sabit olduğu sürece deterministik nicelikler olarak kabul edilebilir. Zamanla değişen radyo kanalları durumunun aksine, RMS gecikme yayılımı, rastgele bir sürecin istatistiksel olasılığı olarak yorumlanır (Komine et al. 2009).

RMS gecikme yayılımının esas olarak kaynaklar arasındaki gecikmeden oluştuğunu bilinir. Radyo kablosuz iletişimde, kentsel alanlardaki ofis binalarında tipik RMS gecikme yayılımı 25 ila 50ns'dir. Görünür ışık kablosuz iletişim sisteminde ise gecikme yayılımı birkaç ns'nin altındadır. Bunun bir nedeni, radyo dalgaların büyük dalga boylarına sahip olması ve yansımaların aynalı yansımalar gibi görünmesidir. Ayrıca, radyo dalgalarının duvarlardan geçerek daha uzun yollar kat etmeleri de daha yüksek RMS gecikme yayılımına neden olabilir. Bu nedenle, görünür

ışık kablosuz sistemi, ISI'ye radyo kablosuz sistemlere göre çok daha az duyarlıdır (Komine et al. 2009).

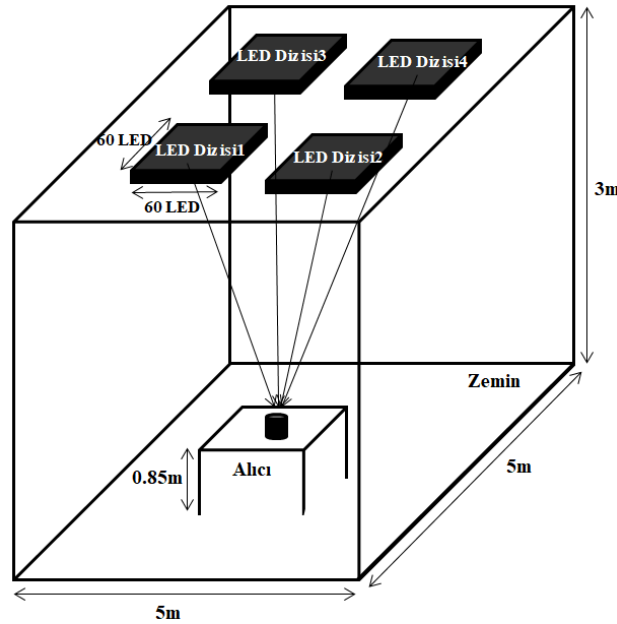
RMS gecikme yayılımı, çoklu yansılardan kaynaklanan normalize gecikme süresi için bir tahmin sağlar. Bu nedenle, RMS gecikme yayılımı veri iletim hızının üst sınırı için kritik bir performans ölçütü olacaktır. Dengeleyiciye ihtiyaç duymadan, optik kanal üzerinden iletilebilecek maksimum bit hızının Denklem 3.42'deki gibi sınırlandırılacağı kabul edilmektedir (Nguyen et al. 2010).

$$R_b \leq 1/(10 \times \tau_{RMS}) \quad (3.42)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4. 1. Kapalı Ortam Görünür Işık Kablosuz İletişim Sisteminin Modellenmesi

Bu TEZ çalışmasında görünür ışık haberleşmesi olan Li-Fi sisteminin başarımlı analizi için bir kapalı ortam görünür ışık kablosuz iletim sistemi modellenmiştir. Veri iletiminin yüksekliği 3m olan, 5m×5m zemin alanına sahip kare prizma biçimdeki Şekil 4.1’de verilen oda içerisinde gerçekleştiği varsayılmıştır. Odada sadece zemin ortasına yerleştirilmiş 0,85m yükseklikteki alıcı vardır. Oda tavanında ise verici görevi görecek olan 60×60 adet LED’den oluşan dört adet LED dizisi yerleştirilmiştir. Her bir LED grubunun tavan montajı dolayısı ile yerden yüksekliği 2,5m olarak kabul edilmiştir. LED’ler arasındaki mesafe ise 1cm’dir. Tüm sistem benzetimleri Şekil 4.1’de verilen oda için MATLAB R2020b ortamında geliştirilen yazılımlar ile yapılmıştır.



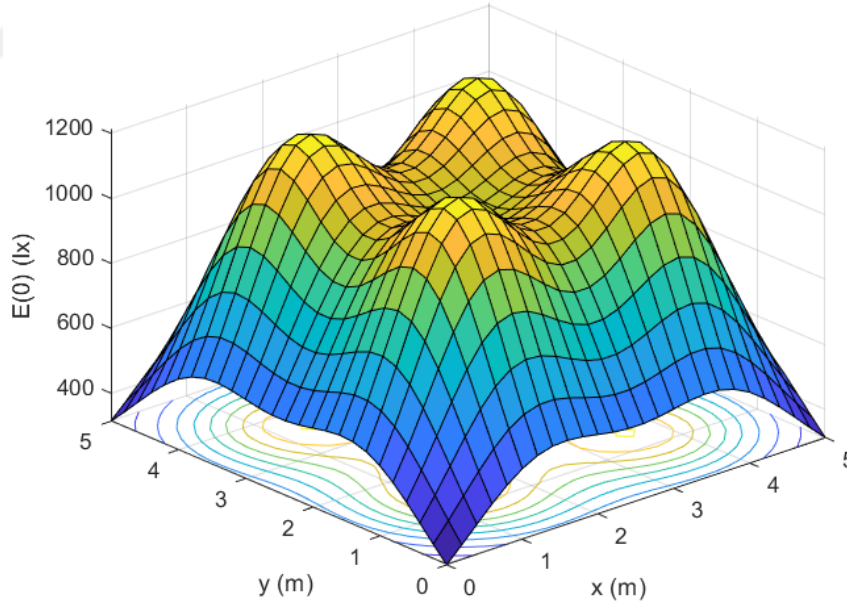
Şekil 4.1. Kapalı ortam için tasarlanan görünür ışık kablosuz iletişim sistemi modeli.

Oda tavanındaki LED’lerden yayılan ışığın benzetiminin yapılabilmesi için odanın zemini ve dört duvarı 0,2m×0,2m’lik karelere bölünmüş ve benzetimi yapılan en küçük birimler bu kareler olarak düşünülmüştür. Sonuç olarak oda zemini 25×25 adet ve her bir duvar 12×25 adet kareye bölünmüştür. Çizelge 4.1’deki parametreler kullanılarak direkt aydınlanma hesabı yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Direkt aydınlatma hesabı için kullanılan sistem parametreleri.

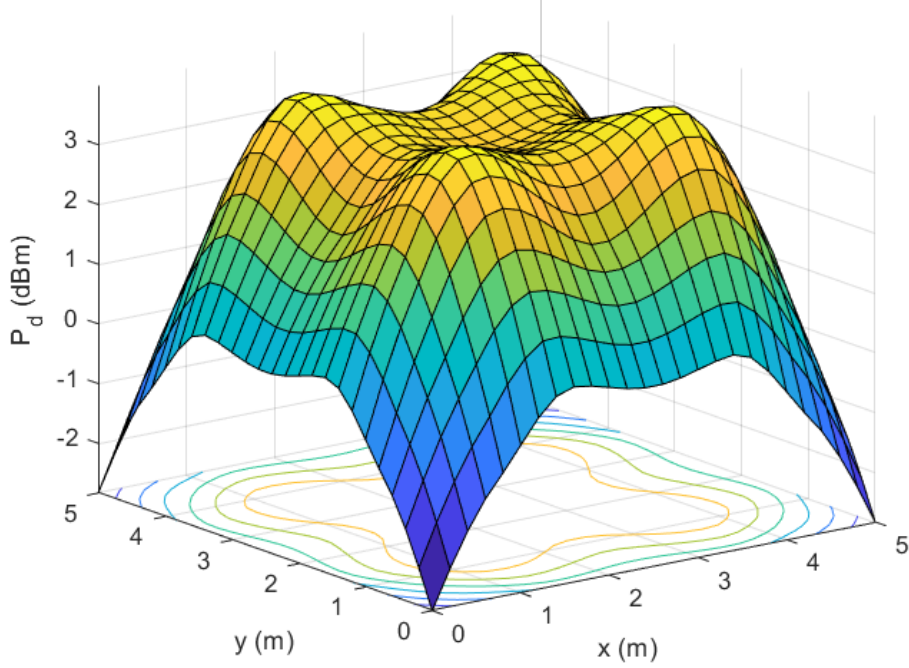
Parametre	Sembol	Değer
Her bir LED tarafından iletilen optik güç	P_t	20mW
Yarı aydınlıktaki güç açısı	$\phi_{1/2}$	70
Işık şiddeti	$I(0)$	0,73cd
Bir LED dizisindeki LED sayısı	-	3600 (60×60)
LED'ler arası mesafe	-	0,01m
LED armatürünün boyutu	-	0,59×0,59

Odadaki direkt aydınlanma yayılımı Şekil 4.2'deki gibi elde edilmiştir. Kullanılan LED dizileri ile odadaki aydınlanma miktarı maksimum 1211,49lx ve minimum 313,52lx olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.2'den görüldüğü üzere odanın her yerindeki aydınlatma miktarı, ISO'nun ofisler için gerekli aydınlatma miktarı olarak belirlediği 300lx-1500lx aralığında gerçekleşmektedir. Bu değerler optik iletişimin temel hedeflerinden biri olan aydınlatma görevinin tasarlanan sistem ile yerine getirildiğini göstermektedir.

**Şekil 4.2.** Direkt aydınlanma yayılımı.

Her bir LED tarafından masa üzerindeki alıcıya 20mW gücünde optik sinyaller gönderilmektedir. Alıcı tarafta algılanan toplam optik güç ise ışığın alıcıya ulaşana kadar izlediği kanalın DC kazancına bağlı olarak değişmektedir. Gelen ışığın alıcı tarafından algılanabilmesi için sıfırdan büyük, FOV açısından ise küçük bir açı ile

gelmesi gerekmektedir. Gönderilen optik sinyaller doğrudan ve yansımali olarak iki tür kanaldan alıcıya ulaşmaktadır. Doğrudan LED’den alıcıya ulaşan sinyaller için alınan güç dağılımı dBm cinsinden Şekil 4.3’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Doğrudan alınan optik güç dağılımı.

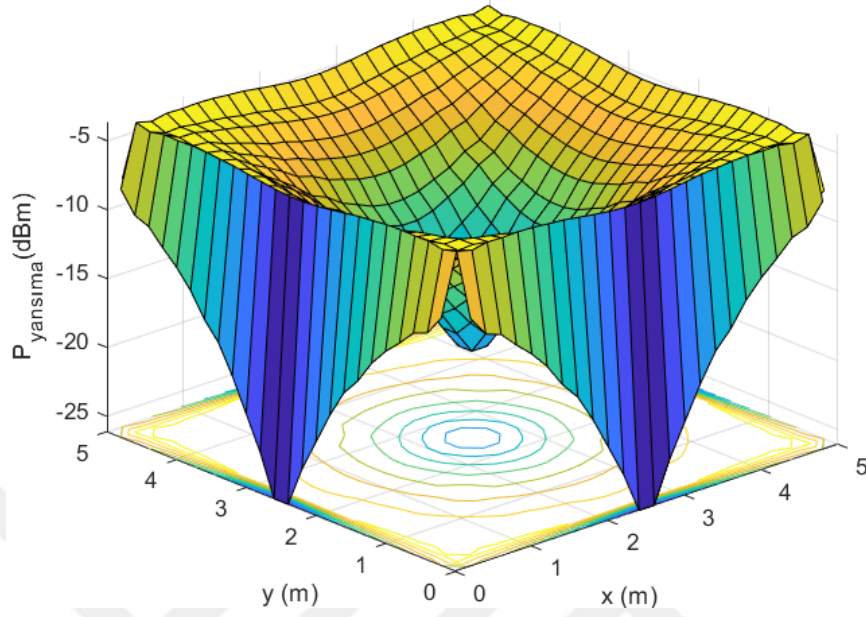
Hesaplamalar için Çizelge 4.2’deki değerler kullanılmıştır. Tepe hassasiyeti görünür dalga boyu olan bir silikon fotodedektör kullanıldığı varsayılmıştır. Doğrudan alınan optik güç için -2,83dBm ve 3,97dBm aralığında değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Alınan optik güç hesabı için kullanılan sistem parametreleri.

Parametre	Sembol	Değer
FOV	Ψ_c	60°
Fotodedektör fiziksel alanı	A	$1,0 \text{ cm}^2$
Optik filtre kazancı	$T(\psi)$	1,0
Fotodedektör merceğinin kırılma indisi	n	1,5
Duvarın yansımaya katsayısı	ρ	0,8

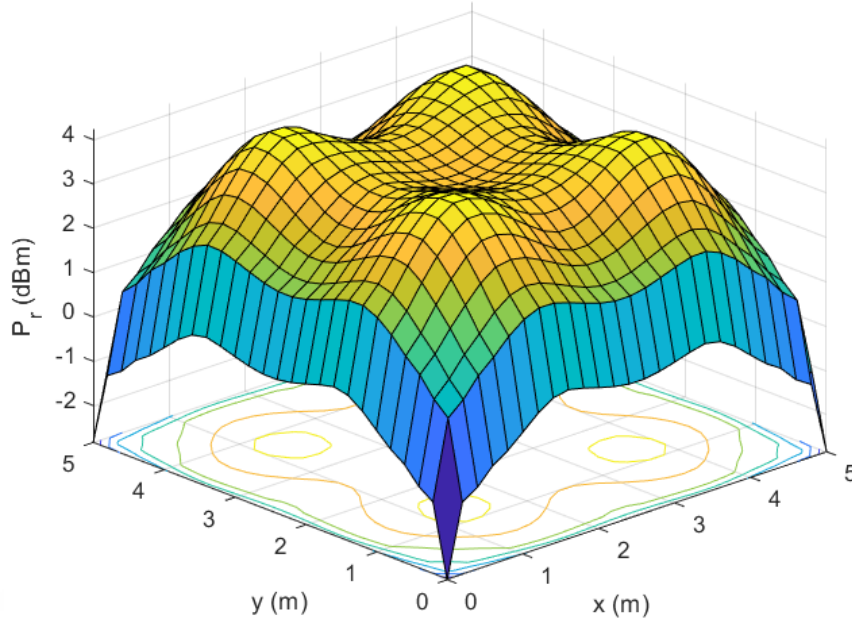
Duvarlardan, alıcıya yansıtılan optik güç düşünüldüğünde, alıcıdaki ikinci optik güç bileşeni de hesaplamalara dahil edilmiş olur. Işığın bir kez yansımaya sonucunda

alınan optik güç dağılımı Şekil 4.4'deki gibidir. Bu durum için optik gücün en yüksek değeri -3,64dBm olarak elde edilmiştir.



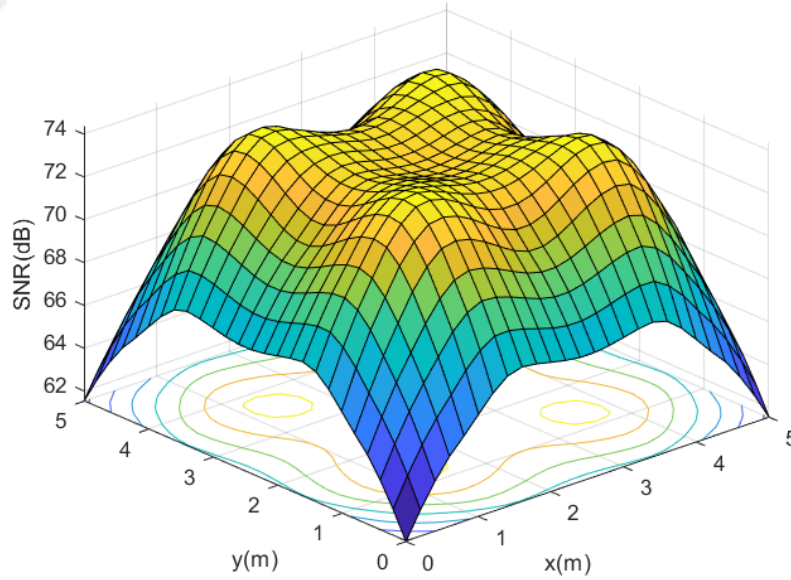
Şekil 4.4. Yansımali yoldan alınan optik güç dağılımı.

Doğrudan ve yansımali yoldan alınan optik güç bileşenlerinin toplamı ise alınan toplam optik güç değerini verir. Alınan toplam optik güç dağılımı Şekil 4.5'de gösterildiği gibi -2,83dBm ile 4,22dBm aralığında elde edilmiştir. Hesaplanan bu değerler, kızılötesi iletişime kıyasla çok büyük enerjili optik gücü ifade eder ve daha geniş bant aralığında iletişimi mümkün kılar. Elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir (Komine et al 2004).



Şekil 4. 5. Alınan toplam optik güç dağılımı.

Semboller arası girişimin ihmal edildiği durumda SNR Şekil 4.6'daki gibi hesaplanmıştır. Tasarlanan sistem için SNR değeri 61,59dB ve 74,44dB aralığında hesaplanmıştır.



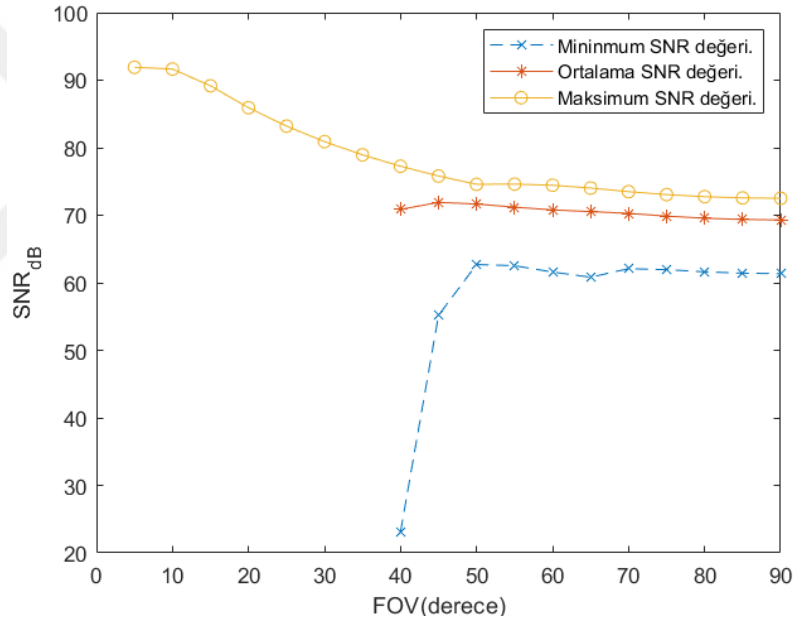
Şekil 4.6. Sinyal gürültü oranı dağılımı.

Yapılan SNR hesaplamalarında Çizelge 4.3'de verilen parametreler kullanılmıştır.

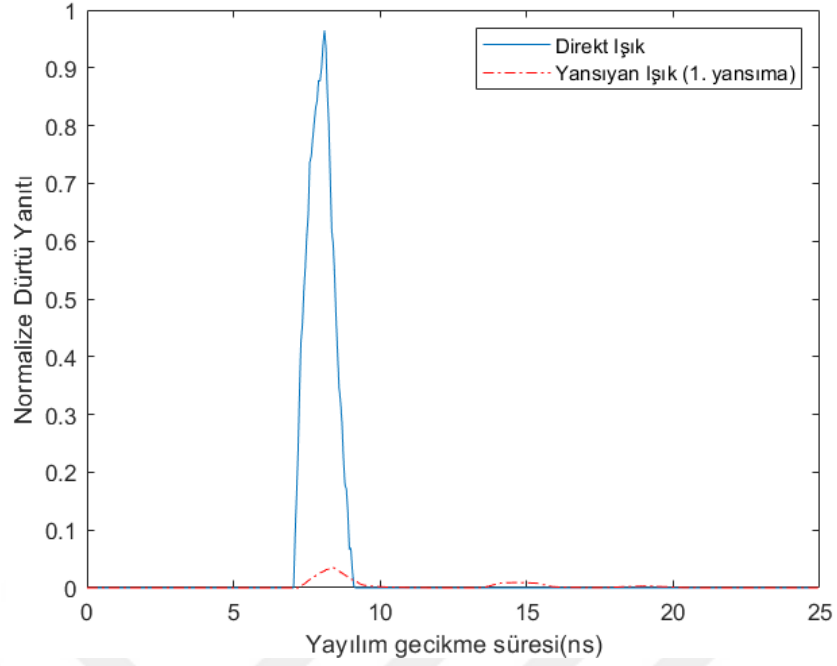
Çizelge 4.3. SNR hesabı için kullanılan sistem parametreleri.

Parametre	Sembol	Değer
Açık çevrim kazancı	G	10
Sabit kapasitans	η_{cap}	112pF/cm ²
FET kanal gürültü faktörü	Γ	1,5
FET transkonduktansı	g_m	30mS
Mutlak sıcaklık	T	298K
Arka plan akımı	I_{bg}	5100 μ A
Data hızı	B	100Mbps
Gürültü bant genişliği faktörleri	I_2 ve I_3	0,562 ve 0,0868
Fotodetektör dönüştürme verimliliği	γ	0,53A/W

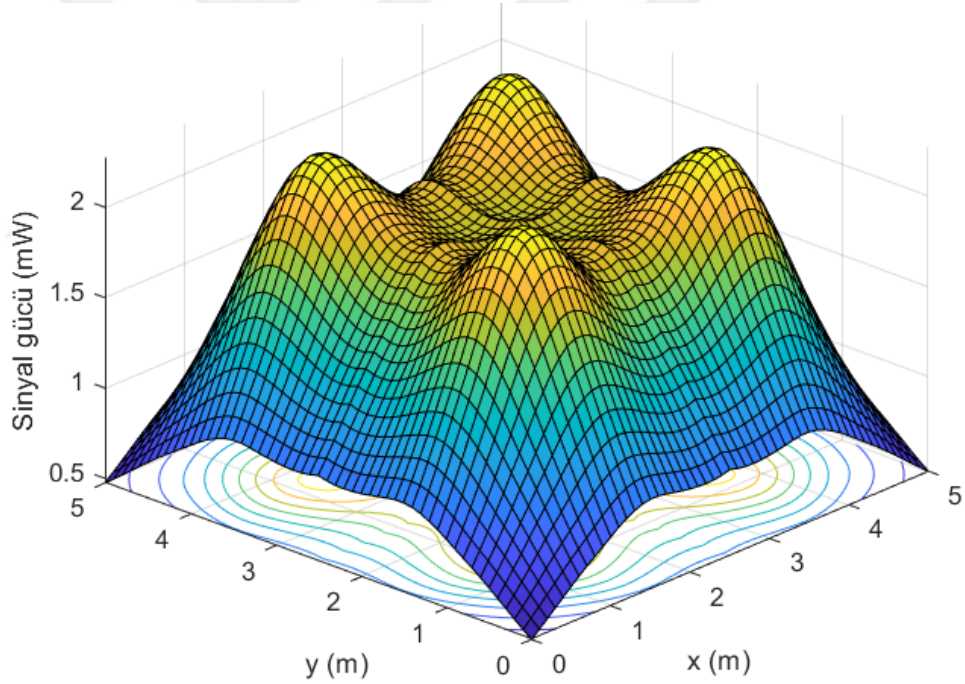
Şekil 4.7’de FOV açısının değeri değiştirilerek SNR değerindeki değişim gösterilmektedir. FOV açısının 40°’nin altına düştüğü durumlarda haberleşme kesintiye uğramakta dolayısı ile minimum SNR hesabı bazı noktalar için yapılamamaktadır.

**Şekil 4.7.** FOV açısına bağlı SNR değişimi.

Tasarlanan haberleşme sisteminde alıcıya gönderilen optik darbeler için kanalın dürtü yanıtı hesaplanmıştır. (0,01, 0,01, 0,85) koordinatında, FOV açısı 60° olan bir alıcı olduğu varsayılmış ve normalize kanal dürtü yanıtı Şekil 4.8’deki gibi elde edilmiştir. Bilgisayar analizlerinde sadece ilk yansıma hesaplamalara dahil edilmiş, daha fazla yansıma sonucunda oluşan etki ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan dikkate alınmamıştır. Doğrudan alıcıya ulaşan optik sinyaller ve yansımali yoldan alıcıya ulaşan sinyaller için hesaplanan kanal dürtü tepkileri incelendiğinde sistem performansının daha çok doğrudan gelen optik sinyallerden etkilendiği görülmektedir.



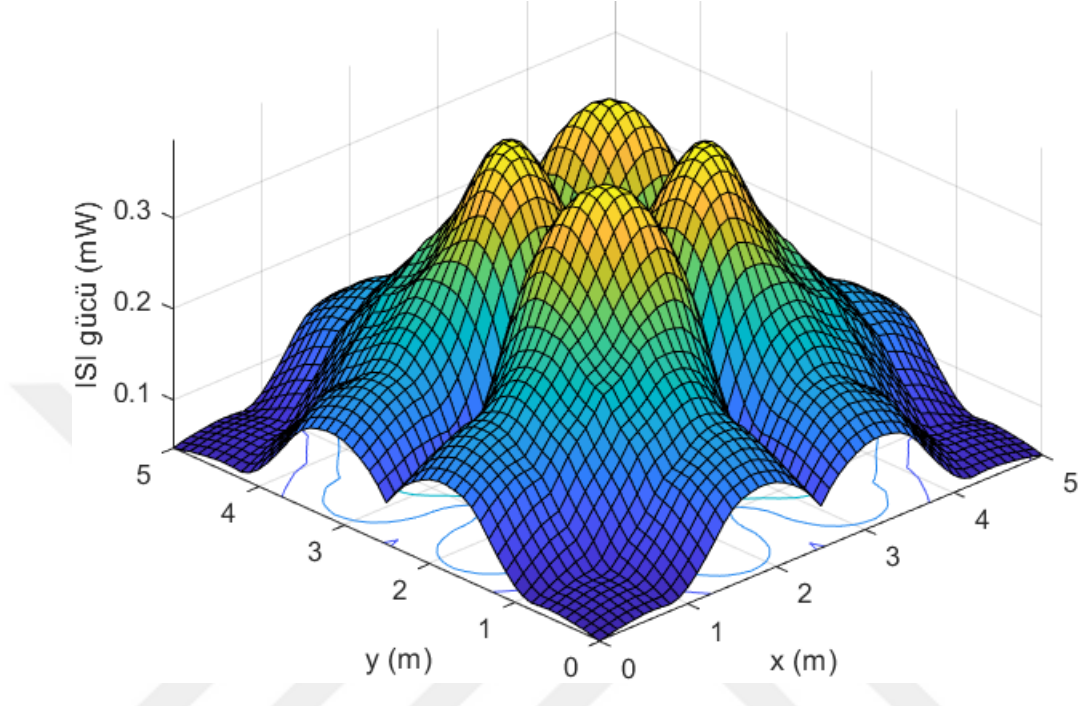
Şekil 4.8. (0,01, 0,01, 0,85) koordinatı için normalize optik kanal dürtü yanıtı.



Şekil 4.9. Alınan sinyal gücü $P_{rsignal}$ dağılımı.

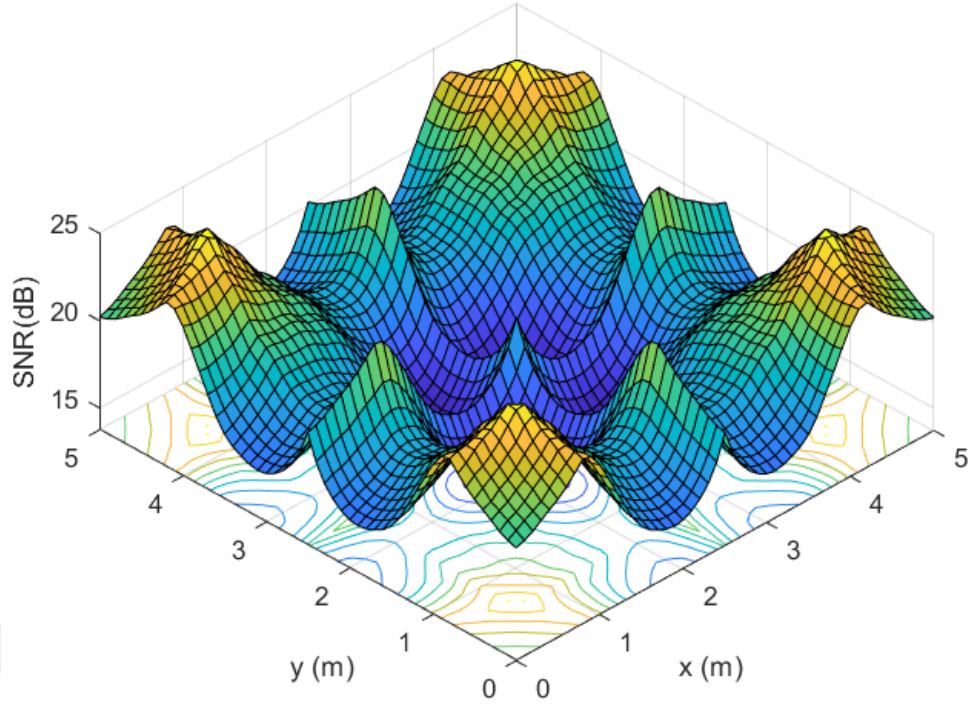
100Mbps veri iletim hızında çalışan optik kablosuz veri iletim sistemine, $X(t)$ sinyali uygulandığında alınan sinyal gücü $P_{rsignal}$ değerinin oda içerisindeki dağılımı Şekil 4.9'daki gibi elde edilmiştir. Oda içerisinde $P_{rsignal}$ 'in aldığı minimum değer 0,47mW, maksimum değer ise 2,27mW olarak hesaplanmıştır.

Semboller arası girişimin neden olduğu optik güç P_{rISI} dağılımı ise Şekil 4.10'daki gibi hesaplanmıştır. Bozucu etkiye sahip olan bu optik güç değeri 0,046 ve 0,38mW değerleri arasında değişmektedir.



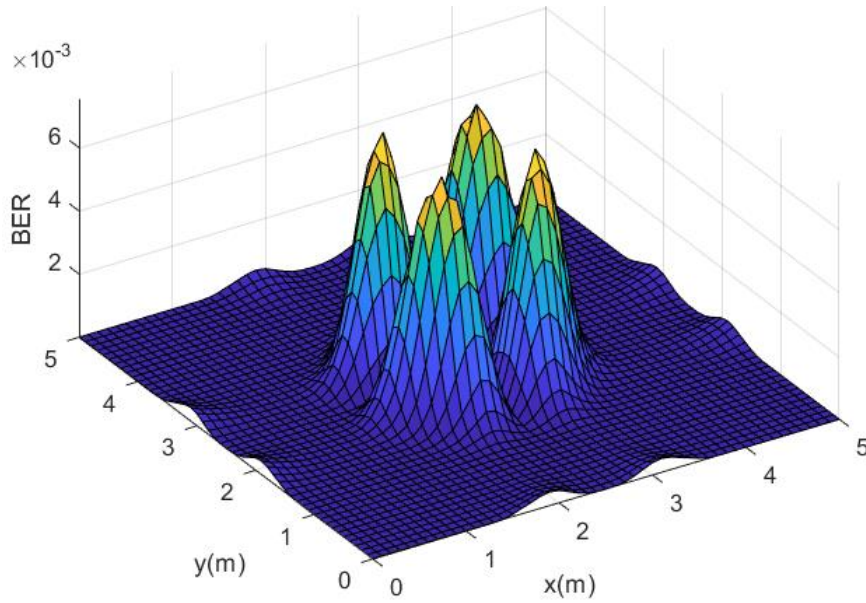
Şekil 4.10. Semboller arası girişimin neden olduğu optik güç P_{rISI} dağılımı.

Hesaplanan sinyal ve semboller arası girişim güçlerinin toplamı, atış gürültü ve termal gürültü kullanılarak hesaplanan SNR dağılımı Şekil 4.11'de gösterildiği gibidir. SNR, semboller arası girişim hesaplamaya dâhil edildiğinde 100Mbps veri iletim hızına sahip sistem için 13,73dB ve 25,02dB aralığındadır. Kararlı bir iletişim bağlantısı için 13,6dB'lık SNR gereklidir. Sonuç olarak tasarlanan odanın her yerinde 100Mbps hızında veri iletimi için yeterli SNR elde edilmektedir.



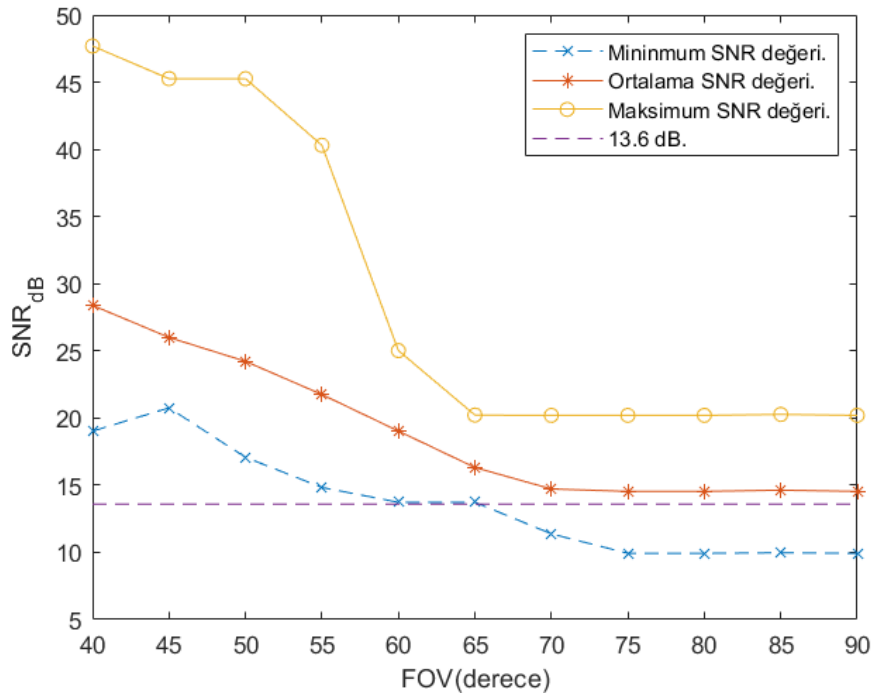
Şekil 4.11. SNR'ın semboller arası girişimle dağılımı (OOK-NRZ).

Tasarlanan sistemde OOK-NRZ modülasyon şeması kullanılması durumunda, iletilecek verilerin bit hata oranı dağılımı Şekil 4.12'deki gibi elde edilmiştir. Tasarlanan sistem için en yüksek BER değeri 7×10^{-3} olarak hesaplanmıştır.



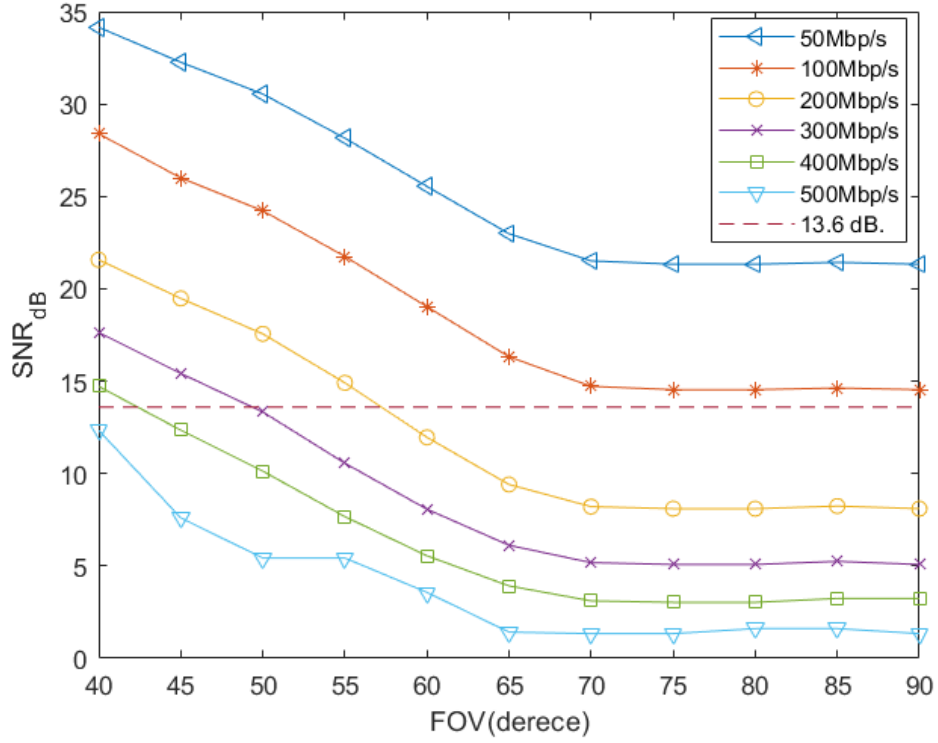
Şekil 4.12. OOK-NRZ uygulandığında Bit hata oranı dağılımı (BER).

Alıcının görüş alanı açısı yani FOV açısı değiştirildiğinde sistemin sinyaller arası girişimli SNR değerinin değişimi Şekil 4.13 gibi hesaplanmıştır. FOV açısının değeri 40° 'nin altına düştüğünde oda içerisinde kör noktalar oluşacağından, oda içerisindeki veri iletiminde kopukluklar yaşanacaktır. Ayrıca küçük ışınım açısına sahip LED'ler kullanılması durumunda semboller arası girişim azalır ve daha iyi sistem performansı elde edilir. SNR odanın çoğunluğunda 13,6dB'nin üzerindedir ve bu durum oda içerisinde 100Mbps veri iletim hızını mümkün kılar.



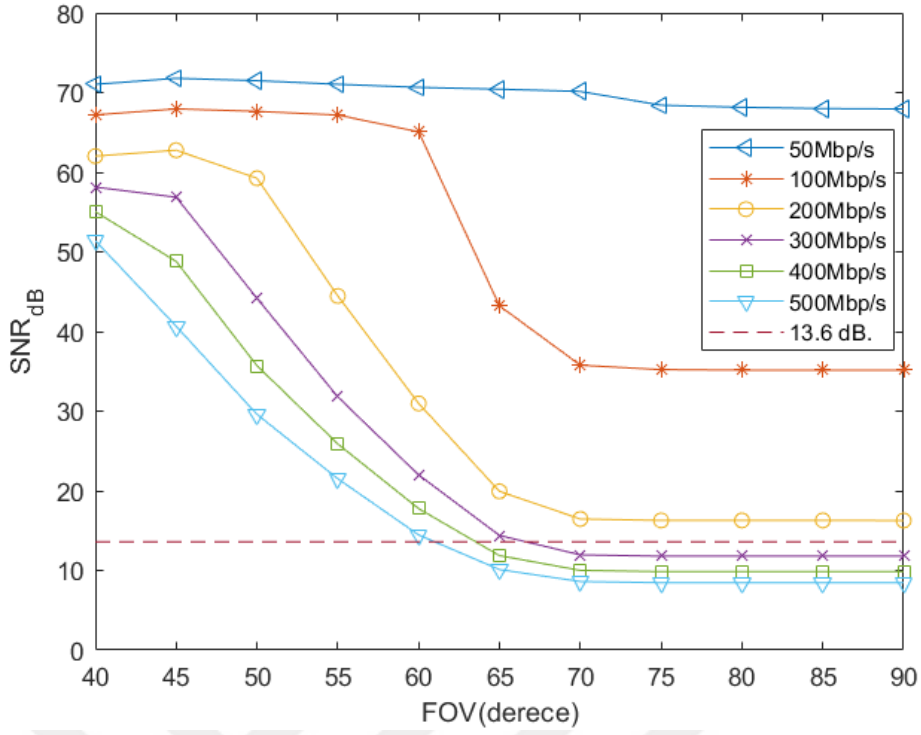
Şekil 4.13. FOV açısına bağlı semboller arası girişim ile alınan SNR değişimi (OOK-NRZ).

Şekil 4.14'deki her veri hızı için semboller arası girişim hesaba katılarak elde edilen ortalama SNR gösterilmektedir. Farklı veri hızlarında hesaplanan ortalama SNR değerleri analiz edildiğinde tasarlanan sistem ile odanın hemen hemen her yerinde 50Mbps ve 100Mbps hızlarında veri iletiminin mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 200Mbps hızda veri iletimi için FOV açısının yaklaşık olarak 40° ve 57° arasında olması gerektiği ve 300Mbps hızında veri iletimi için ise FOV açısının yaklaşık olarak 40° ve 45° arasında olması gerektiği görülmektedir. Ayrıca 400Mbps veri iletim hızının sadece FOV açısının 40° civarında olduğu durumlar için gerçekleştirilebildiği anlaşılmaktadır.



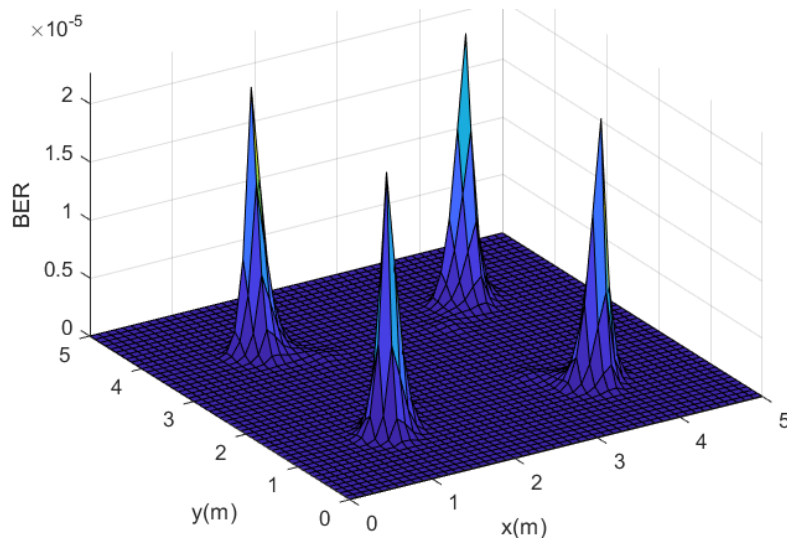
Şekil 4.14. FOV ve veri iletim hızı değerlerine bağlı semboller arası girişim ile alınan ortalama SNR değişimi (OOK-NRZ).

OOK-RZ formatında, 1 verisinin gönderimde darbeler bit aralığının bir kısmını veya yarısını kaplar ve hiçbir darbe 0 biti işgal etmez (Supadiyanto et al. 2019). Bu sebeple optik iletişimin maruz kaldığı ISI etkisini azaltarak daha yüksek hızlara çıkabilmek amacı ile OOK-RZ modülasyon şeması uygulandığında sistemin farklı SNR ve FOV açılarındaki çalışabileceği görülmüştür, elde edilen veri hızları Şekil 4.15'deki gibidir. Azalan bozucu etki sebebi ile OOK-RZ modülasyonda 60°'lik FOV değeri için odanın neredeyse her yerinde 500Mbps hıza ulaşılacağı gözlemlenmiştir. OOK-NRZ modülasyon şeması uygulandığında 40° ve 90° aralığındaki tüm FOV açılarındaki kesintisiz haberleşmenin mümkün olduğu maksimum hız 100Mbps iken OOK-RZ modülasyon ile 200Mbps hıza ulaşılacağı sonucuna varılmıştır.



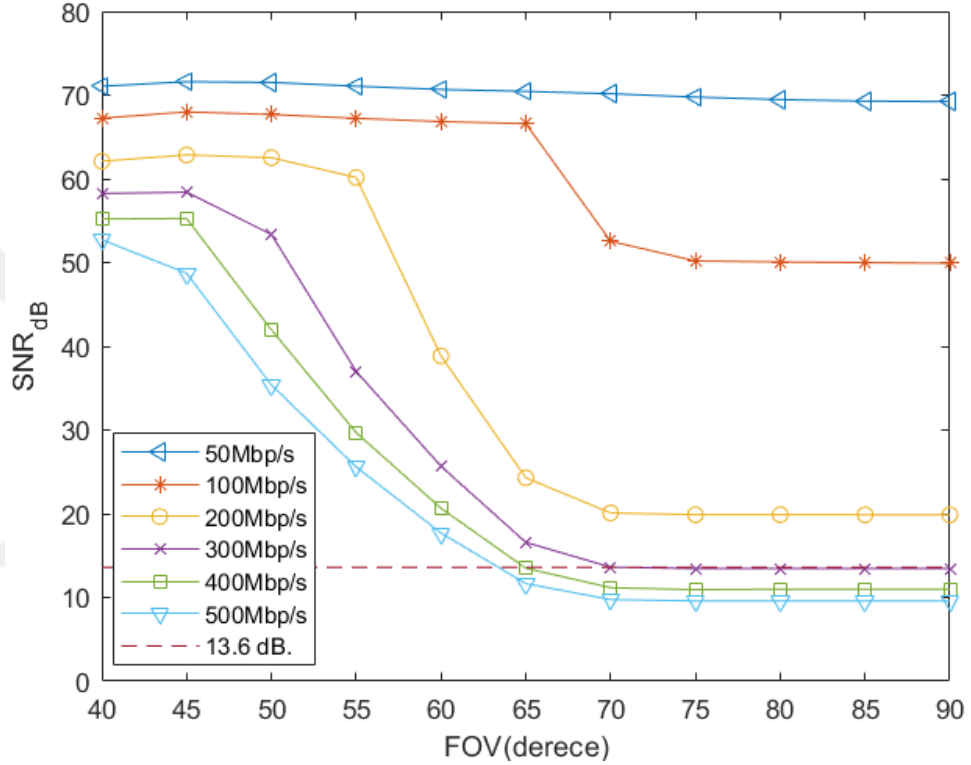
Şekil 4.15. FOV ve veri iletim hızı değerlerine bağlı semboller arası girişim ile alınan ortalama SNR değişimi (OOK-RZ).

OOK-RZ modülasyon tekniği için sistemin bit hata oranı yayılımı Şekil 4.16'daki gibi hesaplanmıştır. Semboller arası girişimin bozucu etkisi azaltıldığı için alıcının hatalı algıladığı bit oranı da azalmış ve oda içerisindeki en yüksek BER, 200Mbps veri hızı için 2×10^{-5} olarak hesaplanmıştır.



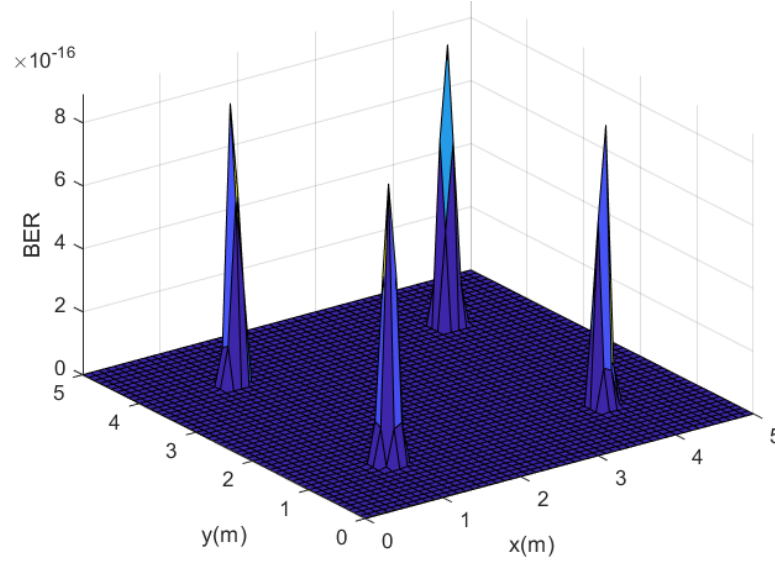
Şekil 4.16. OOK-RZ uygulandığında bit hata oranı dağılımı (BER).

4-PPM modülasyonunda, periyot dört zaman dilimine bölünür ve bilgi bu zaman dilimlerinden birinde gönderilir. Bu sebeple ISI bozucu etkisini azaltmak için tasarlanan sisteme 4-PPM modülasyon formatı uygulanmıştır. Modüle edilen sinyal alıcıya gönderildiğinde SNR'a bağlı olarak veri iletim hızı analizi gerçekleştirilmiştir. PPM için FOV açısı ve hız değiştirilerek elde edilen SNR değişimi Şekil 4.17'deki gibi elde edilmiştir.



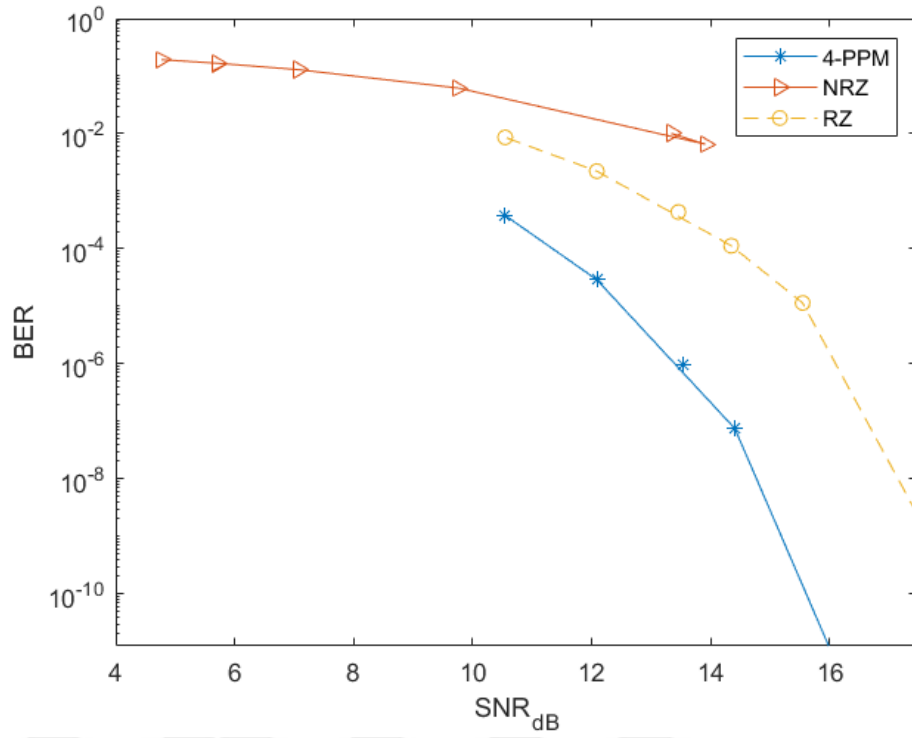
Şekil 4.17. FOV ve veri iletim hızı değerlerine bağlı semboller arası girişim ile alınan ortalama SNR değişimi (4-PPM).

4-PPM modülasyon şeması kullanılması durumunda tüm FOV açıları için 200Mbps'de kesintisiz veri iletimini gerçekleştirebilmektedir. FOV açısı 40° ve 70° aralığında seçilirse sistem 300Mbps hızda da kararlı bir veri iletim imkanı sunmaktadır. 300Mbps hızda iletişim yapıldığında 70° ve 90° aralığındaki FOV açılarında da 13,6dB değerine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.18'den de görüldüğü üzere OOK modülasyona göre bit hata oranı da daha düşüktür. Sonuç olarak OOK modülasyon şemalarına nazaran daha büyük geliş açılarında daha yüksek hızlara çıkılabilmektedir.



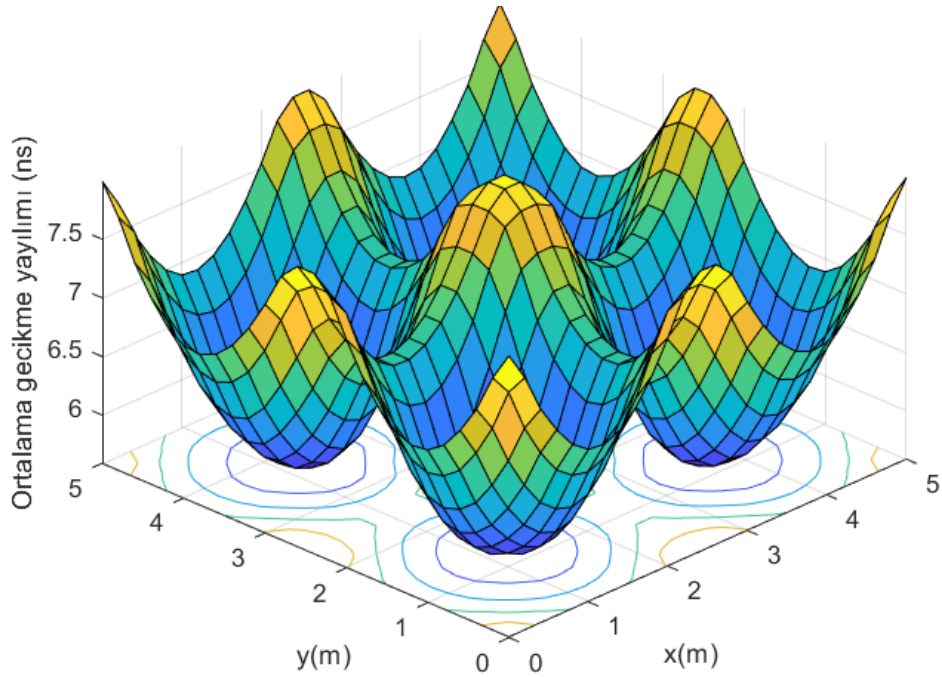
Şekil 4.18. 4-PPM uygulandığında bit hata oranı dağılımı (BER).

OOK-NRZ, OOK-RZ ve 4-PPM formatları ile modüle edilen sinyallerin, 200Mbps hızda iletildiği sistemler için bit hata oranlarının karşılaştırması Şekil 4.19’da gösterilmektedir. Şekil 4.19’dan, 4-PPM modülasyon şemasının BER değerlerinin en düşük olduğu görülmektedir. Yani veri hızı analizinin, SNR ve BER değerleri kullanılarak gerçekleştirilmesi durumunda en yüksek veri iletim hızlarına 4-PPM kullanılarak çıkılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Ghassemlooy et al. (2013), Shinwasusin et al. (2015) ve Gismalla et al. (2019)’nin çalışmalarında elde edilen sonuçlarla uyumludur.



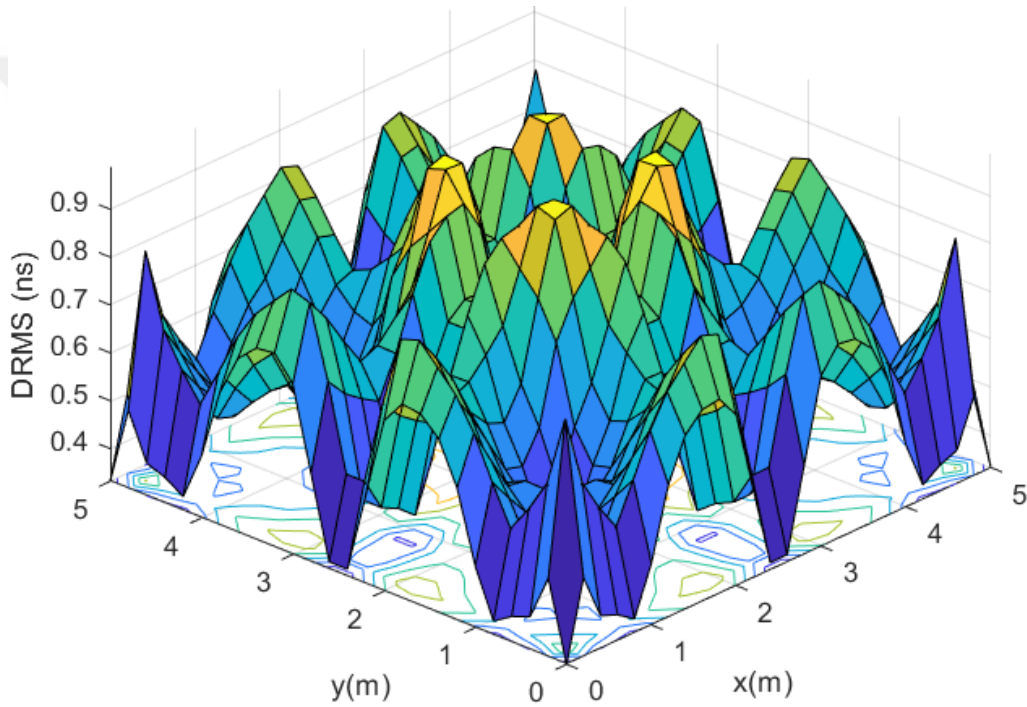
Şekil 4.19. OOK-NRZ, OOK-NRZ ve 4-PPM formatları uygulandığında elde edilen SNR-BER değerleri.

Şekil 4.20’de ortalama gecikme süresinin ve Şekil 4.21’de RMS gecikme yayılımının oda içindeki dağılımı gösterilmektedir.

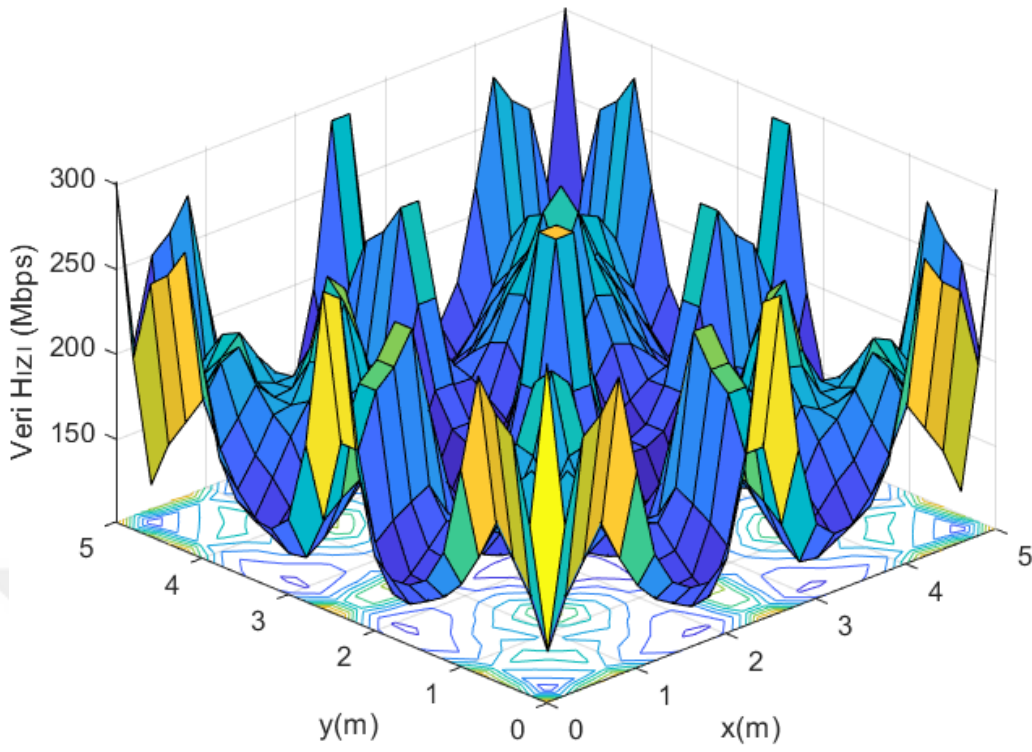


Şekil 4.20. Ortalama gecikme süresinin dağılımı.

Bu hesaplamalar uygulanan modülasyon tekniklerinden bağımsız olarak kanal dürtü yanıtı kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 4.21'den görüleceği üzere RMS gecikme yayılımı, her ışık kaynağının hemen altındaki konumda küçüktür. Matlab benzetimleri ile tasarlanan sistem için RMS gecikme yayılımının en yüksek değeri 0,98ns ve en düşük değeri ise 0,33ns olarak hesaplanmıştır. RMS gecikme yayılımı veri iletim hızının üst sınırı için kritik bir performans ölçütüdür. Optik kanal üzerinden iletilebilecek maksimum bit hızının dağılımı Denklem 3.42 kullanılarak hesaplanarak Şekil 4.22 elde edilmiştir. Şekilden görüleceği üzere sistemin dengeleyiciye ihtiyaç duymadan çıkabileceği maksimum veri hızları 101,2Mbps ve 301,6Mbps aralığındadır.



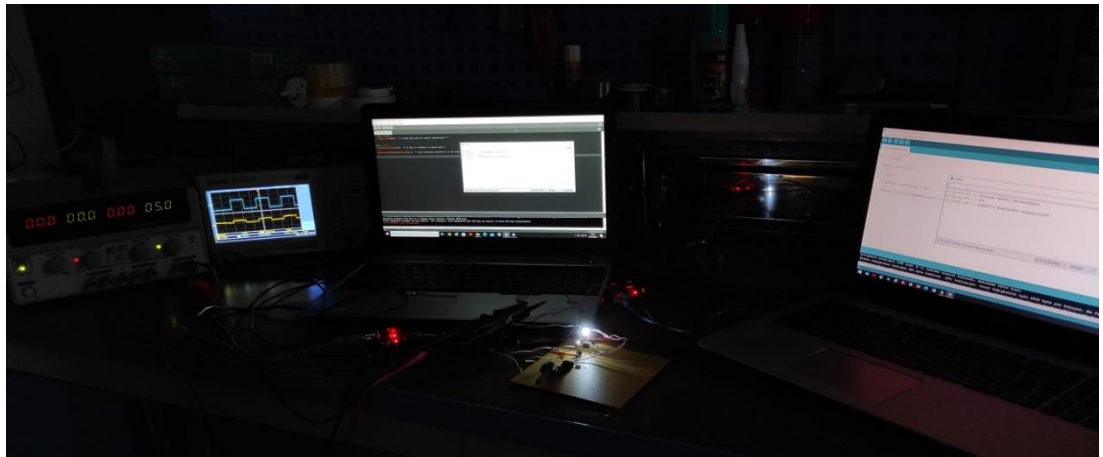
Şekil 4.21. RMS gecikme yayılımının dağılımı.



Şekil 4.22. Veri iletim hız dağılımı.

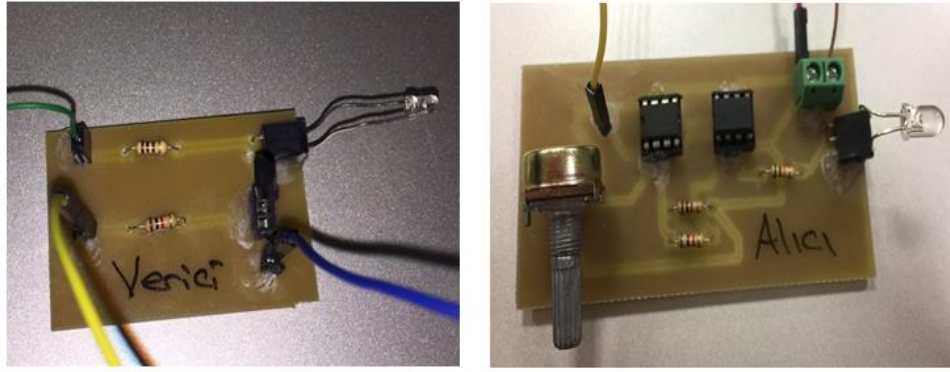
4. 2. Gerçek Zamanlı Li-Fi Deney Düzeneği

Ulaşılabilir elektronik devre elemanları ile tek yönlü veri iletim imkânı sunan Şekil 4.23'deki gibi bir Li-Fi düzeneği kurulmuştur. Düzenek alıcı ve verici olarak iki ana bölümden oluşmaktadır.



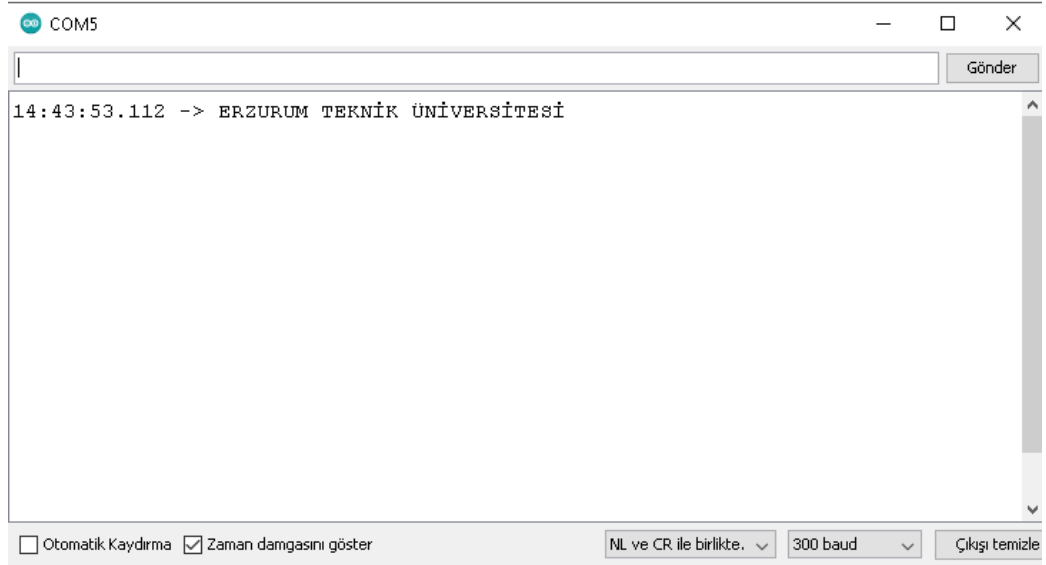
Şekil 4.23. Li-Fi deney düzeneği.

Deney düzeneği ile alıcı ve verici arasında istenilen bir mesaj OOK modülasyon şeması kullanılarak 300bps hızında gerçek zamanlı ve tek yönlü olarak iletilmiştir. Düzeneğin verici tarafı metni ikili bilgiler halinde Arduino Uno mikrodnetleyici kartına iletmektedir. LED Arduino Uno mikrodnetleyici kartı ile anahtarlanabilir fakat Arduino Uno mikrodnetleyici kart portları, doğru miktarda akımı sağlayamamaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için, Arduino Uno mikrodnetleyici kartı Tx portu çıkışında, anahtarlama amacı ile bir transistörün kullanıldığı, Şekil 4.24’de gösterilen verici devre kullanılmıştır.



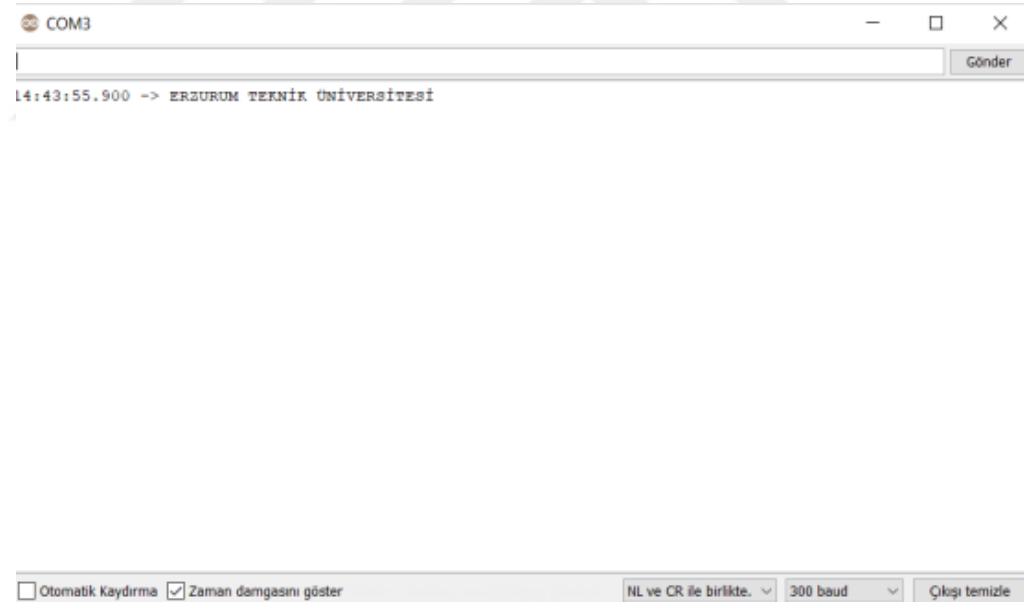
Şekil 4.24. Li-Fi deney düzeneğinin verici ve alıcı devre kartları.

Alıcı tarafta ise fotodedektörden alınan sinyal, Arduino Uno mikrodnetleyici kartına iletilmeden önce giriş voltajını istenen çıkış voltajına yükseltmek için işlemsel yükselteçli (LM741) evirmeyen yükselteç devresi ile sinyal 6 kat yükseltilmiştir. Devre çıkışında dijital ve kararlı bir sinyal elde edilmesi için sinyal, LM358 işlemsel yükselteç entegresinin kullanıldığı bir karşılaştırıcı devreden geçirilmiştir. Daha sonra Şekil 4.24’de gösterilen alıcı devre çıkışındaki yükseltilmiş dijital sinyal, Arduino Uno mikrodnetleyici kartı tarafından bilgisayara iletilmiştir. Arduino Uno mikrodnetleyici ara yüzü ile kodu çözülen mesaj alıcı ekranında okunmuştur. Birinci bilgisayardan iletmek istenen mesaj metni Şekil 4.25’deki gibidir.



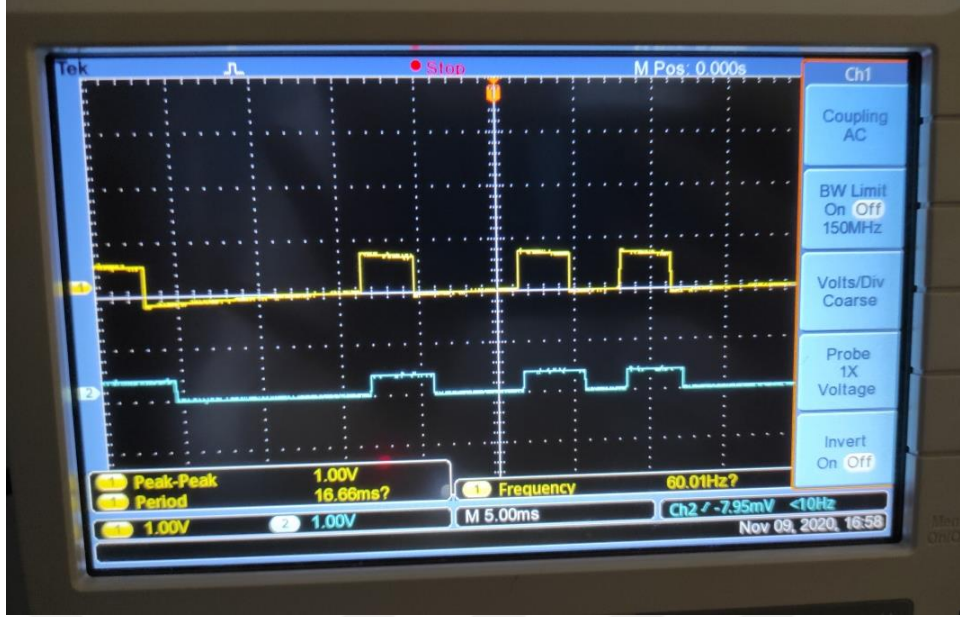
Şekil 4.25. Gönderilen mesaj.

Alıcı tarafta demodüle edilip okunan mesaj ikinci bilgisayar ekranında Şekil 4.26'daki gibi elde edilmiştir.



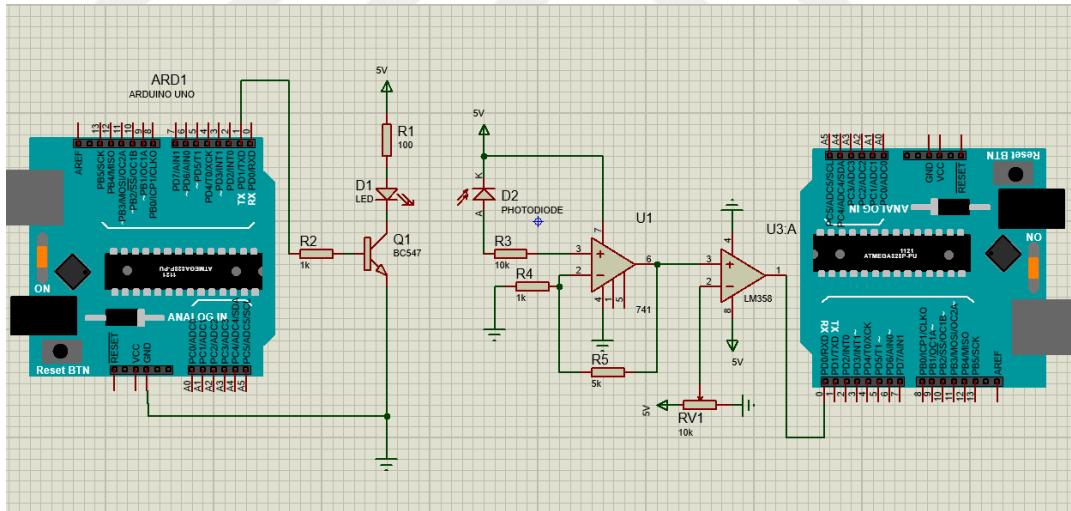
Şekil 4.26. Alınan mesaj.

Veri iletiminin sürekli olduğu durum için verici girişi ve alıcı çıkışından Şekil 4.27'deki sinyaller elde edilmiştir.



Şekil 4.27. Li-Fi deney düzeneğinin verici girişi ve alıcı çıkışından alınan sinyaller.

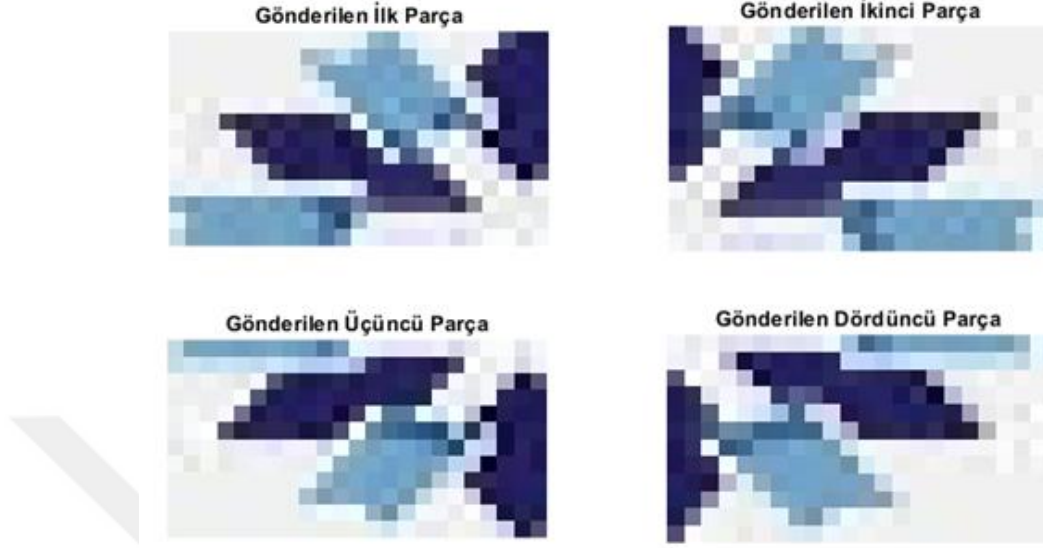
Şekil 4.28’de kullanılan Li-Fi deney düzeneğinin Proteus çizimi gösterilmektedir.



Şekil 4.28. Li-Fi deney düzeneğinin verici ve alıcı şemaları.

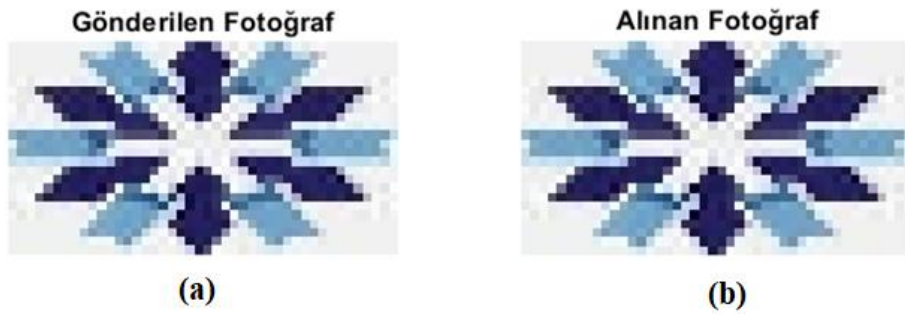
Kurulan Li-Fi düzeneği ile fotoğraf iletimi gerçekleştirmek için Matlab R2020b ve Arduino Uno mikrodenetleyici araç paketi kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım iki adet Arduino Uno mikrodenetleyici kart arasında kurulan kablolu bağlantı ile test edilmiş ve jfif formatındaki 1.94KB’lık fotoğraf, 4800bps hız ile iletilmiştir. Yapılan iletimde Arduino Uno mikrodenetleyici kartının işlem kapasitesi

sınırlamalarından kurtulmak için fotoğraf, Matlab ortamında Şekil 4.29'daki gibi dört ayrı veri paketine bölünerek gönderilmiştir.



Şekil 4.29. Gönderilen veri paketleri.

Alıcı görevde kullanılan Arduino Uno mikrodeneleyici kartı tarafından alınan veri paketleri Matlab ortamında konumlarına bağlı olarak birleştirilmiştir. Şekil 4.30'da Arduino Uno mikrodeneleyici kartları arasında iletimi gerçekleştirilen fotoğraflar gösterilmektedir.



Şekil 4.30. Matlab R2020b ve Arduino Uno mikrodeneleyici kart kullanılarak iletilen fotoğraf. (a) Gönderilen Fotoğraf. (b) Alınan Fotoğraf.

Test edilen yazılım kurulan Li-Fi düzeneğine uygulandığında kullanılan fotodedektörün istenilen hızda okuma yapamaması sebebi ile iletim gerçekleştirilememiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Li-Fi sistemlerin kullanılabilirliğini arttırarak, yaygınlaşmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu sebeple yüksek optik güç sunan LED dizileriyle yüksek hızlı kapalı ortam görünür ışık iletişim sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin, aydınlatma ve veri iletimi açısından ISI göz önünde bulundurularak temel analizleri yapılmıştır. Literatürdeki modelleme çalışmalarında yaygın olarak OOK-NRZ kullanılmaktadır. İlk olarak OOK-NRZ kullanıldığında sistem performansı incelenmiş daha sonra çalışma bir adım ileri taşınarak OOK-RZ ve 4-PPM uygulanmış ve sistemin ISI etkisi azaltılmıştır. Böylece OOK-NRZ ile elde edilen iletim hızı 100Mbps'den, 500Mbps'ye çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen veri hızı analizleri BER, SNR ve RMS değerleri üzerinden yapılmıştır. Literatür araştırması sonucunda OOK-RZ ve 4-PPM modülasyonla çalıştırılan LED dizileri için BER ve RMS gecikme yayılımının daha önce incelenmediği görülmüştür ve bu çalışmanın Li-Fi sistemleri için literatürdeki bu eksikliği gidermesi beklenmektedir. Benzetimler Matlab R2020b yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sistem gereksinimlerinden olan aydınlatma miktarı ISO'nun belirlediği standartlara uygun olarak 313,52 ve 1211,49lx aralığında hesaplanmıştır. LED sayısı arttırılırken bu değer 300-1500lx aralığında olması dikkat edilmesi gereken bir husustur. LED dizileri kullanılırken yüksek optik güç elde etmek hedeflenmiş ve tasarlanan odanın tamamından toplam -2,83dBm ve 4,22dBm aralığında optik güç alındığı hesaplanmıştır. Elde edilen toplam optik güce duvarlardan kaynaklanan birinci yansımalar dâhil edilmiştir. İşlem karmaşıklığının azaltılması amacı ile oda içerisinde sadece alıcı olduğu varsayılmıştır.

Optik kanalların DC kazancı alınan optik güç için önemli bir katsayıdır. Optik kanalların DC kazancı, oda boyutu, alıcı dedektör ve verici LED konumlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle oda tavanına eşit aralıklarla dört adet dizi LED armatürü yerleştirilmiştir ve böylece odadaki her noktada benzer kalitede veri iletimini mümkün kılmak hedeflenmiştir. LED'ler tarafından alıcıya gönderilen optik darbeler için kanalın dürtü yanıtı hesaplanmış ve direkt gelen optik darbelerin sistem performansını daha fazla etkilediği görülmüştür.

Her bir LED tarafından gönderilen optik sinyallerin semboller arası girişime maruz kalmadan fotodedektöre ulaştığı varsayılp sinyal gürültü oranı hesaplanmıştır. Tasarlanan sistem için tüm odada SNR 61,59dB ve 74,44dB aralığındadır. Kararlı bir iletimin gerçekleşmesi için 13,6dB SNR değeri gerekmektedir. Bu oldukça iyi değerler elde edildiğini göstermektedir fakat daha gerçekçi bir sistem için ISI bozucu etkisi ihmal edilmemelidir. ISI hesaplamalara dâhil edildiğinde OOK-NRZ modülasyon tekniği kullanılması durumu için SNR 13,73dB ve 25,02dB aralığında hesaplanmıştır. OOK-NRZ modülasyon şeması kullanılarak odanın hemen hemen her noktasında 100Mbps hızda iletim yapmak mümkündür. Veri hızını arttırmak için ISI'nın düşürülmesi hedeflenmiştir ve bunun için sinyal periyodunun kısmi bir süresinde bilgi gönderimi yapan OOK-RZ ve 4-PPM modülasyon teknikleri de incelenmiştir. Bu modülasyon teknikleri ile tasarlanan sistem 500Mbps hıza çıkabilecek hale gelmiştir.

Sistemin karartma kontrolü, aydınlatma seviyesi kontrolü ve titreme gibi özellikleri Li-Fi için ikincil parametreler olarak değerlendirilir. Bu sebeple düzgün karartma kontrolünün yapılabileceği modülasyon formatları uygulanmalıdır. Fakat bu çalışmada karartma kontrolü analizlere dâhil edilmemiştir. Modülasyon analizleri sadece tez içerisinde yer verilen parametreler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. OOK düzgün karartma kontrolü sağlayamazken, PPM için çeşitli karartma kontrol metotlarının uygulanması mümkündür.

Çok yollu yansımalar söz konusu olduğu sistemlerde, RMS gecikme yayılımı veri iletim hızının üst sınırı için kritik bir performans ölçütüdür ve tasarladığımız sistem için en yüksek 0,98ns olarak hesaplanmıştır. Bu dengeleyici kullanılmadan çıkılabilecek hızlar için sınır değerdir.

Elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, çalışma kapsamında önerilen haberleşme sisteminin, kızılötesi iletişim sistemlerine ve daha az sayıda LED kullanılarak tasarlanan görünür ışık iletişim sistemlerine oranla çok daha yüksek bir performans elde edildiği görülmektedir. Sistem özelliklerinin daha da iyileştirilerek, çalışmanın bir adım ileri taşınabilmesi için yapılan literatür araştırmalarından bazı yöntemler önerilebilir. Örneğin geliş açısı düştükçe ISI azalacağı için SNR artacaktır ve bu durum sistemin daha yüksek hızlarda veri iletimi yapabilmesine olanak sağlayacaktır. Fakat tasarlanan

sistemin FOV açısı 40° 'nin altına düştüğünde oluşan kör alanlar sebebi ile iletişim kesilmektedir. Tasarlanan sisteme ışın izleme yöntemleri uygulanırsa FOV açısı 40° 'nin altına düşülerek daha yüksek hızlara çıkılabilecektir. Ayrıca ISI etkisini ortadan kaldırarak, oldukça yüksek hızlara çıkılmasını mümkün kılan çeşitli optik OFDM şemaları uyarlanarak da sistem hızı arttırılabilir.

Bu tez çalışmasında maliyeti düşük elektronik cihazlar kullanılarak gerçek zamanlı bir Li-Fi düzeneği kurulmuş ve 300bps hızda tek taraflı iletim yapılmıştır. Deney düzeneğinin hız ve mesafe sınırını arttırmak için yüksek optik güç sağlayan dizi LED'ler kullanılabilir. Ayrıca lens kullanımıyla alınan optik güç arttırılabilir. İşlem kapasitesi Arduino Uno mikrodenetleyici kartına oranla oldukça yüksek olan Raspberry ve Max 232 kullanılarak da veri hızı ve gönderilebilecek veri boyutu arttırılabilir.

KAYNAKLAR

- Albayrak, C. ve Türk, K. 2017. Rate adaptive system for visible light communications. 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 5 - 7 Temmuz , 200-203, Barcelona, İspanya.
- Armstrong, J. 2009. OFDM for optical communications. Journal of lightwave technology, 27(3), 189-204.
- Armstrong, J., Lowery, A. J. 2006. Power efficient optical OFDM. Electronics letters, 42(6), 370-372.
- Armstrong, J. ve Schmidt, B. J. 2008. Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN. IEEE Communications Letters, 12(5), 343-345.
- Anonim. 2011. IEEE standard for local and metropolitan area networks-Part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light. IEEE, ABD, 1-309.
- Astar, W., Driscoll, J., Xiaoping, L., Dadap, J., William, G., Yurii, V., Carter, G. ve Osgood, R. 2010. All-Optical Format Conversion of NRZ-OOK to RZ-OOK in a Silicon Nanowire Utilizing Either XPM or FWM and Resulting in a Receiver Sensitivity Gain of ~ 2.5 dB. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 16(1), 234-249.
- Azhar, A. H., Tran, T.-A. ve O'Brien, D. 2010. Demonstration of high-speed data transmission using MIMO-OFDM visible light communications. 2010 IEEE Globecom Workshops, 1052-1056.
- Azhar, A. H., Tran, T.-A. ve O'Brien, D. 2012. A gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications. IEEE Photonics Technology Letters, 25(2), 171-174.
- Berman, S. M., Greenhouse, D. S., Bailey, I. L., Clear, R. D. ve Raasch, T. W. 1991. Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting, and other high frequency sources. Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry, 68(8), 645-662.
- Bell, A. G. 1880. On the Production and Reproduction of Sound by Light. American Journal of Science (1880-1910), 20(118), 305.
- Bozbıyık, A., Özdemir, Ç. ve Hancı, İ. H. 2002. Radyasyon yaralanmaları ve korunma yöntemleri. Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi, 7(11), 274.
- Cogalan, T., Haas, H. ve Panayirci, E. 2015. Power control-based multi-user Li-Fi using a compound eye transmitter. 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 1-6.
- Cossu, G., Khalid, A., Choudhury, P., Corsini, R. ve Ciaramella, E. 2012. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED. Optics express, 20(26), B501-B506.
- Çavdar, A. 2019. Görünür ışık haberleşmesinde çok yollu kanal için iç mekân konumlandırması. Yüksek lisans tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 93, Trabzon.

- Delgado, F., Quintana, I., Rufo, J., Rabadan, J., Quintana, C. ve Perez-Jimenez, R. 2010. Design and implementation of an Ethernet-VLC interface for broadcast transmissions. *IEEE Communications Letters*, 14(12), 1089-1091.
- Dimitrov, S. ve Haas, H. 2015. *Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi*: Cambridge University Press.
- Dong, Z., Cui, K., Chen, G. ve Xu, Z. 2010. Non-line-of-sight link performance study for indoor visible light communication systems. *Free-Space Laser Communications X*, 24 Ağustos, San Diego, California, Birleşik devletler.
- Elgala, H., Mesleh, R. ve Haas, H. 2009. A study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM. 2009 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 30 Nisan.
- Elgala, H., Mesleh, R. ve Haas, H. 2011. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art. *IEEE Communications Magazine*, 49(9), 56-62.
- Ergul, O., Dinc, E. ve Akan, O. B. 2015. Communicate to illuminate: State-of-the-art and research challenges for visible light communications. *Physical Communication*, 17, 72-85.
- Feng, L., Yang, H., Hu, R. Q. ve Wang, J. 2018. mmWave and VLC-Based Indoor Channel Models in 5G Wireless Networks. *IEEE Wireless Communications*, 2–9.
- Ferreira, R. X., Xie, E., McKendry, J. J., Rajbhandari, S., Chun, H., Faulkner, G. ve Pentty, R. V. 2016. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(19), 2023-2026.
- Franz, J. ve Jain, V. 2000. *Optical communications components and systems*. Alpha Science International Ltd., Hindistan.
- Gagliardi, R. M. ve Karp, S. 1976. *Optical communications*. New York.
- Garg, V. K. 2007. *Fourth Generation Systems and New Wireless Technologies*. *Wireless Communications & Networking*, 23–1–23–22.
- Gawande, P., Sharma, A. ve Kushwaha, P. 2016. Various Modulation Techniques for LiFi. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(3), 121-125.
- Gfeller, F. R. ve Bapst, U. 1979. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. *Proceedings of the IEEE*, 67(11), 1474-1486.
- Ghassemlooy, Z., Popoola, W. ve Rajbhandari, S. 2013. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.
- Ghassemlooy, Z., Haigh, P. A., Arca, F., Tedde, S. F., Hayden, O., Papakonstantinou, I. ve Rajbhandari, S. 2013. Visible light communications: 375 Mbits/s data rate with a 160 kHz bandwidth organic photodetector and artificial neural network equalization. *Photonics Research*, 1(2), 65.
- Gismalla, M. S. , Abdullah, M. F., Mabrouk, W. A., Das, B. ve Niass, M. I. 2019 . Data Rate and BER Analysis for Optical Attocells Configuration Model in Visible Light Communication. 2019 International Conference on Information Science and communication Technology (ICISCT), 28 Ocak.

- Goswami, P. ve Shukla, M. K. 2017. Design of a li-fi transceiver. *Wireless Engineering and Technology*, 8(04), 71.
- Haas, H. 2011. Wireless data from every light bulb. TED website, 49.
- Haas, H., Yin, L., Wang, Y. ve Chen, C. 2015. What is lifi?. *Journal of lightwave technology*, 34(6), 1533-1544.
- Haigh, P. A., Le, S. T., Zvanovec, S., Ghassemlooy, Z., Luo, P., Xu, T. ve Canyelles-Pericas, P. 2015. Multi-band carrier-less amplitude and phase modulation for bandlimited visible light communications systems. *IEEE Wireless Communications*, 22(2), 46-53.
- Hermann, C. 2001. The International Commission on Illumination-CIE: What It Is and How It Works. *Symposium-International Astronomical Union*, 196, 69-76, Ocak.
- Islim, M. S. ve Haas, H. 2019. Modulation techniques for Li-Fi. *ZTE communications*, 14(2), 29-40.
- Kahn, J.M., Krause W.J. ve Carruthers, J.B. 1995. Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels, *Communications, IEEE Transactions on*, 43, 2, 1613-1623.
- Kahn, J. M. ve Barry, J. R. 1997. Wireless infrared communications. *Proceedings of the IEEE*, 85(2), 265-298.
- Khalid, A., Cossu, G., Corsini, R., Choudhury, P. ve Ciaramella, E. 2012. 1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation. *IEEE Photonics Journal*, 4(5), 1465-1473.
- Komine, T. ve Nakagawa, M. 2004. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50(1),100-107.
- Komine, T., Lee, J. H., Haruyama, S. ve Nakagawa, M. 2009. Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(6), 2892-2900.
- Komine, T. 2005, Visible light wireless communications and its fundamental study.101
- Köse, S. 2020. Dijital hedef sisteminin üretimi. Yüksek lisans tezi. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 102, Erzurum.
- Küçük, M. A. 2021. Kapalı mekân görünür ışık haberleşmesi için renk kaydırmalı anahtarlama modülasyonunun incelenmesi. Yüksek lisans tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 80, Trabzon.
- Kurniawan, P., Sujatmoko, K. ve Pamukti , B. 2019. Performance of OOK-RZ and NRZ Modulation Techniques in Various Receiver Positions for Li-Fi. 2019 IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys), 173-177.
- Le Minh, H., O'Brien, D., Faulkner, G., Zeng, L., Lee, K., Jung, D. ve Oh, Y. 2008. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20(14), 1243-1245.

- Lee, K., Park, H. ve Barry, J. R. 2011. Indoor channel characteristics for visible light communications. *IEEE Communications Letters*, 15(2), 217-219.
- Lee, S. H., Jung, S.-Y. ve Kwon, J. K. 2015. Modulation and coding for dimmable visible light communication. *IEEE Communications Magazine*, 53(2), 136-143.
- Li, H., Chen, X., Huang, B., Tang, D. ve Chen, H. 2013. High bandwidth visible light communications based on a post-equalization circuit. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(2), 119-122.
- Mamus, A., Yesilkaya, A. ve Panayirci, E. Kapalı Ortam Görünür Işık Kanallarının Modellenmesi ve Denkleştirilmesi, *EMO Bilimsel Dergi* , 5 (9) , 18-29.
- Merah, M. M. 2019. Conception and realization of an indoor multi-user Light-Fidelity link. *Université Paris-Saclay*.
- Miller, G. M., Beasley J. S. ve Beasley, J. 2007. *Modern Electronic Communication*, Pearson International Edition, 992, Amerika Birleşik Devletleri.
- Musayev, E. 2007. Led Işığının Homejenliğinin Araştırılması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12(1).
- Muthu, S. ve Gaines, J. 2003. Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 12-16 Ekim, Salt Lake City, ABD.
- Netsianda, R. E., Ouahada, K. ve Ndjiongue, R. A. 2017. Comparative Study of Different Modulations for Visible Light Communications.
- Nguyen, H. Q., Choi, J.-H., Kang, M., Ghassemlooy, Z., Kim, D. H., Lim, S.-K. ve Lee, C. G. 2010. A MATLAB-based simulation program for indoor visible light communication system. 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 21-23 Temmuz, Newcastle Upon Tyne, Birleşik Krallık.
- Nor, A. M. 2021. Access point selection in beyond 5G hybrid mmWave/Wi-Fi/Li-Fi. *Physical Communication*, 46.
- Ntogari, G., Kamalakis, T., Walewski, J. ve Sphicopoulos, T. 2011. Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible-light communications based on discrete multitone. *Journal of Optical Communications and Networking*, 3(1), 56-65.
- Oldham, W. ve Milnes, A. 1964. Interface states in abrupt semiconductor heterojunctions. *Solid-State Electronics*, 7(2), 153-165.
- Pang, G., Kwan, T., Chan, C.-H. ve Liu, H. 1999. LED traffic light as a communications device. *Proceedings 199 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- Park, S., Jung, D., Shin, H., Shin, D., Hyun, Y., Lee, K. ve Oh, Y. 2007. Information broadcasting system based on visible light signboard. *Proc. Wireless Opt. Commun*, 30, 311-313.
- Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P. ve Mohapatra, P. 2015. Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2047-2077.

- Pottoo, S. N., Wani, T. M., Dar, M. A. ve Mir, S. A. 2018. IoT Enabled by Li-Fi Technology. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*, 4, 106.
- Sarkar, A., Agarwal, S. ve Nath, A. 2015. Li-Fi technology: data transmission through visible light. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 3(6).
- Sewaiwar, A., Tiwari, S. V. ve Chung, Y.-H. 2015. Novel user allocation scheme for full duplex multiuser bidirectional Li-Fi network. *Optics Communications*, 339, 153-156.
- Shaaban, R., Ranganathan, P. ve Faruque, S. 2019. Visible Light Communication Security Vulnerabilities in Multiuser Network: Power Distribution and Signal to Noise Ratio Analysis. *Perspectives on Asian Tourism*, 1–13.
- Shiu, D.-s. ve Kahn, J. M. 1999. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication. *IEEE Transactions on Communications*, 47(8), 1201-1210.
- Shinwasusin, E., Charoenlarnnopparut, C., Suksompong, P. ve Taparugssanagorn, A. 2015. Modulation performance for visible light communications. 2015 6th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems.
- Sugiyama, H., Haruyama, S. ve Nakagawa, M. 2007. Brightness control methods for illumination and visible-light communication systems. 2007 Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07), 4-9 Mart, Guadeloupe, Fransız Karayipleri.
- Supadiyanto, A., Saputri, D. M., Pamukti, B. ve Andini, N. 2019. Comparison of Modulation Schemes toward Coverage Area in indoor Visible Light Communication. 2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), 317-322.
- Şenyer, D., Ünalı, N. ve Akan, Ö. B. 2016. Kablosuz Yeşil Haberleşmenin Önemi Ve Görünür Işıklı Haberleşmede Led Teknolojisi Uygulamaları. *Journal of Aeronautics & Space Technologies/Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 9(1).
- Tanaka, Y., Komine, T., Haruyama, S. ve Nakagawa, M. 2001. Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting, *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 12th IEEE International Symposium on, 2, 81-85.
- Tanaka, Y., Haruyama, S. ve Nakagawa, M. 2000. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links. Paper presented at the 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000, 18-21 Eylül, Londra, Birleşik Krallık.
- Tsonev, D., Videv, S. ve Haas, H. 2014. Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking. *Broadband Access Communication Technologies VIII*, San Francisco, CA.
- Ugweje, O. C. 2000. Communication Systems Seminar, GlennResearch Center, University of Akron.

- Uzun, P.2019.Görünür ışık haberleşmesinde modülasyon türlerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 80, Tokat.
- Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S., Buttner, A., Langer, K.-D. ve Walewski, J. 2009. White light wireless transmission at 200Mbps net data rate by use of discrete-multitone modulation. IEEE Photonics Technology Letters, 21(20), 1511-1513.
- Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S., Habel, K., Buttner, A., Langer, K.-D. ve Walewski, J. 2009. 125 Mbps over 5 m wireless distance by use of OOK-modulated phosphorescent white LEDs.35th European Conference on Optical Communication,1-2.
- Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S., Habel, K., Büttner, A., Langer, K.-D. ve Walewski, J. W. 2010. 230 Mbps via a wireless visible-light link based on OOK modulation of phosphorescent white LEDs. Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 28, 3512-3518.
- Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S., Langer, K.-D., ve Walewski, J. W. 2010. 513 Mbps visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED. Journal of lightwave technology, 28(24), 3512-3518.
- Wang, Z., Mao, T. ve Wang, Q. 2017. Optical OFDM for visible light communications. 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 26-30 Haziran, Valencia, İspanya.
- Wu, C., Zhang, H. ve Xu, W. 2014. On visible light communication using LED array with DFT-spread OFDM. 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), 3325-3330.
- Xi, C., Mirvakili, A. ve Koomson, V. J. 2012. A visible light communication system demonstration based on 16-level pulse amplitude modulation of an led array. Symposium on Photonics and Optoelectronics, 27, 30788-30795.
- Xiangyang, Z., Nan, Z., Fadi, A., Bilal, K. ve Xiaodong, Y. 2020. An Optimization of the Signal to Noise Ratio Distribution of an Indoor Visible Light Communication System Based on the Conventional Layout Model. Sustainability. 12. 9006.
- Xie, E., Bian, R., He, X., Islim, M. S., Chen, C., McKendry, J. J. ve Dawson, M. D. 2020. Over 10 Gbps VLC for long-distance applications using a GaN-based series-biased micro-LED array. IEEE Photonics Technology Letters, 32(9), 499-502.
- Yaklaf, S. K. A. ve Tarmissi, K. S. 2019. Multi-Carrier Modulation Techniques for Light Fidelity Technology. 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 70-73.
- Yeşilkaya, A., Miramirkhani, F., Alsan, H. F., Başar, E., Panayırıcı, E. ve Uysal, M. 2015. Görünür Işık Kanallarının Modellenmesi ve Optik OFDM Sistemleri için Başarım Analizi/Modelling of Visible Light Channels and Performance Analysis for Optical OFDM Systems. EMO Bilimsel Dergi, 5(9), 18-29.
- Zhang, X., Zhao, N., Al-turjman, F., Khan, M.B. ve Yang, X. 2020. An Optimization of the Signal-to-Noise Ratio Distribution of an Indoor Visible Light Communication System Based on the Conventional Layout Model. Sustainability, 12, 9006.

- Zeng, Y., Green, R. ve Leeson, M. 2008a. Multiple pulse amplitude and position modulation for the optical wireless channel. 10th anniversary international conference on transparent optical networks, 4, 193-196.
- Zeng, L., O'Brien, D., Le-Minh, H., Lee, K., Jung, D. ve Oh, Y. 2008b. Improvement of Data Rate by using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System. 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, 678-682.
- Zukauskas, A., Shur, M. ve Gaska, R. 2002. Introduction to Solid-State Lighting. New York.
- Zora, R. 2020. Wi-Fi frekans bandındaki radyasyon. Yüksek lisans tezi. İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 98, İstanbul.

