

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

**LLWT Tabanlı M-CSK Modüleli Optik OFDM Tasarımı
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Talat KEPEZKAYA**

**Danışman
Prof. Dr. Ali ÖZEN**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

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

**LLWT Tabanlı M-CSK Modüleli Optik OFDM Tasarımı
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Talat KEPEZKAYA**

**Danışman
Prof. Dr. Ali ÖZEN**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Talat KEPEZKAYA

İmza



YÖNERGEYE UYGUNLUK

“LLWT Tabanlı M-CSK Modüleli Optik OFDM Tasarımı” adlı Yüksek Lisans Tezi Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Talat KEPEZKAYA
İmza

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Ali ÖZEN
İmza

YÜKSEK LİSANS BİTİRME TEZİ KABUL VE ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Ali ÖZEN danışmanlığında Talat KEPEZKAYA tarafından hazırlanan “LLWT Tabanlı M-CSK Modüleli Optik OFDM Tasarımı” adlı bu çalışma, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim 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 Kurulununtarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /...../

Prof. Dr. Erkan Köse
Enstitü Müdürü V.

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda bana destek veren ve yol gösteren kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Ali ÖZEN'e ve her zaman yanımda olan kardeşim Azra KEPEZKAYA, annem Nazmiye KEPEZKAYA, babam İsmail KEPEZKAYA, aile büyüklerime ve HARGEM laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Talat KEPEZKAYA
Kayseri, Ağustos 2023



LLWT Tabanlı M-CSK Modüleli Optik OFDM Tasarımı

Talat KEPEZKAYA

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2023

Danışman: Prof. Dr. Ali ÖZEN

ÖZET

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte verinin boyutu ve trafiği, nüfusun artması ile çoğalmaktadır. Haberleşme sektöründe ise bu yükü kaldırmak için çalışmalar hızlandırılmıştır ancak RF teknolojisi sınırlı bant genişliği ve lisans durumlarından dolayı farklı yeni teknoloji arayışlarına da önem artmıştır. Görünür ışık iletişimi (VLC), radyo frekansı (RF) haberleşme sistemlerinin tamamlayıcı bir teknolojisi veya alternatifi bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Görünür ışık spektrumu neredeyse Radyo frekans spektrumundan 10000 kat daha büyük frekans aralığına sahiptir. Geniş spektruma sahip olması, elektromanyetik parazitlere karşı sağladığı direnç ve güvenilir olması sebebiyle 6G ve ötesi çalışmalarda odak noktası haline gelmiştir. VLC de amaç ışığın hem aydınlatma özelliğinden faydalanıp hem de haberleşme için kullanılmasına olanak sağlamaktır Ortogonal frekans bölmeli çoğullama (OFDM), süper hızlı optik telsiz iletişim (OWC) için RF haberleşmesinde olduğu gibi, semboller arası girişime (ISI) karşı gelme sebebi ile en iyi opsiyon olacaktır. Yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (IM/DD) sistemine uygun hale getirilen asimetrik kırpılmış optik OFDM (ACO-OFDM), DC ön-gerilim eklemeli optik OFDM (DCO-OFDM) ve Flip-OFDM, literatürlerde OWC için bahsedilen literatürde onay almış polarizasyonlu OFDM şemalarıdır. Bu çalışmada, OWC sistemleri için önerilen ACO-OFDM, DCO-OFDM ve Flip-OFDM sistemlerinin ve 5G ve ötesi çalışmalarda adını çokça duyuran ZT-DFT-OFDM'in optik sistemlerdeki performanslarını arttırmak için Lazy dalgacığını kullanan Lifting dalgacık dönüşümünün (LLWT) bu dört optik OFDM dalga formları ile birleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, VLC sistemleri yukarıda bahsedilen pek çok avantajına karşılık titreşim problemi gibi bir dezavantaj ile karşı karşıyadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için literatürde yapılan pek çok araştırma mevcuttur. Önerilen bu yüksek lisans tezi çalışması kapsamında, IEEE 802.15.7 standartında da belirtildiği gibi, titreşim problemi yok denecek kadar az olan M seviyeli renk kaydırmalı anahtarlama (M-CSK) ve M seviyeli karesel genlik

modülasyonu (M-QAM) modülasyonlarının kullanıldığı ortamda bit hata oranı (BER) ve tepe ortalama güç oranı (PAPR) kıyaslama kriterleri için tezde konu edilen dalga formları AWGN kanal ortamında simülasyonlar ile sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Elimizde bulunan benzetim sonuçlarından, tezde bahsedilen dalga formlarının hem M-CSK hem de M-QAM modülasyonlarında daha iyi performans sağladığı gözlenmektedir. Ayrıca Lazy Lifting Dalgacık Dönüşümünün her iki modülasyon türüne ve Optik-OFDM sistemlerine de katkı sağladığı gözlenmektedir.



Anahtar Kelimeler: Görünür Işık Haberleşmesi, Renk Kaydırmalı Anahtarlama, Optik-OFDM, DCO-OFDM, ACO-OFDM, Flip-OFDM, ZT-DFT-OFDM, IEEE 802.15.7, Lifting Dalgacık Dönüşümü.

LLWT Based Optical OFDM Design with M-CSK Module

Talat Kepezkaya

Nuh Naci Yazgan University, Graduate School of Sciences

Electrical and Electronics Engineering Master of Science Thesis, August 2023

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZEN

ABSTRACT

With the development of technology, the size and traffic of data increase with the increase in population. In the communication sector, efforts have been accelerated to remove this burden, but due to the limited bandwidth and license status of RF technology, the search for different new technologies has increased in importance. Visible light communication (VLC) is emerging as a complementary technology or an alternative technology to radio frequency (RF) communication systems. The visible light spectrum has a frequency range almost 10000 times larger than the radio frequency spectrum. Due to its wide spectrum, resistance to electromagnetic interference, and reliability, it has become the focal point of 6G and beyond studies. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) will be the best option for super-fast optical radio communication (OWC) due to its resistance to inter-symbol interference (ISI), as in RF communication. Asymmetrically clipped optical OFDM (ACO-OFDM), DC bias coupled optical OFDM (DCO-OFDM), and Flip-OFDM, which have been adapted for intensity modulation/direct detection (IM/DD) systems, are the approved polarisation OFDM schemes mentioned in the literature for OWC. In this paper, to improve the performance of ACO-OFDM, DCO-OFDM, and Flip-OFDM proposed for OWC systems and ZT-DFT-OFDM, which has been widely used in 5G and beyond, in optical systems, it is proposed to combine the Lifting wavelet transform (LLWT) using the Lazy wavelet with these four optical OFDM waveforms. In addition, VLC systems are faced with a disadvantage such as jitter issues despite the many advantages mentioned above. There are many pieces of research in the literature to eliminate this disadvantage. Within the scope of this proposed master's thesis, as stated in the IEEE 802.15.7 standard, the results are compared by computer simulations in AWGN channel environment for bit error rate (BER) and peak average power ratio (PAPR) benchmarking criteria in the environment

where M-level color shift keying (M-CSK) and M-level quadrature amplitude modulation (M-QAM) modulations are used. From the simulation results, it is observed that the proposed waveforms provide better performance in both M-CSK and M-QAM modulations. It is also observed that the Lazy Lifting Wavelet Transform contributes to both modulation types and Optical-OFDM systems.



Keywords: Visible Light Communication, Color Shift Keying, Optical-OFDM, DCO-OFDM, ACO-OFDM, Flip-OFDM, ZT-DFT-OFDM, IEEE 802.15.7, Lifting Wavelet Transform.

İÇİNDEKİLER

LLWT Tabanlı M-CSK Modüleli Optik OFDM Tasarımı

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	iii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iv
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR VE SEMBOLLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
TABLolar DİZİNİ.....	xxi

1. BÖLÜM: GİRİŞ

1.1 Motivasyon	1
1.2 Giriş.....	2
1.3 Gelecek Haberleşme Beklentileri	4
1.4 5G ve Ötesinde Haberleşme Beklentileri	7
1.5 5G ve Ötesi Sistemlerde Optik Kablosuz Haberleşmenin Kullanılabilmesi	9

2. BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ NEDİR?

3.BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ UYGULAMALARI

4.BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ

4.1 Giriş.....	23
4.2 Optik OFDM Teknikleri	24
4.3 Doğru Akım Eklemeli Optik OFDM (DCO-OFDM).....	25
4.4 Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM (ACO-OFDM).....	27
4.5 FLİP OFDM (FLİP-OFDM).....	28
4.6 Sıfır Sonlu DCT-s/DST-s Optik-OFDM (ZT DCT-s/DST-s O-OFDM).....	30

5.BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE MODÜLASYON TEKNİKLERİ

5.1 Giriş.....	33
5.2 Aç-Kapa Anahtarlama (ON-OFF KEYING, OOK).....	34
5.3 Değişken Darbe Pozisyonu Modülasyonu (VPPM)	34
5.4 Renk Kaydırmalı Anahtarlama (CSK).....	35
5.5 M-CSK Bit Hata Oranı Analizi	43

6.BÖLÜM: LİFTİNG DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ

7. BÖLÜM: LAZY LIFTING WAVELET DÖNÜŞÜMÜ TABANLI M-CSK-O- OFDM SİSTEMİ

8.BÖLÜM: BİLGİSAYAR BENZETİM SONUÇLARI

8.1 Dalgacık Ailelerinin AWGN Kanal Sonuçları	52
8.2 LAZY Dalgacığının AWGN Kanal Sonuçları.....	60
8.3 PAPR Benzetim Sonuçları	88

9.BÖLÜM: SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA.....	96
----------------------	-----------

ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
-----------------------	---

KISALTMALAR VE SEMBOLLER

KISALTMALAR

1G	: Birinci Nesil
2G	: İkinci Nesil
3G	: Üçüncü Nesil
4G	: Dördüncü Nesil
5G	: Beşinci Nesil
6G	: Altıncı Nesil
ACO	: Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM
AWGN	: Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
CDF	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
CIE	: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
CP	: Periyodik Önek (Cyclic Prefix)
CSK	: Renk Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying)
DCO	: Doğru Akım Sapmalı Optik OFDM
DCT	: Ayrık Kosinüs Dönüşümü
DST	: Ayrık Sinüs Dönüşümü
EMI	: Elektromanyetik Parazit
HS	: Hermityen Simetri
ICI	: Taşıyıcılar Arası Girişim (Inter Carrier Interference)
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
IM/DD	: Yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet Of Things)
IR	: Kızıl Ötesi
ISI	: Simgeler Arası Girişim (Inter Symbol Interference)
JEITA	: Japonya Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Sanayicileri Derneği
LED	: Işık Yayan Diyot (Light-Emitting Diode)
Li-Fi	: Işık Bağlılık
LLWT	: Lazy Lifting dalgacık dönüşümünü
LTE	: Uzun Süreli Evrim (Long Term Evolution)
LWT	: Lifting Dalgacık Dönüşümü (Lifting Wavelet Transform)

M-CSK	: M seviyeli renk kaydırmalı anahtarlama
MIMO	: Çok Girişli Çok Çıkışlı
M-QAM	: M seviyeli karesel genlik modülasyonu
OFDM	: Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama
OOK	: Aç Kapa Anahtarlama
OWC	: Optik Telsiz İletişim
PAPR	: Tepe Ortalama Güç Oranı
PHY	: Fiziksel Katman
RF	: Radyo Frekansı (Radio Frequency)
RGB	: Kırmızı Yeşil Mavi
SE	: Spektral Verimlilik
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
VLC	: Görünür Işık İletişimi (Visible Light Communication)
VLCC	: Görünür Işık Haberleşmesi Konsorsiyumu
VPPM	: Ayarlanabilir Darbe Modülasyonu
Wi-Fi	: Kablosuz Bağlılık
ZT DFT-s OFDM	: Sıfır Sonlu Ayrık Fourier Dönüşümü Yayılmalı OFDM

SEMBOLLER

L	: CSK Kısıtlaması: Toplam RGB yoğunluğu (Lümen veya Amper)
P_r	: Kırmızı Renk Yoğunluğu
P_g	: Yeşil Renk Yoğunluğu
P_b	: Mavi Renk Yoğunluğu
P_T	: Toplam Renk Yoğunluğu
$\hat{P}_r$	: Alıcıda Kırmızı Renk Yoğunluğu
$\hat{P}_g$	: Alıcıda Yeşil Renk Yoğunluğu
$\hat{P}_b$	: Alıcıda Mavi Renk Yoğunluğu
η_r	: Gürültü Eklenmiş Kırmızı Renk
η_g	: Gürültü Eklenmiş Yeşil Renk
η_b	: Gürültü Eklenmiş Mavi Renk
$\hat{s}$	: İşaret Yıldız Diyagramı Noktası
s_l	: Alıcıda Gelen İşaret
Q	: Q fonksiyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	: Bölge ve gelişmişlik durumuna göre internet kullanan bireylerin yüzdesi. [1].....	2
Şekil 1.2	: 2018 yılındaki küresel ağ trafiği grafiği[2].....	3
Şekil 1.3	: İnternet kullanıcı sayısı gösterimi [3].....	4
Şekil 1.4	: Geçmişten günümüze haberleşme jenerasyonlarının gelişimi [6].....	5
Şekil 1.5	: Haberleşme Kuşaklarının Gelişimi [7]	6
Şekil 1.6	: 5G ve Ötesi [12]	7
Şekil 1.7	: Elektromanyetik Spektrum [13]	8
Şekil 1.8	: Işık Kullanılan Haberleşme Sistemleri	9
Şekil 1.9	: Heliograf, (Mance Mark V),[14] (a) İngiliz ordusu versiyonu b) şematik yapı ve montaj.....	9
Şekil 1.10	: Fotofon [16]. (a) Verici (b) Alıcı	10
Şekil 1.11	: TED Global Konuşması [20]	11
Şekil 2.1	: Elektromanyetik Dalga Spektrumu Frekans Aralık Tablosu[22]	13
Şekil 2.2	: Görünür Işık Haberleşmesi kapsama alanı ve veri hızı karşılaştırılması..	14
Şekil 2.3	: LED, VLC ve Haberleşme sektörünün gelişimi [25]	15
Şekil 3.1	:Havacılık alanında görünür ışık haberleşmesi [34]	18
Şekil 3.2	: Akıllı Şehirler alanında görünür ışık haberleşmesi [35]	19
Şekil 3.3	: Su altı Görünür Işık iletişimi [36]	20
Şekil 3.4	: Araçlar için Görünür Işık iletişimi [37].....	21
Şekil 3.5	: Hoparlörler için Görünür Işık iletişimi [37]	22
Şekil 4.1	: DCO-OFDM sisteminin blok şeması[41]	25
Şekil 4.2	: DCO-OFDM Hermityen Simetri Uygulaması	25
Şekil 4.3	: Alt taşıyıcı sayısının 64 ve Modülasyon türü BPSK olan DCO-OFDM zaman bölgesi sinyalinin DC-bias eklenmeden önceki ve sonraki hali	26
Şekil 4.4	: ACO-OFDM sisteminin blok şeması[45]	27
Şekil 4.5	: ACO-OFDM Hermityen Simetri Uygulaması	28
Şekil 4.6	:Flip-OFDM sisteminin blok şeması[48]	29
Şekil 4.7	: Flip-OFDM Hermityen Simetri Uygulaması	29
Şekil 4.8	: ZT-DFT-S-O-OFDM sisteminin blok şeması [49]	31
Şekil 5.1	: VPPM veri darbeleri örneği	35
Şekil 5.2	: 4-CSK takımyıldızı ve veri eşleme	38

Şekil 5.3	: 8-CSK takımıyıldızı ve veri eşleme	38
Şekil 5.4	: 16-CSK takımıyıldızı ve veri eşleme	39
Şekil 5.5	: CIE 1931 x-y renk koordinatları 4-CSK örneği	40
Şekil 5.6	: Basit Verici Yapısı	40
Şekil 5.7	: Alıcı Yapısı	41
Şekil 6.1	: Lifting Dalgacık Dönüşümünde ki temel adımlar	45
Şekil 6.2	: Ters Lifting dalgacık dönüşümü	46
Şekil 6.3	: Ortogonal Dalgacık Ailesi	48
Şekil 6.4	: Biortogonal Dalgacık Ailesi	48
Şekil 7.1	: LLWT M-CSK-O-OFDM Sistemi blok diyagramı	49
Şekil 8.1	: AWGN kanal ortamında 4-CSK modülasyonlu db dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği	53
Şekil 8.2	: AWGN kanal ortamında 4-CSK modülasyonlu coif dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği	54
Şekil 8.3	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda CDF dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği	55
Şekil 8.4	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda bior dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği	55
Şekil 8.5	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda rbio dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği	56
Şekil 8.6	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda sym dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği	57
Şekil 8.7	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda 9.7, r9.7, bs3 ve rbs3 dalgacıklarının BER-SNR grafiği	58
Şekil 8.8	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda haar ve lazy dalgacıklarının BER-SNR grafiği	58
Şekil 8.9	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda dalgacık aileleri arasında en iyi dalgacıkların BER-SNR grafiği	59
Şekil 8.10	: AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda hem klasik sistemin hem de dalgacıklar arasındaki en iyi dalgacıkların BER-SNR grafiği	60
Şekil 8.11	: AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	61

Şekil 8.12	: AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	62
Şekil 8.13	: AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda ACO-OFDM ve VLC OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	63
Şekil 8.14	: AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	64
Şekil 8.15	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 4-CSK ve 4-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması	65
Şekil 8.16	: AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	66
Şekil 8.17	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı FLİP-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 4-CSK ve 4-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması	67
Şekil 8.18	: AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	68
Şekil 8.19	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 4-CSK ve 4-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması	69
Şekil 8.20	: AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	70
Şekil 8.21	: AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	71
Şekil 8.22	: AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda ACO-OFDM ve VLC OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	72
Şekil 8.23	: AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	73
Şekil 8.24	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 8-CSK ve 8-QAM modülasyonları için BER başarımları ölçütleri kıyaslanması	74
Şekil 8.25	: AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	75

Şekil 8.26	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı FLİP-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 8-CSK ve 8-QAM modülasyonları için BER başarımların ölçütleri kıyaslanması	76
Şekil 8.27	: AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	77
	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 8-CSK ve 8-QAM modülasyonları için BER başarımların ölçütlerinin kıyaslanması	78
Şekil 8.28		
Şekil 8.29	: AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	79
Şekil 8.30	: AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	80
Şekil 8.31	: AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda ACO-OFDM ve VLC OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR Grafiği....	81
Şekil 8.32	: AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	82
Şekil 8.33	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 16-CSK ve 16-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması	83
Şekil 8.34	: AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	84
Şekil 8.35	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı FLİP-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 16-CSK ve 16-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması	85
Şekil 8.36	: AWGN kanal 16-QAM, 16-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği	86
Şekil 8.37	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 16-CSK ve 16-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması	87
Şekil 8.38	: AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği	89

Şekil 8.39	: AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği	90
Şekil 8.40	: AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği	90
Şekil 8.41	: AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği	91
Şekil 8.42	: AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği	92
Şekil 8.43	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı dalga formlarının 4-CSK modülasyonu için PAPR performanslarının kıyaslanması	93
Şekil 8.44	: Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı dalga formlarının 4-QAM modülasyonu için PAPR performanslarının karşılaştırılması	93

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 5.1	: Renk Bantları, x-y Renk Koordinatları [21].	36
Tablo 5.2	: CSK renk Gamutu içerisinde oluşturulabilecek üçgen kombinasyonları [21].....	37
Tablo 5.3	: Sembollerin x-y koordinat değerleri	39
Tablo 5.4	: 4-CSK Modülasyonu için Kromatik ve Optik Güç Yoğunluk Seviyeleri.....	42
Tablo 5.5	: 4-CSK Sembollerine Ait Optik Güç Yoğunluk Değerlerini Kullanarak Elde Edilen Öklid Mesafeleri	42
Tablo 6.1	: Dalgacık Aileleri ve Kısa Adları	47

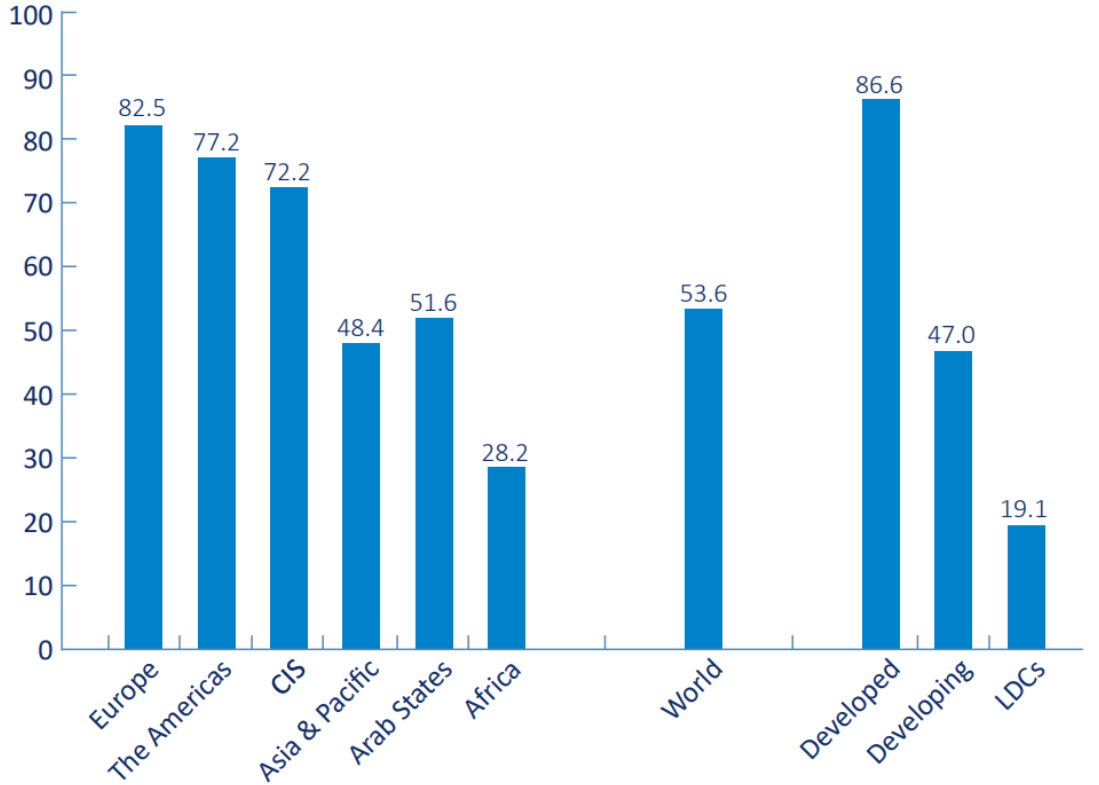
1. BÖLÜM: GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Teknolojinin gelişmesi ve insanların ihtiyaçları doğrultusunda verinin boyutu ve veri trafiği günbegün artmaktadır. Bu durum ise spektrum doluluğu olarak karşımıza çıkmakta ve haberleşme sektörünün en sorun yaratan problemi olarak görünmektedir. Bu problem karşısında, RF teknolojisine alternatif veya paralel olabilecek birçok yeni optik tabanlı iletişim teknolojisinin geliştirilmesi için literatürde çokça çalışmalar yapılmıştır. Bu soruna çare olarak görünür ışık iletişimi (VLC) önerilmiştir. Esnek regülesiz frekans bandı bulundurması, düşük elektromanyetik parazit (EMI) girişimi ve güvenli olması nedeniyle bir yıldız gibi parlayan bu teknoloji öne çıkmaktadır. Çalışmaların artması sistemlerin incelenmesi ile birlikte birçok avantajı bulunmasına karşı olarak VLC sistemleri titreşim problemi gibi bir dezavantaj ile karşı karşıyadır. Çok basit gibi görülen bu dezavantaj VLC sistemleri için araştırılması ve çözülmesi gereken çok önemli bir problemdir. Önerilen bu yüksek lisans tezi çalışması kapsamında, IEEE 802.15.7 Standardında da belirtildiği üzere, titreşim problemi yok denecek kadar az olan M-li renk kaydırmalı anahtarlama (M-CSK) modülasyonu ile literatürde kullanılan optik OFDM iletişim sistemleri ve 5G de boy gösterebilen dalga formlarının birleştirilmesi hedeflenmektedir. Özellikle, sinyal işleme video sıkıştırma gibi birçok alanda kendini ispatlamış haberleşme sistemlerine çok büyük katkısı olan taşıyıcılar arası girişim (ICI) direnci ve daha yüksek spektral verimlilik sağlayan Lazy (Lifting Dalgacık Dönüşümü) LWT dönüşümü kullanılarak optik OFDM sistemlerinin M-CSK modülasyonu ile birleştirilmesi Lazy LWT Tabanlı M-CSK Modüleli Optik OFDM Tasarımı literatürde ilk kez bu yüksek lisans tez çalışmasında önerilmiştir.

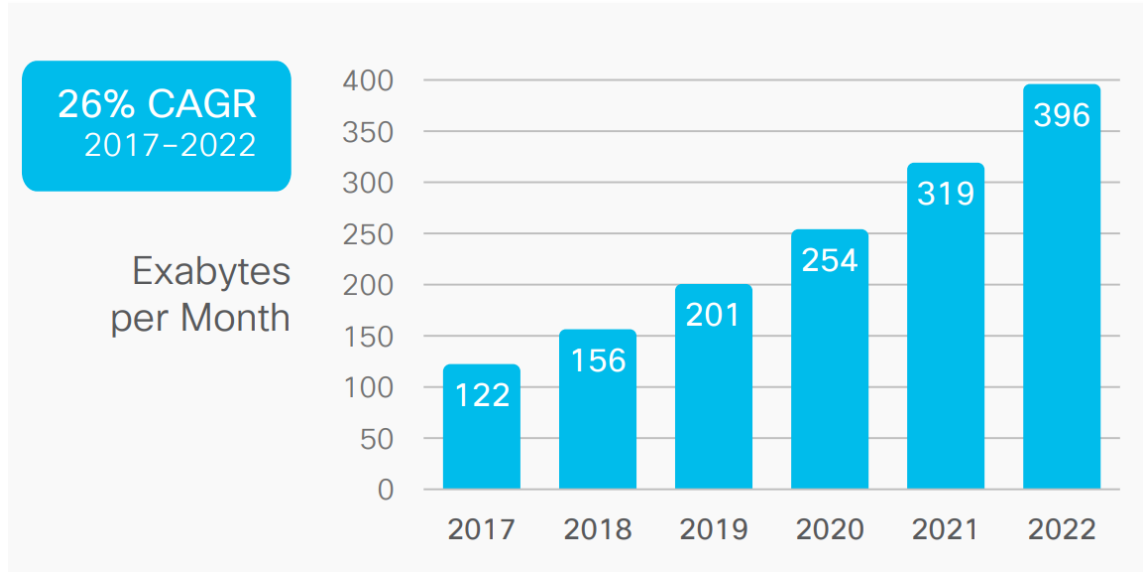
1.2 Giriş

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte telekomünikasyon alanında da gelişmeler hızlanmakta ve gelişen dünyadaki yeni teknoloji trendlerinde endüstri 4.0 makineler arası haberleşme vb. gibi uygulamalara çokça ihtiyaç duyulmaktadır. Son on yılda dünya, kablosuz ağlar da dahil olmak üzere telekomünikasyon ağlarının taşıdığı trafikte hızlı bir artış görüldü. Aynı zamanda iletişimi sağlamak için sabit elektronik cihazlara ve kablosuz cihazlara ihtiyaç duyuluyor. Müşteri ise, hem iç hem de dış mekanlarda kablosuz mobil cihazları her yerde kullanmanın rahatlığını yaşıyor. Bununla birlikte, geniş bant internet hizmetlerine yönelik sürekli artan talep, ultra yüksek veri hızları sunabilen yeni ortaya çıkan iletişim teknolojilerinde daha fazla yenilik, araştırma ve geliştirme ihtiyacını desteklemiştir. [1]'a göre, gelişmiş ülkelerde internet kullanımı 2019'da neredeyse mümkün olan maksimum seviyeye ulaştı, nüfusun neredeyse %87'si çevrimiçi, Avrupa internet kullanımının en yüksek olduğu bölge (%82.5) iken Afrika'nın en düşük bölge (%28.2) olduğu Şekil 1.1'de gözler önüne konulmuştur.



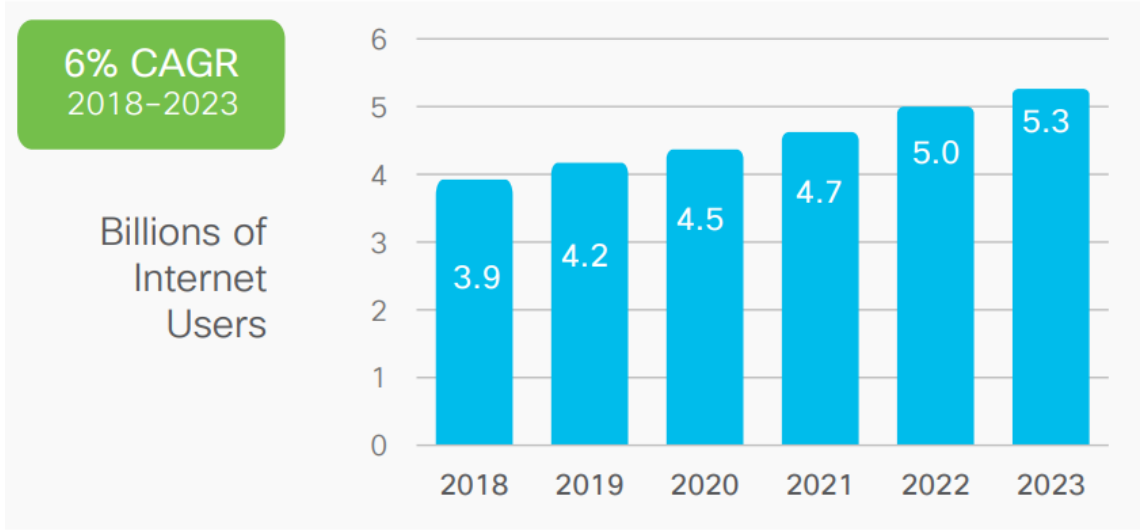
Şekil 1.1 Bölge ve gelişmişlik durumuna göre internet kullanan bireylerin yüzdesi BDT: Bağımsız Devletler Topluluğu, LDC'ler: En az gelişmiş ülkeler. [1]

Yüz milyonlarca insan, Wi-Fi (Wireless-Fidelity) veya hücresel ağı, radyo frekansı (RF) tabanlı kablosuz erişim teknolojisini kullanan dizüstü bilgisayarlar, Kişisel Dijital Asistanlar (PDA) ve diğer dijital cihazlar aracılığıyla mesaj ve dosya gönderip alıyor. CISCO şirketi, önümüzdeki yıllarda ağ veri işleme beklentilerini değerlendiren yıllık bir çalışma yürütmektedir. 2018 raporu, Şekil 1.2’de gösterilen küresel ağ trafiği istatistiklerinde gösterildiği gibi, 2020 ve 2022’de sırasıyla ayda 254 ve 396 eksabayt olarak gösterildiği gibi, internet tarafından oluşturulan trafiğin büyümesinde üstel bir eğilim olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.2 2018 yılındaki küresel ağ trafiği grafiği [2]

Küresel ağ trafiğinin sürekli ve hızlı bir şekilde arttığı gözlemlenmekte ve bu öngörülen küresel ağ trafiği enflasyonunun önümüzdeki yıllarda da devam edeceği öngörülmektedir. Veri iletişimi için mevcut ve gelişen kablosuz teknolojiler, öncelikle radyo dalgası ve mikrodalga frekanslarından yararlanmaktadır. Bu gelişme hızında, özellikle kentsel alanlarda kaçınılmaz olarak spektrum tıkanıklığına yol açmaktadır [2]. Cisco Yıllık İnternet Raporu’na göre, 2018'deki 3.9 milyar kullanıcıya karşılık 2023’e kadar 5,3 milyar kişi internet kullanacak ve 2023 yılına kadar Makineye bağlantılar, %48'lik bir paya sahip olacak. 2023 yılına kadar dünya nüfusunun %70’inden fazlasının, yani yaklaşık 5.7 milyar insanın mobil bağlantıya erişimi olacak. Şekil 1.3, küresel internet kullanıcılarının bir önceki yıl ile karşılaştırıldığında yukarı yönlü hareketini göstermektedir.



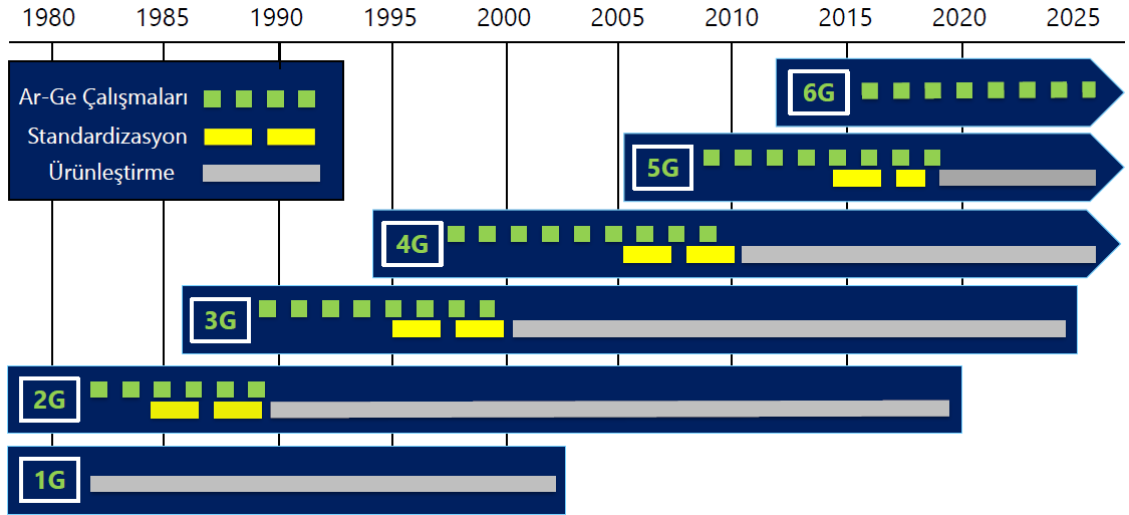
Şekil 1.3. İnternet kullanıcı sayısı gösterimi. [3]

Bu tahminlerle, altyapıdaki artışın beklemede olduğunu varsaymak mantıklıdır. Küresel trafik, farklı türde kablosuz cihaz ve sistemlerin geliştirilmesi nedeniyle bu tutarlı artışı gerçekleştirebilir. Ancak, bu artan ağ altyapısı ile potansiyel bir tıkanıklığın dikkate alınması gereken ciddi bir sorundur. Verimliliği korumak ve paraziti azaltmak için mevcut radyo spektrumunun sıkıntısını azaltmak için büyük çaba harcanmaktadır, ancak bu yönetimin bile sınırları vardır.

Genel anlamda telekomünikasyon alanında çözüm bekleyen bir takım sorunlardan bahsettik. Bu nedenle, görünür ışık spektrumu gibi farklı spektrumlara odaklanan bazı çabalarla birlikte, yeni veri iletim yolları keşfetme çabaları artmıştır. Bu ve benzeri sorunlara çözüm olarak şu an kullanılan haberleşme yöntemine alternatif olarak ortaya atılan görünür ışıkla iletişim (Visible Light Communications, VLC) teknolojisi, halk dilinde Li-Fi (Light-Fidelity) olarak bilinen bir teknolojiyi ortaya çıkardı [4].

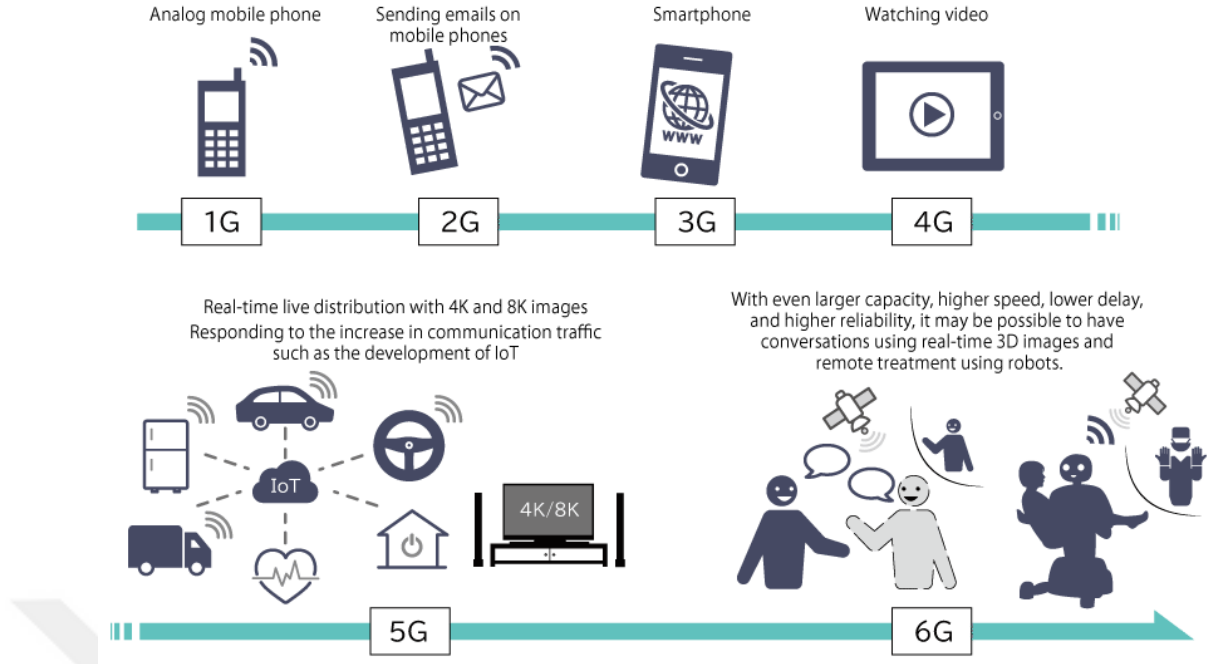
1.3 Gelecek Haberleşme Beklentileri

İnsanların çoğalan iletişim ihtiyaçları göz önüne alındığında, haberleşme teknolojileri alanında yenilikler yapılmaktadır. Bu iletişim macerası, sesler çıkararak ve konuşarak başlar ve ilkel güvercin, duman gibi değişik metotlarla devam eder. Daha sonra bilgisayar devri, kablolu telefonun keşfi ve radyo dalgalarının keşfi gibi büyük gelişmelerin gelmesi ile birlikte haberleşme sektörü çağ atladı. Yarı iletkenlerdeki bu ilerlemeler ve gelişmeler, günümüz iletişim teknolojilerinin inanılmaz hızlı gelişiminin temelini oluşturmuştur. Kablosuz iletişim, Marconi'nin ilk kablosuz telgrafın patentini aldığı yüzyılın başında başladı ve günümüze kadar süregeldi [5].



Şekil 1.4 Geçmişten günümüze haberleşme jenerasyonlarının gelişimi [6]

Bugüne kadar G ile ifade edilen jenerasyon “kuşak” anlamına gelen teknoloji 1980 yıllarından bu yana Şekil 1.4’te ve Şekil 1.5’te görüldüğü üzere devam etmekte ve giderek gelişmektedir. 1979’da Nippon Telegraph ve Telephone Public Corporation (şu anda NTT), dünyada ilk kez birinci nesil (1G) mobil iletişim hizmetini halka ticarileştirdi. Başlangıçta, hizmet yalnızca araç içi terminaller için mevcuttu ve bunlar aynı zamanda araç telefonları olarak da biliniyordu. 1985 yılında taşıma terminalleri ile nihayet arama yapmak mümkün hale geldi. 1993 yılında dijital, ikinci nesil (2G) bir mobil iletişim sistemi piyasaya sürüldü ve analog 1G sisteminin yerini aldı. 2G ile telefon görüşmeleri dışındaki kısa mesaj gönderme gibi hizmetler de mümkün hale geldi. 2000’li yıllarda dahili kameralı cep telefonları piyasaya sürüldü ve ilk akıllı telefonlar da ortaya çıktı. Veri iletişimi ve görüntü gönderme gibi daha gelişmiş hizmetler kullanılabilir hale geldi. 3G, LTE ve 4G Sistemleri ile mobil iletişim sistemlerinin hız ve kapasitesi artırıldı. Günümüzde yaygın olarak kullanılan 4G ve LTE karşılaştırıldığında 5G’nin 100 kat daha fazla iletim hızına (10 Gbps veya daha fazla), 1/10 iletim gecikmesine (1 msn veya daha az) ve 100 kat daha fazla bağlantı yoğunluğuna sahip olması bekleniyor. Sonuç olarak, yüksek hızlı, yüksek hacimli iletişim mümkündür. Bu, 5G ile, neredeyse hiç gecikme olmadan gerçek zamanlı olarak yüksek kaliteli 4K ve 8K görüntüler sunmanın ve sürekli artan sayıda IoT cihazından gelen iletişim verilerini aynı anda işlemenin mümkün olacağı anlamına geliyor.

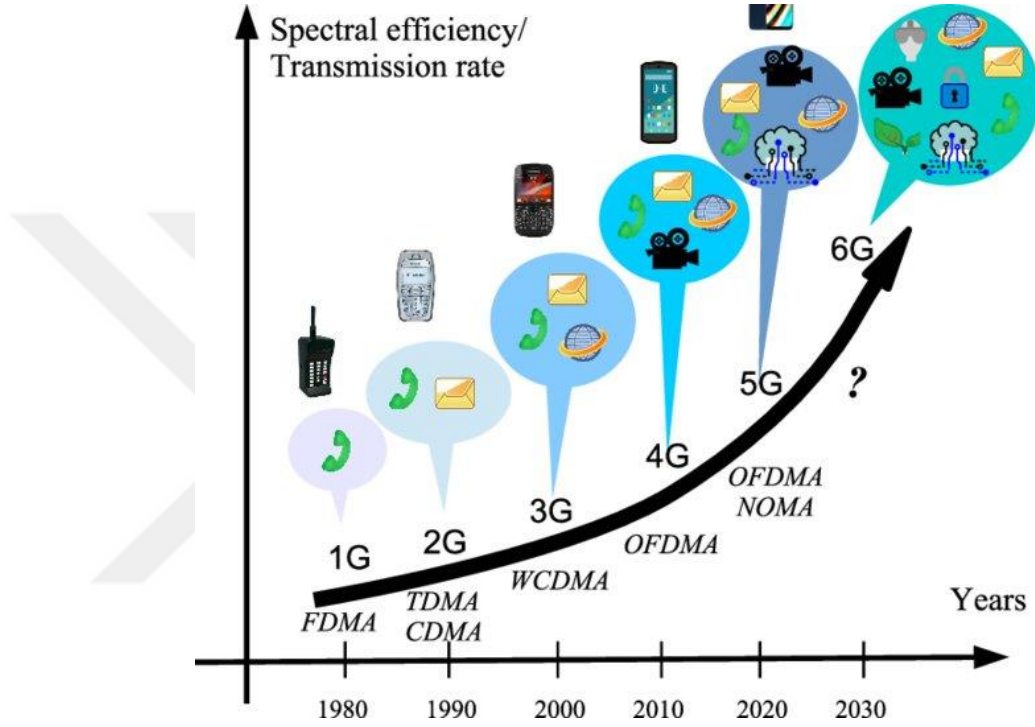


Şekil 1.5 Haberleşme Kuşaklarının Gelişimi [7]

Mart 2017’de yayınlanan 3GPP (3. Nesil Ortaklık Projesi) Sürüm 15 standardı ile başlayarak, yepyeni 5. nesil (5G) kablosuz iletişim teknolojisi ile dünya çapında önemli gelişmeler yaşandı. Bu sürümler devam ederken, 5G’nin dağıtım süreci yüksek bir olgunluk düzeyine ulaştı. Yakın tarihli bir Küresel mobil Tedarikçiler Derneği (GSA) raporuna göre, 72 ülkeden 176 operatör, Ağustos 2021 [8] itibariyle ticari 5G ağı başlattı. Bununla birlikte, 5G’nin uygulanmasındaki son gelişmeler, Her Şeyin İnterneti (IoE) sistemlerinin öncüsü olarak aday gösterilmesine rağmen 5G’nin dezavantajlarını ve sınırlamalarını ortaya çıkardı [9]. 5G, görünür ışık haberleşmesi (VLC), milimetre dalga (mmWave) iletişimi, çoklu numeroloji, ortogonal frekans bölme (OFDM) ve MIMO gibi yeni teknolojileri kullanarak kablosuz ağlara daha fazla esneklik ve verimlilik getirdi. Ek olarak, 5G sistemleri gelişmiş gezgin geniş bant hizmetlerini, yüksek derecede güvenilir düşük gecikmeli iletişimi ve veri hızlarını artırmaya hazır olsa da, gelecekteki IoE uygulamalarını destekleyip desteklemeyecekleri belirsizdir [10].

Bu nedenle araştırmacılar, Şekil 1.6’da görülen 2030 yılından sonra hayata geçmesi öngörülen 6. nesil (6G) kablosuz ağlar için sofistike iletişim teknolojilerini araştırıyor ve merak uyandıran konseptler geliştiriyorlar. 2030 ve sonrasındaki akıllı bilgi toplumunun geleceği oldukça ilgi çekici olacak. 6G, her şeyi birbirine bağlayarak, neredeyse sınırsız kablosuz kapsama alanı sağlayarak, tam dikey ağlar kurarak ve dokunsal uygulamalar için holografik ve yüksek hassasiyetli iletişimi destekleyerek son

derece dijital bir topluluğun temel sağlayıcısı olacaktır [11]. Ek olarak, genişletilmiş gerçeklik uygulamalarından uçan araçlara, uzay yolculuğu ve beyin-bilgisayar arayüzlerine kadar uzanan yeni IoE hizmetleri, 6G ağları ile gerçeğe dönüşecek ve 6G'yi gerçek IoE ustası yapacaktır [9]. Bununla birlikte, bu yeni ve büyüleyici uygulamalar, ultra yüksek güvenilirlik, düşük gecikme süresi, önemli ölçüde yüksek veri hızı, yüksek enerji ve spektral verimlilik ve yoğun bağlantı gibi katı ve zorlu gereksinimler getirecektir.

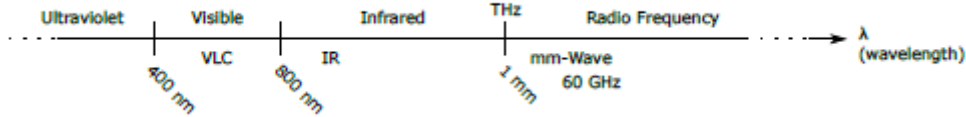


Şekil 1.6 5G ve Ötesi [12]

1.4 5G ve Ötesinde Haberleşme Beklentileri

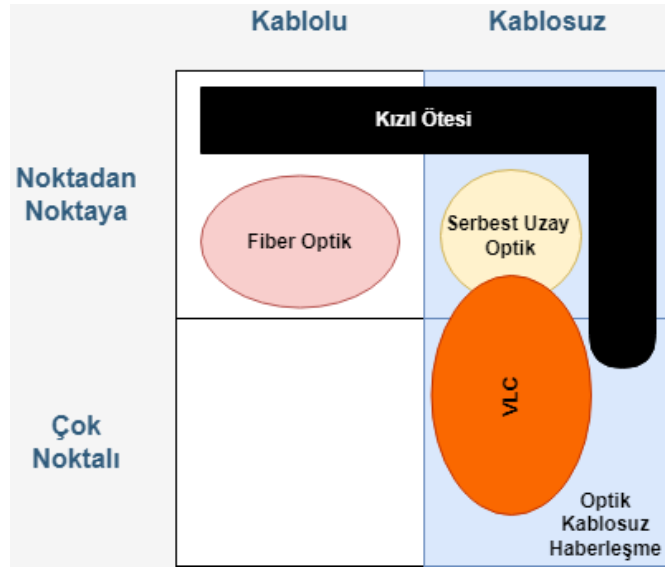
5G ve ötesinde önerilen VLC, optik iletişim, kızılötesi (IR) iletişim ve boşluk uzay optik iletişimine benzer bir optik iletişim teknolojisidir. Bu diğer teknolojilerde olduğu gibi, her VLC vericisi, iletilecek dijital verileri temsil etmek için analog sinyali ışığın iletilebileceği şekilde sinyal işleme donanımından geçirilerek kısacası analog elektrik sinyalini ışığa dönüştürerek optik bir sinyale dönüştürmek için bir optik yayıcıdan oluşur. Benzer şekilde, her alıcı, alınan optik sinyali tekrar elektrik sinyaline dönüştürmek için bir fotodetektörden ve iletilen verileri kurtarmak ve alınan sinyali yorumlamak için bir kod çözücünden oluşur. VLC, optik sinyali optik kaynaktan fotodetektöre taşımak için herhangi bir optik fiber veya benzeri dalga kılavuzu kullanmaması bakımından diğer

optik iletişim sistemlerinden farklıdır. Bunun yerine, VLC sinyalleri, vericiden alıcıya boş alan boyunca yayılır. VLC ayrıca kızılötesi kablosuz iletişim sistemlerinden farklıdır. Şekil 1.7’de gösterildiği gibi elektromanyetik spektrumun benzer kısımlarını kullanmalarına rağmen, bu onlara benzer özellikler verir (örneğin, yönlülük), aynı zamanda önemli şekillerde farklılık gösterirler. Örneğin, VLC ve IR iletişim sistemleri, karşılık gelen ışık dalga boylarını daha iyi üretmek ve algılamak için optik kaynak ve fotodedektörler içinde farklı malzemeler kullanma eğilimindedir. Ayrıca, VLC sistem tasarımlarından farklı olarak, kızılötesi insanlar tarafından görülmediğinden, IR iletişim sistemi tasarımlarının, iletimlerin aydınlatma kalitesi üzerindeki etkilerini dikkate almasına gerek yoktur. Ancak IR iletişim sistemleri, insan gözünün kendisini görünmez kızılötesi ışıktan korumak için tepki verememesi nedeniyle yayılan optik güç üzerinde daha katı göz güvenliği kısıtlamalarına sahip olma eğilimindedir.



Şekil 1.7 Elektromanyetik Spektrum [13]

Milimetre dalga ve 60 GHz radyo teknolojileri de yine VLC ve IR iletişimi gibi optik iletişim teknolojileriyle benzer özellikleri paylaşır, çünkü Şekil 1.7’de gösterildiği gibi elektromanyetik spektrumun benzer kısımlarını kullanırlar. Serbest uzay optik iletişim (FSO) ve görünür ışık iletişim araştırmaları genellikle örtüşür. Bununla birlikte, FSO tipik olarak daha uzun menzilli, dar huzmeli, noktadan noktaya iletişimlerini tanımlamak için kullanılır (örneğin, sadece iki sabit (mobil olmayan) düğüm arasındaki iletişimler veya çok uzun menzilli Dünya’dan uyduya iletişimler için). Şekil 1.8’de bu optik iletişim teknolojileri grafiksel olarak gösterilmiştir. Buna karşılık, VLC tipik olarak, potansiyel olarak birden fazla verici ve bir alıcı arasındaki iletişim ile daha kısa menzilli uygulamalara odaklanır. VLC ayrıca daha geniş açılı vericiler ve alıcılar kullanma eğilimindedir: ya daha geniş bir alana hizmet vermek, mobilitayı desteklemek ya da çok girişli çok çıkışlı (MIMO) iletişim için daha fazla sayıda yayıcı ve foto detektörü kapsamak için. Farklılıklarına rağmen, VLC için önerilen birçok kavram ve çözüm bu benzer teknolojilere de uygulanabilir. Tersine, VLC araştırması büyük ölçüde diğer iletişim teknolojilerinin araştırılmasına dayanır.

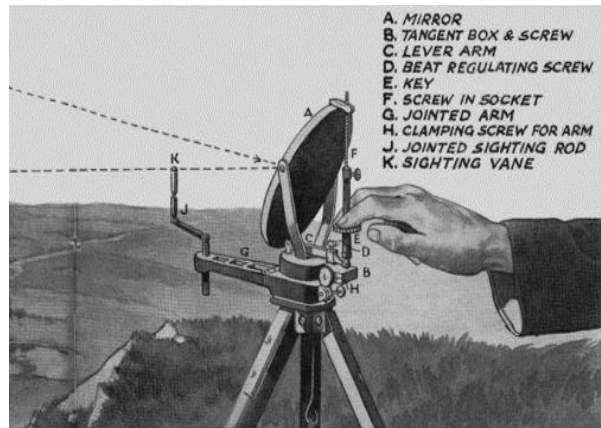


1.5 5G ve Ötesi Sistemlerde Optik Kablosuz Haberleşmenin Kullanılabilirliği

Işığı bir iletişim aracı olarak kullanmak yeni bir fikir değil. Aslında, optik kablosuz iletişim (OWC) üç yüzyıldan daha eskidir. Gemi bayrakları, semafor ve ateş fenerleri gibi teknikler, OWC'nin ilk aşamalarıydı. Güneş ışığının aynalarla yansıtılması, optik iletişimin bir başka yöntemidir. Böyle bir sisteme güzel bir örnek, ayna hareketinin Mors kodunu göndermek için kullanılabilecek ışık flaşları ürettiği Şekil 1.9'da gösterilen Heliograf'tır [14]. 19. yüzyılda, bu sistem, 80 km veya daha fazla bir mesafeden optik iletişim için çok etkili bir araçtı. Bu cihazın başlıca kullanımları araştırmalarda, orman koruma çalışmalarında ve ordudaydı ve 1935'e kadar kullanıldı [14].



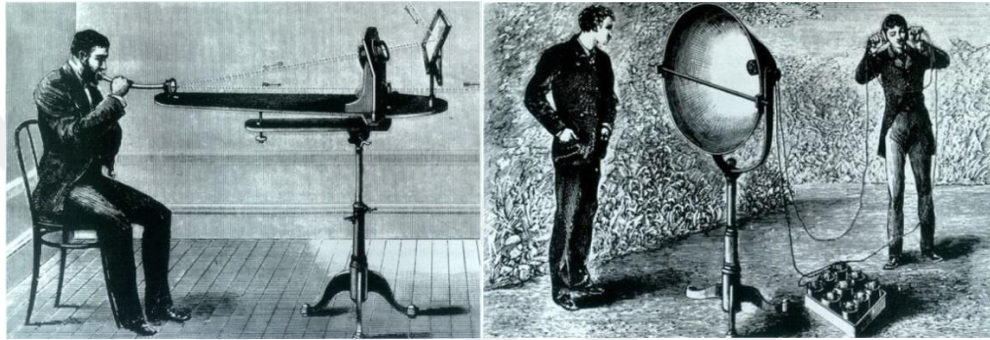
(a) İngiliz ordusu versiyonu



(b) şematik yapı ve montaj

Şekil 1.9: Heliograf, (Mance Mark V), [14].

1880’de Alexander Graham Bell ve Sumner Trainer, ışık tabanlı bir serbest alan iletişim sistemi olan Fotofonu icat etti ve geliştirdi. Cihaz, bir ışık huzmesi üzerinde ses iletmek için kullanıldı [15]. Şekil 1.10 Fotofonu göstermektedir. Cihaz elektronik algılamaya dayanıyordu ve alıcı, optik sinyali elektrik akımına dönüştüren bir selenyum kristalinden oluşuyordu. Bell’in Fotofonu, elektriksel iletkenliğin maruz kaldığı ışığın yoğunluğuna bağlı olduğu selenyum kristallerinin iletkenliğini kullandı [16]. Fotofon, bugün dünyanın telekomünikasyon trafiğinin %80’inden fazlasını taşıyan modern fiber optiğin öncüsü olarak kabul edilmiştir. Günümüzde optik haberleşme sistemleri eski yöntemlere göre çok daha yüksek veri hızları ile daha iyi hizmet kalitesi (QoS) sergilemektedir [17].



(a) Verici

(b) Alıcı

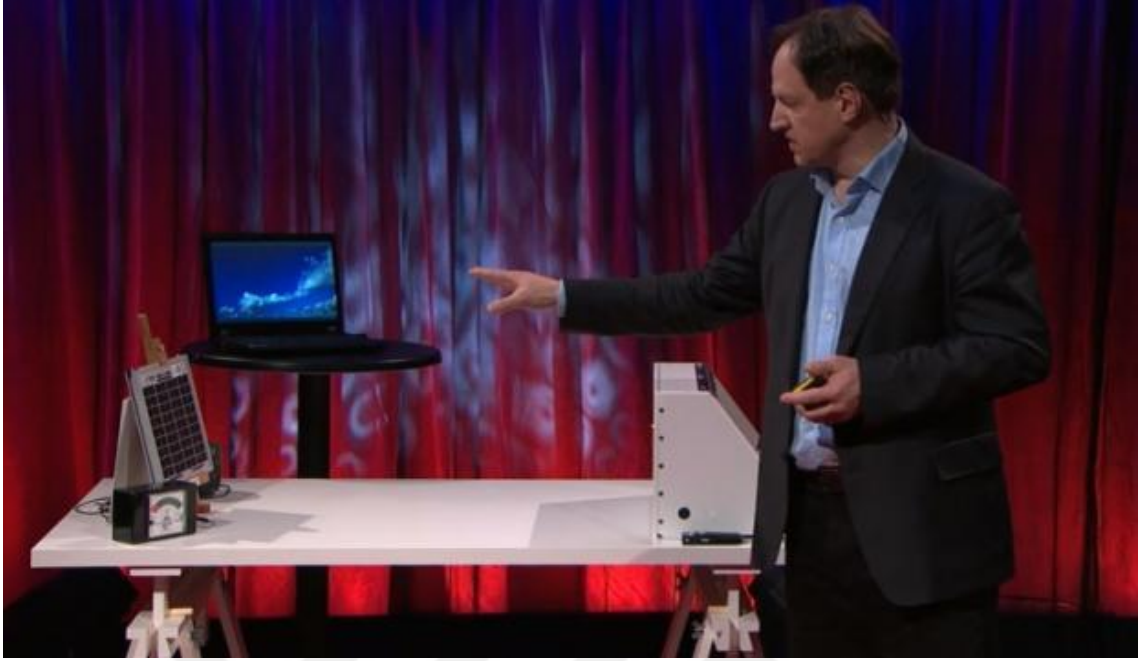
Şekil 1.10: Fotofon [16].

1950’lere kadar optik iletişim için basınçlı ark lambaları kullanılmaktaydı. Modern optik kablosuz haberleşmesinde geçilmesi ile beraber verici olarak lazerler veya ışık yayan diyotlar (LED’ler) kullanılmaya başlandı. 1962’de MIT Lincoln Labs, ışık yayan GaAs diyotu kullanarak deneysel bir OWC bağlantısı kurdu ve TV sinyallerini 48 km mesafeye iletilebildi. Lazerin icadından sonra, OWC, lazerler için ana dağıtım alanı olarak düşünüldü ve farklı lazer türleri ve modülasyon şemaları kullanılarak birçok deneme yapıldı [18].

Görünür ışık iletişimi üzerine araştırmalar ilk olarak 2003 yılında Japonya’da LED’ler üzerinden başladı. Ocak 2010’da, Berlin’deki Heinrich Hertz Enstitüsü, Siemens ve Fraunhofer Telekomünikasyon Enstitüsü’nden bir araştırmacı ekibi, 5 metre ve 100 Mbit/s’lik bir mesafede beyaz bir LED ile 500 Mbit/s’de iletimi gösterdi [19].

2011 yılında VLC standardizasyon süreci, IEEE 802.15.7 çalışma grubu içinde yürütülmeye başlandı ve Şekil 1.11’de görüldüğü gibi Temmuz 2011’de TED Global’de Harald Haas’ın sunumunda normal bir LED lambasından iletilen yüksek çözünürlüklü

videonun canlı bir gösterimini yaptı ve VLC teknolojisinin bir alt kümesine atıfta bulunmak için Li-Fi terimini önerdi [20].



Şekil 1.11 TED Global Konuşması [20]

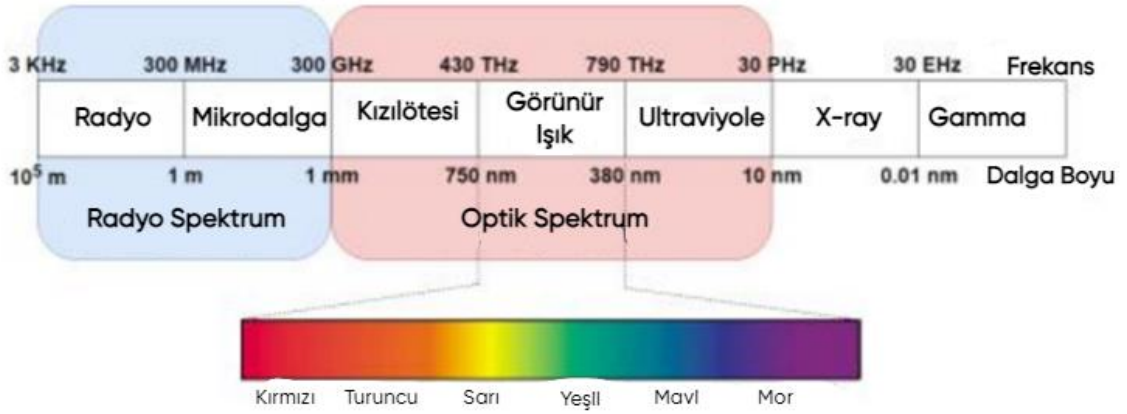
Süregelen bu silsilede 5G ve ötesi sistemler için artık VLC teknolojisi hayatımıza girmiş oldu ve LED'in gelişimi ile çağımızın haberleşme sorunlarından birkaçı olan spektrumdaki kıtlık ve lisans kısıtlamaların da yardımcı bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. RF sistemleri ile beraber kullanıldığında iç ortamlarda LED'in hem aydınlatma hem de data iletişimi için kullanılacak olması haberleşme sektöründe büyük bir etki yaratacağı aşikardır.

2. BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ NEDİR?

Görünür ışık haberleşmesi günümüzdeki radyo frekans haberleşmesine alternatif gelecek güvenilir bina içi haberleşmelerine alternatif bir haberleşme türüdür. Bu haberleşme insan gözünün görebildiği elektromanyetik spektrumun 430 ile 750 Terahertz (THz) arasına denk gelmektedir. Bu haberleşme türü radyo dalgalarına göre bir çok üstünlükleri bulunmaktadır. Bunlar, bu haberleşme türünün sunduğu verimlilik, kapasite, veri güvenliği ve kullanılabilirlik özelliklerinden bazılarıdır. Bu sistem ayrıca radyo haberleşmesinin genel sorunlarının çözümünü de barındırmaktadır. Bu sistem çoğu yerde RF'e alternatif bir çözüm olarak kullanılabilirken bazı kısımlarda RF sistemlere alternatif tamamlayıcı bir sistem olarak karşımıza çıkacaktır. VLC teknolojisi, ışığın rengini veya yoğunluğunu insan gözünün algılayamayacağı bir hızda değiştirerek kablosuz bilgi iletişimini ve ortam aydınlatmasını aynı anda gerçekleştirmeyi amaçlar [21]. Bu sistemler için günümüzde hem fiyat performans olarak hem de donanımsal olarak oldukça gelişen aydınlatma sektöründe çığır açan LED'ler kullanılır.[20]

Görünür ışık haberleşmesinde yüksek veri iletim hızlarına çıkabilmek için kullanılacak ışık kaynaklarının insan gözünün algılayamayacağı çok yüksek seviyelerde anahtarlama yapabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle LED teknolojisinin yükselmesi ve LED temelli aydınlatma ürünlerinin yaygınlaşması ile son yıllarda VLC üzerine çok fazla araştırma ve çalışma yapılmaktadır. LED'lerin mevcut altyapısı bu sistemlerin gelecek ve günümüzdeki yapılara entegre olması bizi büyük bir maliyetten kurtaracaktır. LED'lerin son yıllardaki gelişmeleri ise daha yüksek verimlilik elde ederek daha az enerji tüketen uzun ömürlü LED'lerin üretilmesini mümkün kıldı. Renk kalitelerinin artması daha küçük boyutlu LED'lerin üretilmesi ve daha düşük maliyetlerde göz önüne alındığında LED'ler VLC için en çekici ışık kaynağı olarak yerini almaktadır.

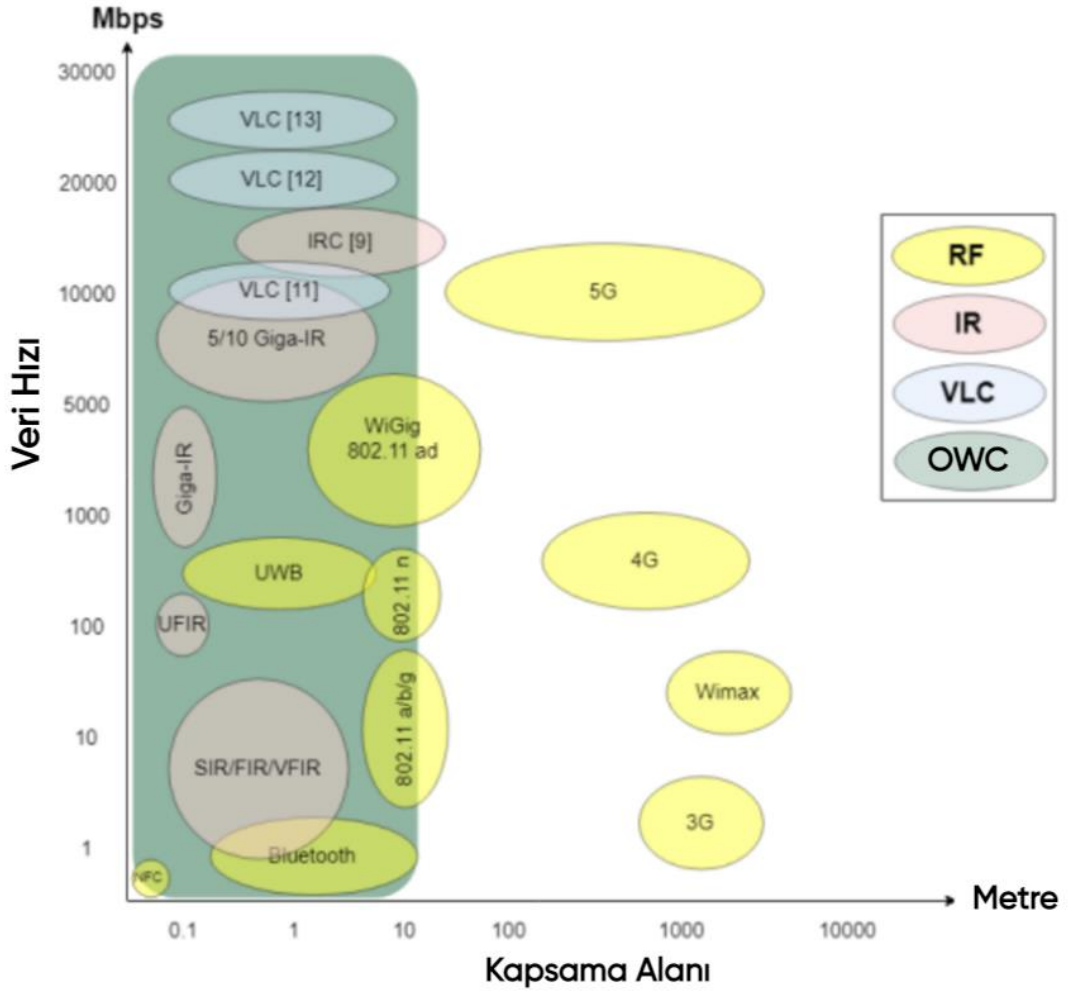
Günümüzdeki haberleşme sorunlarının en başında spektrum kıtlığı gelmektedir. Spektrum kıtlığı, kablosuz iletişim sistemlerinde karşılaşılan önemli bir sorundur. Hızla artan talep ve sınırlı kaynaklar arasındaki dengesizlik, spektrumun etkin bir şekilde tahsis edilmesini zorlaştırırken, aynı zamanda spektrumun maliyetini de artırmaktadır. Spektrum lisansları genellikle pahalıdır ve büyük telekomünikasyon şirketleri için önemli bir yatırım gerektirir. Ayrıca, spektrumun daha etkin tahsisi için spektrum taraması, spektrum paylaşımı ve dinamik spektrum erişimi gibi yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çabalara rağmen, spektrum kıtlığı sorunu halen mevcut ve sürekli olarak takip edilmesi ve çözüm yollarının araştırılması gerekmektedir, VLC ise bu çözümlerin en çekicisi olarak yerini almaktadır. Şekil 2.1 de gösterildiği gibi görünür ışık spektrumu bu soruna bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.1 Elektromanyetik Dalga Spektrumu Frekans Aralık Tablosu [22]

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere radyo dalgaları bulunduğu spektrum 3 KHz ile 300 GHz arasındaki frekansları kapsar ve bu alan telsiz iletişimin tamamını bulundurmaktadır. Bunun yanında görünür ışık spektrumu yaklaşık 430 THz ile 790 THz arasındadır. Şekil 2.1 de gösterildiği gibi görünür ışık spektrumu radyo frekans spektrumundan 10000 kat daha büyük düzensiz bir spektrumdur ve ek satın alma maliyeti gerektirmez [23]. Görünür bir ışık kaynağı hem aydınlatma hem de iletişim için kullanılabildiğinden, RF iletişimde gereken ekstra güçten tasarruf sağlar. Listelenen avantajlar göz önüne alındığında, VLC, lisanssız kanal özellikleri, yüksek bant genişliği ve düşük güç tüketimi için umut verici bir adaydır. Işık tabanlı bir haberleşme sistemi olduğu için RF sistemlerinden yayılan elektromanyetik radyasyonlardan etkilenmez. Herhangi bir sağlık riski oluşturmaz. Bu özelliklerden dolayı RF haberleşmesinin kullanılması halinde tehlike yaratan uçak

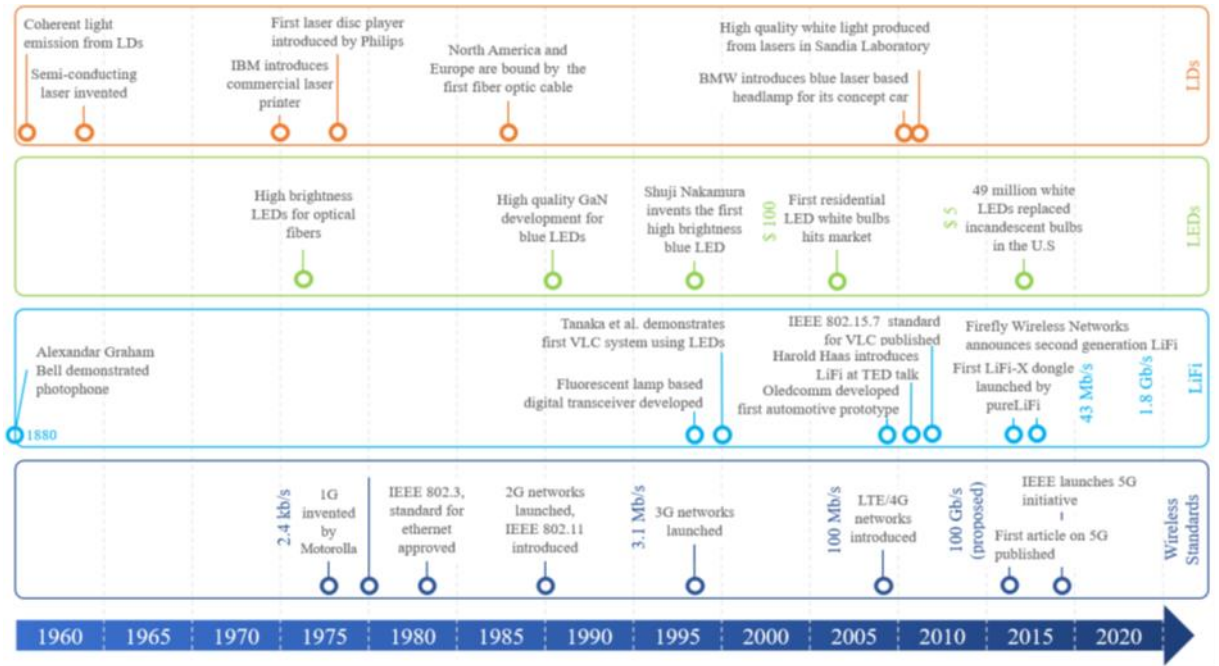
kabinlerinde, hastanelerde ve kimyasal tesisler gibi önem arz eden mekanlarda kablosuz haberleşme için VLC'nin uygun bir çözüm olduğu belirtilebilir.



Şekil 2.2 Görünür ışık haberleşmesi mesafe ve veri hızı karşılaştırılması [24]

VLC teknolojisinin Şekil 2.2’de görüldüğü üzere kapsama alanı kısadır bu her ne kadar dezavantaj gibi gözüküyor olsa da görünür ışık spektrumunda kullanılan dalgaların duvarlardan geçemiyor olması verinin güvenliği ve korunması bakımından RF uygulamalarına karşı bir avantaj bulundurmaktadır. Bu avantajın ise askeri uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlar. Ayrıca diğer kablosuz haberleşme sistemlerine göre veri iletim hızında çok üst mertebelere çıkılabilmektedir.

Şekil 2.3’te görüldüğü gibi hem haberleşme teknolojisindeki gelişmeler hem de LED sektöründeki gelişmeler gelecek te VLC için bir altyapı oluşturmaktadır.



Şekil 2.3 LED,VLC ve Haberleşme sektörünün gelişimi [25]

VLC 'nin gelişimi ile birlikte bu alanda söz sahibi olmak isteyen şirketlerde kendi standartlarını ve deneysel verilerini yayınlamaya başladı. LED'lerin modüle edilmesi durumu ilk olarak 1999 yılında ortaya atıldı [26]. 2000'li Yılların Başında RONJA (Reasonable Optical Near Joint Access) saniyede 10 Mb veriyi 1.4 kilometre mesafeye kadar ulaştırabilen görünür ışık ışınlarını kullandı. Beyaz LED'lerin (Beyaz LED - WLED) aydınlatma ve iletişimde kullanımı Japonya'da Milenyum çağının başlangıcı ile Keio Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarla geliştirilmeye başlandı [27]. Görünür Işık İletişim Konsorsiyumu veya VLCC, 2003 yılına gelindiğinde hem VLC teknolojisini tanıtmak hem de standartları belirlemek için kuruldu.. VLCC firması VLC teknolojisinin bina içi ortamlarda kullanılan LED tabanlı ürünlerine bir standart getirmeye çalışmıştır ve 2008 yılında bir standart yayımlamıştır [28]. Avrupa da ise devam eden süreçte 2008 yılında "Ev Gigabayt Erişim Projesi" OMEGA projesi gerçekleştirilmiştir [29]. Ancak bu standartlarda noksan olan kısımlar vardır. Bu standartlarda ışık kaynağının veri iletimini ve aydınlatmayı beraber yapabilmesi için sisteme uygun gereken insan sağlığında etkisi bulunan renk değişimini engelleme, aydınlatma şiddetini ayarlayabilme ve ışıktaki titreşimi azaltma konularına değinilmemiştir. Görünür ışık iletişimi için ilk IEEE standardı, IEEE 802.15 çalışma grubu tarafından 2011 yılında "802.15.7 Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light" adı altında yayınlandı [30]. IEEE 802.15.7, optik kablolu iletişim için bir standarttır. Bu standart, LED tabanlı aydınlatma sistemleri üzerinden veri transferi sağlamak için kullanılır. Bu teknoloji, özellikle sensör

ağları, akıllı binalar ve hatta araç içi iletişim gibi birçok uygulama için potansiyel avantajlar sunar. IEEE 802.15.7, farklı aydınlatma sistemlerinin birbirleriyle ve diğer ağlara bağlanmasını sağlayacak ortak bir iletişim protokolü tanımlar. Bu protokol, LED'lerin yanı sıra foto-alıcılar (PD) ve diğer bileşenlerin kullanımını da kapsar. Standart, kablosuz optik iletişim için farklı modülasyon tekniklerini de tanımlar, özellikle OFDM, DMT ve PPM gibi teknikler ön plana çıkar. Yüksek verimlilik, düşük maliyet, düşük güç tüketimi ve geniş bir veri aktarım menzili gibi avantajlar sunar. Bu teknoloji, geleneksel radyo frekansı (RF) tabanlı kablosuz iletişim sistemlerine göre daha düşük arıza olasılığına sahiptir ve RF frekanslarına karşı daha az duyarlıdır [21].

IEEE 802.15.7, aydınlatma sistemlerinin yanı sıra diğer cihazlarla da entegre edilebilir ve bu sayede ağ topolojileri daha da genişletilebilir. Bu teknoloji ayrıca, güvenli ve gizlilikle veri transferi için de çeşitli güvenlik mekanizmaları sağlar. Kablosuz optik iletişim teknolojisinin gelişmesine katkıda bulunmuş ve sensör ağları, akıllı binalar ve araç içi iletişim gibi birçok uygulama için yüksek performanslı ve güvenli bir iletişim çözümü sunmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda 500Mbps gibi yüksek veri iletim hızına ulaşılmış çalışmalar bulunmaktadır [31, 32]. Fakat bu çalışmalar ışığında VLC sadece haberleşme teknolojisi olarak kullanılmış aydınlatma faktörü düşünülmemiştir. Bunlar neticesinde VLC için ulaşılan veri hızları pratik olarak günlük hayatımıza entegre olması şuan için pek de mümkün değildir.

Erişilebilirlik haberleşme sistemleri için çok büyük önem arz eder. Teoride her alanda çalışmasını beklediğimiz bu teknoloji bina içi ortamlarda ofis, ev, okul, hastane ve kütüphane gibi toplumsal olarak kullanılan mekanlarda erişilebilmesi ve büyük faydalar sağlaması bu teknolojinin en önemli özelliklerindendir. 2011'de Harald Haas, Light Fidelity (Li-Fi) terimini ilk kullanan kişi oldu [20]. Li-Fi, yüksek hızlı, çift yönlü, görünür ışıklı kablosuz iletişim sistemidir ve iletişim için radyo frekansı kullanan Wi-Fi'ye benzetilmektedir. Wi-Fi sinyallerinin, uçaktaki pilot seyrüsefer ekipmanı sinyalleriyle girişimi gibi diğer RF sinyalleriyle girişim sorunu vardır. Bu nedenle elektromanyetik radyasyona duyarlı alanlarda (uçaklar gibi) Li-Fi daha iyi bir çözüm olabilir. Bir Li-Fi ayrıca geleceğe yön verecek olan Nesnelerin İnterneti'ni (IoT) destekler. Süper hızlı geniş bandın hızından 250 kat daha fazla olan Li-Fi kullanılarak 10Gbit/s'ye varan bir hızlar elde edilir ve bunun gibi prototip çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Görünür ışık haberleşmesi her alanda kullanılabilme potansiyeline sahip bir teknoloji olup kullanabilme alanları artırılabilir. Bölüm 3'te görünür ışık haberleşmesi uygulamaları konusunda bu konu detaylıca ele alınacaktır.

3.BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ UYGULAMALARI

Görünür ışık haberleşmesi LED kullanımının yaygınlaşması, sistem için kullanılan alıcı ile verici aygıtların maliyet olarak ucuz olması ve harcadığı güç bakımından tasarruf sağlaması ile uygulamaları birçok alanda yaygınlaşmıştır. Radyo frekanslarının kesintiye uğradığı ya da verimsiz çalıştığı alanlarda bu eksikleri tamamlayarak kullanıcıya sağlayacağı hız ve güvenlik açısından haberleşme sektöründe öncü olacağı mesajını vermektedir. Genele baktığımız ve bahsettiğimiz üzere bina içi ortamlarda kullanılması düşünülse de dış ortam içinde uygulamalar geliştirilmiştir [33]. Genel olarak kullanım alanları başlıklar halinde sıralayacak olur isek;

- Savunma ve Güvenlik Uygulamaları
- Havacılık
- Nükleer ve Petrokimya Tesisleri
- IoT Akıllı Şehirler
- Hastane ve Sağlık uygulamaları
- Su altı İletişim
- Araç ve Ulaşım
- Diğer

- **Savunma ve Güvenlik Pratikleri**

Verilerin savaşı ve taktiksel iletişimde güvenliği ve hızı çok önemlidir. VLC sinyalleri duvarlardan geçemediği harici ortamlardan ise bu sinyaller alınamadığı için güvenlikle ilgili kullanımlar için çok uygundur. Buda bize savunma birimleri ve hükümet konumları için tesis içinde güvenli kablolu ağ imkanı sağlayarak veri ihlallerinden ve dış ortamdan bizi izole eder. Gelecekte haberleşme teknolojilerinin ilerlemesiyle daha az hatalı daha fazla güvenilirlik ve hız sağlayan sistemler ile VLC teknolojisi bu alanda zirveye oynayacaktır.

- **Havacılık**

Havacılık sektörü kısa süreli seyahatler sağlamak adına ulaşım sektörünün vazgeçilmezlerindendir. Bu ulaşım türünü kullanırken herhangi bir elektromanyetik girişim yaşanmaması adına telefonlarımızı kapatmamızı isterler ve artık bu uyarılar tarih olmak üzeredir. 2019’da AirFrance hava yolları ilk Li-Fi teknolojisi kullanarak uçuşunu gerçekleştirdi. Şirket, havayolu endüstrisinin özel ihtiyaçlarını karşılamak için teknolojiyi uyarlamak için iki yıl daha harcadı ve eksiksiz bir uçak içi eğlence sistemi oluşturmak için Latecoère ile ortak çalıştı. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere Air France uçuşu için sistem 12 koltuğa kuruldu ve seçkin bir yolcu grubu uçmaya ve Ubisoft tarafından düzenlenen bir video oyunu turnuvasına katılmaya davet edildi. eGaming turnuvası bu yılın başlarında duyurulmuştu ve Li-Fi sistemi, oyuncuların uçuş sırasında birbirleriyle savaşmasına izin veren hem yüksek bant genişliği hem de düşük gecikme süresi sağladı.



Şekil 3.1 Havacılık alanında görünür ışık haberleşmesi [34]

Şekil 3.1 de görüldüğü üzere kullanıcılar hem aydınlatma hizmetinden yararlanırken hem de haberleşme servislerini kullandılar. Bu sistemin karşısında görülen en büyük

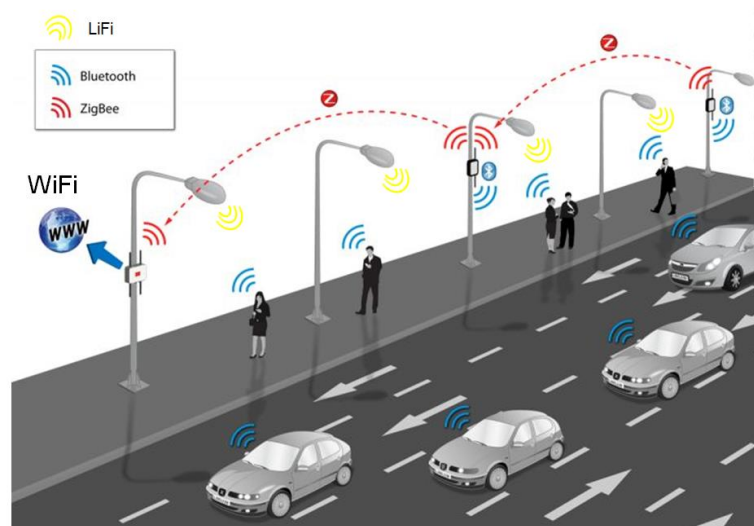
engel ise yan yana oturan kullanıcıların birbirlerine yapacağı girişimlerdir bu girişimler ise gelecekte kullanılan haberleşme teknolojileri ile en aza indirilecektir.

- **Nükleer ve Petrokimya Tesisleri**

Enerji Santrallerinin şebeke bütünlüğünü ve talebi izlemek için hızlı dijital iletişime ihtiyacı vardır. Nükleer Santrallerde çekirdek sıcaklığını izlemeli ve bunu hızlı bir şekilde ilgili birimlere iletmelidir. Wi-Fi, radyasyonu nedeniyle hassas alanları olumsuz etkileyebilir. Bu tür alanlarda Li-Fi daha güvenli ve hızlı bir önlem sağlayabilir. Ayrıca Li-Fi, Wi-Fi benzeri diğer RF çözümlerinden iletim veya frekansların tehlikeli olabileceği kimyasal tesisler içinde geçerli bir veri aktarım çözümü sağlayabilir.

- **IoT ve Akıllı Şehirler**

IoT'nin (Nesnelerin İnterneti) akıllı şehirler konseptini mümkün kılmadaki rolü çok büyüktür. Li-Fi ve IoT bir araya geldiğinde akıllı şehirleri gerçek anlamda daha da güzelleştirebilir. Li-Fi, yalnızca büyük ölçekte iletişimi mümkün kılmakla kalmayacak, aynı zamanda akıllı bir şehrin çeşitli süreçlerini otomatikleştirecek. Kapalı ortamda etkin olarak uygulanan bu yöntem son yıllarda Şekil 3.2'de görüldüğü üzere sokak lambaları ile sokaklarda Li-Fi hot spot kullanarak hem aydınlatma hem de iletişim sağlanmaktadır. LED ışıklar artık çoğu kamusal alanı aydınlatıyor ve bu teknolojileri artık hayatımıza geçiriyoruz.



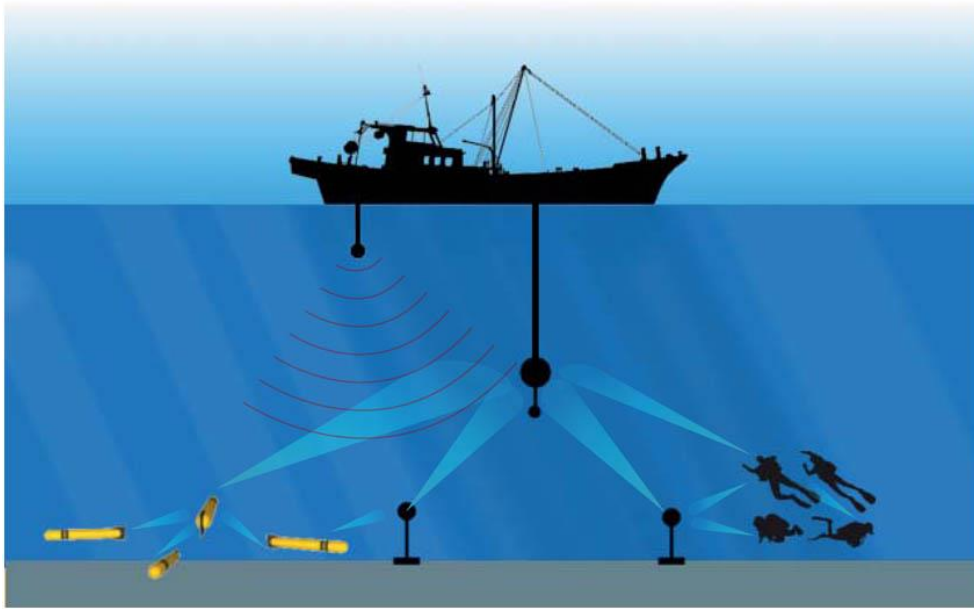
Şekil 3.2 Akıllı Şehirler alanında görünür ışık haberleşmesi [35]

- **Hastaneler ve Sağlık Uygulamaları**

En hassas çalışma ortamlarından biri olan sağlık sektörü, zorunlu düzenlemelere uymak zorundadır. Örneğin, MR gibi tıbbi cihazları ve hatta hastaların tedavisini engelleyebileceği için hastanelerde Wi-Fi kullanımı yasaktır. Öte yandan Li-Fi, EMI (Elektromanyetik Parazit) gibi hassas ortamlarda görünür ışık iletişiminin veri aktarımını sağlayabildiği için uygulanabilir bir fırsat sunar. Ayrıca robotik tedavi ve hasta monitörleri kullanımında doktorlara hızlı ve güvenilir bilgi sunma konusunda yardımcı olabilir.

- **Su Altı İletişim**

Deniz altında radyo dalgalarının elektrik iletkenliğinin kötü olması sebebiyle su ortamında rahat ilerleyemez bundan dolayı su altı haberleşme ağlarında VLC haberleşmesi kullanılması önerilmelidir. Bu alanda görünür ışıkla haberleşme üzerinde çalışmalar hızla devam etmektedir. Çoğu çevresel sebep gibi burada da mesafemiz kısıtlıdır. Su altında belirli bir ışık ile kısa mesafede olsa deniz altında iletişim sağlanabilecek düzeydedir.

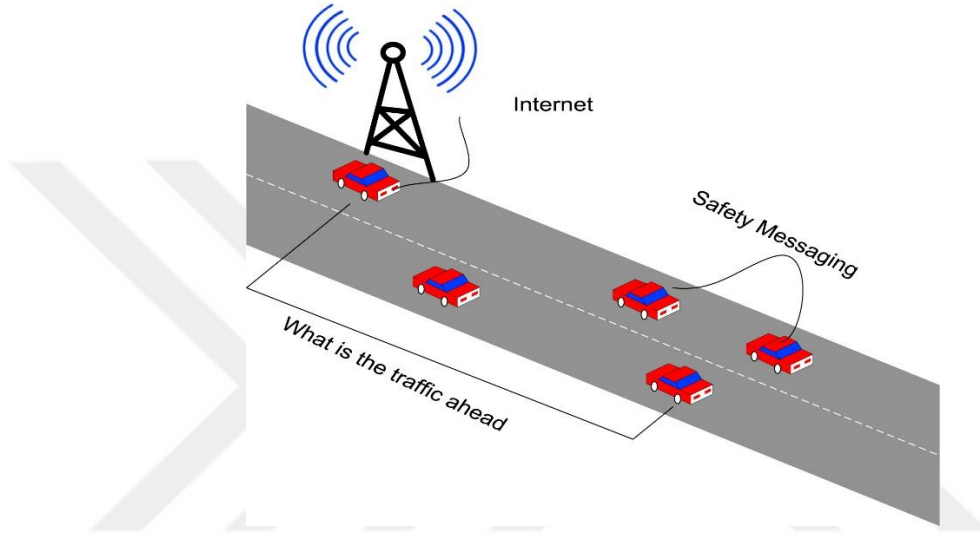


Şekil 3.3 Su altı Görünür Işık iletişimi [36]

Şekil 3.3'te Işığın su altında kırılma kanunlarına uygun bir şekilde görüldüğü gibi Access pointler (erişim noktaları), dalgıçlar veya UAV cihazları arasında iletişim sağlanacaktır.

- **Araç ve Ulaşım**

Araç ışıklarının bulunması ve mevcut trafik ışığı altyapısı sayesinde araç iletişiminde de VLC teknolojisi kullanılabilir. Bu iş birliğine dayalı sistemde önden çarpışma uyarısı, çarpışma öncesi algılama, acil vaka dijital fren lambaları, bant değiştirme ikazı, trafik sinyali ihlal uyarısı ve viraj hız uyarısı ayrıca ön lambaları verici, arkadaki kırmızı ışığı alıcı olarak kullanarak araçlar arası iletişime olanak sağlamakta ve bu sayede kazaların önüne geçebilmektedir.



Şekil 3.4 Araçlar için Görünür Işık iletişimi [37]

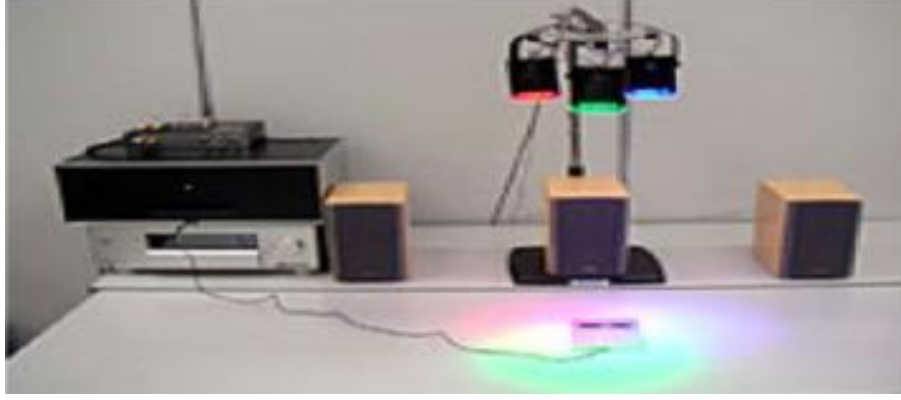
Şekil 3.4’te gösterildiği gibi kullanılabilir. Denetleyici Alan Ağı (CAN) kullanan bir dış mekan VLC sistemi önerilmiş ve önerilen sistemde iletişim için arka ışıklar ve farlar kullanılmıştır.

Özellikle yer altı ulaşım araçlarından metro RF haberleşmesinin yetersiz kaldığı alanlardan olan asansör gibi çeşitli araçların RF haberleşmesinin gerçekleşemediği verimsiz çalıştığı ortamlarda VLC teknolojisi en büyük iletişim adayı olmanın yanında RF teknolojisine göre veri hızı, bant genişliği gibi avantajlarıyla aydınlatmanın olduğu yerlerde bir adım öne çıkmaktadır.

- **Diğer Uygulamalar**

Görünür ışık, binalar ve metrolar gibi farklı yerlerde kimlik sistemi olarak kullanılabilir. Oda numarasını ve binasını tanımlamak için bir görünür ışık tanımlama sistemi kullanılabilir. Benzer şekilde metrolarda, hastanelerde ve havaalanlarında

görünür bir ışıklı kimlik sistemi kullanılabilir. Gelecekte ses sistemlerinde kablo ihtiyacı olmadan görünür ışık sistemi ile çalıştığını düşünün. Şekil 3.5’te müzik sinyallerinin iletimi için gösterildiği gibi kırmızı, yeşil ve mavi LED’ler kullanılır.



Şekil 3.5 Hoparlörler için Görünür Işık iletimi [37]

Bölüm 4’te VLC sisteminin teknik yapısı detaylıca anlatılacaktır.

4.BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ

4.1 Giriş

Görünür ışık iletişimi (VLC) görünür spektrumun 400-700 nm dalga boylarını veya 430-750 THz frekans bandını kullanır ve artık günümüzde her yerde bulunan LED'leri kullanarak kablosuz iletişim sağlar. İnsan gözü, ışık yeterince hızlı anahtarlandığında insan gözü üzerinde fark edilebilir bir etki olmaksızın LED'leri kullanarak veri iletmek mümkündür. LED'lerin hem aydınlatma hem de iletişim amacıyla eşzamanlı kullanımı, ışığı kullanma şeklimizde devrim yaratma potansiyeline sahip sürdürülebilir ve enerji tasarruflu bir yaklaşımdır. VLC, kablosuz yerel, kişisel ve vücut alanı ağları (WLAN, WPAN ve WBAN), araç ağları ve makineler arası iletişim gibi çok çeşitli kısa ve orta menzilli iletişim uygulamalarında kullanılabilir. Enerji verimliliğinin yanı sıra, VLC, elektromanyetik parazitlere karşı dirençlidir, geniş spektruma sahip olup lisanssız bantlarda çalışmaya olanak sağlar, ek fiziksel güvenlik ve yüksek bir yeniden kullanım faktörüne izin verir ve radyo frekansı (RF) tabanlı muadillerine göre başka birçok doğal avantaj sunar. Akademik ilginin yanı sıra, VLC'ye yönelik endüstriyel ilgi, gelişmekte olan bu pazarda özel satıcı çözümlerinin parçalanmasını önlemek için ilgili standardizasyon faaliyetlerini tetiklemiştir. Japonya'da, Görünür Işık İletişim Konsorsiyumu (VLCC) standardizasyon faaliyetlerini desteklemiş ve görünür ışık iletişim sistemi standardı ve görünür ışık kimlik sistemi standardı olarak bilinen iki standart önermiştir. IEEE de bu gelişmekte olan teknolojinin potansiyelini fark etmiş ve Haziran 2011'de onaylanan IEEE Standardı 802.15.7'yi öne çıkarmıştır. IEEE 802.15.7-2011 standardı yaklaşık 10 kbps ile 100 Mbps arasındaki veri hızlarını destekler[21]. İç ve dış mekan kısa menzilli uygulamalar için uygulanabilir. PHY I, PHY II ve PHY III olarak adlandırılan, farklı modülasyon şemaları ve farklı modülasyon şemaları kullanan üç mod belirtilmiştir. PHY I, düşük hızlı dış mekan uygulamaları için önerilmiştir. On-

Off Keying (OOK) ve değişken darbe durum modülasyonu (VPPM) kullanılmaktadır. 11.67 kbps ile 266.6 kbps arasındaki veri hızlarında çalışmaktadır. PHY II ise orta veri hızı uygulamaları ile iç mekan kullanımı için planlanmıştır. Bu mod, 1.25 Mbps ile 96 Mbps arasındaki veri hızlarında OOK ve VPPM modülasyon türlerini kullanır. PHY III, beyaz ışık üretmek için birden fazla ışık kaynağını destekleyebilen iç mekan noktadan noktaya uygulamaları için optimize edilmiştir. Bu mod, 12 Mbps ile 96 Mbps arasındaki veri hızlarında renk kaydırmalı anahtarlama (CSK) kullanır[38]. İlk iki bahsedilen fiziksel katman VLC sistemlerinde çok fazla popüler olan modülasyon türü iken gelişen sektörün hem ihtiyaçlarını karşılayamazken hem de kendi problemlerinden dolayı güncellenmesi ihtiyacı doğmuştur. İhtiyaçlardan bahsedecek olur isek yüksek veri hızlarına ulaşma isteği örnek verilebilir. Sorunu ise aydınlatma sektöründe titreme probleminin bulunması ve insan sağlığına etkileri örnek verilebilir.

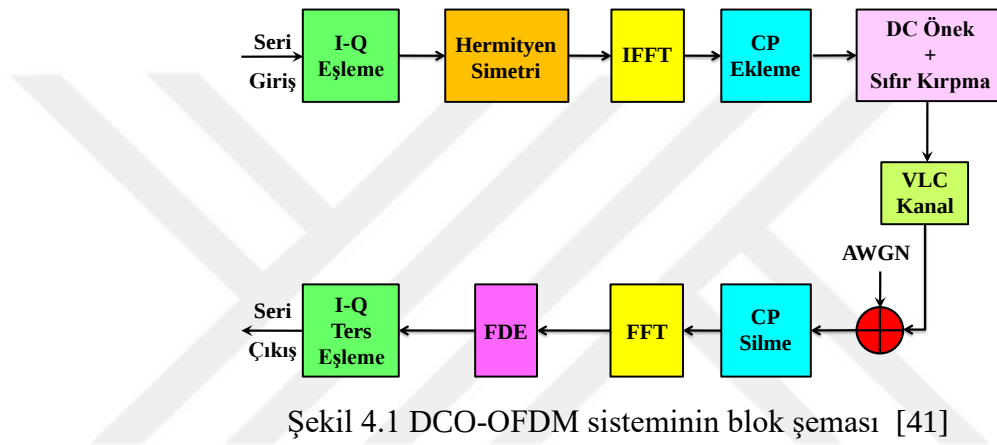
4.2 Optik OFDM Teknikleri

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) sistemi basit kanal denkleştirme yapısına sahip ve simgeler arası girişimlere (Inter Symbol Interference, ISI) dayanıklı olması ve çok yollu frekans seçici RF iletişim şemalarında sık bir şekilde kullanılması pek çok standart da yer almasını sağlamıştır [39]. Bu faydaların VLC şemalarında da kullanılması için birçok çalışma vardır. Geleneksel OFDM kullanılan RF haberleşme sistemlerinden iletilen işaretler çift kutuplu ve karmaşık sayılardır. Radyo frekansı (RF) iletiminin aksine, VLC genellikle optik OFDM sinyallerinin doğrudan yayılan görünür ışığın parlaklığına göre modüle edildiği yoğunluk modülasyonu ve doğrudan algılamayı (IM/DD) benimser. IM/DD şemasında, optik OFDM sinyallerinin genliği gerçek değerli karmaşık değer bulunduramayan ve negatif olmayan tüm işaretler pozitif olacak şekilde kısıtlanır [40].

Bu yöntemin VLC sistemlerinde kullanabilmesi için OFDM sistemlerinin alt taşıyıcıları Hermityen simetrik olarak düzenleyerek dizinin ters hızlı Fourier dönüşümünü (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) alır isek çıkışından pozitif ve negatif işaretlerden oluşan reel semboller üretilebilmektedir. Bu yöntem her ne kadar bant verimliliğini %50 azaltmış olsa da VLC sistemleri için OFDM yönteminin kullanılmasını mümkün kılmıştır. Bu yöntem kullanılarak literatürde pek çok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin en popüler olanları doğru akım eklemeli optik OFDM (DCO-OFDM), asimetrik kırpılmış optik OFDM (ACO-OFDM) ve Flip-OFDM'dir. Gelecek bölümlerde bu yöntemler detaylıca açıklanacaktır.

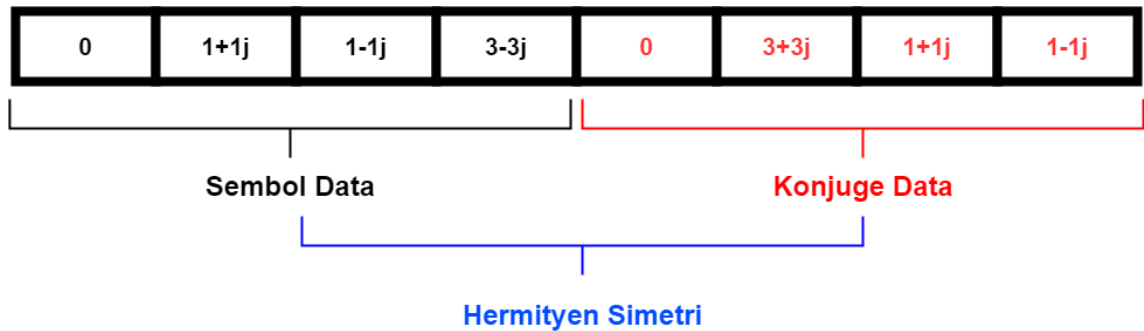
4.3 Doğru Akım Eklemeli Optik OFDM (DCO-OFDM)

DCO-OFDM sistemlerinin VLC-OFDM sistemlerinde Hermityen simetri sonrası oluşan çift kutuplu gerçel sayı problemini DC ön-gerilim eklenmesiyle çözmesidir. Rakibi ACO-OFDM sistemine göre en büyük artışı %50 spektrum verimliliğidir. ACO-OFDM sistemine göre spektral verimliliği iki katına çıkarmaktadır. Şekil 4.1’de DCO-OFDM sisteminin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.1 DCO-OFDM sisteminin blok şeması [41]

Geleneksel optik OFDM ile arasındaki temel fark HS (Hermityen Simetri) ve DC-önek blokların dahil edilmesidir. Öncelikle işaretlerimiz rastgele üretildikten sonra modüle edilir ve $N/2-1$ adet X sembolleri oluşturulur.



Şekil 4.2 DCO-OFDM Hermityen Simetri Uygulaması

Frekans alanında modüle edilen semboller $\mathbf{X} = [x[0], x[1] \dots, x[N/2 - 1]]^T$ şeklindedir ve HS yapısına sahiptir ve bu yapı, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi 0 (DC) ve $N/2$ alt taşıyıcılarının sıfıra set edilerek oluşturulmuştur [42].

Klasik bir DCO-OFDM tekniğinin frekans alanındaki durumu denklem (4.1)'de sunulduğu gibidir.

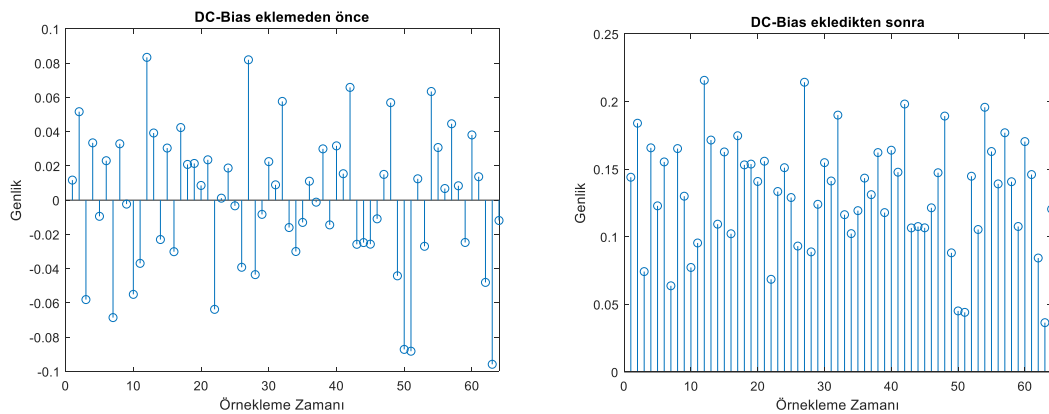
$$X[k] = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ X^*[N - k], & k = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ 0, & k = N/2 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$X[k] = [0, x[0], x[1], x[2] \dots, x[N - 2], x[N - 1], 0, x[N - 1]^*, x[N - 2]^* \dots, x[2]^*, x[1]^*, x[0]^*] \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) de ise oluşan Hermitien simetri uygulanmış dizinin son halidir. Son olarak vericide, N noktalı IFFT işleminden sonra gerçek çift kutuplu OFDM sinyali DC-öngerilim eklenmeden ve LED üzerinden iletilmeden önce CP ekleme işlemi yapılır. IM/DD yükümlülüğünü karşılamak için Şekil 4.3'te OFDM sinyaline en yüksek negatif OFDM genliğine eşit veya yüksek bir DC-öngerilim eklenir. V_{DC} olarak adlandırılan öngerilim miktarı, $X[k]$ sinyalinin standart sapmasının belirli bir katı cinsinden denklem (4.3)'te tanımlanmıştır [42-44].

$$V_{DC} = q\sqrt{E\{x^2[n]\}} \quad (4.3)$$

Burada q keyfi bir katsayıyı belirtirken, $10\log(q^2 + 1)$ ile de eklenen DC ön-gerilim değerinin dB cinsinden değeri belirlenmektedir. Ancak bu, DC ön-gerilim, kırılan örnek sinyal sayısını azaltırken bir yandan da sinyalin toplam gücünü artırmaktadır. Bu da DCO-OFDM'i güç tüketimi ve karartma kontrolü açısından verimsiz hale getirir.



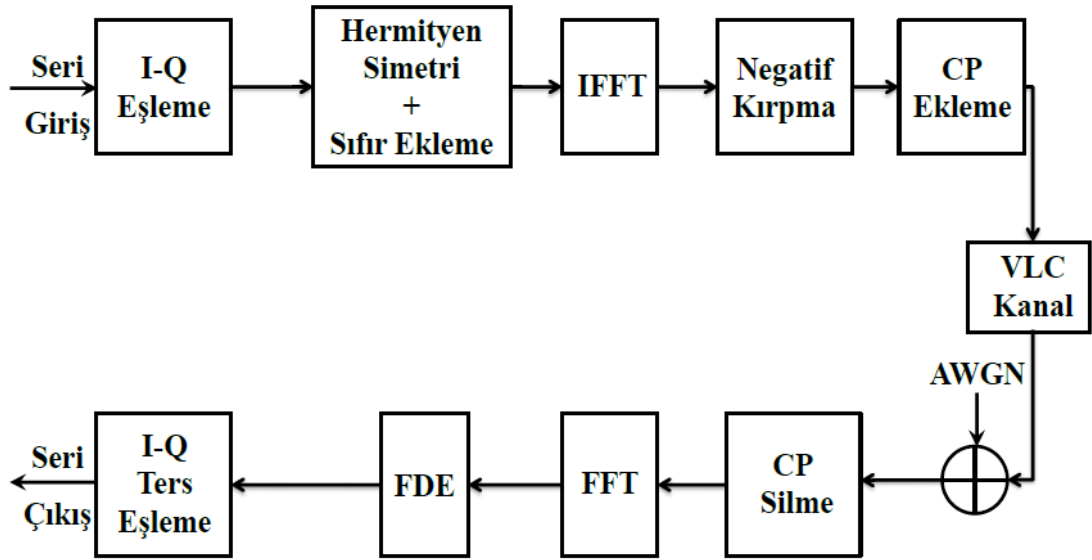
Şekil 4.3. Alt taşıyıcı sayısının 64 ve Modülasyon türü BPSK olan DCO-OFDM zaman bölgesi sinyalinin DC-öngerilim eklenmeden önceki ve sonraki hali

Bu nedenle, uygulama açısından makul bir yaklaşımla DC ön geriliminin seçilmesi önerilmektedir. Devamında ise optik kanaldan geçirilerek verici de yapılan

işlemlerin alıcıda tam tersi uygulanarak BER ve PAPR gibi başarımlar parametreleri hesaplanır. DCO-OFDM tekniği karmaşık yapılı değildir ancak VLC yönteminin güce olan ihtiyacı DC ekleme işleminden ötürü bir hayli artmaktadır. Diğer bir deyişle, DCO-OFDM enerji bakımından düşük verimliliğe sahip olup spektral olarak diğer optik OFDM sistemlerinden olan ACO-OFDM'e göre kazanç sağlamaktadır.

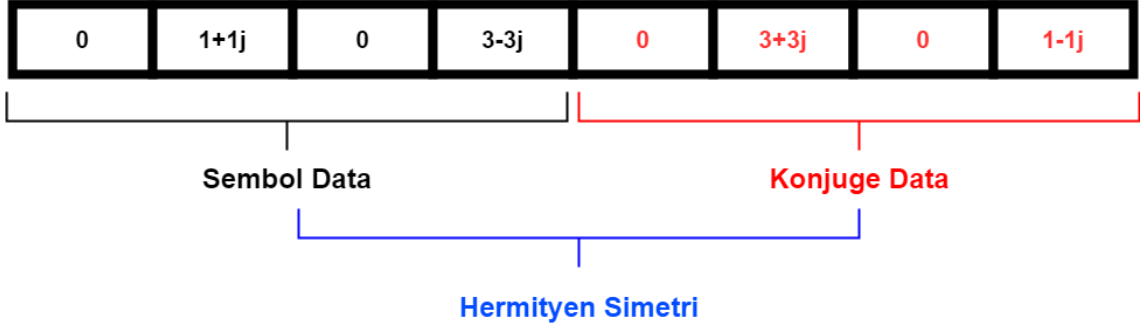
4.4 Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM (ACO-OFDM)

Optik OFDM sistemlerinin güç verimliliğini artırmak amacıyla DCO-OFDM'nin bir alternatifi önerilmiş olan asimetrik olarak kırpılmış optik OFDM bir DC eklemeye gerek kalmadan IM/DD sistemleri için tek kutuplu OFDM sinyalleri üretmeyi önerir. Bu veri iletimi için kullanılan alt taşıyıcı frekanslarının doğru seçilmesiyle elde edilebilir. Ancak bunun bedeli spektral verimliliğin daha da düşmesidir.



Şekil 4.4 ACO-OFDM sisteminin blok şeması [45]

Şekil 4.4'te tipik bir ACO-OFDM sisteminin blok şeması verilmiştir. Şema da ilk olarak rastgele sinyaller üretilerek modüle edilir. Ardından Şekil 4.5'de gösterildiği gibi ACO-OFDM Hermityen simetrisi oluşturulur. Bu nedenle ilgili sistemde OFDM'in tek indeksli alt-taşıyıcılar veri iletirken, çift indeksli alt-taşıyıcılar sıfıra setlenmektedir [44].



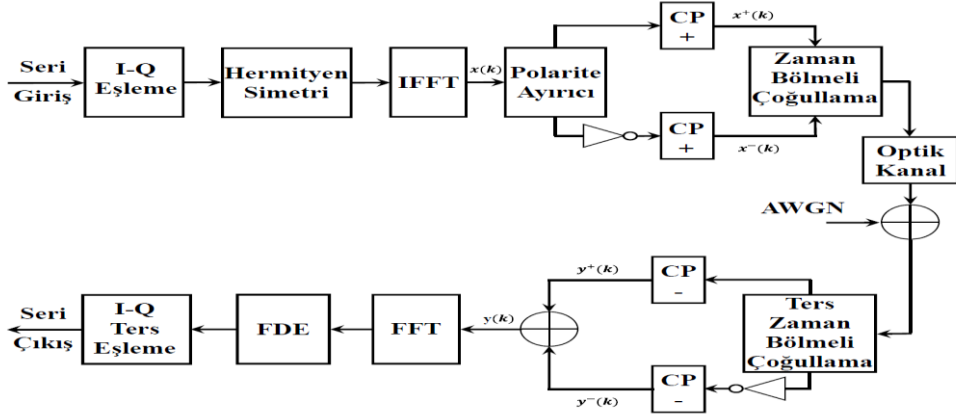
Şekil 4.5 ACO-OFDM Hermitiyen Simetri Uygulaması

Bundan dolayı ACO-OFDM şemalarının spektral verimliliği diğer optik OFDM sistemlerine nazaran yarısı kadardır. Ardından oluşan sembollerin ACO-OFDM’de iki kutuplu OFDM sembolünün negatif değerler sıfır değerine kırılarak (zero-clipping), kırıcı çıkışında pozitif bölümü gönderilmektedir. Kırma doğrusal olmayan distorsiyon getirir de ACO-OFDM, güç verimliliği açısından DCO-OFDM’ye göre bir avantaja sahiptir [46]. Ardından CP eklenerek LED’ler aracılığı ile VLC kanaldan geçirilerek AWGN gürültüsü eklenir ve vericideki işlemlerin alıcıda tam tersi yapılarak istenilen BER ve PAPR başarımları parametreleri hesaplanır.

Asimetrik kırma işlemi, frekans bölgesinde tek sayılı alt-taşıyıcılarda iletilen veri simgelerinin genliklerini yarıya indirir. Alıcıda kullanılan denkleştirici, gerek α ön-ölçeklendirme katsayısının ve gerekse genliklerdeki yarı yarıya olan kayıpları gidermekte etkili olacaktır. ACO-OFDM her ne kadar DCO-OFDM den iyi performans gösterse de spektral verimlilik bakımında DCO-OFDM in gerisinde kalmaktadır.

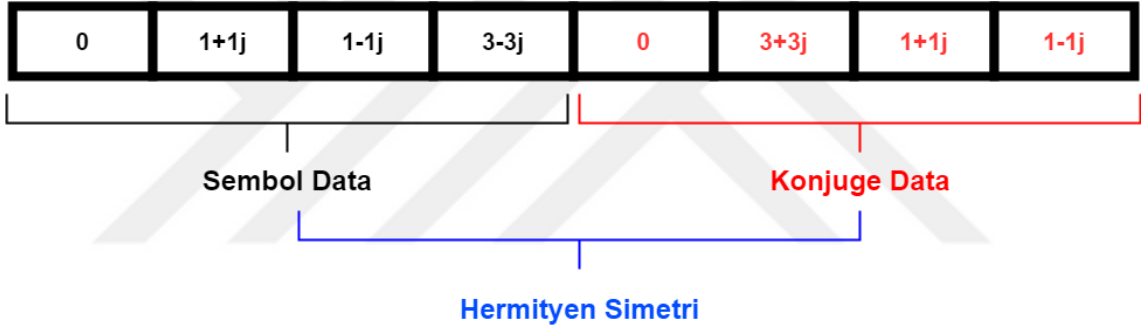
4.5 FLİP OFDM (FLİP-OFDM)

FLİP-OFDM sistemleri VLC-OFDM sistemlerinde Hermitiyen simetri sonrası oluşan çift kutuplu gerçel sayı problemini önce polarite ayırıcıdan pozitif ve negatif sembollerin ayrışması ardından zaman bölmeli çoğullama kullanarak çözmesidir [47]. Rakibi ACO-OFDM sistemine göre en büyük artışı %50 ACO-OFDM sistemine göre spektral verimliliği iki katına çıkarmaktadır. Şekil 4.6’da FLİP-OFDM sisteminin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Flip-OFDM sisteminin blok şeması [48]

Geleneksel optik OFDM ile arasındaki temel fark polarite ayırıcı ve zaman bölmeli çoğullama kullanmasıdır. Öncelikle işaretlerimiz rastgele üretildikten sonra modüle edilir ve $N/2-1$ adet X sembolleri oluşturulur.



Şekil 4.7 Flip-OFDM Hermitiyen Simetri Uygulaması

Frekans alanında modüle edilmiş semboller $\mathbf{X} = [x[0], x[1] \dots, x[N/2 - 1]]^T$ şeklindedir ve HS yapısına sahiptir ve bu yapı Şekil 4.7'deki gibi ilk ve $N/2$ indisli alt taşıyıcıları sıfıra setlenerek oluşturulmuştur [42].

Klasik bir Flip-OFDM tekniğinin frekans bölgesindeki yapısı denklem (4.4)'de sunulduğu gibidir.

$$X[k] = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ X^*[N - k], & k = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ 0, & k = \frac{N}{2} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$X[k] = [0, x[0], x[1], x[2] \dots, x[N - 2], x[N - 1], 0, x[N - 1]^*, x[N - 2]^* \dots, x[2]^*, x[1]^*, x[0]^*] \quad (4.5)$$

Son olarak vericide, denklem (4.5) deki oluşan sembol IFFT işleminden geçirildikten sonra gerçek çift kutuplu OFDM sinyali polarite ayırıcı ile ayrılır.

$$x(k) = x^+(k) + x^-(k) \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'da $x^+(k)$ sinyalin artı yani pozitif tarafını ve $x^-(k)$ da eksi yani negatif tarafını göstermektedir. Buradan ledin istediği biçimde ki veriyi oluşturmak için aşağıdaki kısıtlamalar da gösterildiği gibi verinin artı ve eksi kısmı ayıklanır.

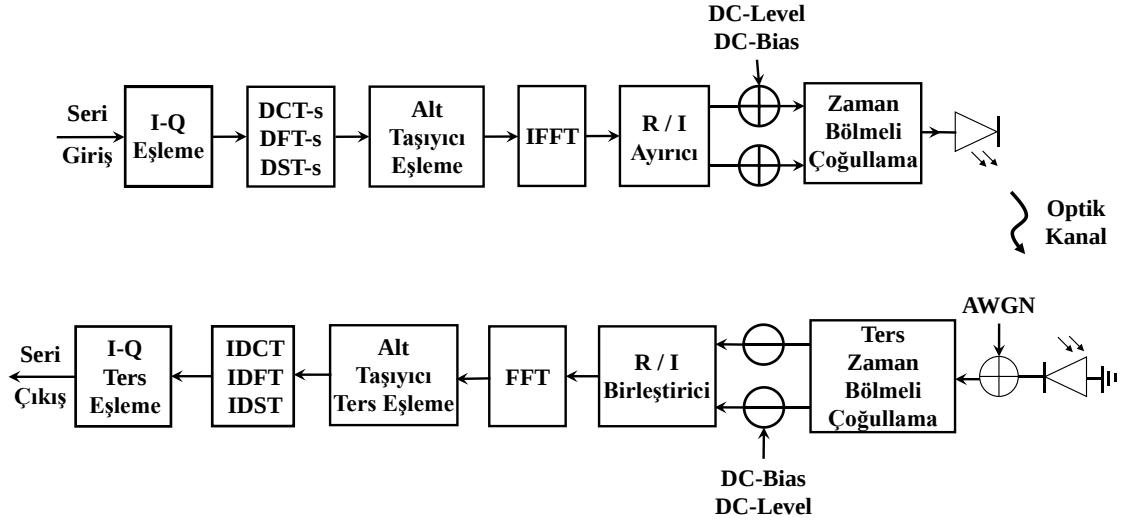
$$x^+(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) \geq 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$x^-(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) < 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.8)$$

Denklemler (4.7) ve (4.8)'de görülebileceği gibi, pozitif kısım $x^+(k)$ ve ters dönderilmiş eksi kısım $-x^-(k)$ çift ardışık OFDM çerçevesinde ayrı ayrı iletilir. Birinci OFDM alt çerçevesinde (artı alt çerçeve) bir pozitif sinyal gönderilir ve ikinci OFDM alt çerçevesinde (eksi alt çerçeve) ise tek ters negatif sinyal iletilir. Ardından CP ek yapılarak zaman bölmeli çoğullama aracılığı ile oluşan semboller LED'ler yardımı ile iletmeye hazır hale gelir. Devamında ise optik kanaldan geçirilerek verici de yapılan işlemlerin alıcıda tam tersi uygulanarak BER ve PAPR gibi başarımlar parametreleri hesaplanır. Flip-OFDM tekniği zaman bölmeli çoğullamanın avantajını kullanarak ACO-OFDM sistemlerine nazaran aynı performans vermesine rağmen spektral olarak %50 daha verimlidir [47].

4.6 Sıfır Sonlu DCT-s/DST-s Optik-OFDM (ZT DCT-s/DST-s O-OFDM)

Radyo frekansı (RF) iletişim yöntemlerinde OFDM'e farklı bir yaklaşım olarak sunulabilecek sıfır sonlu ayrık Fourier dönüşümü yayılmalı OFDM (ZT DFT-s OFDM) dalga şekli optik telsiz iletişim sistemlerinde uygulanmıştır. Ayrıca DFT-s bloğunun yerine diğer ortogonal dönüşümlerden olan ayrık sinüs dönüşümü (DST) ve ayrık cosinüs dönüşümü (DCT) gibi dönüşüm yöntemlerinin kullanılması amaçlanmaktadır.



Şekil 4.8 ZT-DFT-S-O-OFDM sisteminin blok şeması [49]

Şekil 4.8’de gösterilen ZT DCT-s/DFT-s/DST-s O-OFDM iletişim yönteminde verici tarafında öncelikle rastgele datalar oluşturulur ve I-Q Eşleme Bloğu sonunda kiplenen reel olmayan karmaşık datalar başta iletilecek alt taşıyıcı sayısısınca bilgilere dönüştürülür. Elimizde bulunan verilerin zero tail gerekliliklerinde bulunan başlangıç ve bitiş dizilerine sıfır serileri ek yapılarak DCT-s/DFT-s/DST-s Kalıbında Denklem (4.6), Denklem (4.7) ve Denklem (4.8)’teki eşitlikler sayesinde sırayla DCT, DFT ve DST yöntemleri ile yayılma işlemi gerçekleştirilir.

$$X(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} W(k) \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cos\left(\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (4.6)$$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp\left(-\frac{j2\pi}{N} kn\right), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.7)$$

$$X(k) = \frac{2}{N} W(k) \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \sin\left(\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (4.8)$$

Burada, $x[n]$ iletilen sinyalin zaman-alan eşdeğerini temsil eder ve $X(k)$, iletilen sinyalin frekans-alan eşdeğerini (DCT, DFT, DST) temsil eder. $W(k)$, $k=0$ için $1/\sqrt{2}$ ve aksi takdirde DCT dönüşümü için 1 ve benzer şekilde DST dönüşümü için $k=N$ için $1/\sqrt{2}$ ve aksi takdirde 1 seçilir.

Sonrasın da genişletilen sembollerin alt taşıyıcı eşlemesi yapıpı zero tail dalga formunun gerekliliklerinde bulunan dizinin başlangıç ve bitişine sıfır serileri ek yapılarak IFFT bloğunda aşağıda bulunan denklem desteğiyle N-noktalı IFFT dönüşümü yapıpır. Bu işlem Denklem (4.9)'da gösterilmiştir.

$$Tx[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Txx(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.9)$$

Burada, $Tx[n]$ zaman alanındaki sinyalin ve $Txx(k)$ 'da frekans alanındaki başlangıcına ve bitişine sıfır serileri ek yapılmış sembolleri göstermektedir. IFFT Bloğu bitişinde işlem görmüş reel olmayan karmaşık bilgi sembolleri R/I Ayırıcı Kalıbının çıkışında Reel ve sanal olarak iki kısma ayrılır. Gerçel kısım $TxR[n]$ ve İmajiner kısım $TxI[n]$ serilerine eksi değerlerden arınmak için DC-ön ekleme ya da DC seviye ekleme işlemi yapıpır. Devamında Zaman Bölmeli Çoğullama kısmında $TxR[n]$ ile $TxI[n]$ sinyalleri çoğullanarak tezde anlatılan ZT DCT-s/DFT-s/DST-s O-OFDM veri dataları oluşturulur. İletilmek üzere hazırlanan sinyaller LED'ler aracılığı ile optik kanal üzerinden gönderilip AWGN gürültüsü ile bozulur. Verici de yapılan işlemlerin alıcıda tam tersi yapılarak BER ve PAPR gibi istenilen performans ölçütleri hesaplanır.

ZT DCT-s/DST-s O-OFDM tekniği geleneksel optik OFDM sistemine karşı enerji bakımından yüksek verimliliğe sahiptir. Ayrıca farklı ortogonal dönüşümlerin kullanılması performansını daha da iyileştirilmiştir.

5.BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE MODÜLASYON TEKNİKLERİ

5.1 Giriş

Bu bölümde, VLC için literatürde bulunan standartlara girmiş farklı modülasyon şemaları incelenmektedir. Optik haberleşmede kullanılacak sinyaller gerçek ve pozitif değerlerde olmalıdır. Bundan dolayı sistemlerin alıcı ve verici kısımlarında bulunan Modülatörler ve Demolatör kısımları revize edilmelidir. Görünür ışık haberleşmesinde antenler yerine ışık yayan diyotlar (LED'ler) ve fotodiyotlar (PD'ler) kullanır. Buda iletişim için belirli sınırlandırmalar getirir. Tek taşıyıcı modülasyonu (SCM) tekniklerinin Li-Fi'de uygulanması kolaydır. Başla dur anahtarlama (OOK), darbe konum modülasyonu (PPM) ve M-seviyeli darbe genlik modülasyonu (M-PAM) gibi modülasyon teknikleri kolayca uygulanabilir. Bununla birlikte, optik kablosuz kanalların dağıtıcı doğası nedeniyle, bu tür şemalar alıcıda karmaşık denkleştiriciler gerektirir. Bu nedenle, bu şemaların performansı spektral verimlilikleri (SE) arttıkça düşmektedir. Öte yandan, ortogonal frekans bölmeli çoğullama (OFDM) gibi çok taşıyıcılı modülasyon (MCM) tekniklerinin optik kablosuz kanallar için potansiyel adaylar olduğu gösterilmiştir. Çünkü alıcıda sadece tek tap denkleştirici gerektirirler ve çokta karmaşık değildir. İlk üç yöntem IEEE 802.15.7 standardının fiziksel (PHY) katman tiplerinde sunulmaktadır. PHY I ve PHY II, yalnız foton için tanımlanmış ve OOK ve VPPM'yi desteklerken, PHY III birçok frekansta (renk) ve birden çok optik kaynağı kullanarak CSK'yi kullanır. Üç programın tümü birbiriyle birlikte olabilir, titreşim azaltma sağlar ve karartmayı destekler, veri hızları ve azalan aralıklar arasında değişime izin verir [38]. Bunlar gibi birçok modülasyon türü ve tekniği bulunur. Standartta yer edinmiş modülasyon türleri bunlardır. Diğer modülasyon türlerine örnek verecek olur isek Dörtlü Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (QASK), Bindirilmiş Darbe Genlik Modülasyonu

(SPAM), Darbe Konum Modülasyonu (PPM), Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM), Metametrik Modülasyon (MM), Anahtarlama Frekans Modülasyonu (SFM) vb. örnekler verilebilir. Biz bu bölümünün detaylarında standartta bulunan modülasyonlardan bahsedeceğiz.

5.2 Aç-Kapa Anahtarlama (ON-OFF KEYING, OOK)

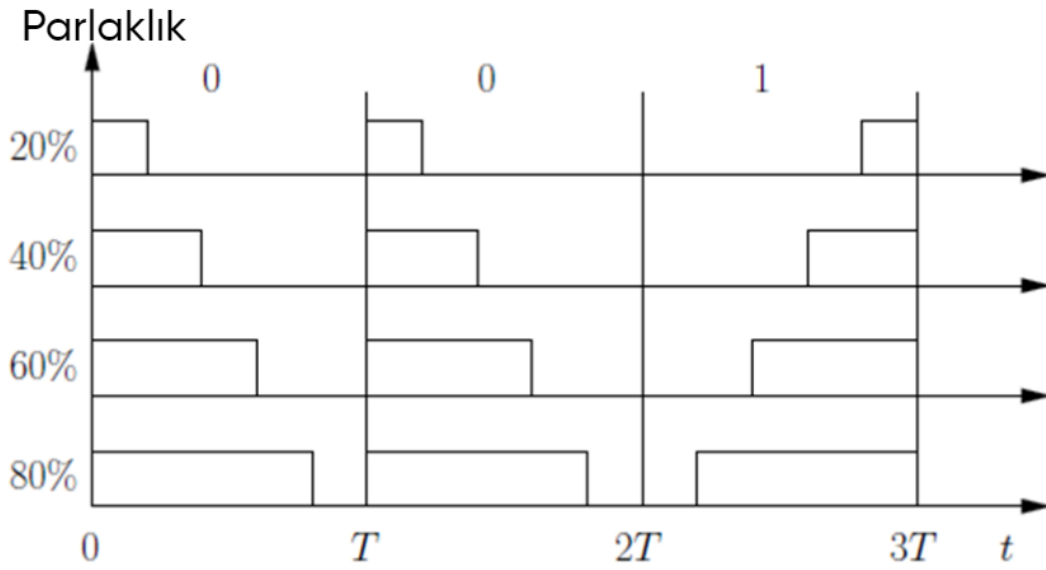
Türkçe açıklaması aç kapa olan bu teknik PHY I katmanında bulunmaktadır ve çeşitli fonksiyonlar eklenerek PHY II seviyelerine çıkarılmıştır. Basit uygulaması nedeniyle VLC’de en yaygın kullanılan IM/DD modülasyon şemasıdır. İkili genlik kaydırmalı anahtarlama (2ASK) olarak da bilinen aç-kapa anahtarlama (OOK) modülasyon formatı, sinüzoidal bir taşıyıcının açılıp kapanmasını kontrol etmek için tek kutuplu bir NRZ (non return to zero) sıfıra dönmeyen satır kod dizisi kullanır. OOK modülasyonunda, bir taşıyıcının genliği “0” veya “1” ikili bilgisine karşılık gelen yalnızca iki durumda değişir. Genlik kaydırmalı anahtarlama, sinüzoidal taşıyıcının frekansı ve ilk fazı değişmeden kalırken, bilgi iletmek için sinüzoidal taşıyıcının genlik değişimini kullanır.

Kısaca OOK modülasyonu VLC için en basit modülasyon şemasıdır; burada LED’ler veri bitlerinin 1 veya 0 olmasına bağlı olarak açılır veya kapanır. Modülasyon mantıksal olarak OOK olsa da, OOK “kapalı” ışığın tamamen kapatıldığı anlamına gelmez; bunun yerine, ışığın yoğunluğu ayırt edilebildiği sürece azaltılabilir. “açık” ve “kapalı” seviyeleri arasında net bir fark vardır. Bu modülasyonun uygulanması kolaydır ve yalnızca iki yükseklik seviyesi olduğundan, LED doğrusal olmama durumlarından daha az etkilenir. LED’in yüksek anahtarlama frekansı nedeniyle OOK modülasyonunun titremesi genellikle daha düşüktür. İnsan sağlığını etkilemeden göz kırpmalarını algılamak için belirli bir frekansta açılıp kapatılabilir. [30].

5.3 Değişken Darbe Pozisyonu Modülasyonu (VPPM)

VPPM, IEEE 802.15.7 VLC standartına dahil edilmiştir ve darbe pozisyonu modülasyonu (PPM) ve darbe genişliği modülasyonunun (PWM) birleşimini olarak kullanılan bir modülasyon yönetimidir ve sembol periyodu boyunca yalnızca 1 bit bilgi taşır. VPPM, tam parlaklıkta bilgi iletimini önlemek için görev döngüsünü değiştirir ve bitler darbe pozisyonuna göre ayırt edilir. Bununla birlikte, düşük karartma seviyelerinde

veri hızı ve performans azalır. VPPM'nin bant genişliği OOK'dan daha azdır, ancak alıcıda daha sıkı bir senkronizasyon gerektirir ve sistem karmaşıklığı daha yüksektir. VPPM'nin temel amacı, veri yoğunluğunu kontrol etmek ve darbe genişliği modülasyonunun etkisini azaltmaktır. VPPM, eşit derecede zayıf spektral verimliliğe sahiptir ve verilerin titreme üretmesi olası değildir. Ayrıca örnek verecek olur isek Şekil 5.1'de 001 veri dizisinin iletildiği varsayılarak farklı karartma seviyeleri için 2-VPPM gösterilmektedir. 50'lik bir karartma seviyesi için 2-PPM ve 2-VPPM aynıdır.



Şekil 5.1 VPPM veri darbeleri örneği

5.4 Renk Kaydırmalı Anahtarlama (CSK)

Bu bölümde, iç mekan aydınlatma gereksinimlerini karşılarken çok renkli görünür spektrum kullanan çok renkli LED'ler aracılığıyla VLC'yi gerçekleştirmek için özel olarak tasarlanmış renk kaydırmalı anahtarlama (CSK) modülasyon şemalarını incelemektedir. Başlangıçta CSK, üç renkli veya trikromatik LED'ler kullanan ve 11.67 kbit/s ile 96 Mbit/s arasında veri hızları sağlayan, yoğunluk titreşim azaltma ve karartma kipini içeren PHY III'teki IEEE 802.15.7 standardında tanıtılmıştır. Beyaz LED ışıklar, tipik olarak iki farklı yöntemle farklı renklerin karışımı kullanılarak üretilir. Beyaz LED'ler sarı fosforlu mavi LED'ler kullanılarak üretilir. Ancak sarı fosfor beyaz LED'lerin anahtarlama tepkisini yavaşlatır. Alternatif olarak, kırmızı, yeşil ve mavi LED'lerin aynı anda uyarılmasıyla daha hızlı beyaz LED'ler üretilir. Bu tür çok renkli LED'lerin kullanımı CSK modülasyonunun arkasındaki prensibi oluşturur; CSK

modülasyonu frekans kaydırmalı anahtarlama benzer, çünkü bit desenleri kombinasyonları renklere kodlanır (dalga boyu). Örneğin, 4-CSK (sembol başına 2 bit) için ışık kaynağı, her bit çifti kombinasyonu için dört olası dalga boyundan (renk) birini iletecek şekilde dalga boyu anahtarlanır.

İletişim için çeşitli renkleri tanımlamak amacıyla IEEE 802.15.7 standardı, iletişim için birden fazla LED renk seçeneği desteği sağlamak üzere CIE 1931 renk uzayı standardına (CIE, 1931) göre spektrumu yedi renk bandına ayırır. Bu bantların her biri atanmış bir renk koduna sahiptir ve x-y renk koordinatlarında x ve y değerlerine eşlenir.

Tablo 5.1’de Her bir bant için renk kodları ve x-y koordinat değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5.1 Renk Bantları, x-y Renk Koordinatları [21]

Bant (nm)	Kodu	Merkez (nm)	(x, y)
380–478	000	429	(0.169, 0.007)
478–540	001	509	(0.011, 0.733)
540–588	010	564	(0.402, 0.597)
588–633	011	611	(0.669, 0.331)
633–679	100	656	(0.729, 0.271)
679–726	101	703	(0.734, 0.265)
726–780	110	753	(0.734, 0.265)

CSK sinyali, yedi renk bandından üç renk ışık kaynağı kullanılarak üretilir. CSK takımyıldızı üçgeninin üç köşesi, x-y renk koordinatları üzerindeki üç renk bandının merkez dalga boyuna göre belirlenir. (110-101-100) veya (100-011-010) gibi x-y renk koordinatları üzerinde üçgen oluşturamayan belirli kombinasyonlar hariç tutulur. Tablo 5.1, optik kaynağın yedi renk bandının her birinin merkezinde meydana gelen spektral tepe ile seçildiğini varsayan x-y renk koordinatları değerlerini göstermektedir. Bazı optik kaynakların, bant planının merkezinden farklı bir frekansta bir spektral zirveye sahip olması mümkündür. Optik kaynağın spektrumunun birden fazla frekans bandına dağıtılması da mümkündür. CSK sisteminin uygulayıcıları, gerçek optik kaynağın merkez dalga boyuna göre renk bandını seçebilir. Tablo 5.2 CSK takımyıldızları için üçgenler üretebilen geçerli renk bandı kombinasyonlarını göstermektedir.

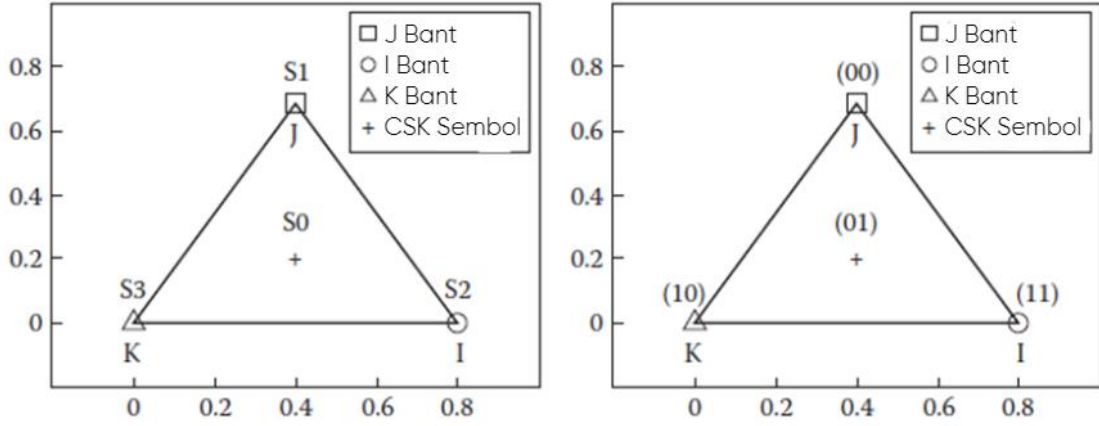
Tablo 5.2 CSK renk Gamutu içerisinde oluşturulabilecek üçgen kombinasyonları [21]

	Bant i	Bant j	Bant k
1	110	010	000
2	110	001	000
3	101	010	000
4	101	001	000
5	100	010	000
6	100	001	000
7	011	010	000
8	011	001	000
9	010	001	000

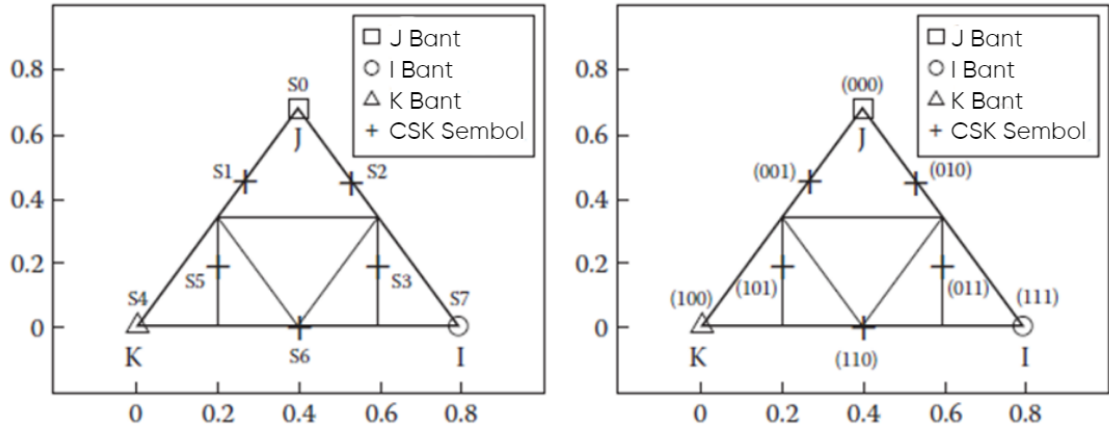
CSK modülasyonu birçok avantajlara sahiptir. Nihai çıktı rengi (örneğin beyaz) renk koordinatları tarafından garanti edilir. CSK kanalları, renk koordinatları düzleminde tahsis edilen karışık renklerle belirlenir. Her bir ışık kaynağı farklı bir anlık çıkış gücüne sahip olsa da, tüm CSK ışık kaynaklarının toplam gücü sabittir. CSK karartma, ışık kaynaklarından gelen ortalama optik gücün sabit tutulmasını sağlar ve renk takımyıldızının merkez renginin gerekli yoğunluğunu korur. Böylece, genlik değişimleri nedeniyle CSK ile ilişkili sorunların en başından gelen titreşim sorunu yaşanmaz. CSK karartma, genlik karartma kullanır ve ışık kaynağını tahrik eden akımı değiştirerek parlaklığı kontrol eder. Ancak ışık kaynağında beklenmedik renk kaymalarını önlemek için CSK karartma sırasında dikkatli olunması gerekir. Ayrıca CSK, dijital-analog (D/A) dönüştürücülerle (daha yüksek karmaşıklık) genlik değişikliklerini destekler, böylece daha yüksek dereceli modülasyona izin verir.

4-CSK sembol noktaları Şekil 5.2'deki tasarım kuralı ile tanımlanmıştır. Bu şekilde, 4-CSK veri eşlemesi de gösterilmiştir. Sembol başına iki bit atanmıştır. I, J ve K noktaları x-y renk koordinatlarında üç renk bandının merkezini göstermektedir. S0 ile S3 arası, 4-CSK'nın dört sembol noktasıdır. S1, S2 ve S3, IJK üçgeninin üç köşesidir. S0 üçgenin merkez noktasıdır I, J ve K tarafından oluşturulmuştur.

8-CSK sembol noktaları Şekil 5.3'teki tasarım kuralı tarafından tanımlanır. Bu şekilde 8-CSK veri eşlemesi de gösterilmiştir. Sembol başına üç bit atanmıştır. I, J ve K noktaları x-y renk koordinatlarında üç renk bandının merkezini göstermektedir. S0 ile S7 arası, 8-CSK'nın sekiz sembol noktasıdır.



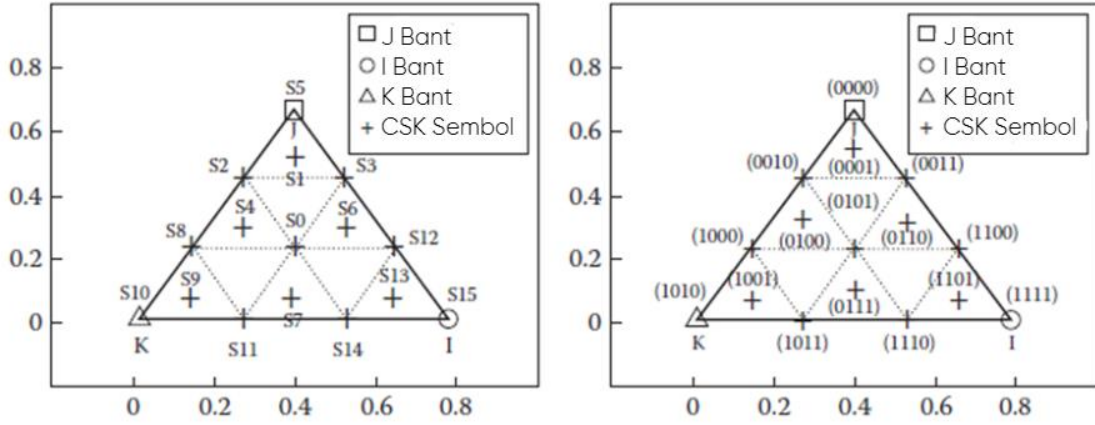
Şekil 5.2 4-CSK takımıyıldızı ve veri eşleme.



Şekil 5.3 8-CSK takımıyıldızı ve veri eşleme.

16-CSK sembol noktaları Şekil 5.4'teki tasarım kuralı tarafından tanımlanır. Bu şekilde, 16-CSK veri eşlemesi de gösterilmiştir. Sembol başına dört bit atanmıştır. I, J ve K noktaları x-y renk koordinatlarındaki üç renk bandının merkezini göstermektedir. S0 ile S15 arası, 16-CSK'nın 16 sembol noktasıdır.

CSK modülasyonunda, ikili veriler (sıfırlar ve birler), M 'nin modülasyon büyüklüğü olduğu $\log_2 M$ gruplarına ayrıştırılır [50]. Renk kodlama bloğu tarafından x-y renk koordinatları üzerindeki bir eşleme kuralına göre x-y değerlerine dönüştürülür. Tablo 5.3'te ise bu oluşan sembollerin x-y koordinat değerleri gözlenebilir.

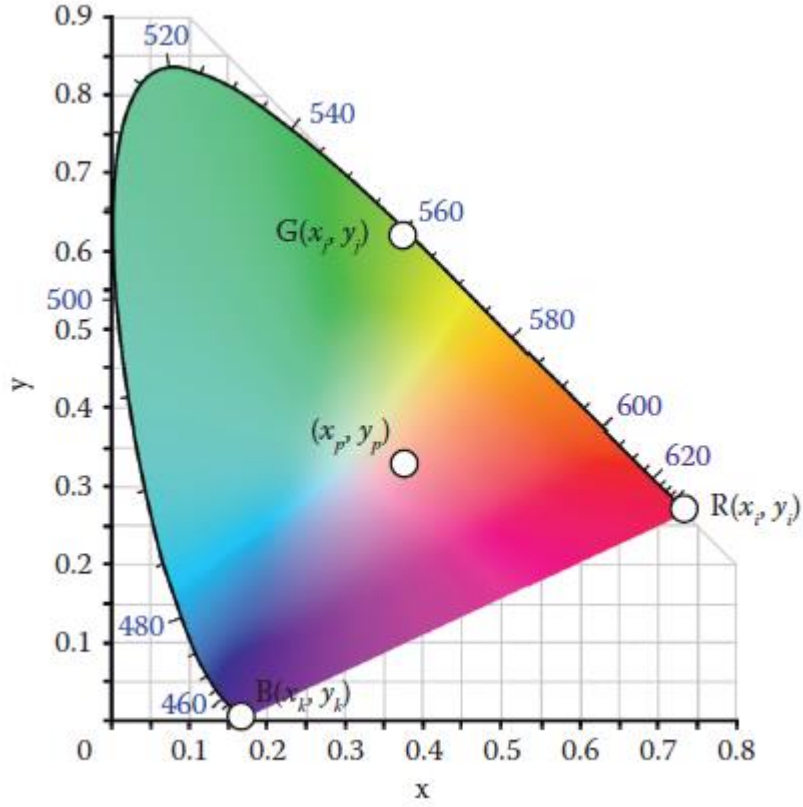


Şekil 5.4 16-CSK takımı yıldızı ve veri eşleme.

Tablo 5.3. Sembollerin x-y koordinat değerleri

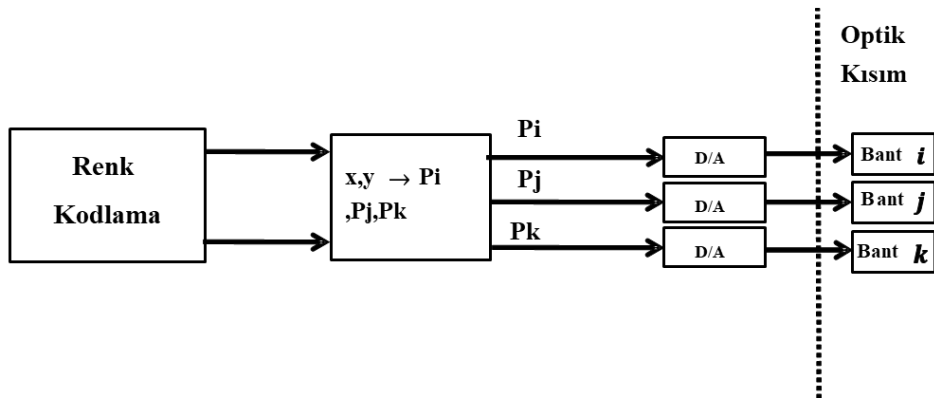
Merkez Bant Noktaları (x, y)	Sembollerin x-y koordinat değerleri		
	4-CSK [data] – (xp, yp)	8-CSK [data] – (xp, yp)	16-CSK [data] – (xp, yp)
(0.734 0.265)	[0 0] – (0.402 0.597)	[0 0 0] – (0.324 0.400)	[0 0 0 0] – (0.402 0.597)
(0.402 0.597)	[0 1] – (0.435 0.290)	[0 0 1] – (0.297 0.200)	[0 0 0 1] – (0.413 0.495)
(0.169 0.007)	[1 0] – (0.169 0.007)	[0 1 0] – (0.579 0.329)	[0 0 1 0] – (0.335 0.298)
	[1 1] – (0.734 0.265)	[0 1 1] – (0.452 0.136)	[0 0 1 1] – (0.324 0.400)
		[1 0 0] – (0.402 0.597)	[0 1 0 0] – (0.623 0.376)
		[1 0 1] – (0.169 0.007)	[0 1 0 1] – (0.513 0.486)
		[1 1 0] – (0.513 0.486)	[0 1 1 0] – (0.435 0.290)
		[1 1 1] – (0.734 0.265)	[0 1 1 1] – (0.524 0.384)
			[1 0 0 0] – (0.734 0.265)
			[1 0 0 1] – (0.169 0.007)
			[1 0 1 0] – (0.247 0.204)
			[1 0 1 1] – (0.258 0.101)
			[1 1 0 0] – (0.546 0.179)
			[1 1 0 1] – (0.634 0.273)
			[1 1 1 0] – (0.546 0.179)
			[1 1 1 1] – (0.357 0.093)

Daha sonra x-y koordinatındaki noktalar, sırasıyla RGB LED’den yayılan kırmızı, yeşil ve mavi ışığın yoğunluğunu temsil eden (R, G, B) değerlerine dönüştürülür.



Şekil 5.5 CİE 1931 x-y renk koordinatları 4-CSK örneği

Şekil 5.5'e göre, (x_i, y_i) , (x_j, y_j) ve (x_k, y_k) noktaları üç ışık kaynağının x-y koordinatlarını göstermektedir. (x_p, y_p) noktası 4-CSK'de tahsis edilmiş bir renk noktasını göstermektedir.



Şekil 5.6 Basit Verici Yapısı

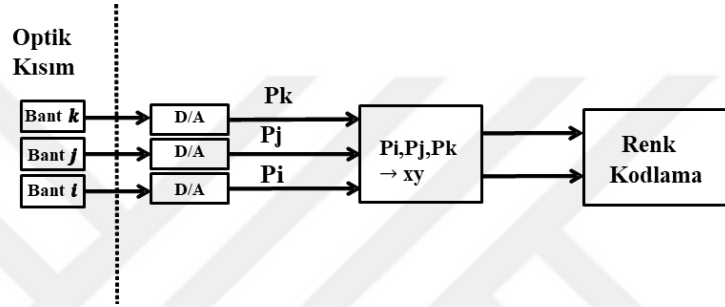
Şekil 5.6'da gözler önüne konulan Renk noktası (x_i, y_i) üç ışık kaynağını ise P_i , P_j ve P_k normalleştirilmiş yoğunluğu ile temsil edilebilir. Koordinatlar ve yoğunluklar arasındaki ilişki Denklem (5.1), Denklem (5.2) ve Denklem (5.3)'de aşağıdaki şekilde verilir:

$$x = P_i x_i + P_j x_j + P_k x_k \quad (5.1)$$

$$y = P_i y_i + P_j y_j + P_k y_k \quad (5.2)$$

$$P_T = P_r + P_g + P_b = 1 \quad (5.3)$$

Alıcı tarafında, x-y değerleri üç rengin alınan yoğunluklarından hesaplanır ve daha sonra alınan veriler çözülür. Şekil 5.7’de alıcı yapısı görülmektedir.



Şekil 5.7 Alıcı Yapısı

Alınan sinyal $\hat{s} = [\hat{P}_i, \hat{P}_j, \hat{P}_k]^T$ ’dan 3-boyutlu sinyal uzayında Denklem (5.4)’te sunulduğu üzere en büyük olabilirlik (Maximum likelihood, ML) sezici ile en küçük Öklid aralığına kıyasla gönderilen simgelerden belirlenir.

$$\bar{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|\hat{s} - s\|_2 \quad (5.4)$$

Burada A, 3B uzayda bir dizi M düzeyinde CSK sembolü oluşturur. Son olarak, belirlenen semboller $\bar{s}$ ikili verilere dönüştürülür [51].

Aşağıdaki Tablo 5.4, 4-CSK modülasyon sembolleri için x-y renk seviyelerini ve R, G ve B kanalları için karşılık gelen üretilmiş optik güç yoğunluğu seviyelerini göstermektedir. Tablo 5.5, 4-CSK modülasyonunun optik güç yoğunluk seviyeleri kullanılarak oluşturulan Öklid aralıklarını göstermektedir.

Tablo 5.4. 4-CSK Modülasyonunda Kromatik ve Optik Güç Yoğunluk Seviyeleri

		x	y	R	G	B
S0	0 0	0,402	0.597	0	1	0
S1	0 1	0.435	0,290	0.333	0,334	0.33
S2	1 0	0.169	0.007	0	0	1
S3	1 1	0.734	0.265	1	0	0

Tablo 5.5 4-CSK Sembollerine Ait Optik Güç Yoğunluk Değerlerini Kullanarak Üretilen Öklid Mesafeleri

	S0	S1	S2	S3
S0	0	0.8157	1.4142	1.4142
S1	0.8157	0	0.817	0.817
S2	1.4142	0.817	0	1.4142
S3	1.4142	0.817	1.4142	0

Öklid mesafesi, demodülasyonda en yaygın kestirim yöntemidir. Öklid mesafesi yıldız kümesine denk gelen yıldızla en yakın bölgeyi bulur ve o bölgede karar kılar. Bir diğer sonuç Manhattan uzunluğu, iletişim literatüründe karşımıza çıkmaktadır ve Öklid mesafesinin en ilkel şeklidir. Genel formülasyonu göz önüne alındığında, Öklid mesafesi tahmininin çok daha iyi sonuç verdiği gözlenir. Kestirim için kullanılan algoritma çok önemlidir. Bu algoritmadaki hatalara ve hata patlamalarına neden olabilir. Literatürde Öklid mesafesinin en iyi sonuçları verdiğini görüyoruz. Bu algoritma, Tablo 5.5’de hesaplanan nokta-yıldız bölgelerinin noktalar arası mesafelerini hesaplamak için Öklid mesafesi renk ışık gücü yoğunlukları ve Pisagor’dan Tablo 5.4’te elde edilen sonuçlar kullanılarak geliştirilmiştir. Çünkü işaret kümesine düşen işaret bitinin doğru bölgeye ulaşacağı şekilde daha büyük bir eşleme tahmin edilebilirse, tahmin sürecinin daha rahat geçeceği ve daha doğru sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir. Elbette, hata performansı için birçok faktör vardır. Bunlar genel kanal profili ve kestirim algoritmaları gibi birçok faktörü barındırır.

5.5 M-CSK Bit Hata Oranı Analizi

Vericide iletilen her bir bit değerin alıcıdaki yansıması ile karşılaştırılması ve alınan hata bitlerinin toplam iletilen bit sayısına oranı iletişim sistemleri için çok önemli bir yer tutmaktadır. Bunun nedeni birçok işlemden geçmiş bit değerlerinin alıcıya en iyi şekilde kaydedilmesi gerektiğidir. Bunu başarmak için kullanılan birçok mühendislik yöntemi vardır ve bunlar belirli faktörlerle orantılıysa literatürde var olan bilimsel teorilerdir. Bu bölümde sadece M-CSK modülasyonu için AWGN kanallarında analitik BER analizi kullanılmıştır. Denklem (5.5), BER analizinin RGB uzayındaki ikili semboller arasında üretilen hata olasılıklarının Hamming mesafesi ile ağırlıklandırılmasını göstermektedir. [52].

$$P_b = \frac{1}{M \log_2 M} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{M-1} d(c_i, c_j) P(\hat{s} = s_j | s = s_i) \quad (5.5)$$

Burada $d(c_i, c_j)$ s_i ve s_j sembollerine karşılık gelen c_i ve c_j kod sözcükleri arasındaki hamming mesafesidir [53]. 4-CSK modülasyonu için Denklem (5.5)'den yararlanarak BER eşitliği,

$$P_b = 0.25 \times Q\left(\frac{0.8157}{\sqrt{2N_0}}\right) + 0.75 \times Q\left(\frac{0.817}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (5.6)$$

Denklem (5.6) olarak elde edilir [52].

Yapılan çalışmalarda gerçekçi bir kanal tipi belirlenemediği ve diğer kanal tipleri iyi çalışmadığı için literatürde çoğunlukla AWGN kanalları kullanılmaktadır. Bölüm 6'de Lifting dönüşümü anlatılmaktadır.

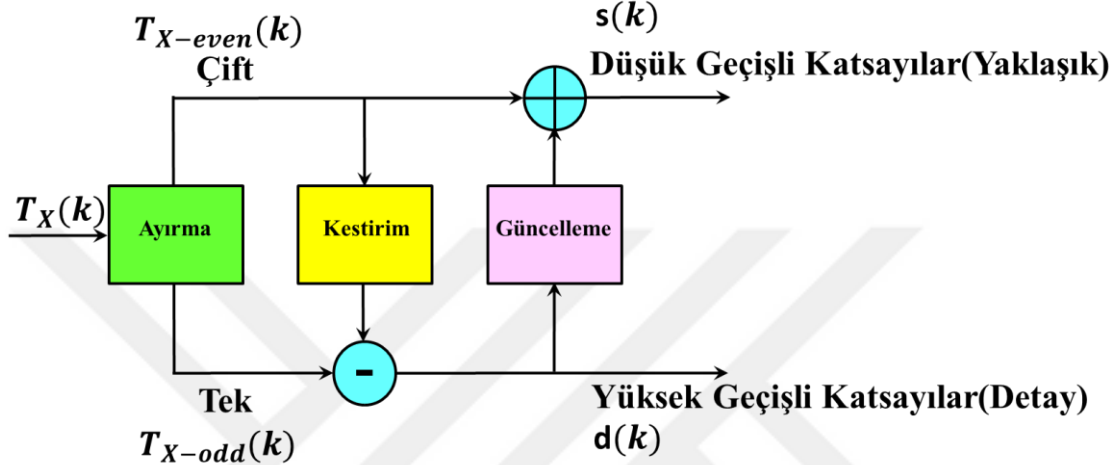
6.BÖLÜM: LİFTİNG DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ

1982 yılında Jean Morlet tarafından geliştirilen dalgacık dönüşümü, bir sinyali ayrık frekans bileşenlerine bölen ve bunları o ölçeğe uygun bir çözünürlükte işleyen matematiksel bir fonksiyondur [54]. Dalgacık dönüşümü uzun yıllardır sinyal işleme ve görüntü işleme uygulamalarında kullanılsa da son yıllarda haberleşme alanında dikkatleri üzerine çekmeye başlamıştır. Dalgacık dönüşümü sinyal işleme, ses tanıma, gürültü giderme, veri/görüntü sıkıştırma, bilgisayarlı görü ve biyomedikal gibi birçok alanda kullanılmaktadır [55]. Ayrık Dalgacık Dönüşümü, 1988 yılında filtreler yöntemi kullanılarak Mallat tarafından geliştirilmiştir [54]. Ayrık dalgacık dönüşümünde sinyale eş zamanlı olarak yüksek geçiren ve alçak geçiren filtreler uygulanır. Yüksek geçiren filtrenin çıkışı sinyalin ayrıntı katsayılarını, alçak geçiren filtrenin çıkışı ise sinyalin yaklaşım katsayılarını verir. Birçok sinyal için, sinyalin bilgisi büyük ölçüde düşük frekanslı kısımda tutulur. Yüksek frekanslı bileşenlerdeki ayrıntı, bazı zamanda gürültüyü temsilen ayrıntı bilgisi saklanır.

Geleneksel dalgacık dönüştürme yöntemlerinde kullanılan filtreler, karmaşık matematiksel işlemleri bulundurur. Bunu hafifletmek üzere bir Lifting yöntemi oluşturulmuştur. Lifting yöntemi, dalgacık dönüşümünün en kolay ve verim sağlayan yöntemidir [56,57]. LWT, Sweldens'a ait sunulan ve Lifting şemasına dayalı modern dalgacık örneğindedir [58]. Lifting sistemi üç bölümden oluşur: bölme, kestirim (tahmin etme) ve güncelleme. Kestirim ve güncelleme işlemleri filtreler yerine uygulanır. Bir boyutlu LWT Şekil 6.1'de gösterilmiştir. LWT'de sinyal iki alt şerite ayrılır. Bu alt taşıyıcılardan ilki tek sayı indeksli verilerden oluşurken diğeri çift sayı indeksli verilerden oluşmaktadır.

- **Split(Ayrırma)**

Lifting metotunda sinyal tek (odd) ve çift (even) verilere ayrıştırılır. Filtrelere karşılık gelebilecek daha kolay gözükten kestirim (prediction) ve güncelleme (update) yöntemleri gerçekleştirilir. Bu karşılık gelebilecek yöntemler için klasik metotlardaki gibi içinden çıkılması zor hesaplamalar gerektirmemektedir. Aşağıda bulunan Şekil 6.1’de Lifting dalgacık dönüşümü sunulmaktadır.



Şekil 6.1 Lifting Dalgacık Dönüşümünde ki temel adımlar

Orijinal $T_X[k]$ sinyali ilk olarak Denklem (6.1) ve (6.2)’de olduğu üzere tek ve çift olarak ikiye ayrılır.

$$T_{X-odd}[k] = T_X[2k + 1] \quad (6.1)$$

$$T_{X-even}[k] = T_X[2k] \quad (6.2)$$

- **Predict(Kestirim)**

Bu iki veri ortasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Kestirim (predict) kısmında tek (odd) verilerden çift (even) verilerden kullanılarak neredeyse ortaya koymaya faaliyeti gösterilir. Bu kısım yüksek geçiren filtre vazifesini üstlenir ve verinin yüksek frekanslı parçası olan ($d[k]$) türetilir.

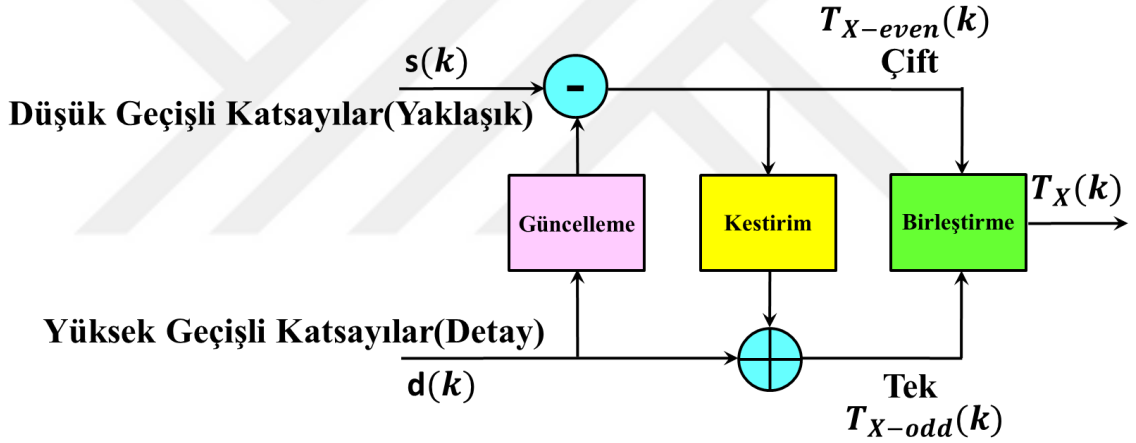
$$d[k] = T_{X-odd}[k] - P(T_{X-even}[k]) \quad (6.3)$$

- **Update(Güncelleme)**

Güncelleme kısmında (update) verilerini netleştirmek için ölçeklendirme uygulanır devamında ise dönüşüm için alçak geçiren filtreli karşılığını edinmek üzere çift örneklere ek yapılır. Bu veriler veri hakkında takribi veriyi ($s[k]$) veren düşük frekanslı parçaları içinde bulundurur.

$$s[k] = T_{X-even}[k] + U(d) \quad (6.4)$$

Elde edilen $d[k]$ ve $s[k]$ sinyallerine dönüşümde kullanılan yöntemin tersi hali yapılarak ters dönüşüm elde edilir. Ters Lifting dalgacık dönüşümünün blok şeması Şekil 6.2’de sunulmaktadır.



Şekil 6.2 Ters Lifting dalgacık dönüşümü

$$T_{X-odd}[k] = d + P(T_{X-even}[k]) \quad (6.5)$$

$$T_{X-even}[k] = a - U(d) \quad (6.6)$$

ILWT, Denklem 5 ve 6 ile gerçekleştirilir. Çift sayı indeksli ve tek sayı indeksli örnekler, Denklem 5 ve 6'daki gibi elde edilir. Ters dönüşüm işleminden sonra, Denklem (6.7)'de verildiği gibi tek indisli ve çift indisli örnekler M birleştirme operatörü ile birleştirilerek orijinal sinyal elde edilir.

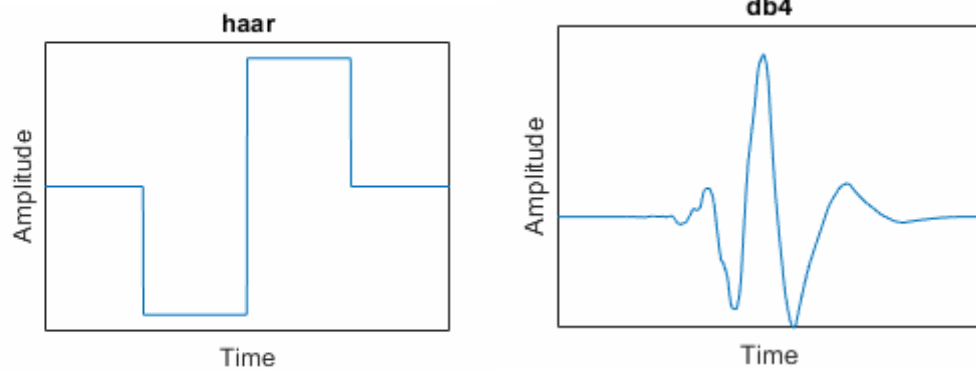
$$T_X[k] = M\{T_{X\text{-odd}}[k], T_{X\text{-even}}[k]\} \quad (6.7)$$

LWT sistemi daha fazla spektral verimlilik elde eder ve ICI'ya problemlerine çözüm olarak geleneksel FFT kullanan OFDM sisteminden daha güçlü hale gelir [59]. OFDM ve LWT'nin temel teorileri, çalışma ve elde etme yapıları açısından birçok benzerliğe sahiptir, bununla birlikte, iki sisteme ayırt edici özelliklerini sağlayan temel ayrılıklar bulunmaktadır. OFDM sinyalleri sadece frekans bölgesinde örtüşmesine rağmen, LWT sinyalleri hem zaman hem de frekans alanında örtüşmektedir. Zaman bölgesindeki denk gelmesi nedeniyle, LWT'nin OFDM sisteminde ISI'ın önlemek için geleneksel sistemlerde kullanılan CP'yi kullanmasına gerek yoktur. Statik sinüslerden/kosinüslerden oluşan Fourier dönüşümünün tersine, LWT uyumluluk ve adaptasyon sunan dalgacıklar kullanır. Tablo 6.1' de bu dalgacıklara örnek verilebilir.

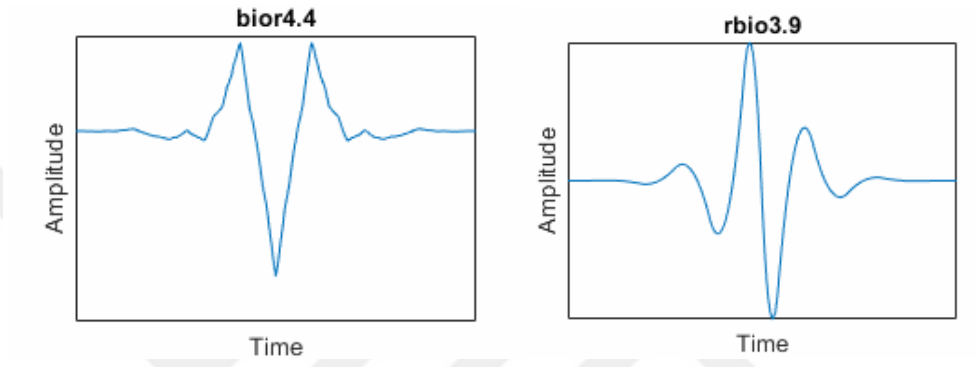
Tablo 6.1 Dalgacık Aileleri ve Kısa Adları

Dalgacık Ailesi	Dalga
Daubechies	'lazy', 'haar', 'db1', 'db2', 'db3', 'db4', 'db5', 'db6', 'db7', 'db8'
Symlet	'sym2', 'sym3', 'sym4', 'sym5', 'sym6', 'sym7', 'sym8'
Cohen-Daubechies-Feauveau	'cdf1.1', 'cdf1.3', 'cdf1.5', 'cdf2.2', 'cdf2.4', 'cdf2.6', 'cdf3.1', 'cdf3.3', 'cdf3.5', 'cdf4.2', 'cdf4.4', 'cdf4.6', 'cdf5.1', 'cdf5.3', 'cdf5.5', 'cdf6.2', 'cdf6.4', 'cdf6.6'
Coiflet	'coif1', 'coif2'
Biorthogonal	'bior1.1', 'bior1.3', 'bior1.5', 'bior2.2', 'bior2.4', 'bior2.6', 'bior2.8', 'bior3.1', 'bior3.3', 'bior3.5', 'bior3.7', 'bior3.9', 'bior4.4', 'bior5.5', 'bior6.8', 'bs3', '9.7'
Reverse Biorthogonal	'rbs3', 'r9.7', 'rbio1.1', 'rbio1.3', 'rbio1.5', 'rbio2.2', 'rbio2.4', 'rbio2.6', 'rbio2.8', 'rbio3.1', 'rbio3.3', 'rbio3.5', 'rbio3.7', 'rbio3.9', 'rbio4.4', 'rbio5.5', 'rbio6.8'

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de ise Tablo 6.1'de bahsedilen dalgacıklara örnek gösterilebilir. Şekil 6.3'de kullanılan dalgacıklar Çoklu Çözünürlük Analizi yaparken kullanılırken Şekil 6.4'de kullanılan dalgalar, çalışmanız sinyal veya görüntü sıkıştırma içeriyorsa, bir biortogonal dalgacık kullanmayı düşünebilirsiniz. LWT dönüşümünün yukarıda belirtilen avantajları nedeniyle, O-OFDM sisteminin performansını artırmak için LWT dönüşümünün O-OFDM sistemi ile birleştirilmesi bu tezde sunulmaktadır. Önerilen LLWT-M-CSK-O-OFDM sistemini kullanan kablosuz optik haberleşme sisteminin verici-alıcı blok diyagramı 7.bölümde bahsedilecektir.



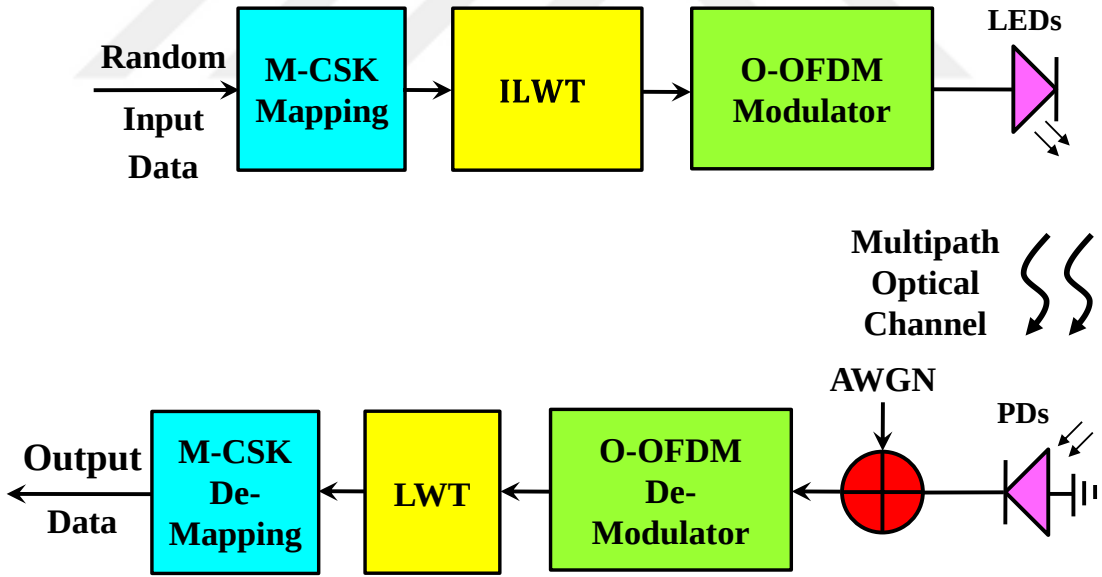
Şekil 6.3 Ortogonal Dalgacık Ailesi



Şekil 6.4 Biortogonal Dalgacık Ailesi

7. BÖLÜM: LAZY LIFTING WAVELET DÖNÜŞÜMÜ TABANLI M-CSK-O-OFDM SİSTEMİ

Bu bölümde tezin amacı olan görünür ışık haberleşmesi tekniklerinden bölüm 3’te detaylıca anlatılan optik OFDM VLC modülasyon tekniklerinden M-CSK ile modüle ederek ve LAZY Lifting Wavelet dönüşümü eklenerek Optik-OFDM sistemlerinin performansına etkisini incelemek için bölüm 4’te detaylıca açıklandığı gibi önerilen modülasyon teknikleri arasında M-CSK modülasyonu ile birleştirilerek ilk kez bu çalışmada yapılan LLWT-M-CSK-O-OFDM yöntemi önerilmiştir.



Şekil 7.1 LLWT M-CSK-O-OFDM Sistemi blok diyagramı

Şekil 7.1’de LLWT-M-CSK-O-OFDM yönteminin blok diyagramı verilmiştir. Blok diyagramında görüldüğü gibi ilk olarak gönderilecek olan sinyal renk kodlama bloğuna alınarak bölüm 4’te detaylıca açıklanan renk kod haritasında renk bitlerine kodlanır. Üretilen datalar M-CSK modülatörü aracılığıyla veri eşlenir ve (x, y) kromatik yerlemi aracılığıyla iletilmek istenen her veri CIE 1931 Uluslararası Aydınlatma

Komisyonu aracılığıyla belirtilen renk uzayı normalinde M seviyeli CSK verilerine eşlenir [14]. CIE 1931 renk uzayı renkserlik şemasında insan gözünün idrak ettiği bütün renklerin renklilik değerlerini x ve y ile belirtir. Devamında, renklilik değerleri (x, y) , dönüşüm yöntemine baz alınarak RGB LED'leri parlatmak için $[P_r, P_g, P_b]$ yoğunluk karşılıklarına çevrilir:

$$x = P_r \cdot X_I + P_g \cdot X_J + P_b \cdot X_K \quad (7.1)$$

$$y = P_r \cdot Y_I + P_g \cdot Y_J + P_b \cdot Y_K \quad (7.2)$$

$$P_T = P_r + P_g + P_b \quad (7.3)$$

Bura da, (X_I, Y_I) , (X_J, Y_J) , ve (X_K, Y_K) , kırmızı (şerit I), yeşil (şerit J) ve mavi (şerit K) renklere denk olan üç bölümün kromatiklik karşılıklarıdır. P_T ise ortalama sembol enerjisi E_s ya da ortalama bit enerjisi E_b 'den oluşabilecek mevcut yoğunluktur.

Sonuçta bulunan yoğunluk değerleri, RGB yoğunluk uzayı benzeri sinyal uzayında bir 3D sembolü $S_l = [P_r, P_g, P_b]$ ($0 \leq l \leq M - 1$)'yi oluşturur. Sonra Lazy dalgacığını kullanan ILWT bloğunda M-CSK modülatörü ile modüle edilen datalara aşağıdaki eşitlik yardımıyla ters Lifting dalgacık dönüşümü uygulanarak yayılır.

$$Tx_{ILWT}[k] = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{N-1} x^n[z] 2^{\frac{n}{2}} \varphi[2^n k - z] \quad (7.4)$$

Burada, $x^n[z]$ modüle edilmiş veriyi ve $\varphi[k]$ z-dereceli alt taşıyıcı için dalgacık fonksiyonunu göstermektedir.

ILWT Ünitesi çıkışında veriler O-OFDM Modülatör Bloğunda alt taşıyıcı eşlemesi yapıp istenilen O-OFDM dalga formu (ACO-OFDM, DCO-OFDM, Flip-OFDM etc.) bilgi paketleri üretilir.

Led için uygun hale getirilen O-OFDM dalga formu bilgi paketleri LED'ler ile çok yönlü sönümlmeli optik kanal vasıtası ile karşıya geçirilip toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) ile distorsiyon etkisine bırakılır ve karşı kısma gelir. Alıcı tarafta verici tarafındaki işlemlerin tersi yapılarak, O-OFDM De-Modulator kısmında, alıcıya gelen bozulmuş veri sinyalleri yaygın denkleştirme tekniklikleri kullanılarak pürüzsüzleştirildikten sonra çözülür. Çözülünen sembollere Lazy dalgacığını kullanan LWT bloğunda aşağıdaki eşitlik yardımıyla LWT işlemi uygulanır.

$$Rx_{LWT}^z[k] = \sum_{n=0}^{N-1} xu[n] 2^{\frac{k}{2}} \varphi[2^k n - z], \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad z = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (7.5)$$

Burada, $xu[n]$ denkleştirici çıkışındaki çözümlenen verileri göstermektedir. LWT bloğu çıkışında ters yayma işlemi gerçekleştirilen veriler M-CSK De-Mapping Bloğunda foto diyot aracılığıyla optik/elektrik dönüşümünün devamında, üç renk yoğunluğu parçaları ön sezileri, $\hat{S} = [\hat{P}_r, \hat{P}_g, \hat{P}_b]$ 3D sinyal uzayında minimum Öklid aralığına baz alınarak demodüle işlemi uygulanır. Son olarak $\bar{S}$ kestirimi (6) nolu denklemdeki gibi türetilbilir:

$$\bar{S} = \arg \min_{S_l \in A} \|\hat{S} - S_l\| \quad (7.6)$$

Bu kısımda, A 3D sinyal uzayında M seviyeli CSK verilerinin temelini belirtir. Devamında (x, y) kromatik koordinatlarına çevrilen bilgi sinyallerinin kodu çözümlenerek ikili ayrılma bitleri ters bağlaşım yöntemiyle $\bar{S}$ 'den yeniden oluşturulabilir. Devamında de-modüle edilen datalar kullanılarak ölçülmek istenilen performans sonuçları hesaplanır. Bölüm 8 de önerilen dalga formlarının bilgisayar benzetim sonuçları incelenecektir.

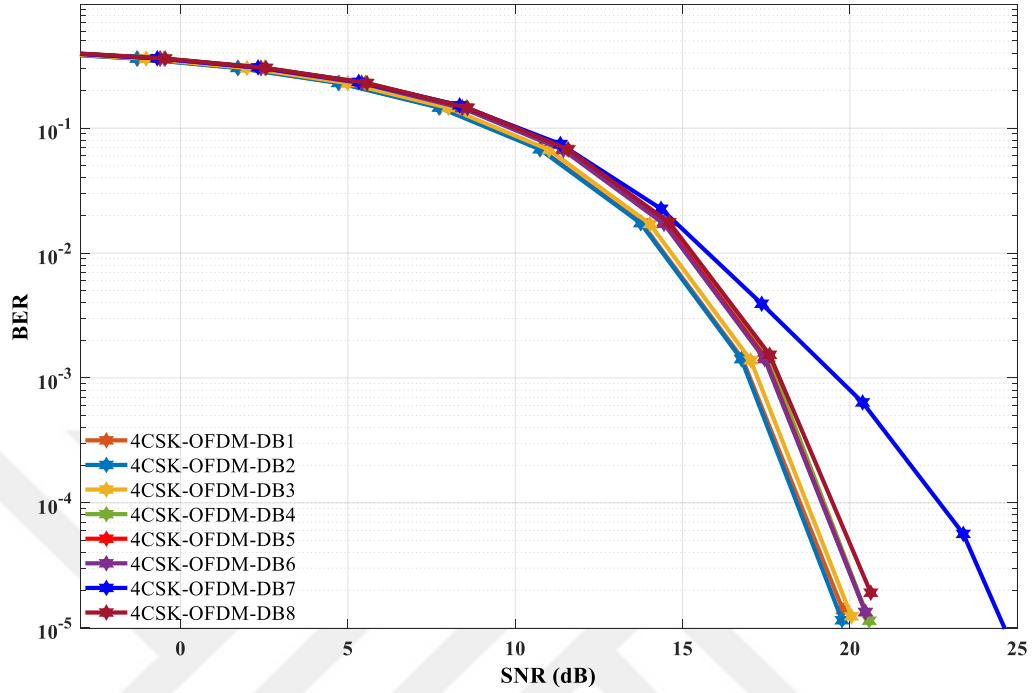
8.BÖLÜM: BİLGİSAYAR BENZETİM SONUÇLARI

Tezin bu bölümünde önerilen yöntemin bilgisayar benzetim sonuçları ve bu sonuçların yorumlanması yer almaktadır. Bilgisayar benzetim sonuçları 3 bölümde incelenmektedir. İlk bölümde benzetim sonuçlarının AWGN kanal ortamında, farklı dalgacık ailelerinin BER-SNR grafikleri verilmektedir. İkinci kısımda AWGN kanal ortamında önerilen dalga formlarının bit hata oranı-işaret gürültü oranı (BER-SNR) simülasyonları ve son kısımda da tepe ortalama güç oranı (PAPR) simülasyonları yapılmaktadır. Tüm simülasyonlarda M-CSK ve M-QAM modülasyonlarının kullanıldığı tezde sunulan dalga formları ile VLC-OFDM ve O-OFDM dalga formları kıyaslanmaktadır. DCO-OFDM dalga formunda 255 alt taşıyıcı, 7 dB'lik DC ön-gerilim ekleme ve 512 noktalı FFT, ACO-OFDM dalga formunda 256 alt taşıyıcı ve 1024 noktalı FFT, Flip-OFDM dalga formunda 255 alt taşıyıcı ve 512 noktalı FFT ve klasik VLC-OFDM dalga formunda da 192 alt taşıyıcı, 256 noktalı FFT ve DC seviye ekleme kullanılmıştır. Bahsedilen grafiklerin tümünde incelenen sistemlerin paket sayısı 1000 ve 1000 Monte-Carlo döngüsünde elde edilmiş olup bütün sonuçlar adil bir şekilde kıyaslanmıştır.

8.1 Dalgacık Ailelerinin AWGN Kanal Sonuçları

Tezin bu bölümüne M-CSK modülasyonu kullanılarak M-CSK-OFDM şemasında farklı dalgacık aileleri ile AWGN kanalda BER-SNR başarımları belirlenmektedir. Simülasyonlar 1000 Monte Carlo döngüsü kullanılarak tezde sunumu gerçekleştirilen tekniklerin 1000 sembol çerçevesi ile klasik VLC-OFDM dalga formunda da 48 alt taşıyıcı, 64 noktalı FFT, DC seviye ekleme ve 4-CSK modülasyonu kullanılarak elde edilmiştir.

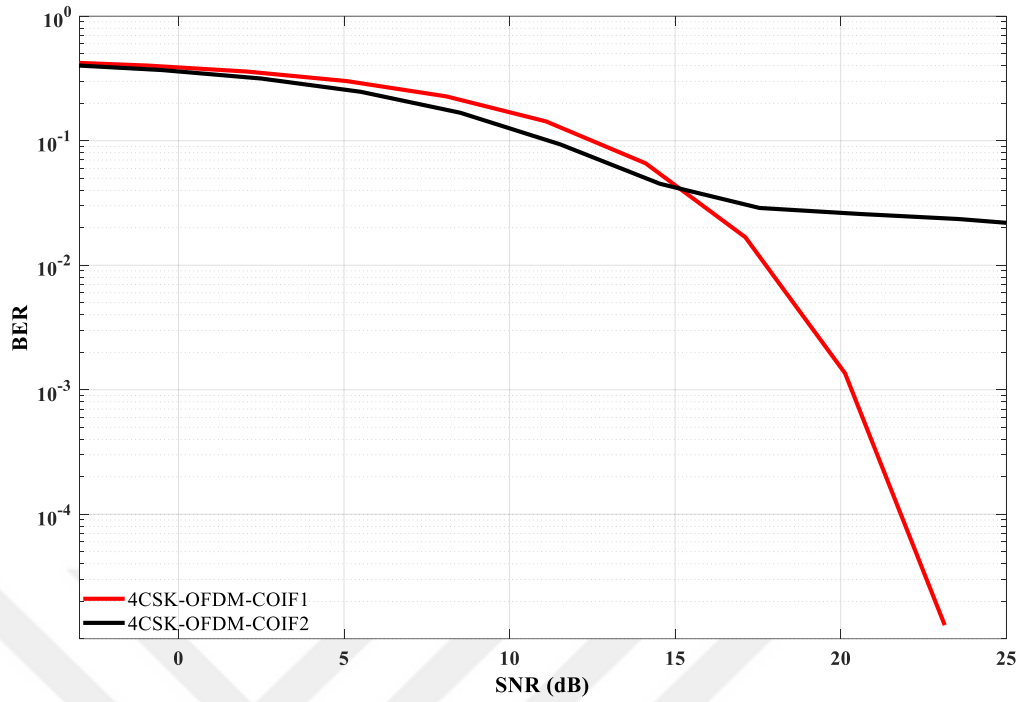
Şekil 8.1’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için db dalgacık ailesi kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.1 AWGN kanal ortamında 4-CSK modülasyonlu db dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği

Şekil 8.1’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda db dalgacık ailesi kullanılarak ortaya çıkan sonuçta 10^{-4} BER seviyesi için 4CSK-OFDM-OFDM-DB2, 4CSK-OFDM-DB7’den yaklaşık olarak 5dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca 10^{-4} BER seviyesi için kullanılan dalgacık ailesinde db1 ve db3’ün db2 ile yakın benzer performanslara sahip olduğu, görülmektedir.

Şekil 8.2’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için coif dalgacık ailesi kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.

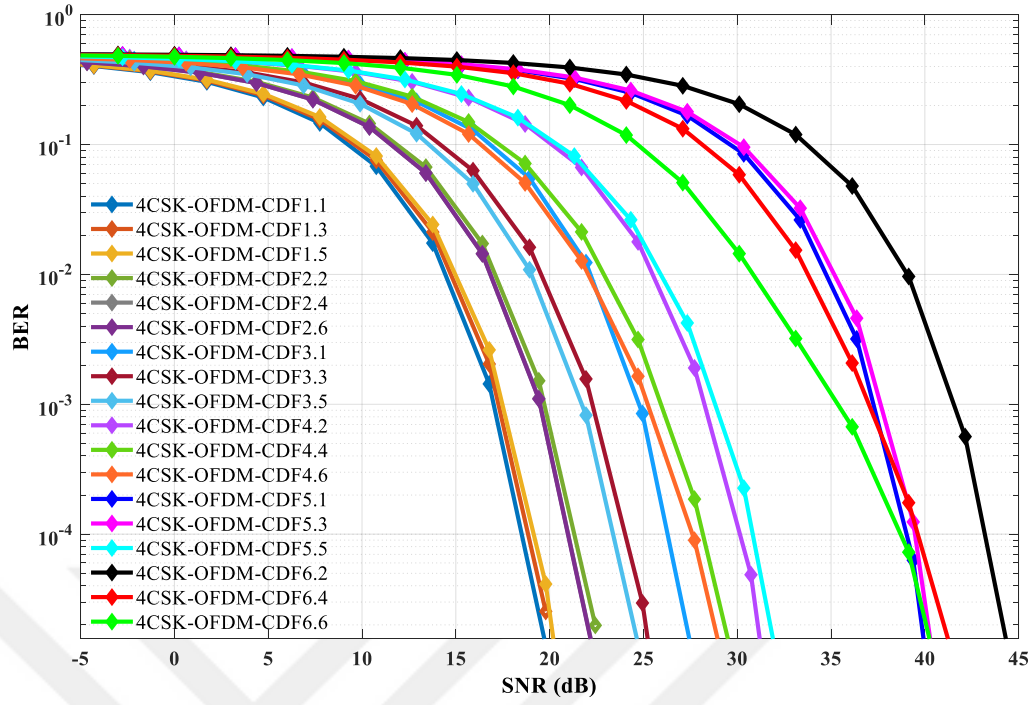


Şekil 8.2 AWGN kanal ortamında 4-CSK modülasyonlu coif dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği

Şekil 8.2’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda coif dalgacık ailesi kullanılarak ortaya çıkan sonuçta 10^{-2} BER seviyelerine gelmeden 4CSK-OFDM-OFDM-COIF2 hata tabanında kalırken 4CSK-OFDM-COIF1 dalga formu daha stabil düzgün bir sonuç ortaya koymaktadır.

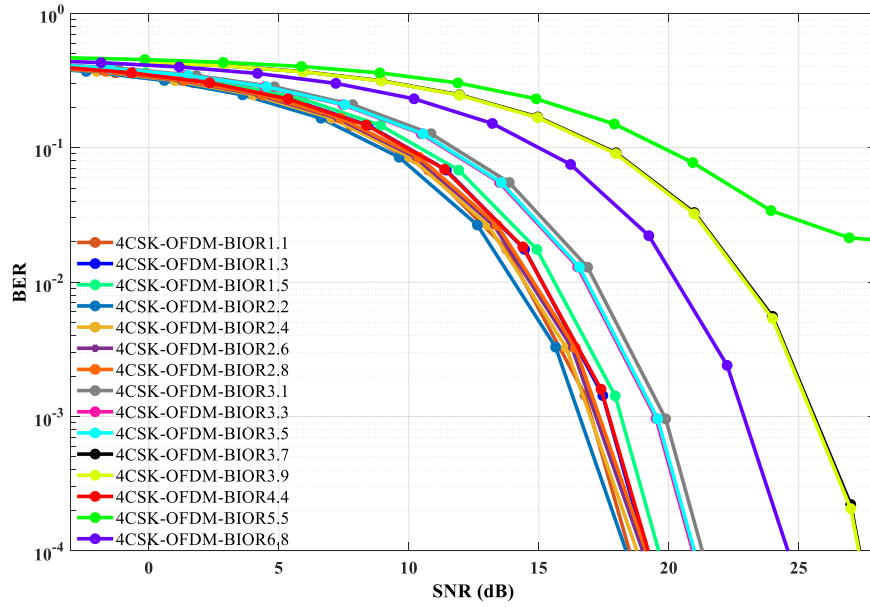
Şekil 8.3’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için CDF dalgacık ailesi kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.

Şekil 8.3’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda cdf dalgacık ailesi kullanılarak ortaya çıkan sonuçta 10^{-4} BER seviyesi için 4CSK-OFDM-CDF1.1, 4CSK-OFDM-CDF6.2’den yaklaşık olarak 26dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca 10^{-3} BER seviyesi için kullanılan dalgacık ailesinde cdf1.1’in cdf1.3 ve cdf1.5 ile yakın benzer performanslara sahip olduğu, cdf6.2 dalgacığının ise en kötü performansı sergilediği görülmektedir.



Şekil 8.3 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda CDF dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği

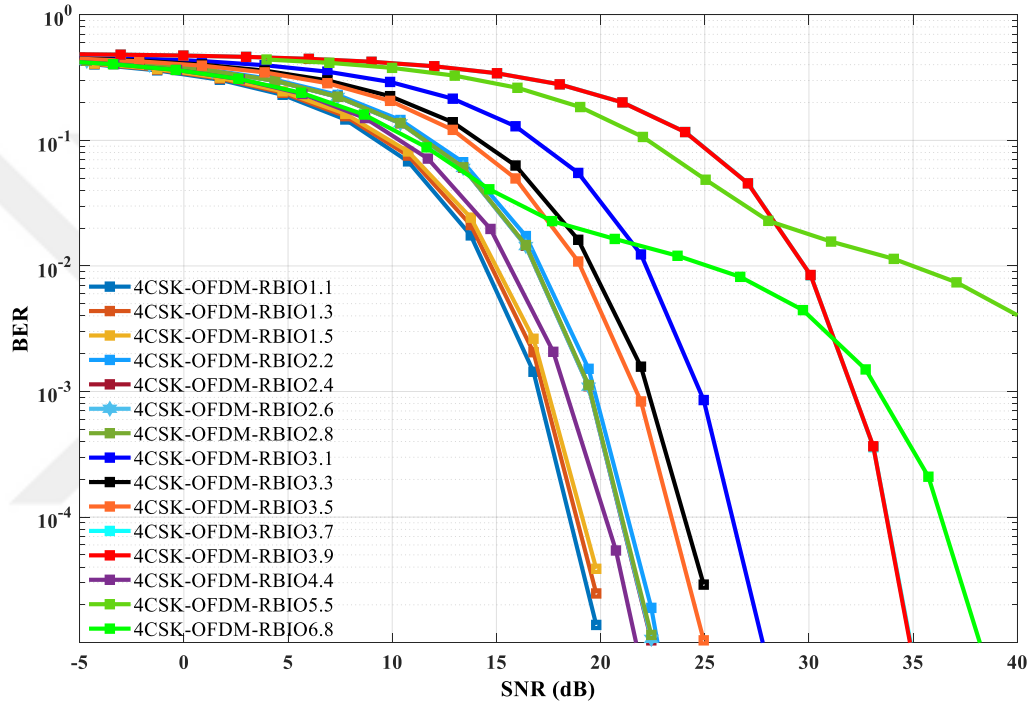
Şekil 8.4’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için bior dalgacık ailesi kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.4 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda bior dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği

Şekil 8.4’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda bior dalgacık ailesi kullanılarak ortaya çıkan sonuçta $1E-3$ BER seviyesi için 4CSK-OFDM-BIOR2.2, 4CSK-OFDM-BIOR3.7’den yaklaşık olarak 9dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca $1E-2$ BER seviyelerine gelmeden 4CSK-OFDM-BIOR6.2 hata tabanında kaldığı ve en kötü performansı sergilediği görülmektedir.

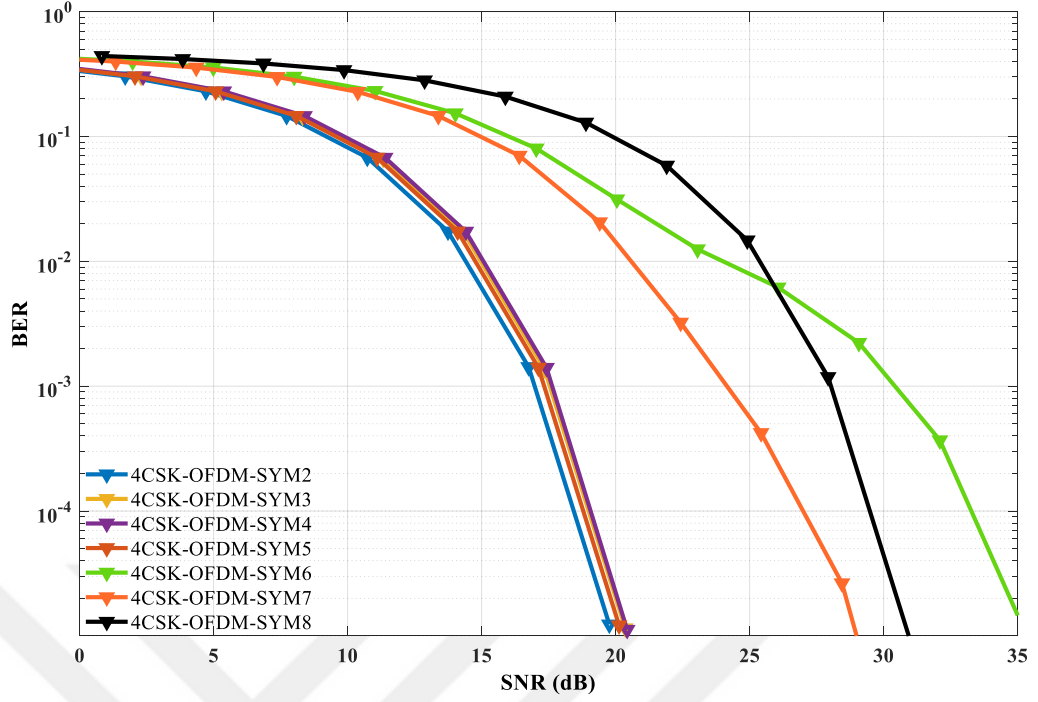
Şekil 8.5’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için rbio dalgacık ailesi kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.5 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda rbio dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği

Şekil 8.5’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda rbio dalgacık ailesi kullanılarak ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için 4CSK-OFDM-RBIO1.1, 4CSK-OFDM-RBIO3.1’den yaklaşık olarak 19dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca $1E-3$ BER seviyelerine gelmeden 4CSK-OFDM-RBIO5.5 hata tabanında kaldığı ve en kötü performansı sergilediği görülmektedir.

Şekil 8.6’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için sym dalgacık ailesi kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.

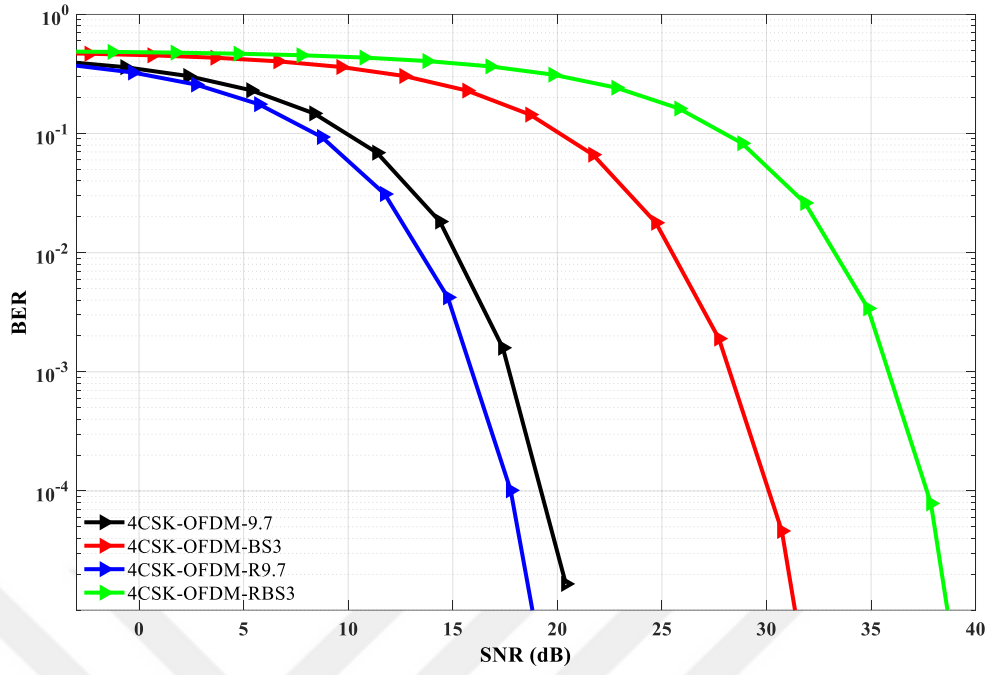


Şekil 8.6 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda sym dalgacık ailesinin BER-SNR grafiği

Şekil 8.6’da görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda sym dalgacık ailesi kullanılarak ortaya çıkan sonuçta 1E-4 BER seviyesi için 4CSK-OFDM-SYM2, 4CSK-OFDM-SYM6’dan yaklaşık olarak 15dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca 1E-3 BER seviyesi için kullanılan dalgacık ailesinde sym2’in sym3 ve sym4 ile yakın benzer performanslara sahip olduğu, sym6 dalgacığının ise en kötü performansı sergilediği görülmektedir.

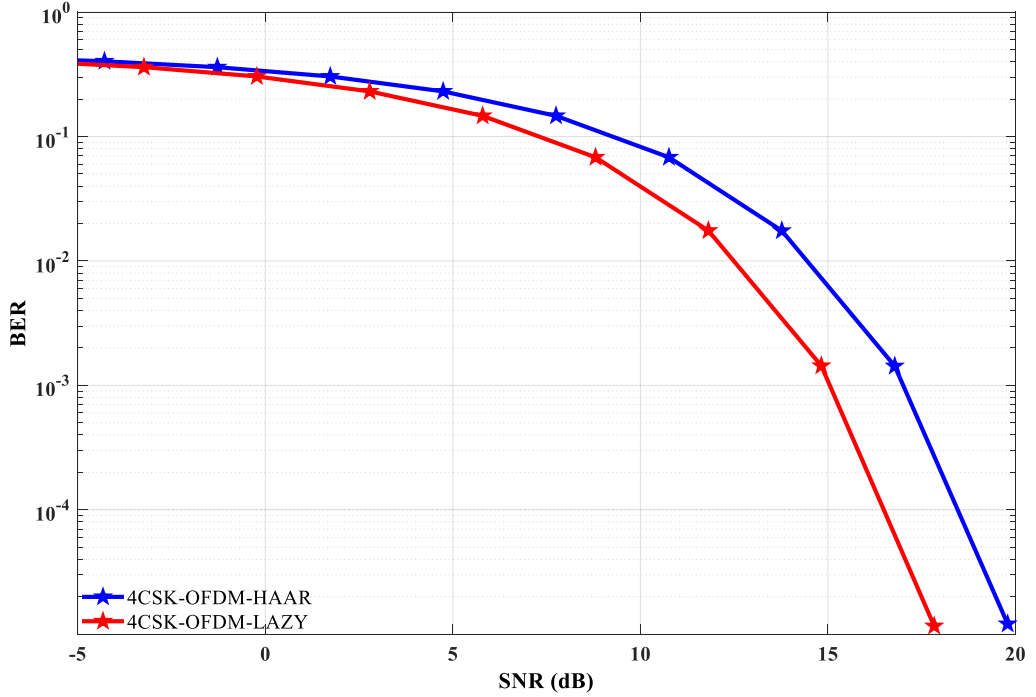
Şekil 8.7’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için 9.7, r9.7,bs3 ve rbs3 dalgacıklarını kullanarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.

Şekil 8.7’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda ilgili dalgacıklar kullanılarak ortaya çıkan sonuçta 1E-4 BER seviyesi için 4CSK-OFDM-9.7, 4CSK-OFDM-RBS3’den yaklaşık olarak 20dB daha iyi sonuç vermiştir.



Şekil 8.7 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda 9.7, r9.7,bs3 ve rbs3 dalgacıklarının BER-SNR grafiği

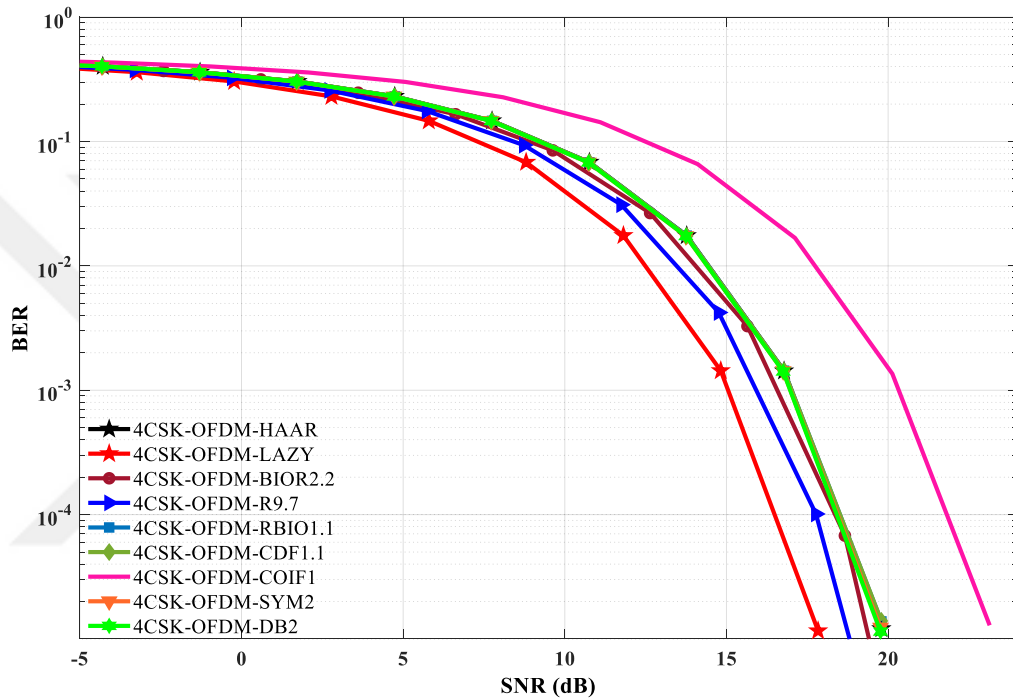
Şekil 8.8’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için haar ve lazy dalgacıklarını kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.8 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda haar ve lazy dalgacıklarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.8’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda ilgili dalgacıklar kullanılarak ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için 4CSK-OFDM-LAZY, 4CSK-OFDM-HAAR’dan yaklaşık olarak 2dB daha iyi sonuç vermiştir.

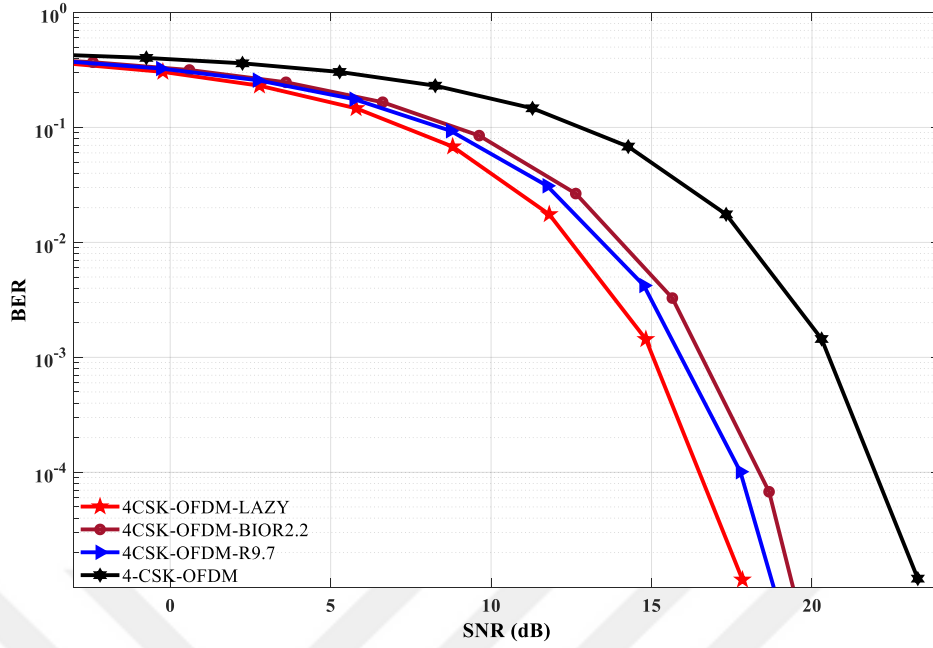
Şekil 8.9’de 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için yukarıda kullanılan dalgacık ailelerinin aralarında en iyi olanları kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.9 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda dalgacık aileleri arasında en iyi dalgacıkların BER-SNR grafiği

Şekil 8.9’da görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda ilgili dalgacıklar kullanılarak ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için 4CSK-OFDM-LAZY, 4CSK-OFDM-COIF1’den yaklaşık olarak 6dB daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca $1E-4$ BER seviyesi için kullanılan dalgacıklarda haar, bior2.2, rbio1.1, cdf1.1, sym2 ve db2’nin benzer performanslara sahip olduğu, coif1 dalgacığının ise en kötü performansı sergilediği görülmektedir.

Şekil 8.10’da 4CSK-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK modülasyonu için hem klasik sistemde hem de yukarıdaki grafikte en iyi sonuçları veren 3 adet dalgacık kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.10 AWGN kanal 4-CSK modülasyonunda hem klasik sistemin hem de dalgacıklar arasındaki en iyi dalgacıkların BER-SNR grafiği

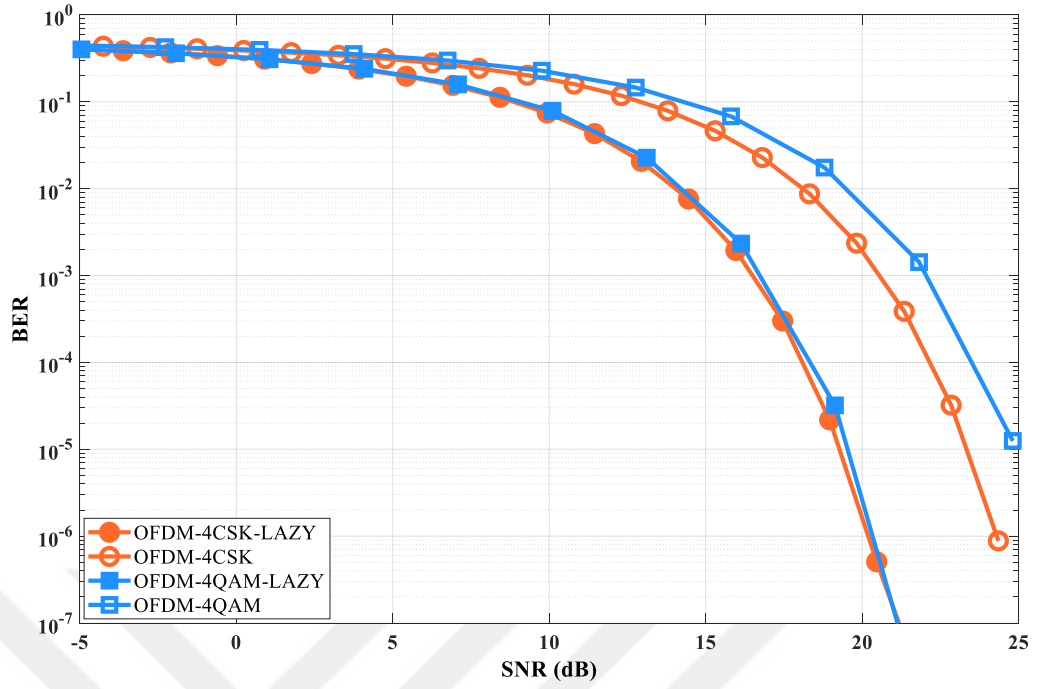
Şekil 8.10’da görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-CSK modülasyonunda ilgili dalgacıklar kullanılarak ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için 4CSK-OFDM-LAZY, 4CSK-OFDM’den yaklaşık olarak 5dB daha iyi sonuç vermiştir.

Bölüm 8.2 de en iyi performansı veren lazy dalgacığının kullanılması uygun görülmüştür. Diğer bölümlerde ilgili dalgacığın optik OFDM sistemleri üzerinden performansı karşılaştırılacaktır.

8.2 LAZY Dalgacığının AWGN Kanal Sonuçları

Tezin bu bölümünde yapılan benzetimler bölüm 8.1 de dalgacık aileleri arasında en iyi sonucu veren lazy dalgacığı kullanılarak AWGN kanal ortamında yapılmıştır. M-CSK ve M-QAM modülasyonlarının uygulandığı klasik VLC-OFDM, O-OFDM ve önerilen dalga formlarının AWGN kanalda BER-SNR başarımlarını ölçütü kıyaslanmaktadır. Simülasyonlar 1000 Monte Carlo çevrimi kullanılarak tezde sunulan metotların 1000 veri paketi ile 4-CSK, 4-QAM, 8-CSK, 8-QAM, 16-CSK ve 16-QAM modülasyonları uygulanarak oluşturulmuştur.

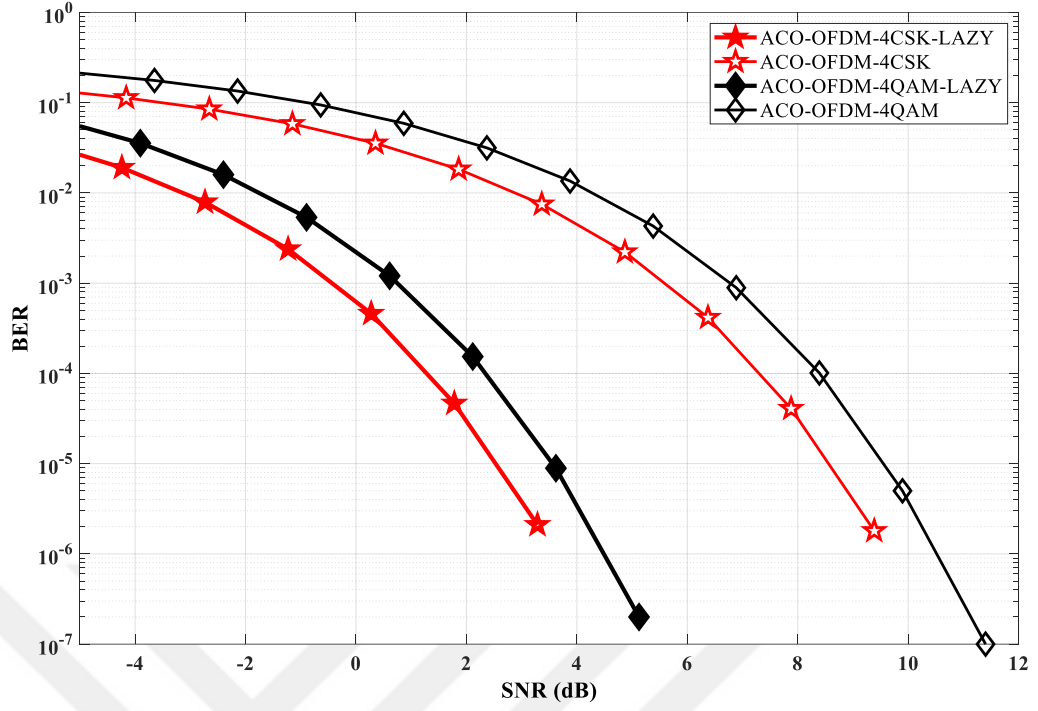
Şekil 8.11’de VLC-OFDM’in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.11 AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.11’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta 10^{-4} BER seviyesi için VLC-OFDM-4QAM-LAZY, VLC-OFDM-4QAM’dan neredeyse 6dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca aynı işlem 4-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise 10^{-4} BER seviyesi için VLC-OFDM-4CSK-LAZY, VLC-OFDM-4CSK’den yaklaşık olarak aynı şekilde 5dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınır ise VLC-OFDM-4CSK-LAZY, VLC-OFDM-4QAM-LAZY’den biraz daha iyi performans verdiği gözlenmiştir.

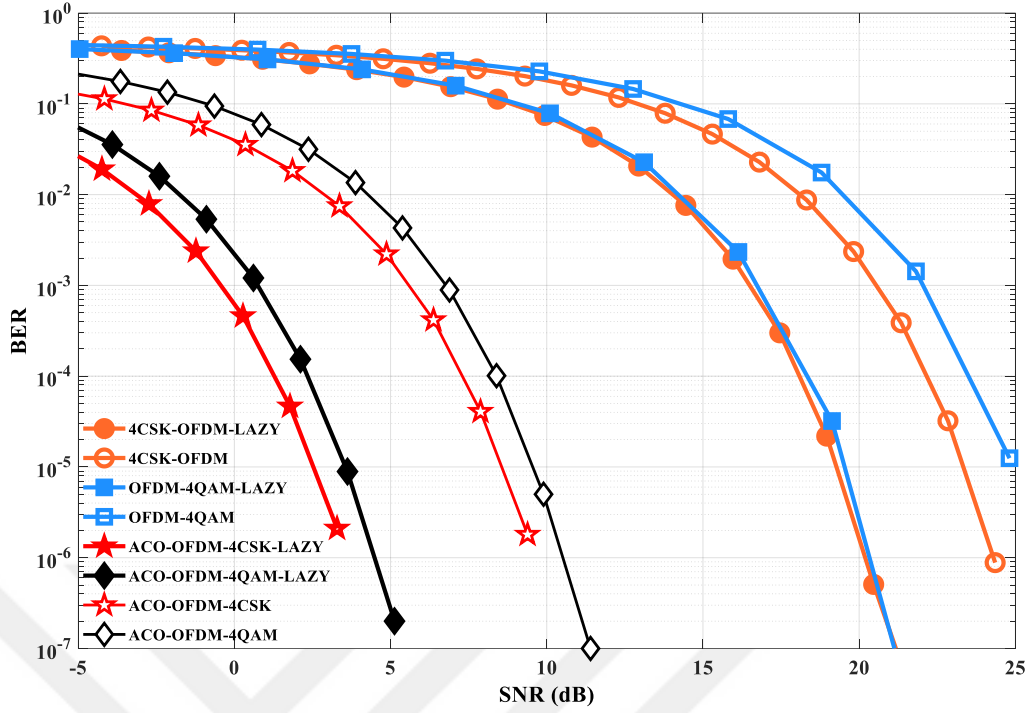
Şekil 8.12’de ACO-OFDM’in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.12 AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.12’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için ACO-OFDM-4QAM-LAZY, ACO-OFDM-4QAM’dan yaklaşık olarak 6dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca aynı işlem 4-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise $1E-4$ BER seviyesi için ACO-OFDM-4CSK-LAZY, ACO-OFDM-4CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınır ise ACO-OFDM-4CSK-LAZY, ACO-OFDM-4QAM-LAZY ‘den yaklaşık olarak 1dB daha performanslı olduğu gözlenmiştir.

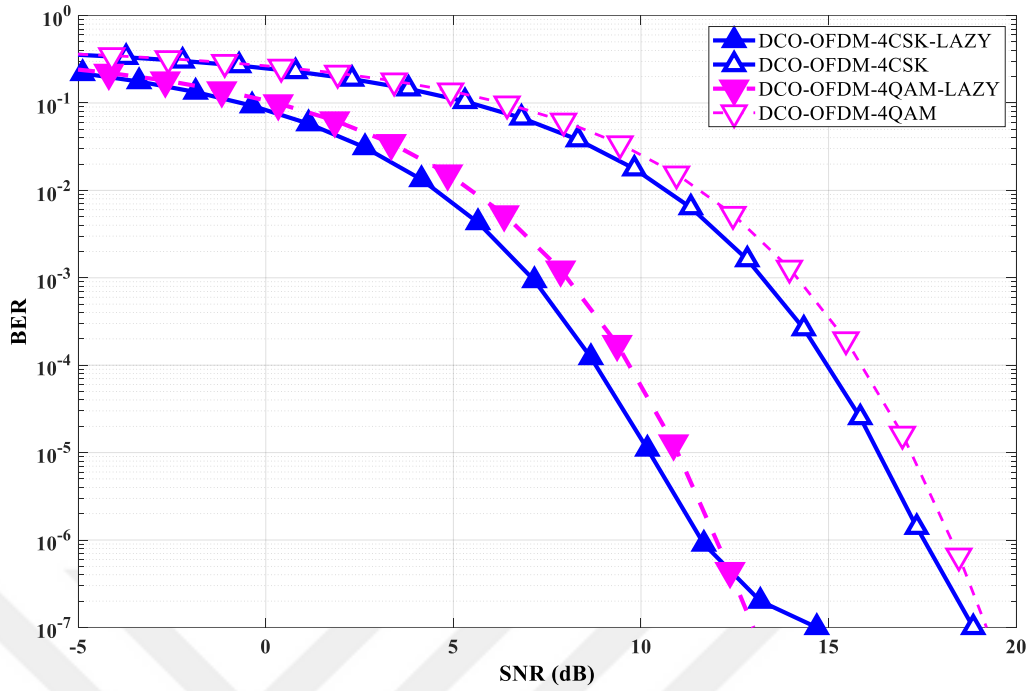
Şekil 8.13’de ACO-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.13 AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda ACO-OFDM ve VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.13 analiz edildiğinde, 4-CSK modülasyonunun 4-QAM modülasyonundan yaklaşık olarak 1 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da katkı sağladığı anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen yöntemle ACO-OFDM dalga formunda neredeyse 6 dB SNR kazancı sağlandığı şekilden yorumlanmaktadır. Öte yandan önerilen yöntemin geleneksel VLC-OFDM dalga formuna her iki modülasyonda da yaklaşık olarak aynı performansı sağladığı görülmektedir ve genel performanslar karşılaştırılacak olur ise ACO-OFDM-4CSK-LAZY, 4CSK-OFDM-LAZY den yaklaşık olarak 16dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

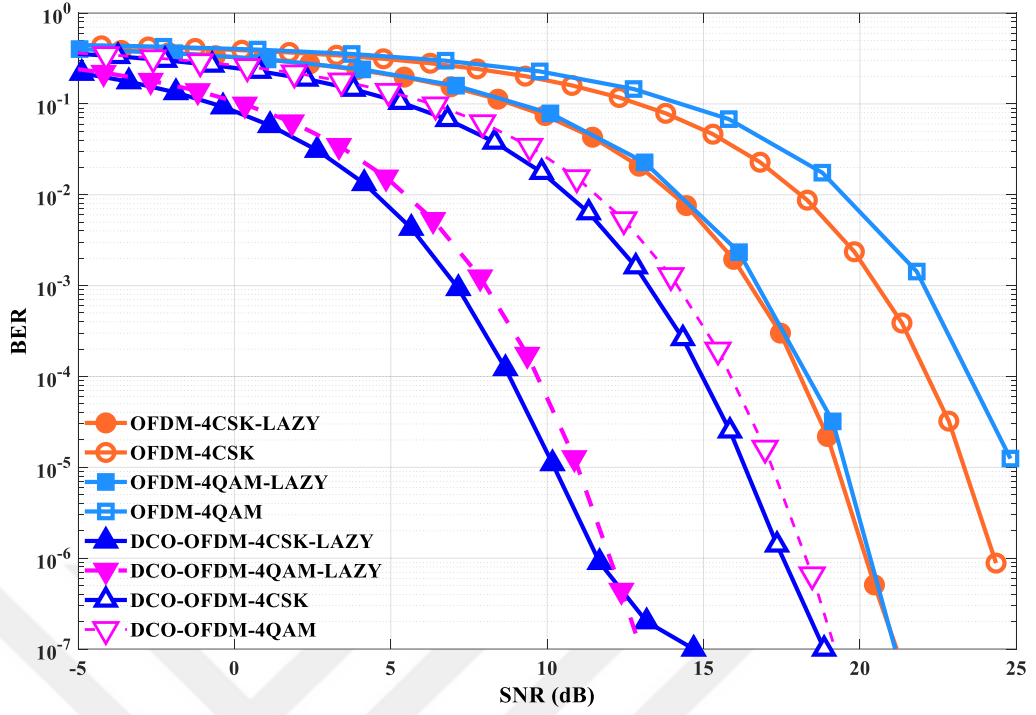
Şekil 8.14’de DCO-OFDM’in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.14 AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.14’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 7dB DC öngerilim uygulanarak 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta 1E-4 BER seviyesi için DCO-OFDM-4QAM-LAZY, DCO-OFDM-4QAM’dan yaklaşık olarak 6dB daha performanslı çıkmıştır. 4-CSK modülasyonu için LLWT dönüşümünün etkisi incelenecek olur ise 1E-4 BER seviyesi için DCO-OFDM-4CSK-LAZY, DCO-OFDM-4CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6dB daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. En iyi performanslar göz önüne alınacak ise DCO-OFDM-4CSK-LAZY, DCO-OFDM-4QAM-LAZY’dan yaklaşık olarak 1dB daha iyi performans verdiği gözlenmiştir.

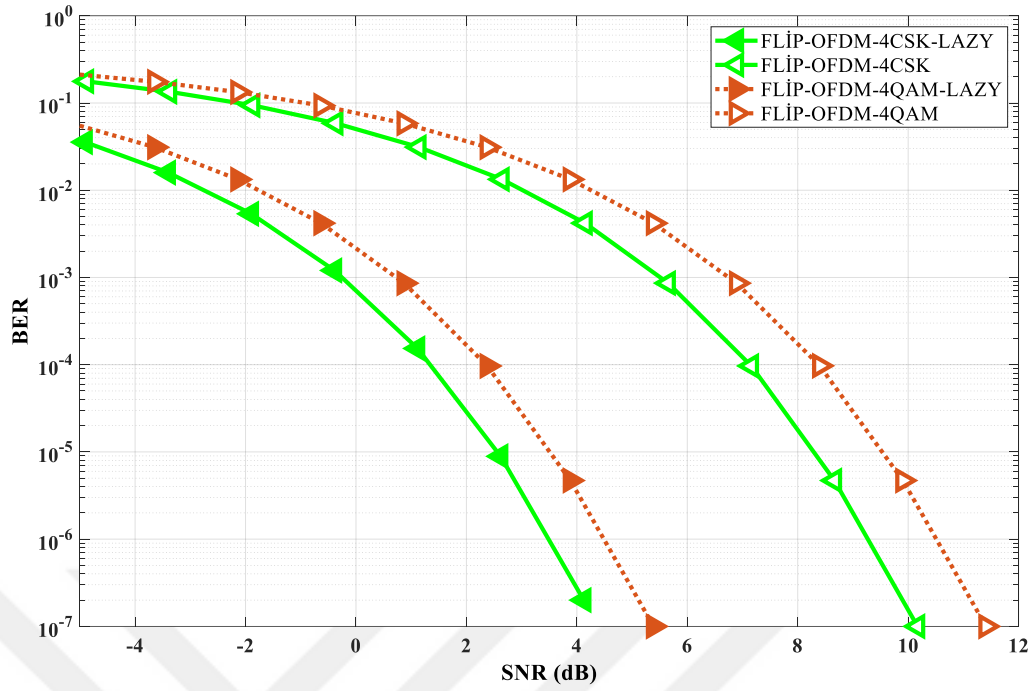
Şekil 8.15’de Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve klasik VLC-OFDM dalga formlarının 4-QAM ve 4-CSK modülasyonları için AWGN kanal BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmiştir. DCO-OFDM dalga formunda 7 dB’lik DC bias değeri kullanılmaktadır.



Şekil 8.15 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 4-CSK ve 4-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması

Şekil 8.15 incelendiğinde, ACO-OFDM dalga formunda olduğu gibi 4-CSK modülasyonunun 4-QAM modülasyonundan hemen hemen 1 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte tezde sunulan LLWT dönüşümünün DCO-OFDM dalga formuna da benzer katkıyı sağladığı anlaşılmaktadır. 1E-4 BER seviyesi için önerilen yöntemle DCO-OFDM dalga formunda neredeyse 6 dB SNR kazancı sağlandığı tespit edilmektedir. Genel performanslar karşılaştıracak olur ise DCO-OFDM-4CSK-LAZY, 4CSK-OFDM-LAZY'den yaklaşık olarak 9dB daha iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

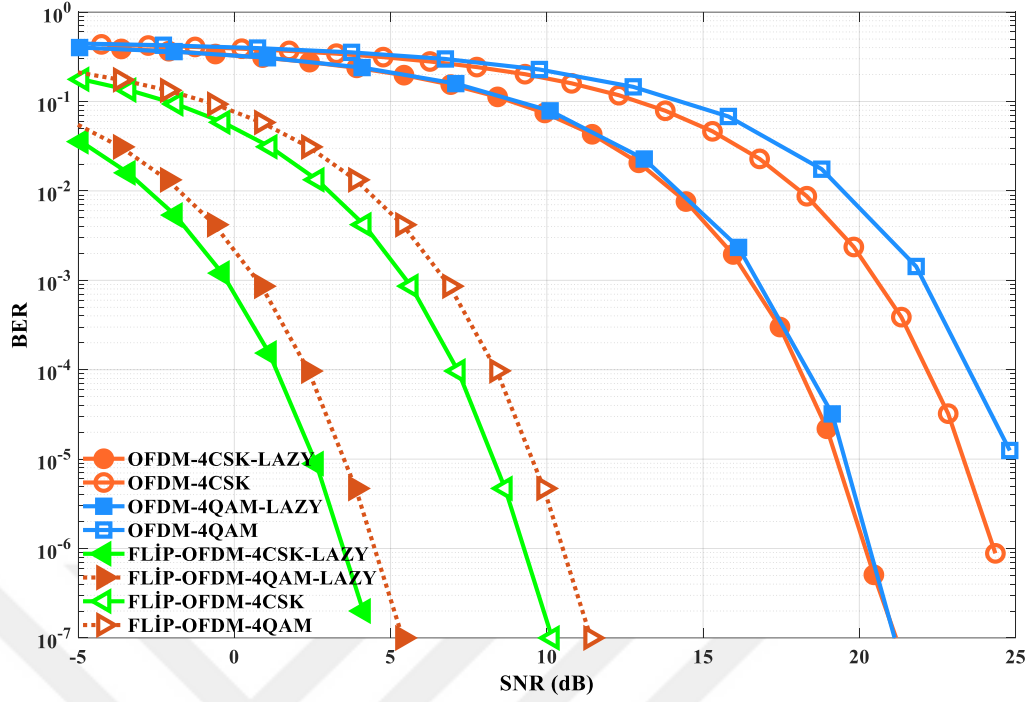
Şekil 8.16'de FLİP-OFDM'in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.16 AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.16’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta 1E-4 BER seviyesi için FLİP-OFDM-4QAM-LAZY, FLİP-OFDM-4QAM’dan yaklaşık olarak 6dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca aynı işlem 4-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise 1E-4 BER seviyesi için FLİP-OFDM-4CSK-LAZY, FLİP-OFDM-4CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınacak ise FLİP-OFDM-4CSK-LAZY, FLİP-OFDM-4QAM-LAZY’dan yaklaşık olarak 1dB daha performanslı olduğu gözlenmiştir.

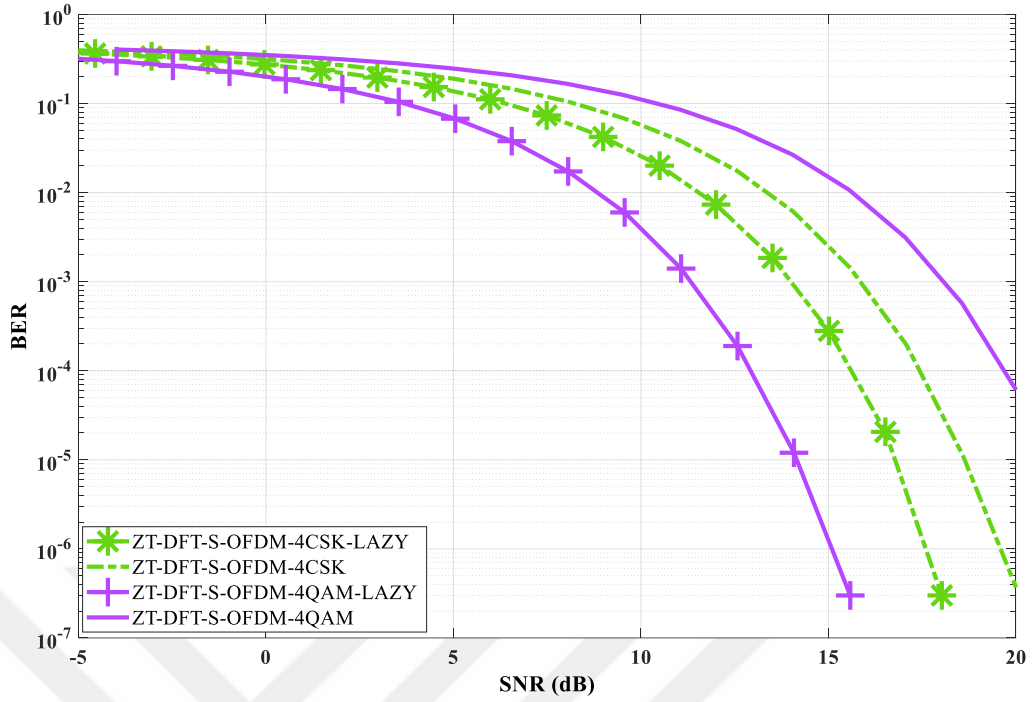
Şekil 8.17’de FLİP-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ile LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.17 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı FLİP-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 4-CSK ve 4-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması

Şekil 8.17 analiz edildiğinde, 4-CSK modülasyonunun 4-QAM modülasyonundan yaklaşık olarak 1 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da katkı sağladığı anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen yöntemle FLİP-OFDM dalga formunda neredeyse 6 dB SNR kazancı sağlandığı tespit edilmektedir. Öte yandan önerilen yöntemin ACO-OFDM dalga formuna her iki modülasyonda da yaklaşık olarak aynı performansı sağladığı görülmektedir. Genel olarak performanslar karşılaştıracak olur ise FLİP-OFDM-4CSK-LAZY, 4CSK-OFDM-LAZY'den yaklaşık olarak 16dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

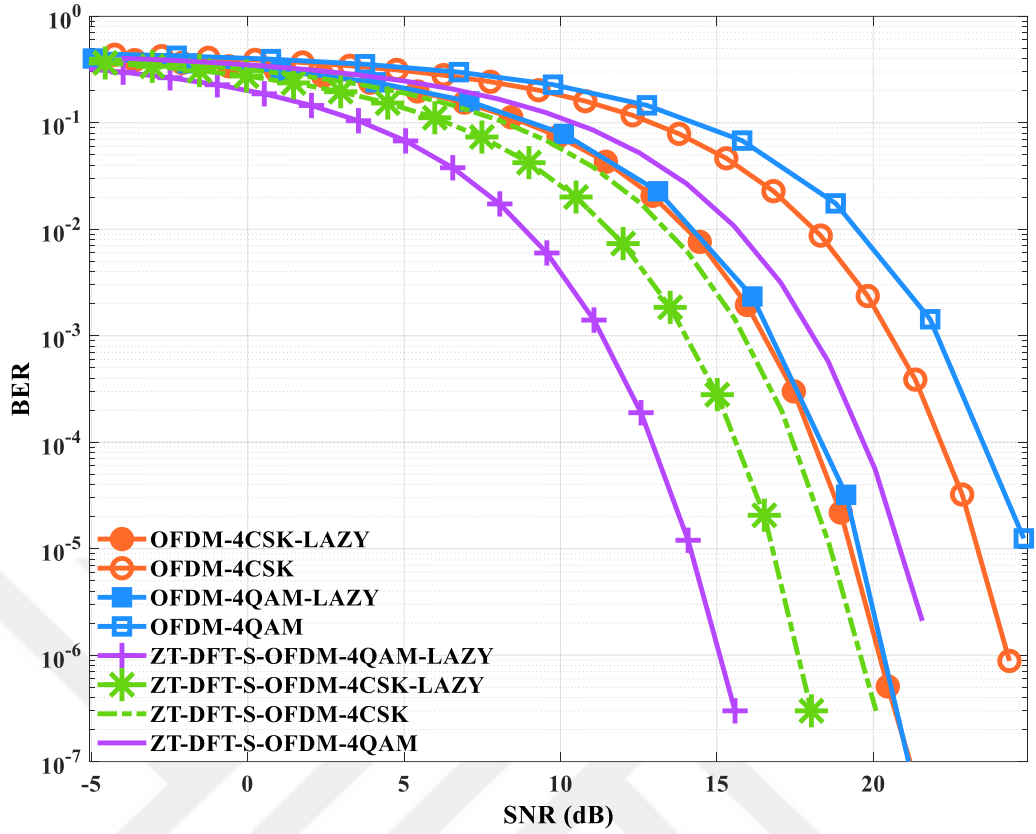
Şekil 8.18'de ZT-DFT-S-OFDM'in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.18 AWGN kanal 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.18’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için ZT-DFT-S-OFDM-4QAM-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-4QAM’dan yaklaşık olarak 7dB daha performanslı çıkmıştır. Ayrıca aynı işlem 4-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise $1E-4$ BER seviyesi için ZT-DFT-S-OFDM-4CSK-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-4CSK’den yaklaşık olarak 3dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınacak diğer optik OFDM sistemlere nazaran ZT-DFT-S-OFDM-4QAM-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-4CSK-LAZY’den yaklaşık olarak 3dB daha iyi performans verdiği gözlenmiştir.

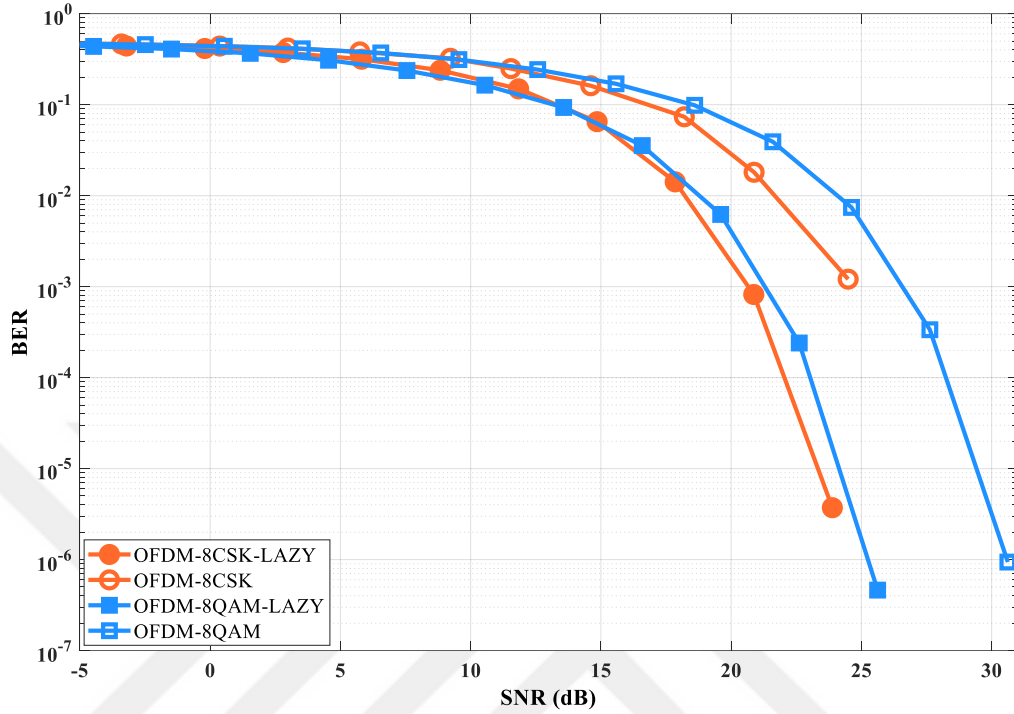
Şekil 8.19’de ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN ortamında 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.19 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 4-CSK ve 4-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması

Şekil 8.19 analiz edildiğinde, LLWT dönüşümü ile uygulanan 4-CSK modülasyonunun 4-QAM modülasyonundan daha kötü performans sağladığı fakat klasik sistemde ise daha iyi performans verdiği ZT-DFT-S-OFDM dalga formunda gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da az da olsa katkı sağladığı anlaşılmaktadır. $1E-4$ BER seviyesi için önerilen yöntemle ZT-DFT-S-OFDM dalga formunda hemen hemen 2 dB SNR kazancı sağlandığı tespit edilmektedir. Genel olarak performanslar karşılaştırılacak olur ise ZT-DFT-S-OFDM-4CSK-LAZY, 4CSK-OFDM-LAZY den yaklaşık olarak 3dB daha iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir. En iyi performansı sağlayan ZT-DFT-S-OFDM-4QAM-LAZY, 4QAM-OFDM-LAZY'den $1E-4$ BER seviyesi için 8dB kazanç sağladığı gözlenmektedir.

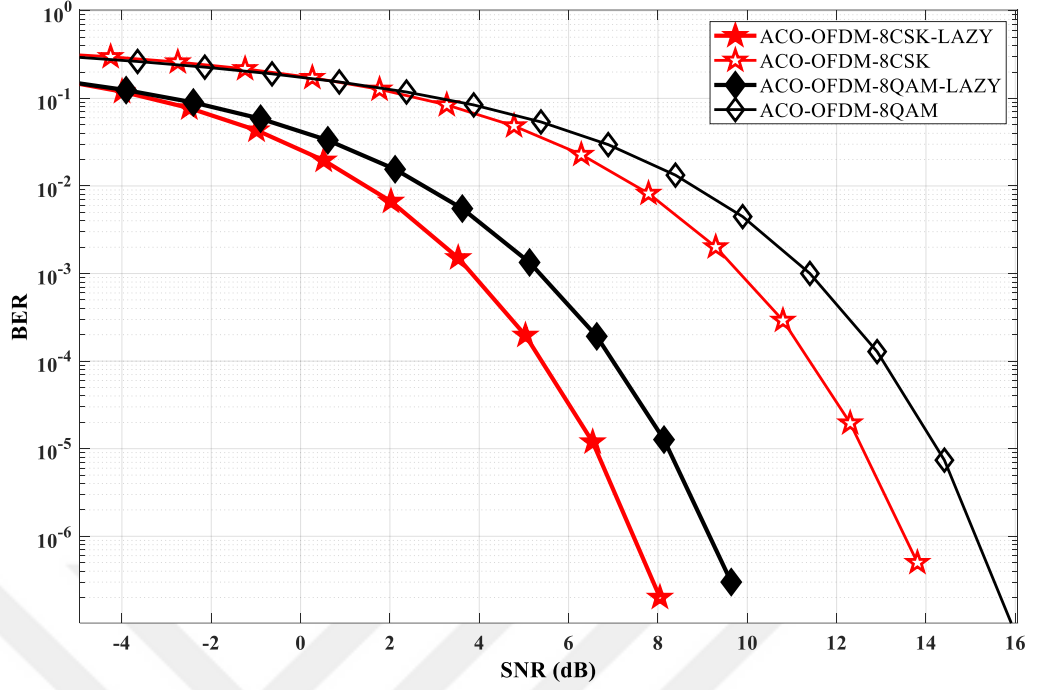
Şekil 8.20’de VLC-OFDM’in AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.20 AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.20’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için VLC-OFDM-8QAM-LAZY, VLC-OFDM-8QAM’dan neredeyse 5dB iyi performanslı çıkmıştır. Ayrıca aynı işlem 8-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise $1E-3$ BER seviyesi için VLC-OFDM-8CSK-LAZY, VLC-OFDM-8CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 5dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınacak ise VLC-OFDM-8CSK-LAZY, VLC-OFDM-8QAM-LAZY’den biraz daha iyi performans verdiği gözlenmiştir.

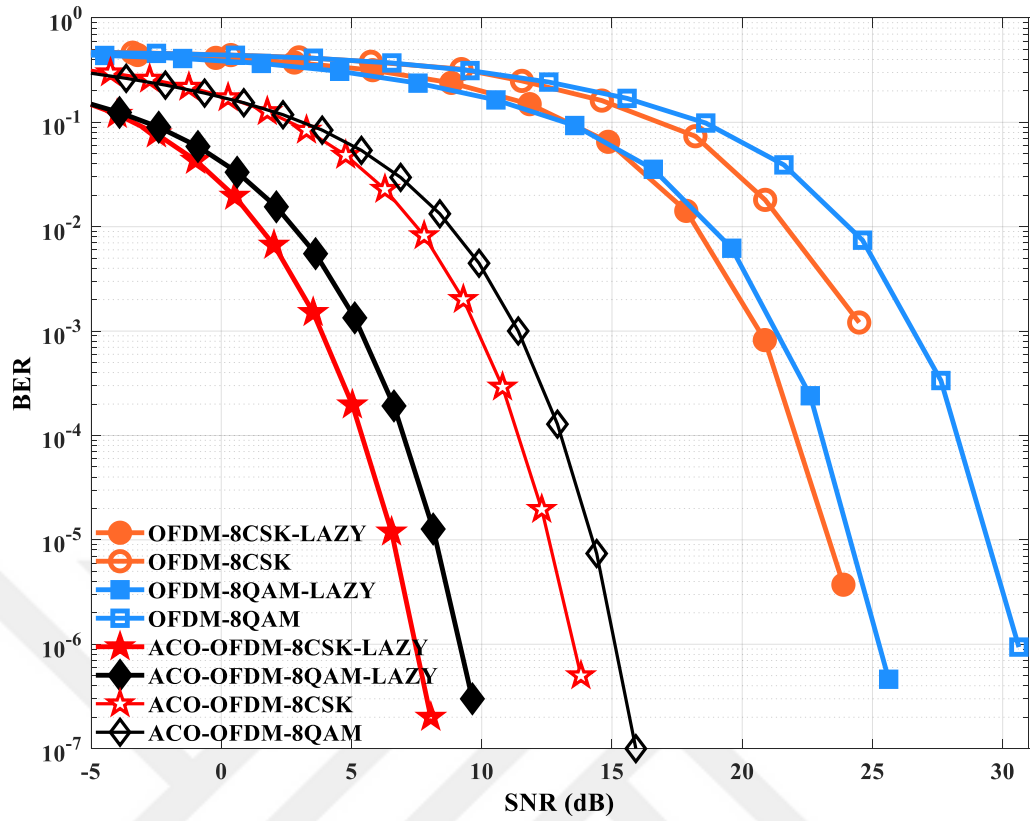
Şekil 8.21’de ACO-OFDM’in AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.21 AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.21’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta 1E-6 BER seviyesi için ACO-OFDM-8QAM-LAZY, ACO-OFDM-8QAM’dan yaklaşık olarak 6dB daha performanslı çıkmıştır. 8-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise 1E-6 BER seviyesi için ACO-OFDM-8CSK-LAZY, ACO-OFDM-8CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınır ise ACO-OFDM-8CSK-LAZY, ACO-OFDM-8QAM-LAZY’dan yaklaşık olarak 2dB daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

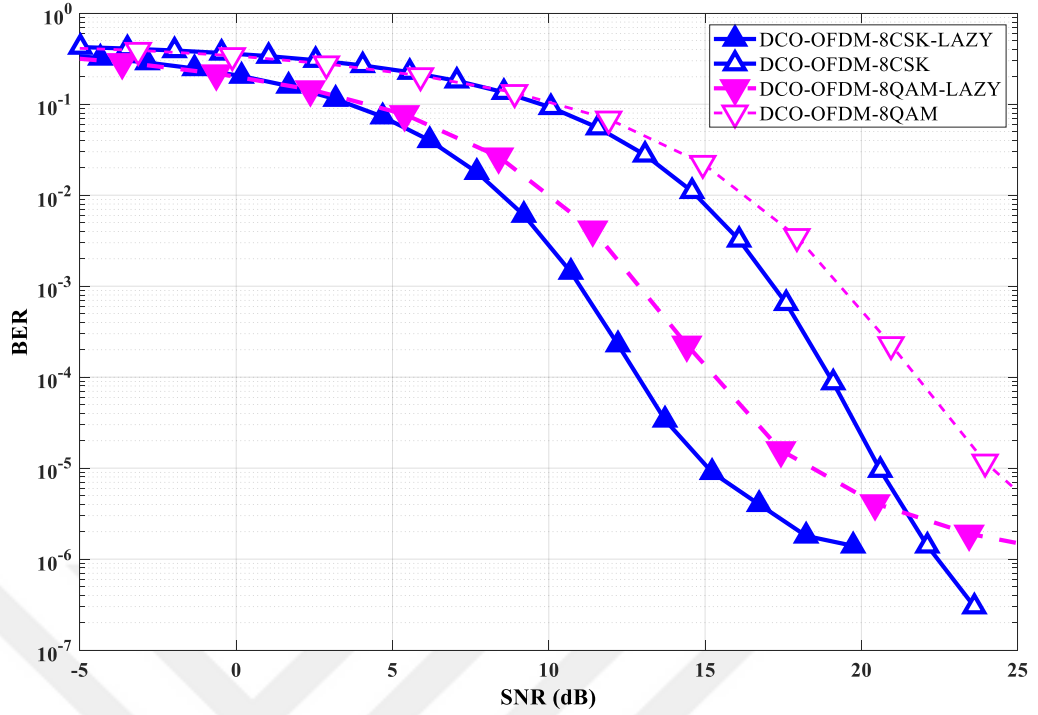
Şekil 8.22’de ACO-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.22 AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda ACO-OFDM ve VLC OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.22 analiz edildiğinde, ACO-OFDM dalga formunda 8-CSK modülasyonunun 8-QAM modülasyonundan neredeyse 2 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da katkı sağladığı anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen yöntemle ACO-OFDM dalga formunda neredeyse 6.5 dB SNR kazancı sağlandığı grafikten okunmaktadır. Öte yandan önerilen yöntemin klasik VLC-OFDM dalga formuna her iki modülasyonda da yaklaşık olarak aynı performansı sağladığı görülmektedir ve genel performanslar karşılaştırılacak olur ise ACO-OFDM-8CSK-LAZY, 8CSK-OFDM-LAZY den yaklaşık olarak 17.5 dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

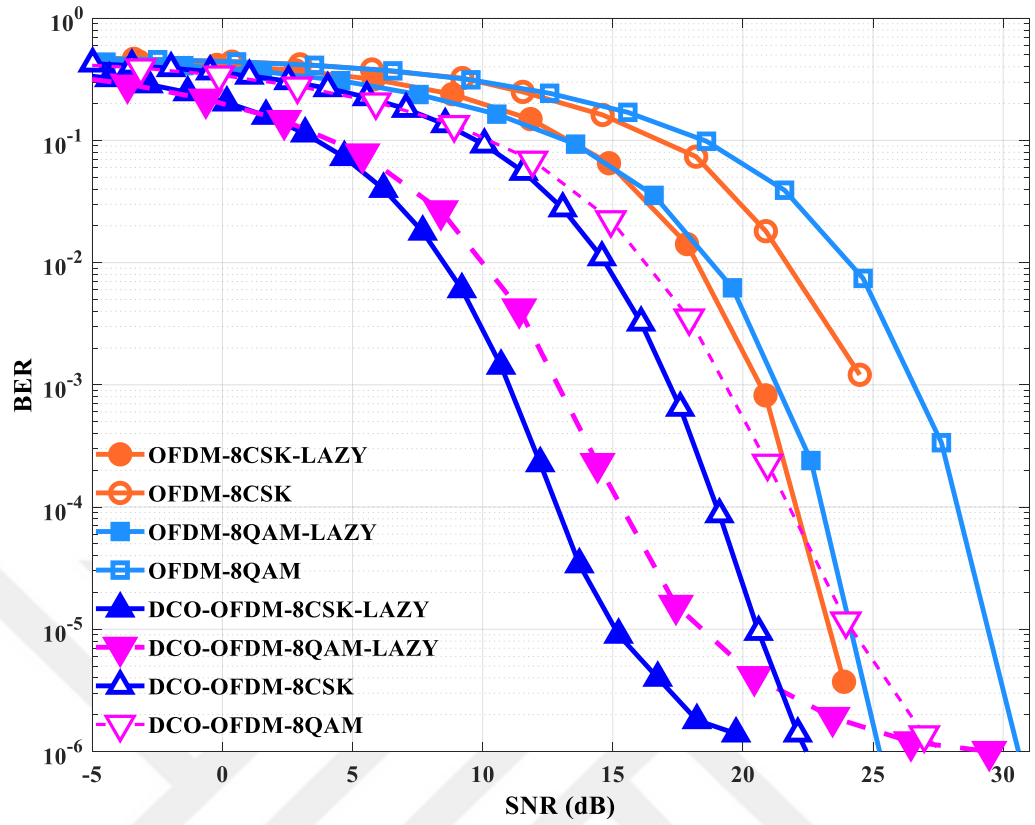
Şekil 8.23’de DCO-OFDM’in AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.23 AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.23’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 7dB DC bias uygulanarak 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için DCO-OFDM-8QAM-LAZY, DCO-OFDM-8QAM’dan yaklaşık olarak 6dB daha performanslı çıkmıştır. 8-CSK modülasyonu için LLWT dönüşümünün etkisi incelenecek olur ise $1E-4$ BER seviyesi için DCO-OFDM-8CSK-LAZY, DCO-OFDM-8CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6dB daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. En iyi performanslar göz önüne alınacak olur ise DCO-OFDM-8CSK-LAZY, DCO-OFDM-8QAM-LAZY’dan yaklaşık olarak 1dB daha iyi performans verdiği gözlenmiştir fakat her iki dalga formunun da $1E-6$ seviyesinde hata tabanına gitme eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni, LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM dalga formunda 7 dB’lik DC bias değerinin uygun olmaması ile açıklanabilir.

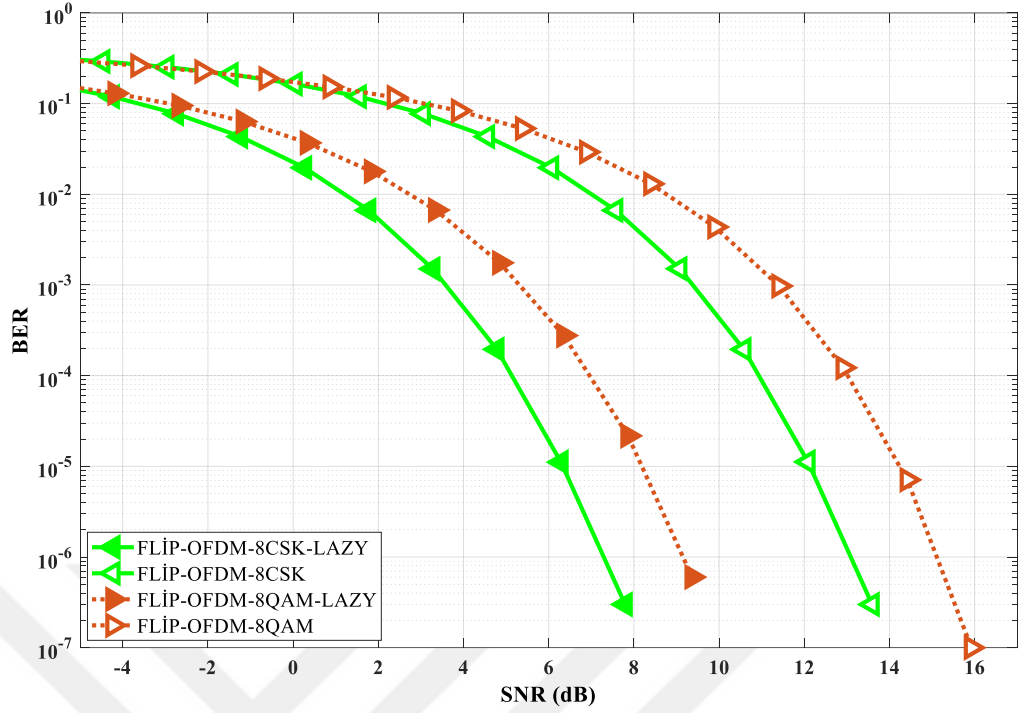
Şekil 8.24’de Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve klasik VLC-OFDM dalga formlarının 8-QAM ve 8-CSK modülasyonları için AWGN kanal BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmiştir. DCO-OFDM dalga formunda 7 dB’lik DC bias değeri kullanılmaktadır.



Şekil 8.24 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 8-CSK ve 8-QAM modülasyonları için BER başarımlar ölçütleri kıyaslanması

Şekil 8.24 incelendiğinde, ACO-OFDM dalga formunda olduğu gibi 8-CSK modülasyonunun 8-QAM modülasyonundan hemen hemen 1 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte tezde sunulan LLWT dönüşümünün DCO-OFDM dalga formuna da benzer katkıyı sağladığı anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen yöntemle DCO-OFDM dalga formunda neredeyse 6 dB SNR kazancı sağlandığı tespit edilmektedir. Genel performanslar karşılaştırılacak olur ise 10^{-5} BER seviyesi için DCO-OFDM-8CSK-LAZY, 8CSK-OFDM-LAZY'den yaklaşık olarak 9dB daha iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

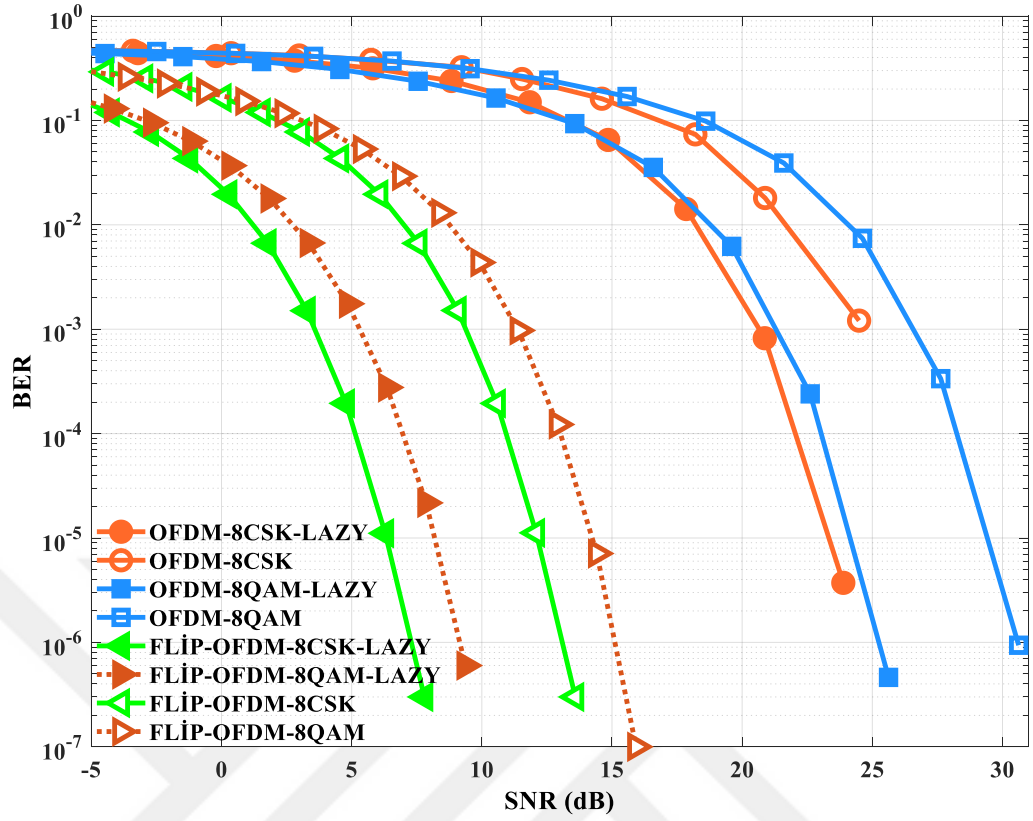
Şekil 8.25'de FLİP-OFDM'in AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.25 AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.25’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için FLİP-OFDM-8QAM-LAZY, FLİP-OFDM-8QAM’dan yaklaşık olarak 6dB daha iyi sonuç göstermiştir. 8-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise $1E-4$ BER seviyesi için FLİP-OFDM-8CSK-LAZY, FLİP-OFDM-8CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınacak ise FLİP-OFDM-8CSK-LAZY, FLİP-OFDM-8QAM-LAZY’dan yaklaşık olarak 2dB daha performanslı olduğu gözlenmiştir.

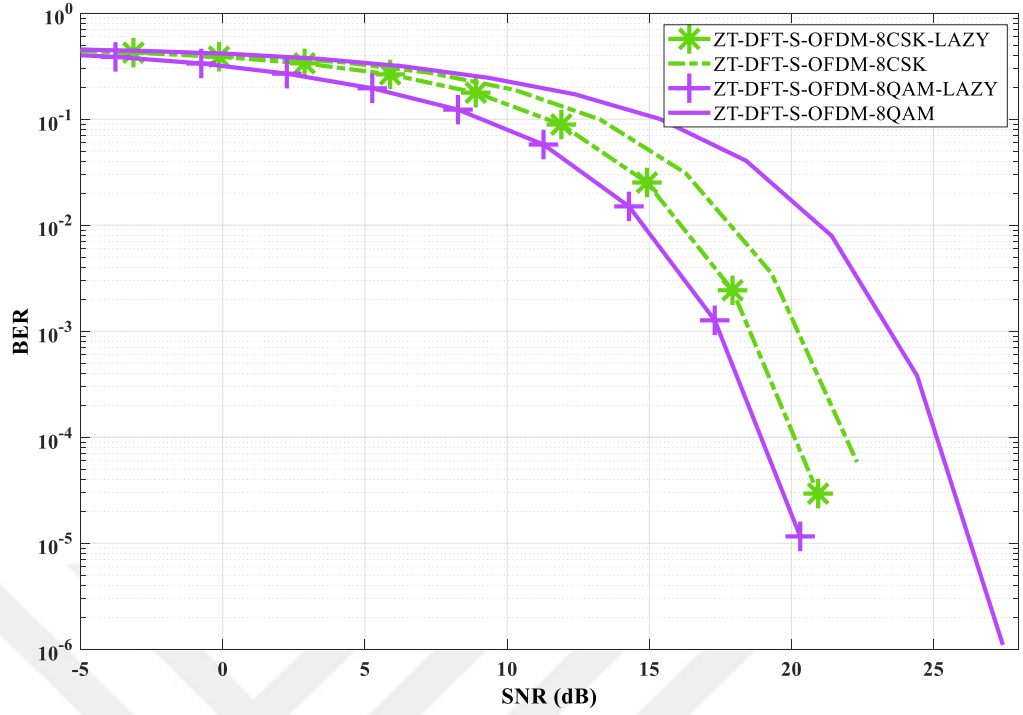
Şekil 8.26’da FLİP-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.26 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı FLİP-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 8-CSK ve 8-QAM modülasyonları için BER başarımları ölçütleri kıyaslanması

Şekil 8.26 analiz edildiğinde, 8-CSK modülasyonunun 8-QAM modülasyonundan hemen hemen 1.5 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da katkı sağladığı anlaşılmaktadır. 1E-4 BER düzeyi için önerilen yöntemle FLİP-OFDM dalga formunda neredeyse 6 dB SNR kazancı sağlandığı tespit edilmektedir. Öte yandan önerilen yöntemin ACO-OFDM dalga formuna her iki modülasyonda da yaklaşık olarak aynı performansı sağladığı görülmektedir. Genel olarak performanslar karşılaştırılacak olursa FLİP-OFDM-8CSK-LAZY, 8CSK-OFDM-LAZY'den yaklaşık olarak 1E-5 BER seviyesi için 18dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

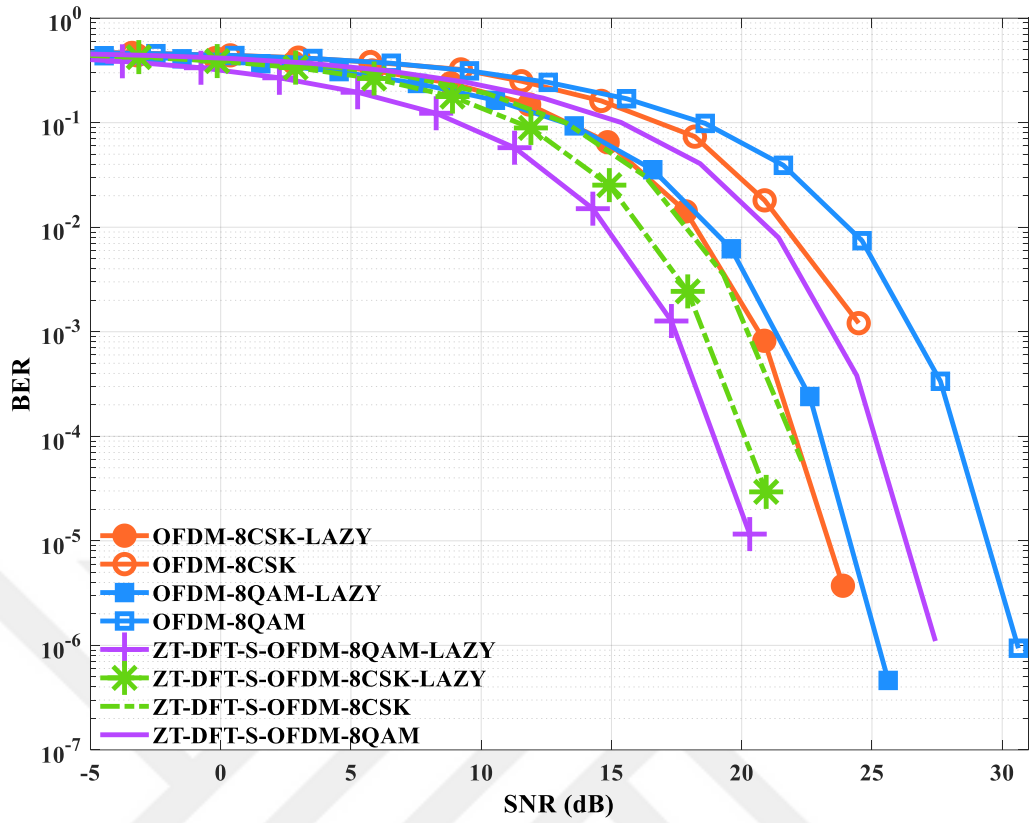
Şekil 8.27'de ZT-DFT-S-OFDM'in AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.27 AWGN kanal 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.27’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 8-QAM, 8-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta 10^{-4} BER seviyesi için ZT-DFT-S-OFDM-8QAM-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-8QAM’dan neredeyse 6.5 dB daha performanslı çıkmıştır. 8-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise 10^{-4} BER seviyesi için ZT-DFT-S-OFDM-8CSK-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-8CSK’den neredeyse 2.5 dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınacak olur ise diğer optik OFDM sistemlere nazaran ZT-DFT-S-OFDM-8QAM-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-8CSK-LAZY’den yaklaşık olarak 10^{-4} BER seviyesi için 1.5 dB daha iyi performans verdiği gözlenmiştir.

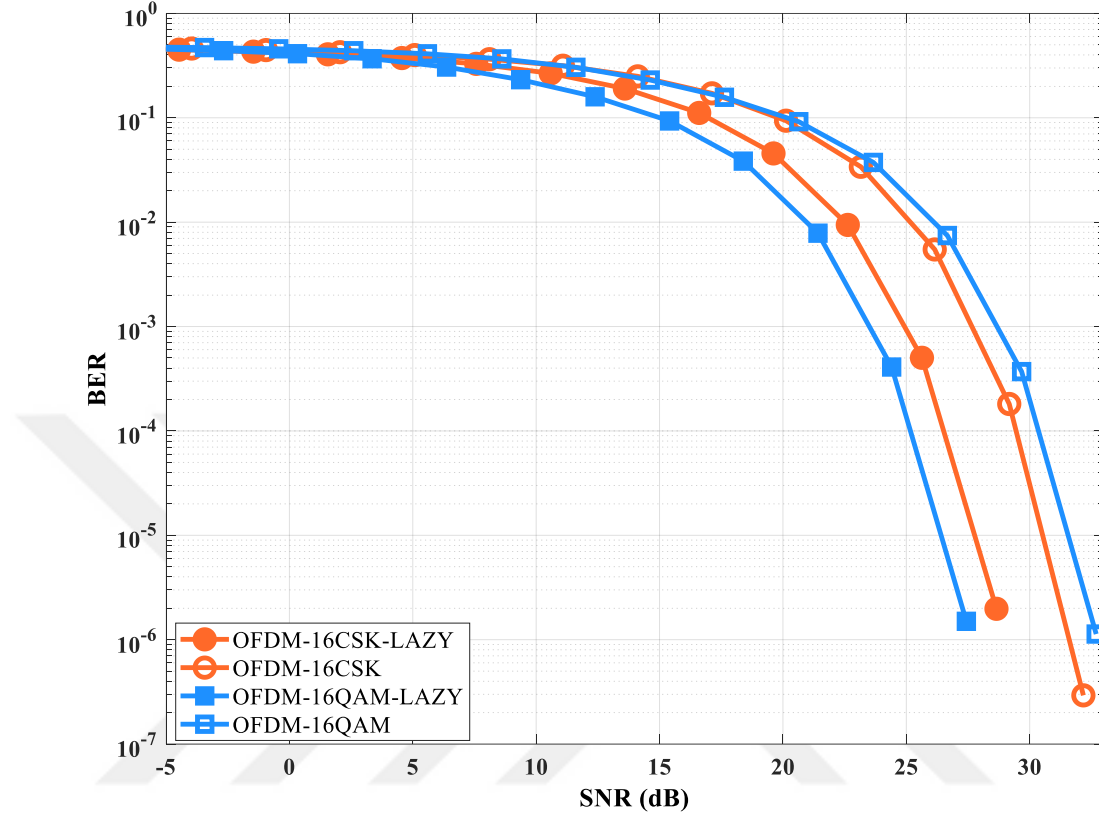
Şekil 8.28’de ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN ortamında 8-QAM, 8-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.28 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 8-CSK ve 8-QAM modülasyonları için BER başarımlarının kıyaslanması

Şekil 8.28 analiz edildiğinde, LLWT dönüşümü ile uygulanan 8-CSK modülasyonunun 8-QAM modülasyonundan daha kötü performans sağladığı fakat klasik sistemde ise daha iyi performans verdiği ZT-DFT-S-OFDM dalga formunda gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da az da olsa katkı sağladığı anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen yöntemle ZT-DFT-S-OFDM dalga formunda neredeyse 5 dB SNR daha iyi performans sağlandığı tespit edilmektedir. Genel olarak performanslar karşılaştırılacak olur ise ZT-DFT-S-OFDM-8CSK-LAZY, 8CSK-OFDM-LAZY'den yaklaşık olarak 3dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir. En iyi performansı sağlayan ZT-DFT-S-OFDM-8QAM-LAZY, 8QAM-OFDM-LAZY'den 10^{-4} BER seviyesi için 5dB kazanç sağladığı gözlenmektedir.

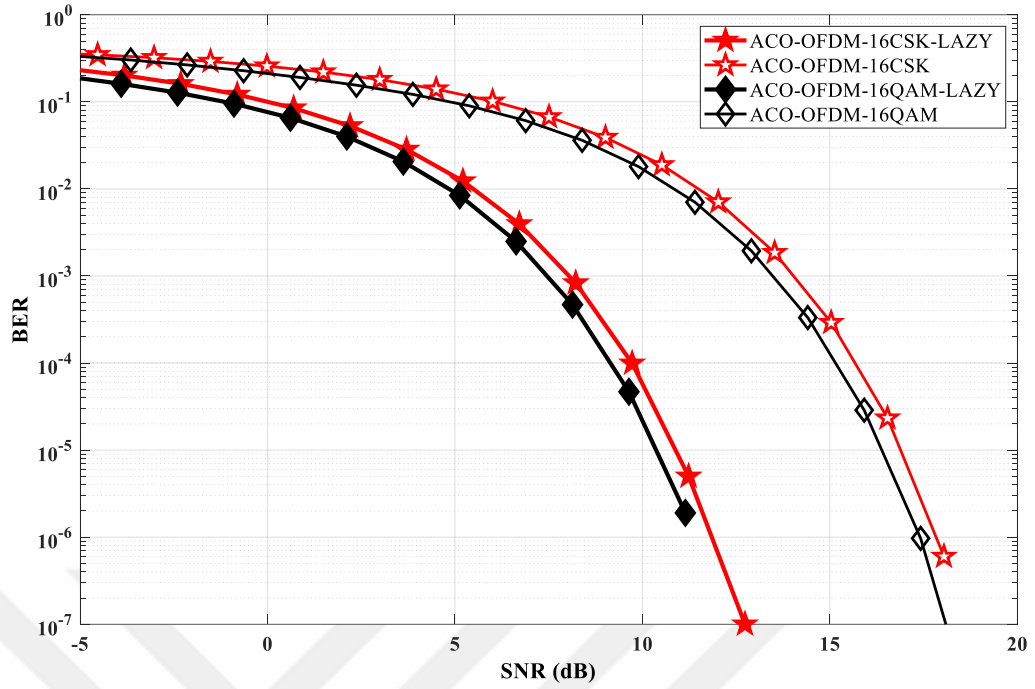
Şekil 8.29’da VLC-OFDM’in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.29 AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.29’da görüldüğü üzere AWGN kanalda 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta 10^{-4} BER seviyesi için VLC-OFDM-16QAM-LAZY, VLC-OFDM-16QAM’den neredeyse 5.5 dB daha performanslı çıkmıştır. 16-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise 10^{-3} BER seviyesi için VLC-OFDM-16CSK-LAZY, VLC-OFDM-16CSK’den yaklaşık olarak aynı şekilde 3dB daha iyi çıkmıştır. Önceki VLC-OFDM sonuçlarına nazaran bu grafikte en iyi sonuçlar incelendiğinde ise VLC-OFDM-16QAM-LAZY, VLC-OFDM-16CSK-LAZY’den 10^{-4} BER seviyesi için 1 dB daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

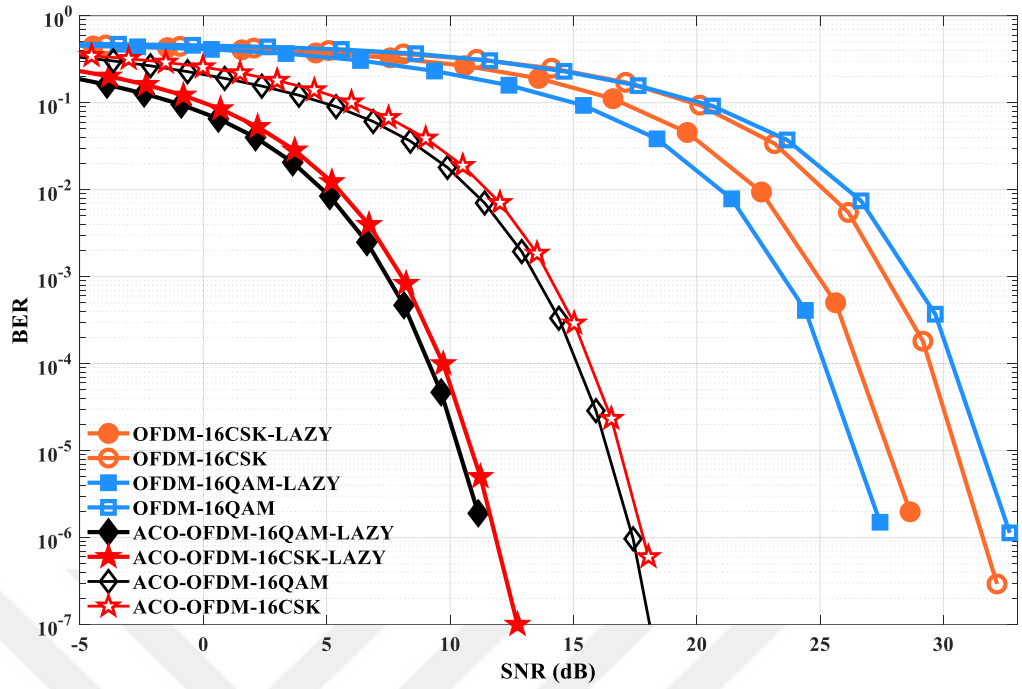
Şekil 8.30’da ACO-OFDM’in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.30 AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.30’da görüldüğü üzere AWGN kanalda 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-5$ BER düzeyi için ACO-OFDM-16QAM-LAZY, ACO-OFDM-16QAM’dan neredeyse 6.5 dB daha performanslı çıkmıştır. 16-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise $1E-5$ BER seviyesi için ACO-OFDM-16CSK-LAZY, ACO-OFDM-16CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6.5 dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınacak olur ise ACO-OFDM-16QAM-LAZY, ACO-OFDM-16CSK-LAZY’dan hemen hemen 0.5 dB daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

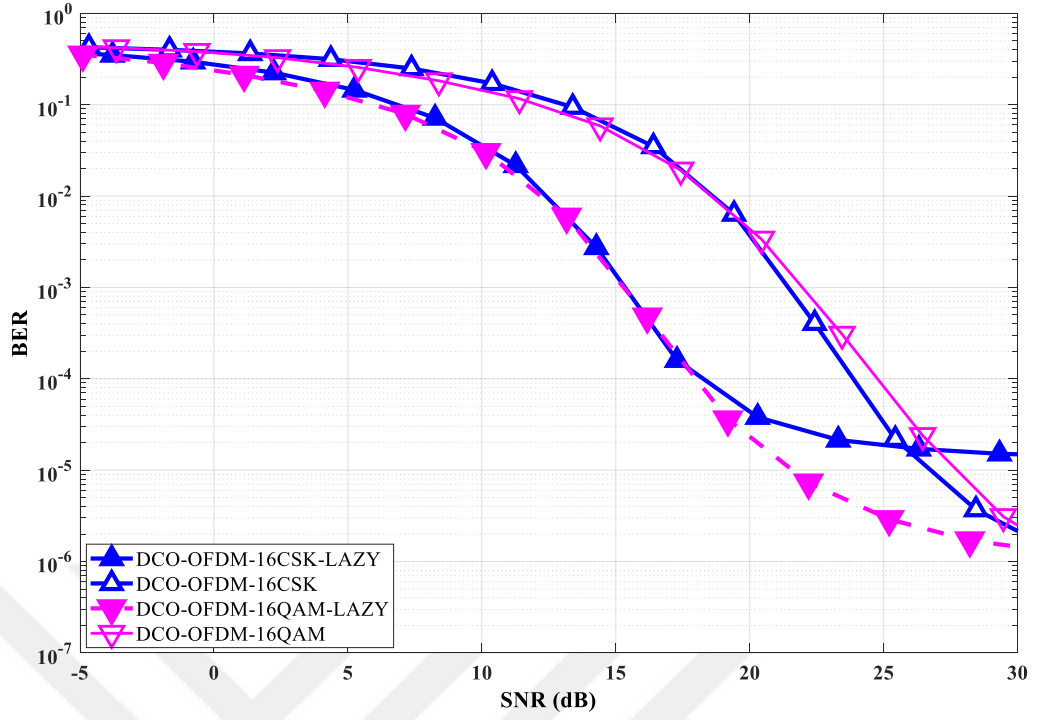
Şekil 8.31’de ACO-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.31 AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda ACO-OFDM ve VLC OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.31 analiz edildiğinde, 16-QAM modülasyonunun 16-CSK modülasyonundan daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. ACO-OFDM dalga formunda 16-QAM modülasyonunun 16-CSK modülasyonundan yaklaşık olarak 0.5 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Buna karşılık klasik VLC-OFDM dalga formunda ise 16-QAM modülasyonunun 16-CSK modülasyonundan hemen hemen 1 dB daha iyi olduğu tespit edilmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da katkı sağladığı anlaşılmaktadır. $1E-4$ BER seviyesi için önerilen yöntemle ACO-OFDM dalga formunda neredeyse 5.5 dB SNR kazancı elde edildiği grafikten anlaşılmaktadır. Ek olarak, tezde sunulan yöntemin klasik VLC-OFDM dalga formuna da her iki modülasyonda benzer katkılar sağladığı gözlenmektedir. Genel performanslar karşılaştırılacak olur ise ACO-OFDM-16CSK-LAZY, 16CSK-OFDM-LAZY den yaklaşık olarak 17.5 dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

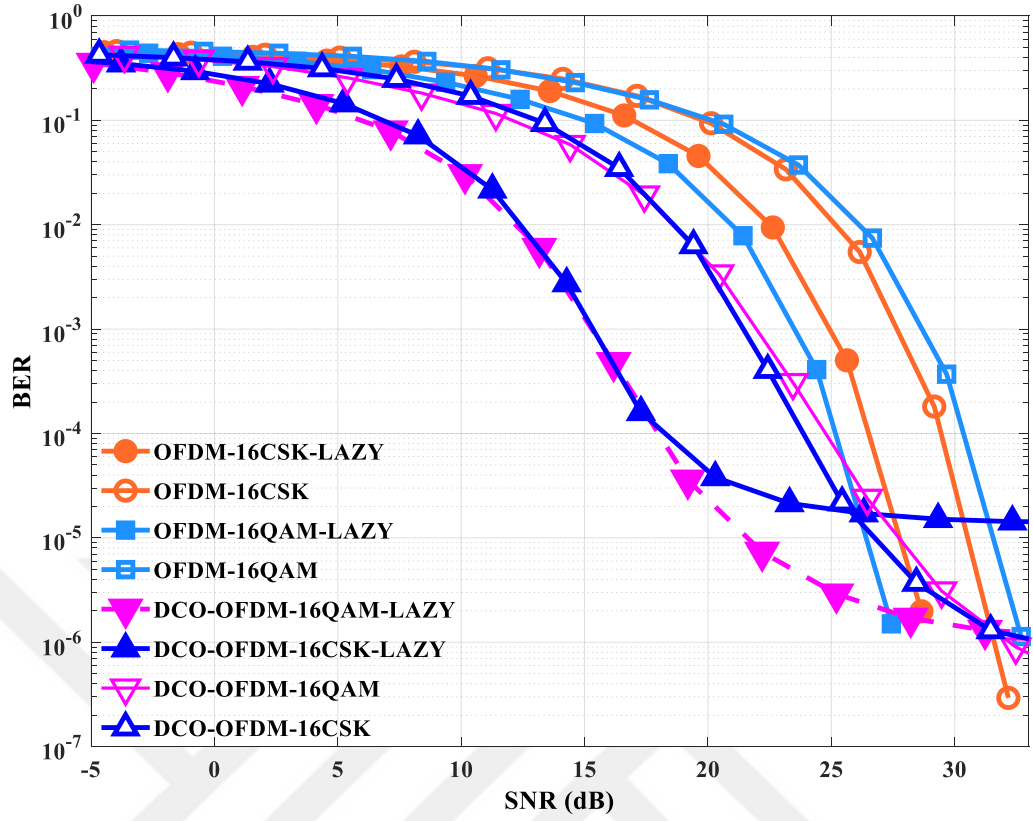
Şekil 8.32’de DCO-OFDM’in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.32 AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.32’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 7dB DC bias uygulanarak 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için DCO-OFDM-16QAM-LAZY, DCO-OFDM-16QAM’den yaklaşık olarak 6dB daha performanslı çıkmıştır. 16-CSK modülasyonu için LLWT dönüşümünün etkisi incelenecek olur ise $1E-4$ BER seviyesi için DCO-OFDM-16CSK-LAZY, DCO-OFDM-16CSK’den yaklaşık olarak aynı şekilde 8dB daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. En iyi performanslar göz önüne alınacak ise DCO-OFDM-16CSK-LAZY, DCO-OFDM-16QAM-LAZY ile benzer performans verdiği gözlenmiştir. Her iki dalga formunun da 16-CSK modülasyonu için $1E-5$ BER seviyelerine gelmeden, 16-QAM modülasyonunun ise $1E-6$ BER seviyelerine gelmeden hata tabanına gitme eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni, LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM dalga formunda 7 dB’lik DC bias değerinin uygun olmaması ile açıklanabilir.

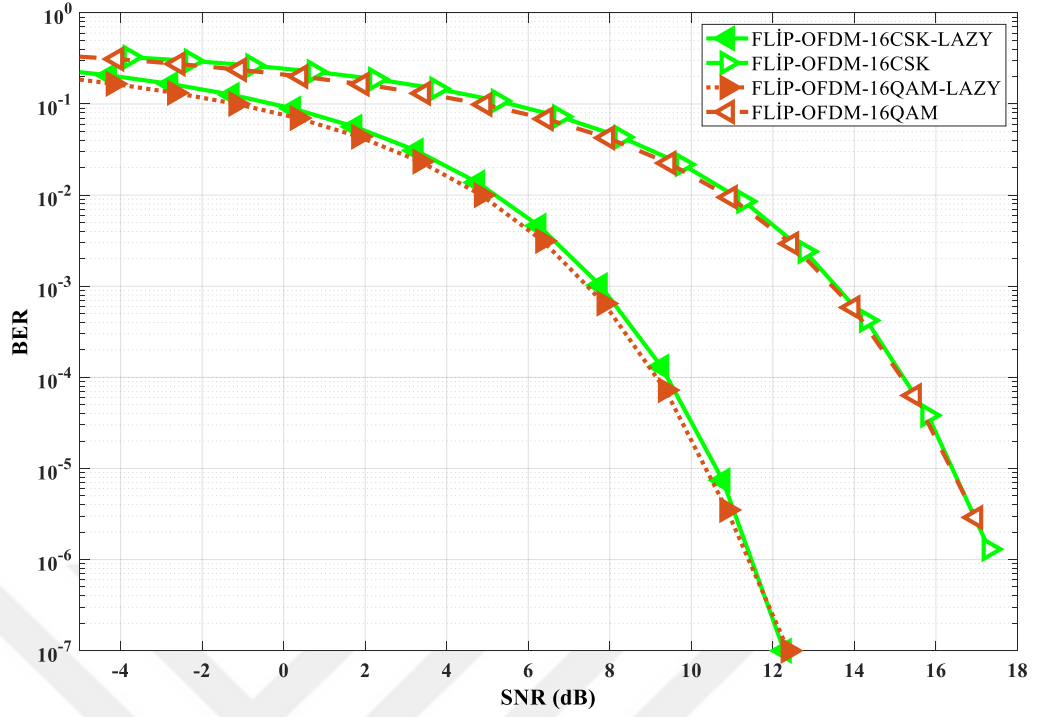
Şekil 8.33’de Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve klasik VLC-OFDM dalga formlarının 16-QAM ve 16-CSK modülasyonları için AWGN kanal BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmiştir. DCO-OFDM dalga formunda 7 dB’lik DC bias değeri kullanılmaktadır.



Şekil 8.33 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı DCO-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 16-CSK ve 16-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması

Şekil 8.33 incelendiğinde, 16-QAM modülasyonunun 16-CSK modülasyonu ile yaklaşık olarak benzer performansları gösterdiği belirtilmektedir. Bunun yanında tezde sunulan LLWT dönüşümünün DCO-OFDM dalga formuna da benzer katkıyı sağladığı anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen yöntemle DCO-OFDM dalga formunda neredeyse 6 dB SNR performans kazandırdığı tespit edilmektedir. Genel performanslar karşılaştırılacak olur ise 10^{-4} BER seviyesi için DCO-OFDM-16CSK-LAZY, 16CSK-OFDM-LAZY den yaklaşık olarak 8dB daha iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

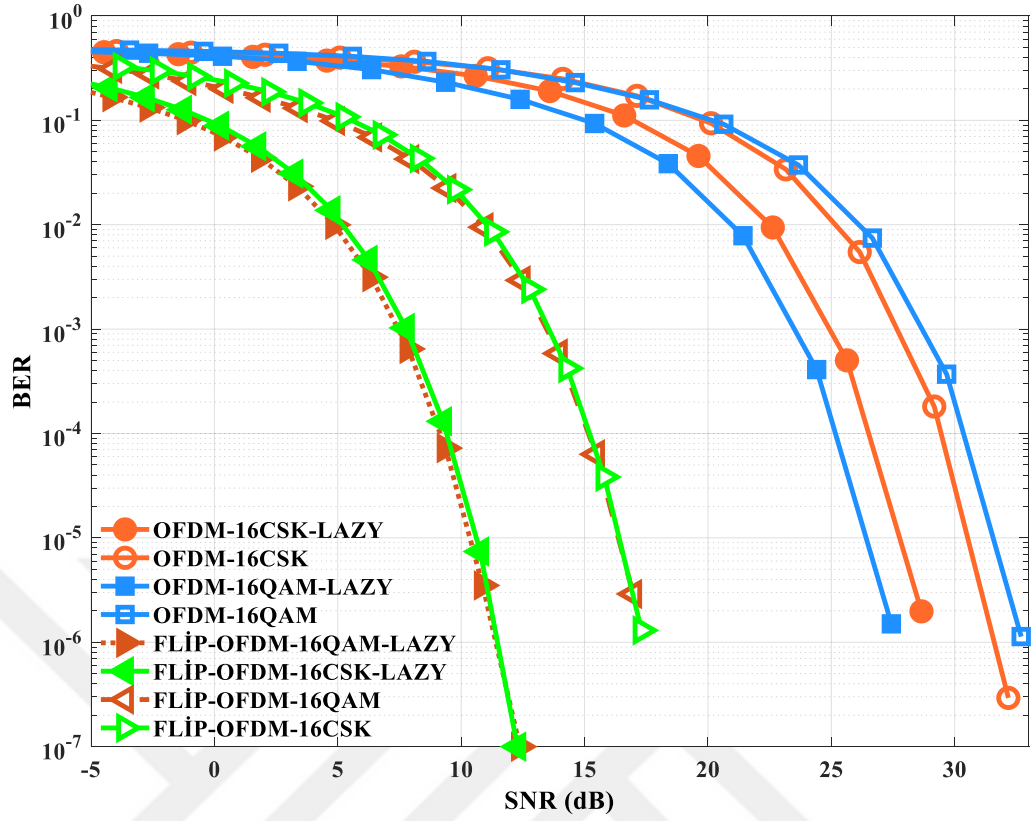
Şekil 8.34’de FLİP-OFDM’in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.34 AWGN kanal 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.34’de görüldüğü üzere AWGN kanalda 16-QAM ve 16-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için FLİP-OFDM-16QAM-LAZY, FLİP-OFDM-16QAM’dan neredeyse 6.5 dB daha iyi sonuç göstermiştir. 16-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise $1E-4$ BER seviyesi için FLİP-OFDM-16CSK-LAZY, FLİP-OFDM-16CSK’dan yaklaşık olarak aynı şekilde 6dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alınacak olur ise FLİP-OFDM-16QAM-LAZY’nin FLİP-OFDM-16CSK-LAZY’den yaklaşık olarak 0.5 dB daha performanslı olduğu gözlenmiştir.

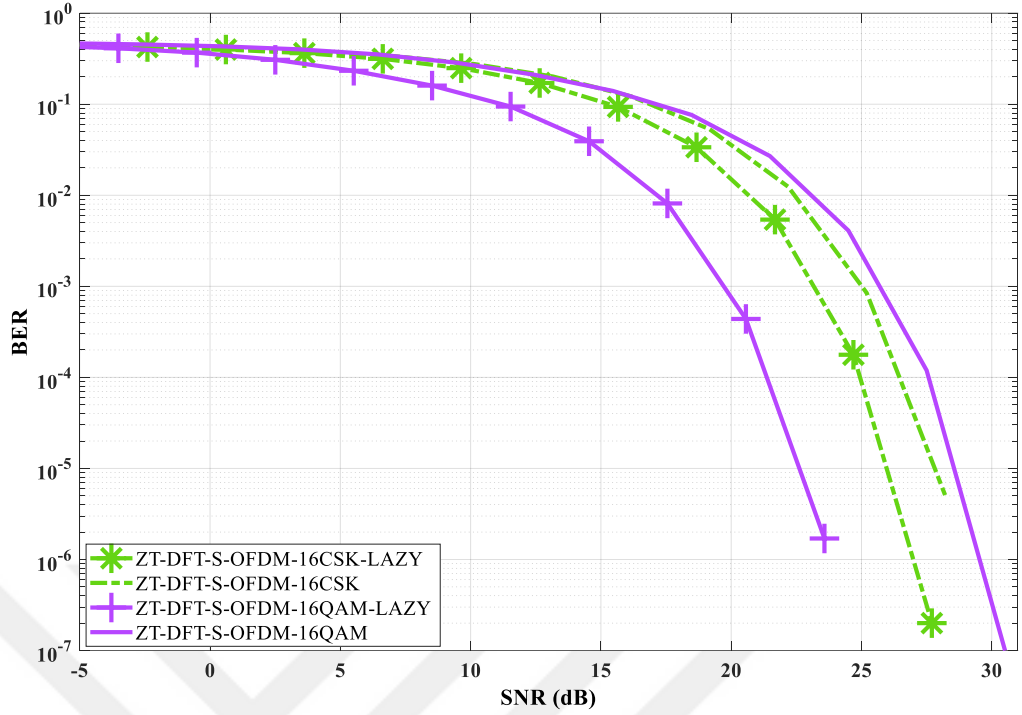
Şekil 8.35’de FLİP-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.35 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı FLİP-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 16-CSK ve 16-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması

Şekil 8.35 analiz edildiğinde, 16-QAM modülasyonunun 16-CSK modülasyonundan hemen hemen 0.5 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da katkı sağladığı anlaşılmaktadır. 1E-4 BER düzeyi için önerilen yöntemle FLİP-OFDM dalga formunda hemen hemen 6 dB SNR kazancı sağlandığı tespit edilmektedir. Öte yandan önerilen yöntemin FLİP-OFDM dalga formuna her iki modülasyonda da yaklaşık olarak aynı performansı sağladığı görülmektedir. Genel olarak performanslar karşılaştırılacak olur ise FLİP-OFDM-16CSK-LAZY'nin 16CSK-OFDM-LAZY'den 1E-5 BER seviyesi için yaklaşık olarak 11dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir.

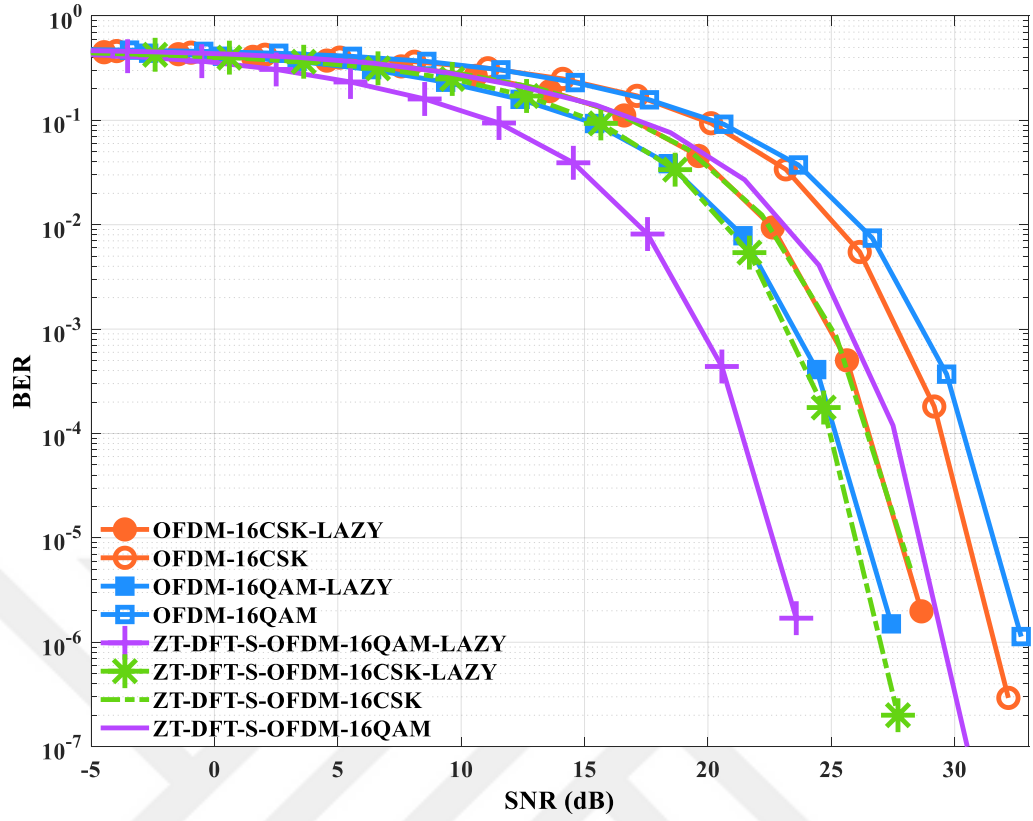
Şekil 8.36'da ZT-DFT-S-OFDM'in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.36 AWGN kanal 16-QAM, 16-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının BER-SNR grafiği

Şekil 8.36’da görüldüğü üzere AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta $1E-4$ BER seviyesi için ZT-DFT-S-OFDM-16QAM-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-16QAM’dan neredeyse 5.5 dB daha iyi sonuç göstermiştir. 16-CSK modülasyonu için de incelenecek olur ise $1E-4$ BER seviyesi için ZT-DFT-S-OFDM-16CSK-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-16CSK’dan yaklaşık olarak 1.5 dB daha iyi çıkmıştır. En iyi performanslar göz önüne alındığında ZT-DFT-S-OFDM-16QAM-LAZY, ZT-DFT-S-OFDM-16CSK-LAZY’dan yaklaşık olarak $1E-5$ BER seviyesi için 3 dB daha iyi performans verdiği gözlenmiştir.

Şekil 8.37’de ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM’in AWGN kanalda 16-QAM, 16-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak BER-SNR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.37 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı ZT-DFT-S-OFDM ve VLC-OFDM dalga formlarının 16-CSK ve 16-QAM modülasyonları için BER performanslarının karşılaştırılması

Şekil 8.37 analiz edildiğinde, LLWT dönüşümü uygulanan 16-CSK modülasyonunun 16-QAM modülasyonundan daha kötü performans sağladığı hem VLC OFDM sisteminde hem de ZT-DFT-S-OFDM dalga formunda gözlenmektedir. Bununla birlikte önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyonda her iki dalga formuna da az da olsa katkı sağladığı anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen yöntemle ZT-DFT-S-OFDM dalga formunda neredeyse 6 dB SNR kazancı sağlandığı tespit edilmektedir. Genel olarak performanslar karşılaştırılacak olur ise ZT-DFT-S-OFDM-16CSK-LAZY'nin 16CSK-OFDM-LAZY'den yaklaşık olarak 1.5 dB dahi iyi sonuç sağladığı gözlenmiştir. En iyi performansı sağlayan ZT-DFT-S-OFDM-16QAM-LAZY'nin 16QAM-OFDM-LAZY'den 10^{-4} BER seviyesi için 5dB kazanç sağladığı gözlenmektedir. PAPR sonuçları bölüm 8.3'te verilecektir.

8.3 PAPR Benzetim Sonuçları

Yapılan yüksek lisans tez çalışmasının son bölümünde, bu çalışmada incelenen dalga formlarının PAPR performansları karşılaştırılmaktadır. PAPR performansları aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır. PAPR benzetimleri, bölüm 8.1 ve bölüm 8.2’de bahsedilen tekniklerin 1000 sembol paketi ile 4-QAM ve 4-CSK modülasyonu için DC-BIAS değeri 7dB alınarak elde edilmiştir. PAPR performansları Denklem (8.1)’de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$PAPR_{dB} = 10 \log_{10} \left[\frac{\max |X_{O-OFDM}[n]|^2}{E[|X_{O-OFDM}[n]|^2]} \right] \quad (8.1)$$

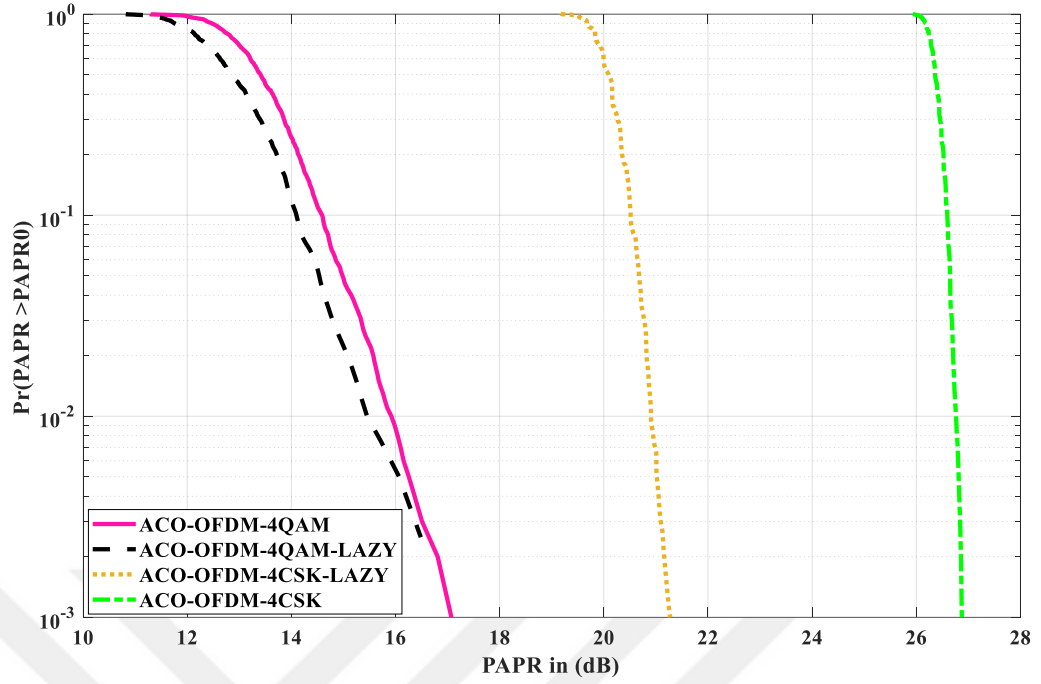
Burada $X_{O-OFDM}[n]$ yukarıda incelenen sistemlerin iletilen sinyali ve $E[\cdot]$ operatörü de muhtemel sonucu işaret etmektedir. Bu tezde, PAPR performans ölçütünü, PAPR’ın tamamlayıcı kümülatif dağılım fonksiyonu (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) ile hesabı yapılmaktadır. $PAPR_0 > 0$ referans seviyesi baz alındığında, $PAPR_{dB}$ ’nin referans değerinden daha yüksek olması olasılığı CCDF ile oluşturulur ve aşağıda bulunan eşitlikteki gibi gözler önüne sunulur:

$$CCDF(PAPR(X_{O-OFDM}[n])) = Pr(PAPR(X_{O-OFDM}[n]) > PAPR_0) \quad (8.2)$$

Burada, $PAPR_0$, belirli bir PAPR düzeyidir. PAPR, bağımsız N veri bloğuna bağlı olarak MC veya OFDM sinyalinde CCDF olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$CCDF = Pr(PAPR(X_{O-OFDM}[n]) > PAPR_0) = 1 - (1 - e^{-PAPR_0})^N \quad (8.3)$$

Şekil 8.38’de ACO-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK, 4-QAM modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak PAPR performansları elde edilmiştir.

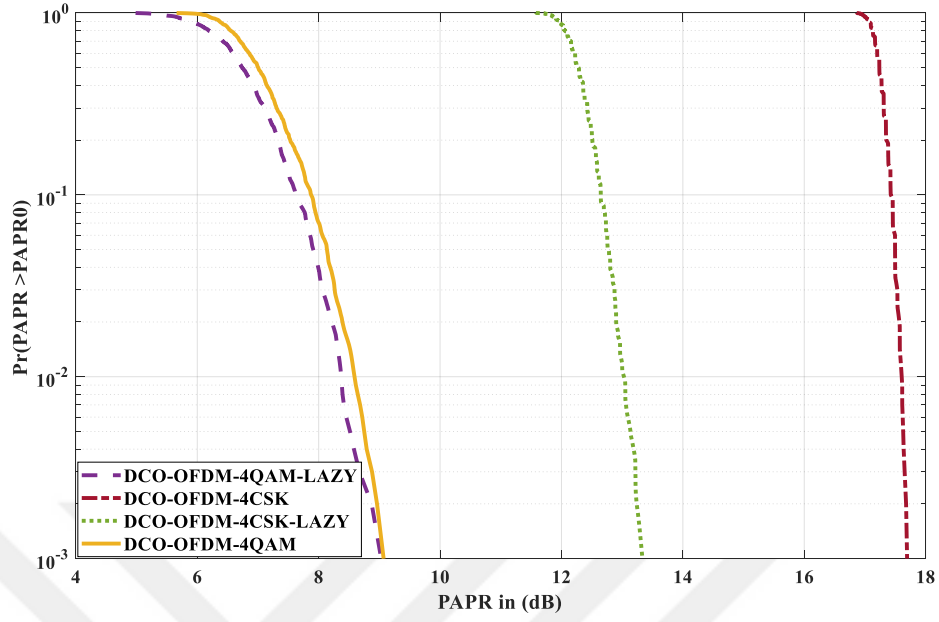


Şekil 8.38 AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda ACO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği

Şekil 8.38 incelendiğinde en iyi sonucun ACO-OFDM-4QAM-LAZY olduğu görülmektedir. ACO-OFDM-4QAM-LAZY'nin ACO-OFDM-4CSK-LAZY'den yaklaşık olarak 6dB ve ACO-OFDM-4QAM'den de hemen hemen 0.5 dB daha performanslı çıkmıştır. ACO-OFDM-4CSK-LAZY ile ACO-OFDM-4CSK karşılaştırıldığında ise ACO-OFDM-4CSK-LAZY, ACO-OFDM-4CSK'den neredeyse 5.5 dB daha performanslı çıkmıştır.

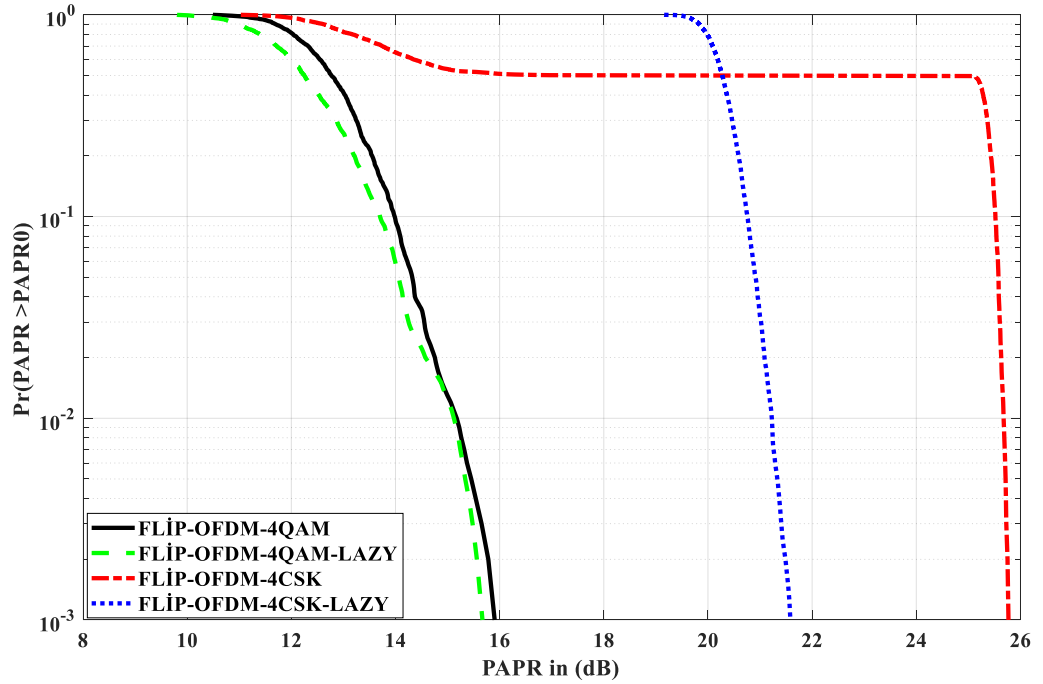
Şekil 8.39'da DCO-OFDM'in AWGN kanalda 4-QAM, 4-CSK modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak PAPR performansları elde edilmiştir.

Şekil 8.39'da görüldüğü üzere AWGN kanalda 7dB DC bias uygulanarak 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda klasik ve önerilen LLWT dalga formunda ortaya çıkan sonuçta en iyi sonucun DCO-OFDM-4QAM-LAZY olduğu görülmektedir. DCO-OFDM-4QAM-LAZY, DCO-OFDM-4QAM'den hemen hemen 0.5 dB ve DCO-OFDM-4CSK-LAZY'den de neredeyse 4.5 dB daha performanslı çıkmıştır. DCO-OFDM-4CSK-LAZY ile DCO-OFDM-4CSK karşılaştırıldığında ise DCO-OFDM-4CSK-LAZY, DCO-OFDM-4CSK'den yaklaşık olarak 4.5dB daha performanslı çıkmıştır.



Şekil 8.39 AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda DCO-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği

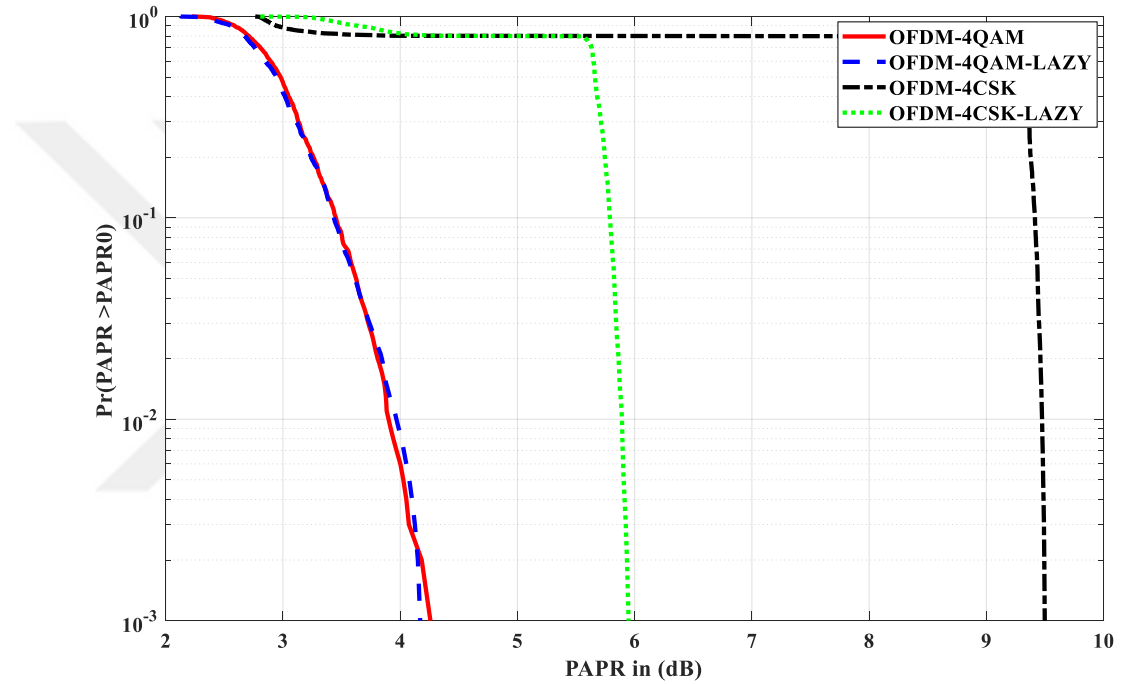
Şekil 8.40’da FLİP-OFDM’in AWGN kanalda 4-CSK, 4-QAM modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak PAPR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.40 AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda FLİP-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği

Şekil 8.40 incelendiğinde en iyi sonucun FLİP-OFDM-4QAM-LAZY olduğu görülmektedir. FLİP-OFDM-4QAM-LAZY, FLİP -OFDM-4CSK-LAZY'den neredeyse 6dB ve FLİP-OFDM-4QAM'den de hemen hemen 0.5 dB daha performanslı çıkmıştır. FLİP-OFDM-4CSK-LAZY ile FLİP-OFDM-4CSK karşılaştırıldığında ise FLİP-OFDM-4CSK-LAZY, FLİP-OFDM-4CSK'den neredeyse 5 dB daha performanslı çıkmıştır.

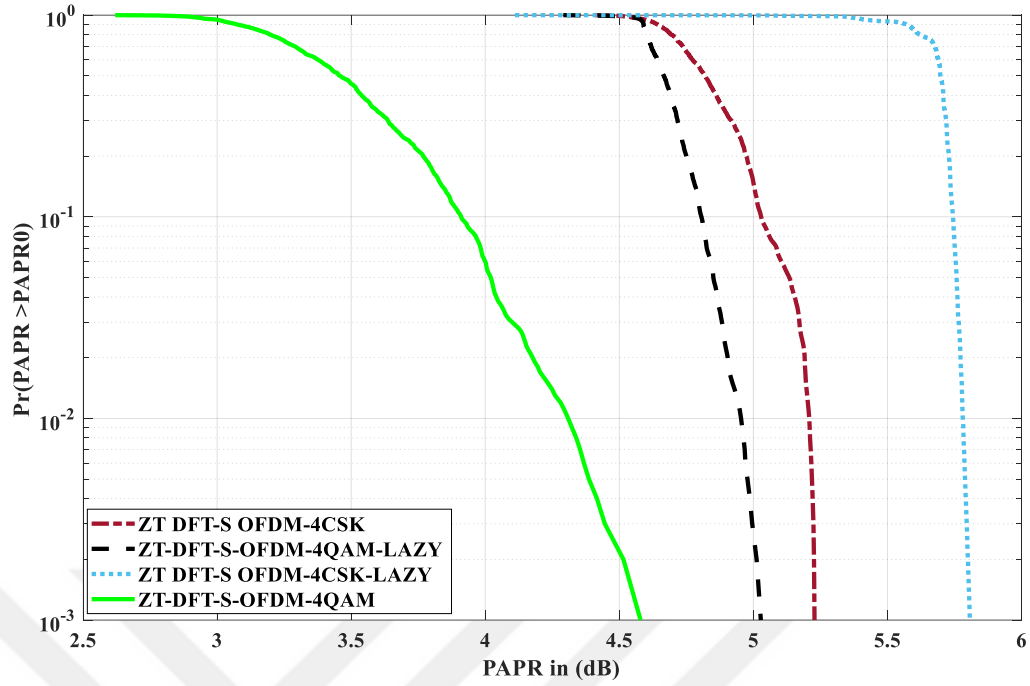
Şekil 8.41'de VLC-OFDM'in AWGN kanalda 4-CSK, 4-QAM modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak PAPR performansları elde edilmiştir.



Şekil 8.41 AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda VLC-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği

Şekil 8.41 incelendiğinde en iyi sonucu VLC-OFDM-4QAM-LAZY ve VLC-OFDM-4QAM'in paylaştığı görülmektedir. VLC-OFDM-4QAM-LAZY, VLC-OFDM-4CSK-LAZY'den yaklaşık olarak 2dB daha performanslı çıkmıştır. VLC-OFDM-4CSK-LAZY ile VLC-OFDM-4CSK karşılaştırıldığında ise VLC-OFDM-4CSK-LAZY, VLC-OFDM-4CSK'den yaklaşık olarak 3.5 dB daha performanslı çıkmıştır.

Şekil 8.42'de ZT-DFT-S-OFDM'in AWGN kanalda 4-CSK, 4-QAM modülasyonu ve LLWT dönüşümü kullanılarak PAPR performansları elde edilmiştir.

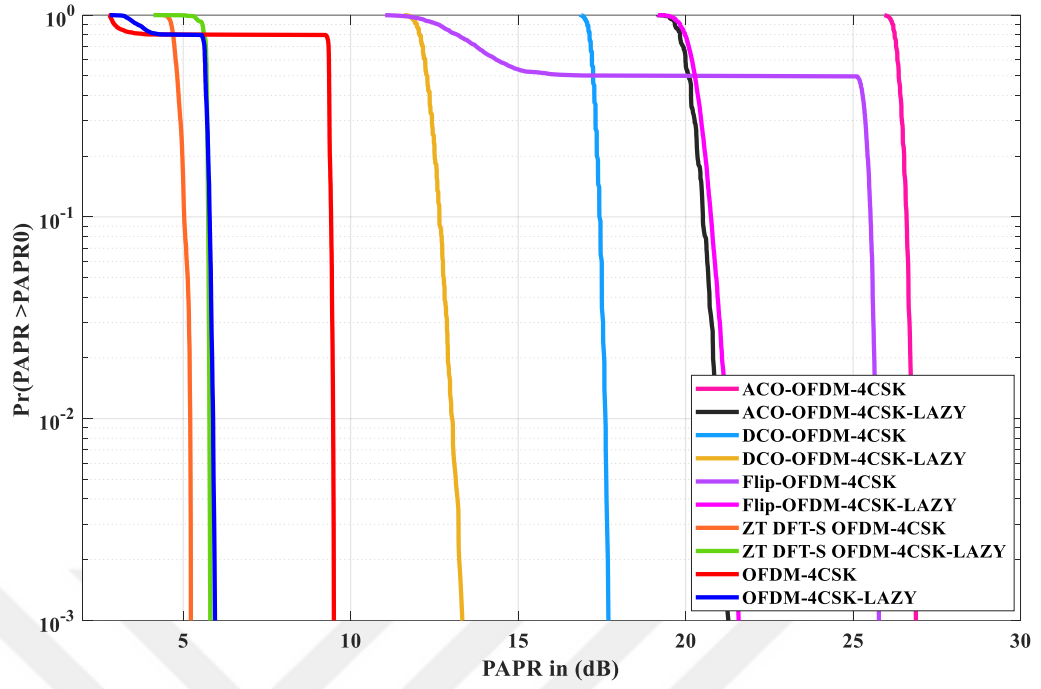


Şekil 8.42 AWGN kanal 4-QAM ve 4-CSK modülasyonunda ZT-DFT-S-OFDM için klasik ve LLWT dalga formlarının PAPR grafiği

Şekil 8.42 incelendiğinde diğer sonuçlara nazaran en iyi sonucun ZT-DFT-S-OFDM-4QAM olduğu görülmektedir. ZT-DFT-S-OFDM-4QAM, ZT-DFT-S-OFDM-4CSK-LAZY'den yaklaşık olarak 2dB ve ZT-DFT-S-OFDM-4QAM-LAZY'den de hemen hemen 0.75 dB daha performanslı çıkmıştır. ZT-DFT-S-OFDM-4QAM ile ZT-DFT-S-OFDM-4CSK karşılaştırıldığında ise ZT-DFT-S-OFDM-4QAM, ZT-DFT-S-OFDM-4CSK'dan hemen hemen 1 dB daha performanslı çıkmıştır.

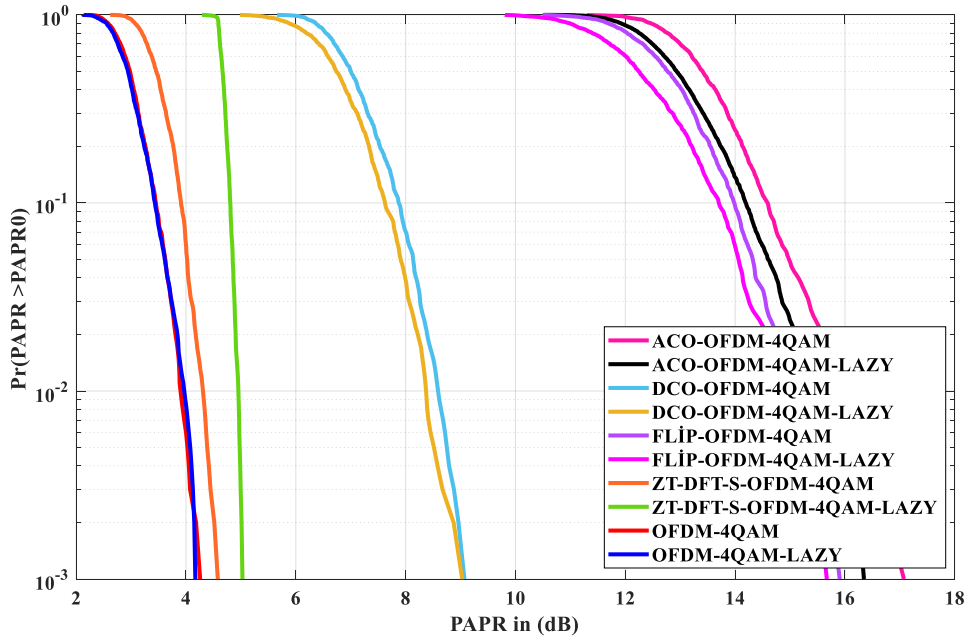
4-CSK modülasyonu için önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı dalga formlarının PAPR performansları Şekil 8.43'de gösterilmektedir.

PAPR performanslarının gösterildiği Şekil 8.43 incelendiğinde, $1E-3$ PAPR seviyesi için tezde sunulan LLWT dönüşümünün bu çalışmada incelenen dalga formlarına ZT-DFT-S dalga formu hariç 3 ile 5 dB arasında PAPR performansını iyileştirdiği anlaşılmaktadır. En iyi performansın klasik ZT-DFT-S-OFDM dalga formunun verdiği, en berbat performansın ise ACO-OFDM dalga formu ile elde edildiği gözlenmektedir.



Şekil 8.43 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı dalga formlarının 4-CSK modülasyonu için PAPR performanslarının kıyaslanması

Şekil 8.44'te 4-QAM modülasyonu için önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı dalga formlarının PAPR performansları sunulmaktadır.



Şekil 8.44 Önerilen LLWT dönüşümünün uygulandığı dalga formlarının 4-QAM modülasyonu için PAPR performanslarının karşılaştırılması

Şekil 8.44 incelendiğinde, önerilen LLWT dönüşümünün bu çalışmada incelenen dalga formlarına neredeyse hiçbir katkı sağlamadığı tespit edilmektedir. 4-CSK modülasyonuna benzer şekilde en iyi performansın klasik VLC-OFDM dalga formu ile ve en kötü performansında ACO-OFDM dalga formu ile elde edildiği anlaşılmaktadır.



9.BÖLÜM: SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, RF sistemlerine alternatif olarak ortaya çıkan 6G ve Ötesi sistemlerde çok büyük bir öneme sahip olacak olan görünür ışıkla iletişim teknikleri incelenmiştir. İncelenen bu tekniklerden önerilen Lazy Lifting Dalgacık Dönüşüm tekniğini kullanarak en iyi performansı sağlayan optik telsiz iletişim sistemleri ele alınmıştır. Önerilen dalga formlarında literatürde olan modülasyon tekniklerinden M-seviyeli renk kaydırmalı anahtarlama (M-CSK) modülasyonu ile karşılaştırılabilmesi için M-QAM modülasyonu seçilmiştir. IEEE 802.15.7 standartlarında titreme problemini en aza indirgeyen CSK modülasyonunun Optik OFDM sistemleri ile birleştirilmesi sonrasında ise daha önce CSK modülasyon türlerinde denenmeyen Lifting dönüşümleri arasında en iyi sonuçları sağlayan Lazy Lifting Dalgacık Dönüşümünün birleştirilmesi ile LLWT-M-CSK-O-OFDM dalga formu bu yüksek lisans tez çalışması sayesinde ortaya çıkmıştır.

Önerilen dalga formları M-CSK ve M-QAM modülasyonlarında klasik VLC-OFDM dalga formu ile BER-SNR ve PAPR başarımları parametreleri baz alınarak kıyaslanmıştır. $1E-4$ BER seviyesi baz alındığında önerilen LLWT dönüşümünün her iki modülasyon yöntemlerinde de bu çalışmada incelenen dalga formlarına neredeyse 6 dB SNR kazancı sağladığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte, önerilen LLWT dönüşümünün M-CSK modülasyonu için dalga formlarına 3 ile 5 dB arasında PAPR kazancı sağladığı, buna karşılık 4-QAM modülasyonu için dalga formlarına neredeyse hiçbir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Öncesinde incelenen sonuçlar karşısında 5G ve ötesi çalışmalarında önerilen ZT-DFT-S OFDM dalga formu için M-QAM modülasyonunda en iyi performansın sağlandığı gözlenmektedir. Tüm bu sonuçlar karşısında ise önerilen LLWT dönüşümü ile birleştirilen O-OFDM dalga formlarının 6G ve ötesi gelecek vaat eden optik iletişim teknolojilerinde kendini kanıtlayacağı ve yer kaplayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] ITU. (2019). Global mobile data traffic forecast update, 2015-2019. [On-line].Erişim:[https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/FactsFigure s2019.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/FactsFigure%2019.pdf) Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023
- [2] Cisco. (2019). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022. [On-line].Erişim:<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-741490.pdf> Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023
- [3] Cisco. (2020, Mart.). Cisco Annual Internet Report, 2018-2023.[On-line].Erişim: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf> Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023
- [4] Dimitrov, S., & Haas, H., "**Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi**," *Cambridge: Cambridge University Press*, 2015, doi: 10.1017/CBO9781107278929
- [5] H. Koçak., "**Kablosuz İletişim ve İnternet Teknolojilerindeki Yeniliklerin Toplumsal Yaşama Katkıları**," *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2013, c. 153, sayı. 153, ss. , Oca. 2011, doi: 10.20296/tsad.82888.
- [6] Aykırı, G., 2022,. M-CSK Modüleli DCO-OFDM Sistemlerinin Başarımını Arttırmak İçin Kanal Kodlama Tekniklerinin. Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 123 s.
- [7] Orbray. (2021, Temmuz.). 100 times faster than 5G! What is possible with 6G?. [On-line].Erişim:https://orbray.com/magazine_en/archives/385 Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023
- [8] GSA. (2021, Ağustos.). 5G Market Update: Executive Summary, 2021. [On-line].Erişim:<https://gsacom.com/paper/5g-market-update-executive-summary-august-2021> Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023
- [9] W. Saad, M. Bennis and M. Chen, "**A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems**," in *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, May/June 2020, doi: 10.1109/MNET.001.1900287.
- [10] E. Basar, "**Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm for 6G**," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 5, pp. 3187-3196, May 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.2971486.

- [11] Z. Zhang et al., "**6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies**," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, Sept. 2019, doi: 10.1109/MVT.2019.2921208.
- [12] C. A. Gutierrez, O. Caicedo and D. U. Campos-Delgado, "**5G and Beyond: Past, Present and Future of the Mobile Communications**," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 10, pp. 1702-1736, Oct. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9477273.
- [13] C. Chau Jimmy, "**Multiple-input multiple-output visible light communication receivers for high data-rate mobile applications**". *OpenBU*, 2016.
- [14] R. W. Burns, "**Communications: An international history of the formative years**," *IETPublication*, vol. 32, no.1, pp.192-196, 2004.
- [15] A. Bell, "Photo phone-transmitter," Dec. 14 1880, uS Patent 235,496. [On-line].Erişim:<http://www.google.com/patents/US235496> Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023
- [16] A. G. Bell, "**On the production and reproduction of sound by light**," *American Journal of Science*, vol.1, no.118, pp.305-324, 1880, doi: 10.2475/ajs.s3-20.118.305.
- [17] S. Arnon, J. Barry, G. Karagiannidis, R. Schober, and M. Uysal, "**Advanced optical wireless communication systems**," *Cambridge University Press*, 2012
- [18] F. E. Goodwin, "**A review of operational laser communication systems**," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 58, no. 10, pp. 1746-1752, Oct. 1970, doi: 10.1109/PROC.1970.7998.
- [19] D. Asha and Drisya, '**Visible Light Communication [VLC] and its Applications**', *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 72–90, Feb. 2019, doi: 10.17148/IARJSET.2019.6213.
- [20] "TED (Technology, Entertainment, Design) Kaliforniya", website [On-line]. (https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb?language=tr) Erişim tarihi: 05 Eylül 2018.
- [21] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.7: **Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light**," in *IEEE Std 802.15.7-2011* , vol., no., pp.1-309, 6 Sept. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195.
- [22] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, and Z. Xu, "**Visible Light Communications. Nashville**", TN: John Wiley & Sons, 2017.
- [23] Haas, H. (2013). "**High-speed wireless networking using visible light**". *SPIE Newsroom*. doi: 10.1117/2.1201304.004773.

- [24] O. Alsulami, A. T. Hussein, M. Alresheedi, and J. Elmirghani, "**Optical Wireless Communication Systems, A Survey**", Dec 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.11751.09129.
- [25] F. B. Zafar, "**Efficient Utilization of LEDs and LDs for Illumination and Visible Light Communication (VLC)**", April 2018, doi: 10.4225/03/5aceffd8866c5.
- [26] G. Pang, T. Kwan, Chi-Ho Chan and Hugh Liu, "**LED traffic light as a communications device**," *Proceedings 199 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Tokyo, Japan, 1999, pp. 788-793, doi: 10.1109/ITSC.1999.821161.
- [27] Y. Tanaka, S. Haruyama and M. Nakagawa, "**Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links**," *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No.00TH8525), London, UK, 2000, pp. 1325-1329 vol.2, doi: 10.1109/PIMRC.2000.881634.
- [28] O'Brien, D. C. et al., "**Home access networks using optical wireless transmission**," *2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699864.
- [29] Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V. and Parthiban, R., "**LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art**," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649-1678, thirdquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2417576.
- [30] Cossu, G., Khalid, A., Choudhury, P., Corsini, R. and Ciaramella, E., "**3.4 Gbit/s Visible Optical Wireless Transmission Based on RGB LED**," *Optics Express*, 20, 26 (2012) B501–B506.
- [31] Huang, X., Shi, J., Li, J., Wang, Y. and Chi, N., "**A Gb/s VLC Transmission Using Hardware Preequalization Circuit**," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 18, pp. 1915-1918, 15 Sept.15, 2015, doi: 10.1109/LPT.2015.2445781.
- [32] Singh, R., O'Farrell, T. and David, J. P. R., "**An Enhanced Color Shift Keying Modulation Scheme for High-Speed Wireless Visible Light Communications**," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 14, pp. 2582-2592, 15 July15, 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2328866
- [33] Hagem, R. M., Thiel, D. V., O'Keefe, S. G. and Fickenscher, T., "**Optical wireless communication for real time swimmers feedback: A review**," 2012

International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2012, pp. 1080-1085, doi: 10.1109/ISCIT.2012.6380853.

[34] “VenturaBeat”, website[On-line].Erişim:(<https://venturebeat.com/mobile/air-france-and-oledcomm-partner-on-first-commercial-flight-with-li-fi/>) Erişim tarihi: 05 Eylül 2018.

[35] Rabia, N. Ali, S. Ali, A. Sajid, and A. Zafar, “**A SECURITY REVIEW OVER WI-FI AND LI-FI**”, *Inform. manag. comp. sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 01–09, Apr. 2020, doi: 10.26480/imcs.01.2020.01.09

[36] G. Cossu, “**Recent achievements on underwater optical wireless communication \[Invited\]**”, *Chin. Opt. Lett.*, vol. 17, no. 10, p. 100009, Oct. 2019, doi: 10.3788/COL201917.100009.

[37] L. U. Khan, “**Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges**”, *Digit. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, May 2017, doi: 10.1016/j.dcan.2016.07.004.

[38] S. Rajagopal, R. D. Roberts and S. -K. Lim, “**IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support**,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72-82, March 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.

[39] N. LaSorte, W. J. Barnes and H. H. Refai, “**The History of Orthogonal Frequency Division Multiplexing**,” *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, New Orleans, LA, USA, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.690.

[40] Z. Wang, T. Mao and Q. Wang, “**Optical OFDM for visible light communications**,” *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Valencia, Spain, 2017, pp. 1190-1194, doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986454.

[41] Özen, B., 2022,. IM/DD İletişim Sistemleri İçin DCO-OFDM’e Alternatif Yeni Bir Optik OFDM Dalga Formu Tasarımı. Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Lisans Tezi, Kayseri, 90 s.

[42] R. Alindra, M. O. Fauzan, R. Ramadhan and S. Rahardjo, “**Performance Analysis of DCO-OFDM and ACO-OFDM for Visible Light Communication System**,” *2018 3rd International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)*, Depok, Indonesia, 2018, pp. 84-90, doi: 10.1109/ISSIMM.2018.8727737.

[43] Wilson, S. K. and Armstrong, J., “**Transmitter and receiver methods for**

improving asymmetrically-clipped optical OFDM," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 9, pp. 4561-4567, September 2009, doi: 10.1109/TWC.2009.080524.

[44] Dimitrov, S., Sinanovic, S. and Haas, H., "**Clipping Noise in OFDM-Based Optical Wireless Communication Systems,**" in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 4, pp. 1072-1081, April 2012, doi: 10.1109/TCOMM.2012.022712.100493.

[45] Şenel, M. C., 2022,. Yoğunluk Modülasyonu/Doğrudan Algılama Sistemleri İçin Spektrum Verimli Yeni Bir ACO-OFDM Dalga Formu. Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Lisans Tezi, Kayseri, 77 s.

[46] J J. Armstrong, B. J. C. Schmidt, D. Kalra, H. A. Suraweera and A. J. Lowery, "**SPC07-4: Performance of Asymmetrically Clipped Optical OFDM in AWGN for an Intensity Modulated Direct Detection System,**" *IEEE Globecom 2006*, San Francisco, CA, USA, 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/GLOCOM.2006.571.

[47] N. Fernando, Y. Hong and E. Viterbo, "**Flip-OFDM for optical wireless communications,**" *2011 IEEE Information Theory Workshop*, Paraty, Brazil, 2011, pp. 5-9, doi: 10.1109/ITW.2011.6089566..

[48] Karakoç, E., 2022,. Görünür Işık Haberleşme Sistemleri İçin Hermityen Simetrisiz Yeni Bir Optik OFDM Tekniği. Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Lisans Tezi, Kayseri, 70 s.

[49] T. Kepezkaya and A. Özen, "**An Investigation of the Effects of the Transform Techniques in Optical-OFDM Systems,**" *2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Safranbolu, Turkey, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU55565.2022.9864909.

[50] Sarbazi, E. and Uysal, M., "**PHY layer performance evaluation of the IEEE 802.15.7 visible light communication standard,**" *2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*, 2013, pp. 35-39, doi: 10.1109/IWOW.2013.6777772.

[51] Singh, R., O'Farrell, T. and David, J. P. R., "**Performance evaluation of IEEE 802.15.7 CSK physical layer,**" *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2013, pp. 1064-1069, doi: 10.1109/GLOCOMW.2013.6825133.

[52] Tugcu, E., Albayrak, C., Yazgan, A., Simsek, C. and Turk, K., "**Bit error rate analysis for color shift keying modulation,**" *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2018, pp. 1-4, doi:

10.1109/SIU.2018.8404509.

- [53] Wang, Y., Chi, N., Wang, Y., Tao, L. and Shi, J., "**Network Architecture of a High-Speed Visible Light Communication Local Area Network**," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 2, pp. 197-200, 15 Jan.15, 2015, doi: 10.1109/LPT.2014.2364955.
- [54] A. Abbate, C. DeCusatis, and P. K. Das, *Wavelets and subbands*, 2002nd ed. Cambridge, MA: Birkhäuser, 2002,doi: 10.1007/978-1-4612-0113-7.
- [55] Akdoğan, A., 2013,. *Yere Nüfuz Eden Radarlarda Lifting Temelli Dalgacık Dönüşümü İle Kargaşa Bastırma*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 87 s.
- [56] P. H. Anilkumar and P. Augusta Sophy Beulet, "**Lifting-based discrete wavelet transform for real-time signal detection**", *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 25, Oct. 2015,doi: 10.17485/ijst/2015/v8i25/80301.
- [57] Coşun, Y., 2019,. *Ayrık Dalgacık Dönüşümü Tabanlı Paralel Görüntü Sıkıştırma Sistemi Tasarımı*. Maltepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 87 s.
- [58] W. Sweldens, '**The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets**', *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, vol. 3, no. 2, pp. 186–200, Apr. 1996, doi: 10.1006/acha.1996.0015.
- [59] N. Taşpınar and Y. Tokur Bozkurt, '**PAPR reduction using genetic algorithm in lifting-based wavelet packet modulation systems**', *TURK. J. OF ELECTR. ENG. COMPUT. SCI.*, vol. 24, pp. 184–195, 2016,doi: 10.3906/elk-1306-236.