

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ İÇİN
YAYMA TEKNİĞİ ÜZERİNE KURULAN
YENİ BİR M SEVİYELİ MODÜLASYON TEKNİĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
20101023 Meryem MARAŞ**

**Danışman
Prof. Dr. Ali ÖZEN**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ İÇİN
YAYMA TEKNİĞİ ÜZERİNE KURULAN
YENİ BİR M SEVİYELİ MODÜLASYON TEKNİĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
20101023 Meryem MARAŞ**

**Danışman
Prof. Dr. Ali ÖZEN**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan bütün materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtmek isterim.

Meryem Maraş
İmza



YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Görünür Işık İletişimi İçin Yayma Tekniğı Üzerine Kurulan Yeni Bir M Seviyeli Modülasyon Tekniğı” isimli Yüksek Lisans tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Yönergesi’ne uygun bir şekilde hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Meryem MARAŞ
İmza

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Ali ÖZEN
İmza

YÜKSEK LİSANS BİTİRME TEZİ KABUL VE ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Ali Özen danışmanlığında Meryem Maraş tarafından hazırlanan “Görünür Işık İletişimi İçin Yayma Tekniği Üzerine Kurulan Yeni Bir M Seviyeli Modülasyon Tekniği” isimli bu çalışma Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

29 / 08 / 2023

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Ali ÖZEN

Üye : Prof. Dr. İbrahim DEVELİ

Üye : Doç. Dr. Ahmet GÜNER

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / / 2023

Prof. Dr. Erkan Köse
Enstitü Müdürü V.

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamı gerçekleştirmekte yardımlarını ve desteğini esirgemeyen, çalışma laboratuvarı HARGEM'i her zaman kullanabilme olanağı sunan, Prof. Dr. Ali ÖZEN'e sonsuz teşekkür dileklerimi sunarım.

Eğitim hayatım süresince maddi manevi desteği esirgemeyen başta babam Mustafa MARAŞ, annem Kadriye MARAŞ, ablalarım Ayla MARAŞ BAL, Meral MARAŞ ve Hanife MARAŞ ATAN'a, ağabeyim Bahtiyar MARAŞ olmak üzere diğer bütün aile fertlerime de teşekkürü bir borç bilirim.

Meryem MARAŞ
Kayseri, Ağustos 2023

GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ İÇİN YAYMA TEKNİĞİ ÜZERİNE KURULAN YENİ BİR M SEVİYELİ MODÜLASYON TEKNİĞİ

Meryem MARAŞ

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2023

Danışman: Prof. Dr. Ali Özen

ÖZET

Tez çalışmasında yapılan, yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (IM/DD) haberleşme teknolojisi için yayma tabanlı yeni bir optik OFDM dalga form sistemi önerilmektedir. Önerilen dalga formu, yayma tekniği ile Flip OFDM dalga formunun birleştirilmesinden oluşmaktadır (Spread Flip OFDM, s-Flip OFDM). Önerilen dalga formunun performans değerini belirlemek ve Flip OFDM, DCO-OFDM ve VLC-OFDM gibi optik OFDM dalga formları ile kıyaslamak için benzetim çalışmaları yapıldı. Ayrıca sunulan çalışmada, önerilen yayma tekniğinin diğer optik OFDM dalga formlarına etkisi analiz edildi. AWGN kanal ile tavan sıçrama (ceiling bounce), üstel azalan (exponential decay) ve üstel artan (exponential risen) kanal modellerinin kullanıldığı dağınık optik kablosuz kanal ortamlarında, önerilen yayma tekniğinin optik OFDM dalga formalarının performansına 5 ila 10 dB aralığında SNR kazancı sağladığı anlaşıldı. Sağlanan nümerik sonuçlardan, hem AWGN kanal ortamında hem de dağınık çok yollu optik kanal ortamlarında, önerilen s-Flip OFDM dalga formunun s-DCO-OFDM'dan yaklaşık 10 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi SNR kazancı olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Yayma tekniği; tavan sıçramalı optik kanal modeli; dağınık çok yollu optik kanal; optik OFDM dalga formu; IM/DD; s-Flip OFDM dalga formu

A Novel M-Level Modulation Technique Built on the Spreading Method for Visible Light Communication

Meryem Maraş

Nuh Naci Yazgan University, Graduate School of Sciences

Electrical and Electronics Engineering Master of Science Thesis, August 2023

Supervisor: Prof. Dr. Ali Özen

ABSTRACT

In this study, a novel spread-based optical OFDM waveform is proposed for intensity modulation/direct detection (IM/DD) communication systems. The proposed waveform is a combination of the spreading technique and the Flip OFDM waveform (Spread Flip OFDM, s-Flip OFDM). Simulation studies are carried out to evaluate the performance of the proposed waveform and compare it with optical OFDM waveforms such as Flip OFDM, DCO-OFDM and VLC-OFDM. In addition, the effect of the proposed spreading technique on other optical OFDM waveforms is analyzed in the presented study. It is understood that the proposed spreading technique provides a gain in the range of 5 to 10 dB SNR to the performance of optical OFDM waveforms in AWGN channel and diffused optical wireless channel environments, where ceiling bounce, exponential decay and exponential risen channel models are used. From the obtained numerical results, it is seen that the proposed s-Flip OFDM waveform is approximately 10 dB superior than the s-DCO-OFDM waveform and 15 dB superior than the s-VLC-OFDM waveform in both AWGN and diffused multipath optical environments.

Keywords: Spread technique; ceiling bounce optical channel model; diffused multipath optical channel; optical OFDM waveform; IM/DD; s-Flip OFDM waveform

İÇİNDEKİLER

GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ İÇİN YAYMA TEKNİĞİ ÜZERİNE KURULAN YENİ BİR M SEVİYELİ MODÜLASYON TEKNİĞİ

Lisans Bitirme Projesi Onay Formu	iv
Önsöz	v
Özet	vi
İçindekiler	viii
Semboller Dizini	ix
Kısaltmalar Dizini	xiii
Şekiller ve Çizelgeler Dizini	xvi
1. Giriş	1
BÖLÜM 1	5
1. 6.NESİL TEKNOLOJİSİ	5
a. Yeni Uygulamalar ve Yeni Faaliyetler	5
b. Bilginin Yayılması	6
c. Sürdürülebilirlik ve Sosyal Sorumluluk	7
d. Genel Vizyon ve Yetenekler	7
e. Sürdürülebilirlik	11
2. KULLANIM DURUMLARI ve GEREKSİNİMLERİ	13
BÖLÜM 2	16
1. GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ	16
1. 2. Kişisel ve Yerel Alan Ağları	21
2. IŞIK YAYAN DİYOTLAR	24
3. VLC SİSTEM MODELİ	29
3. 1. Kanal Dürtü Tepkisi	30
3. 2. RMS Gecikmesi	32
BÖLÜM 3	33
OFDM TABANLI MODÜLASYON SİSTEMLERİ	33
1. GİRİŞ	33

a. OWC'de Yoğunluk Modülasyonu ve Doğrudan Algılama (IM/DD)	36
1. DCO-OFDM (DOĞRU AKIM EKLEMELİ OPTİK OFDM)	37
2. ASİMETRİK KIRPILMIŞ OPTİK OFDM (ACO-OFDM)	39
3. FLİP-OFDM (FLİP DİKGEN FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA)	42
BÖLÜM 4	46
GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR OPTİK OFDM DALGA FORMU TASARIMI	46
1. GİRİŞ	46
2. VLC SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN YAYMA TEKNİĞİ	49
3. YAYILI SC VE MC VLC SİSTEMİ	51
A. Kablosuz Optik Kanal Modeli	51
4. ÖNERİLEN YAYILI OPTİK OFDM DALGA FORMU	55
BÖLÜM 5	58
YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR	58
1. YAYILI SC ve MC SİSTEMLERİ	58
A. AWGN Kanal Nümerik Sonuçları	58

B.	Çok Yollu Optik Kanal Nümerik Sonuçları	64
a.	MC-VLC sisteminde M-QAM'li modülasyonlar ile örnek çalışmalar	68
2.	SONUÇLAR	80
BÖLÜM 6		81
YAPILAN İKİNCİ SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR		81
1.	SAYISAL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	82
A.	AWGN Kanalının Sayısal Sonuçları	82
B.	FLAT Kanal Sayısal Sonuçları	86
C.	AWGN Kanalının Sayısal Sonuçları	90
D.	Dağınık Çok Yollu Optik Kanalın Sayısal Sonuçları	91
a.	Tavan Sıçrama Dağınık Çok Yollu Optik Kanalın Sayısal Sonuçları	92
b.	Üstel Azalan Dağınık Çok Yollu Optik Kanalın Sayısal Sonuçları	96
c.	Üstel Artan Dağınık Çok Yollu Optik Kanalın Sayısal Sonuçları	99
2.	SONUÇLAR	104
3.	KAYNAKLAR	105

SEMBOLLER DİZİNİ

λ	: Dalga boyu
f	: Frekans
c	: Işık Hızı
(lm/w)	: Aydınlatma Verimi
$b(t)$	: Kaynak Bitleri
$s(t)$	: İletilecek Sinyal
p	: Elektro-Optik Dönüşüm Katsayısı
ζ	: Fotodedektör Duyarlılığı
$*$	: Konvolüsyon Operatörü
$n(t)$	: Gürültü
$I(t)$	: Görünür Işık Yoğunluğu
$x(t)$	: Bilgi Sinyali
$y(t)$	: Alıcıdaki İşaret
μ	: Ortalama
σ	: Standart Sapma
$h_{LOS}(t)$	: Görüş Hattı Bileşeni
$h_{NLOS}(t)$	: Görüş Hattı Olmayan Bileşeni
$h_2(t)$	: Kanal Dürtü Yanıtı
D_{rms}	: RMS Gecikme Yayılmı
X_k	: QAM Sembolleri
X^{DCO}	: DCO Vektörü
x_n	: Ayırık Zaman OFDM Sembolü
B_{DC}	: Dağılan Elektrik Gücü
Se_{DCO}	: DCO-OFDM'nin Spektral Etkinliği
M	: QAM Modülasyon Seviyesi
N_{CP}	: Döngüsel Önek Sayısı
X^{ACO}	: ACO Vektörü
Se_{ACO}	: ACO-OFDM'nin Spektral Etkinliği
Se_{ACO}^{tek}	: Tek Alt Taşıyıcılı ACO-OFDM için Spektral Verimliliği
$Se_{ACO}^{çift}$	: Çift Alt Taşıyıcılı ACO-OFDM için Spektral Verimliliği
N	: IFFT Boyutu

X_n^*	: X_n 'nin Eşlenik Simetrik QAM Sembolü
$x^+[k]$	: Pozitif Sinyal
$-x^- [k]$	: Ters Polarite Sinyal
$y^+(k)$	: Birinci Alt Çerçevelere Ait İlgili Zaman Örnekleri
$y^-(k)$	: İkinci Alt Çerçevelere Ait İlgili Zaman Örnekleri
F_s	: Yayılma Faktörü
X_{spread}	: Yayıncının Çıkışından Alınan Sinyal
PN_{spread}	: Yayılan PN Dizi Üretecinin Çıktısı
X	: Rastgele Data Üretecinin Çıkışı
$\oplus$	: Mantıksal XOR Operatörü
k	: Zaman İndeksi
$Y_{de-spread}$	: Ters-Yayıncı Çıkışında Alınan Sinyal
xu	: Demodüle Edilen Sinyal
$\delta(t)$	: Dirac Delta Fonksiyonu
g_{LOS}	: Yönlendirilmiş LOS Bağlantısının Optik Yol Kazancı
g_{dif}	: Dağınık Bağlantı Optik Yol Kazancı
$h'_{dif}(t)$	: Dağınık Bağlantının CIR'inin ortak etkisi
$h_{üstel-azalma}(t)$	: Üstel Azalma Modelinden Dağınık Bağlantının CIR'ı
$H(0)$	: DC optik yol kazancı
$u(t)$	: Birim Basamak Fonksiyonu
$h(t)$	: Tavan Sıçrama Modelinden Dağınık Bağlantının CIR'ı

KISALTMALAR DİZİNİ

ACO-OFDM	: Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM
APD	: Çığ Fotodiyot
AWGN	: Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	: Bit Hata Oranı
BİT	: Veri Haberleşmesi
BPSK	: İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
CAP	: Taşıyıcısız Genlik ve Faz
CIR	: Kanal Dürtü Yanıtı
CMF-DFE	: Kanal Uyumlu Filtre Karar Geri Beslemeli Denkleştirici
CP	: Döngüsel Önek
DD	: Yön Algılama
D2D	: Cihazdan Cihaza İletişim
D/L	: İnternet Erişimi
EMF	: Elektromanyetik Alan
EMI	: Elektromanyetik Girişim
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
Flip-OFDM	: Flip Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
FSC	: Frekans Seçici Kanal
DCO-OFDM	: Doğru Akım Eklemeli Optik OFDM
DFE	: Karar Geri Beslemeli Denkleştirici
GaN	: Galyum-Nitrit
ICI	: Taşıyıcılar Arası Girişim
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
IM	: Yoğunluk Modülasyonu
IR	: Kızılötesi
IoT	: Nesnelerin İnterneti
ISI	: Semboller Arası Girişim
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LAN	: Yerel Alan Ağı
LD	: Lazer Diyot
LED	: Işık Yayan Diyot
LOS	: Görüş Hattı

LTE	: Uzun Vadeli Evrim
MC-VLC	: Çok Taşıyıcılı Görünür Işık Haberleşmesi
M-QAM	: Çok Taşıyıcılı Modülasyon
M2M	: Makinalar Arası İletişim
NLOS	: Görüş Hattı Olmayan
NTN	: Karasal Olmayan Ağlar
OFDM	: Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama
OLED	: Organik Işık Yayan Diyot
OLT	: Optik Hat Terminali
OOB	: Bant Dışı Emisyonu
O-OFDM	: Optik Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama
OOK	: Açık-Kapalı Anahtarlama
OWC	: Optik Kablosuz İletişim
PAPR	: Tepe/Ortalama Güç Oranı
PD	: Foto Dedektör
PIN	: Pozitif-İçsel-Negatif Diyot
POF	: Plastik Optik Fiber
PON	: Optik Erişim Teknolojisi
RAN	: Radyo Erişim Ağı
RF	: Radyo Frekansı
RFI	: Radyo Frekans Girişimi
RGB	: Kırmızı, Yeşil, Mavi
RLS	: Özyineli En Küçük Kareler
RLS-DFE	: Karar Geri Beslemeli Denkleştirici
RMS	: Kök Kare Ortalama
SC-VLC	: Tek Taşıyıcılı Görünür Işık Haberleşmesi
S-BPSK	: Yayma Faktörlü İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
S-4QAM	: Yayma Faktörlü Dörtlü Genlik Modülasyonu
S-16QAM	: Yayma Faktörlü Karesel Genlik Modülasyonu
S-64QAM	: Yayma Faktörlü Dördün Genlik Modülasyonu
THz	: Terahertz
UV	: Ultraviyole
VLC	: Görünür Işık İletişimi

VR	: Sanal Gerçeklik
XR	: Genişletilmiş Gerçeklik
WBAN	: Vücut Alanı Ağları
Wi-Fi	: Kablosuz Bağlantı Ağı
WLAN	: Yerel Alan Ağları
WiMAX	: Mikrodalga Erişim İçin Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik
WPAN	: Kişisel Alan Ağları
1G	: Birinci Nesil Haberleşme
2G	: İkinci Nesil Haberleşme
3G	: Üçüncü Nesil Haberleşme
4G	: Dördüncü Nesil Haberleşme
5G	: Beşinci Nesil Haberleşme
6G	: Altıncı Nesil Haberleşme
802.11a	: Telsiz Yerel Ağ Standardı

ŞEKİLLER VE ÇİZELGELER DİZİNİ

- Şekil 1.** 2030 ve sonrasında doğru mobil iletişimin mega trendleri
- Şekil 2.** Bilginin yaygınlaşmasıyla yönlendirilen 6G özellikleri
- Şekil 3.** VLC iç mekan uygulamaları
- Şekil 4.** OWC'nin kişisel ve LAN'larda uygulanması
- Şekil 5.** Elektromanyetik izge ve görünür izge
- Şekil 6.** OWC'nin genel prensibi
- Şekil 7.** İnsansız hava aracına (İHA) sahip bir OWC sistemi
- Şekil 8.** VLC sistem modeli
- Şekil 9.** Görünür ışık haberleşmesi kanal modeli
- Şekil 10.** OWC'de yoğunluk modülasyonu ve doğrudan algılama (IM/DD)
- Şekil 11:** DCO-OFDM şemasının blok diyagramı
- Şekil 12:** ACO-OFDM şemasının blok diyagramı
- Şekil 13(a).** Flip-OFDM verici blok diyagramı
- Şekil 14(b).** Flip-OFDM alıcı blok diyagramı
- Şekil 15.** Flip-OFDM tek kutuplu çerçeve
- Şekil 16.** Yayma işlem birimi
- Şekil 17.** Yayma PN dizisi üreticinin blok şeması
- Şekil 18.** Yayılı BPSK modüleli SC ve MC VLC sistemlerinin blok şeması
- Şekil 19.** Önerilen yayılı optik OFDM dalga formunun blok diyagramı
- Şekil 20.** Flip-OFDM blok şeması
- Şekil 21.** AWGN kanal ortamında SC-VLC sisteminde s-BPSK, s-4QAM, s-16QAM, s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması
- Şekil 22.** AWGN kanal ortamında SC-VLC sisteminde BPSK, 16-QAM, s-BPSK ve s-16QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması
- Şekil 23.** AWGN kanal ortamında SC-VLC sisteminde 4QAM, s-4QAM 64-QAM, ve s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması
- Şekil 24.** AWGN kanal ortamında MC-VLC sisteminde s-BPSK, s-4QAM s-16QAM, ve s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması
- Şekil 25.** AWGN kanal ortamında MC-VLC sisteminde BPSK, s-BPSK, 16QAM, ve s-16QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması
- Şekil 26.** AWGN kanal ortamında MC-VLC sisteminde 4QAM, s-4QAM, 64QAM, ve s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması

- Şekil 27.** AWGN kanal ortamında SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması
- Şekil 28.** $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 29.** $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ için SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 30.** $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ ve $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ için SC-VLC sistemlerinin 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 31.** $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 32.** $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 33.** $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 34.** $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 35.** $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 36.** $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 37.** $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması

- Şekil 38.** $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 39.** $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 40.** $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 41.** $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 42.** $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 43.** AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, ACO-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması
- Şekil 44.** AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, ACO-OFDM, s-VLC OFDM önerilen s-ACO OFDM sistemlerinin BER-SNR kıyaslanması
- Şekil 45.** AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, s-VLC OFDM önerilen s-DCO OFDM sistemlerinin BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 46.** AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, FLİP-OFDM, s-VLC OFDM önerilen s-FLİP OFDM sistemlerinin BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 47.** FLAT kanal ortamında Optik-OFDM, ACO-OFDM, s-Optik OFDM önerilen s-ACO OFDM sistemlerinin BER-SNR kıyaslanması
- Şekil 48.** FLAT kanal ortamında Optik-OFDM, DCO-OFDM, s-Optik OFDM önerilen s-DCO OFDM sistemlerinin BER-SNR kıyaslanması
- Şekil 49.** FLAT kanal ortamında Optical-OFDM, DCO-OFDM, s-Optik OFDM önerilen s-DCO OFDM sistemlerinin BER-SNR karşılaştırılması
- Şekil 50.** AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması

- Şekil 51.** Önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin AWGN kanal ortamındaki BER-SNR performans karşılaştırması
- Şekil 52.** VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ için 5 dallı tavan sıçramalı dağınık optik kablosuz kanal ortamındaki BER-SNR performans karşılaştırması
- Şekil 53.** $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ için 5 dallı tavan sıçramalı dağınık optik kablosuz kanal ortamında önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması
- Şekil 54.** VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için BER-SNR performans karşılaştırması
- Şekil 55.** $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için 5 dallı tavan sıçramalı dağınık optik kablosuz kanal ortamında önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması
- Şekil 56.** VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı BER-SNR performans karşılaştırması üstel azalan dağınık optik kablosuz kanal ortamı için $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$
- Şekil 57.** $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ için 5 dallı önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması için üstel azalan dağınık optik kablosuz kanal ortamı
- Şekil 58.** VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı BER-SNR performans karşılaştırması üstel azalan dağınık optik kablosuz kanal ortamı için $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$
- Şekil 59.** $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için 5 dallı önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması için üstel azalan dağınık optik kablosuz kanal ortamı
- Şekil 60.** VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması için 5 dallı üstel artan dağılmış optik kablosuz kanal ortamında $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$
- Şekil 61.** Önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin 5 kademeli üstel artan dağınık optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR performans karşılaştırması $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$

Şekil 62. VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı üstel artan dağınık optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR performans karşılaştırması $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$

Şekil 63. Önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı üstel artan dağınık optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR performans karşılaştırması $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$

Tablo 1. VLC, RF VE IR teknolojilerinin karşılaştırılması



GİRİŞ

Son on yılda dünya, telekomünikasyon ağları tarafından taşınan trafikte çarpıcı bir artışa tanık oldu. Yüksek Hızlı İnternet hizmetlerine (yüksek tanımlı TV, görüntülü aramalar ve bulut tabanlı bilgi işlem) yönelik artan talep, son kullanıcılara ultra yüksek veri hızları sunabilen yeni gelişen teknolojilerde daha fazla yenilik, araştırma ve geliştirme ihtiyacını desteklemiştir. Mevcut radyo frekansı (RF) kablosuz spektrumunu geride bırakmaktadır ve bu nedenle acil müdahale gerektiren spektrum tıkanıklığına yol açmaktadır. Bu tür durumlar, kullanıcı taleplerinin etkileyici sınırlı erişim durumuna yol açabileceği spor alanları, konserler, havaalanı, acil durumlar vb. gibi yüksek yoğunluklu senaryolarda ortaya çıkmaktadır. Mevcut RF tabanlı iletişimler, özellikle, bağlantı kullanılabilirliğini ve performansını azaltan yoğun kentsel ortamlarda çok yönlü yayılma etkilerinden etkilenir. Spektrum tıkanıklığı ile birlikte bu sistemlerin sınırlı bant genişliği, belirli bir alana nispeten çok az sayıda yüksek tanımlı kanalın yerleştirilebileceği anlamına gelir [1].

Son yıllardaki çalışmalar ile kablosuz iletişimin hızlı gelişimine tanık olundu ve şu anda 4G, 5G ve WiFi teknolojileri, yüksek hızlı kablosuz bağlantılar sağlamak için kullanılmaktadır. Yüksek hızlı kablosuz ağların kullanılabilirliği günlük hayatımızı değiştirmektedir. Örneğin, taşıtlarda artık akıllı videoları izleyebilir, e-postalarını kontrol edebilir veya otobüslerde veya trenlerde çevrimiçi oyunlar oynayabilir ve öğrenciler kampüsün her yerinden dijital kütüphane koleksiyonlarına ve profesyonel yazılımlara erişebilmektedir. Ultra yüksek çözünürlüklü isteğe bağlı video, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik gibi hızla gelişen uygulamalarla, son kullanıcılar tarafından daha da yüksek kablosuz iletişim hızı beklenmektedir. Dış mekan senaryolarıyla karşılaştırıldığında, özellikle çalışma ve yaşam alanlarında, iç ortamlarda kablosuz hız gereksinimi genellikle daha yüksektir [2]. Kablosuz trafiğin %70'inden fazlasının kapalı ortamlarda (ev, ofis vb.) gerçekleştiği tahmin edilmektedir. Bu nedenle, sorunsuz iç mekan kablosuz iletişimini sağlamak için düşük maliyetli ve son derece güvenilir teknolojiler gerekmektedir. RF teknolojilerinden daha fazlasını elde etmek veya optik teknolojiler gibi bir alternatifi kullanmak mevcut iki seçenektir.

5G'yi kapsayan sınırlar ile 6G'nin nasıl olacağını merak etmeye başlıyoruz. Daha gelişmiş bir yeni nesil mobil iletişim sistemi olan 6G, iletişimin çok ötesine geçecek. Fiziksel, biyolojik ve siber dünyaları kaynaştırmak için entegre iletişim, algılama ve

bilgi işlem yeteneklerine sahip bağlantılar sağlayan dağıtılmış bir sinir ağı olarak hizmet edecek ve Gerçek Her Şeyin Zekası çağını başlatacaktır. 5G'yi temel alan 6G, bağlantılı insanlardan ve nesnelerden bağlantılı zekaya dönüşümü sürdürecektir. Özünde, her insana, eve ve işe zeka getirecek ve yeni bir inovasyon ufkuna yol açacaktır [3].

Kabul edilen kablosuz teknolojilerden (yani 3G, 4G, 5G ve ötesi) bağımsız olarak, kablosuz radyo sistemlerinin kapasitesini artırmak için yalnızca üç yaklaşım vardır: (i) yeni spektrum ve dolayısıyla daha fazla bant genişliği kullanmak; (ii) düğüm sayısını artırmak; ve (iii) spektral verimliliği yükseltmektir [1]. Yeni bir spektrum elde etmek maliyetlidir ve daha fazla bant genişliği bulmak büyük bir sorun değildir, ancak açıkça yeterli değildir – sınırlıdır. Daha fazla düğüm eklemek de hücre bölme yoluyla gerçekleştiriliyor, ancak bu oldukça maliyetli ve bu tür sistemler de yönetilemeyecek kadar karmaşık hale gelmektedir. Ayrıca altyapının iki katına çıkarılması, gelirin iki katına çıkmasına yol açmayacaktır [1].

Bu kısıtlamaları giderebilecek ve üstesinden gelebilecek olası bir alternatif teknoloji, kızılötesi (IR), görünür ve ultraviyole (UV) alt bantlarını kullanan ve şimdiye kadar çoğunlukla keşfedilmemiş olan optik kablosuz iletişimdir (OWC). [1] Sürekli artan kablosuz iletişim hızı gereksinimini karşılamak için, verilerin ışık dalgası tarafından taşındığı ve kablosuz bağlantı yoluyla iletildiği optik kablosuz teknolojisi araştırılmıştır. Optik kablosuz iletişimi araştırmak için bir anahtar sürücü, teorik olarak ultra yüksek hızlı kablosuz bağlantıları mümkün kılan neredeyse sınırsız ve düzensiz bant genişliğinin mevcudiyetidir. Optik kablosuz teknolojinin bir diğer önemli avantajı, günümüzde çok sayıda kablosuz sistemin bir arada bulunması nedeniyle daha çekici hale gelen geleneksel Elektromanyetik Girişime (EMI) karşı bağışlıklardır. [2]

OWC, RF ile karşılaştırıldığında, ultra yüksek bant genişliği (THz (Terahertz) düzeyinde), elektromanyetik gürültüye maruz kalmama, neredeyse sınırsız frekans yeniden kullanımını getiren yüksek derecede uzaysal sınırlama sağlamak, lisans ücreti olmadan maliyet etkinliği ve doğal fiziksel güvenlik gibi üstün özellikler sunar. Çok sayıda spektrum mevcut olduğundan, spektral verimlilik RF sistemlerinde olduğu kadar kritik değildir; yine de RF sistemleri için spektral verimliliği artırmak için geliştirilen tekniklerin çoğu optik alana uygulanabilir [2]. RF sistemlerinin spektrum kıtlığını ele almak için önerilen çözümlerin çoğu, artan yol kaybı ve pahalı verici/alıcı bileşenlerinin

büyük dezavantajları ile milimetre ve THz dalgaları gibi daha yüksek frekansları düşünürken, OWC tabanlı iletim sistemleri, avantajlarını iletişim teknolojisinin olgunluğu ve aynı zamanda kıyaslanamaz enerji verimliliği nedeniyle almaktadır.

Görünür banttaki (390–700 nm) OWC sistemlerine genellikle görünür ışık iletişimleri (VLC'ler) denir ve bunlar, aydınlatma ve çok yüksek hızlarda veri iletişiminin ikili amacı için görünür ışık yayan diyotlardan (LED'ler) tam olarak yararlanmaktadır. VLC, yakın gelecekte ışıkları nasıl kullanacağımıza ilişkin yaklaşımlarda devrim yaratma potansiyeline sahip, sürdürülebilir ve yeşil bir teknolojidir. Kablosuz yerel alan, kişisel alan ve vücut alanı ağları (WLAN, WPAN ve WBAN'lar), heterojen ağlar, iç mekan yerelleştirme ve navigasyon (mevcut GPS'in bulunmadığı yerlerde), araç ağları, yeraltı ve sualtı ağları dahil olmak üzere bir dizi uygulama için çözümler ve birkaç Mbps'den 10Gbps'ye kadar bir dizi veri hızı sunabilir [1].

İç mekan optik kablosuz iletişim, hem görünür ışık aralığını hem de yakın kızılötesi dalga boyu aralığını keşfedebilir. LED'ler aynı zamanda VLC'de vericiler olarak da hizmet ettiğinden, LED'lerin aydınlatma altyapısında yaygın olarak kullanılması nedeniyle görünür ışık iletişimi teknolojisi giderek daha çekici hale gelmektedir. Öte yandan, yakın kızılötesi optik kablosuz iletişim teknolojisi, daha yüksek modülasyon bant genişliği ve kablosuz kanal bant genişliği sağlayabilir ve bu nedenle gelecekte daha yüksek hız gerektiğinde oldukça çekicidir [2]. Şu anda, radyo frekansı (RF) teknolojileri, kullanıcılara kablosuz erişim sağlamak için 4G ve Wi-Fi teknolojileri gibi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu tür RF teknolojileri, özellikle ulaşılabilir iletişim hızını kısıtlayan sıkışık RF spektrumu gibi bir takım sınırlamalarla karşı karşıyadır. Öte yandan, optik kablosuz iletişim teknolojisi, yüksek hızlı kablosuz veri iletimi sağlamak için sıkışık olmayan, lisanssız optik spektrumu araştırır ve bu nedenle, yakın gelecekte kullanıcıların giderek artan kablosuz iletişim hızı gereksinimlerini karşılamak için umut verici bir çözümdür [2].

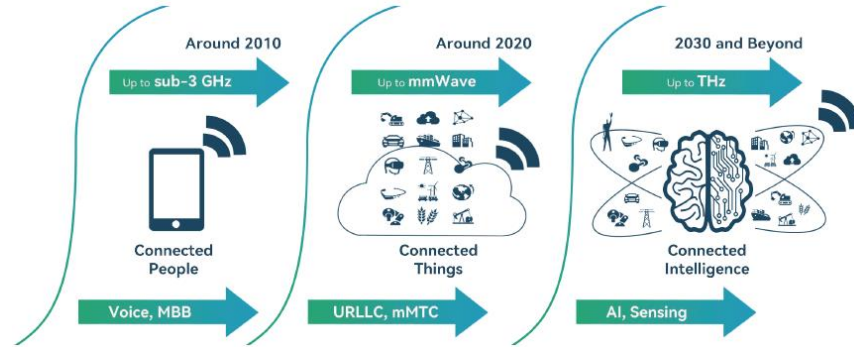
Bu tez, VLC teknolojisinin teorik ve uygulama ile ilgili yönlerinin özellikle geniş bir kapsamını kapsayan ve farklı uygulama senaryolarında bu sistemlerin farklı temel ve pratik hususlarını ele alan bölümlerden oluşmaktadır. İlk bölümde geleceğin kablosuz nesillerinden 6.Nesil haberleşmesi hakkında bilgilere yer verilmiştir. İkinci

bölümünde üzerine çalışılan ve araştırılan Görünür Işık Haberleşmesi'nden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde OFDM Tabanlı Modülasyon Sistemlerinden söz edilmiş olup, üzerine çalışılan Optik OFDM yapılarından ACO-OFDM, DCO-OFDM ve Flip-OFDM'in yapıları ve blok diyagramları verilmiştir. Dördüncü bölüm ve devamında da önerilen dalga formu Görünür Işık Haberleşme Sistemleri için Yeni Bir Optik OFDM Dalga Formu yapısı anlatılmış olup, incelenen ve yapılan simülasyon çalışmaları verilmiştir.



1. 6.NESİL TEKNOLOJİSİ

Yeni nesil mobil iletişim sistemi kabaca her 10 yılda bir ortaya çıkarken, mobil ağlar tarafından sağlanan ana akım hizmetler ve yeni frekans bantlarının uygulanması genellikle iki nesil veya daha fazla zaman almaktadır. Aslında, insanların her yerde ve her zaman bağlantı kurması neredeyse dört nesil sürdü ve bu da bağlantılı bir topluma yol açtı. 2020 yılı civarında başlayan 5G'nin hızlı küresel ticarileşmesiyle birlikte, yalnızca toplum gelişmiş iletişim yetenekleriyle daha iyi bağlantı kurmakla kalmayacak, aynı zamanda her türlü iş senaryosunda daha fazla cihaz bağlanacak ve bağlantılı bir toplum çağından her şeyin bağlantılı olduğu bir çağa geçilecektir. Bu trendi takip ederek, 6G'nin insanlar ve nesneler için daha iyi bağlantılar sağlayacağını ve akıllı toplum trendini benimseyeceğini, bağlantılı insanlardan ve nesnelerden bağlantılı zekaya dönüşümü sürdüreceğini öngörülmektedir. 5G'de [4] başlatılan üç kullanım senaryosunun devam eden gelişimine ek olarak, Şekil 1'de önerildiği gibi yapay zeka ve algılama, 6G'de iki yeni kullanım senaryosu haline gelecektir. Aşağıda açıklandığı gibi, mobil iletişimi yeni bir bağlı zeka çağına doğru yönlendiren üç temel etken vardır.



Şekil 1: 2030 ve sonrasına doğru mobil iletişimin mega trendleri [3]

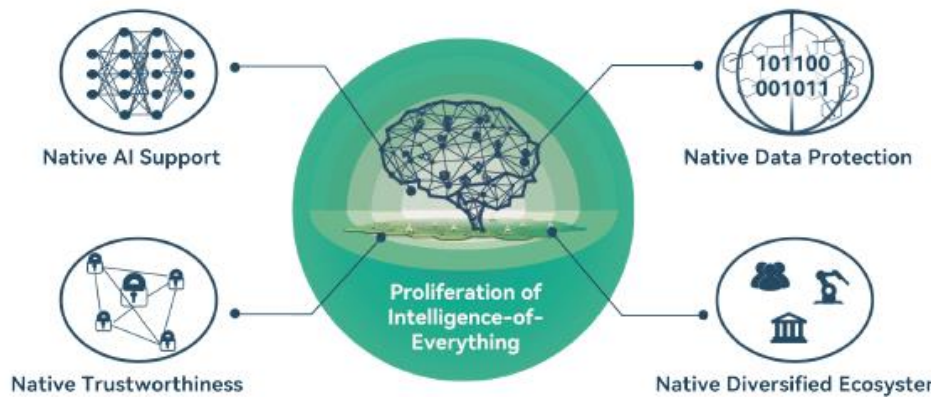
a) Yeni Uygulamalar ve Yeni Faaliyetler

6G çağında daha fazla uygulama ortaya çıkacaktır. Dokunsal geri bildirim ve holografik görüntüleme ile birlikte genişletilmiş gerçeklik (XR) bulut hizmetleri, insan

merkezli ana akım uygulamalar haline gelebilir. Cihaz başına trafik talebindeki üstel artış, katı gecikme ve güvenilirlik gereklilikleri ile birlikte, ihtiyaç duyulan devasa kapasite açısından 6G ağ tasarımı için büyük bir zorluk haline gelecektir. Aynı zamanda, artan sayıda IoT cihazı ve öğrenme algoritmalarına büyük veri sağlayan yeni kablosuz algılama özelliği ile yapay zeka, her tür otomasyon için bir motor haline gelecektir. Bu nedenle büyük veriler, 6G ağ verimindeki büyüklük sırası artışı için önemli bir itici güç haline gelecektir. Ayrıca, yüksek performanslı endüstriyel IoT uygulamaları, garantili kullanılabilirlik ve güvenilirliğe ihtiyaç duyarken, deterministik gecikme ve titreşim açısından zorlu gereksinimler getirecektir. Bu tür kullanım durumları, 6G'de belirleyici bir özellik olacak ve çeşitli performansı da destekleyecektir [3].

b) Bilginin Yayılması

Mobil endüstri, insanların hayatını derinden etkiledi, dijital uçurumun azaltılmasına yardımcı oldu ve toplumun genel üretkenliğine ve ekonomik büyümesine önemli ölçüde katkıda bulundu. Bu eğilim 2030 ve sonrasında da devam edecek. Özellikle, büyük makine öğrenimi (ML), kaba kuvvet bilgi işlem ve büyük veri analitiği tarafından desteklenen yaygın zeka, gelecekte iş ve ekonomik modellerin temel sağlayıcısı haline geldikçe [6], radyo teknolojisi ve ağ mimarisindeki paradigma değişiklikleri Şekil 2'de gösterildiği gibi aşağıdaki dört kritik faktör tarafından yönlendirilecektir.



Şekil 2. Bilginin yaygınlaşmasıyla yönlendirilen 6G özellikleri [3]

- **Yerel Veri Koruması:** 6G ağının ve verilerinin her alanında gizliliğin korunması esas olacaktır. İnsan veya makine olabilecek kullanıcıların, kontrol ve operasyon haklarına sahip veri sahipleri olarak yetkilendirilmeleri beklenmektedir. Aynı zamanda, 6G'nin tasarımı gizliliği garanti etmeli, veri konularının uygun haklarını sağlamalı, veri kontrolünü ve işlemeyi sağlamalı ve gelecekte teknoloji tasarımı ve kullanımı için temel yönergeler oluşturmak üzere Genel Veri Koruma Yönetmeliği gibi politikaları desteklemelidir [3].
- **Yerel güvenilirlik:** Çok çeşitli kullanım durumlarını ve pazarları desteklemek için özelleştirilmiş, doğrulanabilir ve ölçülebilir güvenilirliğe sahip olmak çok önemlidir. Günümüzün nomotetik ağ mülkiyeti ve işletimi, tek taraflı bir model yerine kapsayıcı bir çok taraflı güven modelinin hayati önem taşıyacağı çok partili, çok oyunculu ve çok aktörlü bir modele dönüşecektir. Gelecek odaklı olmanın yanı sıra, güvenilirlik mimarisi güvenlik, mahremiyet, esneklik, güvenlik ve güvenilirliği içermelidir [7].

c) **Sürdürülebilirlik ve Sosyal Sorumluluk**

Mobil sistemlerde bir arada bulunan çok sayıda teknoloji ve spektrum konuşlandırması ve üstte çalışan giderek artan heterojen hizmetler ile, 6G yeniliklerinin sürdürülebilir gelişimi için yüksek talep var. 6G ağlarını ve hizmetlerini dağıtmanın, çalıştırmanın, izlemenin ve yönetmenin maliyet ve enerji açısından verimli, kolay ve otomatik olması beklenmektedir. Ayrıca 6G, bir bütün olarak toplumun sürdürülebilir kalkınma hedeflerine (SDG'ler) [8] ulaşmasını kolaylaştırıcı olmalıdır.

d) **Genel Vizyon ve Yetenekler**

Daha gelişmiş bir yeni nesil mobil iletişim sistemi olan 6G, iletişimin çok ötesine geçecek. Önümüzdeki on yılda, sürekli kablosuz yeniliklere ek olarak, daha fazla teknoloji atılımını besleyen bir sistem olacaktır. Ortaya çıkan 6G, hem ekonomi hem de toplum açısından oyunun kurallarını değiştirecek — Gelecekteki Her Şeyin Zekası için sağlam bir temel oluşturacaktır.

6G'nin bağlantılı insanlardan ve nesnelerden bağlantılı zekaya dönüşümü sağlayacağını öngörüyoruz. Önceki ile karşılaştırıldığında 6G, olağanüstü performans sunacak ve temel performans göstergeleri açısından önemli iyileştirmeler

gerçekleştirecektir. Ayrıca, tüm dikey işletmelerin tam ölçekli dijital dönüşümünü gerçekleştirmede önemli bir kolaylaştırıcı olacaktır. Daha da önemlisi, 6G'nin entegre algılama, iletişim ve bilgi işlem yeteneklerine sahip bağlantılar sağlayan dağıtılmış bir sinir ağı olarak hizmet edeceğine inanıyoruz. Bu, fiziksel, biyolojik ve siber dünyaları birleştirecek ve her şeyin gerçekten hissedileceği, bağlantılı ve akıllı olacağı bir çağı başlatacaktır [3].

6G siber dünyadan fiziksel dünyaya - bu tipik bir aşağı bağlantı kanalıdır - birincil hizmet, dokunsal iletişim ve yeni insan-makine arayüzü ile geliştirilmiş, dijital dünya ile etkileşimde sürükleyici bir deneyim yaratan her türlü XR olacaktır. Bu arada, dijital dünyadaki sürekli derin öğrenme, fiziksel dünya için yapay zeka motoru görevi görerek her türlü karar vermeyi kolaylaştırmak için gerçek zamanlı çıkarımlar sağlar. Bu, radyo arayüzü tasarımında son derece yüksek verim ve ultra düşük gecikme süresi gerektiren büyük zorluklar getirmektedir. İkincisi, fiziksel dünyadan siber dünyaya - bu tipik bir yukarı bağlantı kanalıdır - birincil uygulama, makine öğrenimi için büyük verilerin algılanması ve toplanmasıdır. Devasa makine öğrenimi için büyük miktarda verinin (veya sinir ağlarındaki model parametrelerinin) nasıl sıkıştırılacağı ve iletileceği yeni bir zorluk teşkil etmektedir. 6G, veri merkezlerinin sinir merkezleri haline geleceği ve makine öğrenimi görevlerinin sinir merkezinden derin sinir kenarlarına (örneğin, baz istasyonları ve hatta mobil cihazlar) kadar tüm ağa yayılacağı bir sensörler ve makine öğrenimi ağı olacaktır [3].

6G, ne bir eklenti ne de üst düzey bir özellik olmayan yerel bir yapay zeka yeteneğine sahip olacaktır. 6G'nin birincil hedeflerinden biri, yapay zekayı her yerde desteklemektir. 6G, iletişim, bilgi ve veri teknolojilerini derinden bütünleştiren yerel bir akıllı mimari olarak işlev görmektedir. Endüstri zekasının yanı sıra kablosuz ağlarda, büyük ölçekli dağıtılmış eğitim, gerçek zamanlı kenar çıkarımı ve yerel veri duyarsızlaştırma ile her tür yapay zeka uygulamasına hizmet eder. Bu vizyona ulaşmak için üç temel zorluğu ele almak gerekmektedir.

- 6G her biri gelecekteki çalışma için hem iletişim hem de hesaplama için minimum maliyetin nasıl gerçekleştirileceği açısından yeni zorluklar sunmaktadır. İletişim maliyetlerini en aza indirmek için, minimum kapasite kaynakları kullanarak yapay zeka eğitimi için devasa büyük verileri aktarabilen bir 6G sistemi tasarlamak

gerekmektedir. Bilgi işlem maliyetlerini en aza indirmek için, mobil uç bilgi işlem den en iyi şekilde yararlanabileceğimiz ağlarda optimum şekilde dağıtılmış bilgi işlem uygulamak gerekmektedir.

- 6G'nin fiziksel dünyadan (şu anda olduğundan milyonlarca kat daha fazla veri) büyük miktarda veri toplanmasını sağlaması gerekecek, böylece bir siber dünya yaratılabilecektir. Ancak bu, 6G için başka bir büyük zorluk teşkil etmektedir. Bu nedenle, bilgi ve öğrenme teorisine dayalı eğitim verilerinin nasıl etkili bir şekilde sıkıştırılacağı, 6G araştırmasında yeni ve önemli bir konu haline gelmektedir.

- Verimli ve dağıtılmış bir işbirlikçi öğrenme mimarisi, hesaplama yükünü azaltmak için hayati olacaktır. Yapay zeka için veri ayırma ve model ayırma, 6G ağ mimarisine dahil edilecektir. Ayrıca, dağıtılmış ve birleştirilmiş öğrenmeden yararlanmak, bilgi işlem kaynaklarını, yerel öğrenmeyi ve küresel öğrenmeyi optimize etmeye ve yeni veri yerel yönetim gereksinimlerini karşılamaya yardımcı olacaktır. Bu anlamda, 6G çekirdek ağ işlevleri derin uç bir ağa doğru itilirken, bulut tabanlı yazılım işlemleri devasa makine öğrenimine doğru kayacaktır. Ek olarak, derin uçlardan (cihazlardan) büyük miktarda veri ve modelin sık sık aktarılmasıyla, 6G radyo erişim ağı (RAN), aşağı bağlantı merkezli den yukarı bağlantı merkezli ye geçecektir [3].

6G, ağ bağlantılı algılama özelliğine sahip olacaktır. Gelecekteki 6G sistemlerinde daha yüksek frekans bantları (mmWave'den THz'e kadar), daha geniş bant genişliği ve büyük anten dizilerinin daha yoğun dağıtımı, tek bir sistemin her biri diğerini karşılıklı olarak geliştiren kablosuz sinyal algılama ve iletişimi entegre etmesini sağlayacaktır. Bir bütün olarak iletişim sistemi, fiziksel dünyayı algılamak ve daha iyi anlamak için radyo dalgası iletimini, yansımaları ve saçılmasını araştıran bir sensör görevi görebilir ve sonuçta geniş bir yelpazede yeni hizmetler sağlayabilir. Ayrıca, 6G için temel bir özellik olarak algılama, fiziksel ve biyolojik dünyaları siber dünyayla gözlemleyen, örnekleyen ve birbirine bağlayan "yeni bir kanal"dır. Algılama işlevselliği sağlamaya yönelik geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, 6G ağındaki entegre algılama ve iletişim tasarımının iki hedefi ve potansiyel faydaları vardır: ek algılama ekipmanının maliyetini önemli ölçüde azaltmak ve gelişmiş algılama performansı için yaygın olarak konuşlandırılmış baz istasyonları ve kullanıcı cihazları arasındaki büyük ölçekli işbirliğinden yararlanmaktır.

6G, evrensel yüksek performanslı kablosuz bağlantılar ve optik fiberle karşılaştırılabilir hızlarda nihai deneyim sağlayacaktır. Tbit/s'ye varan tepe hızı, 100 Gbit/s deneyimli hız, 10 milisaniye altı gecikme süresi, 5G bağlantılarının yoğunluğunda on kat artış, santimetre düzeyinde yerelleştirme, milimetre düzeyinde görüntüleme ve kontrol edilebilir hata dağılımına dayalı sistem güvenilirliği, yalnızca gelecekte insan merkezli sürükleyici hizmetler, aynı zamanda dikey endüstrilerin tam ölçekli dijital dönüşümünü ve üretkenlik yükseltmesini hızlandırmaktadır.

Kablosuz trafiğindeki artış, genellikle daha yüksek frekansla gelen daha geniş spektrum ihtiyacını artırırken, mobil iletişim sistemi altyapısı, her yerde kapsama alanı için daha düşük frekans spektrumunu tercih etmektedir. Birkaç nesil kablosuz evrimden sonra, ağ yükseltmeleri için giderek daha fazla yeni frekans bandı dağıtılmaktadır. 6G, yalnızca milimetre dalga (mmWave) spektrumunu değil, aynı zamanda THz'yi (Terahertz (THz)) ve hatta görünür ışık spektrumunu da kullanacak ve potansiyel olarak en üst düzeyde bağlantı sağlamak için tüm spektrumu ilk kez kullanacaktır.

THz iletişimi, çok sayıda zorluk içeren yeni bir kablosuz teknolojidir. Araştırma şu anda yüksek güçlü cihazların tasarımı, antenler için yeni malzemeleri, radyo frekanslı güç transistörlerini, kalıp mimarisinde THz alıcı-vericiyi, kanal modellemeyi ve dizi sinyal işlemeyi araştırıyor [9]. THz teknolojisinin 6G'de başarılı bir şekilde benimsenip benimsenmediği, elektronik, fotonik ve hibrit alıcı-vericiler ve kalıp üstü anten dizileri gibi THz ile ilgili bileşenlerdeki mühendislik atılımlarına bağlıdır. Görünür ışık yoluyla iletişim, elektromanyetik alan (EMF) olmadan bağlantı sağlayan potansiyel radyasyonsuz bir iletim teknolojisidir. Bununla birlikte, düşük güç tüketimi, küçük form faktörleri ve düşük maliyetli cihazlarla kısa mesafeli iletişim için onlarca Tbit/sn'ye ulaşan veri hızlarına ulaşmak için büyük ölçekli bir mikro LED dizisi teknolojisi gerekecektir. Ek olarak, görünür ışık iletişimi (VLC) [10] büyük miktarlarda lisanssız spektruma erişebilir, ancak VLC'nin 6G'de başarılı bir şekilde kullanılabilmesi için yer-uydu bağı iletimi, mobilite yönetimi ve yüksek performanslı alıcı-vericiler açısından çeşitli zorlukların üstesinden gelinmesi gerekmektedir.

6G, bağlantısız ağırları birbirine bağlayarak dünya çapında tam kapsama sağlamak için karasal ağırları ve karasal olmayan ağırları (NTN'ler) entegre edecektir.

Uydu üretme ve fırlatma maliyeti düştükçe, NTN'lerde alçak veya çok alçak yörüngeli (LEO/VLEO) uydulardan oluşan devasa filolar gerçeğe dönüşecektir.

Uydu iletişimine ek olarak, dronlar, insansız hava araçları (İHA'lar) ve yüksek irtifa platform istasyonları (HAPS'ler) gibi yeni radyo düğümleri, mobil terminaller veya geçici altyapı düğümleri olarak işlev görerek 6G'nin ayrılmaz bir parçası olacaktır. Hem karasal hem de karasal olmayan ağları entegre ederek 6G, öncekilerden ayrı duracaktır [3].

- **Yerel güvenilirlik:** 6G ağı, iletişim, algılama, bilgi işlem ve zeka gibi çeşitli yetenekleri entegre ederek ağ mimarisini yeniden tanımlamayı gerekli kılacaktır. Yeni ağ mimarisi, güvenilirliğin yerel bir özellik olarak garanti edilmesi gereken yapay zeka uygulamalarını büyük ölçekte çoğaltmak için işbirlikçi algılama ve dağıtılmış öğrenme gibi görevlere esnek bir şekilde uyarlanabilmelidir. Buradaki "güvenilirlik" kavramı, güvenlik, gizlilik, dayanıklılık, emniyet ve güvenilirlik gibi konuları kapsamaktadır [7].
- **Dengeli güvenlik:** Farklı korunan varlıklar veya mülkler, farklı senaryolara bağlı olarak bütünlüğün, gizliliğin ve kullanılabilirliğin her yönünde farklı bir koruma düzeyi veya farklı ağırlık gerektirebilir.
- **Kalıcı gizlilik koruması:** Kullanıcıların kimliği ve davranışları, yalnızca kullanıcılar tarafından yetkilendirilen tarafların aralarında aktarılan bilgilerin içeriğini yorumlayabilmesi için korunmaktadır.
- **Akıllı esneklik:** Operasyonlar çeşitli hatalar ve zorluklarla karşı karşıya kalırken kabul edilebilir bir hizmet düzeyi sağlamak ve sürdürmek için, riskleri belirlemek ve ardından riskleri önlemek veya aktarmak için durum farkındalığı ve büyük veri analitiğinden yararlanılmaktadır. Bu mümkün değilse, sonuçlar kontrol edilmeli ve sadece zararsız kalan riskler kabul edilmelidir [3].

e) **Sürdürülebilirlik**

Yeşil ve sürdürülebilir kalkınma, 6G'deki ağ ve terminal tasarımlarının temel gereksinimi ve nihai hedefidir. 6G, yeşil tasarım konseptini ve yerel yapay zeka yeteneğini tanıtarak ağ genelinde genel enerji verimliliğini (Joule başına bit olarak tanımlanır) 100 kat iyileştirmeyi ve toplam enerji tüketimini (Joule cinsinden) 5G'nin

altında tutmayı ve aynı zamanda optimum hizmet performansı ve deneyimi sağlamayı hedeflemektedir. Dijital ekonominin temel altyapısı olan 6G, insanlığın sürdürülebilir gelişimine benzersiz katkılar yapmak zorunda kalacaktır.



2. KULLANIM DURUMLARI VE GEREKSİNİM

6G'nin yaşam döngüsü içinde yeni teknolojiler kablosuz iletişim sistemlerinde daha yaygın bir şekilde benimsendikçe, günlük hayatımızın birçok yönü ultra yüksek hızlı ve ultra güvenilir kablosuz bağlantılar, yerel yapay zeka ve gelişmiş algılama teknolojileri ile zenginleştirilecektir.

- **5. Seviye Otonom araçlar:** Teknik gereklilikler açısından otonom sürüş, akıllı ulaşımın en zorlu kullanım durumudur. Otonom araçların başlangıç seviyesi (tipik olarak madencilik, taş ocağı işletmeciliği, inşaat ve tarım gibi senaryolarda kullanılır), uzaktan insan sürüşü ve teleoperasyon gerektirmektedir. Seviye 5 otonom araçlar, araba ile seyahat etmenin anlamını yeniden tanımlayacak olan daha gelişmiş bir kullanım durumudur. Otonom araçlar, sürüşü ve rota planlamayı tamamen devraldığından, bu tür araçlardaki yolculuklar, özel alan avantajını korurken dinlendirici, keyifli ve verimli olabilecektir. Öngörülemeyen durumlarla başa çıkmak için 6G'nin sağladığı algılama ve yapay zeka yeteneklerinin yanı sıra ultra düşük gecikme süresi, yüksek güvenilirlik ve hassas yerelleştirme çok önemli olacaktır.

- **Akıllı binalar:** Akıllı bina, elektronik ürünler, akıllı malzemeler, kontrol sistemleri ve kullanıcılar dahil olmak üzere ilgili taraflar arasında kesintisiz bilgi akışı sağlayan akıllı varlıklar olarak bir binanın yönetilmesi ve kontrol edilmesi anlamına gelmektedir. Entegrasyon, bir binayı akıllı hale getirmenin ilk adımıdır. Karmaşık bir ekosistem olarak, bir bina güvenlik kameraları, asansör kontrolü, klima ve elektrik enerjisi gibi birçok farklı alt sistem içerebilir. 6G'nin akıllı bina endüstrisinde kullanılması, yüksek verimliliğe ve zekaya sahip ortak bir altyapının kurulmasını sağlamalıdır. Ek olarak, akıllı bir binaya kurulan çok sayıda sensör nedeniyle, bunların büyük ölçekli bağlantıyı ve düşük enerji tüketimini desteklemesi gerekecektir. İkinci adım, binaları birbirine bağlamaktır. Gelecekte mobil iletişim altyapısı, platformlar arası güvenilirlik için dijital temeli sağlayacaktır.

- **Akıllı sağlık:** Coğrafi kısıtlamalardan bağımsız, yaygın ve özelleştirilmiş sağlık hizmetleri, gelecekte akıllı sağlık hizmetleri vizyonudur. Mobil iletişim sistemi geliştikçe, kişisel sağlığın dinamik olarak izlenmesi, tele teşhis ve patoloji çıkarımı, holografik tıp ve iyileşme eğitimi ve tele cerrahi dahil olmak üzere çeşitli yeni kullanım durumlarının ortaya çıkmasına olanak sağlayacaktır. Özellikle 6G'deki yeni algılama ve

yapay zeka yetenekleriyle, hasta verileri üzerinde gerçek zamanlı analiz son derece faydalı olabilir. Ayrıca, teletanı ve telecerrahi gibi kullanım örnekleri, özellikle yeterli tıbbi kaynağa sahip olmayan bölgelerde, yaşanan bir toplumdaki baskıyı önemli ölçüde azaltacaktır.

- **Geniş kapsamlı IoT hizmetleri:** 6G'nin küresel kesintisiz kapsama alanından önemli ölçüde yararlanacak bir başka alan da geniş kapsamlı IoT hizmetleridir. Örneğin, 6G, okyanus taşımacılığı sırasında konteyner durumunu bildirmek için okyanuslardaki şamandıralardan veya doğal afetleri zamanında tahmin etmek ve önlemek için ormanlardaki veya çöllerdeki sensörlerden bilgi toplanmasını sağlayabilir. Geniş kapsamlı IoT hizmetleri, dünyayı daha iyi korumak için bu tür bağlantısız konumlara genişletilecektir.

- **Yeni Spektrum:** Birincil kaynak olarak spektrum, kablosuz iletişim teknolojisinin her nesli için ana düşüncedir - daha yüksek veri hızlarını desteklemek için daha fazla spektrum gerekir. Mobil iletişim teknolojileri yeni nesillere evrilirken, spektrum kullanımı daha yüksek frekans bantlarına doğru genişlemeye devam ediyor. 5G, mmWave frekans bantlarını ilk kullanan olurken, 6G'nin (sub-) THz gibi daha da yüksek frekans bantlarını keşfetmesi beklenmektedir.

- **Yeni cihazlar:** Son 20 yılda özellikle telefonların yerini alan akıllı telefonlar gibi mobil cihazların bir sonraki devriminin 6G çağında gerçekleşmesi beklenmektedir. Gelecekteki cihazların, 6G iletişim sistemi tarafından etkinleştirilen algılama ve görüntüleme, dokunsal iletişim, holografik görüntüleme ve yapay zeka gibi yeni yetenekleri benimsemesi beklenmektedir.

- **Daha akıllı:** Bu, yalnızca akıllı telefonları daha akıllı hale getirmeyi değil, aynı zamanda her şeyi otomatikleştirmek için gerçeklikleri artırmayı ifade etmektedir. Ayrıca, hizmet deneyimimizi ve üretkenliğimizi iyileştirerek hayatımızın daha fazla yönünü otomatikleştirecektir.

- **Çeşitlendirilmiş:** Bu, yalnızca akıllı telefonları değil, aynı zamanda sensörler ve işleticiler olarak işlev gören çeşitli cihaz türlerini de ifade etmektedir. Gelecekte, giyilebilir cihazlar, vücuda yerleştirilebilir tıbbi cihazlar, otomobiller, robotlar ve kobotlar ve akıllı fabrika ekipmanları gibi gelişmiş sensörleri, yeni ekran teknolojilerini

ve yapay zekayı entegre eden çok çeşitli insan merkezli ve endüstriyel cihazlar ortaya çıkacaktır.

- **Bulutlu:** Bu, yalnızca fiziksel cihazları değil, aynı zamanda gizliliğin korunmasını ve yeni iş modellerini etkinleştiren sanal cihazları da ifade etmektedir. Gelecekte, her 6G cihazının bulutta proxy görevi gören sanal bir karşılığı olacaktır. Bu tür cihazlar halka açık yerlerde paylaşılır ve talep üzerine kullanılmaktadır. Buluttaki sanal cihazlar ile kullanıcılar, paylaşılan cihazlar aracılığıyla istedikleri hizmetlere her zaman ve her yerden erişebilirler. Cihazlara ek olarak, onlarla insanlar arasındaki arayüzler de gelişecektir.

1G'den 5G'ye mobil iletişim endüstrisi nispeten olgunlaştı ve büyümesi önemli ölçüde yavaşladı. Birleşik standartlar, ölçek ekonomilerine ulaşmak için her zamankinden daha önemli hale geldi. 4G ve 5G'de olduğu gibi, 6G'nin başarılı olmasını sağlamak, endüstri, akademik ve ekosistem oyuncularının birlikte çalışmasını gerektirir.

BÖLÜM 2

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ

Gezegendeki tüm doğal yaşamın bir parçası olan moleküler iletişim araçlarını hesaba katmayan VLC'ler, belki de insanlık tarafından bilinen en eski iletişim araçlarıdır. İnsanlık tarihinin ilk günlerinden beri ışık, temel bir iletişim aracı olarak hizmet etmiştir. Örneğin kabileler arasında iletişim kurmak için ateş sinyallerinin kullanılması, gemiden gemiye iletişim için yansıyan güneş ışığının kullanımı; her ikisi de eski Yunanlılar tarafından kullanılan iletişim araçlarıdır. Uzun menzilli iletişim için, yüksek noktalara yerleştirilen ateş fenerleri, mesajları iletmek için bir noktadan diğerine yakıldı. Ayrıca, eski Çinliler, Çin Seddi boyunca ordu birimleri arasındaki düşman hareketleri hakkında bilgi iletmek için duman sinyalleri kullandılar. Dikkat çekici bir şekilde, VLC, 1880'de Alexander Graham Bell tarafından fotofonuyla daha gelişmiş teknolojik toplumda önerildi. Bu cihaz, konuşmanın neden olduğu titreşimle güneş ışığını modüle edebildi ve modüle edilmiş ışığı istenen bir alıcıya iletti. VLC'deki gerçek ilerlemeler, 1927'de Rus bilim adamı Oleg Losev tarafından elektroışıma ve LED'in keşfiyle geldi. Tesadüfen Losev, elektroışıma cihazlarının iletişim cihazları olarak uygulamalarını öngördü [11]. Elektromanyetik radyasyona dayalı kablosuz radyo, son on yılda baskın iletişim teknolojisi olarak kurulmuştur. IR ışınlarına dayalı OWC, ilk olarak 1979'da Gfeller ve Bapst tarafından önerildi. OWC ile ilgili mevcut araştırma eğilimleri, UV'den spektrumun görünür kısmına ve spektrumun yakın IR bölgelerinde sona eren bir dizi farklı dalga boyuna odaklanmaktadır. OWC, kablosuz RF sistemlerine kıyasla eşi görülmemiş bant genişlikleri, spektrum düzenlemesinde özgürlük ve doğası gereği güvenli iletişim bağlantıları sunmaktadır. OWC ile ilgili araştırma faaliyetleri arasında, yeni tasarım konseptlerini ve tekniklerini teşvik etmek için kablosuz RF sistemleriyle birleştirilmesi özellikle VLC'yi çekici hale getirmiştir. VLC sistemleri, birçok uygulamada genel aydınlatma için LED'lerin artan kullanımı nedeniyle şu anda dikkat çekmektedir. Daha uzun ömür, daha iyi kontrol edilebilirlik ve enerji verimliliği gibi özellikleriyle, gelecekte dünya çapında geleneksel aydınlatma

cihazlarının yerini alan LED'lere dayalı olacaktır. LED'lerin benzersiz özelliği, aynı anda aydınlatma ve iletişim gibi hayal edilemez sonuçlarla kullanılabilmesidir [11].

Mevcut araştırma eğilimleri, bu çift LED işlevselliğini keşfederek yüksek veri hızlı iletişim (7 Gbps'nin üzerindeki veri hızlarına sahip bağlantılar) elde etmenin fizibilitesini göstermiştir. Bu performans dönüm noktasına ulaşmak için, örneğin optik ayrık çok tonlu modülasyonların kullanımı gibi, güç LED'lerinin yavaş yanıtını azaltmak için çeşitli yöntemler benimsenmiştir. Aslında, aydınlatma için kullanılan güç LED'leri, IR LED'lere ve lazer diyotlara kıyasla daha yüksek ileri akımlarla sürülür, bu da onları yavaşlatır. Ayrıca, çoğu güç LED'i, mavi ışığı görünür ışığa dönüştürmek için sarı bir fosfor kaplama kullanır ve bu da cihazın yanıtını daha da yavaşlatmaktadır. VLC sistemlerinin bir başka ilginç özelliği de uzaysal sınırlamalarıdır. İç mekan senaryolarında kullanıldığında, duvarlardan radyasyon geçmediği için iletişim aralığı oda boyutuyla sınırlıdır. Bu durum, sistemleri güvenli ve potansiyel olarak gizlice dinlemeye karşı korur. Mekansal sınırlama, farklı ışık kaynaklarının farklı veriler taşıdığı, ancak artan sistem karmaşıklığı pahasına çok kullanıcı senaryolarında da keşfedilebilir.

Günümüzde aydınlatma sistemlerinin kullanım amacı çeşitlilik göstermektedir [12, 13]. Aydınlatma sistemlerini üç küresel sınıfa ayırmak mümkündür: iç mekan aydınlatması, dış mekan aydınlatması ve sinyalizasyon [14]. Bu sınıfların her birinin kendine has özellikleri vardır. İç mekan aydınlatması ofislerde, evlerde ve kamusal alanlarda kullanılmaktadır. İç mekanlarda aydınlatmanın amacı, mekanın amacına bağlı olarak farklı işlevler için farklı kurallarla çeşitlilik göstermektedir. Çalışma alanlarında, yeterli konfor ve görünürlük koşullarının sağlanması önemlidir, dolayısıyla alanın özelliklerine (ofisler, hastaneler, yoğun çalışma yerleri, diğerleri arasında) bağlı olarak farklı kurallar uygulanmaktadır. Kamusal alanlarda ve evlerde ışığın hem konforu hem de dekoratif yönü önemli bir rol oynamaktadır. Dış aydınlatma ise kamu güvenliği ve emniyeti ile daha iyi görünürlük gibi farklı amaçlara hizmet etmektedir. Dış mekan aydınlatması için, farklı yol koşulları, aydınlatma cihazları türleri ve minimum ışık seviyeleri için geçerli olan farklı aydınlatma sınıflarına göre düzenlenmiş katı kuralları vardır. Trafik kontrolü, araçlardaki sinyal lambaları ve hatta deniz fenerleri gibi

sinyalizasyon sistemleri, karayolu sürücüleri, yaya güvenliği ve deniz navigasyonu için belirli bir amaca hizmet eder [11].

LED'lerin uzun kullanım süresine sahipliği ve daha az güç harcamaları varolan ışık kaynaklarına göre avantaj elde etmektedir. Aydınlatma ve iletişimin bir arada kullanılması VLC'nin geniş alan kullanımına sahip olmasına sebep olmaktadır. Görünür ışık iletişim yapısını diğer teknolojilerden ayıran niteliği haberleşme ve aydınlatma olarak çift işlevli kullanım avantajı sağlayabilmesidir. Ayrıca sinyal yapısı Radyo Frekans (RF) haberleşmesinden ayırt edicidir ve RF ile karşılaştırıldığında insan sağlığına daha düşük zararı olmaktadır. Karşılaştırmalar doğrultusunda görünür ışık ile teknolojisini gelecek nesil iletişim sistemleri ve ağ iletimi için avantajlı ve faydalı bir kullanım ve geliştirme alanı olarak görülmektedir. Teknoloji sistem yapısında; Gb/s hızında yayın gerçekleştirirken veri göndermenin aydınlatma işlevi üzerindeki tesirinin yok edilmesini amaçlamak, farklı ortamlarda etkin karatma kontrol yöntemlerini ile aydınlatma derecesini standart yapılara daha kullanılabilir şekilde ayarlamak, karatma tekniğini modülasyon yapıları ile uyumlu hale gelerek çalışma işlevini amaçlamak, mobilite yönetimini elde etmek, iletimde çok yollu kanal karakteristikleri problemini yok etmek, çift fonksiyonlu iletişimi amaçlamak, bazı sorunları olarak sayılabilmektedir. Ek olarak dış mekan iletişim yapısı, sistemin daha güvenli olması, kanal kodlama yapıları, ağ iletiminde kapsama alanı problemleri de mevcuttur [11].

Günümüzde özellikle kablosuz veri iletiminde çevreye daha duyarlı, insan sağlığına daha zararsız metodları içeren daha emniyetli teknolojilerin kullanımı önem kazanmaktadır. Hayatımızın sürdürülebilirliği için gözardı edilemez bir parçası haline gelen ışığın, haberleşme sisteminin esas yapısı haline gelmesi; yenilikçi, maliyet ve enerji etkin, güvenli ve ticari manada kullanılması henüz yaygın olmayan bir yeşil iletişimin meydana gelmesi anlamı çıkarılmaktadır.

Aydınlatma ve haberleşmenin aynı zamanda olması Görünür Işık ile iletişimi ışık yapılarını örneğin LED'leri RF vericilerin yerine kullanan bir teknolojidir ve kızılötesi (Infrared (IR)) haberleşmeye kıyasla daha çok tercih edilmektedir. VLC, RF ve IR teknolojilerinin karşılaştırılması Tablo 1'de gösterilmektedir. Gelecekte hem akademik ve hem de sanayi alanında yükselen önemi bu yeni tasarımlı teknoloji şuanda

kısa mesafe haberleşmesinde çift fonksiyonlu kullanım alanı sağlaması amacıyla ve aydınlatma sistemine basitçe entegre edilebilmektedir [15]

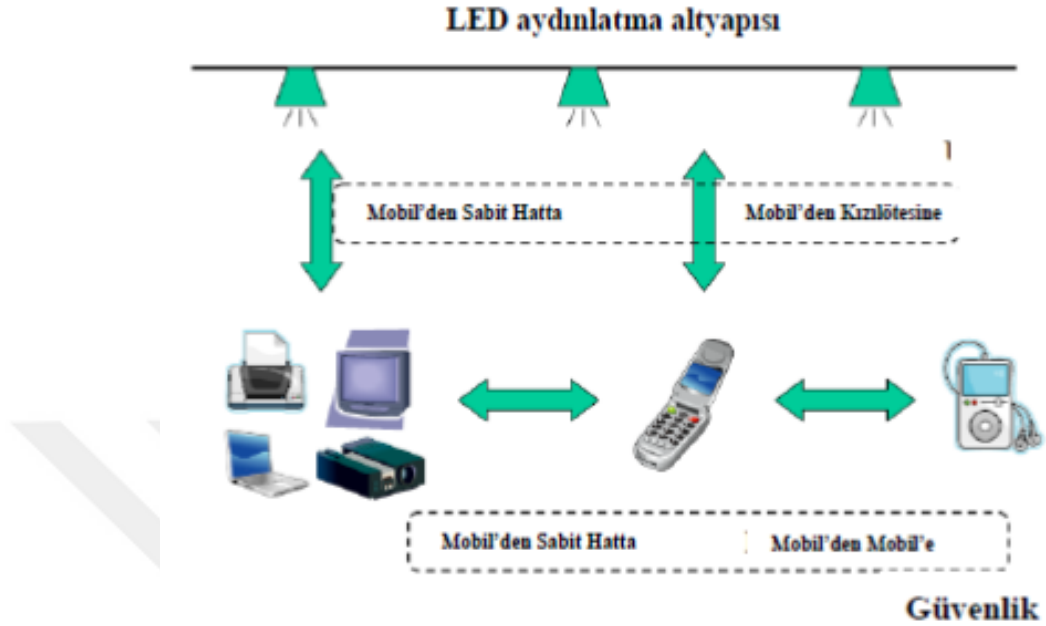
Tablo 1: VLC, RF VE IR teknolojilerinin karşılaştırılması

Özellik	VLC	RF	IR
Bant Genişliği	Sınırsız 400nm-700nm	BW sınırlı-az	~200 THz
Elektromanyetik Girişimi	-----	Evet-Yüksek	-----
Los-Görüş açısı	✓	-----	✓
Hizmet	Aydınlatma-İletişim	İletişim	İletişim
Kapsama Alanı	Dar	Geniş	Dar
Hareketli Yapısı	Kısıtlı	İyi	Kısıtlı
Güç Harcaması	Daha az	Orta	Daha az

VLC etkin olarak yüksek veri hızı potansiyeline sahip, sağlığa zararı hiç yok denilecek kadar az olması, güvenli, maliyet etkin, kolay erişime sahip olması, hemen hemen sonsuz bantgenişliği avantajına sahip olması, özgür ve henüz düzenlenme yapılmamış kanal yapısı olan, işaret izolasyon niteliğine sahip, elektromanyetik ışıma yapmayan, Elektromanyetik Girişim veya Radyo Frekans Girişimi (EMI/RFI)’ne sebep vermeyen, veri göndermede düşük güç tüketen yeni iletişim teknolojisidir. Ek olarak iletişim için radyo dalgalarını yapısına dahil eden Kablosuz Bağlantı Alanı (Wi-Fi), Bluetooth, Mikrodalga Erişim İçin Dünya Geneline Birlikte Çalışabilirlik (Wimax) vs. gibi farklı varolan kablosuz iletişim teknolojileriyle kıyaslandığında, kanal yapıları üzerinde en son kullanıcılarının karartma kontrolü ile tatminkar bir işlevinin ortaya çıkması ek avantajlardandır. [15].

Bu dönemde, evlerde ve iş yerlerinde artan hızda iletişim ve ticarete yüksek değerli doğruluk ve güvenilirlikte iç mekan konumlandırma, trafik ışık sistemlerinden araca data iletme, D/L internet erişimi, araçtan araca teknolojisi, mobil cihazların kendi aralarında veri gönderme ve bilgi ekranı ile iletişim ve iç mekanlarda mobil sistemlerin yerleştirilmesi ve konumlandırılmasında daha az veri hızı vb. uygulamalarda ve cihaz tamirinde VLC kullanımına dair bir takım araştırmalar mevcut olup, yakın bir

zamanda VLC'nin daha hızlı ve kolay olarak bu alanda kullanımı sağlanabilecektir [16]. Şekil 3'te VLC iç mekan uygulamalarının örneği gösterilmektedir.



Şekil 3: VLC iç mekan uygulamaları [15], [17].

VLC henüz çok yeni başlangıç seviyesinde olan bir iletişim yapısıdır ve bu gelecek nesil iletişim yapısının pazara girişi istenenden çok daha düşük hızda ilerlemektedir. Sadece örnek kullanımları; iç mekanlarda ağ haberleşmesi ve lokasyon merkezli servisler, ticarete kullanımları ise; trafik sistemlerin akıllı yönetimi, eğlence amacıyla uçak içerisinde yer alması ve su altı iletişimindeki kullanımlarıdır. VLC'nin yakın zamanda kullanılmasının istenildiği alanları; internet veya veri yapıları üzerinden ses veri işaretleri transfer edilmesi, akıcı görüntü ve iletimi, ağ iletişimine bağlı depolama, ethernet üzerinden besleme (PoE), makinalar arası iletişim (M2M), ağ haberleşmesinde kablosuz sensör, gerçek zamanlı bantgenişliği yoğunluklu kullanımı, artırılmış gerçeklik ve aynı vakitte her yerde mevcut olan ağ haberleşmesidir [15], [18].

Bunların sonucunda, VLC'de aydınlatma ve iletişim sorunlarını çözüme kavuşturmak, varolan yapay aydınlatmadan değişik olarak çevreye karşı daha hassas ve duyarlı yapılar oluşturmak için, VLC sistemlerini frekans yayılım profilleri ve optimum spektral ile ilerletmek varolan bir çözme yöntemi olarak ele alınmaktadır. Fakat ilk

başta, sistemin varolan önemli görülen teknik problemlerini, düzenleme ile ilgili zorluklarını gelecek zamanda, bu iletişim teknolojisinin yaygın olarak kullanımının başlamadan önce çözüme kavuşturulması önemli hale gelmektedir.

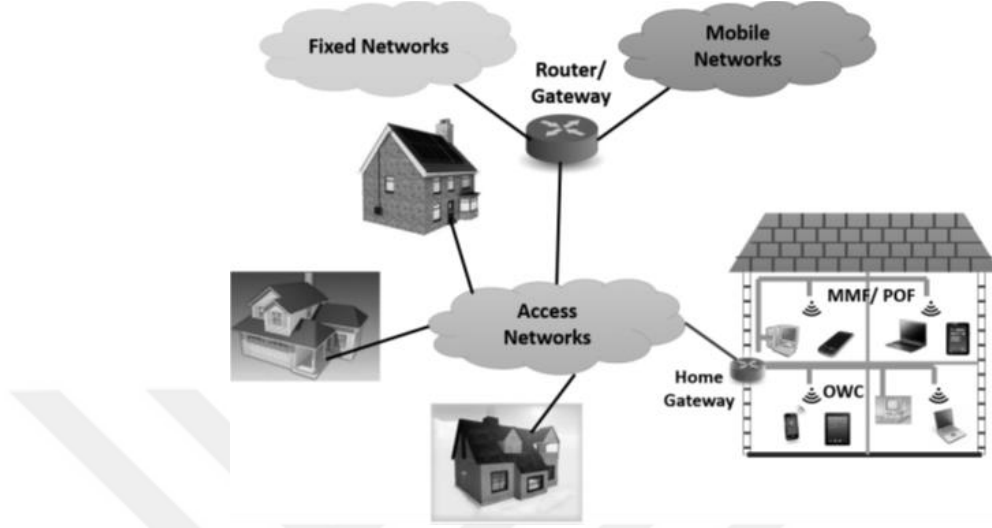
Bu tezde LED ve modülasyon tabanlı enerji verimli görünür ışıkla haberleşme sistemleri ile ilgili olarak yapılan çalışmalar aktarılmıştır. Geleneksel ışık kaynakları ve LED ışık sistem kaynakları ile yapılan VLC uygulamaları araştırılarak, iletişim teknikleri kısa olarak anlatılmıştır. Yüksek veri hızı sunan, gelecek nesil LED sistemlerinin avantajları gösterilerek, yapısındaki sorunlar üzerine tartışılmıştır. Sistemin standartlarla tanımlanan fiziksel katmanları, güç optimizasyonu ile veri hızını Gb/s seviyesine çıkarmak için çözümlenmesi gereken süreçler aktarılmış ve uygulanan modülasyon teknikleri tanıtılmıştır. Enerji verimliliğinin sağlanması için uygulanan ve görünür ışıkla haberleşme sistemi için tasarlanan temel ve ileri teknikler ve elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Ayrıca yapılan literatür araştırmasında, sistem tasarımı aşamasında aydınlatma kriterlerinin optimizasyonu ile enerji verimli bir sistem tasarlanması konusu üzerine yapılan çalışma bulunmadığı belirlenmiştir. Karartma, gölgeleme, titreme etkisi gibi aydınlatma fonksiyonunu doğrudan etkileyen kriterlerin optimize edilmesi sonucunda elde edilecek enerji verimli görünür ışıkla veri iletimi tasarımının VLC sistem tasarımlarında önemli bir aşama olacağı değerlendirilmektedir. Bu tez çalışmasında elde edilmesi istenen konu, şuan için yeni bir teknolojinin alt yapısı mevcut olması ve teknik problemlerin çözüme kavuşturulamaması sebebiyle henüz pratikte kullanım alanları sınırlı olan görünür ışık iletişimin yeşil haberleşme alanı kapsamındaki avantajının öğrenilmesini elde etmek ve çalışmacıları güncel iletişim sisteminde daha çok çalışma yapabilmeleri sebebiyle motivasyonu sağlamaktadır.

1.2 Kişisel ve Yerel Alan Ağları

OWC ilkesi, kişisel ve Yerel Alan Ağ (LAN)'larda yüksek hızlı kablosuz bağlantılar sağlamak için önerilmiş ve geliştirilmiştir. Böyle bir örnek Şekil 4'de gösterilmektedir.

Bir geniş bant erişim ağı kurulur ve bir optik hat terminalinin (OLT) Optik Erişim Teknolojisi (PON) erişim teknolojisini kullanan kullanıcılara geniş bant bağlantısı sağladığı kullanıcıların tesislerinin "eşiklerine" yüksek hızlı bağlantı sağlanır. Bina içinde, kolay bağlantı ve "tak-çalıştır" avantajları nedeniyle yüksek hızlı kablolu

bağlantı sağlamak için çok modlu fiber (MMF) veya plastik optik fiber (POF) kullanılmaktadır. Kablolu iletişime ek olarak, OWC sistemi, bu tür kapalı ortamlarda artan kablosuz bağlantı talebiyle başa çıkmak için kullanılır [19].



Şekil 4. OWC'nin kişisel ve LAN'larda uygulanması [19].

Hem görünür hem de yakın kızılötesi dalga boyu aralıkları, OWC tabanlı kişisel ve yerel alan uygulamalarında incelenmiştir. Görünür dalga boyu kullanıldığında, sistem görünür ışık iletişim (VLC) sistemi olarak adlandırılır [20]. VLC sistemi kablosuz veri iletimi için LED kullanır ve bu nedenle, eşzamanlı aydınlatma ve iletişim işlevleri sağlamanın temel avantajına sahiptir. Bu avantaj, alışveriş merkezleri ve ofisler gibi iç mekan aydınlatması için LED'lerin geniş kullanımıyla giderek daha önemli hale geliyor. Ek olarak, LED ışıkların uzamsal sınırlaması nedeniyle, paraziti minimum seviyede tutarken spektral verimliliği artırmak için hücresel ağ türü (yani optik hücreler) kullanılabilir [21].

VLC sistemlerinin karşılaştığı ana sınırlardan biri, kısmen aydınlatmanın tutarsız doğası nedeniyle LED'lerin nispeten küçük modülasyon bant genişliğidir. LED'lerin modülasyon bant genişliği tipik olarak onlarca MHz aralığındadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için bir takım teknikler önerilmiş ve incelenmiştir. Örneğin, taşıyıcısız genlik ve faz (CAP) [22], ortogonal frekans bölme (OFDM) [23] ve ayrık çok tonlu (DMT) [24] formatlar gibi daha iyi spektral verimliliğe sahip yüksek

dereceli modülasyon formatları araştırılmıştır. VLC sistemlerinde ulaşılabilir veri hızlarını daha da artırmak için kanal eşitleme ilkeleri de uygulanmıştır [25, 26].

VLC sistemlerinde tatmin edici bir aydınlatma seviyesi sağlamak için birden fazla LED mevcut olduğundan, bu LED'ler aynı anda veri iletimi için kullanılabilir. Bu nedenle, sistem veri hızını ve kapasitesini daha da artırmak için MIMO ilkesi uygulanabilir. Küçük ölçekli 2×2 MIMO ile 6 Gbps'nin üzerinde VLC gerçekleştirilmiştir [27]. VLC sistemlerinde MIMO ilkesinin kullanılması, çoklu sinyal kanalları tarafından sağlanan uzamsal artıklık sayesinde sistem sağlamlığını da iyileştirebilir.

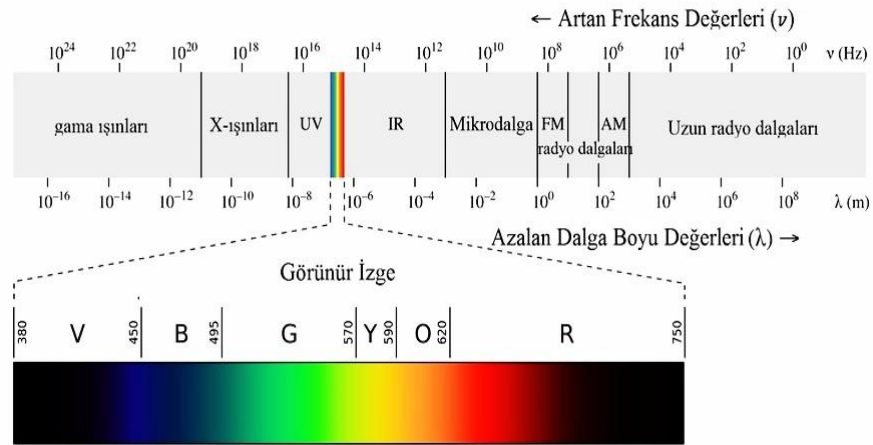
İç mekan OWC sistemlerinde, alıcı tarafından iki tür sinyal toplanır ve algılanır. İlk tip, fiziksel gölgeleme veya engelleme olmaksızın nispeten güçlü olan doğrudan görüş hattı (LOS) bağlantısından gelen sinyaldir. İkinci tip, duvarlar, zemin ve tavan tarafından yansıtılanlar gibi çok yollu bağlantılardan gelen sinyaldir. Çok yollu sinyal normalde LOS sinyaline kıyasla daha zayıftır ve daha uzun yayılma mesafeleri nedeniyle alıcıya ek gecikmeyle ulaşır. Bu nedenle, çok yollu sinyaller, iletilen sinyalin alıcıya farklı zaman örneklerinde ulaştığı, sisteme semboller arası girişim (ISI) getirdiği ve etkin kanal bant genişliğini azalttığı çok yollu dağılım sorununa yol açabilir. Çok yollu dağılım sorunu nedeniyle kanal bant genişliğini iyileştirmek için, özellikle alıcı tarafında bir dizi teknoloji geliştirilmiştir [19].

2. IŞIK YAYAN DİYOTLAR

Görünür ışık sistemlerinin esas aydınlatma yapısında katı hal iletişimi vardır. Katı hal teknolojisi elektriksel-ışınma yoluyla ışığın oluşturulmasına bağlıdır. Bu iletişimin bir sonucu haline gelen LED'ler en gözde ışık sistemleridir. Yüksek ışık yayılımına sahip LED'lerin kullanımı ve üretimi son yıllarda yüksek seviyeye ulaşmıştır.

Görünür ışık insan gözünün algılayabileceği bölümü oluşturmaktadır. İnsan gözü 380nm ve 780nm dalgaboyu aralığında algılama yapabilir ki, $\lambda = c/f$ ($c \cong 3 \times 10^8 m/s$) eşitliğinden bu değer yaklaşık 385-789 THz'e denk gelmektedir. λ dalgaboyu, f frekans, c ışık hızıdır [15].

Şekil 5'te görünür ışık haberleşmesinde kullanılan spektrum renklerinin frekans aralıkları gösterilmektedir.



Şekil 5: Elektromanyetik izge ve görünür izge [28].

Görünür izge spektrumu renkleri ile ayırdığımızda;

- ✓ Mor renk için 380 – 450nm
- ✓ Mavi renk için 450 – 495nm
- ✓ Yeşil renk için 495 – 570nm
- ✓ Sarı renk için 570 – 590nm
- ✓ Turuncu renk için 590 – 620nm
- ✓ Kırmızı renk için 620 – 750nm

bu nm arasında bir farklılık görülmektedir. Bu veriler ile LED'in saçtığı ışığın rengi ile ilgili olarak bir iletim bant aralığı kullanılabilir. LED ışıkları, görünür izgede renklerin kullanımına göre değişmektedir.

LED ile birlikte beyaz ışık oluşturmak için birkaç yol vardır; Birinci yol kırmızı, yeşil ve mavi ışık oluşturan RGB (kırmızı, yeşil, mavi) LED ile bu üç renk karışımı sonucunda beyaz ışık meydana getirilir. Diğer ikincisi ise kolay ve en çok tercih edilendir. Tercih edilen Galyum-Nitrit (GaN) yardımı ile oluşturulan mavi ışığa, sarı inorganik fosfor yapısında elenerek beyaz ışık oluşturulmaktadır. Elenerek beyaz ışık oluşturan LED'lere beyaz LED denmektedir [28], [29].

Yakın zamanlarda geleneksel aydınlatma yapısı yerini katı hal aydınlatmasına bırakma noktasına gelecektir. Işık verimi fazla olan florasan lambalar geleneksel aydınlatmaya nazaran çevresel açıdan daha zararlı maddeler bulundurduğu için fazla verimlilik sağlayan beyaz LED'ler ile değiştirilmektedir [28]. Beyaz LED'ler varolan aydınlatma sistemlerine nazaran 20 kat, florasan sistemlerine nazaran da 5 kat daha düşük enerji harcadığı görülmektedir. Işığında katı hal aydınlatması ile global elektrik harcamasının %50 değerinde düşeceği araştırmacılar tarafından düşünülmektedir [28], [30].

İncelemeler çevresel bakımdan yapıldığında katı hal aydınlatma iletişimi ve LED'ler, temiz bir yeşil dünyada gerekli yapı haline geleceği görülmektedir. Canlıların yaşamı için aydınlatma ihtiyacının önemli bir çoğunluğunu elektrik enerjisinin kullanımı sağlamaktadır. Global elektrik giderinin ise üçte birinin, aydınlatma ihtiyacı için tükettiği araştırmacılar tarafından öngörülmektedir [30]. Bu yüzden verimli aydınlatma kaynaklarının gelişimi ve ilerlemesi ile enerji harcanmasında önemli tasarruf elde edilirken, çevresel açıdan da değerli katkılar sağlamaktadır. Bu görüş katı hal aydınlatmanın ilerleyişini sağlayan bir etken olmuştur [28], [30].

VLC'lerin genel özellikleri verilecek olursa şu şekilde sıralanabilir;

- son derece geniş bir bant genişliği;
- düzenlenmemiş bir bant genişliği yani hizmet sağlayıcıların pahalı lisanslama ücreti ödemesine gerek olmaması;
- son derece güvenli iletişim;
- elektromanyetik girişime karşı bağışıklık;

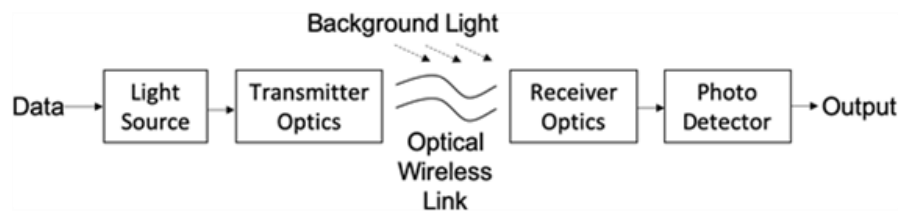
- uçaklar ve hastaneler gibi ortamlarda kullanım;

LED'lerin özellikleri;

- uzun kullanım süresine sahiplik;
- fazla ısı üretmemeleri;
- düşük güç tüketimine sahiplik;
- hızlı açılıp-kapanma özelliği vardır.

Bu avantajlara ek olarak, OWC sistemlerinde tipik olarak yoğunluk modülasyonu (IM) ve doğrudan algılama (DD) şeması kullanılır. Bu yüzden, OWC, RF kablosuz sistemlerinde yaygın olarak bulunan çok yollu zayıflama sorunu yaşamaz.

Genel OWC ilkesi Şekil 6'da gösterilmektedir. İletilecek veriler ilk önce lazer diyotun (LD) veya ışık yayan diyotun (LED) kullanıldığı ışık kaynağını modüle eder. IM yaygın olarak benimsenmiştir ve hem doğrudan modülasyon hem de harici modülasyon yoluyla gerçekleştirilebilir. Modüle edilmiş optik sinyal daha sonra ışın sapması gibi ışın özelliklerini kontrol etmek için verici optiklerden geçer. Ardından, veri taşıyan optik ışın doğrudan kablosuz bağlantı (yani boş alan) aracılığıyla yayılır. Alıcı tarafında, alıcı optik modülü optik sinyal demetini toplar ve ardından foto dedektör (PD) ışık sinyalini veri çıkışı olarak elektriksel alana dönüştürür. Tipik olarak, doğrudan algılamayı gerçekleştiren PD olarak pozitif-içsel-negatif (PIN) veya çığ fotodiyodu (APD) kullanılır. Alıcı tarafında sinyal ışığına ek olarak arka plan ışığı da toplanır ve algılanır. Arka plan ışığı normalde güneş ışığından veya aydınlatma lambalarından gelir ve alınan verilerin ek gürültüsüne yol açar [19].



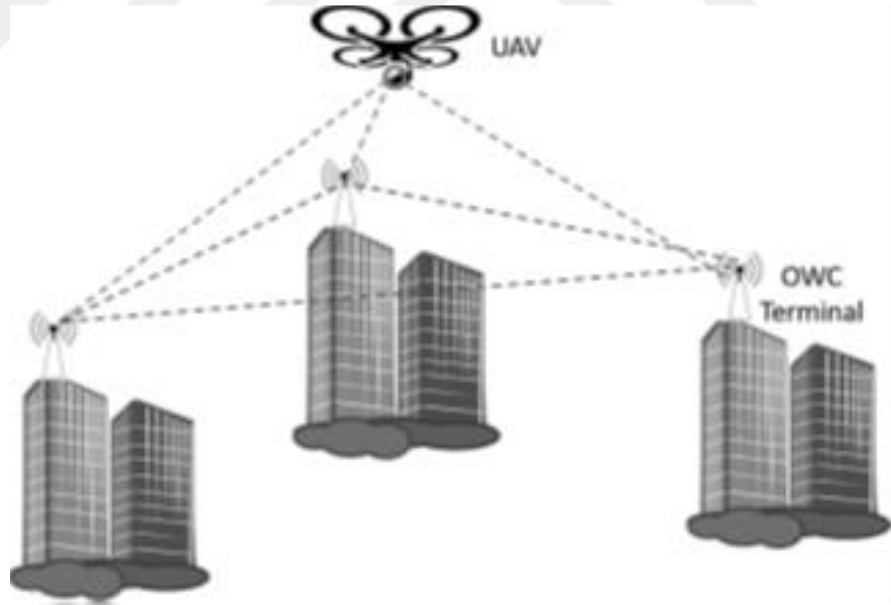
Şekil 6: OWC'nin genel prensibi [19]

Kolay kurulum avantajı nedeniyle (esas olarak bir çift verici ve alıcı gerektirir), OWC teknolojisi, telekomünikasyon altyapısının yok olduğu veya kullanılmadığı veya mevcut iletişim ağının çöktüğü felaket durumlarında da uygulama bulur [31]. Örneğin, OWC sistemi, veri iletişimi sağlamak ve yedek bir bağlantı olarak hizmet etmek için

New York City'deki 9/11 terörist saldırısından sonra konuşlandırıldı. Kolay dağıtım avantajı nedeniyle, OWC, halihazırda kablolu bağlantıları olmayan finansal şirketler için hızlı bir şekilde yüksek hızlı iletişim bağlantıları sağlamak için Wall Street'teki uygulamasını da görmektedir [32]. Yukarıda bahsedilen dış mekan uygulamalarında, OWC sistem performansı bir dizi faktörle sınırlıdır [19]:

- Olumsuz hava durumu: Dış mekan OWC sistemlerinin iletim kaybı hava durumuna bağlıdır ve olumsuz koşullar altında ek zayıflama gözlemlenebilir. Bu, özellikle, tipik olarak bağlantı arızasına ve hizmet kesintilerine yol açan yoğun sis için geçerlidir;
- Atmosferik türbülans: Dış ortamlarda yaygın olarak bulunan hava türbülansı, sinyal yayılma yolu boyunca kırılma indisinin değişmesine neden olur ve ışıldama, ışın genişlemesi ve ışın gezinmesi gibi bir dizi olumsuz etkiye yol açar. Tüm bu etkiler, OWC sistemlerinde ek gürültüye, daha yüksek bağlantı kaybına ve kararsız performansa neden olur;
- Alıcı-verici hizalaması: Nispeten uzun bağlantı aralığı nedeniyle, dış mekan OWC sistemlerinde dar ve yönlü ışık huzmeleri kullanılır. Bu nedenle, alıcı-vericiler arasında hassas hizalama bir zorunluluktur. Bununla birlikte, alıcı-vericiler binalara monte edildiğinde bina sallanmasının neden olduğu işaretleme hatası gibi uygulamada hassas hizalama zordur. Ek olarak, türbülansın neden olduğu ışın gezinmesi de alıcı-vericiler arasında yanlış hizalamaya neden olur. Alıcı-vericinin yanlış hizalanması, sistemde ek kayıplara ve hizmet kesintilerine neden olur;
- Ortam ışığı: Dış mekan OWC sistemlerinde, gündüzleri güneşten gelen arka plan ışığı mevcuttur. Gece boyunca, aydınlatmalar ayrıca güçlü arka plan ışığına neden olur. Bu nedenle, OWC sisteminde ek gürültü indüklenir;
- Bağlantı engelleme: Yukarıda tartışıldığı gibi, öncelikle sınırlı sinyal ışını kullanılır. Bazen, örneğin kuşlar tarafından ışın kısmen veya tamamen bloke olabilir. Dış mekan OWC sistemlerinde yukarıda belirtilen sınırlamaların üstesinden gelmek için bir dizi teknoloji çalışılmıştır. Ortam ışığının etkisini azaltmak için araştırmacılar, arka plan ışık spektrumunun çok daha zayıf olduğu 10 µm civarında uzak kızılötesi dalga boyu bandının kullanımını inceledi [33], ve arka plan gürültüsü baskın olduğunda OWC sistem performansını iyileştirmek için bir çift lazer diferansiyel sinyalleme şeması da

önerilmiştir [34]. Ek olarak, hava türbülansının sınırlamalarının üstesinden gelmek, sistem sağlamlığını artırmak için yedeklilik sağlamak ve sistem kapasitesini iyileştirmek için dış mekan OWC sistemlerinde çok girişli-çok çıkışlı (MIMO) ilkesi de geniş çapta araştırılmıştır [35–39]. Bu tür uygulamalar için ışık kullanmanın bir nedeni, optik dalgaların kısa dalga boyundan dolayı anten boyutunun RF sistemlerinden çok daha küçük olabilmesidir. Işığın yönlü yayılma özelliği ve optik spektrumda mevcut olan pratik olarak sınırsız bant genişliği, uzay iletişimde OWC kullanmanın diğer önemli nedenleridir. Derin uzay uygulamasına ek olarak, uçak iletişimde OWC teknolojisi de kullanılmaktadır. Havadaki terminaller, izleme yoluyla sürekli veri iletimi sağlayabilir ve hem ticari uçaklar hem de son zamanlarda insansız hava araçları (İHA) dahil olmak üzere çeşitli uçak tiplerinde gösterilmiştir [40-45]. İHA'da bulunan hava indirme terminalinin binaların çatısında bulunan OWC terminalleri ile iletişim kurabildiği Şekil 7'de İHA ile OWC'nin bir uygulaması gösterilmektedir [19]. Bu tür iletişim bağlantıları, yüksek hızlı sensör veri aktarımları (örneğin gerçek zamanlı video veya görüntü aktarımları) sağlamak için kullanılabilir.



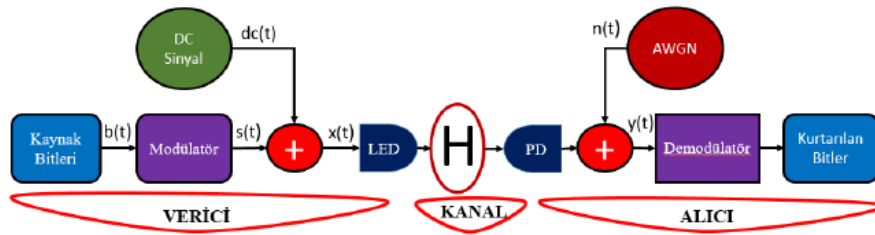
Şekil 7. İnsansız hava aracına (İHA) sahip bir OWC sistemi.

3. VLC SİSTEM MODELİ

Görünür Işık İletişimi'nde haberleşme sistem tekniklerini kullanmak için uygulanacak kanalın niteliklerinin bilinmesi gerekir. Haberleşmedeki alıcı ve verici kaynaklarının sınırlamaları, haberleşme kalitesini değiştirdiği için önemlidir. Kanalın dürtü yanıtı bilindiğinde alıcıya iletilen işaret doğru bir biçimde açıklanabilmektedir [46].

LED ve fotodedektör nitelikleri, VLC'yi aydınlatma ve iletişim özelliklerini birlikte gerçekleştiren bir yapı haline getirmektedir. Bununla birlikte, RF'ten ayrı bir şekilde kablosuz iletişimde servis alanı, aydınlatmanın ihtiyaç duyulduğu bütün çevreye yayılmaktadır. LED sistemleri en fazla aydınlatma verimi (lm/w) üzerine ve uzun süreli kullanım için yoğunlaşmıştır [28]. Kablosuz teknoloji ise daha çok yüksek veri hızı, yüksek güvenilirlik gibi verimli iletişim üzerine çalışmaktadır [28].

Şekilde bir VLC sistem modeli görülmektedir. Bu yapıda $b(t)$ verileri modülatörde gönderilecek sinyale entegre hale getirerek, gerçek $s(t)$ işaretini oluşturur. LED yalnızca pozitif işaretleri optik işarete dönüştürdüğü için $s(t)$ sinyaline $dc(t)$ eklenerek bütün zaman eksenini süresince pozitif yapıya dönüştürülür. Şekil 8'de VLC sistem modeli gösterilmektedir.



Şekil 8: VLC sistem modeli [28].

Asimetrik kırılmış optik OFDM (ACO-OFDM), Açık-kapalı anahtarlama (OOK), vb. sistemlerde modülatör çıkışı pozitif $s(t)$ verisini oluşturan yapılar için $dc(t)$ '0' alınabilmektedir. $X(t)$ işareti LED'lere yayılarak ışığın yoğunluğuna entegre hale getirilir [28].

Optik sistemden ilerleyen veri, alıcı tarafında ışığın yoğunluğundaki değişimleri fotodedektörün katkısıyla elektriksel sinyale dönüştürür.

Kanal sönümlemesi toplam Gauss gürültüsü (AWGN) etkilerini kapsayan $y(t)$ sinyali şu şekilde gösterilir [28];

$$y(t) = p\zeta(x(t) * h(t)) + n(t), \quad (1)$$

Kullanılan ζ ise fotodedektör duyarlılığıdır ve p elektro-optik dönüşüm katsayısını temsil etmektedir. ' * ' konvolüsyon işareti, $h(t)$ kablosuz optik kanal yapısı etkisini ve $n(t)$ ise AWGN'yi göstermektedir. Alıcıda bozulmuş, sezilen gürültülü $y(t)$ işaretinden demodülatör katkısı ile kaynak bitleri oluşturulması sağlanmaktadır [28].

3.1 Kanal Dürtü Tepkisi

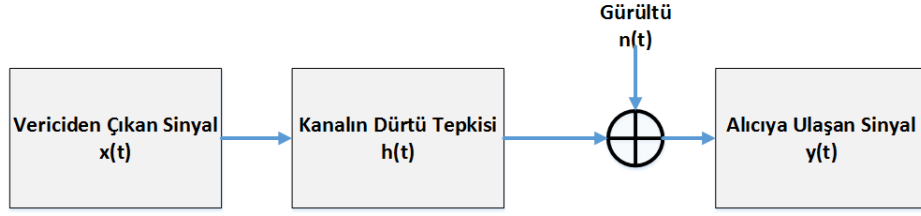
LED'ler ikili aydınlatma ve iletişim alanı için kullanıldığından, ışık yoğunluğunu ve iletilen optik gücü tanımlamak gerekir. Görünür ışık iletişimi diğer optik haberleşme teknikleri gibi, IM/DD sistemleri ile çalışır. LED'ler ile meydana getirilen görünür ışık yoğunluğu $I(t)$, bilgiyi taşıyan $x(t)$ işareti ile doğrusal orantılı olarak entegre edilip, optik sisteminden gönderilmektedir. Alıcıdaki foto diyot alınan optik yoğunluklu işareti algıladıktan sonra $y(t)$ ile ifade edilen elektriksel akıma çevrilmektedir [47].

Işık yoğunluğu, bir LED'in parlaklığını göstermek için, gönderilen optik güç, bir LED'den yayılan toplam enerjiyi gösterir.

Işık şiddeti, katı açısı başına ışık akısıdır ve aşağıdaki ifade ile verilir [47].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2)$$

Şekil 9'daki örnek VLC haberleşme sistemine bakıldığında vericinin kaynağı LED'lerden gönderilen optik yoğunluklu işaret ($x(t)$) bloğundan ($h(t)$) ilerleyerek alıcıdaki girişim işareti ($n(t)$)'ye eklendiğinde alıcı işareti ($y(t)$) elektrik akımının oluştuğu ortaya çıkmaktadır [47].



Şekil 9. Görünür ışık iletişiminin kanal blok şeması [46].

Alıcıdaki işaret $y(t)$ şu şekildedir;

$$y(t) = Rx(t) * h(t) + n(t) \quad (3)$$

R alıcıdaki foto diyot elemanının duyarlılık katsayısını, $n(t)$ toplanır beyaz Gauss gürültüsünü ve “*” sembolü ise katlama işlemini göstermektedir. Kanal yapısının, dürtü etkisinin bilinmesi, iletilecek işaret için incelemenin doğru olmasını sağladığı görülmektedir [46]. $n(t)$ ’nin elemanları $N(0, \sigma_n^2)$ dağılımını içermesi ve $N(\mu, \sigma^2)$ gösterimi, standart sapması σ olan, ortalaması μ olan Gauss dağılımını göstermektedir.

Kanalın dürtü yanıtı $h(t)$,

$$h(t) = h_{LOS}(t) + h_{NLOS}(t) \quad (4)$$

LOS bileşen ve NLOS bileşenlerin toplamı şeklinde elde edilir. $h_{LOS}(t)$ kanal dürtü yanıtının LOS bileşenini ve $h_{NLOS}(t)$ ise kanal dürtü yanıtının NLOS bileşenlerinin toplamını göstermektedir [46].

İç mekan OWC sistemlerinde, alıcı tarafından iki tür sinyal toplanır ve algılanır. İlk tip, fiziksel gölgeleme veya engelleme olmaksızın nispeten güçlü olan doğrudan görüş hattı (LOS) bağlantısından gelen sinyaldir. İkinci tip, duvarlar, zemin ve tavan tarafından yansıtılanlar gibi çok yollu bağlantılardan (NLOS) gelen sinyaldir. Çok yollu sinyal normalde LOS sinyaline kıyasla daha zayıftır ve daha uzun yayılma mesafeleri nedeniyle alıcıya ek gecikmeyle ulaşır.

3.2 Kök Kare Yayılım Gecikmesi (RMS)

Sistemin ortalama kök kare yayılım gecikmesi, zaman dağılım niteliklerini çok yollu sistemleri için belirlemek açısından yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. VLC sistemindeki tek optik kaynak için meydana gelen kök kare yayılım gecikmesi, kızılötesi optik iletişimi açısından düşük seviyededir. Bunun sebebi, VLC sisteminde yansıyan işaretler kızılötesi optik iletişime oranla düşük genliği mevcut olmasındandır [46].

RMS, çok yollu sistemlerin zaman dağılım yapısını göstermektedir. Gecikme yayılımının büyüklüğü fazlaysa sistemin evre uyumlu bant genişliği azaldığı için kanal frekansı seçici bir yapı haline gelmektedir. Ancak RMS yayılımı az ise uyumlu evre bant genişliği arttığı için sistem, frekansı düzgün bir yapı haline gelmektedir. Kanalin RMS'den önce ortalama gecikme yayılımının bulunması gerekmektedir [46].

Kanalin RMS gecikme yayılımı D_{rms} ,

$$D_{rms} = \sqrt{\frac{\int (t-\mu)^2 h^2(t) dt}{\int h^2(t) dt}}, \quad (5)$$

olarak verilmektedir [46]. Burada $h(t)$ kanal dürtü yanıtını ifade etmektedir. RMS gecikme yayılımı düşük olmasından dolayı yüksek hızlarda gereksinim hissedilen bant genişliği fazlalaşacağından kanalın uyumlu evre bant genişliğinin daha da yukarılara çıkarılması gerekmektedir. Haberleşme teknolojisinde tek taşıyıcı ile kanalın frekans seçici özelliği olacağından, tek taşıyıcı yerine daha çok sayıda alt taşıyıcıyla sağlayarak sistemin frekansının daha düzgün bir hal alması amaçlanmaktadır [46].

OFDM TABANLI MODÜLASYON SİSTEMLERİ

Semboller arası girişime (ISI) kıyasla kanal denkleştiricilere göre kolay yapısının mevcut olması, oldukça dirençli yapısı olması, Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) yönteminin, geniş bantlı RF haberleşme teknolojisinde geniş bir şekilde, birçok standartta kullanım alanına sahip olmasını sağlamıştır [48-56]. Benzer sebeplerden dolayı OFDM tekniğinin VLC sistemlerinde de kullanılması büyük ilgiye yol açmaktadır.

Yüksek veri hızında, OWC kanalı, sinyalin sembol hızından daha az sınırlı tutarlı bant genişliğine sahiptir. Bu, alınan sinyalde iletişim kalitesini önemli ölçüde düşüren ciddi bir ISI'ye yol açabilir. ISI'nın ana nedeni, optik sinyalin farklı reflektörlerden ve saçılmalardan gelen çoklu yansımasından gelen çok yollu dağılımdır. Tek taşıyıcılı iletimin aksine, çok taşıyıcılı iletim semboller arası girişimle başa çıkmak için en iyi adaydır. MCM (Çok Taşıyıcılı Modülasyon), O-OFDM (Optik Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama) gibi çok taşıyıcılı modülasyon, ISI'ye karşı daha sağlamdır çünkü alt taşıyıcılardaki her bir sembolün sembol süresi, optik kablosuz kanalın RMS gecikme yayılımına kıyasla yeterince uzundur. Bu nedenle MCM O-OFDM, yüksek veri hızlarını gerçekleştirmek için en iyi adaydır [57-59]. OFDM şeması, döngüsel önek (CP) kullanır, böylece kanal, alt taşıyıcı bant genişliği üzerinde düz sönümleme olarak kabul edilebilir [60, 61]. Böylece, alt taşıyıcılar arası girişim (ICI), bilgi sinyaline döngüsel önek (CP) eklenerek etkili bir şekilde taşınabilir. Ayrıca, Optik-OFDM'de, kanal dürtü yanıtının alınan bilgi üzerindeki etkisini azaltmak için frekans alanında daha az karmaşık tek dal denkleştirici kullanmak mümkündür.

Optik-OFDM'nin temel konsepti, bilgiyi taşımak için tek bir geniş bant taşıyıcı yerine çok sayıda paralel dar bant alt taşıyıcı kullanmaya dayanır. Veriler, bir dizi ortogonal frekans üzerinden paralel olarak iletilir. OFDM, aynı kapasiteye sahip tek taşıyıcı sisteme kıyasla her bir alt taşıyıcıda daha uzun sembol periyodu kullanır [61]. OFDM'de daha uzun süreli sembollerin kullanılması, sistemin ISI etkisini azaltmasına yardımcı olur. Ek olarak, artık ISI, döngüsel önek [61] tarafından sunulan koruma aralığı ile hafifletmektedir.

Optik-OFDM'de modülasyon, verici tarafında ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) ile sağlanır. Ortaya çıkan ayırık zaman alanı OFDM sinyali, dijitalden analoğa dönüştürücü kullanılarak analog dalga biçimine dönüştürülür. Zaman alanlı analog sinyal, ışık kaynağından yayılan ışık yoğunluğunu modüle etmek için kullanılır. Modüle edici analog sinyalin gerçek değerli olması ve negatif olmaması gerekir. Hermitian simetri, gerçek değerli sinyal üretmek için alt taşıyıcılara eklenir [62-64]. Tek kutuplu O-OFDM şemaları, bilgi sinyali optik taşıyıcı dalganın yoğunluğu üzerinde kodlandığından, LED'e giriş elektrik sinyalinin gerçek ve pozitif olduğu geleneksel iki kutuplu OFDM iletim tekniğinin modifikasyonudur. Doğrudan algılanan optik sinyal yoğunluğunu elektriksel alana dönüştürmek için alıcıda foto dedektörler (PD) kullanılır.

OFDM modülatörü, X vektörü üzerinde bir N noktalı ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) uygular ve gerçek zamanlı sinyali oluşturan döngüsel bir önek ekler. CP, doğrusal evrişimi dairesel bir evrişime dönüştürerek hem taşıyıcılar arası girişimin (ICI) hem de bloklar arası girişimin (IBI) etkisini azaltmak için kullanılır. Bununla birlikte, ortaya çıkan iki kutuplu zaman alanı OFDM sinyali, yoğunluk modülasyonu sürecinden önce pozitif tek kutuplu olana dönüştürülmelidir [65].

Modülasyon planlarını incelerken kullanılan birçok ölçüt mevcuttur. Bunlar arasında dikkat çekenleri bant verimliliği ve güçtür. PAPR, verim gönderme kapasitesi ve karmaşıklık diğer önemli kriterler olarak sayılabilmektedir. AWGN güç verimi sistemde belirlenen BER değerine gerekli ortalama güç ile ulaşmak için ifade edilebilmektedir. Bant verimliliği, seçilmiş bir bant genişliği değeri için iletilebilecek veri hızını ifade etmektedir. [28].

IM/DD yapılarında gönderilen işaretin pozitif ve gerçek değerli olması gerekmektedir. VLC'ler az maliyeti ve kolay yapısı ile yoğunlukla IM/DD sistemini kullanırlar. Bu durum RF teknolojisinde incelenmiş, güç ve bant verimliliği yüksek modülasyona sahip sistemlerin doğrudan olarak VLC sistemlere entegre edilmesini sınırlamaktadır [28].

Temel bant modülasyon teknikleri yüksek veri hızlarında ISI'dan etki alabilmektedir. Bunlar alıcı yönünde karar geri beslemeli denkleştirici (DFE) sistemi uygulanarak başarımları artırılabilir [66]. Nitekim temel bant modülasyonlar

IM/DD iletimine basit uyarlanabilirliği ve kolay yapısı ile standartlar ve endüstri alanları geliştirilirken öncelikli hale gelmiştir [28].

VLC iletişim teknolojisinde bilgi gönderimi, yoğunluk modülasyonu/doğrudan sezim yapısı uygulanarak gerçekleştirilebilmektedir [56]. IM/DD sisteminde veri, ışık şiddeti ile gönderildiği için iletimde uygulanan optik işaretler radio frekans yapıların tersine pozitif, gerçel değerli olmalıdır [67-70]. Güç, pozitif fiziksel bir büyüklük ve gerçel değerli olduğu için entegre eden işaretin gerçel ve pozitif olması gerekmektedir [71]. Bu yüzden, RF yapılarında, klasik OFDM yapısı doğrudan VLC'ye monte edilememektedir. Ancak, OFDM'de alt taşıyıcılar ile gönderilen sinyaller Hermitian simetrik şeklinde belirlenerek, Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) çıkışındaki sinyalin gerçel hale getirilmektedir. Fourier transferinin bahsedilen niteliği, OFDM yapısının bant verimliliği %50 oranında azaltsa da, OFDM'i VLC'de kullanılabilir hale getirmiştir [67, 69, 72].

Hermityen simetriklik uygulanarak gerçel değerli olması için elde edilen sinyalin, yalnızca pozitif değerli iletebilmesi için literatürde ana yöntemler önerilmiştir [67-69, 73]. Bu yöntemler M-QAM Optik-OFDM'de negatif olmayan tek kutuplu bir sinyal elde etmek için yaygın olarak kabul edilen yöntem doğru akım eklemeli DCO-OFDM (Doğru Akım Eklemeli Optik OFDM)'dir, OFDM sembolüne DC öngerilim eklemesi içerir [74-76]. Armstrong ve Lowery [63] tarafından önerilen ikinci teknik, asimetrik olarak kırılmış ACO-OFDM [63, 69, 77-78] olarak bilinen tasarım Optik-OFDM tek kutuplu yarı Gauss sinyallerini içerir. Çift alt taşıyıcılar boş iken sadece tek alt taşıyıcılar veri iletimi için kullanılarak gerçekleştirilir. ACO-OFDM'de, IFFT'den sonra ortaya çıkan sinyalin negatif kısmı vericide kırılır.

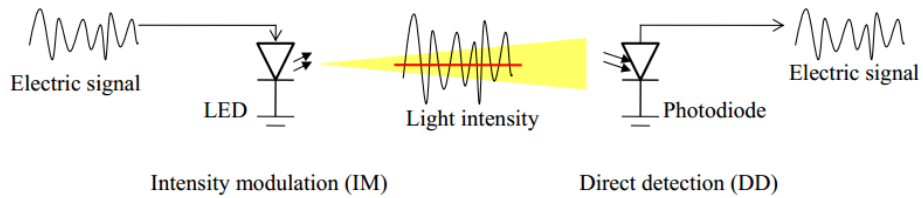
İlk yöntem olan doğru akım eklemeli optik OFDM (DCO-OFDM), OFDM yapısının VLC yapılarındaki uygulamalara ilk örnektir [67-69]. DCO-OFDM tekniğinde, gönderilmek istenen sinyal pozitif değerli hali alması için IFFT işlemi çıkışında oluşturulan çift kutuplu gerçel veriye, uyumlu genlikte pozitif bir (DC öngerilim) eklenerek sinyal tüm zaman eksenini boyunca pozitif yapılabilmektedir. Burada işarete eklenen DC bileşen güç verimini negatif bir şekilde etkilememektedir. [28]

Diğer bir yöntem olarak, IFFT bloğu giriş bölümünde tek indisli taşıyıcılar ele alınır ve çift indisli taşıyıcılar sıfır hale getirilir. IFFT bloğu çıkışında gerçek değerli olarak oluşturulması için veri Hermitian simetrik olacak şekilde ayarlanmaktadır. Negatif değerli işaretler IFFT bloğu çıkışında kırılır. Modüle hale getirilen bilgi sinyalleri pozitif değerli taşıyıcılardan yeniden oluşturulmaktadır. Bu yöntem ile oluşan optik OFDM sistemine ACO-OFDM (Asimetrik Kırılmış Optik OFDM) sistemi adı verilmiştir [28].

IFFT çıkış bloğunda pozitif ve negatif uçların birbirinden çıkarılması ile tek kutuplu işaret oluşturulması da bir diğer yöntemdir. Bu sistem ile oluşan yapıya Flip-OFDM yapısı denilmektedir [28].

a. OWC'de Yoğunluk Modülasyonu ve Doğrudan Algılama (IM/DD)

LED'in tutarsız ışık yayma özelliği, OWC'de modülasyon şeması tipini seçme konusunda önemli zorluklar getirir. LED'den yayılan tutarsız ışık dalgaları farklı frekans ve faza sahiptir. Bu nedenle, tutarlı faz ve frekans modülasyonu için sabit faz ve frekansa sahip kararlı bir taşıyıcı elde etmek zordur [79, 80]. OWC'deki tek verimli ve uygun maliyetli iletişim türü, yoğunluk modülasyonu ve doğrudan algılamayı (IM/DD) içeren iletişim türüdür. Yoğunluk modülasyonunda, LED'den yayılan optik güç, bilgi sinyalinin elektriksel genliğine göre değişir. IM/DD tipi iletişim, bilgi sinyalinin gerçek değerli ve pozitif tek kutuplu tipte olmasını gerektirir. OWC'de modülasyon iki aşamada gerçekleşir. İlk önce iletilecek bilgi dalga biçimlerine kodlanır ve daha sonra bu dalga biçimleri ışık kaynağından yayılan ışık yoğunluğunu modüle eder. IM/DD tabanlı OWC'nin blok diyagramı Şekil 10'da gösterilmektedir.



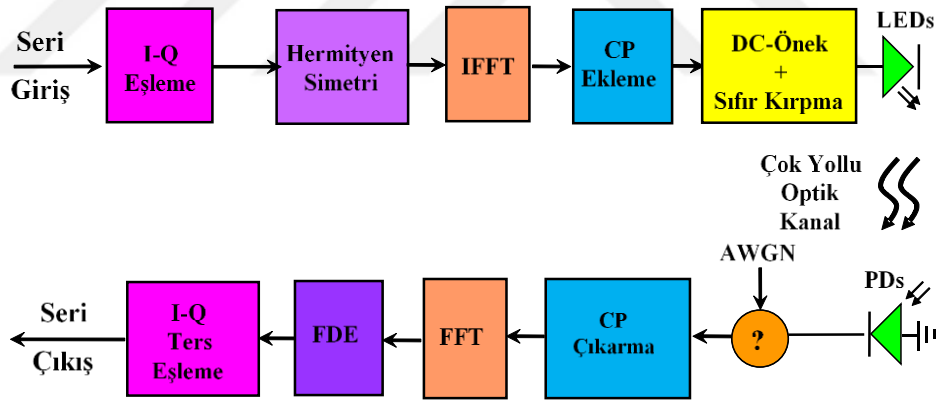
Şekil 10. OWC'de yoğunluk modülasyonu ve doğrudan algılama [61].

2. DCO-OFDM (DOĞRU AKIM EKLEMELİ OPTİK OFDM)

DCO-OFDM [69, 81–83], veri iletimi için hem çift hem de tek alt taşıyıcıları kullanır. DCO-OFDM, iki kutuplu OFDM sinyaline pozitif bir DC öngerilim eklenerek gerçekleştirilir. Bu, iki kutuplu bir sinyali tek kutuplu bir pozitif sinyale dönüştürmek için en kolay ve anlaşılır tekniktir. OFDM sinyali, bazı sinyallerin büyük bir DC öngerilimi getirildikten sonra bile negatif bölgede olabildiği büyük tepe-ortalama güç oranına (PAPR) sahip olma özelliğine sahiptir. Bu nedenle, bu negatif tepe noktaları kırılacak ve sistem performansını sınırlayan doğrusal olmayan bir bozulma ile sonuçlanacaktır [61]. Bilgi işaretine bir DC öngerilimi ilave etmek, enerji verimliliğini düşürür; bu sebeple DCO-OFDM'in, enerji açısından modülasyonun verimsiz olduğunu göstermektedir. Şekil 11'de DCO-OFDM sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir.

Toplam N alt taşıyıcıya sahip olan DCO-OFDM şeması için, giriş QAM sembolleri X_k , aşağıdaki gibi X^{DCO} vektörü formunda alt taşıyıcılara eşlenir.

$$X^{DCO} = [X_k], k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (6)$$



Şekil 11: DCO-OFDM şemasının blok diyagramı.

Hermitian simetrisi, birinci ve $(N/2)^{inci}$ alt taşıyıcılara sıfır QAM sembolleri ve ikinci yarıda alt taşıyıcılar üzerindeki bilgi QAM sembolünün eşlenik simetrisi ile yüklenerek kullanılır.

$$X_k = X_{N-k}^* \quad (7)$$

$$X_0 = X_{\frac{N}{2}} = 0 \quad (8)$$

X^{DCO} vektörü üzerinde IFFT işlemi alınarak oluşturulan ayırık zaman OFDM sembolü x_n şu şekilde verilir:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi kn}{N}}, n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (9)$$

x_n , pozitif veya negatif değere sahip olabildiği için gerçekte ve iki kutupludur. İki kutuplu sinyali tek kutuplu x_n^{DC} 'ye değiştirmek için, k_{DC} 'nin bir DC sapması x_n 'ye aşağıdaki gibi eklenir:

$$x_n^{DC} = x_n + k_{DC} \quad (10)$$

OFDM, yüksek tepe-ortalama güç (PAPR) oranına sahip olma gibi iyi bilinen özelliklere sahiptir. Böylece, bazı numuneler DC sapması eklendikten sonra bile hala negatif bölgede olacaktır. Negatif bölgede kalan negatif örneklerin kırılması, bilgede bir bozulmaya neden olur. Optimum DC yanlılığı, farklı seviye M-QAM modülasyonu için farklıdır ve IFFT modülünün çıkışındaki sinyalin standart sapmasının katıdır. DCO-OFDM, eklenen DC sapmasının neden olduğu ek güç dağılımı nedeniyle enerji açısından verimsiz bir şemadır. Bipolar OFDM sinyaliyle karşılaştırıldığında, eklenen DC öngerilimi nedeniyle dağılan elektrik gücü B_{DC} 'nin DCO-OFDM'deki artışı şu şekilde yazılabilir [69]:

$$B_{DC} = 10 \log_{10}(k_{DC}^2 + 1) \quad (11)$$

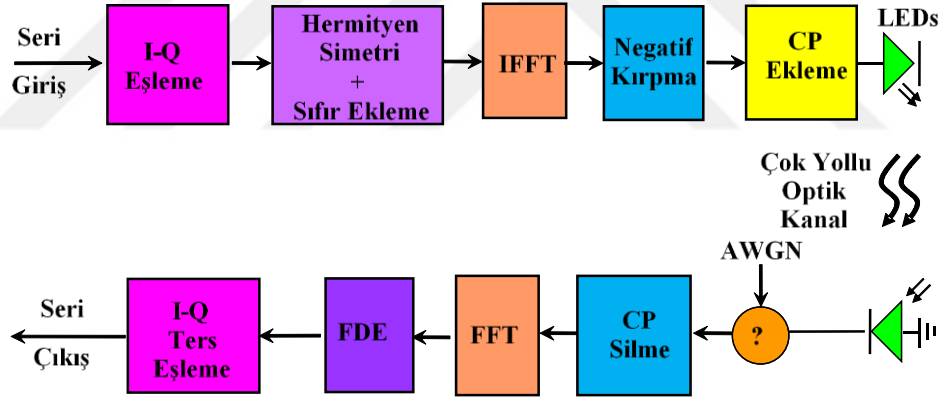
DCO-OFDM, bilgi bitlerini taşımak için tek ve çift alt taşıyıcıları kullanıldığından, iyi spektral verimlilik sağlamasıyla bilinir, N mevcut alt taşıyıcı için DCO-OFDM'nin spektral etkinliği Se_{DCO} [69] verilmektedir: M kullanılan QAM modülasyonu seviyesi, N_{CP} döngüsel önek sayısıdır.

$$Se_{DCO} = \frac{(\log_2 M)(N-2)}{2(N+N_{CP})} \quad (12)$$

3. ASİMETRİK KIRPILMIŞ OPTİK OFDM (ACO-OFDM)

ACO-OFDM literatürde geniş çapta çalışılmıştır. Geleneksel ACO-OFDM [62–63, 69], veri iletimi için yalnızca tek alt taşıyıcıları kullanır. Ancak tek alt taşıyıcıları boş bırakarak sadece çift alt taşıyıcıları kullanmak da mümkündür; bu nedenle ACO-OFDM, çift veya tek dizinli alt taşıyıcıları boşa harcar. Tek veya çift alt taşıyıcıların israfı, ACO-OFDM'yi DCO-OFDM'ye kıyasla spektral olarak verimsiz hale getirir.

DCO-OFDM'deki DC sapması, vericide dağılan elektrik enerjisini ve gereken optik gücü artırmada önemli bir etkiye sahiptir [84]. DCO-OFDM'nin güç verimliliği tatmin edici ve ümit verici değildir. DCO-OFDM'den farklı olarak, ACO-OFDM şeması, DC polarizasyonunu önler ve pozitif tek kutuplu bir OFDM sinyali üretir [85]. ACO-OFDM'de, değerli bilgilerle sadece tek dizinli frekans alt taşıyıcıları entegre edilir. Bu, iki kutuplu zaman alanı OFDM numuneleri arasında bir simetri özelliği oluşturur. Şekil 12'de gösterildiği gibi X_k , k'inci alt taşıyıcıya yüklenen QAM sembolünün karmaşık temsildir [61].



Şekil 12. ACO-OFDM şemasının blok diyagramı

Mevcut alt taşıyıcılar üzerinde eşlenen QAM sembolünün X^{ACO} vektörü şu şekilde yazılabilir:

$$X^{ACO} = [X_k], k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (13)$$

$$X_k = X_{N-k}^* \quad (14)$$

$$X_k = 0, k = 0, 2, 4, \dots, N - 2 \quad (15)$$

Bu nedenle, çift indeksli alt taşıyıcılar, sıfır QAM sembolleri ile yüklendikleri için bilgi bitlerini iletmek için kullanılmazlar. Frekans alanı QAM sembolü X_k ve ayırık zaman alanı OFDM sinyal örneği x_n , IFFT/FFT işlemleriyle şu şekilde ilişkilidir:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi kn}{N}}, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (16)$$

$$X_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (17)$$

Çift alt taşıyıcılar, üzerlerine yüklenen sıfır QAM sembolü nedeniyle herhangi bir anda örnekler üzerinde herhangi bir katkıya sahip değildir. Bu nedenle tek k için; verilen ilişki şu hale gelir:

$$x_{n+\frac{N}{2},k} = -\frac{1}{\sqrt{N}} X_k e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (18)$$

x_n gerçek bir çift kutuplu sinyal olduğundan, negatif değerli örnekleri sıfıra kırparak pozitif tek kutuplu sinyale dönüştürülmelidir. Negatif örnekleri kırptıktan sonra pozitif tek kutuplu OFDM sinyali x_n^{ACO} şu şekilde verilir:

$$x_n^{ACO} = \begin{cases} 0, & x_n \leq 0 \\ x_n, & x_n \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Negatif örneklerin kırpılmasının, alıcı tarafındaki alt taşıyıcılarda alınan sinyal üzerinde iki sonucu olacaktır. Alınan QAM sembolünün genliği, kırpılma nedeniyle iletilen QAM sembollerine kıyasla yarı yarıya azalacaktır. Ek olarak, iletilen sinyalin gücünün yarısı kadar olan kırpma gürültüsü, alıcı uçtaki çift alt taşıyıcılara düşecektir. Kırpmanın bu iki etkisi, OFDM sinyalinin frekans alanından açıkça görülebilir. Frekans alanı OFDM sinyali X_k , FFT işlemi kullanılarak zaman alanı sinyali x_n 'den elde edilebilir.

Negatif örneklerin vericide kırılması, aynı alt taşıyıcı üzerinde iletilen QAM sembollerine kıyasla, tek alt taşıyıcılar üzerinde alınan QAM sembollerinin genliğini yarıya indirir. Bilgi sinyali demodüle edilebilir ve çift endeksli alt taşıyıcılar atılarak tek alt taşıyıcılardan veri kurtarılabılır [85]. ACO-OFDM şeması çift endeksli alt taşıyıcıları boşa harcar, çünkü bilgi bitlerini taşımak için yalnızca tek endeksli alt taşıyıcılar kullanılır. Bu, DCO-OFDM'ye kıyasla spektral verimliliğin yaklaşık yarısından ödün vererek ACO-OFDM şemasını enerji verimli hale getirir. ACO-OFDM'nin spektral verimliliği Se_{ACO} [69, 71] olarak, N alt taşıyıcılara ve N_{CP} döngüsel ön ekine sahip geleneksel M-QAM, ACO-OFDM için spektral verimlilik şuna eşittir:

$$Se_{ACO}^{tek} = \frac{\log_2 M(N)}{4(N + N_{CP})}. \quad (20)$$

Yukarıdaki denklem, yalnızca bilgi iletimi için kullanılan tek alt taşıyıcılar durumu içindir. Tek alt taşıyıcılar yerine yalnızca çift alt taşıyıcılar kullanılırsa, spektral verimlilik şu hale gelir [86]:

$$Se_{ACO}^{çift} = \frac{\log_2 M(N - 4)}{4(N + N_{CP})}. \quad (21)$$

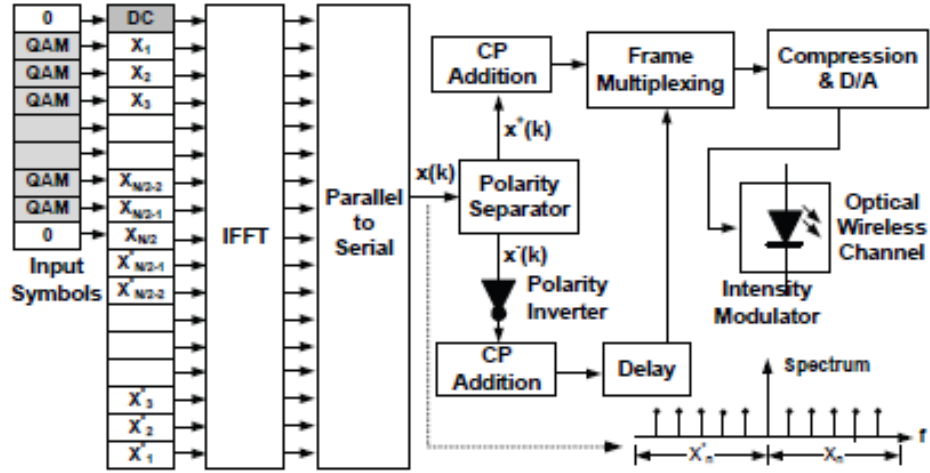
Denklem görebileceğimiz gibi, ACO-OFDM'nin spektral verimliliği, DCO-OFDM'nin neredeyse yarısı kadardır ve ACO-OFDM, tüm alt taşıyıcılar tarafından sunulan toplam mevcut bant genişliğinin neredeyse %75'ini boşa harcamıştır [86].

4. FLİP-OFDM (FLİP DİKGEN FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA)

İşaretin negatif ve pozitif kısımlarının mutlak değerlerini ardı ardına iki OFDM işaretinde gönderen iç mekanda kullanılan optik kablosuz haberleşme çeşididir. Flip OFDM, iletimden önce negatif değerleri pozitive çevirerek, sinyalin pozitif ve negatif kısımlarını iki ardışık pozitif değerli blok halinde iletir [61]. Flip OFDM hem çift hem de tek alt taşıyıcı kullansa bile, art arda pozitif ve negatif kısımlar için çift sembol kullanması nedeniyle ACO-OFDM ile aynı güç verimliliğini ve spektral verimliliği sağlar [87]. Farklı donanım karmaşıklıklarına sahip olduğu gösterilmiştir. Özellikle yavaş sönmölenen kanallar için Flip-OFDM, alıcıda ACO-OFDM'ye göre donanım karmaşıklığında %50 tasarruf sağlar [88].

Flip-OFDM'de, pozitif ve negatif kısımlar, bipolar OFDM gerçek zamanlı etki alanı sinyalinden çıkarılır ve iki ardışık OFDM sembolünde iletilir. Negatif kısım iletimden önce çevrildiğinden, her iki alt çerçeve de pozitif örneklere sahiptir. Flip-OFDM bu nedenle optik kablosuz iletişimde kullanılabilen tek kutuplu bir OFDM tekniğidir [88].

Bir Flip-OFDM vericisinin blok diyagramı Şekil 13(a)'da gösterilmektedir.



Şekil 13(a): Flip-OFDM verici blok diyagramı

X_n , n 'inci OFDM alt taşıyıcısında iletilen QAM sembolü olsun. Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) işleminin k . zaman anında çıktısı şu şekilde verilir:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) \quad (22)$$

N , IFFT boyutudur. Her OFDM alt taşıyıcısında bulunan X_n sembolleri bağımsız ise, IFFT işlemi tarafından üretilen zaman alanı sinyali $x(k)$ karmaşıktır. Bu, Hermitian simetri özelliğini empoze ederek önlenebilir, yani, gerçek bir sinyal üretilebilir;

$$X_n = X_{N-n}^* \quad n = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1 \quad (23)$$

Burada “*” karmaşık konjugasyonu belirtir. Bu nedenle, gerçek zaman alanı sinyalini üretmek için OFDM alt taşıyıcılarının yarısının feda edilmesi gerekir. IFFT işleminin çıktısı daha sonra şu şekilde verilir:

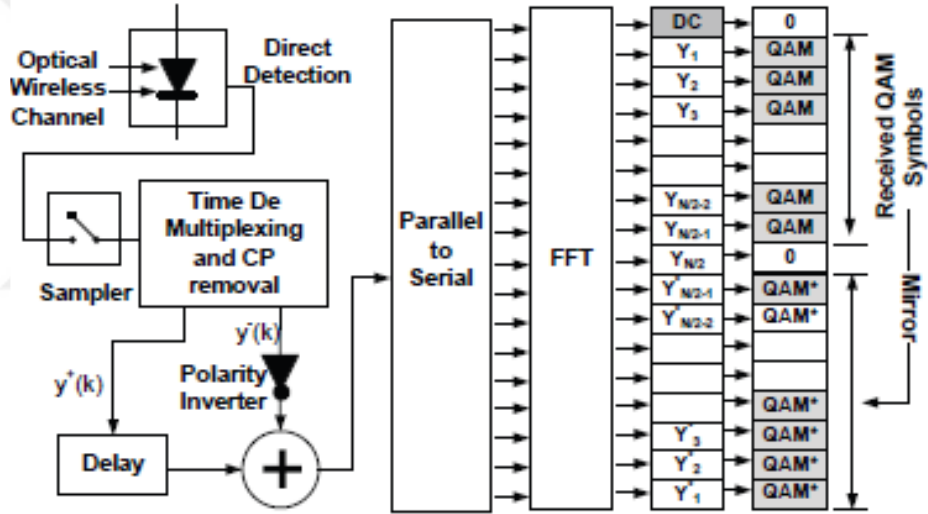
$$\begin{aligned} x(k) = & X_0 + \sum_{n=1}^{N/2-1} X_n \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) + X_{N/2} \exp(j2\pi) \\ & + \sum_{n=N/2+1}^{N-1} X_{N-n}^* \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) \end{aligned} \quad (24)$$

Burada X_n^* , X_0 ve $X_{N/2}$, sırasıyla X_n 'nin eşlenik simetrik QAM sembolünü, DC bileşenini ve merkez taşıyıcının QAM sembolünü temsil eder. Ek olarak, zaman alanı sinyalinde herhangi bir DC kaymasını veya herhangi bir kalıntı karmaşık bileşeni önlemek için, X_0 ve $X_{N/2}$ sıfıra ayarlanır. Flip-OFDM, bilgi taşımak için toplam OFDM alt taşıyıcılarının yarısını kullanır, böylece IFFT bloğunun çıkışı gerçek bir iki kutuplu sinyal $x(k) = x^+(k) + x^-(k)$ olur, burada pozitif ve negatif kısımlar şu şekilde tanımlanır:

$$x^+(k) = \begin{cases} x(k) & \text{if } x(k) \geq 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$$

$$x^-(k) = \begin{cases} x(k) & \text{if } x(k) < 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (25)$$

ve $k = 1, 2, \dots, N$ 'dir. Bu iki bileşen, birbirini izleyen iki OFDM sembolü üzerinden ayrı ayrı gönderilir. Pozitif işaret $x^+[k]$ birinci alt çerçevede (pozitif alt çerçeve) iletilirken, çevrilmiş (ters polarite) sinyal $-x^- [k]$ ikinci alt çerçevede (negatif alt çerçeve) gönderilir. İletim, frekans seçici bir kanal üzerinden yapıldığından, Δ örneklerinden oluşan döngüsel önekler, OFDM alt çerçevelerinin her birine eklenir. Dolayısıyla, negatif OFDM alt çerçevesi $(N + \Delta)$ kadar geciktirilir ve pozitif alt çerçeveden sonra iletilir. Çift kutuplu OFDM çerçevesinin yeniden yapılandırılması ve alıcıdaki tespit süreci Şekil 14(b)'de gösterilmektedir.



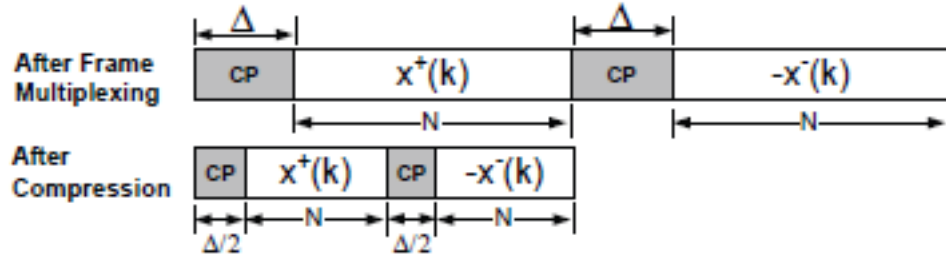
Şekil 14(b): Flip-OFDM Alıcı Blok Diyagramı

Her bir OFDM alt çerçevesi ile ilişkili döngüsel önekler ilk olarak kaldırılır ve orijinal bipolar sinyal şu şekilde yeniden oluşturulur, burada $y^+(k)$ ve $y^-(k)$, birinci ve ikinci alt çerçevelere ait ilgili zaman örneklerini temsil eder:

$$y(t) = y^+(k) - y^-(k) \quad (26)$$

Alıcıda iletilen bilgi sembollerini algılamak için bipolar sinyali yeniden oluşturmak için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) işlemleri gerçekleştirilir [88].

Çerçeve çoğullamasından sonraki zaman örnekleri, tek bir bipolar OFDM çerçeve uzunluğunun aynı sembol süresini üretmek için zaman içinde iki faktör tarafından sıkıştırılır. Burada, sıkıştırılmış koruma aralığının, kanalın tam gecikme yayılımını karşılaması gerekir [88].



Şekil 15. Flip-OFDM Tek Kutuplu Çerçeve

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR OPTİK OFDM DALGA FORMU TASARIMI

Gelişen teknolojilere ve kablosuz mobil iletişime atanan Radyo Frekans (RF) bantları hızla dolmaya devam etmektedir. Dolayısıyla 6. Nesil (6G) için tanımlanacak frekans bant bölgesinin dışında daha yüksek frekans bantlarında çalışmanın imkansız hale gelebileceği görülmektedir. Soruna en iyi çözüm Görünür Işık İletişim (VLC) sistemleridir. Işık yayan diyot (LED) teknolojilerinin artan popüleritesi ile LED'leri kullanan VLC, geniş bant kablosuz iletişim alanında büyüleyici bir araştırma alanı haline geldi. Bazı şemalarda, radyo frekansı için ek bir çalışma alanı olması ve diğer çalışmalarda ayrılmaz bir rol alması beklenmektedir. VLC sistemleri, RF tabanlı iletişim şemalarına alternatif bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. VLC, görünür ışık iletişim bandındaki dalgaların duvarlardan ve yüzeylerden geçememesiyle radyo dalgalarında olduğu gibi geniş bağlantı ağı oluşturmaya da veri güvenliğinde güçlü bir avantaj sağlar. VLC, çok yüksek frekans bant genişliğine, iyi iletim kapasitesine, daha ucuz maliyete, elektromanyetik girişime karşı yüksek bağışıklığa ve daha geniş spektrum aralığına sahiptir [46], [89]. Bu sistemler görünür ışık spektrumunu kullanmayı amaçlar. Görünür ışık bandının (380-750 nm) haberleşme amaçlı kullanılması esasına dayanan bu sistemler, RF sistemlerindeki gibi karmaşık, sınırlı ve pahalı bir teknoloji olmaması ve aynı zamanda RF haberleşmesine de alternatif olması nedeniyle RF haberleşmesine bir alternatif oluşturmaktadır.

VLC teknolojisi, vericideki LED'in yoğunluğunu veya rengini görünmez bir hızda değiştirerek ortam aydınlatmasını etkilemeden kablosuz iletişim sağlamayı amaçlar. RF iletişimi ile karşılaştırıldığında VLC, çevre dostu olma, zengin spektrum ve yüksek güvenlik gibi ciddi faydalar önermektedir. Gelecekteki geniş bant kablosuz iletişim için teşvik edici bir sistem olarak büyük ölçüde kabul görmüştür [90, 91]. Sağlığa hiçbir etkisi olmayan VLC, radyo frekans spektrumuna göre çok daha geniş bir bantta, yüksek hızda, daha az enerji tüketimi ile veri iletebilmektedir. Ayrıca elektromanyetik radyasyondan ve radyo frekansı girişiminden etkilenmemektedir.

VLC'nin en önemli avantajlarından biri, ışık dalgaları yüzeylerden ve binalardan geçemediği için en iyi veri güvenliğini sağlamasıdır [92, 93].

Optik iletişimde pozitif ve gerçek işaretlerin kullanılmak istenmesi, bu sistemler için kullanılabilecek olası modülasyon şemalarını büyük ölçüde kısıtlamaktadır. Gerçek sinyaller üretmek için en yaygın teknik, mevcut bant genişliğinin yarısını kaybetme pahasına OFDM alt taşıyıcılarının Hermityen simetrisini korumaktır. Bu yöntem gerçek bir sinyal üretse de bu sinyal iki kutupludur ve iletimden önce tek kutuplu bir sinyale dönüştürülmelidir. İki kutuplu bir OFDM sinyalini tek kutuplu bir sinyale dönüştürmenin geleneksel şeması, bir DC ön-gerilim voltajı eklemektir. Bu, DC ön-gerilim katkılı OFDM (DCO-OFDM) olarak bilinir [62, 69]. Büyük DC ön-gerilim ilavesi, DCO OFDM'nin optik gücünü verimsiz hale getirir. Öte yandan, daha düşük DC ön-gerilim voltajının eklenmesi, büyük negatif zaman örneklerinin kırılmasına neden olur, bu da önemli taşıyıcılar arası girişime ve bant dışı optik güce neden olabilmektedir [88].

[63]' te önerilen Asimetrik Kırılmış Optik OFDM, DC ön-gerilim voltajı ekleme ihtiyacını önleyebilir. ACO OFDM'de, veri bitlerini sadece tek alt taşıyıcılar taşır, tüm negatif değerler göndericide kırılır. ACO-OFDM, DCO-OFDM'ye güç verimli alternatif optik sistem olması için önerilmiştir. ACO-OFDM'de, tek alt taşıyıcılar monte edilmekte, bununla birlikte IFFT çıkışında simetrik olmayan zaman sembolü ile oluşmaktadır [94]. IFFT çıkışında iki kutuplu işaret devamında bütün negatif serinin kırılmasıyla pozitif olmaktadır. Yalnızca anti-simetrik işaretin pozitif parçası gönderildiğinden ve DC ön-gerilime ihtiyaç duymadığından, ACO-OFDM şeması optik olarak yüksek güç verimliliği sunar. Yine de, ACO-OFDM şeması, DCO-OFDM'den spektral olarak düşük üretkendir, çünkü kırılma gürültüsü sonucuna oluşan girişimleri engellemek için alt taşıyıcıların yarısı kapatılır.

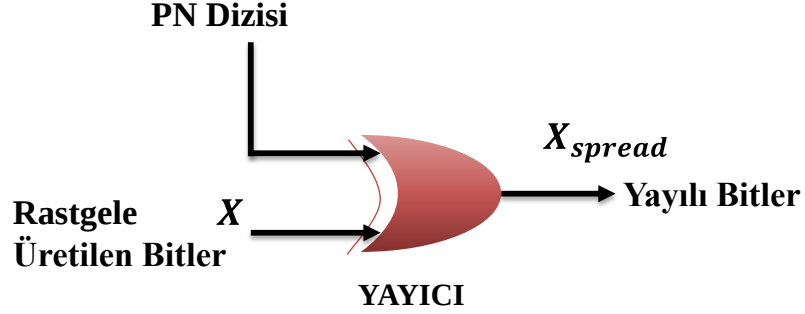
[95]'te Wang ve ark. frekans bölgesi yayımlı ACO-OFDM tekniğini önerdi. Ayrıca, önerilen planın başarısını artırmak için etkili veri algılama ve kod kanalı tahsis planlarını geliştirmeyi amaçladı. [96]'da Wu ve ark. RF sistemlerinde çalışılan DFT yayımlı OFDM dalga biçimini ve serpiştirilmiş DFT yayımlı OFDM dalga biçimini VLC iletişim sistemlerine uyguladı.

[88]'de önerilen alternatif bir tek kutuplu OFDM şeması, Flip-OFDM şemasıdır. Flip-OFDM'de, pozitif ve negatif bölümler iki kutuplu OFDM gerçek zamanlı bölge sinyalinin çıkarılır ve iki sıralı OFDM çerçevesinde gönderilir. Negatif kısım iletimden önce mutlak değeri alınarak pozitifte dönüştürüldüğü için her iki alt çerçevenin de pozitif örnekleri vardır. Literatürde ACO-OFDM ve DCO-OFDM ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen, Flip-OFDM'nin başarısı neredeyse hiç çalışılmamıştır.

Bu çalışmada, optik OFDM dalga formlarının daha önce RF sistemlerinde kullanılan ve referans [97]'den esinlenilen yayma tekniği ile birleştirilmesi amaçlanmıştır. Yayma tekniğinin çok taşıyıcılı optik kablosuz iletişim şemalarından biri olan Flip-OFDM dalga formunda ve DCO-OFDM ile VLC-OFDM gibi diğer optik OFDM dalga formlarında kullanılması literatürde ilk kez bu çalışma ile önerilmektedir. Literatürde optik OFDM şemalarının başarısını artırmak için farklı yayma teknikleri hakkında birkaç çalışma olmasına rağmen [95, 96], yazarların bildiği kadarıyla, önerilen yayma tekniğini Flip OFDM ve diğer optik OFDM dalga formları ile birleştirerek yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama iletimde araştırılan herhangi bir araştırma ve çalışma sistemine denk gelinmemiştir. Monte-Carlo simülasyonlarının sonuç verilerinde, önerilen yayma yöntemi uygulanarak optik telsiz haberleşme teknolojilerinde hem Flip-OFDM dalga formunun performanslarında hem de diğer optik OFDM dalga formlarının performanslarında önemli gelişmeler elde edildiği görülmektedir.

1. VLC SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN YAYMA TEKNİĞİ

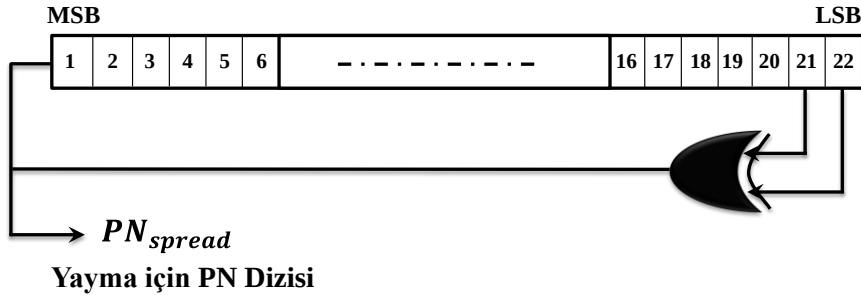
Önerilen yayma biriminin blok şeması Şekil 16’da gösterilmektedir.



Şekil 16. Yayma işlem birimi

Şekil 16, yayılma faktörü F_s ile yayılma verilerinin üretimini göstermektedir [97]. Şekil 16’da gösterilen yayma ünitesinin girişine rastgele üretilen data bitleri uygulanmaktadır. Her bir giriş biti, sembol hızında çalışan bir PN dizisi üreticinin F_s ardışıl çıkışları ile XOR’landığından, F_s sembol saatleri için tutulmalıdır. Setten yayılma faktörleri $F_s = 2^n$, $0 \leq n \leq n_{max}$ olarak yazılabilir. Burada, $n_{max} = 3$ (aşağı bağlantı için), 4 (yukarı bağlantı için) kullanılabilir [97]. Bu çalışmada n_{max} parametresi 3’e eşittir. XOR çıkışı, yayılmış bitler, istenen herhangi bir modülasyon tipine eşlenebilir.

Yayılma PN dizisi üretici, Şekil 17’de gösterilen doğrusal geri beslemeli kaydırmalı kaydediciden (LFSR) oluşturulmalıdır. Bu LFSR için karakteristik polinom $1 + x^{21} + x^{22}$ ile verilebilir. PN dizisi üretici, referans [98]’deki Tablo 184’te listelenen değerlerden biriyle bir yayma birimi tahsisinin başlangıcında önceden ayarlanabilir. Yayma için paket profili ayarı, belirlenecek değeri seçmek için kullanılır.



Şekil 17. Yayma PN dizisi üreticinin blok şeması

Seed 0 varsayılan ayardır. Seed 0 dışındaki herhangi bir değerin seçimi, yayma parametreleri için paket profili kodlamasının kullanılmasını gerektirir.

Yayıncının çıkışında alınan sinyal, Şekil 1’den görülebileceği gibi, X_{spread} , aşağıdaki eşitlikle verilebilir.

$$X_{spread}(k * F_s + i) = \sum_{i=0}^{F_s} PN_{spread}(k * F_s + i) \oplus X(k) \quad (27)$$

Burada PN_{spread} , yayılan PN dizi üreticinin çıktısıdır, X , rastgele data üreticinin çıkışıdır, F_s yayılma faktörüdür, $\oplus$ mantıksal XOR operatörüdür ve k , zaman indeksidir. Ters-Yayıncı çıkışında alınan sinyal, $Y_{de-spread}$ aşağıdaki eşitlikteki gibi verilebilir:

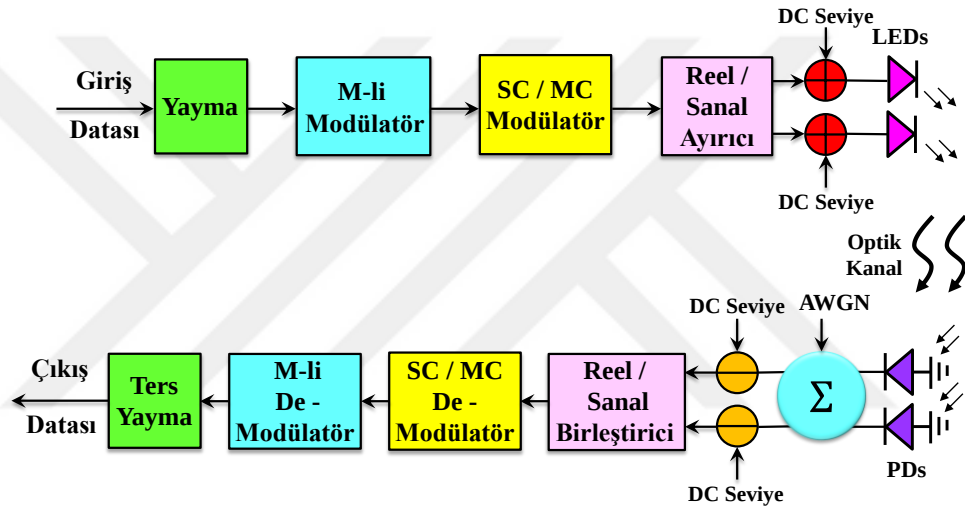
$$Y_{de-spread}(k) = \sum_{i=0}^{F_s} PN_{spread}(k * F_s + i) \oplus xu(k * F_s + i) \quad (28)$$

Burada, xu de-modüle edilen sinyali göstermektedir. Yayılma bloğunun çıkışı işaret yıldız diyagramındaki kümelerden herhangi birisine eşlenerek istenilen modülasyon kullanılabilir.

2. YAYILI SC VE MC VLC SİSTEMİ

VLC sistemlerinde kullanılabilir alternatif bir modülasyon şeması, kaynak [92, 93]'den esinlenerek geliştirilen yayma tekniği üzerine kurulu yayılı modülasyon şemasıdır. Yazarların bildiği kadarıyla, literatürde SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinde kullanan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Geliştirilen SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinde AWGN ve yayılmış (diffused) çok yollu optik kanallar üzerinden test edilmektedir.

Önerilen yayma yöntemini kullanan SC ve MC VLC sisteminin alıcı verici blok diyagramı Şekil 18'de gösterilmektedir.



Şekil 18. Yayılı BPSK modüleli SC ve MC VLC sistemlerinin blok şeması.

Şekil 18'de verilen SC ve MC VLC yapılarının gönderici tarafında rastgele oluşturulan seri giriş dataları kaynak [92]'de ayrıntılı bir şekilde açıklandığı gibi Yayma Bloğunda aşağıdaki eşitlik yardımıyla yayılmaya tabi tutulur.

$$Tx_{yayma}(k * F_s + i) = \sum_{i=0}^{F_s} PN_{yayma}(k * F_s + i) \oplus Tx(k) \quad (29)$$

burada, PN_{yayma} , yayılan PN dizi üreticinin çıkışıdır, Tx , rastgele data generatörünün çıkışıdır, F_s yayılma faktörüdür, $\oplus$ mantıksal XOR operatörüdür ve k , zaman indeksidir.

Ardından yayılan veriler M-li Modülatör Bloğunda BPSK modülasyonu ile modüle edilir. Sonrasında SC/MC Modülatör Bloğunda SC ve MC veri paketleri oluşturulur. VLC sistem yapısında bilgi gönderimi için yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama yöntemi uygulandığından, gönderilecek olan işaretin gerçel ve pozitif değerli olmalıdır. SC/MC Modülatör Bloğu çıkışında üretilen SC ve MC işaret Reel/Sanal Ayırıcı Bloğunda gerçel ve sanal olarak bölünür. Daha sonra, işaretler gerçel fakat çift kutuplu işaretler olmasından dolayı blok şemasından da incelendiği üzere iki bileşeninde DC seviye ile iletilen bilgi verisinin pozitif hale getirilmesi IM/DD iletimi için yetersiz kalmaktadır. Yapılan çalışmalarda iletilen bilgi işaretinin DC seviyesi en küçük değeri sıfır olacak biçimde seçilmektedir. Oluşturulan gerçel pozitif işaretler LED ile optik çok yollu kanaldan gönderilerek foto diyotlar aracılığıyla alınıp toplanarak beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) ile bozuk hale getirilir. Blok şemasının alıcı tarafında, verici sisteminde gerçekleştirilen işlemlerin uygulanarak Reel/Sanal Birleştirici Bloğu çıkışında gürültüyle bozulmuş hale getirilen bilgi verisi oluşturulmuştur. Bozulan bilgi işareti uygun denkleştirme yöntemleri uygulanarak düzeltilir. Daha sonra SC/MC De-Modulator Bloğu çıkışında çözümlenen sinyaller M-li De-Modülatör Bloğunda de-modülasyona tabi tutulur. Ardından Ters-Yayma Bloğunda aşağıda verilen eşitlik yardımıyla ters yayma işlemleri uygulanarak çıkış dataları elde edilir.

$$Rx_{ters-yayma}(k) = \sum_{i=0}^{F_s} PN_{yayma}(k * F_s + i) \oplus y(k * F_s + i) \quad (30)$$

burada, y de-modüle edilen sinyali göstermektedir. Daha sonra da çıkışta oluşturulan verilerden yararlanarak istenen performans parametreleri hesaplanabilmektedir.

A. Kablosuz Optik Kanal Sistemi

Tezde çalışılan sistemde, yayma faktörlü optik kablosuz kanalın dürtü cevabını (CIR) modellemek için tavan sıçramalı sistem kanalı kullanılmaktadır.

İç mekan optik kablosuz kanalının dürtü yanıtı, bağımsız bir LOS bağlantısı, dağınık bağlantı veya bağlantı konfigürasyonuna bağlı olarak LOS ve dağınık bağlantı

kombinasyonu olarak modellenenebilir. Dirac delta fonksiyonları, $\delta(t)$, LOS bağlantılarının CIR'ini modellemek için temel fonksiyon olarak kullanılırken, yansıyan optik sinyal dağınık bir yapıya sahip olduğundan, birim basamak fonksiyonları dağınık bağlantıları modellemek için kullanılır. LOS bağlantısının CIR'i, $h_{LOS}(t)$, aşağıdaki eşitlikteki gibi modellenenebilir [61]:

$$h_{LOS}(t) = g_{LOS}\delta(t) \quad (31)$$

Burada, g_{LOS} , yönlendirilmiş LOS bağlantısının optik yol kazancıdır.

Dağınık bağlantı için, dağınık bağlantının CIR'inin ortak etkisi olan $h'_{dif}(t)$, $h_{dif}(t)$ ve dağınık bağlantı optik yol kazancı, g_{dif} , aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılabilir [61]:

$$h'_{dif}(t) = g_{dif}h_{dif}(t) \quad (32)$$

Üstel azalma (decay) ve tavan sıçrama (ceiling bounce) modelleri, iyi bir doğrulukla dağınık bağlantıların CIR'sini modellemek için iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan iki tekniktir [62]. Üstel azalma modeli, iletilen optik dalgalar alıcıya ulaşmadan önce birden fazla yansıma yaşadığında en uygundur. Bu nedenle, $h_{\text{üstel-azalma}}(t)$, üstel azalma modelinden dağınık bağlantının CIR'i aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılabilir [61, 86-88]:

$$h_{\text{üstel-azalma}}(t) = H(0) \frac{1}{D_{RMS}} e^{\frac{-t}{D_{RMS}}} u(t) \quad (33)$$

Burada, $H(0)$ DC optik yol kazancı, D_{RMS} kanalın RMS gecikmesi, $u(t)$ birim basamak fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Tavandan yansıma sistem şeması, tek yansıma yaşadığında alınan optik dalgaların çoğu doğrudur. Bu yüzden, $h(t)$, tavan sıçrama sistemden dağınık bağlantının CIR'i aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılabilir [61, 86-88]:

$$h(t) = H(0) \frac{6a^6}{(t+a)^7} u(t) \quad (34)$$

Burada, $a = 12(\sqrt{11/13})D_{RMS}$ olarak alınır. Yansıyan optik sinyallerin optik yol kaybını açıklayan denklem (2.51)'deki optik yol kazancı $H(0)$ aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılabilir [61]:

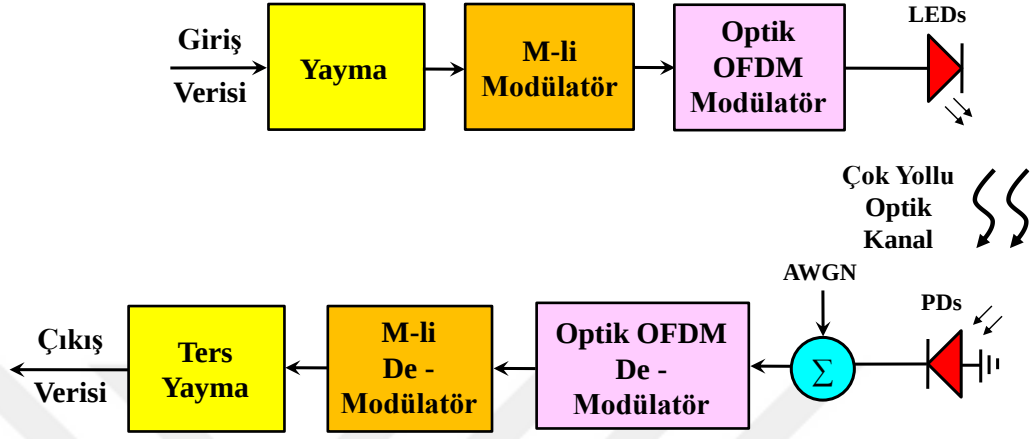
$$H(0) \approx \int_0^{\infty} |h(t)| dt \quad (35)$$

Denklem (2.50)'deki $h_{dif}(t)$ terimi, sırasıyla üstel azalma $\frac{e^{-t/D_{RMS}}}{D_{RMS}}$ terimi ve tavan sıçrama $\frac{6a^6}{(t+a)^7}$ terimi modellerine eşdeğerdir ve bu modeller için geçerlidir. Denklem (2.50)'deki g_{dif} terimi aynı zamanda hem tavan sıçraması hem de üstel azalma modelleri için $H(0)$ terimine eşdeğerdir. Hem LOS hem de yayılmış (diffused) bileşenlere sahip yönlendirilmemiş LOS (N-LOS) bağlantı konfigürasyonu durumunda, CIR, $h_{N-LOS}(t)$, aşağıdaki eşitlikteki gibi verilebilir:

$$h_{N-LOS}(t) = h_{LOS}(t) + h'_{dif}(t) = g_{LOS}\delta(t) + g_{dif}h_{dif}(t - \Delta T) \quad (36)$$

3. ÖNERİLEN YAYILI OPTİK OFDM DALGA FORMU

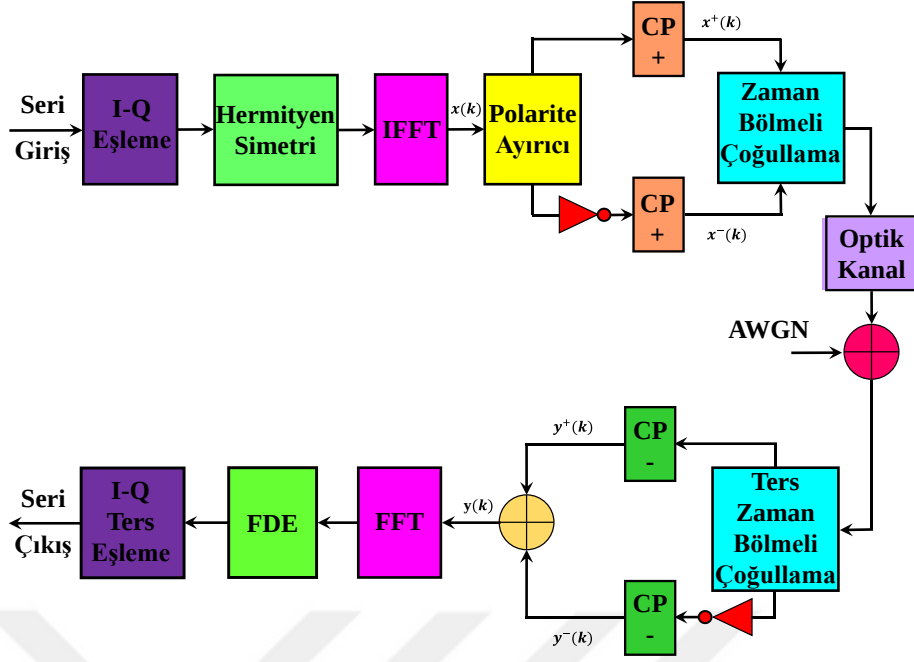
Önerilen yayma yöntemini kullanan optik OFDM sisteminin alıcı verici blok diyagramı Şekil 19’de gösterilmektedir [99].



Şekil 19. Önerilen yayılı optik OFDM dalga formunun blok diyagramı.

Şekil 19’da verilen optik OFDM yapısının verici tarafında rastgele oluşturulan seri giriş dataları bir önceki bölümde açıklandığı gibi Yayma Bloğunda yayılmaya tabi tutulur. Ardından yayılan veriler M-li Modülâtör Bloğunda BPSK modülasyonu ile modüle edilir. Daha sonra Optik OFDM Modülâtör Bloğunda istenen optik OFDM veri paketleri üretilir. Bu araştırmada, literatürdeki en değerli optik OFDM yöntemlerinden Flip-OFDM şeması kullanılmaktadır.

Şekil 20’de Flip-OFDM blok şeması verilmektedir. Flip-OFDM şemasında, kiplenen bilgi sinyalleri IFFT bloğu çıkışı gerçel sayılar oluşturulması için Hermityen simetri işlemi uygulanır. Kullanılan simetri işlemi üretilmesi için modüle edilen bilgi sinyallerinin meydana getirildiği $T_s = T_{sym}/N$ süreli simge vektörleri paralel bloklar şeklinde işlenerek oluşturulur. Frekans bölgesinde modüle hale getirilen veriler $[X = X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$ şeklindedir ve Hermityen simetrik yapı haline gelmektedir ve bu sistem 0 (DC) ve $N/2$ indisli alt taşıyıcıların sıfıra denkleştirilmesiyle oluşturulmaktadır.



Şekil 20. Flip-OFDM blok şeması

Hermityen sisteminin frekans bölgesindeki denkliği gösterilebilir;

$$X[k] = \begin{cases} 0, & \text{if } k = 0 \\ X[k], & \text{if } k = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2}\right) - 1 \\ X^*[N - k], & \text{if } k = \left(\frac{N}{2}\right) + 1, \left(\frac{N}{2}\right) + 2, \dots, N \\ 0, & \text{if } k = \frac{N}{2} \end{cases} \quad (36)$$

Gösterilen (*), karmaşık eşleniğini ifade etmektedir. IFFT çıkışında zaman bölgesinde gösterildiği gibi çift kutuplu işaret sinyali oluşturulur.

$$x(k) = x^+(k) + x^-(k) \quad (37)$$

Burada, $x^+(k)$ işaretin pozitif tarafını ve $x^-(k)$ da negatif tarafını ifade etmektedir. Tek kutuplu sinyali oluşturmak için verilen denklemlerde pozitif ve negatif tarafını ayrıştırılır.

$$x^+(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) \geq 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (38)$$

$$x^-(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) < 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (39)$$

Flip-OFDM şemasında, gerçek zamanlı iki kutuplu işaretin bölünmesi bir Polarite Ayırıcı uygulanarak elde edilir. Negatif taraf $x^-(k)$ 'nin polaritesi tam tersine dönüştürülmüş işareti oluşturmak için bir polarite güç çevirici kullanılır, yani mutlak değeri alınır, $-x^-(k)$. Pozitif taraf olan $x^+(k)$ ve polaritesi ters döndürülmüş negatif taraf $-x^-(k)$ birbirini izleyen iki Flip-OFDM çerçevesi ile ayrı ayrı gönderilir. Pozitif işaret Flip-OFDM'nin pozitif alt çerçevede (birinci alt çerçevesinde) gönderilir ve polarite ters döndürülmüş negatif işaret Flip-OFDM'in diğer alt çerçevesinde (negatif alt çerçeve) gönderilir. Flip-OFDM'in her bir alt çerçevesine periyodik önek (CP) ilave edilerek zaman bölmeli çoğullama uygulanarak Flip-OFDM data paketleri oluşturulur. Oluşturulan Flip-OFDM data paketleri LED'ler aracılığıyla sönmülemeli çok yollu optik kanal sistemi ile gönderilip toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) ile bozulmuş hale getirilerek alıcıya gönderilir. Bozulmuş işaretler alıcıya ulaştıktan sonra frekans bölgesi veya zaman bölgesi denkleştiricileri ile tamir edildikten sonra vericide uygulananların tersi yapılarak M-li De-Modülatör Bloğu çıkışında seçilen işaretler meydana getirilir. Sonuçta BER ve PAPR gibi istenen performans parametreleri hesaplanmaktadır.

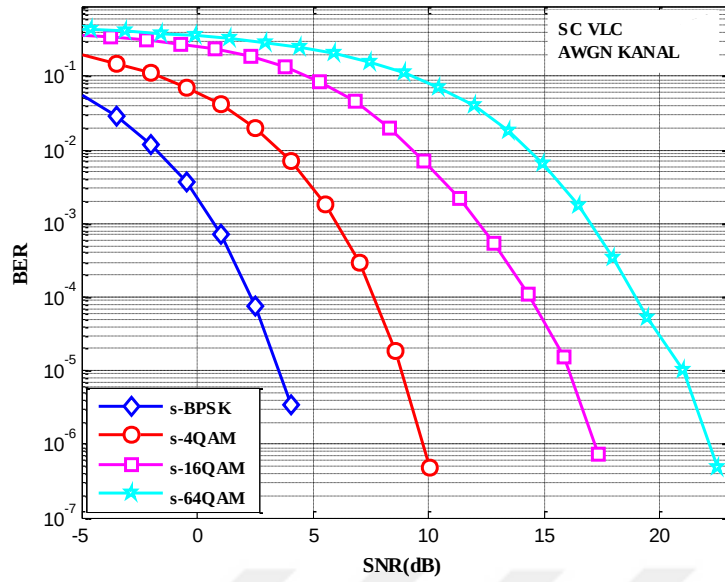
YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR**3. YAYILI SC VE MC SİSTEMLERİ**

Sayısal sonuçların elde edilmesi iki bölüm halinde yapılmıştır. Birinci bölümde AWGN kanal sayısal benzetimleri ve ikinci bölümde tavan sıçrama (ceiling bounce), üstel azalan (exponential decay) ve üstel artan (exponential risen) kanal modellerinin kullanıldığı 5 dallı dağınık çok yollu optik kanal sayısal benzetimleri sunulmuştur. Tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan channel modellerinde $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ ve $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için benzetimler yapılmıştır. Tüm simülasyonlarda BPSK modülasyonu ile önerilen S-BPSK modülasyonunun kullanıldığı SC-VLC ve MC-VLC sistemleri karşılaştırılmaktadır. 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM modülasyonlarının performansları incelenmek üzere yapılmıştır. MC-VLC sistemlerinde OFDM veri paketleri IEEE 802.11a Standartına uygun olarak 64 noktalı FFT kullanılarak hazırlanmıştır.

A. AWGN Kanalda Sayısal Analiz Sonuçları

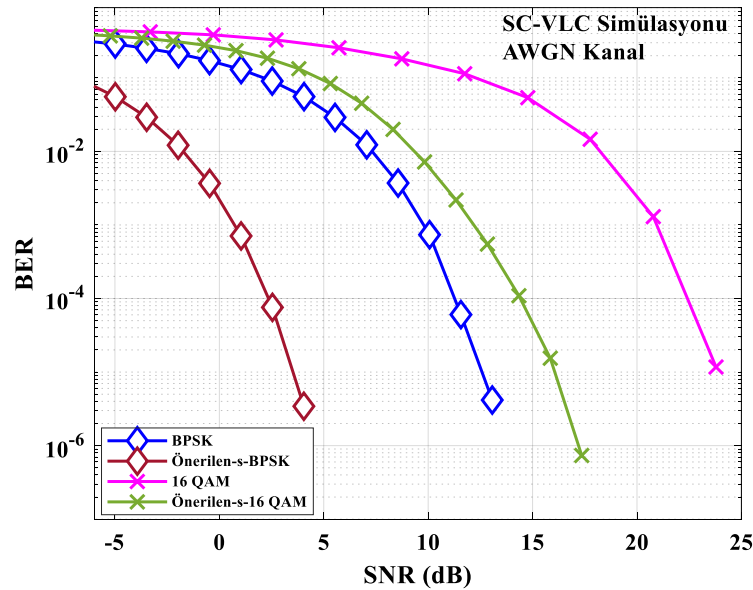
Birinci kısımda, SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin AWGN kanalı ile BER-SNR performansları kıyaslanmaktadır. Simülasyon analizleri 1000 Monte Carlo döngüsü ile haberleşme sistemlerinin 1000 veri paketi üzerinden BPSK modülasyonu ve önerilen S-BPSK modülasyonu kullanılarak oluşturulmuştur.

Şekil 21’de SC-VLC sistemlerinin S-BPSK, S-4QAM, S-16QAM ve S-64QAM için AWGN kanalda elde edilen BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması sunulmaktadır. SC-VLC sisteminde AWGN kanal ortamında BER-SNR performanslarının kıyaslandığı en iyi performansı BPSK modülasyonu ile sağladığı görüldü. S-BPSK modülasyonu ile çalışmamız en iyi performansı gösterdiği için bundan sonra yapılacak çalışmalarda ve literatüre katkı açısından BPSK modülasyonu kullanılarak elde edilen sonuçlar gösterilecektir.



Şekil 21. AWGN kanal ortamında SC-VLC sisteminde s-BPSK, s-4QAM, s-16QAM, s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması.

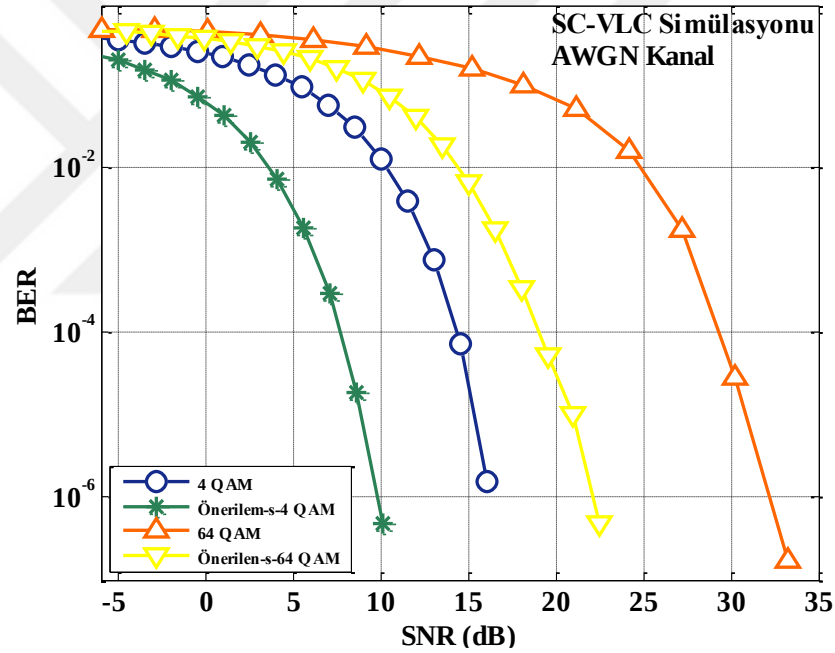
Şekil 22’de SC-VLC sistemlerinin BPSK, s-BPSK, 16-QAM ve s-16QAM modülasyonları için AWGN kanalda elde edilen BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır.



Şekil 22. AWGN kanal ortamında SC-VLC sisteminde BPSK, 16-QAM, s-BPSK ve s-16QAM için BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması.

Şekil 22’de AWGN kanal ortamında BER-SNR performanslarının kıyaslandığında en iyi performansı s-BPSK modülasyonu ile sağladığı görülmektedir. S-BPSK modülasyonu yayılma faktörü eklenmemiş olan BPSK modülasyonuna karşı yaklaşık 9-dB SNR kazancı elde ettiği görülmektedir. Yine s-16QAM modülasyonuna bakıldığında yayılma faktörü eklenmeyen 16QAM modülasyonuna karşı yaklaşık 8.5dB’lik bir SNR kazancı sağladığı yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. S-BPSK modülasyonun, s-16QAM modülasyonu ile arasında yaklaşık 13dB’lik bir fark olduğu görülmektedir. S-BPSK’nın en iyi performansı sağladığı görülmektedir.

Şekil 23’de SC-VLC sistemlerinin 4-QAM, s-4QAM, 64-QAM ve s-64QAM modülasyonları için AWGN kanalda elde edilen BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır.

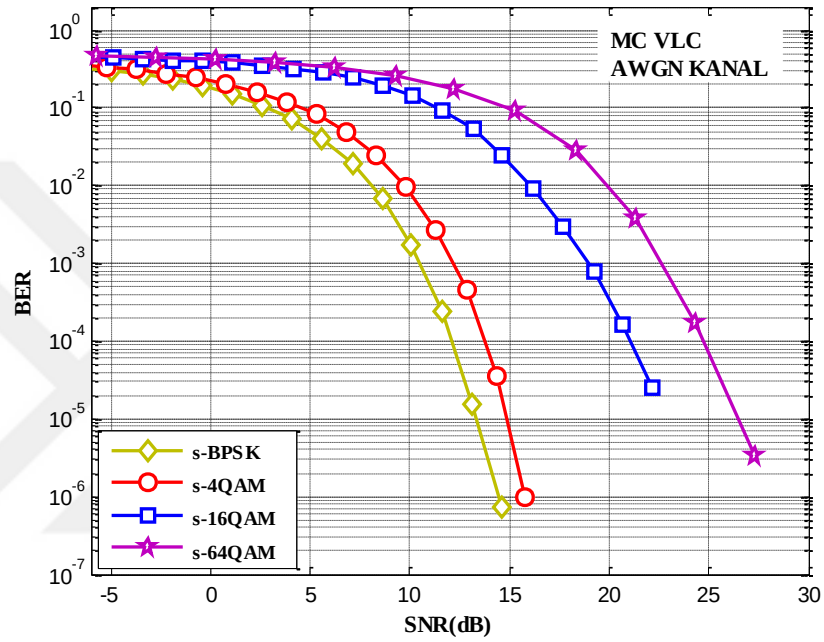


Şekil 23. AWGN kanal ortamında SC-VLC sisteminde 4QAM, s-4QAM, 64-QAM, ve s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması.

Şekil 23’de AWGN kanal ortamında BER-SNR performansları incelendiğinde s-4QAM modülasyonunun SNR kazancı 4-QAM modülasyonundan daha iyi olduğu görülmektedir. Yaklaşık olarak 7dB’lik bir SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

S-64QAM modülasyonu yayılma faktörü eklenmemiş olan 64QAM modülasyonuna karşı yaklaşık 11-dB'lik SNR kazancı elde ettiği görülmektedir. Simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi yayılma faktörü eklenen modülasyonların dB kazancı açısından gayet verimli oldukları görülmektedir.

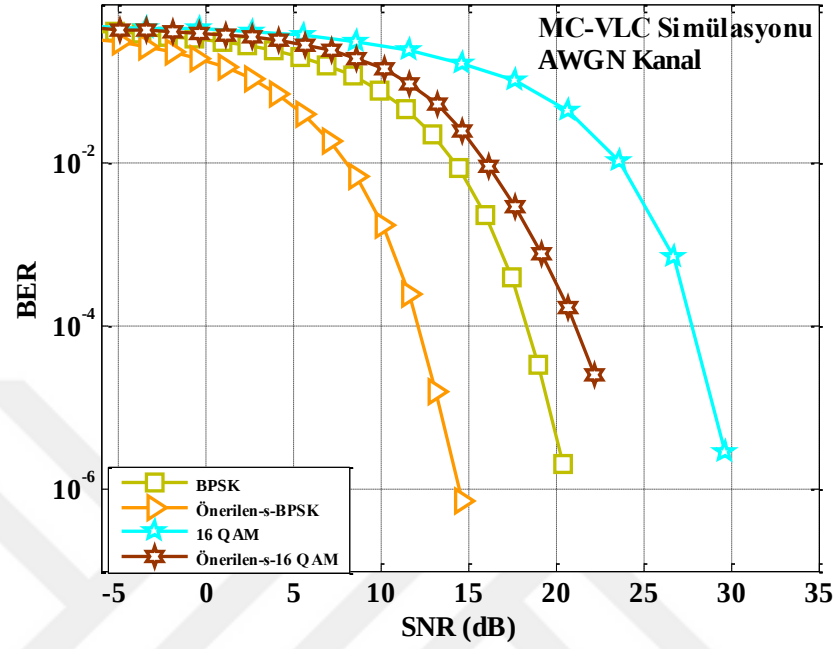
Şekil 24'te MC-VLC sistemlerinin S-BPSK, S-4QAM, S-16QAM ve S-64QAM için AWGN kanalda elde edilen BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması sunulmaktadır.



Şekil 24. AWGN kanal ortamında MC-VLC sisteminde s-BPSK, s-4QAM, s-16QAM, ve s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması.

MC-VLC sisteminde AWGN kanal ortamında BER-SNR performanslarının kıyaslandığı en iyi performansı s-BPSK modülasyonu ile sağladığı görülmektedir. S-BPSK modülasyonu ile çalışmamız en iyi performansı gösterdiği için bundan sonra yapılacak çalışmalarda ve literatüre katkı açısından BPSK modülasyonu kullanılarak elde edilen sonuçlar gösterilecektir

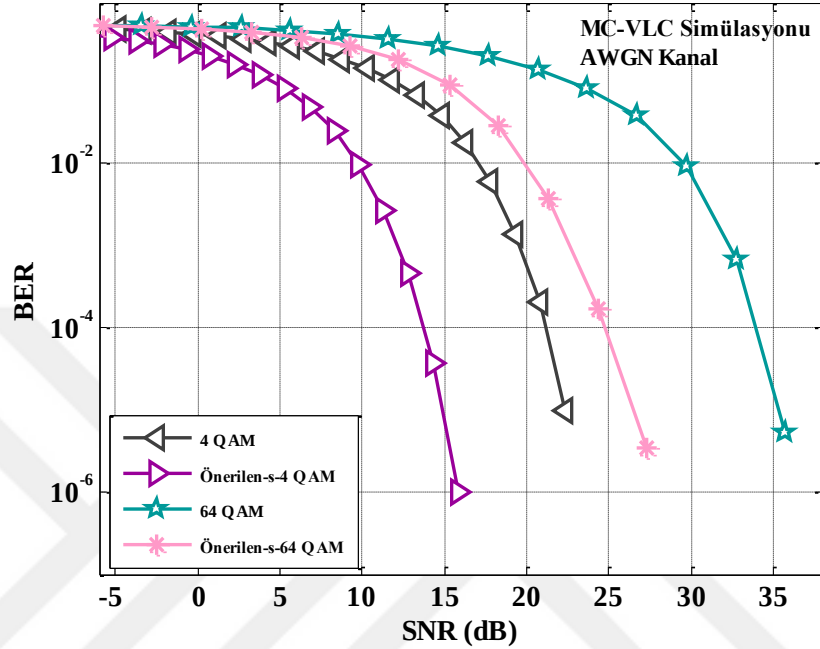
Şekil 25'te MC-VLC sistemlerinin BPSK, s-BPSK, 16-QAM ve s-16QAM modülasyonları için AWGN kanalda elde edilen BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır.



Şekil 25. AWGN kanal ortamında MC-VLC sisteminde BPSK, s-BPSK, 16QAM, ve s-16QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması.

Şekil 25'te MC-VLC sisteminde AWGN kanal ortamında BER-SNR performanslarının kıyaslandığında en iyi performansı önerilen s-BPSK modülasyonu ile sağladığı görülmektedir. S-BPSK modülasyonu yayılma faktörü eklenmemiş olan BPSK modülasyonuna karşı yaklaşık 6-dB SNR kazancı elde ettiği görülmektedir. Yine s-16QAM modülasyonuna bakıldığında yayılma faktörü eklenmeyen 16QAM modülasyonuna karşı yaklaşık 7-dB'lik bir SNR kazancı sağladığı yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. S-BPSK modülasyonun, s-16QAM modülasyonu ile arasında yaklaşık 9 dB'lik bir fark olduğu görülmektedir. S-BPSK'nın en iyi performansı sağladığı görülmektedir.

Şekil 26’da MC-VLC sistemlerinin 4QAM, s-4QAM, 64QAM ve s-64QAM modülasyonları için AWGN kanalda elde edilen BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır.

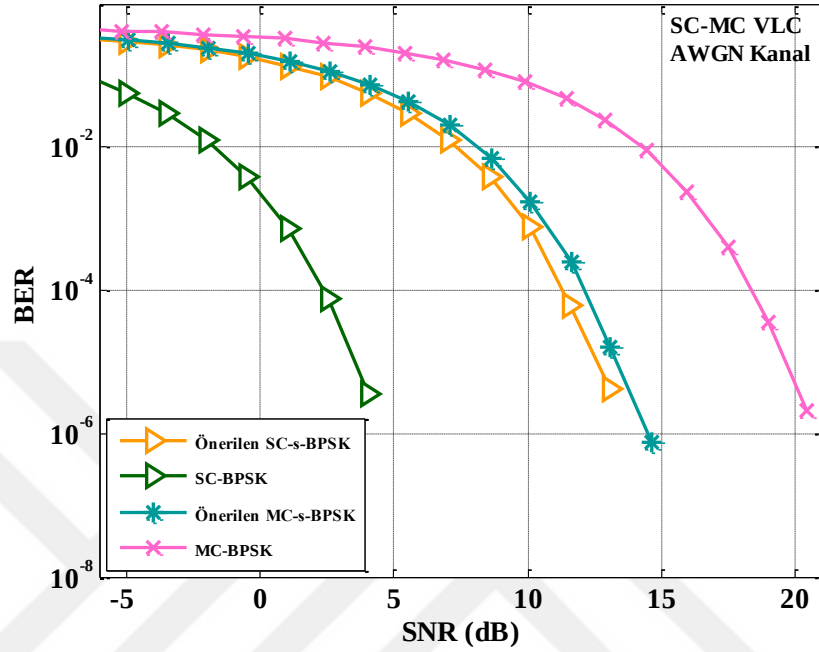


Şekil 26. AWGN kanal ortamında MC-VLC sisteminde 4QAM, s-4QAM, 64QAM, ve s-64QAM için BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması.

Şekil 26’da MC-VLC sisteminde AWGN kanal ortamında BER-SNR performanslarının kıyaslandığında önerilen yayılma faktörlü modülasyonların daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. S-4QAM modülasyonu 4QAM modülasyonuna karşı yaklaşık olarak 7dB’lik SNR kazancı elde edildiğini göstermektedir. S-64QAM modülasyonu da 64QAM modülasyonuna göre 9dB’lik SNR kazancı elde etmiştir.

Şekil 27’de SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin AWGN kanalı için elde edilen BER-SNR kazanımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır. SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin AWGN kanalında BER-SNR performanslarının kıyaslandığı Şekil 27’de, önerilen S-BPSK modülasyonunu kullanan SC-VLC sisteminin MC-VLC sistemini

geçerek, $1E-4$ BER değeri için yaklaşık 10 dB SNR elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, BPSK modülasyonunu kullanan SC-VLC sisteminin MC-VLC sistemini geçerek, $1E-4$ BER değeri için yaklaşık 7.5 dB SNR kazancı olduğu görülmektedir.



Şekil 27. AWGN kanal ortamında SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin BER-SNR kazanımlarının kıyaslanması.

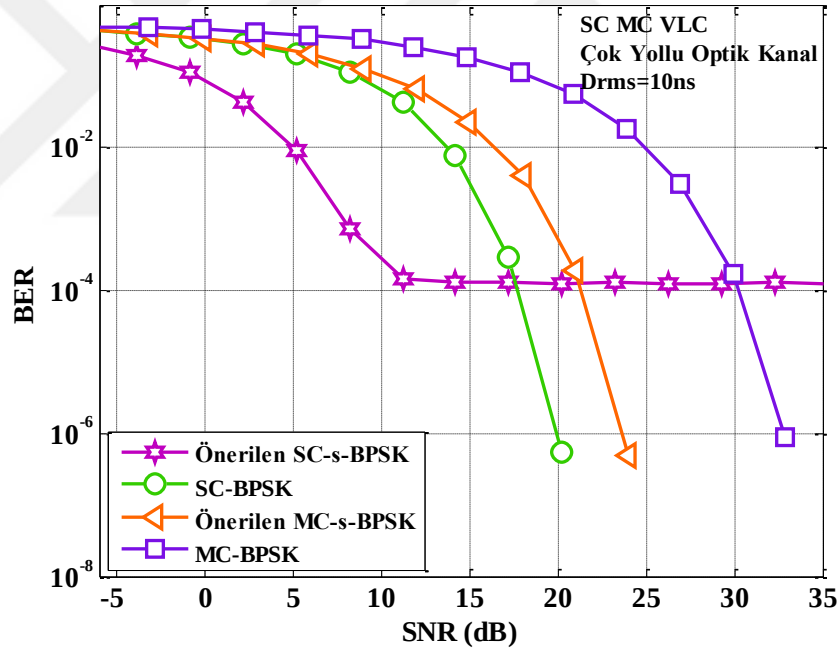
Önerilen teknikle meydana getirilen bu performans iyileştirmesi, önerilen yayma tekniğinin ardışıl hata patlamalarını engellemesi ile açıklanabilir. Böylece, karmaşıklıkta çok az bir artışla önerilen S-BPSK, VLC sistemlerine pratik alternatif bir modülasyon tekniği sunar ve klasik BPSK'ya karşı da önemli BER iyileştirmesi sağlar.

B. Çok Yollu Optik Kanal Sayısal Analiz Sonuçları

Paylaşılan sayısal sonuçların ikinci evresinde, detaylı olarak verilen tavan sıçrama kanal modelinin uygulandığı yayılmış çok yollu optik kablosuz kanal ortamında SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin BER-SNR başarımları kıyaslanmaktadır. Sayısal analiz sonuçları 1000 Monte Carlo döngüsünde 1000 veri paketi ile BPSK modülasyonu ve önerilen S-BPSK modülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada incelenen

tüm haberleşme sistemlerinde, 5 dallı yayılmış optik kablosuz kanalı denkleştirmek için SC-VLC sistemlerinde ileri beslemeli 9 dallı süzgeç ve geri beslemeli 4 dallı süzgeçten meydana gelen kanal uyumlu filtre karar geri beslemeli denkleştirici (CMF-DFE) ve MC-VLC sistemlerinde ise frekans bölgesi denkleştirici (FDE) kullanılmaktadır. Her iki denkleştirici yapısında da kanal katsayılarının alıcıda bilindiği kabul edilmektedir. Bunlara ek olarak, özyineli en küçük kareler (RLS) algoritmasının kullanıldığı ileri beslemeli 9 dallı süzgeç ve geri beslemeli 4 dallı süzgeçten meydana gelen karar geri beslemeli denkleştirici (RLS-DFE) yapısı ile üretilen performanslar da sonuçlara dahil edilmiştir.

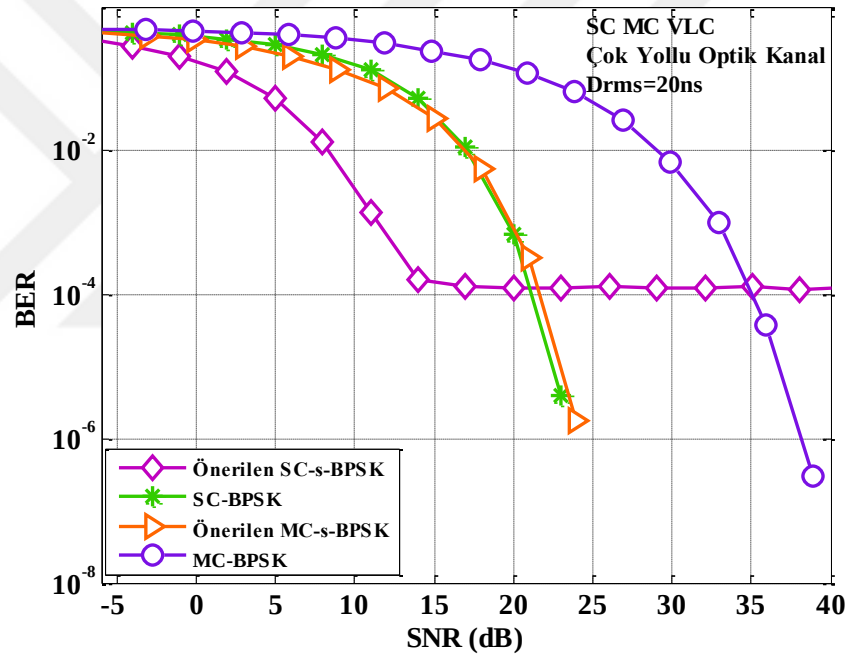
Şekil 28’de SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin tavan sıçrama kanal modelinde $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması



Şekil 28. $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması.

Çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR kazanımlarının sunulduğu Şekil 28 kıyaslandığında, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı SC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 10 dB, BPSK modüeli SC-VLC sisteminden 6.5 dB ve BPSK modüeli MC-VLC sisteminden de 19 dB daha iyi performans sergilediği anlaşılmaktadır. Ek olarak, önerilen S-BPSK'lı SC-VLC sisteminin 11 dB SNR'den sonra $1E-4$ hata tabanına yakınsadığı görülmektedir.

SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin tavan sıçramalı kanal modelinde $D_{RMS} = 20$ ns olarak alındığı 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR performanslarının kıyaslaması Şekil 29'da paylaşılmaktadır.

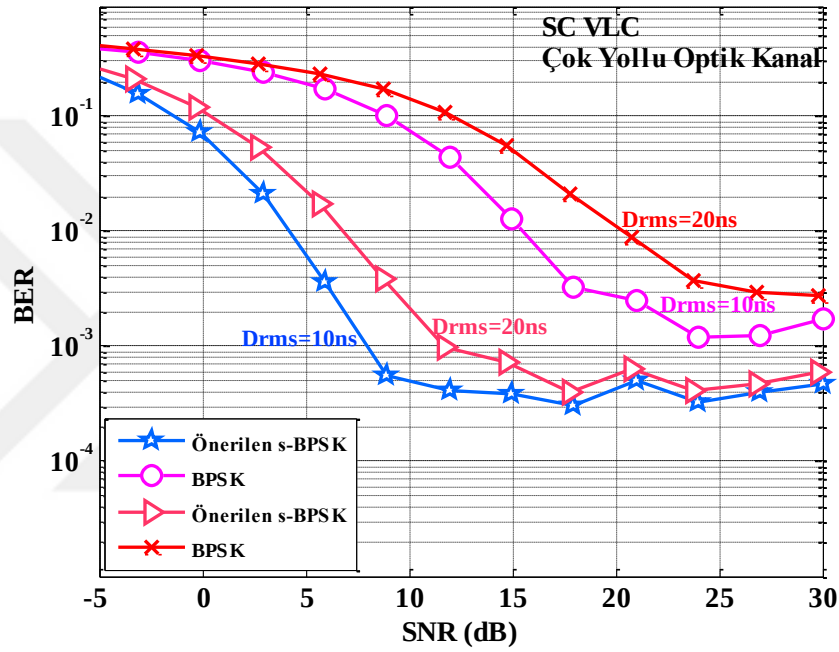


Şekil 29. $D_{RMS} = 20$ ns için SC-VLC ve MC-VLC sistemlerinin 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 29 değerlendirildiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı SC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sisteminden

yaklaşık olarak 7 dB, BPSK modüleli SC-VLC sisteminden 7 dB ve BPSK modüleli MC-VLC sisteminden de 21 dB daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, önerilen S-BPSK'lı SC-VLC sisteminin 14 dB SNR kazancından sonra $1E-4$ hata tabanına yakınsadığı tespit edilmektedir.

Şekil 30'da, SC-VLC sistemlerinde tavan sıçramalı kanal modelinde $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ ve $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ alındığı 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda RLS-DFE ile oluşturulan BER-SNR performanslarının kıyaslaması gösterilmektedir.



Şekil 30. $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ ve $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ için SC-VLC sistemlerinin 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması

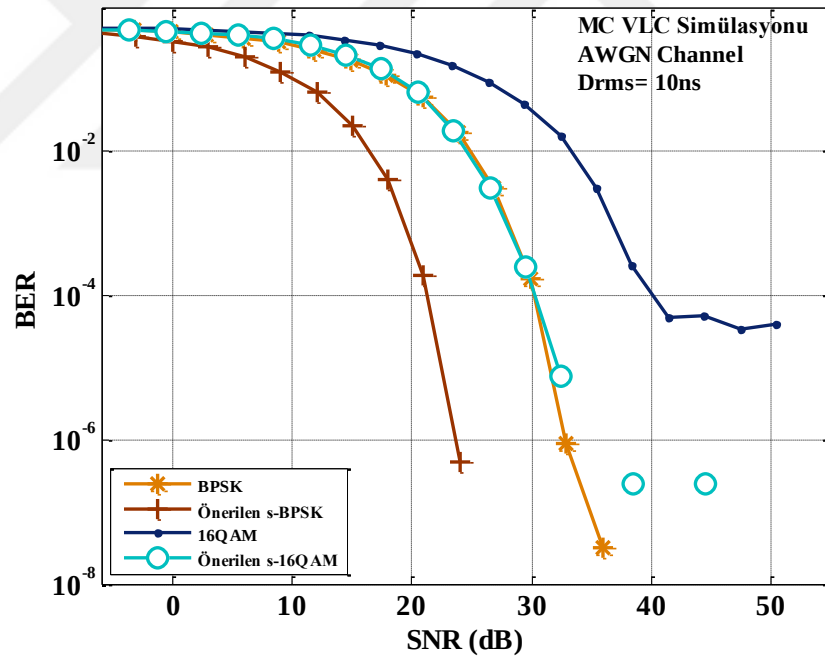
Çok yollu yayma faktörlü optik kanalda BER-SNR performanslarının sunulduğu Şekil 30 analiz edildiğinde, RMS'in 10 ns olduğu sonuçlardan $1E-3$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı SC-VLC sistemi ile elde edilen performansın BPSK'lı SC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 16 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, RMS'in 10 ns ve 20 ns olması durumunda önerilen S-BPSK'lı SC-VLC sistemlerinin

10 dB SNR değerinden sonra hata tabanına gittiği ve aralarında da 4 dB'lik bir performans farkının olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır.

a. MC-VLC Sisteminde M-QAM'li Modülasyonlar ile Örnek Çalışmalar

Bu bölümde BPSK, 4QAM, 16QAM ve 64QAM'in AWGN kanalında tavan sıçrama (ceiling bounce), üstel azalan (exponential decay) ve üstel artan (exponential risen) kanal modellerinin kullanıldığı 5 dallı dağınmış çok yollu optik kanal sayısal benzetimleri sunulmuştur. Tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan channel modellerinde $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ ve $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ için benzetimler yapılmıştır.

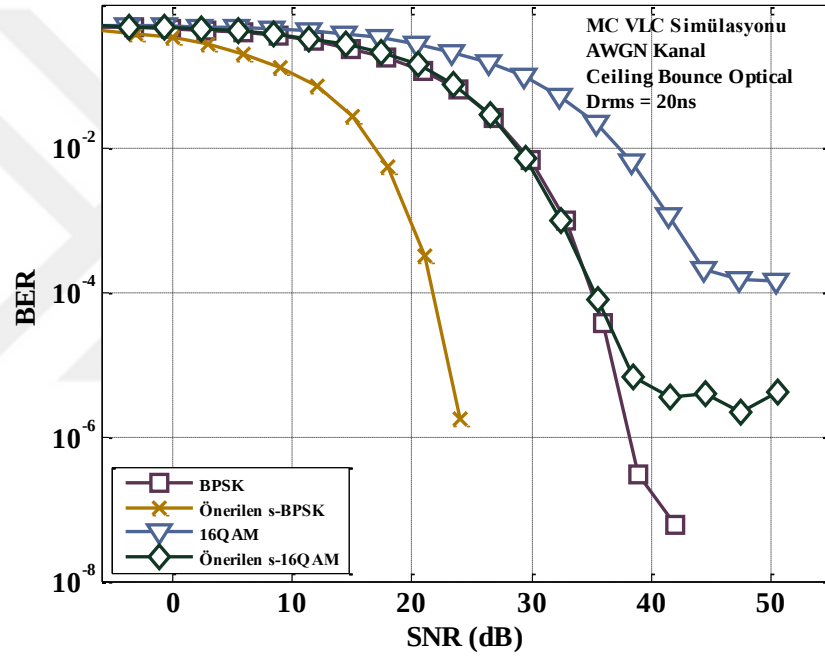
Şekil 31'de MC-VLC sistemlerinin tavan sıçrama (ceiling bounce optical channel) kanal modelinde BPSK ve 16QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ alındığı 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanal sisteminde BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 31. $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR karşılaştırılması

Şekil 31 değerlendirildiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-16QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 9 dB, BPSK modüleli MC-VLC sisteminden 9 dB ve 16QAM modüleli MC-VLC sisteminden de 19 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 32'de MC-VLC sistemlerinin tavan sıçrama (ceiling bounce optical channel) kanal modelinde BPSK ve 16QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ alındığı 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanal sisteminde BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.

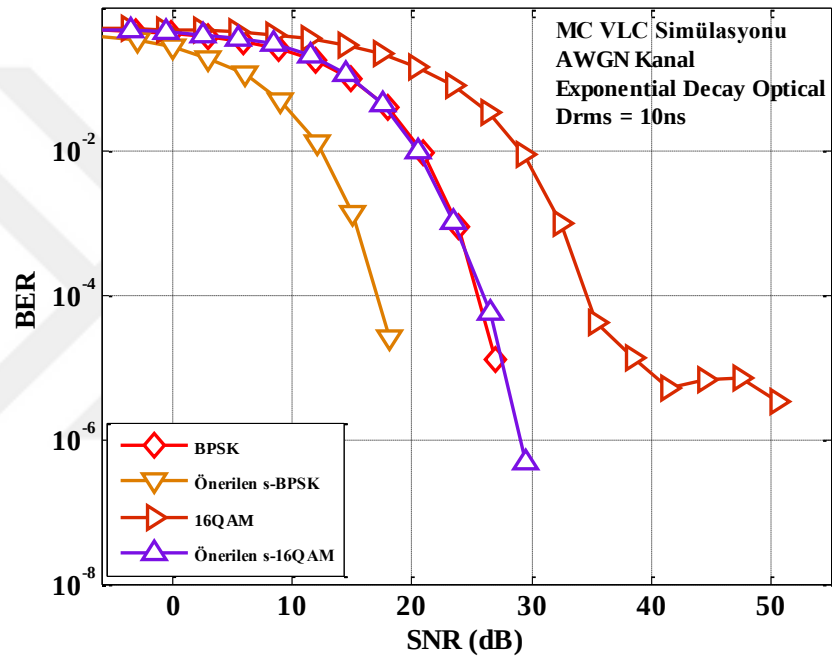


Şekil 32. $D_{rms} = 20\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 32 incelendiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-16QAM MC-VLC

sisteminden yaklaşık olarak 16 dB, BPSK modüli MC-VLC sisteminden 14 dB ve 16QAM modüli MC-VLC sisteminden de 38 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, önerilen S-16QAM'lı MC-VLC sisteminin $1E-4$ BER değerinde hata tabanına yakınsadığı sonuçlardan tespit edilmektedir.

Şekil 33'de MC-VLC sistemlerinin üstel azalan (exponential decay optical channel) kanal modelinde BPSK ve 16QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 10\text{ ns}$ alındığı 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanal sisteminde BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.

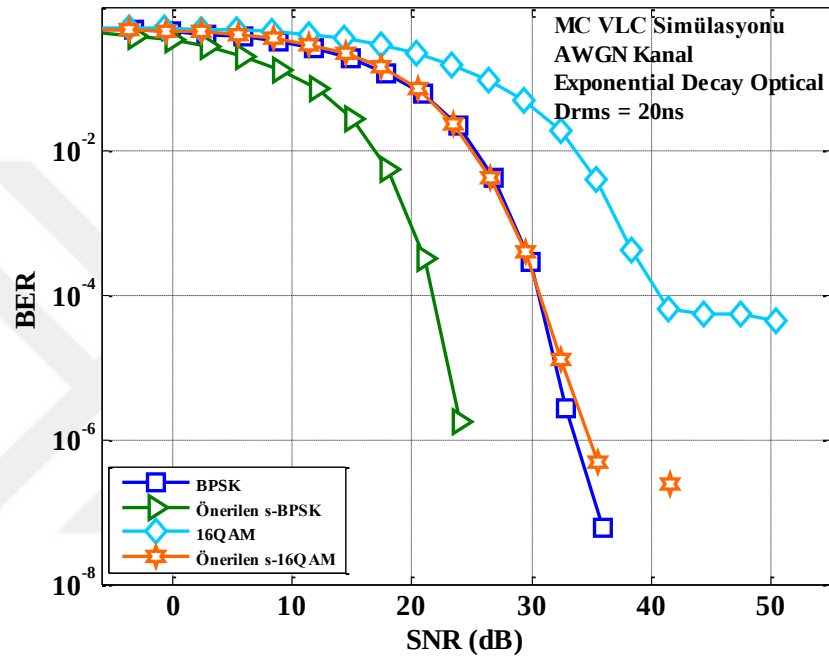


Şekil 33. $D_{rms} = 10\text{ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 33 değerlendirildiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-16QAM MC-VLC

sisteminden yaklaşık olarak 9 dB, BPSK modüveli MC-VLC sisteminden 10 dB ve 16QAM modüveli MC-VLC sisteminden de 17 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

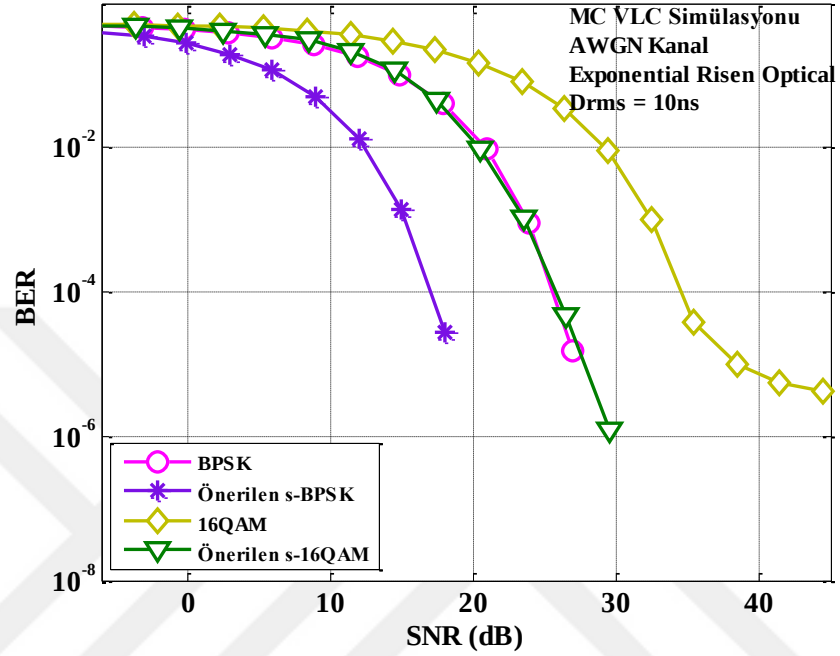
Şekil 34'te MC-VLC sistemlerinin üstel azalan (exponential decay optical channel) kanal modelinde BPSK ve 16QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 20\text{ ns}$ alındığı 5 dallı yayma faktörlü optik kablolu kanal ortamında BER-SNR kıyaslaması gösterilmektedir.



Şekil 34. $D_{rms} = 20\text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablolu kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 34 değerlendirildiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1\text{E-}4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-16QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 8 dB, BPSK modüveli MC-VLC sisteminden 9 dB ve 16QAM modüveli MC-VLC sisteminden de 18 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 35'te MC-VLC sistemlerinin üstel artan (exponential risen optical channel) kanal modelinde BPSK ve 16QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ alındığı 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.

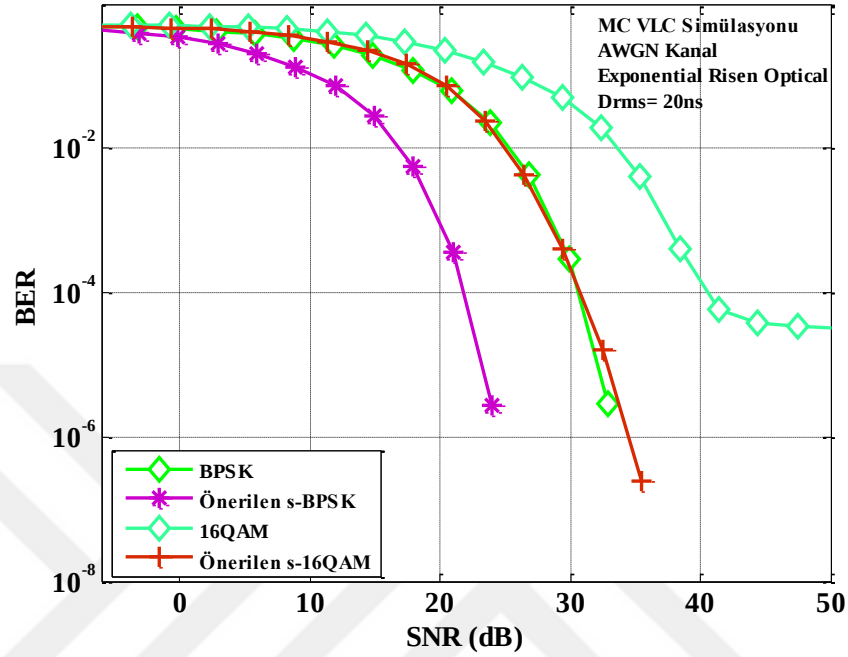


Şekil 35. $D_{rms} = 10 \text{ ns}$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 35 değerlendirildiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1\text{E-}4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-16QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 10 dB, BPSK modüleli MC-VLC sisteminden 10 dB ve 16QAM modüleli MC-VLC sisteminden de 16 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 36'da MC-VLC sistemlerinin üstel artan (exponential risen optical channel) kanal modelinde BPSK ve 16QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ olarak

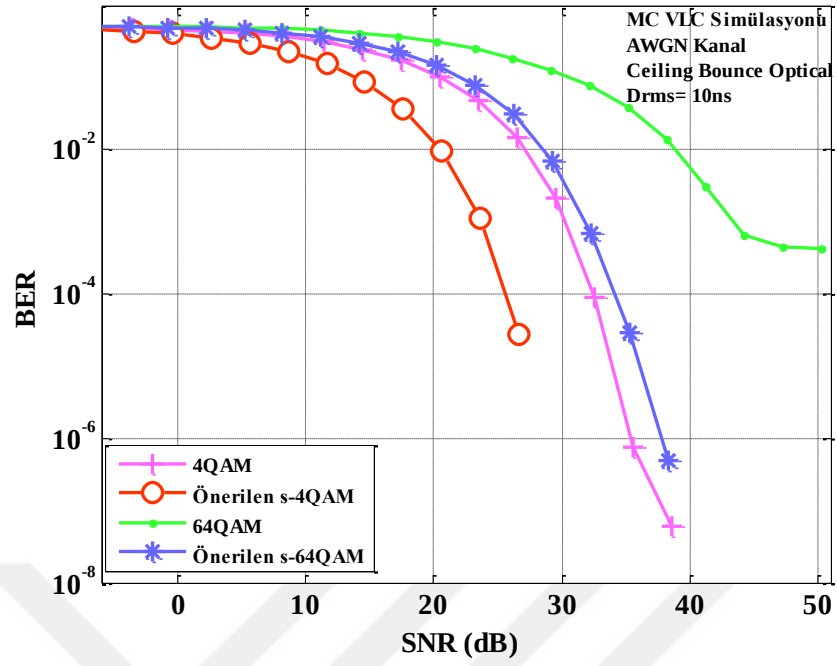
5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda hesaplanan BER-SNR performanslarının kıyaslaması gösterilmektedir.



Şekil 36. $D_{rms} = 10ns$ için MC-VLC sistemlerinin BPSK ve 16QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 36 değerlendirildiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-BPSK'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-16QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 9 dB, BPSK modüleli MC-VLC sisteminden 9 dB ve 16QAM modüleli MC-VLC sisteminden de 19 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

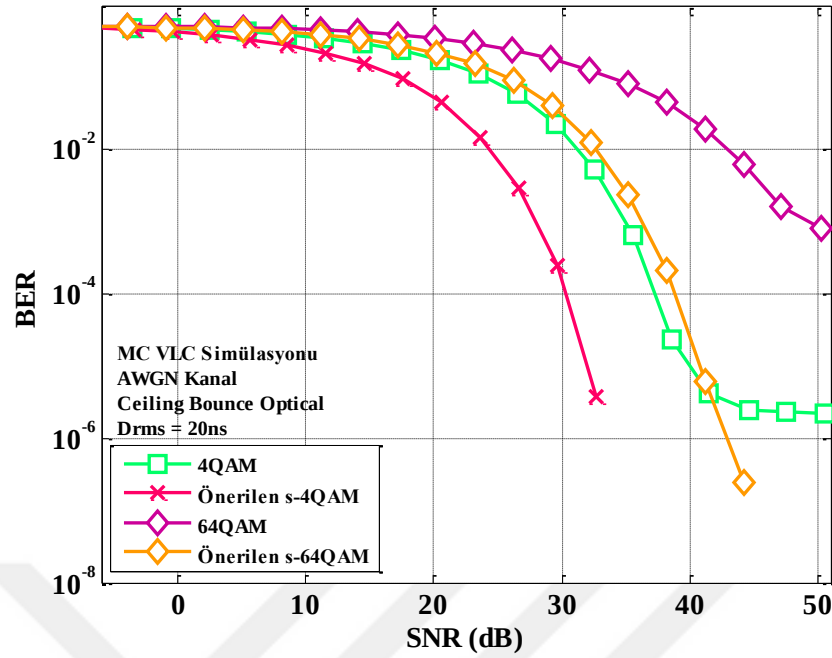
Şekil 37'de MC-VLC sistemlerinin tavan sıçrama (ceiling bounce optical channel) kanal modelinde 4QAM ve 64QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 10 ns$ olarak 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda hesaplanan BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 37. $D_{rms} = 10ns$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 37’de, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-4QAM’lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-64QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 8 dB, 4QAM modüleli MC-VLC sisteminden 5 dB daha iyi olduğu görülmektedir. 64QAM modülasyonu $1E-2$ ve $1E-4$ BER seviyesi arasında hata tabanına gittiği görülmektedir.

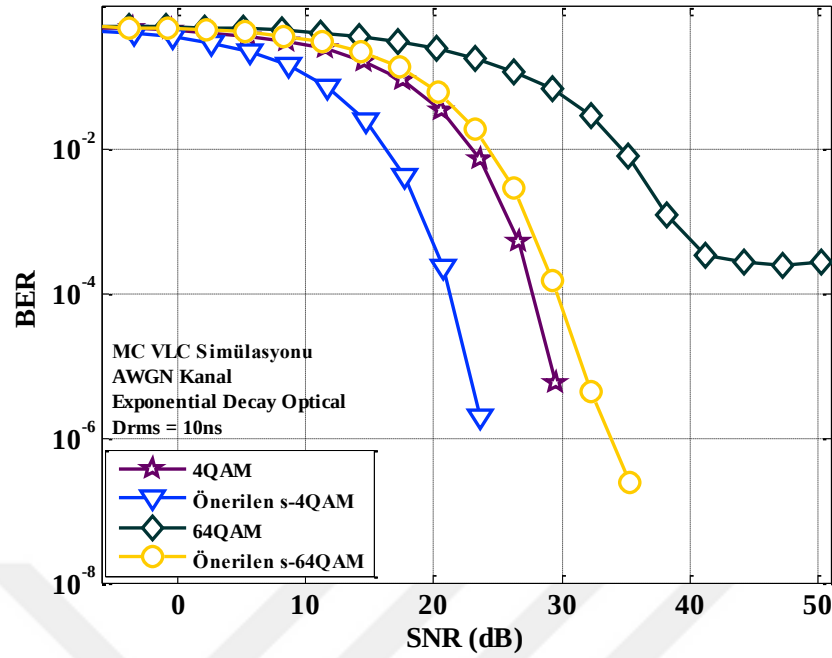
Şekil 38’de MC-VLC sistemlerinin tavan sıçrama (ceiling bounce optical channel) kanal modelinde 4QAM ve 64QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 20 ns$ olarak 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda hesaplanan BER-SNR performanslarının kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 38. $D_{rms} = 20ns$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı tavan sıçramalı yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 38’de, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-4QAM’lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-64QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 9 dB, 4QAM modüleli MC-VLC sisteminden 8 dB daha iyi olduğu görülmektedir. 64QAM modülasyonu $1E-2$ ve $1E-4$ BER seviyesi arasında hata tabanına gittiği görülmektedir.

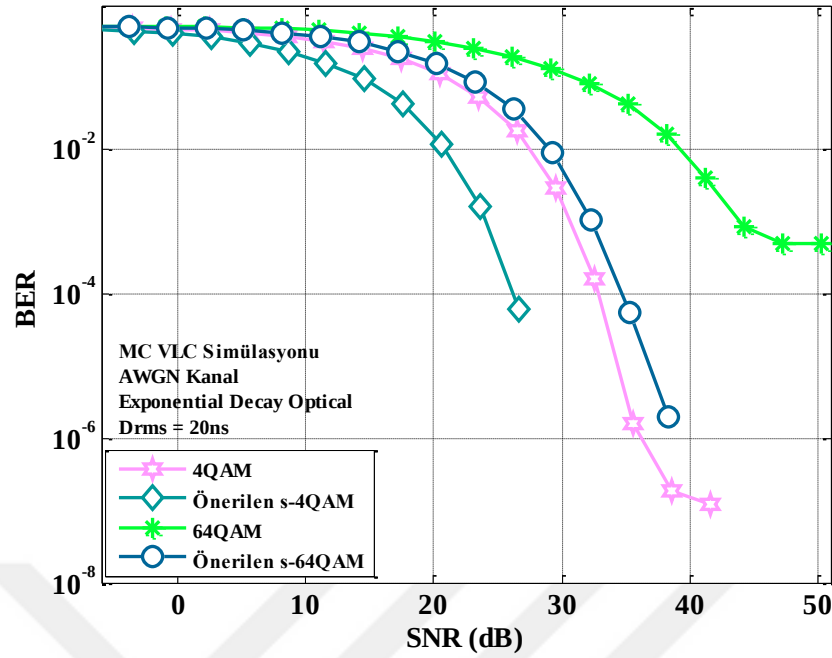
Şekil 39’da MC-VLC sistemlerinin üstel azalan (exponential delay optical channel) kanal modelinde 4QAM ve 64QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 10 ns$ olarak 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda hesaplanan BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 39. $D_{rms} = 10ns$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 39 değerlendirildiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-4QAM'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-64QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 20 dB, 4QAM modülesi MC-VLC sisteminden 8 dB, 64QAM MC-VLC sistemine karşıda yaklaşık 20 dB daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Görüldüğü gibi 64QAM modülasyonu yaklaşık $1E-4$ BER seviyesinde hata tabanına yakınsamaktadır.

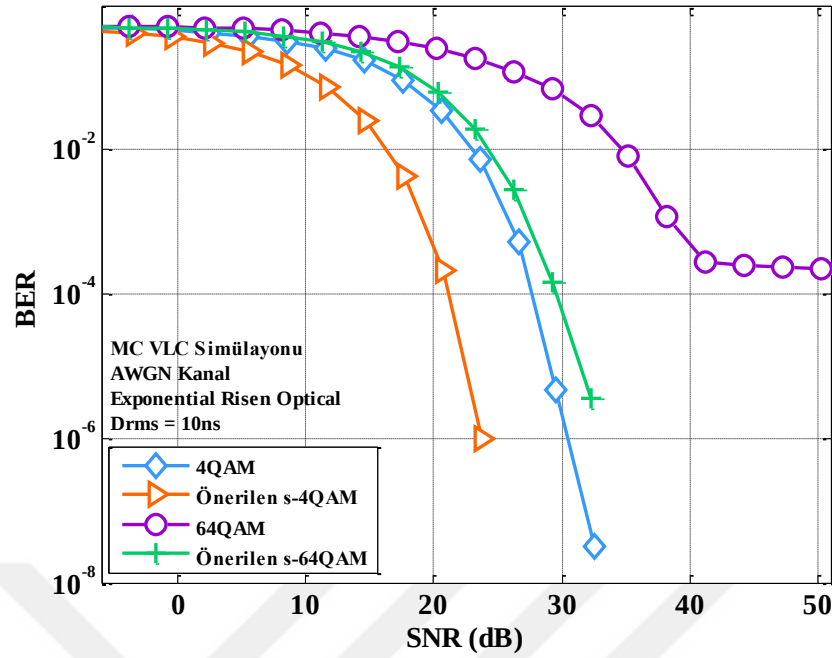
Şekil 40'da MC-VLC sistemlerinin üstel azalan (exponential delay optical channel) kanal modelinde 4QAM ve 64QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 20 ns$ olarak 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda hesaplanan BER-SNR performanslarının kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 40. $D_{rms} = 20ns$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel azalan yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 40 incelendiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-4QAM'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-64QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 7 dB, 4QAM modüleli MC-VLC sisteminden 4 dB daha iyi SNR kazancı elde ettiği görülmektedir. 64QAM modülasyonu MC-VLC sistemine yaklaşık $1E-4$ BER seviyesinde hata tabanına yakınsamaktadır.

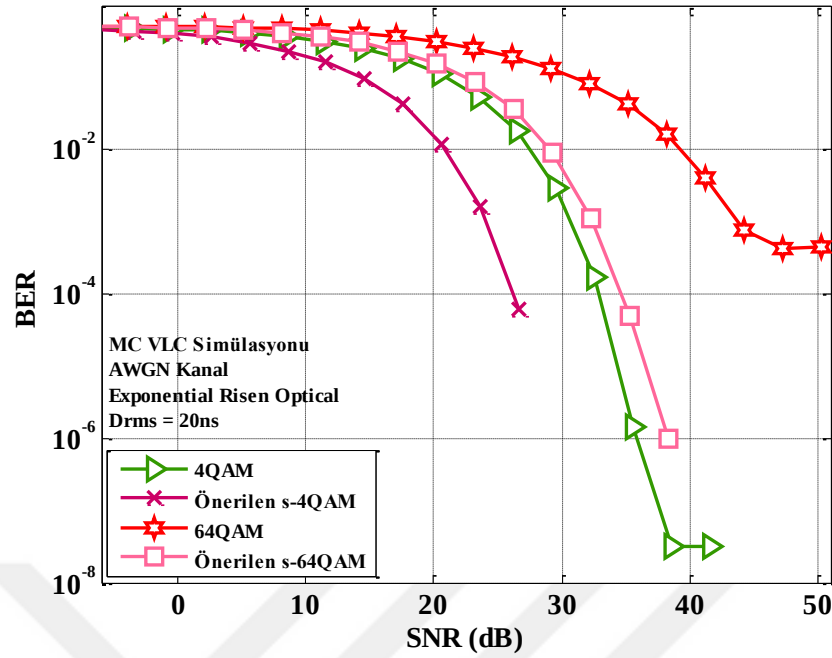
Şekil 41'de MC-VLC sistemlerinin üstel artan (exponential risen optical channel) kanal modelinde 4QAM ve 64QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 10 ns$ olarak 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda hesaplanan BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 41. $D_{rms} = 10ns$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 41 incelendiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-4QAM'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-64QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 9 dB, 4QAM modüleli MC-VLC sisteminden 7 dB daha iyi SNR kazancı elde ettiği görülmektedir. 64QAM modülasyonu yaklaşık $1E-4$ BER seviyesinde hata tabanına yakınsamaktadır.

Şekil 42'de MC-VLC sistemlerinin üstel artan (exponential risen optical channel) kanal modelinde 4QAM ve 64QAM modülasyonlarının $D_{RMS} = 20 ns$ olarak 5 dallı yayma faktörlü optik kablosuz kanalda hesaplanan BER-SNR performanslarının kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 42. $D_{rms} = 20ns$ için MC-VLC sistemlerinin 4QAM ve 64QAM, 5 dallı üstel artan yayma faktörlü optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR karşılaştırılması.

Şekil 42 incelendiğinde, çok yollu yayılmış optik kanalda BER-SNR başarımlarının paylaşıldığı sonuçlardan $1E-4$ BER seviyesi için önerilen S-4QAM'lı MC-VLC sistemi ile elde edilen performansın önerilen S-64QAM MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 8 dB, 4QAM modüleli MC-VLC sisteminden 5 dB daha iyi SNR kazancı elde ettiği görülmektedir. 64QAM modülasyonu yaklaşık $1E-4$ BER seviyesinde hata tabanına yakınsamaktadır.

2. SONUÇLAR

Bu çalışmada, daha önce IEEE 802.16 (WiMAX) RF haberleşme sistemlerinde kullanılan yayma tekniğine dayalı BPSK işaret yıldız kümesinin SC ve MC optik kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılması önerilmektedir. Önerilen S-BPSK modülasyonunun kullanıldığı SC-VLC ve MC-VLC sistemleri BER-SNR performans ölçütü üzerinden karşılaştırılmıştır. Önerilen modülasyon tekniği ile SC-VLC sistemlerinde $1E-4$ BER için klasik BPSK modülasyonuna yaklaşık 9 dB ve MC-VLC sistemlerinde de yaklaşık olarak 7.5 dB SNR iyileştirmesine sahip olması çalışmayı çok dikkat çekici hale getirmiştir. Ek olarak, S-BPSK modülasyonunu kullanan SC-VLC sisteminin MC-VLC sisteminden yaklaşık olarak 10 dB daha iyi performans sağladığı sonuçlardan görülmektedir. Önerilen S-BPSK modülasyon tekniğinin donanım karmaşıklığı diğer modülasyon yöntemlerine göre göze alınabilir boyuttadır. Bu yapısıyla önerilen modülasyon tekniğinin, gelecek zamanda 6G ve ileri sistemleri için uygulanabilecek optik kablosuz iletişim sistemlerinde en iyi modülasyon yapılarından biri olabileceği ileri sürülmektedir.

YAPILAN İKİNCİ SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR

Bu tezde çalışılan yapıda, yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama iletim şeması için yayma tabanlı yeni optik OFDM dalga formu modeli önerilmektedir. Önerilen sistem, literatüre katkı için dalga formu yayma tekniği ile Flip OFDM dalga formunun bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır (Spread Flip OFDM, s-Flip OFDM). Önerilen dalga formunun performans parametrelerini incelemek ve Flip OFDM, ACO-OFDM, DCO-OFDM ve VLC-OFDM gibi optik OFDM dalga formları ile kıyaslamak için benzetim çalışmaları ele alınmaktadır. Ayrıca sunulan çalışmada, önerilen yayma tekniğinin diğer optik OFDM dalga formlarına etkisi analiz edilmektedir. AWGN kanal ve tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinin kullanıldığı dağınık çok yollu optik kablosuz kanal ortamlarında, önerilen yayma tekniğinin optik OFDM dalga formularının performansına 5 ila 10 dB SNR aralığında kazanç sağladığı anlaşılmaktadır. Elde edilen nümerik sonuçlardan, hem AWGN kanal ortamında hem de dağınık çok yollu optik kanal ortamlarında, önerilen s-Flip OFDM dalga formunun s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık 10 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi SNR kazancı olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmada Optik OFDM, Flip OFDM, ACO-OFDM, DCO-OFDM sistemlerinin FLAT kanal ortamındaki performansları da merak edilerek küçük bir inceleme yapılmıştır.

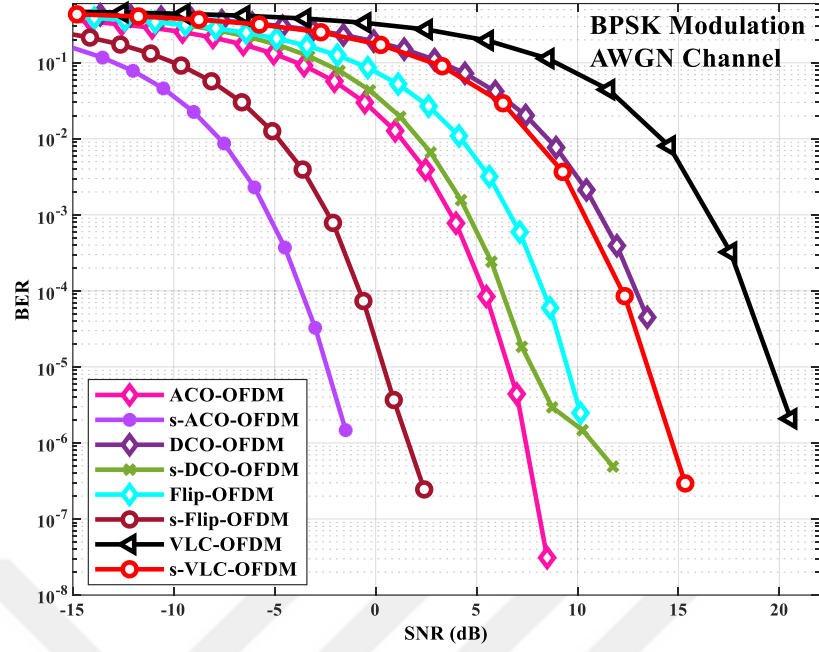
4. SAYISAL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Sayısal sonuçların elde edilmesi iki bölüm halinde yapılmaktadır. Birinci bölümde AWGN kanal sayısal benzetimleri ve ikinci bölümde tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinin kullanıldığı 5 dallı dağınık çok yollu optik kanal sayısal benzetimleri sunulmuştur. Tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinde $D_{RMS} = 10ns$ ve $D_{RMS} = 20ns$ için benzetimler yapılmıştır. Tüm simülasyonlarda BPSK modülasyonunun kullanıldığı ACO-OFDM, DCO-OFDM, Flip-OFDM ve VLC-OFDM sistemleri karşılaştırılmaktadır. ACO-OFDM, DCO-OFDM ve Flip OFDM sistemlerinde 63 alt taşıyıcı ve 128 noktalı FFT kullanılmaktadır. VLC-OFDM sisteminde ise 64 noktalı FFT kullanılmaktadır. Dahası, DCO-OFDM şemasında 7 dB'lik DC-öneklemeye kullanılmaktadır.

A. AWGN Kanalı Sayısal Sonuçları

Ortaya çıkan sayısal sonuçların ilk aşamasında, VLC-OFDM, ACO-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen yayılma faktörü eklenen dalga formlarının AWGN'de BER-SNR sonuçları karşılaştırılmaktadır. Nümerik sonuçlar 1000 Monte Carlo döngüsü ile haberleşme sistemlerinin 1000 veri paketi ile BPSK modülasyon sistemi üzerinden elde edilmiştir.

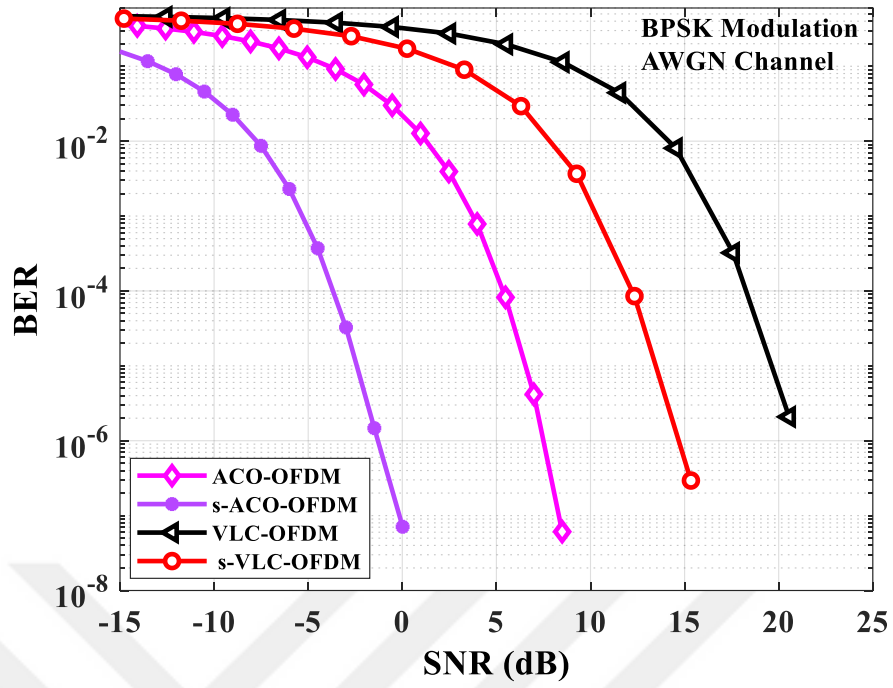
Şekil 43'te VLC-OFDM, ACO-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve s-Flip OFDM sistemlerinin AWGN kanalda üretilen BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 43. AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, ACO-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması.

AWGN ortamında BER-SNR nümerik sonuçlarının verildiği Şekil 43 analiz edildiğinde, önerilen s-ACO-OFDM, ACO-OFDM'e karşı, s-DCO OFDM, DCO-OFDM'e karşı ve s-Flip OFDM FLİP-OFDM'e karşı ve VLC-OFDM dalga formu ile elde edilen performansın diğer dalga formları ile elde edilen performansları gerilerde bıraktıkları anlaşılmaktadır. Ayrıca, önerilen dalga formu s-FLİP OFDM sistemi üzerinden çalışma yürütülmesinden dolayı önerilen bu dalga formuna göre de 1E-4 BER performansı için VLC-OFDM'den yaklaşık 18 dB, 7 dB'lik DC-öneklem değerin kullanıldığı DCO-OFDM'den 14 dB ve Flip OFDM'den de 9 dB daha iyi olduğu görülmektedir.

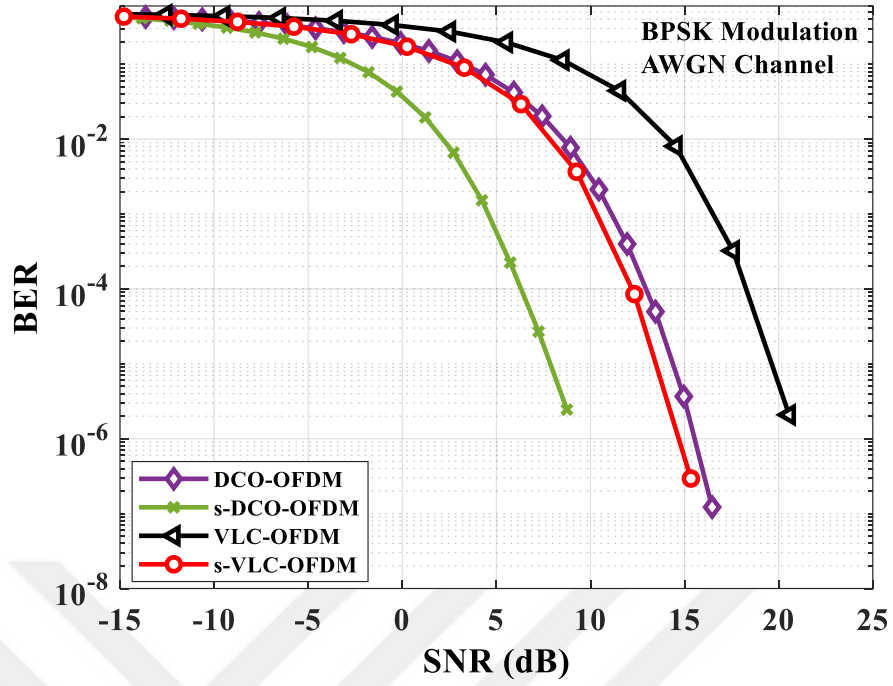
Şekil 44'te VLC-OFDM, ACO-OFDM, dalga formlarının AWGN kanalında üretilen BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.



Şekil 44. AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, ACO-OFDM, s-VLC OFDM önerilen s-ACO OFDM sistemlerinin BER-SNR kıyaslanması

AWGN kanalda ortamında BER-SNR nümerik sonuçlarının verildiği Şekil 44 incelendiğinde, önerilen s-ACO-OFDM, ACO-OFDM'e, VLC-OFDM'e ve s-VLC-OFDM'e karşı elde ettiği performansına göre diğer dalga formları ile elde edilen performansları gerilerde bıraktığı anlaşılmaktadır. Önerilen s-ACO OFDM, ACO-OFDM'e göre yaklaşık 6 dB'lik kazanç elde ettiği görülmektedir. S-ACO OFDM sistemi hem VLC OFDM sistemine hem de s-VLC OFDM sistemine karşı SNR kazancı elde ettiği görülmektedir.

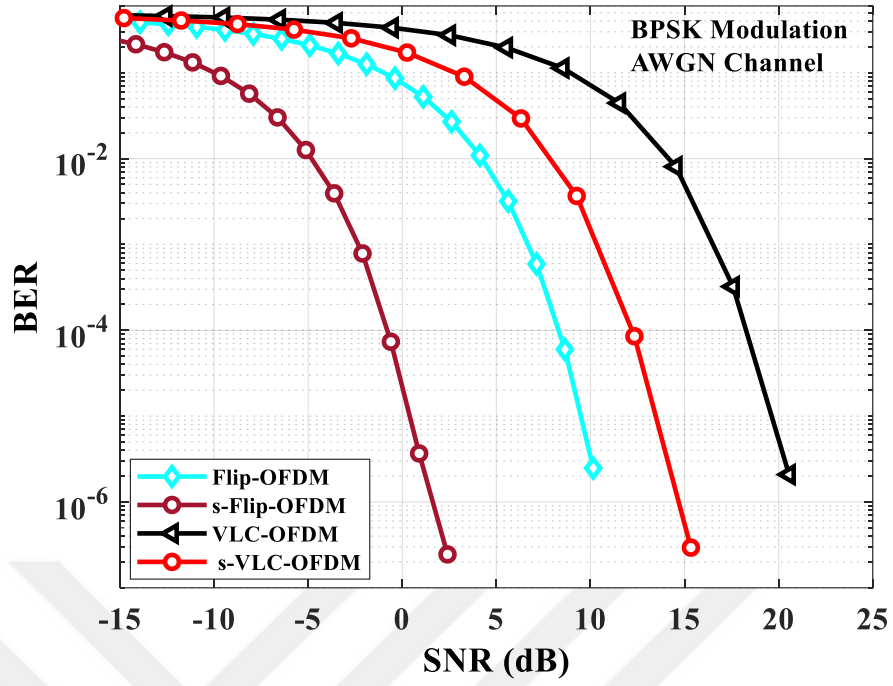
Şekil 45'te VLC-OFDM, DCO-OFDM, s-VLC OFDM ve s-DCO OFDM dalga yapısının AWGN kanalında üretilen BER-SNR karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 45. AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, s-VLC OFDM önerilen s-DCO OFDM sistemlerinin BER-SNR karşılaştırılması

AWGN kanalında BER-SNR sayısal sonuçlarının verildiği Şekil 45’de, önerilen s-DCO-OFDM, DCO-OFDM’e, VLC-OFDM’e ve s-VLC-OFDM’e karşı elde ettiği performansına göre diğer dalga formları ile elde edilen performansları gerilerde bıraktığı anlaşılmaktadır. Önerilen s-DCO OFDM, DCO-OFDM’e göre yaklaşık 6 dB’lik kazanç elde ettiği görülmektedir. S-DCO OFDM sistemi hem VLC OFDM sistemine karşı 10 dB, s-VLC OFDM sistemine göre de 5 dB’lik SNR kazancı elde ettiği görülmektedir.

Şekil 46’da VLC-OFDM, Flip-OFDM, s-VLC OFDM ve s-Flip OFDM dalga yapısının AWGN kanalda üretilen BER-SNR karşılaştırılması verilmektedir.



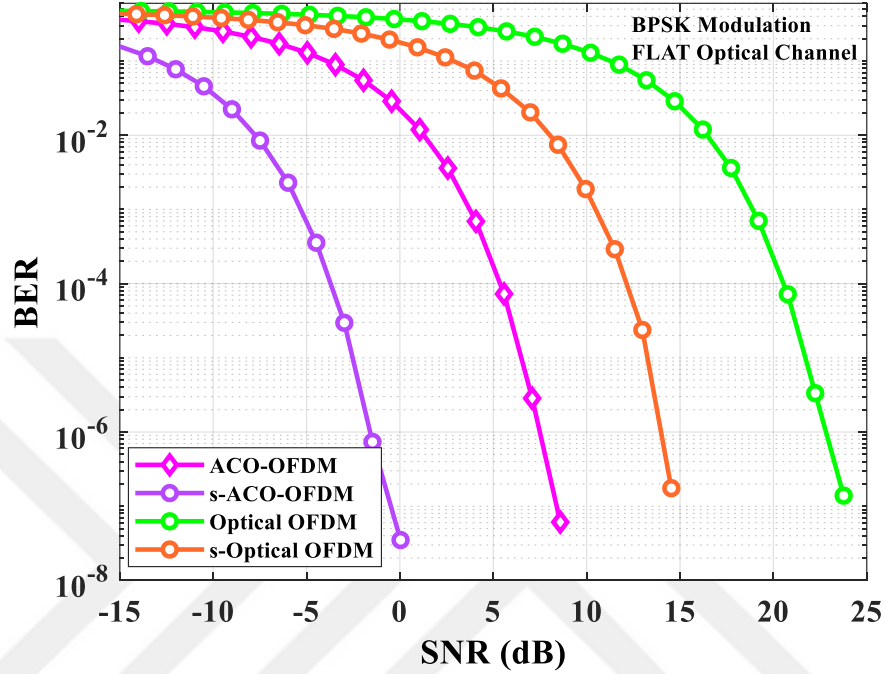
Şekil 46. AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, FLİP-OFDM, s-VLC OFDM önerilen s-FLİP OFDM sistemlerinin BER-SNR karşılaştırılması

AWGN kanalında BER-SNR sayısal sonuçlarının verildiği Şekil 46’da, önerilen s-Flip OFDM, Flip-OFDM’e göre yaklaşık 9 dB’lik kazanç elde ettiği görülmektedir. S-Flip OFDM sistemi hem VLC OFDM sistemine karşı 20 dB, s-VLC OFDM sistemine karşı da 13 dB’lik SNR kazancı elde ettiği görülmektedir.

B. FLAT Kanal Sayısal Sonuçları

Yapılan çalışmanın ikinci kısmında düz sönümlemeli kanal kullanılmıştır. Paylaşılan sayısal sonuçların Optik-OFDM (O-OFDM), ACO-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen yayılma faktörü eklenen dalga yapısının FLAT kanalda BER-SNR kazançları karşılaştırılmaktadır. Sayısal sonuçlar 1000 Monte Carlo döngüsü kullanılarak, haberleşme sistemlerinin 1000 veri paketi üzerinden BPSK modülasyonu ile üretilmiştir.

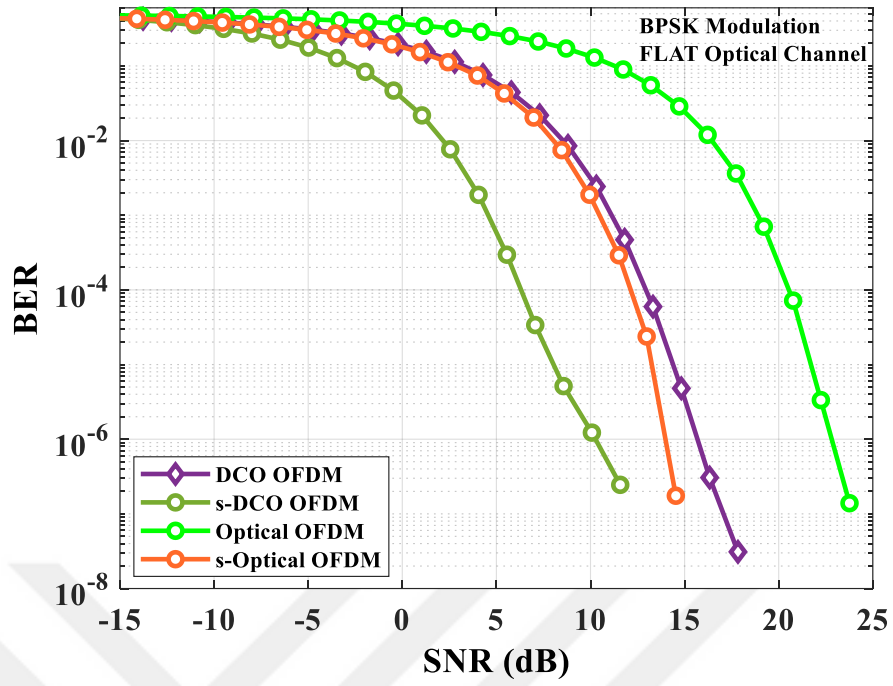
Şekil 47’de Optik-OFDM, ACO-OFDM, s-optik OFDM ve s-ACO OFDM dalga formlarının optik düz sönümlmeli kanal için yayma tekniği kullanılarak üretilen BER-SNR karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 47. FLAT kanal ortamında Optik-OFDM, ACO-OFDM, s-Optik OFDM önerilen s-ACO OFDM sistemlerinin BER-SNR kıyaslanması

FLAT kanalda BER-SNR performansları incelendiğinde, önerilen s-ACO-OFDM modülasyonu ile üretilen performansın ACO-OFDM modülasyonu ile üretilen performansı aşarak, 1E-7 BER değeri için yaklaşık 9 dB SNR kazancı elde edildiği verilmektedir. Optik OFDM ve s-Optik OFDM sistemleri ise her iki ACO-OFDM sistemlerine kıyasla daha kötü performans sergilediği görülmektedir.

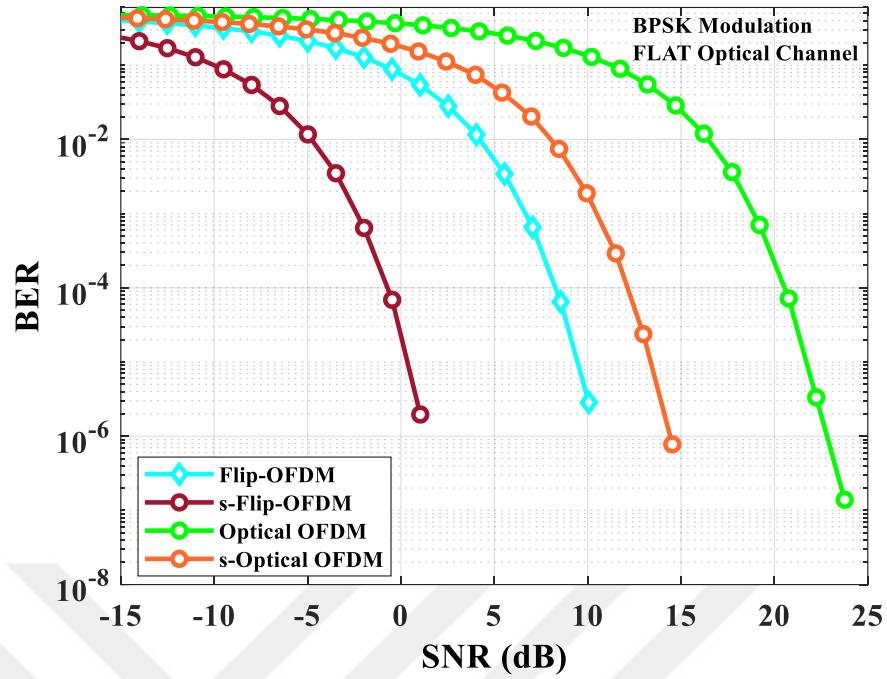
Şekil 48’de FLİP-OFDM-VLC sistemlerinin düz sönümlmeli optik kanal için yayma tekniği kullanılarak elde edilen BER-SNR performanslarının kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 48. FLAT kanal ortamında Optik-OFDM, DCO-OFDM, s-OptikOFDM önerilen s-DCO OFDM sistemlerinin BER-SNR kıyaslanması

FLAT kanal ortamında BER-SNR performanslarının verildiği Şekil 48'e bakıldığında, önerilen s-DCO-OFDM modülasyonu ile elde edilen performansın DCO-OFDM modülasyonu ile üretilen performansına geçerek, 10^{-6} BER değeri için yaklaşık 9 dB SNR elde ettiği simülasyonda verilmektedir. Burada en kötü performansı Optik OFDM gösterirken, s-Optik OFDM sistemi ise her iki DCO-OFDM sistemlerinin arasında yer aldığı görülmektedir.

Şekil 49'da Optik-OFDM, DCO-OFDM, s-optik OFDM ve s-DCO OFDM dalga yapılarının FLAT kanalda üretilen BER-SNR kıyaslaması verilmektedir. FLAT kanal ortamında BER-SNR nümerik sonuçlarının verildiği Şekil 49 incelendiğinde, önerilen s-Flip OFDM, Flip-OFDM'e karşı yaklaşık 8 dB'lik kazanç elde ettiği görülmektedir. S-Flip OFDM sistemi hem Optik-OFDM sistemine karşı 21 dB, s-Optik OFDM sistemine karşı da 13 dB'lik SNR kazancı elde ettiği görülmektedir.

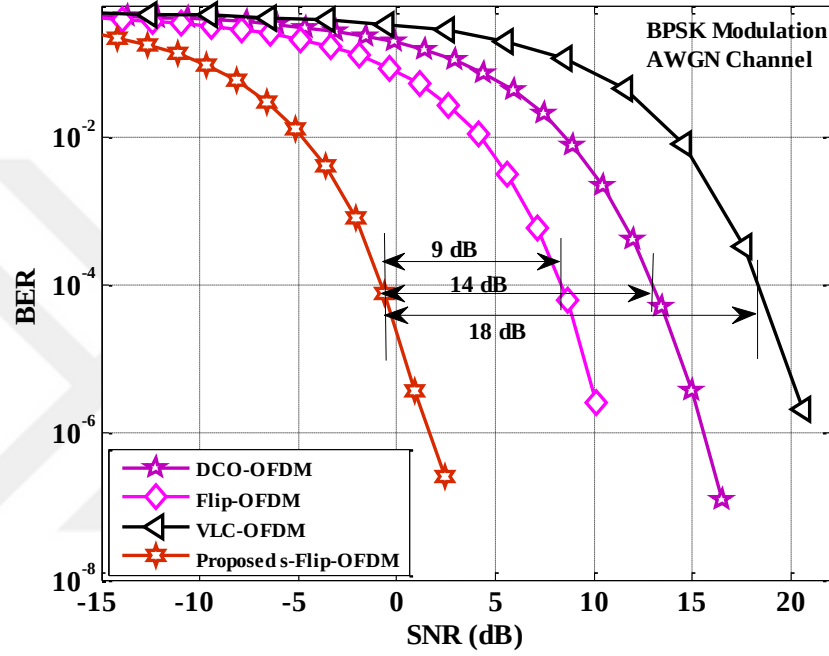


Şekil 49. FLAT kanal ortamında Optik-OFDM, DCO-OFDM, s-Optik OFDM önerilen s-DCO OFDM sistemlerinin BER-SNR karşılaştırılması

Çalışmada, optik kablosuz haberleşme sistemleri için yayma tabanlı yeni modülasyon tekniğinin kullanılması önerilmektedir. Önerilen S-BPSK modülasyonunun kullanıldığı s-ACO-OFDM-VLC, s-DCO-OFDM-VLC ve s-Flip-OFDM-VLC sistemleri BER-SNR performans ölçütü üzerinden karşılaştırılmaktadır. Önerilen modülasyon tekniklerinden s-ACO-OFDM sistemi AWGN kanal üzerinde en iyi performansı sergilediği ispat edilmiştir. FLAT kanalı üzerinde ise s-Flip-OFDM, s-ACO-OFDM, s-DCO-OFDM sistemleri kendi içlerinde Optik OFDM'e göre güzel kazançlar elde ettiği görülmektedir. Önerilen S-BPSK modülasyon tekniğinin donanım karmaşıklığı diğer modülasyon yöntemlerine göre dikkate değer boyuttadır. Bu haliyle önerilen modülasyon tekniğinin, yakın gelecekte 6G ve ilerisi kullanım alanları için uygulanabilecek optik kablosuz iletişim yapıları için en iyi modülasyon bloklarından biri haline geleceği düşünülmektedir.

C. AWGN Kanalınnın Sayısal Sonuçları

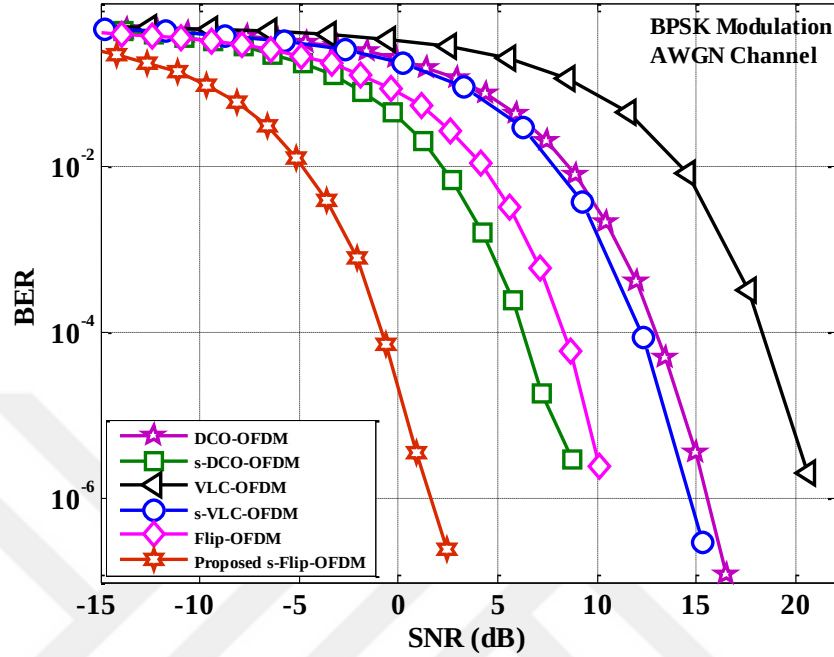
Sayısal sonuçların üçüncü aşamasında, VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip OFDM dalga formlarının AWGN kanalında BER-SNR'leri karşılaştırılmaktadır. Nümerik sonuçlar 1000 Monte Carlo döngüsü ile, ilgili haberleşme sistemlerinin 1000 veri paketi kullanılarak BPSK üzerinden modülasyonu oluşturulmuştur.



Şekil 50. AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması.

AWGN kanalda ortamında BER-SNR nümerik sonuçlarının verildiği Şekil 50 analiz edildiğinde, önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile sağlanan performansın diğer dalga formlarının performanslarını gerilerde bıraktığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, önerilen dalga formu ile 10^{-4} BER değeri için VLC-OFDM'den yaklaşık 18 dB, 7 dB'lik DC öngerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM'den 14 dB ve Flip OFDM'den 9 dB daha iyi olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan optik OFDM dalga formlarına önerilen yayma tekniğinin uygulanması ile üretilen BER-SNR kıyaslanması Şekil 51’de verilmektedir.



Şekil 51. Önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin AWGN kanal ortamındaki BER-SNR performans karşılaştırması.

AWGN’de BER-SNR karşılaştırılması verildiği Şekil 51 incelendiğinde, önerilen spread tekniğinin tüm optical OFDM dalga formlarına katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Önerilen yayma tekniği optical OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 5 ila 9 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun 1E-4 BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık 7 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 13 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.

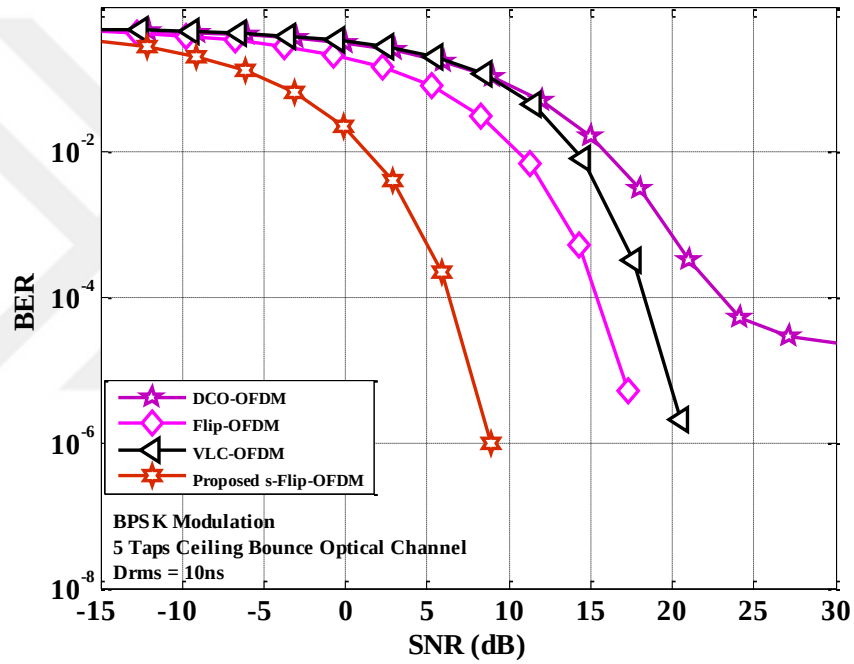
D. Dağılık Çok Yollu Optik Kanalin Sayısal Sonuçları

Paylaşılan sayısal sonuçların ikinci evresinde, ayrıntılı bir şekilde verilen tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinin kullanıldığı dağılık çok yollu optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip OFDM dalga formlarının BER-SNR performansları kıyaslanmaktadır. Nümerik

sonuçlar 1000 Monte Carlo döngüsü kullanılarak ilgili haberleşme sistemlerinin 1000 veri paketi ile BPSK modülasyonu ile çalışma gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada incelenen tüm haberleşme sistemlerinde, 5 dallı dağınık optik kablosuz kanalı denkleştirmek için frekans bölgesi denkleştirici (FDE) uygulanmaktadır.

a. Tavan Sıçrama Dağınık Çok Yollu Optik Kanalin Sayısal Sonuçları

Şekil 52’de VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve s-Flip OFDM dalga yapılarının tavan sıçramalı kanal sisteminde $D_{RMS} = 10ns$ alındığı 5 dallı dağınık optik kablosuz kanalda elde edilen BER-SNR kıyaslaması verilmektedir.

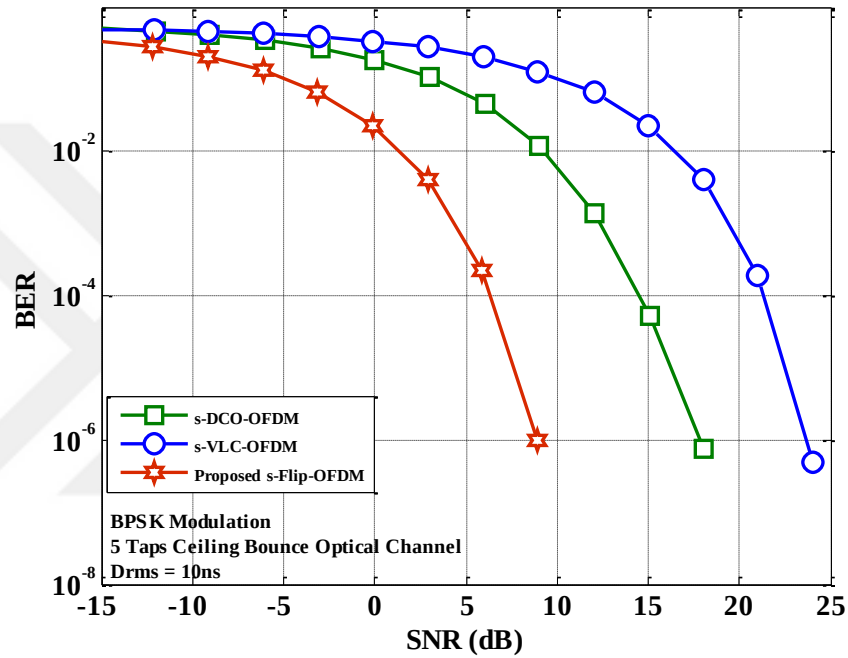


Şekil 52. VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin $D_{RMS} = 10ns$ için 5 dallı tavan sıçrama dağınık optik kablosuz kanal ortamındaki BER-SNR performans karşılaştırması.

Çok yollu dağınık optik kanalda BER-SNR performanslarının verildiği Şekil 52 karşılaştırıldığında, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 8 dB, VLC-OFDM

dalga formundan 11 dB ve 7 dB’lik DC-öngerilim değeri kullanıldığı DCO-OFDM’den de 17 dB daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, DCO-OFDM dalga formunun 30 dB SNR’den sonra hata tabanına yakınsadığı simülasyon sonucunda verilmektedir.

5 dallı dağınık optik kanal ortamında, önerilen yayma tekniğinin bu çalışmada kullanılan optik OFDM dalga formları üzerine etkilerinin karşılaştırılması Şekil 53’te verilmektedir.

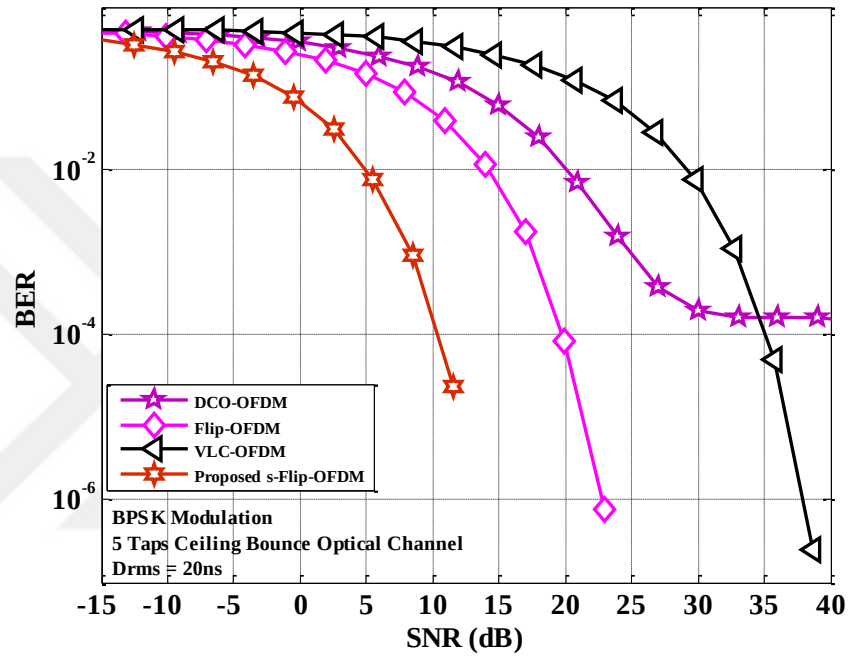


Şekil 53. $D_{RMS} = 10ns$ için 5 dallı tavan sıçramalı dağınık optik kablosuz kanal ortamında önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması

Şekil 53 analiz edildiğinde, önerilen yayma tekniğinin tüm optik OFDM dalga formlarının performansını iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Özellikle, 7 dB’lik DC-öngerilim değeri kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundaki hata tabanını ortadan kaldırdığı gözlerden kaçmamaktadır. Önerilen yayma tekniği optik OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 5 ila 8 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen

s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 8 dB ve s-VLC-OFDM dalga yapısından da 16 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.

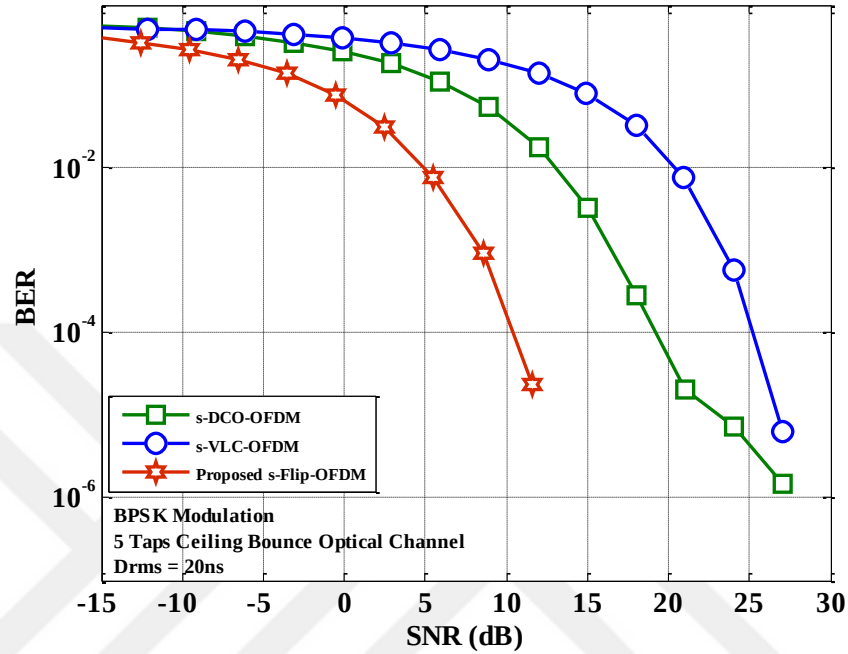
Şekil 54'te, tez çalışmasında optik OFDM dalga formlarının tavan sıçramalı kanalda $D_{RMS} = 20ns$ alındığı 5 dallı dağınık optik kablolu kanalda elde edilen BER-SNR karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 54. VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin $D_{RMS} = 20ns$ için BER-SNR performans karşılaştırması

Şekil 54 incelendiğinde, 5 dallı dağınık optik kanal ortamında $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga yapısından yaklaşık 10 dB ve VLC-OFDM dalga formundan 25 dB daha iyi olduğu görülmektedir. 7 dB'lik DC-önekleme değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formunun ise 30 dB SNR'den sonra $3E-4$ hata tabanına yakınsadığı sonuçlardan görülmektedir.

Tavan sıçramalı modelde $D_{RMS} = 20ns$ alındığı 5 dallı dağınık optik kanalda, önerilen yayma tekniğinin bu çalışmada kullanılan optik OFDM dalga formları üzerine etkilerinin analizi Şekil 55'te sunulmaktadır.

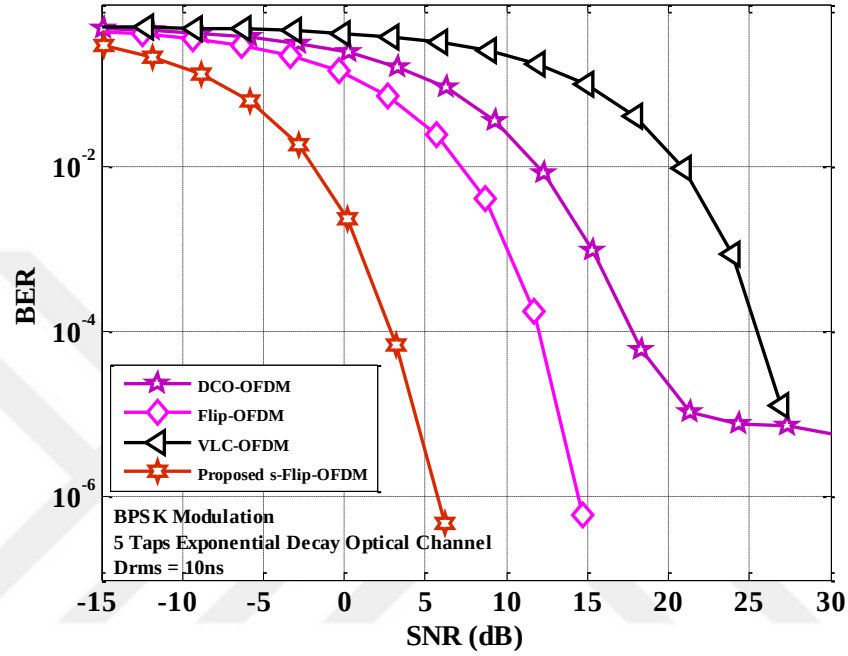


Şekil 55. $D_{RMS} = 20ns$ için 5 dallı tavan sıçramalı dağınık optik kablosuz kanal ortamında önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması

$D_{RMS} = 20ns$ olarak alınan 5 dallı dağınık optik kanal ortamına ait performansların verildiği Şekil 63 değerlendirildiğinde, diğer sonuçlara benzer şekilde önerilen yayma tekniğinin tüm optik OFDM dalga formlarının performansını iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Ancak dağınık optik kanalın bu çalışmada kullanılan optik OFDM dalga formlarının performansları üzerine etkileri sonuçlardan görülmektedir. Önerilen yayma tekniği optik OFDM dalga formlarına yaklaşık 9 ila 10 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık 9 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.

b. Üstel Azalan Dağılık Çok Yollu Optik Kanalin Sayısal Sonuçları

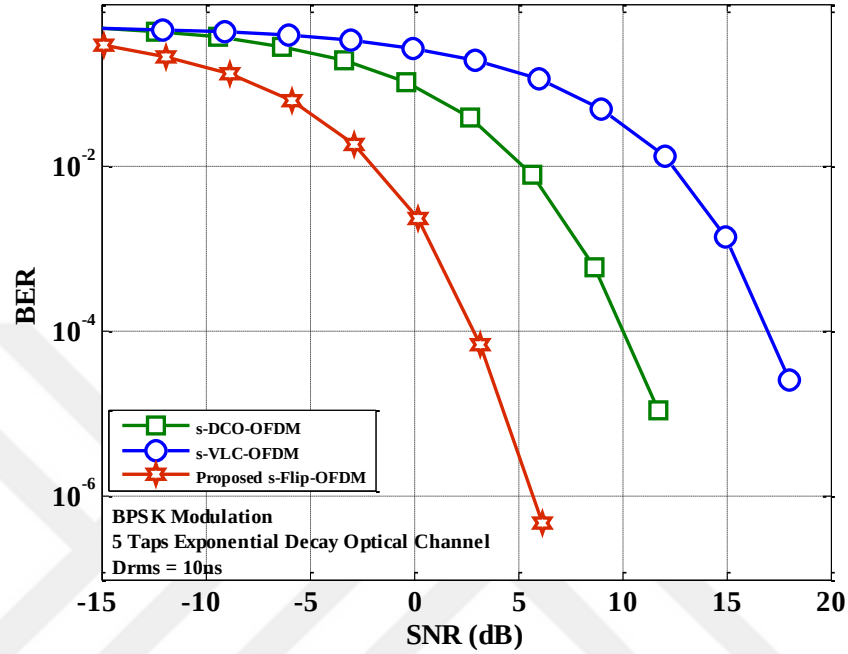
Şekil 56’da, çalışmada değerlendirilen optik OFDM dalga yapısının üstel azalan kanal modelinde $D_{RMS} = 10ns$ alındığı 5 dallı dağılık optik kablosuz kanalda elde edilen BER-SNR karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 56. VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı BER-SNR performans karşılaştırması üstel azalan dağılık optik kablosuz kanal ortamı için $D_{RMS} = 10ns$

Benzetimlerde kullanılan optik OFDM dalga yapılarının BER-SNR performanslarının gösterildiği Şekil 56 karşılaştırıldığında, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 10 dB, VLC-OFDM dalga formundan 22 dB ve 7 dB’lik DC-öneklem değeri kullandığı DCO-OFDM’den 15 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, DCO-OFDM dalga formunun 25 dB SNR’den sonra hata tabanına yakınsadığı sonuçlardan anlaşılmaktadır.

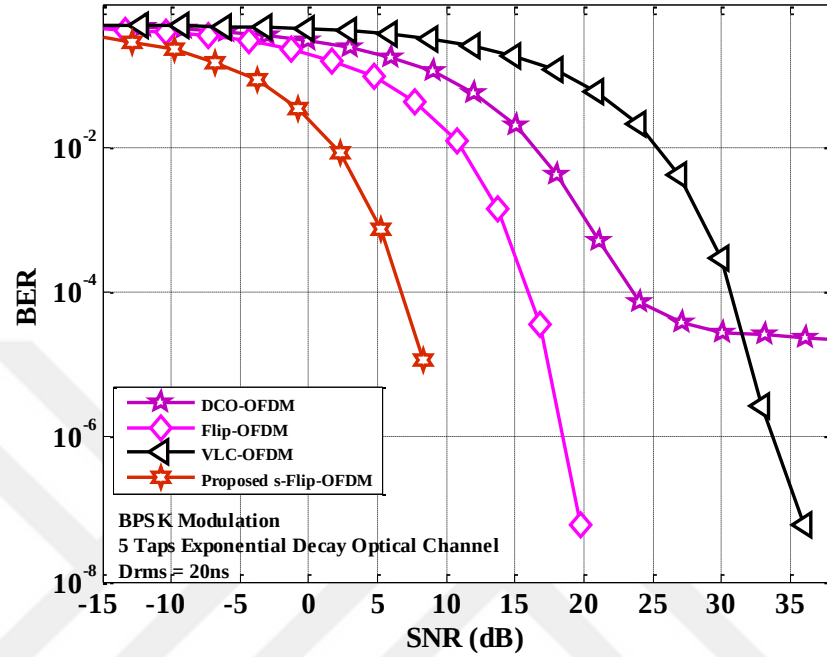
Çok yollu üstel azalan dağılık optik kanal ortamında, önerilen yayma tekniğinin bu çalışmada dikkate alınan optik OFDM dalga formları üzerine etkilerinin analizi Şekil 57’de verilmektedir.



Şekil 57. $D_{RMS} = 10ns$ için 5 dallı önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması için üstel azalan dağılık optik kablosuz kanal ortamı

Şekil 57 irdelendiğinde, önceki sonuçlara benzer şekilde önerilen spread tekniğinin tüm optical OFDM dalga formlarının performanslarına katkı sağladığı tespit edilmektedir. Özellikle, 7 dB’lik DC öngerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundaki hata tabanını ortadan kaldırması son derece önemlidir. Önerilen yayma tekniği optical OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 8 ila 10 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık 7 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 14 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.

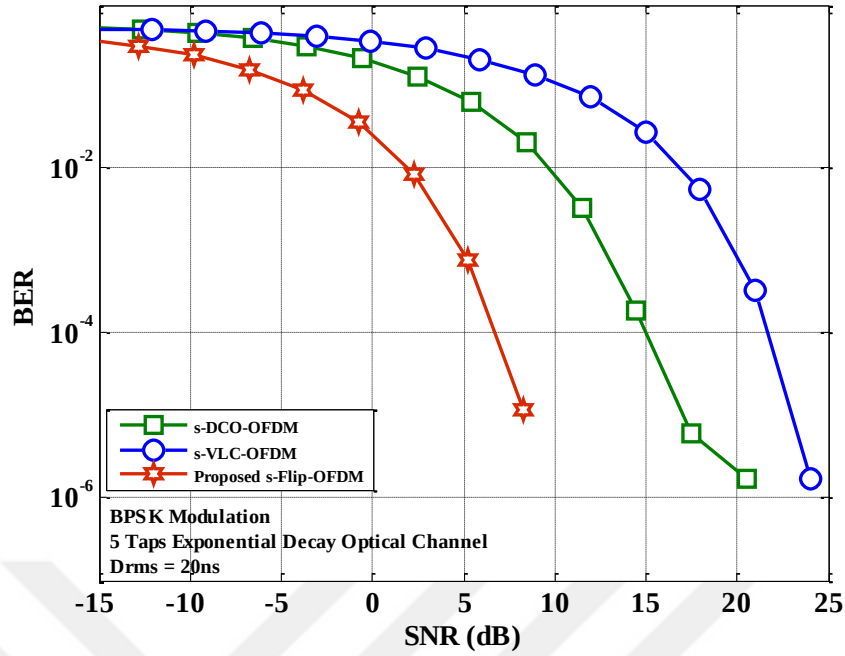
Şekil 58’de, simülasyonlar da değerlendirilen optik OFDM dalga formlarının üstel azalan kanal modelinde $D_{RMS} = 20ns$ alındığı 5 dallı dağınık optik kablolu kanalda elde edilen BER-SNR karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 58. VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı BER-SNR performans karşılaştırması üstel azalan dağınık optik kablolu kanal ortamı için $D_{RMS} = 20ns$

Çok yollu üstel azalan optik kanalda BER-SNR performanslarının verildiği Şekil 58 değerlendirildiğinde, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 9 dB, VLC-OFDM dalga formundan 23 dB ve 7 dB’lik DC öngerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM’den 16 dB daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca, DCO-OFDM dalga formunun 30 dB SNR’den sonra hata tabanına yakınsadığı sonuçlardan görülmektedir.

5 dallı üstel azalan dağınık optik kanal ortamında, önerilen yayma tekniğinin simülasyonlar da karşılaştırılan optik OFDM dalga formları üzerine etkilerinin analizi Şekil 59’da gösterilmektedir.

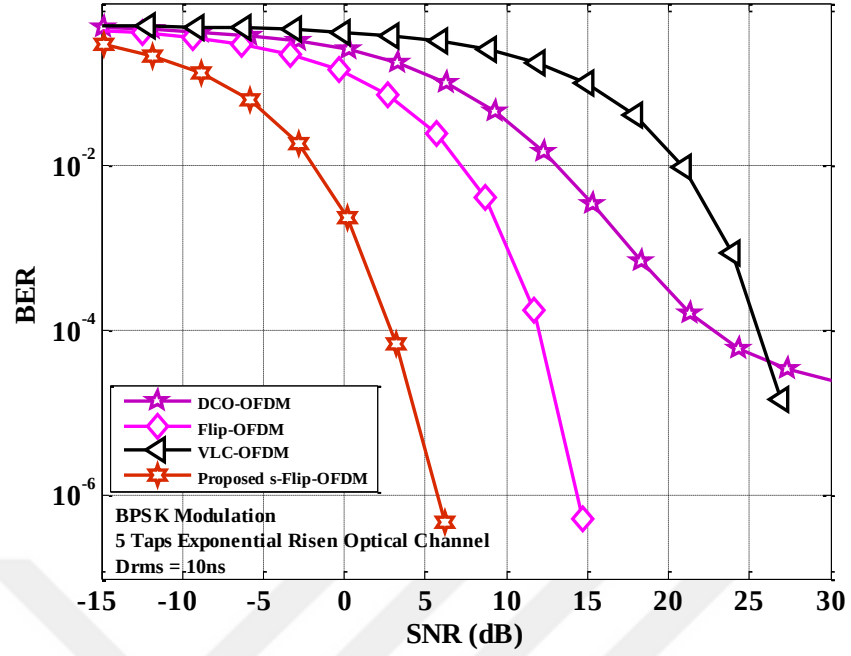


Şekil 59. $D_{RMS} = 20ns$ için 5 dallı önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması için üstel azalan dağılık optik kablosuz kanal ortamı

Şekil 59 incelendiğinde, önerilen tekniğin özellikle 7 dB’lik DC öngerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundaki hata tabanını ortadan kaldırması, yapılan çalışmanın katkısını açıkça ortaya koymaktadır. Önerilen yayma tekniği optical OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 8 ila 10 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER değerinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık 8 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB iyi olduğu gözlenmektedir.

c. Üstel Artan Dağılık Çok Yollu Optik Kanallın Sayısal Sonuçları

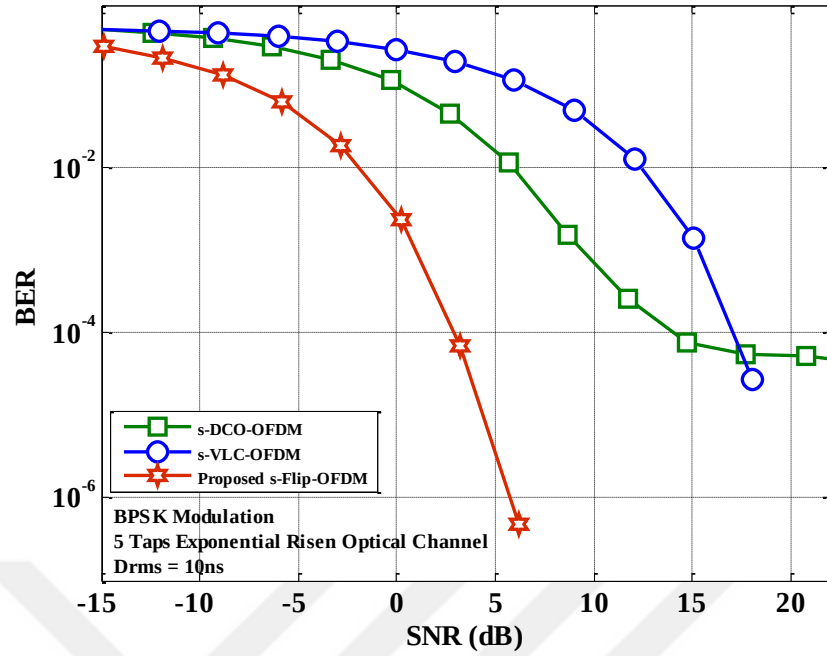
Benzetimlerde değerlendirilen optik OFDM dalga formlarının üstel artan kanal modelinde $D_{RMS} = 10ns$ alındığı 5 dallı dağılık optik kablosuz kanalda elde edilen BER-SNR karşılaştırılması Şekil 60’da verilmektedir.



Şekil 60. VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR performans karşılaştırması için 5 dallı üstel artan dağılık optik kablosuz kanal ortamında $D_{RMS} = 10ns$

Şekil 60 irdelendiğinde, önceki sonuçlara benzer sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır. $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 9 dB, VLC-OFDM dalga formundan 22 dB ve 7 dB'lik DC öngerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga yapısından da 20 dB daha iyi olduğu görülmektedir.

Şekil 61'de, 5 dallı üstel artan dağılık optik kanal ortamında, önerilen yayma tekniğinin benzetimlerde kullanılan optik OFDM dalga formları üzerine etkilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.

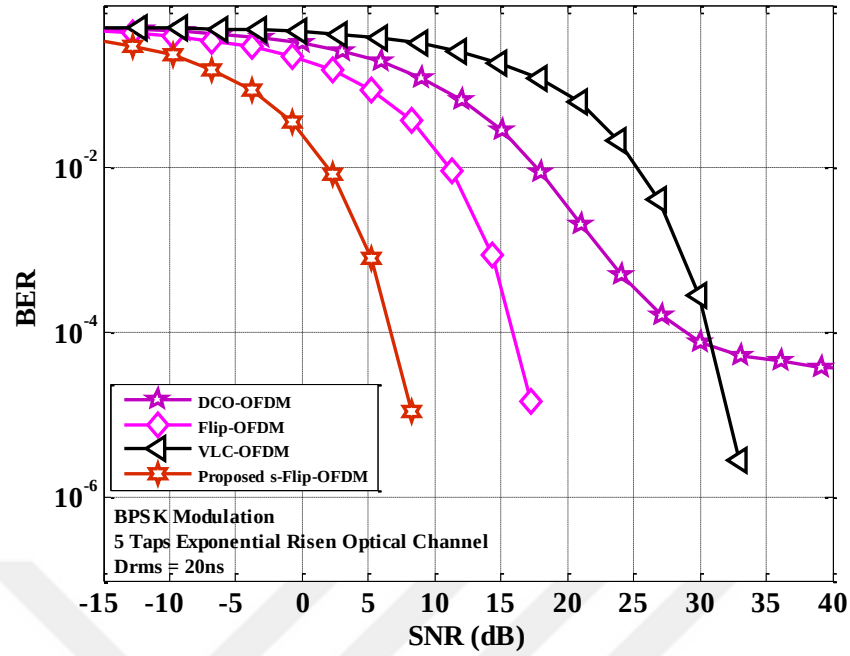


Şekil 61. Önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin 5 kademeli üstel artan dağılık optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR performans karşılaştırması

$$D_{RMS} = 10ns$$

Şekil 61'deki performanslar karşılaştırıldığında, önceki sonuçlara benzer şekilde önerilen yayma tekniğinin tüm optik OFDM dalga formlarının performanslarına katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Önerilen yayma tekniği optik OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 8 ila 9 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 11 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 14 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.

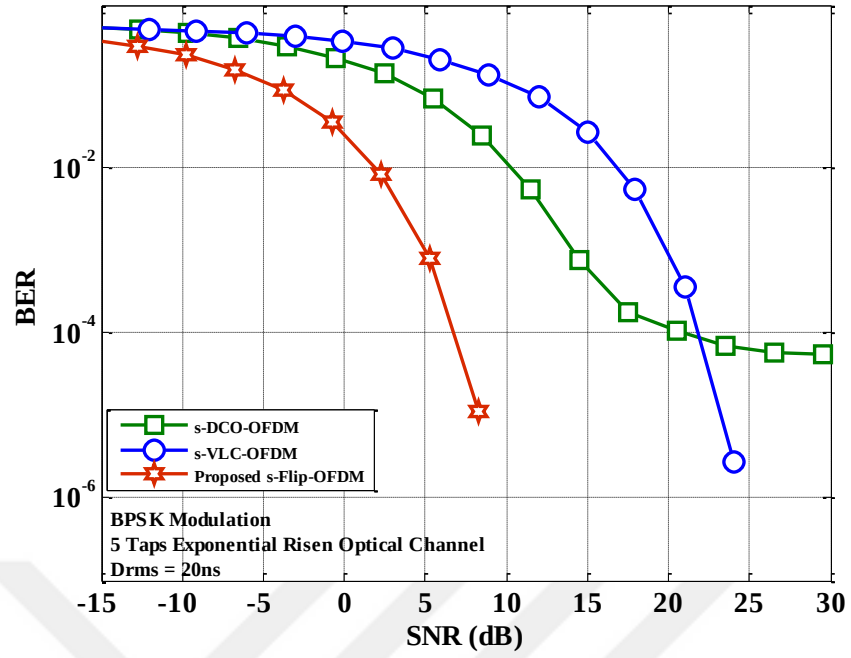
Simülasyonlarda kullanılan optik OFDM dalga formlarının üstel artan kanal modelinde $D_{RMS} = 20ns$ alındığı 5 dallı dağılık optik kablosuz kanalda elde edilen BER-SNR karşılaştırılması Şekil 62'de sunulmaktadır.



Şekil 62. VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip-OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı üstel artan dağılık optik kablosuz kanalda BER-SNR performans karşılaştırması $D_{RMS} = 20ns$

BER-SNR performanslarının değerlendirildiği Şekil 62 incelendiğinde, önceki sonuçlara yakın sonuçların ve benzer SNR kazançlarının elde edildiği görülmektedir.

Çok yollu üstel artan dağılık optik kanal ortamında, önerilen yayma tekniğinin çalışmalarda göz önüne alınan optik OFDM dalga formları üzerine etkilerinin değerlendirmesi Şekil 63'te gösterilmektedir.



Şekil 63. Önerilen yayılmış optik OFDM dalga biçimlerinin 5 dallı üstel artan dağınık optik kablosuz kanal ortamında BER-SNR performans karşılaştırması

$$D_{RMS} = 20ns$$

Şekil 63'teki performanslar incelendiğinde, önceki sonuçlara benzer şekilde önerilen yayma tekniğinin tüm optik OFDM dalga formlarının performanslarına katkı sağladığı ve benzer kazançların elde edildiği anlaşılmaktadır.

5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, optik telsiz haberleşme sistemlerinin en önemli dalga formlarından Flip OFDM dalga formunun performansını arttırmak için yayma tekniği ile Flip OFDM dalga formunun birleştirilmesi önerilmektedir. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun performansını incelemek ve Flip OFDM, DCO-OFDM ve VLC-OFDM gibi optik OFDM dalga formları ile kıyaslamak için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, önerilen yayma tekniğinin DCO-OFDM ve VLC-OFDM gibi diğer optik OFDM dalga formları üzerine etkileri incelenmektedir. Sayısal sonuçlardan yayma tekniğinin optik OFDM dalga formlarının performansına 5 ile 10 dB aralığında SNR kazancı sağladığı gözlenmektedir. AWGN kanal ortamında ve dağınk çok yollu optik kanal ortamlarında önerilen s-Flip-OFDM dalga formunun s-DCO-OFDM dalga yapısından yaklaşık 10 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi SNR kazancı olduğu anlaşılmaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun donanım karmaşıklığı diğer dalga formları ile karşılaştırıldığında önemli bir boyuttur. Bu haliyle önerilen s-Flip OFDM dalga formunun, gelecekteki 6G ve ilerisi kullanım alanları için uygulanabilecek optik telsiz haberleşme sistemleri için en iyi dalga formu yapılarından biri olabileceği tahmin edilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1]. Z. Ghassemlooy, L.N. Alves, S. Zvanovec, M.A. Khalighi, Visible Light Communications Theory and Applications. Boca Raton, FL: CRC Press., 2017, 24/590.
- [2]. K. Wang, Indoor Infrared Optical Wireless Communications Systems and Integration, 1st Edition. Boca Raton, CRC Press., 2020, 200 pp.
- [3]. Xu, E., 6G: TheNext Horizon White Paper,2022. (<https://www.huawei.com/en/huaweitech/future-technologies/6g-white-paper>).
- [4]. ITU-R. 2015. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation ITU-R M.2083-0.
- [5]. Kimura, D., Seki, H., Kubo, T., and Taniguchi, T. Wireless Network Technologies Toward 5G. SIP, vol. 4, page 1 of 8, 2015.
- [6]. 6GANA. 2021. From cloud AI to network AI, a view from 6GANA. Whitepaper,Available (<https://www.6gana.com/upload/file/20210619/6375969458505193666851527.pdf>).
- [7]. Griffor, E. R., Greer, C., Wollman, D.A., and Burns, M.J., 2015. Framework for Cyber-Physical Systems: volume 1, overview, version 1.0. NIST Special Publication. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). United Nations.
- [8]. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). United Nations, October 2015.
- [9]. Song, H., and Nagatsuma. T., Present and future of terahertz communications. *In IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, vol.1, no. 1, pp. 256-263.
- [10]. Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P., and Mohapatra. P., Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *In IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, vol. 17, no.4, pp.2047-2077.
- [11]. Z. Ghassemlooy, L.N. Alves, S. Zvanovec, M.A. Khalighi, Visible Light Communications Theory and Applications. Boca Raton, FL: CRC Press., 2017, 24/590.
- [12]. Shur, M. S., and Zukauskas, R., Solid-State Lighting: Toward Superior Illumination, *Proc. IEEE*, 2005, vol. 93, no. 10, pp. 1691–1703.

- [13]. Krames, M. R., Shchekin, O. B., Mach, R. M., etc. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting, *IEEE J. Display Technol.*, 2007, vol. 3, no. 2, pp. 160–175,
- [14]. Schreuder, D., **Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception**, Springer, The Netherlands, 2008.
- [15]. Şenyer, D., Görünür Işıklı Kablosuz Yeşil Haberleşme Sistemleri. Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2014, İstanbul, 133 s.
- [16]. A. Jovicic., J. Li., T. Richardson., A. Jovicic., J. Li., T. Richardson., **“Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market”**, *Communications Magazine IEEE*, 2013, Volume: 51, Issue: 12, Page(s): 26 – 32.
- [17]. E. T. Won., D. Shin., D.K. Jung., Y.J. Oh., etc. **“Visible Light Communication: Tutorial. Tom Matsumura, Company Samsung Electronics Co.,”** LTD, University of Oxford, ETRI (4) VLCC (28 Members), Project: *IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2008.
- [18]. Elgala, H., Mesleh R., and Haas, H., **“Indoor Broadcasting via White LEDs and OFDM”**, *Proc. IEEE*, 2009.
- [19]. K. Wang., *Indoor Infrared Optical Wireless Communications Systems and Integration*, 1st Edition. Boca Raton, CRC Press., 2020, 200 pp.
- [20]. Wang, Y., Chi, N., Wang, Y., Tao, L., and Shi, J., **“Network architecture of a highspeed visible light communication local area network”**, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(2): pp. 197–200.
- [21]. Feng, L., Hu, R.Q., Wang, J., Xu, P., and Qian, Y., Applying VLC in 5G networks: Architectures and key technologies. *IEEE Network*, 2016, 30(6): pp. 77–83.
- [22]. Haigh, P.A., Burton, A., Werfli, K., Le Minh, H., etc. **“A multi-CAP visible-light communications system with 4.85-b/s/Hz spectral efficiency”**, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(9): pp. 1771–1779.
- [23]. Wang, Z., Yu, C., Zhong, W.D., and Chen, J., Performance improvement by tilting receiver plane in M-QAM OFDM visible light communications. *Optics Express*, 2011, 19(14): pp. 13418–13427.

- [24]. Cossu, G., Ali, W., Corsini, R., and Ciaramella, E., 2015. Gigabit-Class Optical Wireless Communication System at Indoor Distances (1.5–4 m). *Optics Express*, 23(12): pp. 15700–15705.
- [25]. Zeng, L., Le Minh, H., O'Brien, D., Faulkner, G., Lee, K., Jung, D., and Oh, Y., **“Equalisation for High-Speed Visible Light Communications Using White-LEDs”**, in *International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, IEEE, 2008, pp. 170–173.
- [26]. Lin, B., Tang, X., Ghassemlooy, Z., Zhang, S., Li, Y., Wu, Y., and Li, H., **“Efficient Frequency-Domain Channel Equalisation Methods for OFDM Visible Light Communications”**, *IET Communications*, 2017, 11(1): pp. 25–29.
- [27]. Lu, I.C., Lai, C.H., etc. **“6.36 Gbit/s RGB LED-based WDM MIMO Visible Light Communication System Employing OFDM Modulation”**, in *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Optical Society of America, Los Angeles, CA, 2017, pp. W2A–39.
- [28]. Çelik, Y., Görünür Işık Haberleşmesi için Yeni Nesil Fiziksel Katman Teknikleri, İstanbul Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul, 2018, 113 s.
- [29]. Feng, Z.C., Handbook of Solid-State Lighting and LEDs, CRC Press, 2017, New York.
- [30]. Kavehrad, M., **“Sustainable Energy-Efficient Wireless Applications Using Light”**, *IEEE Communication Magazine*, 2010, 48, 12.
- [31]. Khalighi, M.A., and Uysal, M., **“Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective”**, *IEEE Communications Surveys And Tutorials*, 2014, 16(8): pp. 2231–2258.
- [32]. Plank, T., Leitgeb, E., Pezzei, P., and Ghassemlooy, Z., **“Wavelength-Selection for High Data Rate Free Space Optics (FSO) in Next Generation Wireless Communications”**, in *European Conference on Networks and Optical Communications*, IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [33]. Khalighi, M. A., Xu, F., Jaafar, Y., and Bourennane, S., **“Double-Laser Differential Signaling for Reducing the Effect of Background Radiation in Free-Space Optical Systems”**, *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(2): pp. 145–154.

- [34]. Bayaki, E., Schober, R., and Mallik, R.K., **“Performance Analysis of MIMO Free-Space Optical Systems in Gamma Fading”**, *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(11): pp. 3415–3424.
- [35]. Djordjevic, I.B., Denic, S., Anguita, J., Vasic, B., and Neifeld, M.A., **“LDPC-Coded MIMO Optical Communication Over the Atmospheric Turbulence Channel”**, *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(5): pp. 478–487.
- [36]. García-Zambrana, A., Castillo-Vázquez, C., and Castillo-Vázquez, B., Outage Performance of MIMO FSO Links over Strong Turbulence and Misalignment Fading Channels. *Optics Express*, 2011, 19(14): pp. 13480–13496.
- [37]. Farid A.A., and Hranilovic, S., **“Diversity Gain and Outage Probability for MIMO Free-Space Optical Links with Misalignment”**, *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(2): pp. 479–487.
- [38]. Abou-Rjeily C. and Fawaz, W. **“Space-time Codes for MIMO Ultra-Wideband Communications and MIMO Free-Space Optical Communications with PPM”**, 2008, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(6): pp. 938–947.
- [39]. Chan, V.J., and Arnold, R.L., **“Results of one GBPS Aircraft-to-Ground Lasercom Validation Demonstration”**, in *Proceedings of SPIE 2990, Free-Space Laser Communication*, SPIE, 1997, Bellingham, WA.
- [40]. Stotts, B., **“Optical Communications in Atmospheric Turbulence”**, in *Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communications IX 7464*, SPIE, 2009, Bellingham, WA.
- [41]. Moll, F., Horwath, J., Shrestha, A., Brechtelsbauer, M., Fuchs, C., Navajas, L.A.M., Souto, A.M.L., and Gonzalez, D.D., **“Demonstration of High-Rate Laser Communications from a Fast Airborne Platform”**, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33: pp. 1985–1995.
- [42]. Leitgeb, E., Zettl, K., Muhammad, S.S., Schmitt, N., and Rehm, W., **“Investigation in Free Space Optical Communication Links Between Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)”**, in *International Conference on Transparent Optical Networks*, IEEE, 2007, Vol. 3, pp. 152–155.

- [43]. Ahdi, F., and Subramaniam, S., **“Using Unmanned Aerial Vehicles as Relays in Wireless Balloon Networks”**, in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, 2015, pp. 3795–3800.
- [44]. Fawaz, W., Abou-Rjeily, C., and Assi, C., **“UAV-Aided Cooperation for FSO Communication Systems”**, *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(1): pp. 70–75.
- [45]. Durukan, F., SC ve MC Görünür Işık Haberleşmesi İçin Renk Kaydırmalı Anahtarlama Modülasyonu Tasarımı ve Uygulaması, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Lisans Tezi, Kayseri, 2019, s. 94.
- [46]. Fişne, A., Görünür Işık Haberleşmesinde Kırpma Gürültüsünün Analizi, Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2015, s. 96.
- [47]. Chun, H., Chiang, C.-J., O’Brien, D., **“Visible Light Communication Using OLEDs: Illumination and channel modeling”**, *Optical Wireless Communications International Workshop on*, 2012, s. 1-3.
- [48]. Tomasoni, A., Gatti, D., Bellini, S., Ferrari, M. ve Siti, M., **“Efficient OFDM Channel Estimation Via An Information Criterion”**, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12, 3 (2013) 1352–1362.
- [49]. Cao, Y., Zhang, H., Wu, D. ve Yuan, D., **“OGCMAC: A Novel OFDM Based Group Contention MAC for VANET Control Channel”**, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16, 9 (2017) 5796–5809.
- [50]. Liu, H. ve Li, G., *OFDM-Based Broadband Wireless Networks: Design and Optimization*, First Edition, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2005, s. 116.
- [51]. IEEE Std 802.11a-1999, Part11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. High-speed Physical Layer in 5 GHz Band, IEEE, 1999.
- [52]. ANSI/IEEE 802.11g-2003, Part11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE, 2003.
- [53]. IEEE Std 802.11h-2003, Part11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. Amendment 5: Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5GHz Band in Europe, IEEE, 2003.

- [54]. IEEE Std 802.11j-2004, Part11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. Amendment. 7: 4.9GHz-5GHz Operation in Japan, IEEE, 2004.
- [55]. Barros, D. J., Wilson, S. K., ve Kahn, J. M., Comparison of Orthogonal Frequency Division Multiplexing and Pulse-Amplitude Modulation in Indoor Optical Wireless Links, *IEEE Transactions on Communications*, 60, 1 (2012) 153–163.
- [56]. Albayrak, C., 2018. Kapalı Mekanlarda Görünür Işık Haberleşmesi İçin Oransız Kodlara Dayalı Hız Uyarlaması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, Trabzon, 141 s.
- [57]. Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S., Langer, K. D., and Walewski, J. W., 2010. "513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED," **Journal of Lightwave Technology**, vol. 28, no. 24, p. 3512–3518.
- [58]. Elgala, H., Mesleh, R., Haas, H., and Pricope, B., 2007. OFDM Visible Light Wireless Communication Based on White LEDs, in *Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology (VTC)*, Dublin, Ireland.
- [59]. Dimitrov, S., Sinanovic, S., and Haas, H., 2012. Signal Shaping and Modulation for Optical Wireless Communication, **IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology (IEEE/OSA JLT)**, vol. 30, no. 9, p. 1319–1328.
- [60]. Elgala, H., Mesleh, R., and Haas, H., 2009. Practical Considerations for Indoor Wireless Optical System Implementation using OFDM, in *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Telecommunications (ConTel)*, Zagreb, Croatia.
- [61]. Gebeyehu, Z. H., 2018. Signal Transmission and Detection Scheme for Energy and Spectrally Efficient Indoor Optical Wireless Communications, Pan African University, Doctor Thesis, Afrika, 155 s.
- [62]. Armstrong, J., 2009. OFDM for Optical Communications, **Journal of Lightwave Technology**, vol. 27, no. 3, pp. 189 – 204.
- [63]. Armstrong, J., and Lowery, A., 2006. Power Efficient Optical OFDM, *Electronics Letters*, vol. 42, no. 6, p. 370–372, March 16.
- [64]. Carruthers, J. B., and Kahn, J. M., 1996. Multiple-subcarrier Modulation for Nondirected Wireless Infrared Communication, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**.

- [65]. Mesleh, R., Elgala, H., and Haas, H., **“Performance Analysis of Indoor OFDM Optical Wireless Communication Systems”**, in *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, Shanghai, China, 2012.
- [66]. Çelik, Y., vd., **“On the performance of SC-FDE schemes with decision feedback equalizer for visible light communications”**, *17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Temmuz 2015, Budapeşte.
- [67]. Damnjanovic, A., Montojo, J., Wei, Y., Ji, T., Luo, T., Vajapeyam, M., Yoo, T., Song, O. ve Malladi, D., **“A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks”**, *IEEE Wireless Communications*, 18, 3 (2011) 1536-1284.
- [68]. Dissanayake, S. D. ve Armstrong, J., 2013. Comparison of Aco-Ofdm, Dco-Ofdm and Ado-Ofdm in IM/DD Systems, **Journal of Lightwave Technology**, 31, 7 (2013) 1063–1072.
- [69]. Armstrong, J. ve Schmidt, B. J., **“Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN”**, *IEEE Communications Letters*, 12, 5 (2008)343–345.
- [70]. Armstrong, J., Schmidt, B. J., Kalra, D., Suraweera, H. A. ve Lowery, A. J., **“Performance of Asymmetrically Clipped Optical OFDM in AWGN for An Intensity Modulated Direct Detection System”**, *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, San Francisco, CA, USA, 2006, s. 1–5.
- [71]. Dimitrov, S. ve Haas, H., **Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi**, Cambridge University Press., Cambridge, 2015.
- [72]. Arnon, S., *Visible Light Communication* First Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2015.
- [73]. Komine, T., Lee, J. H., Haruyama, S. ve Nakagawa, M., **“Adaptive Equalization System for Visible Light Wireless Communication Utilizing Multiple White LED Lighting Equipment”**, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 6 (2009) 2892–2900.
- [74]. Carruthers, J. B. and Kahn, J. M. 1996. Multiple-subcarrier Modulation for Nondirected Wireless Infrared Communication, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 14, no. 3, p. 538–546.

- [75]. Ohtsuki, T., 2003. Multiple-Subcarrier Modulation in Optical Wireless Communications, **IEEE Communications Magazine**, vol. 41, no. 3, p. 74–79.
- [76]. Panta, J., Saengudomlert, P. and Sripimanwat, K. **“Optimization of operating BW for indoor optical wireless OFDM transmission with IM/DD”**, in *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technologies (ECTI-CON)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014..
- [77]. Dimitrov, S., Sinanovic, S. and Haas, H. **“A comparison of OFDM-based modulation schemes for OWC with clipping distortion”**, in *IEEE GLOBECOM Workshops*, Houston, TX, USA, 2011.
- [78]. Saengudomlert, P., Panta, J. and Sripimanwat, K., **“Optimal sizing of QAM constellation for indoor optical wireless OFDM transmissions without bandwidth limitation”**, in *IEEE International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, Chonburi, Thailand, 2014.
- [79]. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., *Optical Wireless Communications: System and Channel Modeling with MATLAB*, 1st ed., CRC press. 2012.
- [80]. Elgala, H., Mesleh, R. and Haas, H. 2009. Indoor Broadcasting via White LEDs and OFDM, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 3, p. 1127–1134.
- [81]. Fernando, N., 2014. Non-Coherent OFDM Techniques, PhD Thesis, Monash University.
- [82]. Ohtsuki, T., 2003. Multiple-Subcarrier Modulation in Optical Wireless Communications, **IEEE Communications Magazine**, vol. 41, pp. 74–79.
- [83]. Gonzalez, O., Perez-Jimenez, R., Rodriguez, S., Rabadan, J. and Ayala, A. 2005. OFDM Over Indoor Wireless Optical Channel, *IEEE Proceedings–Optoelectronics*, vol. 152, no. 4, pp. 199–204.
- [84]. Dimitrov, S., Sinanovic, S., and Haas, H., **“Clipping Noise in OFDM-based Optical Wireless Communication Systems”**, *IEEE Transactions on Communications (IEEE TCOM)*, 2012, vol. 60, no. 4, p. 1072–1081.
- [85]. Tsonev, D., Videv, S., and Haas, H., 2015. Unlocking Spectral Efficiency in Intensity Modulation and Direct Detection Systems, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 33, no. 9, pp. 1758–1770.

- [86]. Gebeyehu, Z. H., Langat, P. K., and Maina C. W., 2018. BER Performans of Stratified ACO-OFDM for Optical Wireless Communications over Multipath Channel. **Journal of Computer Networks and Communications**, 14 s.
- [87]. Panta, J., Saengudomlert, P. and Sripimanwat, K., 2014. Performance Analysis of Partial Pre-equalization for ACO-OFDM Indoor Optical Wireless Transmissions, *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP)*, Manchester, UK, 2014, pp. 1029-1033.
- [88]. Fernando, N., Hong, Y., and Viterbo, E., 2011. Flip-OFDM for Optical Wireless Communications," *2011 IEEE Information Theory Workshop*, Paraty, Brazil, pp. 5-9.
- [89]. IEEE 802.15.7TM-2011, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 15.7: Short – Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE, 2011.
- [90]. Komine, T., Tanaka, Y., Haruyama, S., and Nakagawa, M., **“Basic Study on Visible-Light Communication Using Light Emitting Diode Illumination”**, *Proc. of 8th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2001)*, pp. 45-48, Montreal, Canada, 2001.
- [91]. Komine, T., and Nakagawa, M., 2004. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights, **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, vol. 50, no. 1, pp. 100-107.
- [92]. Tsonev, D., Islim, M.S., Haas, H., 2016. OFDM-Based Visible Light Communications. In: Uysal M., Capsoni C., Ghassemlooy Z., Boucouvalas A., Udvary E. (eds) *Optical Wireless Communications. Signals and Communication Technology*. Springer, Cham. (https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0_12).
- [93]. Sun, Y., Yang, F., and Cheng, L., **“An Overview of OFDM-Based Visible Light Communication Systems From the Perspective of Energy Efficiency Versus Spectral Efficiency”**, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 60824-60833.
- [94]. Yong, J., **“Modulation and Demodulation Apparatuses and Methods for Wired / Wireless Communication”**, Korea Patent WO2007/064 165, 2007.
- [95]. Wang, J. -B., Jiang, P., Wang, J., Chen, M., and Wang, J.-Y., **“Data Detection and Code Channel Allocation for Frequency-Domain Spread ACO-OFDM**

Systems Over Indoor Diffuse Wireless Channels”, in *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 1-16, Feb. 2014, Art no. 6800716, doi: 10.1109/JPHOT.2014.2305736.

[96]. Wu, C., Zhang, H., and Xu, W., “**On Visible Light Communication Using LED Array with DFT-Spread OFDM**”, *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 3325-3330, doi: 10.1109/ICC.2014.6883834.

[97]. Özen, A., 2011. A Novel QAM Technique for High Order QAM Signaling, **Radioengineering Journal**, Vol. 20, Number 3, pp. 683-691, ISSN 1210-2512.

[98]. Standard IEEE 802.16-2004, Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, 2004.

[99]. M. Maraş, 2021. A Novel M-Level Modulation Technique Built on the Spreading Method for Visible Light Communication, MsC. Thesis Proposal, Nuh Naci Yazgan University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences.