

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

**Görünür Işık Haberleşme Sistemleri İçin Ortogonal Dönüşüm
Tabanlı Yeni Bir DC Ekleme-siz Optik OFDM Tasarımı
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Elif NurAYVAZ**

**Danışman
Prof. Dr. Ali ÖZEN**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**



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

**Görünür Işık Haberleşme Sistemleri İçin Ortogonal Dönüşüm
Tabanlı Yeni Bir DC Eklemeiz Optik OFDM Tasarımı
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Elif NurAYVAZ**

**Danışman
Prof. Dr. Ali ÖZEN**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmada yer alan bütün bilgiler, akademik ve etik kurallara uygun olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği şekilde, bu çalışmaya ait olmayan bütün materyal ve sonuçları doğru şekilde aktararak referans olarak yazdığımı belirtirim.

Elif Nur AYVAZ
İmza



YÖNERGEYE UYGUNLUK

Görünür Işık Haberleşme Sistemleri İçin Ortogonal Dönüşüm Tabanlı Yeni Bir DC Eklemeiz Optik OFDM Tasarımı isimli Yüksek Lisans tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Elif Nur AYVAZ
İmza

Tez Danışmanı
Ali ÖZEN
İmza



YÜKSEK LİSANS BİTİRME TEZİ KABUL VE ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Ali Özen danışmanlığında Elif Nur AYVAZ tarafından hazırlanan “Görünür Işık Haberleşme Sistemleri İçin Ortogonal Dönüşüm Tabanlı Yeni Bir DC Ekleme-siz Optik OFDM Tasarımı” isimli bu çalışma Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

29 / 08 / 2023

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Ali ÖZEN

Üye : Prof. Dr. İbrahim DEVELİ

Üye : Doç. Dr. Ahmet GÜNER

ONAY:

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

... / ... / 2023

Prof. Dr. Erkan KÖSE
Enstitü Müdürü V.

ÖNSÖZ

Yaptığım araştırma ve çalışmalar da HARGEM'i her zaman kullanımına sunan ve evimiz gibi hissettiren, çalışmaların her adımında çok büyük yardım ve emeklerde bulunarak cesaretlendiren, ümidimi kaybettiğim anlarda doğru yöne yönlendirerek yeniden çalışmaya yönelten Prof. Dr. Ali ÖZEN'e teşekkürü borç bilirim. Kıymetli zamanını bana ayırarak sonsuz sabır ve güven verdiği için sevgili hocama minnettarım. Kendisi ile gelecekte de bir çok alanda beraber çalışmayı sabırsızlıkla bekliyor olacağım.

Çalışmalarımız boyunca Hargem de araştırmalarım ve birçok konuda benden yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşım Meryem MARAŞ'a teşekkür eder akademik ve çalışma hayatında arkadaşşıma başarılar dilerim.

Ayrıca eğitimim süresince her kararında yanımda olan, maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Hatice AYVAZ'a babam Mustafa AYVAZ'a ve kardeşlerim Gülsüm AYVAZ ve Sude Naz AYVAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos 2023

Elif Nur AYVAZ

Görünür Işık Haberleşme Sistemleri İçin Ortogonal Dönüşüm Tabanlı Yeni Bir DC Eklemesiz Optik OFDM Tasarımı

Elif Nur Ayvaz

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2023

Danışman: Prof. Dr. Ali Özen

ÖZET

Gelişmekte olan teknolojiler ve bilgiye hızlı erişim ihtiyacı sebebiyle kablosuz mobil haberleşmeye ayrılan radyo frekans (radio-frequency) bantları hemen dolmakta ve RF bandının üst sınırlarına yaklaşmaktadır. Dolayısıyla, 5G sistemleri için ayarlanacak olası frekans bantlarının üzerinde daha yüksek frekans bantlarında çalışmanın fazlasıyla güç veya olanaksız hale gelmesi kaçınılmaz olacaktır. Bu durumda yeni bir teknolojiye ihtiyaç vardır. Radyo frekans teknolojisine dikgen (ortogonal) bir haberleşme sistemi olan görünür ışık haberleşme (Visible Light Communication, VLC) sistemleri alternatif olarak tercih edilebilmektedir.

Görünür ışık haberleşmesinde, veri transferi ve oda aydınlatması için ışık saçan diyotlar (Light Emitting Diode, LED) tercih edilir. Işık bağlantısı (Light Fidelity, LiFi) olarak adlandırılan VLC'nin tamamen ağ bağlantılı versiyonu, RF tabanlı kablosuz bağlantı (Wireless Fidelity, WiFi) için tamamlayıcı bir çözüm olarak kabul edilir. VLC'deki verileri kodlamak için, dikgen frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) kullanılır. OFDM yüksek veri hızları sağlar ve sembollerarası girişime (Intersymbol Interference, ISI) dayanıklıdır. OFDM sembolleri iki kutupludur. Bu nedenle, OFDM yoğunluk modülasyonu ve doğrudan sezim (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) için kullanılabilir hale getirmek için tek kutuplu hale dönüştürülmelidir. OFDM'nin tek kutuplu formlarından bazıları asimetrik olarak kırılmış optik OFDM (ACO-OFDM), doğru akım (Direct Current, DC) eklemeli optik OFDM (DCO-OFDM), DC eklemeli olmayan optik OFDM (NDC-OFDM),dir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, MIMO ve VLC-OFDM tabanlı özgün iletim tekniklerinin başarımlarını iyileştirmek üzerine yapılan çalışmalarda, NDC-O-OFDM sisteminin performansını daha da yukarılara çıkartabilmek için maliyeti fazla olmayan ortogonal dönüşümlerden olan Lifting dalgacık dönüşümü tabanlı yeni bir DC eklemesiz optik OFDM (LWT-NDC-O-OFDM) sistemi önerilmektedir. Önerilen bu sistemde MIMO teknolojisi kullanılmış ve karmaşık OFDM işaretleri pozitif-negatif ve gerçel-sanal kısımlarına ayrılarak işaretlerin MIMO-VLC kanal üzerinden iletilmesi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin literatürdeki mevcut sistemlere kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.



Anahtar Kelimeler: Optik Kablosuz İletişim (OWC), MIMO Sistemler, Görünür Işık Haberleşmesi (VLC), NDC-O-OFDM, Lifting Dalgacık Dönüşümü (LWT).

A New DC Additionless Optical OFDM Design Based on Orthogonal Conversion for Visible Light Communication Systems

Elif Nur Ayvaz

Nuh Naci Yazgan University

Graduate Studies in Science and Engineering

Electrical and Electronic Engineering

Master Thesis, August 2023

Supervisor: Prof.Dr. Ali OZEN

SUMMARY

Due to the developing technologies and the need for fast access to information, the radio frequency bands reserved for wireless mobile communication are rapidly filling up and approaching the upper limits of the RF band. Therefore, it will inevitably become too difficult or impossible to operate in higher frequency bands above the possible frequency bands to be adjusted for 5G systems. In this case, a new technology is needed. Visible Light Communication (VLC) systems, which is a communication system orthogonal to RF technology, can be preferred as an alternative.

In visible light communication, light emitting diodes (Light Emitting Diode, LED) are preferred for data transfer and room lighting. The fully networked version of VLC, called Light Fidelity, LiFi, is considered a complementary solution for RF-based wireless connectivity (Wireless Fidelity, WiFi). Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is used to encode data in VLC. OFDM provides high data rates and is resistant to Intersymbol Interference (ISI). However, OFDM symbols are complex and bipolar. Therefore, OFDM symbols need to be converted to real and unipolar in order to be used for intensity modulation and direct detection (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD). Some of the unipolar forms of OFDM are asymmetrically clipped optical OFDM (ACO-OFDM), direct current (Direct Current, DC) biased optical OFDM (DCO-OFDM) and non-DC biased optical OFDM (NDC-OFDM).

In this master's thesis, in studies on improving the performance of MIMO and VLC-OFDM-based original transmission techniques, in order to further increase the performance of the NDC-O-OFDM system, a new DC biasless optical OFDM based on Lifting wavelet transform (LWT-NDC-O-OFDM) system is recommended. In this proposed system, MIMO technology is used and complex OFDM signals are divided into positive-negative and real-imaginary parts and the signals are transmitted over the MIMO-VLC channel. It has been seen that the proposed system gives more successful results compared to the existing systems in the literature.



Keywords: Optical Wireless Communication (OWC), MIMO Systems, Visible Light Communication (VLC), NDC-O-OFDM, Lifting Wavelet Transform (LWT).

İÇİNDEKİLER

Bilimsel Etiğe Uygunluk	IV
Yönergeye Uygunluk	V
Yüksek Lisans Bitirme Tezi Kabul ve Onay Sayfası.....	VI
Önsöz.....	VII
Özet	VIII
İçindekiler	XII
Kısaltmalar Dizini	XIV
Semboller Dizini	XVII
Şekiller Dizini	XIX
Tablolar Dizini	XXVI

1. GİRİŞ	1
1.1. Gelecek Nesil Haberleşme Ağı Teknolojilerinin Evrimi	2
1.2. 5G Ve Ötesi	3
1.3 5G ve Ötesinde Önerilen Haberleşme Teknikleri	4
1.4 6G Teknolojisi	5
1.4.1 6G İçin Anahtar Performans Göstergeleri (KPI'ler)	6
1.4.1.1 Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR)	6
1.4.1.2 Holografik Telepresence (Işınlanma)	7
1.4.1.3 e-Sağlık	8
1.4.1.4 Yaygın Bağlantı	8
1.4.1.5 Endüstri 4.0 ve Robotik	9
1.4.1.6 İnsansız Hareketlilik	9
1.4.2 5G ve 6G Karşılaştırması	11
2. 6G TEKNOLOJİSİ İÇİN OPTİK KABLOSUZ HABERLEŞME	15
2.1 Görünür Işık Haberleşmesinin Özellikleri Ve Gereği	16
2.2 Görünür Işık Haberleşmesi (VLC)	19
2.3 Görünür Işık Haberleşmesi Uygulama Alanları	23
2.4 Görünür Işık Haberleşmesinin (VLC'nin) Sistem Modeli	23
2.5 IM/DD Sistemleri ve Modülasyon Çeşitleri	25
2.5.1 IM/DD'li Sistemler	25
2.5.2 Modülasyon Çeşitleri	29
3. OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE DİKGEN FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA (O-OFDM) YÖNTEMİ	32
3.1 DC Eklemeli Optik OFDM (DCO-OFDM).....	34
3.2 Asimetrik Olarak Kırpılmış Optik OFDM (ACO-OFDM)	36
3.3 VLC Sistemlerinde Çok Girişli Çok Çıkışlı Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (MIMO-OFDM).....	38
4. VLC İÇİN YENİ BİR OPTİK DALGA FORMU TASARIMI	42
4.1 DC Eklemesiz Optik OFDM Tekniği (NDC-O-OFDM)	45
4.2 Sistem Başarımını Artırmaya Yönelik Çalışmalar	49
4.2.1 Lifting Dalgacık Dönüşümü (LWT)	49
4.2.1.1 Dalgacık Aileleri	50
4.2.1.1.1 Haar Dalgacığı	50

4.2.1.1.2	Daubechies Dalgacığı	50
4.2.1.1.3	Coiflet Dalgacığı	51
4.2.1.1.4	Bi-Ortogonal Dalgacık	51
4.2.1.1.5	Symlet Dalgacığı	53
4.3	Önerilen LWT-NDC-O-OFDM Dalga Formu	56
5.	BİLGİSAYAR BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI	59
5.1	2x2 MIMO Sistemleri Bilgisayar Benzetim Çalışmaları ve Sonuçları...	60
5.2	4x4 MIMO Sistemleri Bilgisayar Benzetim Çalışmaları ve Sonuçları...	73
6.	SONUÇLAR	144
7.	KAYNAKÇA	146



KISALTMALAR DİZİNİ

3G	: 3. Nesil
4G	: 4. Nesil
5G	: 5. Nesil
6G	: 6. Nesil
ACO-OFDM	: Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM
ADD	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü
AL	: Yapay Zeka
AR	: Arttırılmış Gerçeklik
AWGN	: Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	: Bit Hata Oranı
BİOR	: Biorthogonal Dalgacığı
BPSK	: İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
COİF	: Coiflets Dalgacığı
CP	: Çevrimsel Önek
CSK	: Renk Kaydırmalı Anahtarlama
Db	: Daubechies Dalgacığı
dB	: Desibel
DC	: Doğru Akım
DCO-OFDM	: DC Eklemeli Optik OFDM
DD	: Doğrudan Sezim
FET	: Alan Etkili Transistör
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
ICI	: Taşıyıcılar Arası Girişim
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
IM	: Yoğunluk Modülasyonu
IMT	: Uluslararası Mobil Telekomünikasyon
IoT	: Nesnelerin İnterneti
ISI	: Sembollerarası Girişim
KPI	: Temel Performans Göstergesi
LD	: Lazer Diyot
LED	: Işık Yayan Diyot

LiFi	: Işık bağlantısı
LOS	: Doğrudan İletim Hatlı
LTE	: Uzun Vadeli Evrişim
LWT	: Lifting Dalgacık Dönüşümü
MATLAB	: MATris LABaratuvarı
mBRLLC	: Mobil Geniş Bant Güvenilir Düşük Gecikmeli Haberleşme
MCM	: Çok Taşıyıcılı Modülasyon
MIMO	: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
MMS	: Multimedya Mesajları
mMTC	: Devasa Makine Tipi Haberleşme
mURLLC	: Devasa Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim
MWC	: Milimetre Dalga Haberleşmesi
NDC-OFDM	: DC Eklemeziz Optik OFDM
NLOS	: Doğrudan Olmayan İletim Hattı
OFDM	: Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama
OOK	: Açma-Kapama Anahtarlama
OWC	: Optik Kablosuz İletişim
PAM	: Darbe Genlik Modülasyonu
PAPR	: Tepe Ortalama Güç Oranı
PPM	: Darbe Konum Modülasyonu
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
QAM	: Karesel Genlik Modülasyonu
QoE	: Deneyim Kalitesi
QoPE	: Fiziksel Deneyim Kalitesi
QoS	: Hizmet Kalitesi
QPSK	: Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama
RF	: Radyo Frekans
RFID	: Radyo Frekansı İle Tanımlama Teknolojisi
SISO	: Tekli Giriş Tekli Çıkış
SM	: Uzaysal Modülasyon
SNR	: İşaret/Gürültü Oranı
SYM	: Symlets Dalgacığı
TBPS	: Terabayt

THz	: Terahertz
URLLC	: Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim
UV	: Ultraviyole
VLC	: Görünür Işıkla Haberleşme
VR	: Sanal Gerçeklik
WIMAX	: Mikrodalga Erişim İçin Evrensel Uyumluluk
WiFi	: Kablosuz Bağlantı



SEMBOLLER DİZİNİ

A_{PD}	: Foto-dedektör Yüzey Alanı
A_r	: Alıcının Fiziksel Dedektör Alanı
C_p	: Foto-dedektörün Birim Alanı Başına Sabit Kapasitesi
P_r	: Alınan Optik Güç
P_t	: Gönderilen Optik Güç
T_k	: Mutlak Sıcaklık
$T_s(\psi_r)$	: Optik Filtre Kazancı
X_k	: Dalgacık Bölgesindeki Sinyal
d_{Tx}	: LED'ler Arası Mesafe
l_{bg}	: Foto-akımı
n_R	: Alıcı Sayısı
n_T	: Verici Sayısı
ψ_c	: Foto-dedektörün Görüş Alanı Yarım Açısı
$\sigma_{atış}^2$	: Atış Gürültü Varyansı
$\sigma_{ısı}^2$	: Termal Gürültü Varyansı
ψ_r	: Alıcı Eksenine Göre Geliş Açısı
ϕ_t	: Verici Eksenine Göre Ayrılma Açısı
$h(t)$	: Kablosuz Optik Kanalin Etkisi
$U(.)$	: Güncelleme Operatörü
B	: Bant Genişliği
$E\{. \}$	: Beklenen Değer Hesabı
G	: Açık Çevrim Gerilim Kazancı
H	: Kanal Matrisi
N	: Taşıyıcı Sayısı
$P(.)$	: Öngörü Operatörü
R	: Foto-dedektör Duyarlılığı
m	: Lambertian Yayılımının Mertebesi
$n(t)$	: Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü
q	: Elektron Yüğü
$x(t)$	: Zaman Bölgesindeki Optik Sinyal
$y(t)$	: Alınan Elektriksel İşaret

η	: Bant Verimliliği
κ	: Boltzmann Sabiti
μ	: Ortalama
σ	: Standart Sapma
$\varphi(t)$	: Ölçekleme Fonksiyonu
$\psi(t)$	: Dalgacık Fonksiyonu



ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 1.1 : Telekomünikasyon evriminin gelişimi
- Şekil 1.2 : 6G ağlarının temel yetenekleri
- Şekil 1.3 : Holografik Telepresence
- Şekil 1.4 : Ana konsol ile tele-operatör arasındaki iletişimi açıklayan bir döngü
- Şekil 1.5 : Endüstri 4.0 ve robotik
- Şekil 1.6 : Dron deneyimi
- Şekil 1.7 : Akıllı ağ
- Şekil 2.1 : Görünür ışık haberleşmesinin elektromanyetik spektrumu
- Şekil 2.2 : LED'in içyapısı
- Şekil 2.3 : VLC sistemlerinin blok diyagramı
- Şekil 2.4 : IM/DD'de görünür ışık dalga boyu ve foto-dedektör aktif alanı
- Şekil 2.5 : VLC kanalının IM/DD'li blok şeması
- Şekil 2.6 : IM/DD etkili VLC Kanal Modeli
- Şekil 3.1 : VLC sistemlerinde DCO-OFDM yönteminin blok diyagramı
- Şekil 3.2 : VLC sistemlerinde ACO-OFDM yönteminin blok diyagramı
- Şekil 3.3 : MIMO-OFDM sistem modeli
- Şekil 4.1 : Klasik NDC-O-OFDM blok şeması
- Şekil 4.2 : 4x4 MIMO NDC-O-OFDM blok diyagramı
- Şekil 4.3 : Haar Dalgacığına ait Dalgacık fonksiyonu ($\psi(t)$) ve Ölçekleme fonksiyonu ($\varphi(t)$).
- Şekil 4.4 : Daubechies Ailesine Ait Dalgacık Fonksiyonları.
- Şekil 4.5 : Coiflet Ailesine Ait Bazı Dalgacık Çeşitleri
- Şekil 4.6 : Bior Ailesinin Dalgacık Fonksiyonları
- Şekil 4.7 : Symlets Ailesinin Dalgacık Fonksiyonları
- Şekil 4.8 : Lifting dalgacık dönüşümü şeması
- Şekil 4.9 : Ters Lifting dalgacık dönüşümü şeması
- Şekil 4.10 : 2x2 MIMO LWT-NDC-O-OFDM blok şeması
- Şekil 4.11 : 4x4 MIMO LWT-NDC-O-OFDM blok şeması
- Şekil 5.1 : BPSK modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması.
- Şekil 5.2 : BPSK modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması

- Şekil 5.3 : BPSK modülasyonunda Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.4 : 4 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.5 : 4 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.6 : 4 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.7 : 8 QAM modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.8 : 8 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.9 : 8 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.10 : 16 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.11 : 16 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.12 : 16 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.13 : 64 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.14 : 64 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.15 : 64 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.16 : 2x2'lik MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile tüm modülasyonlarda karşılaştırması
- Şekil 5.17 : BPSK modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.18 : BPSK modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.19 : BPSK modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.20 : BPSK modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC,

- ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.21 : BPSK modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.22 : BPSK modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.23 : BPSK modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.24 : BPSK modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.25 : BPSK modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.26 : BPSK modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.27 : BPSK modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması
- Şekil 5.28 : BPSK modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.29 : 4 QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.30 : 4 QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.31 : 4 QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.32 : 4 QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.33 : 4 QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.34 : 4 QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.35 : 4 QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.36 : 4 QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.37 : 4 QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.38 : 4 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.39 : 4 QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.40 : 4 QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması

- Şekil 5.41 : 4 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması
- Şekil 5.42 : 4 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.43 : 8 QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.44 : 8 QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.45 : 8 QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.46 : 8 QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.47 : 8 QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.48 : 8 QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.49 : 8 QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.50 : 8 QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.51 : 8 QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.52 : 8 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.53 : 8 QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.54 : 8 QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.55 : 8 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması
- Şekil 5.56 : 8 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.57 : 16 QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.58 : 16 QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.59 : 16 QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.60 : 16 QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-

- OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.61 : 16 QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.62 : 16 QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.63 : 16 QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.64 : 16 QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.65 : 16 QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.66 : 16 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.67 : 16 QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.68 : 16 QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.69 : 16 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması
- Şekil 5.70 : 16 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.71 : 64 QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.72 : 64 QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.73 : 64 QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.74 : 64 QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.75 : 64 QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.76 : 64 QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.77 : 64 QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.78 : 64 QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.79 : 64 QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.80 : 64 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin ACO-OFDM, Klasik VLC ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması

- Şekil 5.81 : 64 QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması
- Şekil 5.82 : 64 QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması
- Şekil 5.83 : 64 QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması
- Şekil 5.84 : 64 QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması
- Şekil 5.85 : 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H020 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması
- Şekil 5.86 : 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H030 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması
- Şekil 5.87 : 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H040 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması
- Şekil 5.88 : 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H045 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması
- Şekil 5.89 : 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H060 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması
- Şekil 5.90 : 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H070 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması
- Şekil 5.91 : BPSK modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.92 : 4 QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.93 : 8 QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.94 : 16 QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.95 : 64 QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.96 : BPSK modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.97 : 4 QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması

- Şekil 5.98 : 8 QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.99 : 16 QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.100 : 64 QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.101 : BPSK modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.102 : 4 QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.103 : 8 QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.104 : 16 QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması
- Şekil 5.105 : 64 QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1	: 5G ile 6G Karşılaştırması
Tablo 2.1	: Görünür Işık ve Radyo Frekansı İletişim Teknolojilerinin Kıyaslaması
Tablo 2.2	: LED'lerin, Akkor ve Florasan lambalar ile Kıyaslanması
Tablo 2.3	: VLC'de farklı modülasyon türlerinin karşılaştırılması
Tablo 3.1	: Tipik OFDM Sistem İle Tipik Optik Sistemin Karşılaştırılması
Tablo 3.2	: DCO-OFDM ve ACO-OFDM Karşılaştırma Özeti



1. BÖLÜM : GİRİŞ

Kablosuz haberleşme sistemlerinin son zamanlarda kullanım alanlarının artmasıyla radyo frekansı (RF) bantları doluluk seviyelerine yükselmektedir. Bu artışın yakın zamanda kablosuz haberleşme sistemlerinin kullanımını sınırlaması muhtemeldir. Bu sebeple alternatif olabilecek haberleşme sistemlerinin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda geliştirilmesi hedeflenen sistemlerden birisi de veri transferini ışık üzerinden gerçekleştiren görünür ışık haberleşme (VLC) sistemleridir.

VLC, görünür spektrumdaki ışık dalgaları aracılığıyla veri gönderen bir iletişim teknolojisidir. Görünür ışık haberleşme sistemleri; RF, zigbee, bluetooth, Wi-fi gibi kablosuz haberleşme araçlarına alternatif olarak geliştirilmektedir. Görünür ışık haberleşme sistemleri, yüksek hızda veri transferi gerçekleştirebilen çoklu katman teknolojisini destekleyen Kablosuz Ağ IEEE 802.15.7 standardına kısa mesafe optik haberleşme ismiyle dâhil olmuştur. VLC dalga boyları aralığı (380 nm - 750 nm) arasındadır. İnsan gözüyle algılanabilen dalga boyları da (375nm - 780nm) arasında yer aldığı için VLC olarak isimlendirilmiştir. VLC’de verici olarak LED, lazer gibi ışık saçan diyotlar kullanılmaktadır [1]. LED gibi ışık kaynakları sayesinde görünür ışık haberleşme sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. İletilmek istenen verinin, ışık kaynağının hızlı bir şekilde açılıp kapanması ile gerçekleşiyor olması, ışık kaynağının önemine değinmektedir. LED kaynaklar ise 20 MHz’den fazla açma-kapama hızına sahip, farklı renklerde ışık üretebilen ve ucuz ışık kaynakları olarak, görünür ışık haberleşme sistemlerinde kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmektedir. Bu teknolojinin avantajları lisanssız frekans kullanımı, düşük maliyet, daha uzun ömür ve daha düşük güç tüketimidir. Aydınlatma cihazları LED ampuller kullandığından, bu teknoloji ucuzdur. Akkor lambalarla karşılaştırıldığında, LED’ler ayrıca güç tüketimi için daha dayanıklı ve daha verimlidir. Mobil kablosuz teknolojinin ardışık gelişiminin devam etmesi üzerine 2025’te 6G’nin ortaya çıkması beklenmektedir. Yeni teknoloji, 5G’nin teknolojik sınırlamaların çözüm sağlamak üzere tasarlanacak. 6G’nin, özellikle

yüksek trafik artışı ve iç mekan ağ performansının verimliliği ile başa çıkmada 5G'den daha mükemmel bir kullanım sağlaması beklenmektedir. Bu arada, 6G için yeni bir teknolojik platform inşa etme çabası içinde, araştırmacılar, terahertz spektrumu üzerinden radyo iletişiminin potansiyel kullanımını incelemeye başladılar ve VLC, üzerinde kullanılan birincil teknolojidir.

VLC, devasa bant genişliği ve THz frekanslarında çalışması nedeniyle 6G'yi destekleyen bir teknoloji olarak kabul edilir. Bu tür yüksek çalışma frekansları, bant genişliğini ve kapasitesini etkileyecektir, öyle ki kullanılan frekans seviyesi yükseldikçe, mevcut bant genişliği de artış gösterir ve bu da daha yüksek kapasite ve veri hızına yol açar.

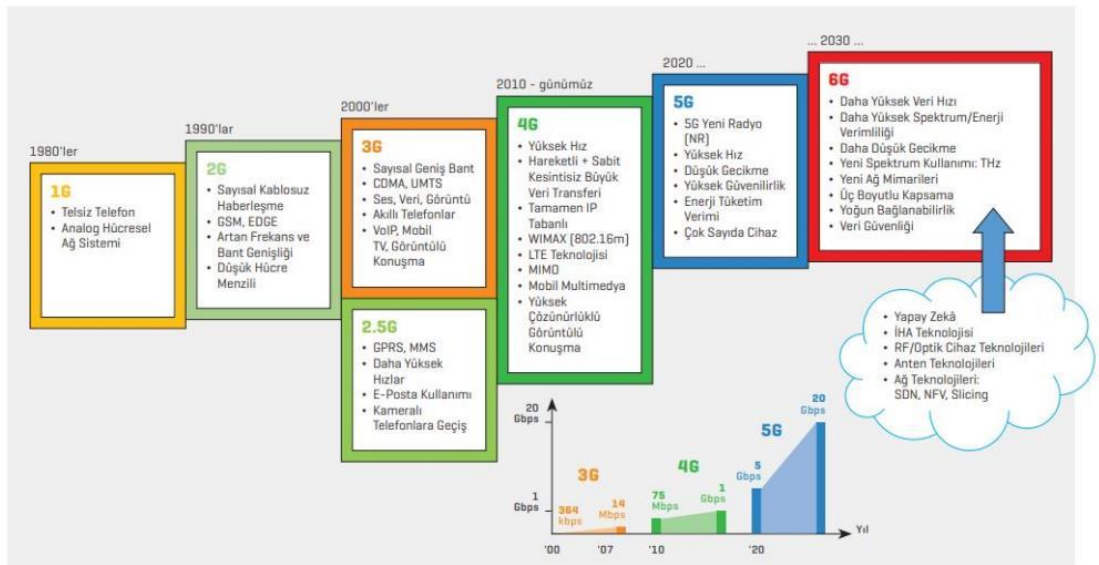
Son zamanlarda, özellikle veri iletim hızlarındaki yüksek artışlar sonucu, güvenilir iletişimi sağlamak için dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) yöntemi vb. çok taşıyıcılı yöntemler optik haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. OFDM tekniği; gerek bant-verimliliğiyle gerekse ISI problemine karşı sunduğu etkili çözümlerle VLC için gelecek vaadeden bir iletim tekniği olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.1. Gelecek Nesil Haberleşme Ağı Teknolojilerinin Evrimi

Mobil veri miktarındaki fazla artışlar, yüksek hızlı kablosuz haberleşmeye olan ilginin artmasına, düşük gecikmeye sahip ve ultra güvenilir iletişime olan gereksinimin artması vb. nedenler, kablosuz haberleşme sektörünü, yeni nesil mobil ağ geliştirmek için motive etmektedir. Bu ihtiyaçları karşılayabilmek adına araştırmalar yapılmaktadır ve 4G haberleşme teknolojisi olan LTE ağlarına sürekli iyileştirmeler yapılmaktadır. Bununla beraber sadece haberleşme sektöründe değil, pek çok sektörde de dönüşüm sağlayan, yeni çalışma alanları ve iş yapma şekillerini mümkün hale getiren 5G teknolojisi hayatımıza dahil olmakta ve önemi giderek artış göstermektedir [2].

Analog telefon ve kısa mesajlaşma gibi ilk kablosuz haberleşmelerden günümüze kadar geniş bant ve tümüyle IP tabanlı iletişim teknolojilerinde elde edilen gelişmeler ile birlikte, mobil kablosuz ağlar da gelişim göstermektedir. İsteyenlerin görüşmeleri dinleyebildiği ve haberleşme güvenliğinin sağlanamadığı 1G analog kablosuz haberleşme sistemlerinde, veri iletimi yapılamamaktadır ve sadece sesli görüşmeye imkan sunulmaktadır. 2G ile hayatımıza giren sayısal GSM teknolojisi ve bu teknolojinin içine GPRS, EDGE ve MMS teknolojilerinin eklenmesiyle, bant genişliği artsa da yüksek frekans kullanımı nedeniyle sınırlı hücre mesafesi elde edilmiştir. 3G ile

birlikte akıllı telefonlar kullanılmaya başlanmış; EDGE teknolojisi sayesinde veri hızı artmış, görüntü iletimi de mümkün hale gelmiştir. Görüntülü konuşmaya ek, akıllı telefonlar üzerindeki ağ tarayıcıları ve internet tabanlı oyun uygulamaları kullanılmaya başlanmıştır. 4G ile sabit ve hareketli kullanıcıların yüksek hızda, kesintisiz şekilde tamamen IP tabanlı veri transferi ve haberleşme mümkün olmuştur. Bu değişim sayesinde, günümüzde 4G ve 5G gibi yeni nesil haberleşme tekniklerine ulaşılmıştır. Şekil 1.1’de de bu haberleşme tekniklerinin evrimsel gelişimi verilmektedir. Enerji verimi, hesaplama gücü, veri işleme zekâsı, yüksek hız, düşük gecikme, anten tasarımı ve insansız araç koordinasyonu gibi alanlarda kaydedilen hızlı gelişmeler sayesinde gerçekleşecek 5G ve ötesi haberleşme teknikleriyle daha verimli ve akıllı, çevreye duyarlı, otonom haberleşme sistemleri mümkün olabilecektir. 6G ile daha yüksek veri hızı, modülasyon, kodlama ve yeni anten teknolojilerinin desteğiyle daha yüksek enerji ve spektrum verimliliği, daha düşük erişim gecikmesi, 3 boyutlu ultra yoğun bağlanabilirlik gibi özelliklerin gerçekleştirilebilmesi hedeflenmektedir [3].



Şekil 1.1. Telekomünikasyon evriminin gelişimi.

1.2. 5G Ve Ötesi

5G'nin ötesindeki çalışmalar; temel kablosuz haberleşmesinin güncellenmesi, daha verimli dinamik spektrum yönetimi, yapay zekâ temelli yenilikçi iş planları ve sistem tasarımıdır. Bu kavramların bir kısmı 5G ile de ortak olmakla beraber verimliliği arttırıcı uygulamaların dâhil edilmesi 5G uygulamalarını daha öteye taşıyacaktır.

Yazılımın önünün açılması ile 5G kendi içinde yapay zekâ ile yenilenerek ilerleme sağlayacağı görülmektedir.

5G ötesindeki taleplerin Terabit hız seviyelerinde ölçüleceği ve belki 6G ile adlandırılacak çalışmaların 2030'dan sonra gerçekleşeceği öngörülmektedir. 5G çalışmalarının tersine 300 GHz'in üstündeki frekansların da çalışmalara dâhil edilmesi 6G'nin kendine özel özelliklerinden olacaktır. Bu frekansların özellikle biosensörler gibi kısa mesafeye veri transfer eden ürünlerde katkı sağlayacağı tahmin edilmektedir. RF ortamında kirlilik yaratma ihtimali düşük olduğundan 50GHz'lik kanal genişliklerinin tanımlanması mümkün olacaktır. Kirliliğin azlığı sebebiyle yeni modülasyon teknikleri bu kanal genişliklerini çok daha verimli kullanacaktır. Günümüzde de bu frekansların fiziksel koşullardaki performansını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

1.3. 5G ve Ötesinde Önerilen Haberleşme Teknikleri

IEEE 802 kablosuz haberleşme standartları, mevcut duruma yönelik ve gelecekte kullanılması planlanan uluslararası bir standarttır. Bilim insanları VLC sistemlerini gelecek nesil haberleşme ve ağ iletimi için potansiyel bir araştırma alanı olarak görmektedirler. Özellikle iç mekan aydınlatma sistemleri üzerine yoğunlaşarak kablosuz haberleşme kapasitesinin sistem fonksiyonları üzerindeki etkilerinin azaltılması ve ortaya çıkan zorlukların belirlenmesi üzerine çalışmaktadırlar. Gelişmekte olan bu teknolojinin yaygın olarak günlük yaşamımızdaki veri transferinde kullanılabilmesi için sistemin Gb/s hızına erişmesi gerekmektedir. Sistem tasarımında; Gb/s hızında iletim sağlanırken data transferinin aydınlatma özelliği üzerindeki oluşabilecek bozucu etkilerin giderilmesini sağlamak, farklı ortamlarda etkin karartma kontrol tekniklerinden faydalanılarak yeterli aydınlatma seviyesini standartlara uygun şekilde ayarlamak, karartma sisteminin modülasyon tekniği ile uyumlu olarak çalışmasını sağlamak, çok yollu iletim kanal karakteristikleri sorununu çözmek, mobilite yönetimini oluşturmak ve geliştirmek, çift yönlü haberleşme sağlamak karşılaşılan sorunlar arasında yer almaktadır. Ayrıca dış mekan haberleşmesinde ortaya çıkan sorunlar; sistem güvenilirliği, sistem tasarımı, kanal kodlama yöntemleri, ağ iletimi ve kapsama alanı sorunlarıdır.

Bu alanda çalışan bilim insanları, varolan ve gelecekte VLC teknolojisi üzerinde olumlu çözümler üretebilecek yeni tasarım örnekleri üzerinde çalışmalarını

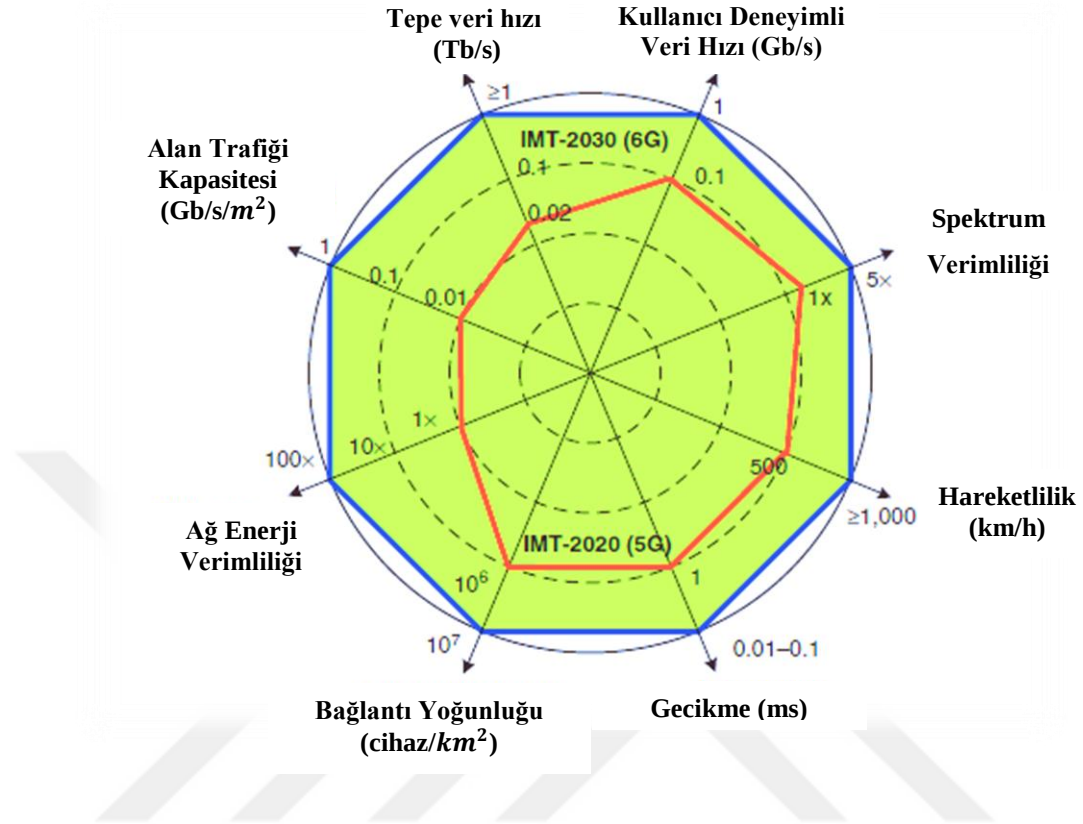
sürdürmektedirler. Kablosuz haberleşme hayatımızın her yerindedir. Gelecekte kablosuz haberleşme için 6G ve ilerisinde VLC ve milimetre dalga haberleşmesi (Millimeter Wave Communication, MWC) kablosuz haberleşmeye yeni bir soluk olmaya hazırlanmaktadır. Gerçekten bu teknolojiler mevcut haberleşme ve gelecekte artacak haberleşme gereksinimi için bulunmaz bir nimet olacaktır. Uzun zamandır süren 5G ve ötesinde kullanılacak dalga biçimi çalışmalarında düşük sinyal oranlarında çalışacak, yüksek verimliliğe sahip, düşük bit hatasına sahip kusursuz bir dalga biçimi uzun zamandır aranmaktadır. Gelecekte bulunacak teknolojilerinde kaderini oluşturacak haberleşme sistemleri gerek sağlık gerek uzay bilimleri gerek nanobilim sektörleri içinde çığır açacaktır.

1.4. 6G Teknolojisi

6G teknolojisi, yeni nesil telekomünikasyon dünyasını yeni bir üyesidir. 6G'nin açılımı "Mobil Gerçeklik Hologram Teknolojisi" dir. 6G, 5G teknolojisinden sonra gelen, 5G ağlarından daha yüksek frekansları kullanarak, önemli ölçüde düşük gecikme süresi ve yüksek kapasite sağlayabilen altıncı nesil ağ teknolojisidir. 2030 yılına kadar 5G kapasitesinin sınırına ulaşacağı tahmin edildiğinden, mobil kablosuz teknolojinin ardışık gelişiminin devam etmesi üzerine 2030'da 6G'nin ortaya çıkması beklenmektedir. 5G, gecikme süresi, enerji, maliyetler, donanım karmaşıklığı, verim ve uçtan uca güvenilirlik konusunda ödünleşimler sunar. Örneğin, mobil geniş bant ve düşük gecikmeli, ultra güvenilir iletişim gereksinimleri, 5G ağlarının farklı yapılandırmalarıyla karşılanır. 6G ise aksine, öngörülen ekonomik, sosyal, teknolojik ve çevresel bağlam göz önünde bulundurularak katı ağ taleplerini (örneğin, ultra yüksek güvenilirlik, kapasite, verimlilik ve düşük gecikme süresi) bütünsel bir şekilde ortaklaşa karşılamak üzere geliştirilecektir [4]. Ardından, gelişmiş hizmetlerin sağlanması için tamamen akıllı ağ uyarlaması ve yönetimi, yalnızca 6G ağları kullanarak gerçekleştirilecektir. Bu nedenle, 6G kablosuz iletişim, 5G ağının sunabileceklerinin ötesine geçen kullanıcı ihtiyaçlarının bir sonucudur.

Yeni teknoloji, 5G'nin teknolojik sınırlamalarına çözüm sağlamak üzere tasarlanacaktır. 6G'nin hedefleri arasında, bir milisaniye iş hacminden bin kat daha hızlı olan bir mikro saniye gecikmeli iletişimi sağlamak vardır. 6G'nin, özellikle yüksek trafik artışı ve iç mekan ağ performansının verimliliği ile başa çıkmada 5G'den daha mükemmel bir kullanım sağlaması beklenmektedir. 6G (IMT-2030) ve 5G (IMT-2020)

için anahtar performans göstergesinin (Key Performance Indicator, KPI) karşılaştırılması aşağıdaki şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Bu teknoloji gelişim aşamasının sonunda 5G'nin yerini alacaktır. 6G teknolojisini kullanması beklenen bazı uygulama örnekleri arasında çok-duyulu çapraz gerçeklik uygulamaları, robotik ve otonom kombinasyonu, yapay zeka (AI) ve blok zinciri (blockchain) yer alır. 6G teknolojisi kullanım durumu, kitlesel iletişim, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR), holografik telepresence (ışınlanma), e-sağlık, iç mekan kapsama alanı, endüstri 4.0, robotik, akıllı şehir ve insansız hareketliliklerdir [4].

1.4.1. 6G İçin Anahtar Performans Göstergeleri (KPI'ler)

Bu bölümde, genelliği ve tamamlayıcılığı nedeniyle gelecekteki 6G hizmetlerini iyi temsil ettiğine inanılan kullanım durumlarının özelliklerini ve öngörülen gereklilikleri verilmektedir.

1.4.1.1 Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR)

4G sistemleri, o dönemde en çok veri tüketen uygulamalardan biri olan kablosuz video potansiyelini ortaya çıkarmıştır. Akış ve multimedya hizmetlerinin artan

kullanımı řu anda 5G'de daha yüksek kapasiteyi garanti etmek için yeni spektrumun (yani mm dalgalar) benimsenmesini haklı çıkarmaktadır. Ancak, bu çoklu Gbps fırsatı, iki boyutlu multimedya içeriğinden daha veri ağırlıklı olan yeni uygulamaları cezbetmektedir: 5G, AR/VR'nin erken benimsenmesini tetikleyecektir. Ardından, tıpkı kablosuz video doygunluğuna ulaşmış 4G ağlarında olduğu gibi, AR/VR uygulamalarının çoğalması 5G spektrumunu tüketecek ve 5G için tanımlanan 20 Gbps hedefinin aksine 1 Tbps'nin üzerinde bir sistem kapasitesi gerektirecektir [5]. Ayrıca, sürükleyici ortamda gerçek zamanlı kullanıcı etkileşimi sağlayan gecikme gereksinimlerini karşılamak için AR/VR sıkıştırılmaz (kodlama ve kod çözme zaman alan bir süreçtir), bu nedenle kullanıcı başına veri hızının daha rahat olan 100 Mbps 5G hedefinin aksine Gbps'ye dokunması gerekir.

1.4.1.2 Holografik Telepresence (Işınlanma)

Telepresence, yakın uçtaki kullanıcılar için uzak uçtaki işitsel ve görsel sahnenin sürükleyici ama sanal bir deneyimini yaratmayı amaçlar. İnsanların artan uzaktan bağlanma eğilimi, 6G ağlarında ciddi iletişim zorluklarına yol açacaktır [6].

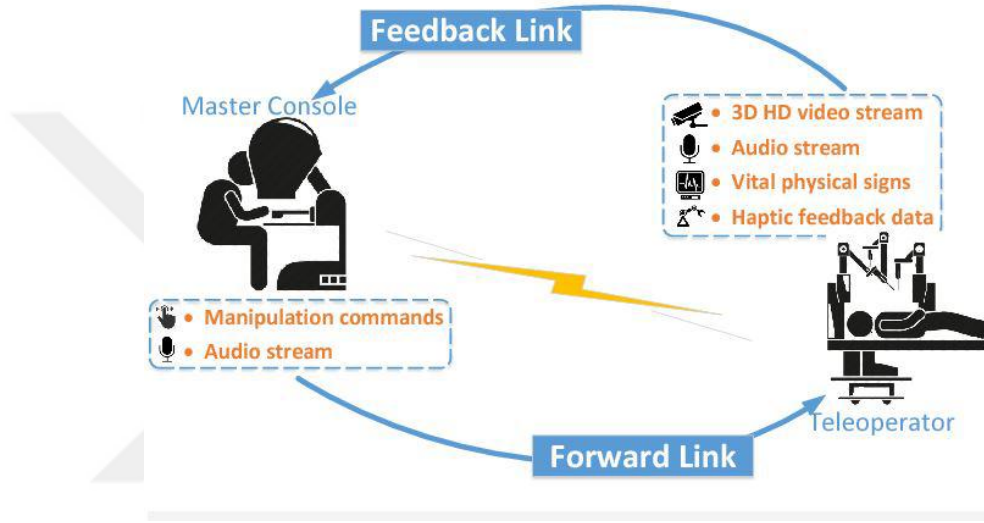
Holografik, anten tarafından ışın yönlendirmesi elde etmek için bir hologramın kullanılması anlamına gelir; burada anten, optik bir hologramdaki holografik bir plaka gibidir; Bir radyodan gelen RF sinyalleri antenin arkasına akar ve ön tarafına dağılır; burada küçük öğeler, Şekil 1.3'teki gibi ışının şeklini ve yönünü ayarlar. Gecikme gereksinimi ms'nin altına düşecek ve VR/AR için gereken birkaç açının aksine binlerce senkronize görüş açısı gerekecektir. Dahası, sürükleyici bir uzaktan deneyimi tam olarak gerçekleştirmek için, 5 insan duyusunun tümü dijitalleştirilecek ve gelecekteki ağlar üzerinden aktarılacak, bu da genel hedef veri hızını artıracaktır.



Şekil 1.3. Holografik Telepresence [7].

1.4.1.3 e-Sağlık

Elektronik sağlık hizmetinin diğer kablosuz iletişim teknolojilerindeki eksikliği, düşük veri hızı ve zaman gecikmesinden kaynaklanıyordu. 6G, güvenli iletişim, yüksek performans, ultra düşük gecikme süresi, yüksek ve yüksek veri hızı sağlayarak Şekil 1.4'teki gibi XR, robotik, otomasyon ve yapay zeka aracılığıyla uzaktan ameliyatların tam olarak var olmasını sağlayacaktır [8]. Ayrıca, THz bandından kaynaklanan küçük dalga boyu, insan vücudunda çalışacak yeni nano boyutlu cihazların geliştirilmesine olanak tanıyan nanosensörlerin iletişimini ve gelişimini destekler.



Şekil 1.4. Ana konsol ile tele-operatör arasındaki iletişimi açıklayan bir döngü [7].

1.4.1.4 Yaygın Bağlantı

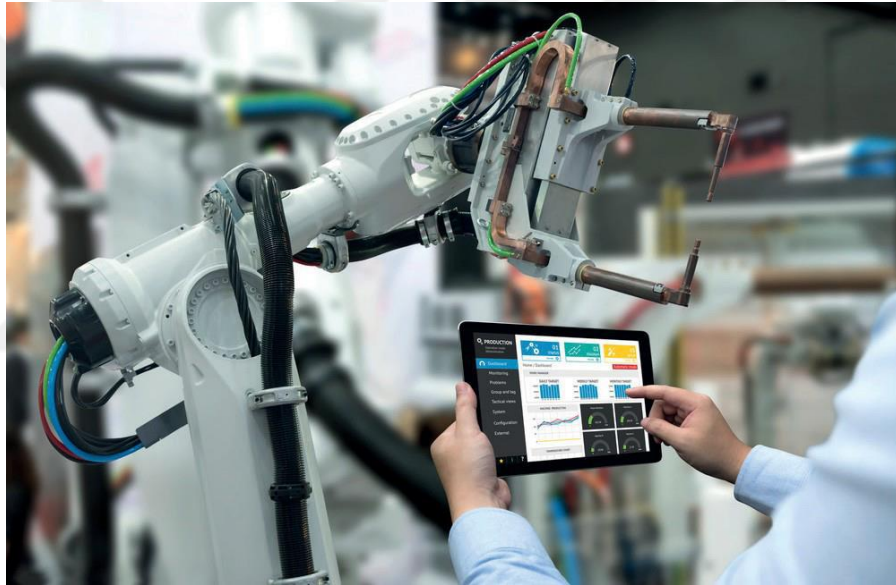
Mobil trafiğin kat kat artarak mobil cihaz sayısını en uç noktaya taşıması, yoğun bölgelerde km^2 başına çok sayıda cihaz ve 2030'a kadar dünya çapında 125 milyardan fazla cihaz olması bekleniyor. 6G kişisel cihazları, sensörleri (akıllı şehir paradigmasını uygulamak için), araçları ve benzerlerini birbirine bağlayacaktır. Bu durum şekil 1.2'deki KPI'leri karşılarken her cihaza bağlantı sağlayamayacak olan zaten sıkışık olan ağları zorlayacaktır. Dahası, 6G ağları ölçeklenebilir, düşük maliyetli, düşük çevresel etkiye sahip dağıtımlar ve daha iyi kapsama alanı sağlamak için daha yüksek bir genel enerji verimliliği (5G'ye göre 10-100x) gerektirecektir.

Gerçekten de, mobil trafiğin %80'i iç mekanlarda üretilirken, çoğunlukla dış mekanlarda konuşlandırılan ve mmWave spektrumunda çalışabilecek olan 5G hücresel ağlar, yüksek frekanslı radyo sinyalleri dielektrik malzemelere (örneğin beton) kolayca

nüfuz edemeyeceği için iç mekan bağlantısı sağlamayacaktır. Bunun yerine 6G ağları, çeşitli farklı bağlamlarda kesintisiz ve yaygın bağlantı sağlayacak, dış ve iç mekan senaryolarındaki katı hizmet kalitesi(QoS) gereksinimlerini maliyet bilincine sahip ve esnek bir altyapıyla karşılayacaktır [4].

1.4.1.5 Endüstri 4.0 ve Robotik

6G, 5G ile başlayan Endüstri 4.0 devrimini, yani üretimin siber fiziksel sistemler ve IoT hizmetleri aracılığıyla dijital dönüşümünü şekil 1.5'ten de anlaşılacağı gibi tam olarak gerçekleştirecektir. Gerçek fabrika ile siber hesaplama alanı arasındaki sınırların aşılması, internet tabanlı teşhis, bakım, operasyon ve doğrudan makine iletişimini uygun maliyetli, esnek ve verimli bir şekilde sağlayacaktır [9].



Şekil 1.5. Endüstri 4.0 ve robotik

1.4.1.6. İnsansız Hareketlilik

Tamamen otonom ulaşım sistemlerine doğru evrim, daha güvenli seyahat, gelişmiş trafik yönetimi ve bilgi-eğlence desteği sunmaktadır [10]. Otonom araçların birbirine bağlanması, mevcut teknolojilerle karşılanması zor bir gereksinim olan yolcu güvenliğini garanti etmek için ultra yüksek hareketlilik senaryolarında (1000 km/s'ye kadar) bile benzeri görülmemiş düzeyde güvenilirlik ve düşük gecikme gerektirir. Dahası, araç başına artan sensör sayısı, mevcut ağ kapasitesinin ötesinde artan veri hızları (sürüş saati başına üretilen Terabaytlar) gerektirecektir. Buna ek olarak, şekil 1.6'da verilen uçan araçlar (ör. dronlar), çeşitli senaryolar (ör. inşaat, ilk müdahale

ekipleri) için büyük bir potansiyeli temsil etmektedir. Bu perspektiften bakıldığında 6G, donanım ve yazılım çözümlerindeki ilerlemeler sayesinde bağlantılı araçların önünü açacaktır.



Şekil 1.6. Dron deneyimi.

Bu arada, 6G için yeni bir teknolojik platform inşa etme çabası içinde, araştırmacılar, Terahertz spektrumu üzerinden radyo iletişiminin potansiyel kullanımını incelemeye başladılar ve VLC, üzerinde kullanılan birincil teknolojidir [11]. 6G teknolojisi tarafından sağlanacak olası kullanım durumları aşağıdaki gibidir;

- Mobil geniş bant güvenilir düşük gecikmeli iletişim (Mobile Broadband Reliable Low-Latency Communication - mBRLLC): Yalnızca düşük gecikmeli iletişim sağlamakla kalmaz, aynı zamanda verimlilik, güvenilirlik ve hız sunar.
- Devasa ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim (Massively Ultra-Reliable Low Latency Communications - mURLLC): Ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications) ve Masif Nesnelerin Haberleşmesi'nin (Massive Machine Type Communications – mMTC) birleşimi olan ve daha kaliteli ve güvenilir hizmetler sunar.
- İnsan merkezli hizmet: Fiziksel deneyimin (Quality of Physical Experience QoPE) kalitesinin hedeflendiği kullanım durumunun gerçekleştirilmesidir. Bu yeni terim, deneyim kalitesi (Quality of Experience - QoE) ve hizmet kalitesi (Quality of Service - QoS) ile insanın kendisinin fiziksel gerçekler deneyiminin bir birleşimidir.

- Çok amaçlı 3CLS ve enerji hizmetleri: Bu kullanım durumu, kablosuz enerji aktarımı yoluyla küçük cihazlar için iletişim, bilgi işlem, kontrol, yerleştirme, algılama (Communication, Computing, Control, Localization, Sensation - 3CLS) hizmeti ve enerjinin yakınsamasını sağlayacaktır.

1.4.2. 5G ve 6G Karşılaştırması

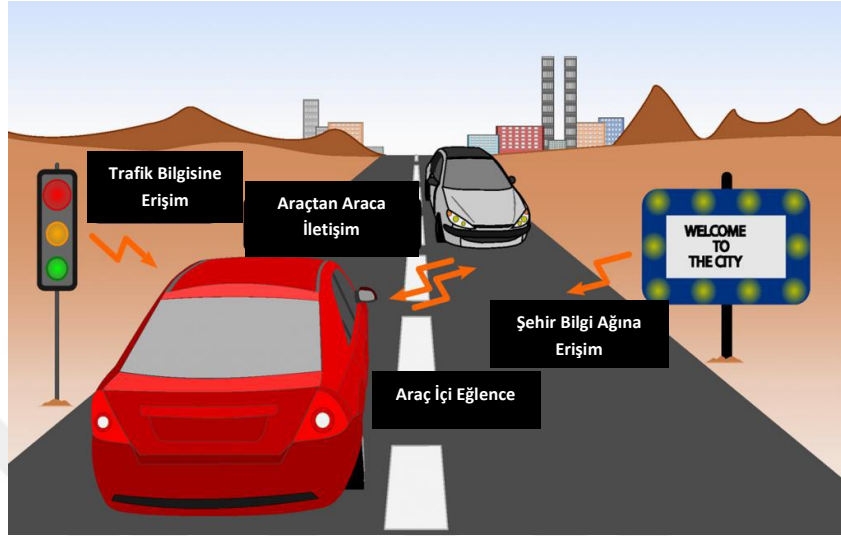
5G teknolojisi ile karşılaştırıldığında 6G, bazı büyük performans iyileştirmeleri gerektirecektir. Örneğin, 5G, 20 Gbps'lik en yüksek hızlara ve 100 GHz'e kadar frekanslara ulaşacaktır. Ancak 6G'nin 1000 Gbps'ye kadar ve 3 THz'e kadar frekanslara ulaşacağı bir beklenmektedir.

6G'nin saniyede 1 terabayt (Tbps) hızı desteklemesi bekleniyor, Bu kapasite ve gecikme seviyesi eşi görülmemiş düzeyde olacak ve kablosuz iletişim, algılama ve görüntüleme alanlarında giderek daha yeni ve yenilikçi uygulamaları destekleyen yeteneklerin kapsamını genişletmekle birlikte, 5G uygulamalarının performansını genişletecektir. 6G'nin daha yüksek frekansları, önemli ölçüde daha iyi verim sağlamanın yanı sıra çok daha hızlı örnekleme hızı da sağlar. SUB-MM Wawe (bir milimetreden küçük dalga boyu) ve göreceli elektromanyetik soğurma oranlarını belirlemek için frekans seçiciliğinin kullanımının, kablosuz algılama teknolojisinde potansiyel olarak önemli ilerlemelere yol açması da bekleniyor. Henüz araştırma aşamasında olduğu için 6G için resmi bir standart bulunmamaktadır.

6G teknolojileri, 5G ve ötesinde otomasyon sistemlerinin ve gezgin algılayıcılar ile donatılmış akıllı makinelerin ihtiyaç duyacağı veri iletişimini desteklemektedir. Özellikle 6G taşıyıcı frekansları son derece yüksek frekans bantları olan 95 GHz ile 3 THz'i kapsamaktadır. Böylece üst frekans bandında sadece çok yüksek hızlarda veri transferi yapılmayacak, aynı zamanda yüksek hızlarda örnekleme ve veri işleme işlemleri de yapılabilecektir. Buradaki amaç gezgin sistemlerin yakın mesafelerde birbirleriyle çok yüksek hızlarda veri transferini sağlamaktır. Uzak mesafelerde ise baz istasyonları aracılığıyla evrensel internet alt yapısı kullanılacaktır.

6G'nin en heyecan verici özelliği, otonom sistemleri çalıştırmak için tamamen desteklenen yapay zekanın dahil edilmesidir. Örneğin şoförsüz araçlar; seyir halindeyken etrafındaki araçlarla, daha ilerisindeki ve daha gerisindeki araçlarla, üst frekans bölgesi olan 6G ile, baz istasyonları aracılığıyla data haberleşmesini gerçekleştirecektir. Araçlar yol üzerinde bilgi üreten RFID (Radyo Frekansıyla

Tanımlama teknolojisi) algılayıcıları ile kablosuz iletişim kuracaktır. Farklı şehirlerdeki araçlarla ya da belirli merkezlerle haberleşmesi ise şekil 1.7’deki gibi akıllı ağ yapısı ile sağlanacaktır. Birbirleriyle paylaştıkları çok büyük boyutlardaki verileri yüksek hızlarda işleyerek elde edilecek bilgilerle insandan bağımsız olarak karar vereceklerdir [12].



Şekil 1.7. Akıllı ağ.

6G iletişim sistemlerinin gelişiminin arkasındaki kritik motive edici üstünlüklerden birkaçı şunlardır: yüksek bit hızı, yüksek güvenilirlik, düşük gecikme süresi, yüksek enerji verimliliği, yüksek spektral verimlilik, yeni spektrumlar, yeşil iletişim, akıllı ağlar, ağ kullanılabilirliği, iletişim yakınsama, yerelleştirme, bilgi işlem, kontrol ve algılama. Bu nedenle, 6G tamamen dijital bağlantı dünyası olacaktır. 6G teknolojisi için temel performans göstergeleri, 5G ve 6G arasındaki karşılaştırmayı da gösteren Tablo 1.1’de görülebilir.

Bazı teknik parametreler, veri hızındaki çalışma frekansındaki farklılıkları içerir. 6G teknolojisinin bireysel veri hızlarının 100 Mbps’ye ulaşması ve aşağı bağlantı veri hızlarının 1 Tbps’den fazla olması gerektiğinin açık bir göstergesidir [13]. Gecikme, araçtan araca hizmetler gibi herhangi bir kritik uygulama için uygun olan 0,1 ms’den azdır.

6G’nin geliştirilmesi yalnızca yeni iletişim teknolojilerini değil, aynı zamanda yeni malzemeler ve bileşenler, sinyal işleme, gelişmiş özel uygulamalar ve diğerleri gibi oldukça ilgili alanları da dikkate alır.

Tablo 1.1: 5G ile 6G Karşılaştırması [8].

Teknik Parametreler	5G	6G
Bireysel veri hızı	1 Gbps	100 Gbps
Yukarı bağlantı (uplink) veri hızı	10 Gbps	1 Tbps
Aşağı bağlantı (downlink) veri hızı	20 Gbps	1 Tbps
Spektral verimlilik	10 bps/Hz/m ²	1000 bps/Hz/m ²
Güvenilirlik	10 ⁻⁵	10 ⁻⁹
Kullanıcı düzlemi(u-plane) gecikmesi	< 1 ms	< 0.1 ms
Kontrol düzlemi(c-plane) gecikmesi	10 ms	< 1 ms
İşlem gecikmesi	100 ns	10 ns
Trafik kapasitesi	10 Mbps/m ²	1 - 10 Gbps/m ²
Maksimum hareketlilik	500 km/h	1000 km/h
Zaman koruması	Gerçek zamanlı değil	Gerçek zamanlı
Çalışma frekansı aralığı	3 - 300 GHz	1 THz'e kadar
Uydu entegrasyonu	Hayır	Tam
Yapay zeka(AI) entegrasyonu	Kısmen	Tam
Genişletilmiş gerçeklik(XR) entegrasyonu	Kısmen	Tam
Dokunsal iletişim entegrasyonu	Kısmen	Tam
Otomasyon entegrasyonu	Kısmen	Tam

Gelecekte 6G sistemi birçok teknoloji tarafından yönlendirilecektir. Bazı yeni teknolojiler eklenecek ve bazı 5G teknolojileri iyileştirilecek. Bunlardan birkaçı; yapay zeka, terahertz iletişim, optik kablosuz teknoloji (OWC), devasa MIMO ve akıllı yansıtıcı yüzeyler, blok zinciri (blockchain), insansız hava araçları, hücresiz iletişim, büyük veri analizidir. Gelecekteki 6G ağlarında, fiber optik benzeri performans sağlamak için olası bir tamamlayıcı teknoloji, kısa menzilli bağlantılar (birkaç metreye kadar) için VLC teknolojileriyle birlikte görünür spektrumun kullanımına dayanır. Çekici bir yaklaşım, hem optik (örn. VLC) hem de radyo ağlarını birleştiren hibrit ağların kullanılmasıdır.

6G haberleşmesinde Wi-Fi yerine, Li-Fi, yani, yüksek enerjili LED'lerle VLC teknolojisi kullanılacaktır. Kısacası, mekandan ve zamandan bağımsız, sanal dünyadaki gerçeklik keşfedilecektir.



2. BÖLÜM: 6G TEKNOLOJİSİ İÇİN OPTİK KABLOSUZ HABERLEŞME

Optik kablosuz haberleşme (OWC), kızılötesi (infrared - IR), görünür ışık veya ultraviyole (ultraviolet - UV) frekanslarını kullanarak kablosuz iletişim imkânı sağlayan, radyo frekans düzenine ek yeni nesil kablosuz iletişim teknolojisidir. Frekans tayfında optik bant kullanılarak uzak mesafelere bilgi aktarmak için tanımlanan optiksel haberleşme, optik bantta yer alan ilk haberleşme yöntemlerinden biridir. RF bantları üzerinden çalışan geleneksel kablosuz iletişim için gelecek vaat eden bir tamamlayıcı teknolojidir. Radyo frekans haberleşmesine göre daha iyi güvenlik ve daha fazla yönlülük sağlar. Görünür bantta çalışan OWC sistemleri, son zamanlarda dikkat çeken VLC olarak anılır. Optik bant, dünya çapındaki düzenleyicilerin izni olmadan neredeyse sınırsız bant genişliği sağlayabilir. Optik yayıcıların ve dedektörlerin mevcudiyeti sayesinde yüksek hızlı erişimi düşük maliyetle gerçekleştirmek için uygulanabilir. Kızılötesi ve UV dalgaları, görünür ışıkla benzer bir davranışa sahip olduğundan, güvenlik riskleri ve parazit önemli ölçüde sınırlandırılabilir ve radyo radyasyonunun insan sağlığına olan endişesi ortadan kaldırılabilir.

OWC teknolojileri 4G iletişim sistemlerinden beri kullanılmaktadır. Ancak 6G iletişim sistemlerinin taleplerini karşılamak için daha yaygın olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Kablosuz optik teknolojilere dayalı iletişim, çok yüksek veri hızları, düşük gecikme süreleri ve güvenli iletişim sağlayabilir. Işık yayan diyot (LED) teknolojisindeki gelişmeler ve çoğullama teknikleri, 6G'de OWC için iki kritik geliştirici güçtür. Işık yayan diyotlar (LED), lazer diyotlar (LD), PIN fotodiyotlar ve benzeri ucuz opto-elektronik cihazların gelişimi bu çalışmalara katkı sağlamıştır. OWC'nin önemli avantajı, her verici LED için çok büyük bir bant genişliği sunmasıdır. Son yıllarda LED'lerin ve fotodedektörlerin kullanıldığı yeni bir kablosuz optik haberleşme yöntemi olarak görünür ışık haberleşmesi (VLC) ön plana çıkmıştır.

2.1 Görünür Işık Haberleşmesinin Özellikleri Ve Gereği

Son zamanlarda, VLC üzerine yapılan araştırmaların çoğu, görünür ışık tayfı kontrolsüz olduğundan ve fazlaca büyük bant genişliğine sahip olduğundan muazzam bir şekilde artış göstermiştir. VLC'nin önemli avantajları, görünür ışığın elektromanyetik radyasyona sebebiyet vermemesi, karbondioksit emilimini azaltması, radyo frekans bandını kullanan elektronik aletlerin çalışmasına müdahale etmemesi ve bu bantta istenmeyen girişime (interference) sebep olmamasıdır. Yukarıda bahsedilen özelliklerden ötürü görünür ışıkla haberleşme sistemlerinin uçak kabinleri, hastaneler, kimya tesisleri gibi risk teşkil eden ortamlarda kablosuz veri transferi için ideal çözümler sunduğu elde edilmiştir.

Görünür ışık haberleşme sistemlerinde, veri transferi için kullanılan VLC bandındaki sinyallerin yüzeylerden ve duvarlardan geçememesi sebebiyle radyo frekans sistemlerinde olduğu gibi geniş bir bağlantı ağı kurulamaz. Bunlar bir dezavantaj olarak anlaşılsa da radyo frekans sistemlerine göre veri güvenliği açısından güçlü bir avantaj sağlamaktadır. Ek olarak LED'lerin aydınlatma amacıyla kullanımının yaygınlaşması sayesinde VLC sistemleri kablosuz yerel ağlara hızlı bir şekilde adapte edilebilmektedir. Avm'ler, tren istasyonları, restoranlar, marketler, kampüsler ve diğer birçok kamusal alan dahil edilebilir. Ayrıca, görünür ışık haberleşme sistemlerinde iletim gücünü sınırlayan bir sağlık denetimi yoktur ve görünür ışık haberleşme daha yüksek güvenlik sağlar. Sonuç olarak, görünür ışık haberleşmesinin yakın zamanda kablosuz sistemlerde kritik bir rol oynaması beklenmektedir.

VLC teknolojisini diğer tekniklerden ayıran en önemli özelliği; aydınlatma ve haberleşme olarak çift fonksiyonlu kullanım sunabilmesidir. Haberleşmenin ve aydınlatmanın birlikte sağlandığı VLC teknolojisi, ışık kaynaklarından olan LED'leri radyo frekans vericileri yerine kullanılmaktadır. Bu durumda diğer sistemlerden farklı olarak tasarımda optik güç kısıtlamalarının da dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca sinyal formatı radyo frekans haberleşmesinden farklıdır ve radyo frekans enerjisiyle karşılaştırıldığında insan sağlığına daha az zararlı etkiye sahiptir. Bu sebeple araştırmacılar VLC sistemlerini gelecek nesil ağ iletimi ve haberleşme için potansiyel bir araştırma alanı olarak görmektedirler.

RF ile karşılaştırıldığında, VLC lisanssız ve ücretsiz bir optik bant genişliğine sahiptir. Tablo 2.1, görünür ışık spektrumunun potansiyel olarak RF'nin mevcut bant

genişliğinden nasıl daha büyük olduğunu gösterir. Bu, çok yüksek veri hızı iletişimini mümkün kılar. Ayrıca optik bant mevcut RF bantları ile örtüşmediğinden bu sistemlerde elektromanyetik girişim olmaz.

VLC, RF Haberleşmesi'ne göre avantajlar ve dezavantajlar içermektedir. Aşağıdaki tabloda da RF ve VLC sistemlerinin karşılaştırılması verilmektedir [14].

Tablo 2.1: Görünür Işık ve Radyo Frekansı İletişim Teknolojilerinin Kıyaslaması.

	VLC	RF
Frekans Bandı	THz	MHz-GHz
Dalga Boyu	nm	cm-mm
Servisler	Aydınlatma ve İletişim	İletişim
Karmaşıklık ve Maliyet	Düşük	Yüksek
Gürültü Kaynakları	Güneş Işığı ve Ortam Işıkları	Elektronik Cihazlar
Elektromanyetik Girişim	Yok	Var
Güç Tüketimi	Düşük	Yüksek
Mobilite	Sınırlı	Yüksek
Kapsama Alanı	Kısa ve Orta Mesafe	Orta ve Uzun Mesafe
Güvenlik	İyi	Zayıf
Lisans	Gerektirmez	Gerekli
Standartlar	802.15.7	Çeşitli
LOS	Var	Yok

Diğer kablosuz haberleşme sistemleriyle kıyaslandığında, görünür ışık önemli bir haberleşme teknolojisidir ve aşağıda verilen avantajları vardır:

- **Maliyet Verimliliği:** Görünür ışık ile haberleşme sağlayabilmek için var olan aydınlatma altyapısı kullanılır. Bu da buna benzer sistemlerin birkaç ek cihazla var olan sisteme ilave edilebileceği göstermektedir. Başka bir ifadeyle, bu sistemlerde maliyet daha düşüktür.
- **Bant Genişliği:** Görünür ışık tayfı 430 - 790 THz arasındadır. Yani görünür ışık haberleşmesinin var olan veri iletim kapasitesi, spektrumun radyo frekans kısmından çok çok büyüktür. Radyo frekans spektrumundaki kullanıcı artışı dikkate alındığında, frekans spektrumunu verimli kullanabilmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Yine de, var olan radyo frekans spektrumu, artış gösteren kablosuz iletim ihtiyacını karşılayabilmek için yetersizdir. Yüksek bant genişliğine sahip

görünür ışık haberleşmesi, yüksek kapasiteli mobil veri ağları tasarlayabilmek için radyo frekans yerine kullanılabilir.

- **Enerji Verimliliği:** LED'ler %75'e kadar elektrik tasarrufu sağlarlar ve akkor aydınlatmalara göre ömürleri 25 kat daha fazladır [15]. LED'ler enerjilerinin çoğunu aydınlatma için kullanılırlar. Bu yüzden görünür ışık haberleşme sistemleri enerji tasarrufludur.
- **Haberleşme Güvenliği:** VLC, duvarların ve nesnelerin çoğundan geçemez. Bu sebeple verici ve alıcı arasındaki kablosuz bağlantılar gizlenebilmektedir. Bu da güvenli olarak kablosuz haberleşmenin gerçekleştirildiği anlamına gelir.

Görünür ışık haberleşme sistemleri haberleşme ve aydınlatma ihtiyaçlarını tek bir kaynak kullanarak sağlamaktadır. Katıhal aydınlatma cihaz teknolojisinin gelişimiyle geleneksel aydınlatma sistemlerine göre fazla enerji verimliliği sağlar [16]. Görünür ışık haberleşmesinin dikkat çeken özellikleri içinde, yoğunluk modülasyonlu direk algılama (IM/DD) yöntemi kullanımıyla beraber verici-alıcı yapısının radyo frekans sistemlerine kıyasla düşük maliyete sahip olması gösterilebilir. Görünen ışığın kapalı alan içinde duvarlar tarafından geçişine izin verilmemesi görünür ışık haberleşme sistemlerini ISI'ya karşı dayanıklı ve güvenli yapmaktadır. Ayrıca bu özellik ile, frekans tekrar kullanım oranı artmaktadır. Görünür ışık haberleşme sistemlerinde kullanılan frekans bant aralığı terahertz seviyelerinde yer alıp serbest kullanımdadır, yani herhangi bir kurum tarafından düzenlenmemektedir. Ek olarak, görünür ışıkla haberleşme sinyalleri radyo frekans sinyalleriyle girişimde bulunmaz dolayısıyla elektromanyetik yayına duyarlı cihazların olduğu alanlarda iletişim aracı olarak kullanılabilir [17,18].

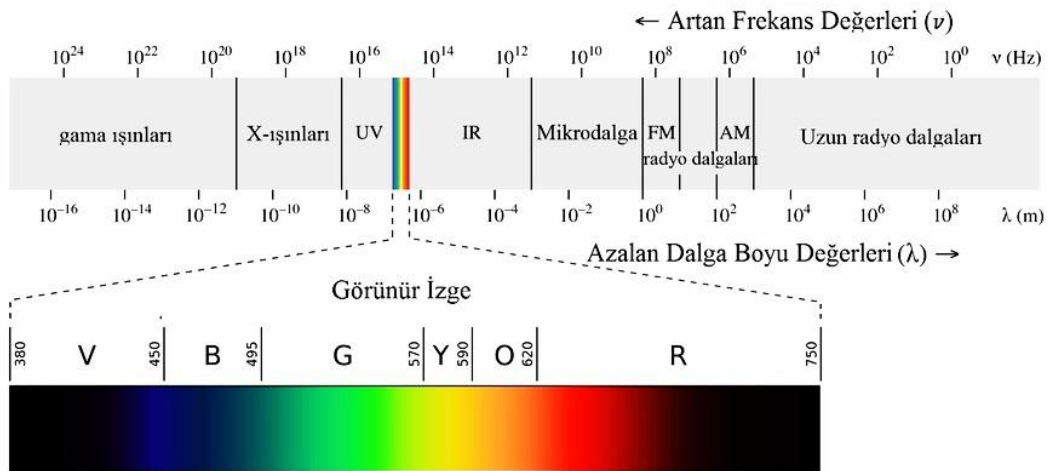
Önümüzdeki zamanlarda gerçekleşmesi öngörülen yoğun dijitalleşmenin mobil veri miktarını hızlı bir şekilde artıracığı tahmin edilmektedir. Artış gösteren mobil veri talebi, doyum seviyesine ulaşmış var olan aktif radyo frekans bandının yakın zamanda bu alandaki ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalacağını göstermektedir. Bu sebeple görünür ışık haberleşmesi, alternatif/tamamlayıcı bir kısa mesafe kablosuz haberleşme sistemi olarak göze çarpmaktadır.

Radyo frekans iletişimi için önemli bir alternatif/tamamlayıcı teknoloji olan görünür ışık haberleşmesi, avantajlarına ek geliştirilmesi gereken yönleri de vardır. Görünür ışık haberleşme sistemlerinde verici olarak eşevresiz bir cihaz olan LED'lerin, alıcı olaraksa foto-dedektörlerin kullanılması, IM/DD tekniğini kullanmayı zorunlu hale

getirmektedir. Bunun sonucunda, görünür ışık haberleşmesinde kullanılan modülasyonlar IM/DD sınırlamaları altında olduklarından, gerçel ve pozitif değerli olmaları gerekmektedir [16]. Bu durumsa radyo frekans sistemlerinde yer alan birçok bant ve güç verimli modülasyon çeşidinin, doğrudan görünür ışık haberleşme sistemlerine uygulanmasını sınırlamaktadır. Bununla beraber VLC sistemlerinde bant genişliği THz seviyelerinde yer alsada, sisteme ait elektriksel bant genişliği LED'lerin bant genişliği kadardır. Piyasadaki LED'lerin 3dB bant genişliği 3 MHz iken, mavi filtreleme yardımıyla bu değer aşağı yukarı 20 MHz seviyesine çıkarılabilmektedir [19]. Sonuçta da, elektriksel bant genişliğinin düşüklüğü ve IM/DD sınırlamalarının varlığı, VLC sistemlerinde veri hızı düşüklüğü problemini ve güç verimi düşük modülasyonları ortaya çıkarmaktadır.

2.2 Görünür Işık Haberleşmesi (VLC)

VLC, görünür spektrumdaki ışık dalgaları aracılığıyla veri gönderen bir iletişim teknolojisidir. VLC 380 nanometre (nm) ile 750 nanometre (nm) görünür ışık dalga boyları arasında aydınlatmayı sağlayan LED'lerle yapılır. Bant genişliği açısından incelendiğinde, insan gözünün hassas olduğu, kızılötesi ve morötesi arasındaki 430 - 790 THz (750nm-380nm) yaklaşık 400 THz genişliğinde iletim bandına sahiptir. VLC için kullanılan bant, RF'in kullandığı banttan hemen hemen onbin kat daha geniştir. Bu sebeple görünür ışık haberleşmesi, mevcut tüm RF teknolojilerini aşarak 1 Gbps'den daha fazla hızda bilgi aktarımı yapabilmektedir. VLC dalga boylarının elektromanyetik spektrumdaki yeri şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Görünür ışık haberleşmesinin elektromanyetik spektrumu [20].

Şekil 2.1, radyo dalgalarının bulunduğu düşük frekanslardan gama ışınlarının bulunduğu daha yüksek frekanslara kadar elektromanyetik spektrumun aralığını göstermektedir.

Görünür spektrumu renklere ayırdığımızda:

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

Değerleri aralığında bir dağılım mevcuttur. Bu bilgilerden yola çıkarak LED'lerin yaydığı ışıkların renkleriyle bağlantılı olacak şekilde bir iletim bant aralığının kullanımı mümkündür. LED'ler, görünür ışık tayfindaki renklere bağlı olarak değişmektedir. RGB (red, green, blue (kırmızı, yeşil, mavi)), fosfor tabanlı beyaz LED'ler olmak üzere çeşitlere sahiptir.

Daha önce belirttiğimiz gibi, ışığın görünür spektrumu 380 nm ile 750 nm arasında değişir. Bu tür yüksek çalışma frekansları, bant genişliğini ve kapasitesini etkileyecektir; öyle ki kullanılan frekans aralığı yükselirse, mevcut bant genişliği de orantılı olarak genişler ve bu da daha yüksek kapasite ve veri hızına yol açar. Bu teknolojinin avantajları lisanssız bantta çalışır ve operatörün devlete bir frekans bandı lisans ücreti ödemesi zorunluluğunu bırakmaz. Düşük maliyete sahiptir, uzun süre kullanılır ve daha düşük güç tüketir.

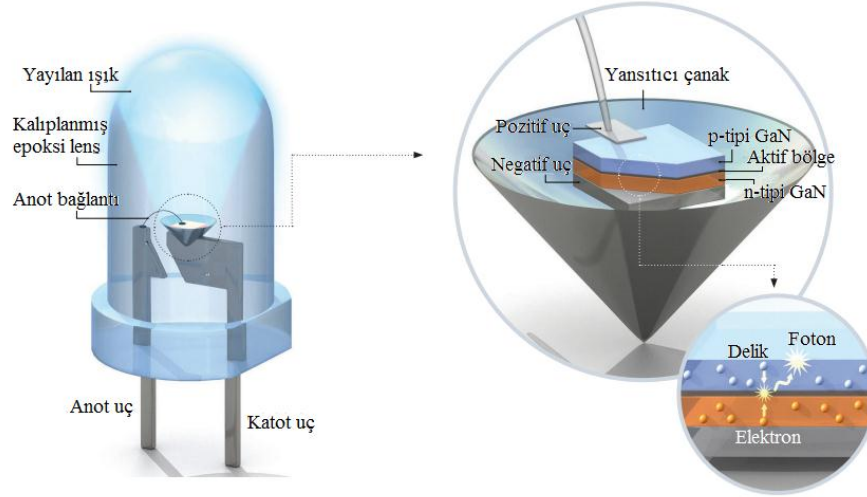
Bir VLC cihazı, akkor ampullerden daha ucuz, daha dayanıklı ve daha uzun ömürlü olan bir LED ampulü temel olarak çalışır. Gaz boşaltmalı ve Akkor ampullerde hassas karartma işlemi zor yapılmaktadır. Oysaki LED'ler aracılığıyla hassas karartma seviyesi kontrol altına alınabilmektedir. Çünkü LED'lerin anahtar açma kapama işlemi süresi boyunca tepki zamanları kısadır. Bu sebeple yüksek frekanslarda sürücü akımı modüle edilerek, insan gözü tarafından görülemeyecek seviyede LED'lerin açma kapama konumları arasında anahtarlama yapabilmektedir. Bundan ötürü, bir LED'den saçılan ışıklar, düşük ortalama güç ve tekrarlamalı yüksek frekansa sahip bir darbe dizisi formunda olacaktır.

Suni aydınlatma günümüzde florasana ve akkor ampuller gibi mevcut ticari aydınlatmalarla yapılmaktadır. Akkor ampullerin ortalama bin saat ömrü vardır ve sadece tükettiği enerjinin %5'ini ışığa dönüştürebilirler. Bu nedenle görünür ışık haberleşmesi uygulamalarında tercih edilmezler. Florasan lambalar 10,000 saat ömre sahiptir ve %20-%25 oranındaki enerjilerini ışığa dönüştürebilirler. Bu yüzden kullanım açısından akkor ampullere göre daha fazla tercih edilirler [21]. Fakat florasana lambaların verimliliği cıva buharı nedeniyle düşüktür ve ayrıca ampulün kırılması durumunda cıvanın zarar vermesinden kaynaklı sağlık riskleri teşkil ederler [21]. Akkor lambalarla karşılaştırıldığında, LED'ler ayrıca güç tüketimi için daha dayanıklı ve daha verimlidir. Aşağıda bu karşılaştırmalar Tablo 2.2 olarak verilmektedir.

Tablo 2.2: LED'lerin, Florasan ve Akkor lambalar ile kıyaslanması [21].

Özellikler	LED	Akkor Ampuller	Florasana Lambalar
Elektrik Kullanımı	6-8 Watt	60 Watt	13-15 Watt
Cıva İçeriği	Hayır	Hayır	Evet
RoHS Uyumluluğu	Evet	Evet	Hayır
CO ₂ Yayılımı	451 libre/yıl	4500 libre/yıl	1051 libre/yıl
Neme Duyarlılık	Yok	Az miktarda	Evet
Ani Olarak Açılma	Evet	Evet	Hayır
Açma/Kapama Döngüsü Etkisi	Yok	Az miktarda	Evet
Kırılabilirlik	Dayanıklı	Dayanıksız	Dayanıksız
Isı Yayılımı	3.4 btu/saat	85 btu/saat	30 btu/saat
Hata Modları	Tipik değil	Az miktarda	Evet

Görünür ışık haberleşmesinde yaygın olarak kullanılan LED'in içyapısı şekil 2.2'de ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 2.2. LED'lerin içyapısı [22].

Aşağıda maddeler halinde verilenler LED'lerin genel özellikleridir [22];

- Elektriksel bant genişlikleri 20 MHz civarındadır,
- Kullanım süreleri uzundur,
- Neme karşı dayanıklılıkları diğer aydınlatma cihazlarından daha iyidir,
- Üretimlerinde cıva kullanılmamıştır,
- Kompakt boyutlara sahiptirler,
- Aydınlatma verimleri yüksektir,
- Fazla ısı üretmezler,
- Düşük güç tüketimine sahiptirler,
- Basit yapıya ve düşük maliyete sahiptirler,
- Hızlı açılıp kapanma özellikleri vardır.

VLC tarafından LED'lerin kullanışlı hale gelmesinin sebebi, elektro-optik (E/O dönüşüm) özellikte yani elektrik sinyali optik sinyale dönüştürebiliyor olmasıdır. LED'lerin yapısında yarıiletken malzemelerin bulunması, diğer aydınlatma cihazlarına göre, LED'lere hızlı açılıp kapanma özelliği sağlamıştır. Işık kaynağı çok hızlı açılıp kapandığı zaman insan gözü sadece ortalama ışık yoğunluğunu algılayabilmektedir. Görünür ışık haberleşmesinde LED'lerin açılıp kapanma hızı, insan gözünün fark edebileceği frekans olan 200 Hz'in üzerinde gerçekleştirilir. Bunun sonucunda aydınlatma standardı ve insan gözüne herhangi bir olumsuzluk yaratmadan kablosuz haberleşme gerçekleştirilmektedir [22].

Bu özellik aydınlatma için devrim sayılabilecek değişimi mümkün kılmaktadır. Bu özellik ile sokaklarda, ofislerde ve evlerde kullanılan LED'ler hem aydınlatma için hemde veri iletimi için kullanılmaktadır. Kablosuz olarak gönderilecek veriler LED'ler aracılığıyla ışığın yoğunluğundaki değişimlere modüle edilmektedir.

2.3 Görünür Işık Haberleşmesi Uygulama Alanları

VLC gitgide yaygınlaşmaktadır ve kullanım alanları artmaktadır. Verici ile alıcı kaynaklarının ucuzluğu, az güç tüketimi, aydınlatma ile birlikte kullanımı gibi sağladığı özellikler sayesinde birçok alanda kullanımı artış göstermektedir. Ulaşılabilirlik alanında bahsederken değintimiz bu alanda bizler daha çok radyo dalga kullanan teknolojilerin yapamadığı, kesintiye uğradığı, verimsiz çalıştığı her alanda bu eksiklikleri tamamlayarak ve hatta bulunduğumuz özellikler niteliğiyle kullanıcıya hız sağlayarak haberleşme alanında öncü olma isteği mevcuttur. Genel olarak incelendiğinde Görünür Işık uygulamaları sadece kapalı ortamlar için tasarlanmamıştır. Dış ortamlar için uygulamalar geliştirilmiştir. Bu alanlar genel olarak sıralanmıştır.

- Taşıma ve Ulaşım
- Hastaneler ve Sağlık Uygulamaları
- Kapalı Ortamlarda yer Belirleme
- Savunma ve Güvenlik Uygulamaları
- Havacılık
- Akıllı Aydınlatma
- Su altı İletişim

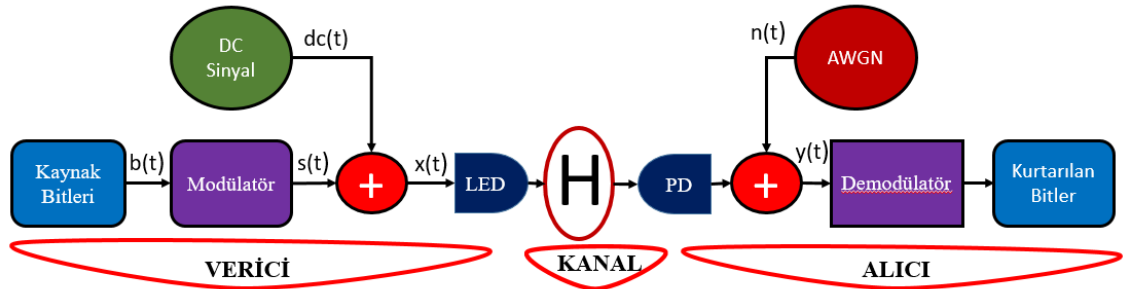
2.4 Görünür Işık Haberleşmesinin (VLC'nin) Sistem Modeli

Mevcut OWC sistemlerinde, modüle edilmiş elektrik sinyali optik sinyale dönüştürmek için verici olarak Işık Yayan Diyotlar (LED'ler) kullanılır. LED'ler aydınlatma ünitesidirler. LED lambalar (LED'ler ampul olarakta adlandırılırlar), bir veya daha fazla LED'e sahip olabilir.

Radyo frekans sistemlerinde elektromanyetik dalgaların frekansları, genlikleri veya fazları veri taşımak için kullanılabilir. VLC sistemlerindeyse bu durum gerçekleştirilemez. LED'lerin eş-evresiz malzemeler olması nedeniyle optik taşıyıcının frekansına ya da fazına bilgi modüle edilemez. Görünür ışık haberleşme sistemlerinde

çoğunlukla kullanılan metot, gönderilecek sinyalin ışığın yoğunluğuna modüle edilmesidir. LED'ler vasıtasıyla deri ve göz sağlığı için herhangi bir olumsuzluk oluşturmada bilginin ışığın yoğunluğuna modüle edilme işlemi yoğunluk modülasyonu (IM) olarak isimlendirilmektedir. Yoğunluk modülasyonlu iletimde, LED'den saçılan ışığın yoğunluğu, başka ifadeyle LED çıkışındaki anlık optik güç, LED girişindeki veri ileten sinyal ile modüle edilir.

Alıcıda, alınan ışığı akıma dönüştüren ve yarı iletken bir malzeme olan foto-diyotlar kullanılır. Optik sinyal foto-diyotlar (PD'ler) tarafından algılanır ve dijital sinyal işleme teknikleri kullanılarak demodüle edilir. Hazır LED'ler ve PD'ler, en az 500 Mb/s'lık yüksek bit hızlarına ulaşabilen düşük maliyetli bir görünür ışık iletişim (VLC) sistemini gerçekleştirmek için kullanılabilir [23]. Ancak LED'ler, veri iletimi için faz bilgisinin kullanılmasına izin vermez. Sonuç olarak, veri modülasyonu için yalnızca gerçek değerli ve pozitif sinyaller kullanılabilir. Buna göre genel bir VLC blok şeması aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.3 VLC sistemlerinin blok diyagramı [22].

Bu yapıda $b(t)$ kaynak bitleri modülatör bloğunda gönderilecek işarete modüle edilirler ve gerçel $s(t)$ işaretini oluştururlar. Verici kısmında, modüle edilmiş işaretler LED'ler aracılığıyla iletilirken, elektriksel sinyal optik sinyal olan $x(t)$ 'ye dönüştürülmektedir. LED'ler sadece pozitif işaretleri optik işarete çevirebildiği için $s(t)$ işaretiyle $dc(t)$ işareti birbirine eklenerek zaman eksenini boyunca pozitif hale dönüştürülür. Dönüşen $x(t)$ işareti LED'e iletilerek ışığın yoğunluğuna modüle edilir. Optik kanaldan iletilen işaret, alıcı kısmında ışığın yoğunluğundaki değişimlerin foto-dedektör aracılığıyla algılanması ile elektriksel işarete dönüştürülür. AWGN $n(t)$ ise, alınan işaretlere elektriksel bölgede ilave edilmektedir. Kanal girişine doğrudan optik

işaret gönderildiği için $x(t)$ işareti gerçel ve pozitif değerli sayılara sahiptir. Kanal sönümlemesi ve AWGN etkilerine sahip $y(t)$ sinyali aşağıdaki gibidir;

$$y(t) = Rx(t) * h(t) + n(t) \quad (2.1)$$

Burada $y(t)$ alıcıdaki elektriksel sinyali, R ise foto-dedektör duyarlılığıdır. Foto-dedektörün optik sinyali elektriksel sinyale dönüştürme duyarlılığıyla alakalı olarak dönüştürme oranını temsil eder ve birimi Amper/Watt (A/W)'dır. $x(t)$ gönderilen optik işareti, "*" konvolüsyon operatörünü (katlama işlemi), $h(t)$ kablolu optik kanalın etkisini ve $n(t)$ gürültüyü ifade etmektedir. Alıcı kısımda algılanan gürültü eklenmiş, bozulmuş $y(t)$ işaretinden demodülatör yardımıyla kaynak bitleri elde edilir. $n(t)$ $N(0, \sigma_n^2)$ dağılımına sahiptir ve $N(\mu, \sigma^2)$ ifadesi, standart sapması σ ve ortalaması μ olan bir Gauss dağılımına aittir.

Verici kısımda, modüleli sinyaller LED'ler aracılığıyla iletilirken, elektriksel sinyal optik sinyale, yani (2.1) numaralı denklemde yer alan $x(t)$ 'ye dönüşmektedir. Alıcı kısımdaysa alınan optik sinyaller foto-dedektörde $Rx(t)$ 'ye yani R oranında elektriksel sinyale dönüştürülmektedir. AWGN $n(t)$ ise, alınan işaretlere elektriksel bölgede ilave edilmektedir. Kanal girişine doğrudan optik sinyal geldiği için $x(t)$ sinyali gerçel ve pozitif değerli sayılar içermektedir [24].

Kanalın dürtü tepkisi $h(t)$ eşitlik 2.2'deki gibi hesaplanır.

$$h(t) = h_{LOS}(t) + h_{NLOS}(t) \quad (2.2)$$

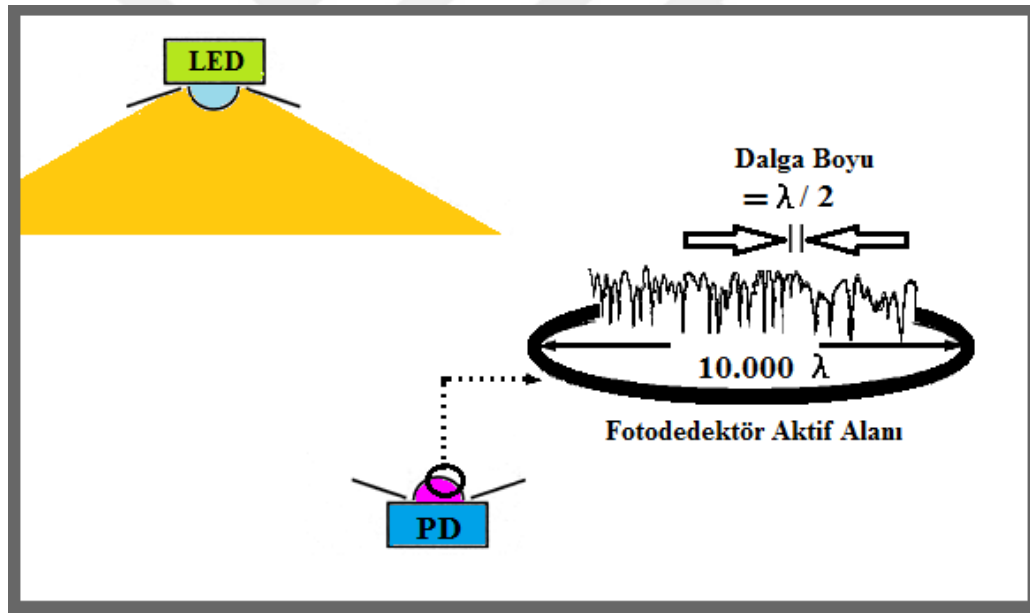
LOS ve NLOS bileşenlerinin toplamı şeklinde ifade edilir. $h_{LOS}(t)$ kanal dürtü yanıtının LOS bileşenini ve $h_{NLOS}(t)$ ise kanal dürtü yanıtının NLOS bileşenlerinin tamamını göstermektedir.

2.5 IM/DD Sistemleri ve Modülasyon Çeşitleri

2.5.1 IM/DD'li Sistemler

İç mekân VLC sistemleri için kanalı doğru bir şekilde modellemek önemlidir. Verici tarafta bilgi sinyali, LED'lerin ürettiği ışığın genlik modülasyonu (intensity modulation, IM) ile kanal ortamına iletilir. Alıcıda ise, ışığın yoğunluğunu elektriksel akıma dönüştürebilen bir foto sezici aracılığıyla doğrudan-sezim (direct-detection, DD) tekniği ile orijinal bilgi sinyaline dönüştürülür.

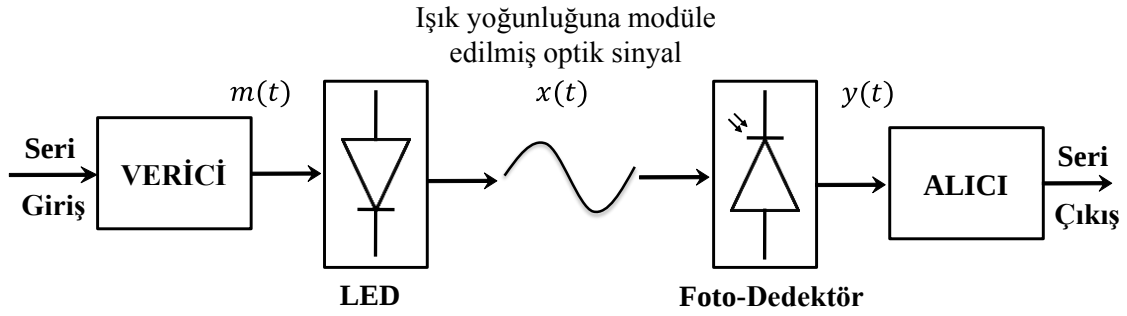
Alıcı tarafta foto-dedektör aracılığıyla ışığın yoğunluğuna modüle edilen bilginin elde edilmesi DD prensibine göre yapılmaktadır. IM’de veri ileten sinyal optik taşıyıcının anlık gücüne modüle edildiği için, doğrudan-sezimde foto-dedektör aracılığıyla aktif sezim alanını etkileyen anlık optik güçle orantılı olarak çıkış akımı üretilir. Doğrudan-sezim alıcısının işaret gürültü oranı alınan optik gücün karesiyle orantılıdır. Burada yayılan ışığın dalga boyu veya frekansı dikkate alınmaz bu eş-evresiz sezim türüdür. Burada değinilmesi gereken diğer bir önemli özellik DD’de alınan işaretle hızlı sönümlenmenin olmamasıdır. Radyo frekans sistemlerinden farklı olarak görünür ışık haberleşme sistemlerinde optik taşıyıcı nm seviyesinde dalga boylarına sahiptir. Bu durumda foto-dedektör aktif sezim alanı yani anten boyutu ($0.2cm^2 - 1cm^2$), taşıyıcının dalga boyundan daha büyüktür. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi foto-dedektör aktif sezim alanını etkileyen anlık güç, VLC’nin dalga boyuna göre uzun bir zaman periyoduna denk geldiği için hızlı sönümlenme olmaz [25].



Şekil 2.4. IM/DD’de görünür ışık dalga boyu ve foto-dedektör aktif alanı [22].

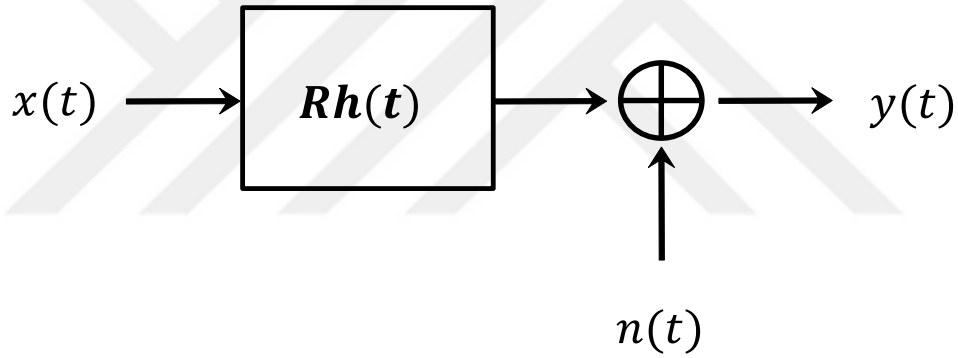
Yoğunluk modülasyonlu direk algılama yöntemi, düşük karmaşıklık ve maliyet sebebiyle OWC sistemlerinin uygulanması amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte optik kaynağının sürücü akımı, modüle edici bir $m(t)$ sinyaliyle modüle edilir ve çıkışında optik kaynağının $x(t)$ ışık yoğunluğuna dönüştürülür. Alıcı olarak bir foto-dedektör kullanılır. Foto-dedektör, gelen optik işaretin dalga boyunun 10000 katı büyüklüğündeki işareti toplayıp çıkışında bir $y(t)$ foto-akımı üretir. Bu foto-akımı,

alıcıya gelen anlık optik güç ile doğru orantılıdır. Şekil 2.5’de yoğunluk modülasyonlu direk algılama haberleşme kanalının blok şeması verilmektedir.



Şekil 2.5. VLC kanalının IM/DD’li blok şeması.

Şekil 2.6’da IM/DD etkili bir VLC kanalının genel kanal modeli verilmektedir.



Şekil 2.6. IM/DD etkili VLC Kanal Modeli.

Burada; $x(t)$ vericideki optik gücü; $h(t)$, kanal dürtü tepkisini; $n(t)$, toplamsal beyaz gauss gürültüsünü, $\oplus$ sembolü ise katlama (convolution-konvolüsyon) işlemini yani gönderilen sinyalin, sinyal bağımsız toplamalı gürültü ile konvole olmasını ifade etmektedir. Zaman ortalamaalı vericiden gönderilen optik güç olan P_t de (2.3) eşitliğine göre hesaplanabilir.

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (2.3)$$

Buradaki $X(t)$ sinyali genlik yerine doğrudan gücü temsil etmektedir ve verici kısımdan iletilen ortalama güç, radyo frekans sistemlerindeki gibi sinyalin karesinin

$(|X(t)|^2)$ ortalaması yerine (2.3) numaralı denklemde olduğu gibi doğrudan sinyalin kendisinin ortalaması alınarak elde edilmektedir [24].

P_r alınan optik gücü ifade etmektedir ve (2.4) numaralı denklem aracılığıyla elde edilmektedir. Burada kanalın doğru akım kazancını $H(0)$ terimi temsil etmekte olup (2.5) numaralı denklemdeki gibi elde edilmektedir.

$$P_r = H(0).P_t \quad (2.4)$$

Formülde yer alan $H(0)$, sabit verici gücü için ulaşılabilecek SNR'yi belirleyen, görünür ışık haberleşme kanal özelliklerinden en önemli olanını ifade etmektedir [24].

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (2.5)$$

Bu bilgilere ek olarak elektriksel işaret gürültü oranı, alıcıdaki foto-dedektörün duyarlılığına ve ortalama optik güce bağlı olarak (2.6) numaralı denklemdeki gibi elde edilir.

$$SNR = \frac{(RP_r)^2}{\sigma_n^2} \quad (2.6)$$

R , alıcı duyarlılığıdır. P_r , tüm LED lambalarından alınan gücü ifade eder. σ_n^2 , yukarıda da bahsedildiği gibi, AWGN'nin varyansını ifade etmektedir ve aşağıda görüldüğü üzere ısı ve atış gürültülerine sahiptir.

$$\sigma_n^2 = \sigma_{\text{ısı}}^2 + \sigma_{\text{atış}}^2 \quad (2.7)$$

Alıcı tarafta yer alan devre elemanları ısı gürültüyeü oluştururken, ortamda bulunan diğer ışık kaynakları ise atış gürültüsünü oluşturmaktadır. Isı ve atış gürültülerinin varyansları (2.8) ve (2.9) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilmektedir [26].

$$\sigma_{\text{ısı}}^2 = \frac{8\pi\kappa T_k}{G} C_p A_{PD} I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 \kappa T_k \Gamma_F}{g_m} C_p^2 A_{PD}^2 I_3 B^3 \quad (2.8)$$

$$\sigma_{\text{atış}}^2 = 2qRP_r B + 2ql_{bg} I_2 B \quad (2.9)$$

Bu denklemlerde kullanılan q elektron yükünü, T_k mutlak sıcaklığı, κ Boltzmann sabitini, A_{PD} foto-dedektör yüzey alanını, C_p foto-dedektörün birim alanı başına sabit kapasitesini, G açık çevrim gerilim kazancını, I_2 ve I_3 gürültü bant genişliği faktörlerini, l_{bg} arka plan ışımasının neden olduğu foto-akımını, g_m alan etkili transistörün (Field Effect Transistor, FET) iletkenliğini, Γ_F FET kanal gürültü faktörünü ve B bant genişliğini temsil etmektedir.

2.5.2 Modülasyon Çeşitleri

Haberleşme sistemlerinde gönderilecek datanın, gönderileceği ortam şartlarına uygun hale getirilmesi işlemine modülasyon ismi verilmektedir. Verilerin, istenen gönderim şekline uygun olarak hangi frekansta gönderilmesi gerektiği önceden belirlendikten sonra alt-taşıyıcı ile çarpılması modülasyonun bir parçasıdır. Haberleşme sistemlerinde tek taşıyıcı ile bu işlem yapılabildiği gibi çok taşıyıcı kullanılarak gönderilecek verinin iletilmesi sağlanır.

Modülasyon şemasının seçimi, sistem performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Modülasyon türü hem ışığın yapısına uygun hem de verimi artırmaya yönelik belirlenmelidir. Kullanılacak olan modülasyon türü istenilen veri hızı, maliyet ve sinyal gücü dikkate alınarak belirlenmelidir. Günümüzde görünür ışık haberleşme sistemlerinin yaygın olarak kullanımının artması, modülasyon çeşidinin belirlenmesini veya kullanılan modülasyon çeşidinin VLC için geliştirilmesini gerektirmektedir.

LED'ler, veri iletimi için faz bilgisinin kullanılmasına izin vermez. Sonuç olarak, veri modülasyonu için yalnızca gerçek değerli ve pozitif sinyaller kullanılabilir. Bu, karmaşık değerli ve iki kutuplu sinyalleri kullanan RF sistemlerinin tam tersidir. Bu nedenle, açıklandığı gibi tutarsız ışık kaynakları kullanan OWC, yalnızca bir yoğunluk modülasyonu (IM) ve doğrudan algılama (DD) sistemi olarak gerçekleştirilebilir. Görünür ışık haberleşme sistemlerinin, bahsi geçen IM/DD yöntemi ile gerçekleştirilmesinde oluşan gerçel ve pozitif sinyallerin gönderilmesi şartı, bu sistemlerde kullanılabilecek birçok modülasyon tekniği olmasına rağmen sınırlandırmaktadır. Bu konu ile ilgili ilk çalışmalarda, tek-taşıyıcılı sistemlerden sadece darbe-konum modülasyonu (pulse position modulation, PPM) ve açma-kapama anahtarlama (OOK) yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat bu tür haberleşme çeşitlerinin yüksek bant verimliliklerine ulaşmaları mümkün olmamıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda yüksek bant-verimliliğine sahip çok-seviyeli ve tek-taşıyıcılı darbe genlik

modülasyonu (pulse amplitude modulation, PAM) tekniği kullanılmaya başlanmıştır [27]. Son zamanlarda, özellikle veri transfer hızlarındaki yüksek artışlar sonucu güvenli haberleşmeyi gerçekleştirmek için dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM) vb. çok taşıyıcılı yöntemlerin optik haberleşmede kullanımı artış göstermektedir.

VLC sistemlerinde ilk kullanılan ve tek taşıyıcılı modülasyon tekniği olan Açma-Kapama Anahtarlama (On Off Keying, OOK) yönteminde iletim; LED'lerin kapalı ve açık olmasına bağlı olarak 0 ile 1 bilgi bitleriyle sağlanmaktadır. Kapalı durumdayken, tamamen kapatılmadan ışığın yoğunluğu azaltılarak iletim yapılır. Bu yöntemin kolay ve basit uygulanabilirliği önemli bir özelliğidir fakat iletimi yavaştır. Görünür ışık haberleşmesinde kullanılan diğer taban bant teknikleri; sinyale göre darbenin konumunu değiştiren Darbe Konum Modülasyonu (PPM) ve darbenin genişliğini değiştiren Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM)'dur. Hem dijital hem de analog iletim için kullanılan diğer tek taşıyıcılı modülasyon tekniği de Dördül Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation – QAM)'dur. Bu modülasyon tekniği, çok taşıyıcılı olabileceği gibi tek taşıyıcılı da olabilir. Taşıyıcı işaretin genlik ve faz değerlerinde değişiklikler yapılarak sisteme dahil edilir.

Tüm haberleşme sistemlerinde olduğu gibi görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde de aktarılan veri oranında artış olması istenmektedir. Bu yüzden çok taşıyıcılı modülasyonlara (Multi-Carrier Modulation – MCM) ait çalışmalar hız kazanmaktadır. Son zamanlarda görünür ışık haberleşmesinde yüksek iletim hızlarına ulaşabilmek için gelişmiş modülasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Görünür ışıkla haberleşme kanallarının doğrusal olmayan frekans bandı, tek taşıyıcılı sistemlerde yüksek Semboller Arası Girişim (ISI) oluşumuna sebebiyet verir. OFDM, çokyollu sönmülenmeden kaynaklanan semboller arası girişim sorununu çözmedeki yeteneğiyle dikkat çekmiş bir yöntemdir. Ancak yoğunluk modülasyonu/doğrudan sezim için OFDM tarafından üretilen karmaşık değerli bipolar işaretlerin gerçel değerli pozitif işaretlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşümün gerçekleştirme şekillerine göre temelde 3 farklı optik OFDM yöntemi bulunmaktadır: DC Eklemeli Optik OFDM (DC-biased O-OFDM), Asimetrik Olarak Kırılmış Optik OFDM (Asymmetrically-Clipped Optic OFDM, ACO-OFDM), (bölüm 3'te anlatılmıştır) ve Tek Kutuplu OFDM (Unipolar OFDM).

VLC için özel tasarlanmış modülasyon yöntemi IEEE 802.15.7 standardında bulunmaktadır. Bu yöntem Renk Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying, CSK)'dır. Bu yöntemde beyaz ışık üretebilmek için kırmızı, mavi ve yeşil olacak şekilde 3 çeşit LED kullanılmaktadır. Renk kaydırmalı anahtarlama bu 3 rengin yoğunluğunu kullanarak sinyali modüle eder [28]. Tablo 2.3'de görünür ışık haberleşmesinde kullanılan modülasyonların karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 2.3: Farklı modülasyon türlerinin karşılaştırılması [29].

Modülasyon Türü	BER	SNR (dB)	Veri Oranı
OOK	En Düşük	Yüksek	En Yüksek
PPM	Yüksek	Orta	Düşük
PWM	Yüksek	Düşük	En Düşük
OFDM	Yüksek	Düşük	En Yüksek
CSK	Düşük	Orta	Orta

3. BÖLÜM: OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE DİKGEN FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA (O-OFDM) YÖNTEMİ

Daha önce bahsedilen tek taşıyıcılı modülasyon şemalarının VLC’de kullanım sınırlamaları, görünür ışık iletişim kanallarının doğrusal olmayan frekans tepkisinden dolayı yüksek semboller arası girişime neden olmalarıdır. OFDM’de bu sorun bertaraf edilebildiği için görünür ışık iletişiminde kullanılması önerilmektedir.

Dik frekans bölmeli çoğullamanın (OFDM), birçok avantaja sahip olmasının yanında en büyük avantajı, dağınık bir kanalın neden olduğu semboller arası girişim (ISI) problemine etkili bir çözüm olmasıdır. Bu nedenle geniş bant kablolu ve kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci bir büyük avantajı, vericilerin ve alıcıların karmaşıklığını analogdan dijital alana aktarmasıdır. Örneğin, analog filtrelerin kesin tasarımı, seri modülasyon sistemlerinin performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilirken, OFDM’de, alıcının dijital parçalarında frekansla herhangi bir faz değişimi çok az maliyetle veya hiç maliyet olmadan düzeltilebilir. OFDM’nin bu önemli birçok avantajlarına ve kablosuz iletişimde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, OFDM optik iletişim için son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunun nedeni kısmen, dağınık optik ortamlarda artan veri hızlarına yönelik son zamanlardaki talep ve kısmen de dijital sinyal işleme (DSP) teknolojisindeki gelişmelerin optik veri hızlarında işlemeyi mümkün kılmasıdır. Bununla birlikte bir diğer önemli engel, geleneksel OFDM sistemleri ile geleneksel optik sistemler arasındaki temel farklılıklar olmuştur. Tablo 3.1 bu farklılıkları özetlemektedir.

RF haberleşme sistemlerinde kullanılan tipik (klasik - optik olmayan) OFDM sistemlerinde, bilgi elektrik alanı üzerinde taşınır ve iletilen sinyal hem pozitif hem de negatif değerlere (bipolar) sahip olabilir. Alıcıda lokal osilatör bulunur ve uyumlu algılama kullanılır. Tipik bir yoğunluk modülasyonlu doğrudan algılamalı optik

sistemin aksine, bilgi optik sinyalin yoğunluğu üzerinde taşınır ve bu nedenle sadece pozitif (tek kutuplu) olabilir. Alıcıda lokal osilatör görevi gören lazer yoktur ve tutarlı algılama yerine doğrudan algılama kullanılır.

Tablo 3.1: Tipik OFDM Sistem İle Tipik Optik Sistemin Karşılaştırılması [30].

TİPİK OFDM SİSTEM	BIPOLAR	Elektrik Alanında Taşınan Bilgi	Alıcıda Yerel Osilatör	Tutarlı Karşılama
TİPİK OPTİK SİSTEM	UNIPOLAR	Optik Yoğunlukta Taşınan Bilgi	Alıcıda Yerel Osilatör (lazer) Yok	Doğrudan Algılama

OFDM'nin teorik temeli birkaç on yıl önce atılmış olmasına ve OFDM'nin 1990'larda kablosuz ve kablolu uygulamalar için birçok iletişim standardının temeli olmasına rağmen, OFDM'nin optik iletişimde uygulanması ancak çok yakın zamanda düşünülmüştür. Bu kısmen OFDM modülasyonu ve geleneksel optik sistemler arasındaki bariz uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır. Çeşitli optik uygulamalar için çeşitli şekillerde bu uyumsuzlukların üstesinden gelen bir dizi OFDM formu geliştirilmiştir. Bunlar, optik kablosuz ve çok modlu fiber uygulamaları için uygun olanlar ve tek modlu fiber için uygun olanlar olarak sınıflandırılır. Birincisi için yoğunluk modülasyonu kullanılmalı, ikincisi için OFDM sinyali optik sinyal alanında taşınmalıdır.

Optik-OFDM'nin temel konsepti, bilgiyi taşımak için tek bir geniş bant taşıyıcı yerine çok sayıda paralel dar bant alt taşıyıcı kullanmaya dayanır. Veriler, bir dizi ortogonal frekans üzerinden paralel olarak iletilir. OFDM, aynı kapasiteye sahip tek taşıyıcı sisteme kıyasla her bir alt taşıyıcıda daha uzun sembol periyodu kullanır. OFDM'de daha uzun süreli sembollerin kullanılması, sistemin ISI etkisini azaltmasına yardımcı olur. Ek olarak, istenmeyen semboller arası girişim (ISI), döngüsel önek (CP) tarafından sunulan koruma aralığı ile hafifletilir [30].

Klasik OFDM yöntemlerinde, veriler elektriksel olarak iletilmektedir ve elektriksel sinyal negatif veya pozitif değerlere sahip olabilmektedirler. Dolayısıyla klasik OFDM yöntemlerinde gönderilecek sinyal karmaşık ve çift kutuplu olabilmektedir. Fakat OWC'de veri, ışığın anlık gücüyle iletildiğinden ötürü gönderilen sinyalin sadece pozitif ve gerçel değerli olma zorunluluğu bulunmaktadır [1].

Görünür ışık haberleşmesi gibi OWC sistemlerinde veri transferi, yoğunluk modülasyonu/doğrudan sezim (IM/DD) yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde veriler, ışık şiddeti aracılığıyla iletilebildiği için iletimde kullanılan optik sinyaller radyo frekans sistemlerinin tersine gerçel ve pozitif değerli olmak zorundadır. Bu yüzden, radyo frekans sistemlerinde kullanılan tipik OFDM yöntemi doğrudan görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde kullanılamamaktadır. Fakat OFDM yönteminde gerçel değerli bir OFDM işareti elde etmenin kolay şekli “Hermityen” (Hermitian) simetri (genlik spektrumu çift/faz spektrumu tek simetrik) özelliğini frekans alanında alt-taşıyıcılar aracılığıyla uygulamaya sokmaktır. Alt-taşıyıcılar ile iletilen işaretler, Ters hızlı Fourier dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) bloğu girişinde Hermityen simetri olacak şekilde ayarlanarak ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) bloğu çıkışında gerçel değerli hale getirilir. IFFT’nin sağladığı bu özellik ile, OFDM’in bant verimliliği yarıya düşse de, optik kanal aracılığıyla iletilen sinyal gerektiği gibi gerçel değerli olarak OFDM tekniğinin VLC sistemlerinde kullanılabilmesi mümkün kılınmıştır [22, 31].

Fakat elde edilen işaret hala negatif bileşenler içermektedir. Hermityen simetri özelliği sayesinde gerçel değerli olması sağlanan çift kutuplu işaretlerin, tek kutuplu, sadece pozitif değerli olarak gönderilebilmesi için literatürde 2 temel teknik önerilmektedir. OFDM yönteminin görünür ışık haberleşmesindeki kullanımı ile ilgili önerilen ilk yöntem DC eklemeli Optik OFDM (DCO-OFDM)’dir. Bir diğer yöntem ise, Asimetrik Olarak Kırpılmış Optik OFDM (ACO-OFDM)’dir.

3.1 DC Eklemeli Optik OFDM (DCO-OFDM)

DCO-OFDM yöntemi ile, verici tarafta yer alan IFFT işleminin ardından oluşan negatif gerçel işaretlerin, doğru akım (DC) ve pozitif yönde bir ofset ile yükseltilerek negatif bileşenlerinin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Eklenecek DC öngeriliminin, OFDM sinyalinin en küçük negatif değerini sıfır veya pozitif yapması beklenmektedir. DCO-OFDM’de bütün alt-taşıyıcılar modüle edilir, fakat işaretin tek kutuplu olması için pozitif bir DC eklenmektedir [32]. DCO-OFDM tekniğinde, gönderilmek istenen sinyali pozitif değerli yapabilmek için IFFT işlemi sonrasında oluşan çift kutuplu gerçel sinyale uygun genlikte bir pozitif sayı (DC öngerilim) eklenmesi yapılmaktadır. Eklenen doğru akım B_{DC} , IFFT işlemi sonrasında zaman bölgesinde oluşan işaret ise $x(t)$ ile ifade edilmek üzere, eklenecek DC öngerilim (3.1)

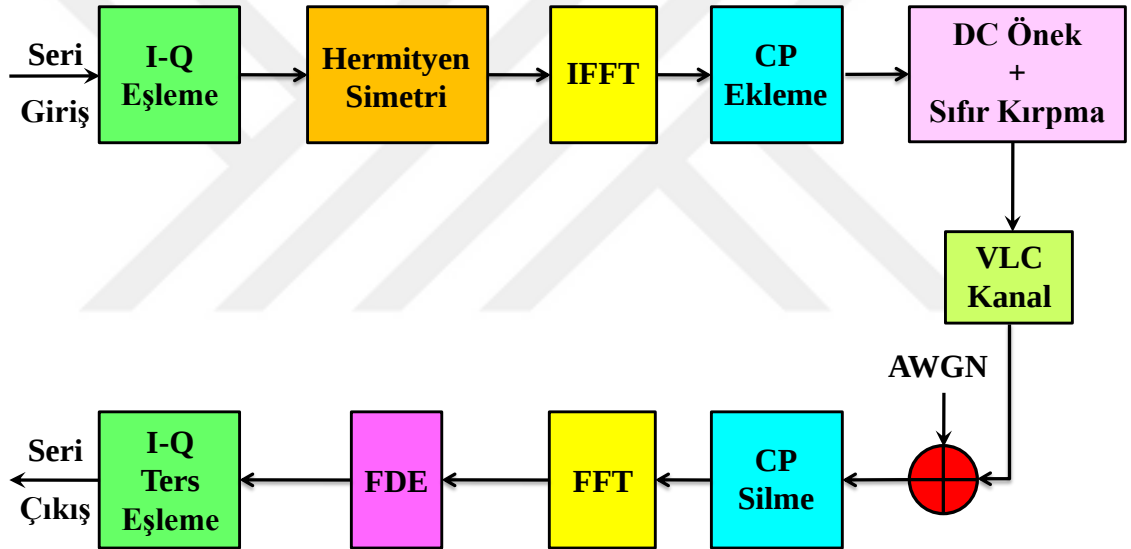
numaralı denklemdeki gibi $x(t)$ işaretinin standart sapmasına bağlı olarak hesaplanmaktadır [31].

$$B_{DC} = \mu \sqrt{E\{x(t)^2\}} \quad (3.1)$$

Burada μ gerçel ve pozitif değerli bir sayıyı, $E\{\cdot\}$ ise beklenen değeri ifade etmektedir. Eklenen B_{DC} pozitif sayının desibel cinsinden karşılığı denklem (3.2)'deki gibi elde edilmektedir [33].

$$B_{DC(dB)} = 10 \log_{10}(\mu^2 + 1) \quad (3.2)$$

DCO-OFDM yönteminin blok şeması şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. VLC sistemlerinde DCO-OFDM yönteminin blok diyagramı [33].

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bilgi işaretine I/Q eşleme yapıldıktan sonra IFFT bloğu öncesi, X karmaşık bilgi işareti Hermityen simetri olacak şekilde, yani denklem (3.3)'te yer alan şartları sağlayacak şekilde düzenlenir. Burada N , ters hızlı Fourier dönüşümü boyutunu, yani alt-taşıyıcı sayısını ifade etmektedir. $(*)$ ise eşlenik alma işlemini ifade etmektedir. Tipik DCO-OFDM sistemlerinde hem tek hem de çift alt-taşıyıcılar veri sembolleri taşır ve kırpma gürültüsü tüm alt-taşıyıcıları etkiler. Hermityen simetri özelliği ile IFFT bloğu çıkışında oluşan x işareti çift kutuplu ve gerçel sayılar içermektedir. Çevrimsel önek (Cyclic Prefix, CP) eklenerek elde edilen

OFDM işareti sayısal-analog dönüştürücüsü yardımıyla gerçel değerli ve çift kutuplu $x(t)$ işareti oluşmaktadır.

$$\begin{aligned} X(0) &= X\left(\frac{N}{2}\right) = 0 \\ X(K) &= X^*(N - K), \quad K = 1, 2, \dots, N - 1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Daha sonra, $x(t)$ gerçel ve çift kutuplu işarete doğru akım eklemesi yapıldıktan sonra elde edilen $x_{B_{DC}}(t) = x(t) + B_{DC}$ işaretinde geriye kalan negatif kısımlar denklem (3.4)'de olduğu gibi sıfıra kırpılarak LED'ler aracılığıyla iletilecek olan $x_{DCO}(t)$ işareti elde edilir [33].

$$x_{DCO}(t) = \begin{cases} x_{B_{DC}}(t), & x_{B_{DC}}(t) \geq 0 \\ 0, & x_{B_{DC}}(t) < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

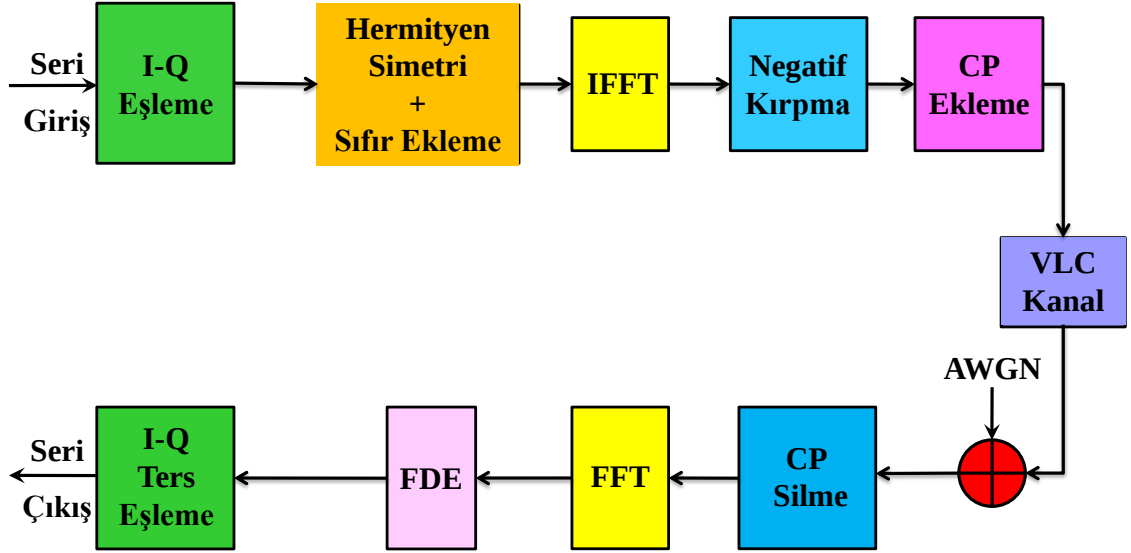
Oluşan bu işaret VLC kanal üzerinden iletilir. Alıcıda, alınan sinyal önce bir foto-diyot kullanılarak optik bir sinyalden elektrik sinyaline dönüştürülür. Bu noktadan sonraki işlemler, geleneksel bir OFDM alıcısı ile aynıdır.

DCO-OFDM yönteminin yapısı oldukça basittir fakat verici tarafında yapılan IFFT işlemi sonrasında DC eklemekten ötürü görünür ışık haberleşmesinin güç gereksinimi artış göstermektedir. Diğer bir deyişle DCO-OFDM'in güç verimliliği düşüktür. DCO-OFDM yönteminde ortaya çıkan bu soruna çözüm amaçlı ACO-OFDM yöntemi sunulmaktadır.

3.2 Asimetrik Olarak Kırpılmış Optik OFDM (ACO-OFDM)

ACO-OFDM yönteminde, DCO-OFDM tekniğinden farklı olarak negatif sinyalleri giderme işlemi kırpma yoluyla yapılmaktadır. ACO-OFDM yöntemine, DC öngerilim eklemesi yapılmadığından daha az güç tüketmektedir. Bu yüzden ACO-OFDM yöntemi DCO-OFDM yöntemine göre pratik uygulamalarda daha fazla tercih edilmektedir. Fakat kırpma işleminden kaynaklanan bozulmalar, alıcının çıkışındaki sinyali etkilemektedir. Bu bozulmalar, alt-taşıyıcılar arasındaki girişim (ICI) veya kırpma gürültüsü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu yöntemde, veri sinyalinin pozitif değerli olarak gönderilebilmesi için FFT dönüşümünden yararlanılır ve sadece tek indisli alt-taşıyıcıların kullanımı esas alınır.



Şekil 3.2. VLC sistemlerinde ACO-OFDM yönteminin blok diyagramı [33].

Şekil 3.2’de verilen ACO-OFDM yönteminin blok diyagramı incelendiğinde, (3.3) numaralı denklemdeki Hermityen simetrilik şartlarını sağlayan I/Q eşleme bloğunda modüle edilmiş X işareti, çift indisli alt-taşıyıcılar sıfır olacak ve sadece tek indisli alt-taşıyıcılar kullanılacak şekilde, yani $X = [0, X_1, 0, X_3, \dots, 0, X_{N-1}]$ ayarlanır. Bu ayarlamalar sonucunda, IFFT bloğu çıkışında zaman bölgesindeki x işaretinin negatif ve pozitif değerli örnekleri, denklem (3.5)’de görüldüğü üzere, simetrik bir yapıya sahip olmaktadır. Alt-taşıyıcı sayısı N ile belirtilmektedir.

$$x\left(n + \frac{N}{2}\right) = -x(n), \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (3.5)$$

Çevrimsel örnek eklenerek elde edilen OFDM sembolü denklem (3.6)’da görüldüğü gibi herhangi bir veri kaybı olmadan negatif kısımlar çıkarılarak LED’ler aracılığıyla gönderilecek olan $x_{ACO}(t)$ işareti elde edilir. Böylelikle ACO-OFDM yönteminde bilgi sinyali, DC öngerilime ihtiyaç kalmadan pozitif şekilde iletilebilir [31].

$$x_{ACO}(t) = \begin{cases} x(t), & x(t) \geq 0 \\ 0, & x(t) < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

ACO-OFDM yönteminde, DC öngerilime ihtiyaç duyulmadığından, DCO-OFDM yöntemine göre daha iyi güç verimliliği elde edilmektedir. Fakat bu yöntemde sadece tek indisli alt-taşıyıcılar ile veri gönderimi yapılabildiğinden DCO-OFDM’e

göre veri hızında %50 ödün vermektedir ve bant verimliliği de DCO-OFDM'in yarısı kadar olmaktadır [31].

Tablo 3.2: DCO-OFDM ve ACO-OFDM Karşılaştırma Özeti [34].

VLC				
Parametreler	DCO-OFDM		ACO-OFDM	
	Düşük SNR'de	Yüksek SNR'de	Düşük SNR'de	Yüksek SNR'de
Enerji Verimliliği	Kötü	Kötü	İyi	İyi
Spektrum Verimliliği	İyi	İyi	Kötü	Kötü
PAPR	İyi	İyi	Kötü	Kötü
Karmaşıklık	İyi	İyi	Kötü	Kötü
Doğrusal Olmama Toleransı	İyi	İyi	Kötü	Kötü
Gecikme	İyi	İyi	Kötü	Kötü

Tablo 3.2 incelendiğinde, DCO-OFDM'nin spektrum verimliliği açısından ACO-OFDM'den daha verimli olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Tüm bunlara ek, geliştirilmekte olan çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) sistemler, hem yüksek hızlı, güvenilir haberleşme bağlantısının kurulabilmesi hem de yüksek enerji verimliliğiyle yeterli aydınlatmanın sağlanabilmesi açısından VLC'de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

3.3 VLC Haberleşme Sistemlerinde Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (MIMO-OFDM)

MIMO, daha fazla veri transferi sağlayabilmek için aynı anda 2 veya daha fazla antene sahip sistemlere verilen isimdir. Bir telsiz haberleşme sisteminin verici ve alıcı taraflarında birden çok verici/alıcı birim kullanılmasıyla elde edilen çok-girişli ve çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemler, RF haberleşme sistemleri için 2000'li yılların başından itibaren araştırmacılar tarafından oldukça ilgi görmüş ve yaygın olarak kullanılmaya, geliştirilmeye başlanmıştır. MIMO sistemlerin tek verici ve tek alıcılı (Single-Input Single-Output, SISO) sistemlere kıyasla hata başarımında ve veri hızında gösterdiği kayda değer gelişimler dolayısıyla günümüzde MIMO sistemler IEEE 802.11n (Wi-Fi), 4G, 3GPP uzun süreli evrim (Long Term Evolution, LTE), WiMAX vb. birçok telsiz iletişim standardında yerini almıştır. OFDM ise ISI ile etkili

bir şekilde baş edebilmesi ve kanalın bozucu etkilerini en aza indirgeyebilmesi nedeniyle sözü geçen bu standartların içerisinde tek taşıyıcılı sistemlere alternatif olarak MIMO teknolojisi ile entegre bir şekilde yer almaktadır [35]. MIMO ve OFDM tekniklerinin sağladıkları avantajlar göz önünde bulundurulduğunda gelecekte önerilecek standartlarda bu iki teknik sıkla kullanılacaktır. Gelişmekte olan VLC haberleşme sistemleri için de bu durum aynıdır. MIMO tekniğinin VLC haberleşme sistemlerinde uygulanmasıyla diğer haberleşme sistemlerine göre veri hızında iyileşmeler elde etmek mümkündür [36].

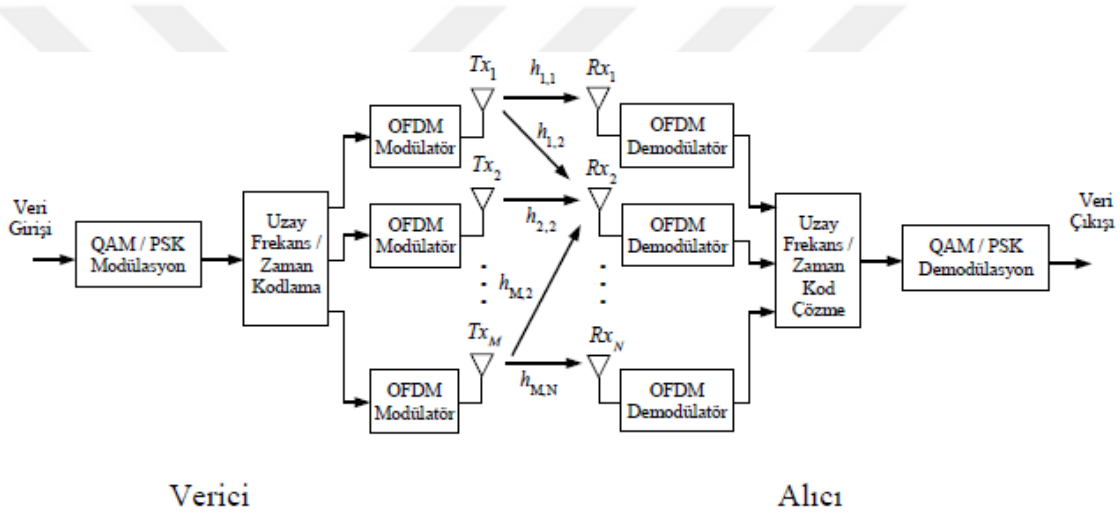
Yeterli aydınlatma sağlamak için armatürlerin çoğu tipik olarak birden fazla LED içerir. Bu çoklu LED'ler, görünür ışık MIMO iletişimini etkinleştirebilen çoklu vericiler olarak ele alınabilir. RF iletişimlerinde, spektral verimliliği artırarak daha yüksek veri hızları elde etmek için MIMO sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (IEEE 802.11n, Long-Term Evolution - LTE'de). Benzer şekilde, VLC'de de daha yüksek spektral verimlilik için birden fazla LED kullanılabilir.

MIMO'nun, aynı zamanda daha fazla veri transferi sağlayabilmek için 2 veya daha fazla anten kullanan sistemlere denildiğinden bahsetmiştik. MIMO teknolojisi, kablolu kanalın yapısındaki değişimlerden yararlanarak, antenlerin belli bir mesafe aralıklarıyla konumlandırılmasıyla ortaya çıkan kesişmeyen sanal kanallar üzerine kurulmuş bir teknolojidir. Örneğin; vericide ve alıcıda 2 anten varsa 2x2 MIMO, 4 anten varsa 4x4 MIMO olarak tanımlanmaktadır. Yani 2x2 MIMO 2 paralel kanal oluşturabilmektedir, 4x4 MIMO ise 4 kanal oluşturabilmektedir. Antenlerden aynı veri gönderilerek alıcının gönderilen veriyi güçlendirilmiş bir şekilde hatasız alması sağlandığı gibi antenlerden farklı veri gönderilerek kapasitenin anten sayısı ile katlandığı kullanım da mevcuttur. 2x2'lik için alıcı ve vericide simetrik anten sayısı aranmaz ama 4x4'lük için kapasite en az anten sayısı kadar katlanır. Örneğin 4x2 MIMO'da kapasite en fazla ikiye katlanabilir. MIMO teknolojisi şimdilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [37].

VLC sistemlerinin 6G teknolojilerine uyarlanması için varolan modülasyon çeşitlerinin sağladığı izge verimleri yetersiz gelmektedir [38]. İzge verimini artırmanın yollarından biri MIMO iletim metodudur ve RF sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte MIMO sistemlerinin VLC'de yaygın olarak kullanılmaya başlanmasının en önemli nedenleri hem yüksek hızlı ve güvenilir haberleşme bağlantısının yapılabilmesi hem de yüksek enerji verimliliğiyle yeterli

aydınlatmanın sağlanabilmesidir. VLC'deki MIMO sistemlerini gerçekleştirmek, RF iletişimlerine kıyasla zordur. RF MIMO sistemlerinde, verim kazanımları büyük ölçüde uzamsal çeşitliliğe (doğası gereği çeşitli olan çoklu uzamsal yolların varlığı) dayanır. Bununla birlikte, VLC MIMO'da bu tür çeşitlilik kazançları sınırlıdır çünkü verici ve alıcı arasındaki yollar, özellikle iç mekan senaryolarında çok benzerdir (daha az çeşitlidir). Bu, VLC MIMO sistemlerinin mevcut uzamsal çeşitliliğini sınırlar [16]. Öte yandan MIMO iletim tekniklerinde başarıyı etkileyen önemli faktörlerden biri de kanallar arası ilintidir. VLC’de ise MIMO kanallar birbiriyle yüksek ilintilidir.

Şekil 3.3’de N tane alt taşıyıcıya sahip OFDM tekniğini kullanan N_T tane verici ve N_R tane alıcı antene sahip bir MIMO-OFDM sisteminin blok şeması verilmektedir [39].



Şekil 3.3. MIMO-OFDM sistem modeli [39].

MIMO-OFDM sistemine gelen sayısal dataların ilk önce QAM veya PSK eşlemeleri yapılır. Daha sonra uzay-frekans veya uzay-zaman kodlaması yapılarak iletimin yapılacağı kanalda oluşabilecek girişimlere ve gürültülere karşı koruma sağlanmaktadır. Uzay-frekans ve uzay-zaman kodlamalarının yapıları, MIMO-OFDM sistemlerinde kullanılan anten sayılarına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu tez çalışmasında vericide iki adet led alıcıda iki adet fotodiyot (2x2) ve vericide dört adet led alıcıda dört adet fotodiyot (4x4) kullanılarak elde edilen MIMO-OFDM sistemi kullanılmıştır.

VLC-MIMO kanal üzerinden iletim;

$$Y = H_x + N \quad (3.7)$$

eşitliği ile sağlanır. Burada Y , alınan sinyal vektörünü, N , ortam atış ışıgı gürültüsü ve termal (ısı) gürültünün toplamını ifade eder. OWC'de yaygın olarak varsayıldığı gibi iletilen sinyallerden ve ana gürültü bozukluğundan bağımsızdır. Sonuç olarak, N , sıfır ortalamalı ve $\sigma_n^2 = \sigma_{\text{ısı}}^2 + \sigma_{\text{atış}}^2$ varyanslı gerçel değerli toplamsal beyaz Gauss gürültüsüdür (AWGN). Burada $\sigma_{\text{atış}}^2$, atış gürültü varyansı ve $\sigma_{\text{ısı}}^2$, termal gürültü varyansıdır.

Şekil 3.3'te verilen MIMO-OFDM sistemine ait $N_R \times N_T$ boyutundaki H kanal matrisi aşağıda verilen denklem (3.8)'deki gibidir:

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & \dots & h_{N_T,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} & \dots & h_{N_T,2} \\ \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \dots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Burada yer alan $h_{i,j}$, i . verici antenden j . alıcı antene olan kanal katsayılarını ifade eder. Bu durumda sistemin alıcı kısımdaki işareti denklem (3.9)'da verildiği gibidir:

$$y^i[n] = \sum_{j=1}^{N_T} X_j h_{i,j} + w_j \quad (3.9)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_T \quad j = 1, 2, \dots, N_R$$

Burada X_j j . antenden alınan işaret, w_j AWGN'dir.

4. BÖLÜM: VLC SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR OPTİK DALGA FORMU TASARIMI

Kablosuz hizmetler ve uygulamalardaki hızlı artışla birlikte sınırlı radyo frekansı (RF) spektrumu, gelecekteki veri hızı taleplerini karşılamak için yeterli olmayabilir. Uygulanabilir bir tamamlayıcı yaklaşım olarak, Optik Kablosuz İletişim (OWC), katıhal aydınlatma teknolojisindeki teknolojik atılımların bir sonucu olarak önemli ölçüde dikkat çekmiştir. OWC'nin önemli bir avantajı, her bir verici LED için çok büyük bir bant genişliği sunmasıdır. Mevcut OWC sistemlerinde, modüle edilmiş elektrik sinyalini optik sinyale dönüştürmek için verici olarak Işık Yayan Diyotlar (LED'ler) kullanılır. Alıcıda, optik sinyal fotodiyotlar (PD'ler) tarafından algılanır ve dijital sinyal işleme teknikleri kullanılarak demodüle edilir.

LED'ler faz bilgilerinin veri iletimi için kullanılmasına izin vermez. Sonuç olarak, veri modülasyonu için yalnızca gerçel değerli ve pozitif sinyaller kullanılabilir. Bu, karmaşık değerli ve iki kutuplu sinyallerden yararlanan RF sistemlerinin tam tersidir. Bu nedenle, tarif edildiği gibi tutarsız ışık kaynakları kullanan OWC, yalnızca bir yoğunluk modülasyonu (IM) ve doğrudan sezim (DD) sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Daha önce bahsedildiği gibi, IM/DD için, Darbe Genlik Modülasyonu (PAM), Darbe Konum Modülasyonu (PPM) ve Açma-Kapama Anahtarlama (OOK) gibi standart dijital modülasyon yöntemleri tasarlanmıştır [40].

Yüksek hızlı veri iletimi için Semboller Arası Girişim (ISI) bir sorun haline gelmektedir ve hesaplama açısından karmaşık eşitleme teknikleri gerektirir. Dördüncü nesil (4G) kablosuz iletişimde, şiddetli ISI ile başa çıkmak ve daha donanımlı olduğu için Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) kullanılmıştır. Optik iletişimde de, IM/DD sistemleri bağlamında da uygulanabilir [30]. IM/DD sistemi yalnızca gerçel değerli sinyalleri iletebildiğinden, Optik OFDM'nin (O-OFDM) gerçel değerli semboller üretmesi gerekir. Bu, sinyal üretim aşamasında ters hızlı Fourier dönüşümü

(IFFT) işleminden önce bilgi çerçevesine Hermityen simetrisi uygulanarak elde edilebilir. Bu, spektral verimliliğin yarısı pahasına gelir. Genel olarak, LED'ler için gerekli olan pozitif optik sinyalleri sağlamak için standart teknikler, Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM (ACO-OFDM) ve Doğru Akım Eklemeli Optik OFDM (DCO-OFDM)'dir [41]. DCO-OFDM'de bir DC sapması eklenir. ACO-OFDM'de, sistem çift alt taşıyıcılara sıfırlar ekler ve yalnızca tek alt taşıyıcıları modüle eder. Bu, herhangi bir negatif numunenin bozulma olmadan kırılmasına izin verir. DCO-OFDM'deki DC sapması ve kırpma gürültüsü, bit hata oranı (BER) performansı üzerinde bir etkiye sahiptir [42]. Yüksek güçlü sinyaller gerektiğinde, etki önemli hale gelir. ACO-OFDM'de, ihmal edilebilir bir DC sapması olmasına rağmen, şema, aynı Dördün Genlik Modülasyonu (QAM) küme boyutu için DCO-OFDM'ye kıyasla %50 spektral verimliliği kaybeder.

Gerekli aydınlatmanın sağlanabilmesi için birden fazla LED'in kullanılması görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde oldukça yaygın bir durumdur. Bu nedenle görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde çoklu girişli-çoklu çıkışlı (multiple-input multiple output, MIMO) iletim tekniği ortaya çıkmaktadır. MIMO sistemler hem yüksek hızlı ve güvenilir haberleşme bağlantısının kurulabilmesi hem de yüksek enerji verimliliğiyle yeterli aydınlatmanın sağlanabilmesi açısından VLC'de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Çoklu ışık yayan diyotların (LED) kullanılması, görünür ışık iletişiminde (VLC) spektral verimliliği arttırmanın çekici bir yoludur. Son zamanlarda literatürde iki LED kullanan DC eklemeli olmayan bir OFDM (NDC-OFDM) şeması önerilmektedir. Literatürde var olan NDC-OFDM yöntemi [40], 2×2'lik bir MIMO-VLC kanalda çalışmaktadır. VLC için NDC OFDM'nin, çoklu LED ayarlarında DC eklemeli OFDM (DCO-OFDM) ve diğer OFDM şemalarına göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

DCO-OFDM'de eklenecek olan DC gerilim değeri dolaylı olarak OFDM işaretinin tepe-ortalama güç oranına (peak-to-average power ratio, PAPR) bağlıdır. OFDM'in genellikle yüksek PAPR'a sahip olması nedeniyle bu DC gerilimin değeri çoğunlukla büyük olmaktadır. Bu durum DCO-OFDM'i güç bakımından verimsiz yapmaktadır. DC eklemesiz optik OFDM (non-DC biased OFDM, NDC-O-OFDM), DCO-OFDM ve ACO-OFDM'in yukarıda bahsedilen dezavantajlarını ortadan kaldırabilecek özgün bir MIMO-VLC sistemi olarak önerilmektedir.

NDC-OFDM'de [40], OFDM sembollerinin pozitif ve negatif kısımları, verici ünitenin indeksinin sembolün polaritesini modüle ettiği iki farklı optik verici ünite tarafından iletilir. NDC-OFDM herhangi bir DC önyargı kullanmaz ve bu nedenle DCO-OFDM'den daha fazla elektrik verimliliği sağlar. Bununla birlikte, bu tez çalışmasında NDC-OFDM'e ek optik modülatörler, optik dedektörler, çeşitli kodlayıcılar, denkleştiriciler eklenerek DCO-OFDM'e kıyasla daha iyi güç verimliliği elde etmek hedeflenmektedir. Bunun sonucunda MIMO-OFDM tabanlı sistemlere yeni bir form geliştirerek literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

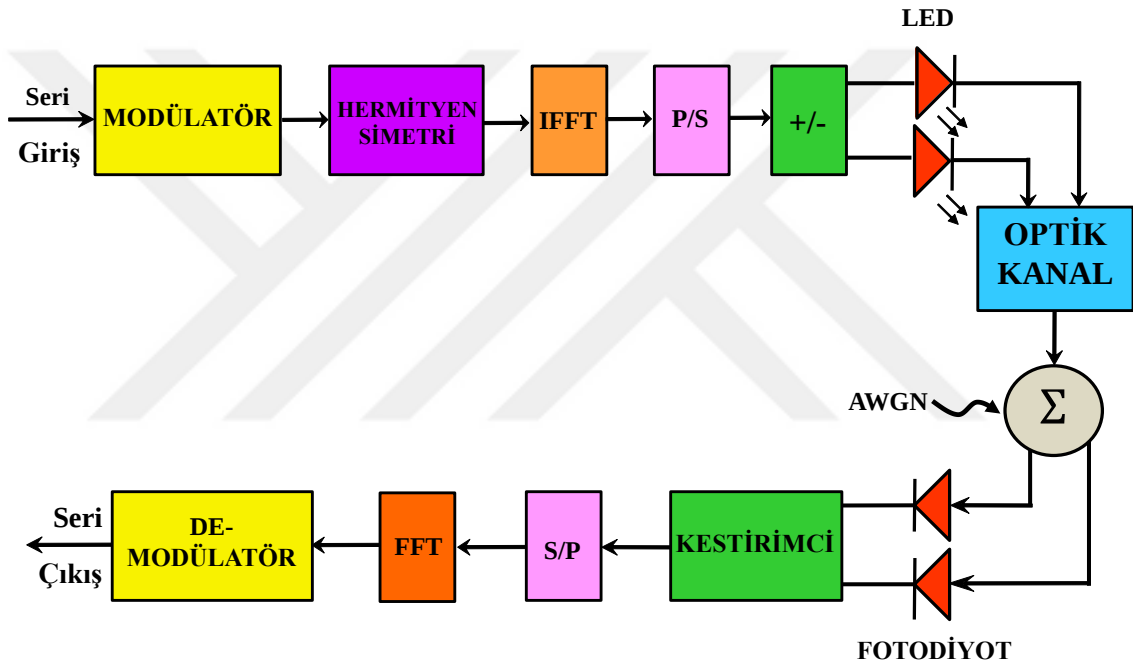
Bu bağlamda NDC-O-OFDM, DCO-OFDM ve ACO-OFDM'in problemlerini ve zorluklarını ortadan kaldıran özgün ve yeni bir MIMO-VLC sistem yapısı olarak önerilmektedir. NDC-O-OFDM, 2x2 ve 4x4 MIMO-VLC kanal ile elde edilmiştir. VLC sistemlere uygulanmasına yönelik çalışmalar bu tezde yapılmıştır. NDC-O-OFDM sistemi NDC tekniğinin optik OFDM sistemlerine entegre edilmesi ile elde edilmiştir. Ele alınan NDC-O-OFDM yönteminde MIMO yapısı kullanılmış ve karmaşık OFDM sinyalleri pozitif-negatif ve gerçel-sanal kısımlarına ayrılması sağlanarak, bu bileşenlerin gerçel bir MIMO-VLC kanal aracılığıyla iletimi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, MIMO ve OFDM tabanlı özgün iletim tekniklerinin geliştirilmesi üzerine, NDC-O-OFDM sistemine seçenek olarak yeni bir optik dalga formu önerilmiştir. Bu yeni dalga formuna, VLC sistemlerinin başarımını iyileştirmek için lifting dalgacık dönüşümü tekniği uygulanmıştır. Önerilen yöntem, lifting dalgacık dönüşümü ile DC eklemesiz optik OFDM'in birleşimiyle oluşan (LWT-NDC-O-OFDM) ve literatürde var olmayan yeni bir yöntemdir.

Önerilen bu sistemde temel amacımız; yüksek hızlarda veri iletimini sağlayan, dış etmenlerden etkilenmeyen, güvenilir ve optimal yapıda bir VLC sistem tasarımı gerçekleştirmektir. Önerilen yöntemde, MIMO teknolojisi kullanılmış ve karmaşık OFDM işaretleri pozitif-negatif ve gerçel-sanal kısımlarına ayrılarak bu işaretlerin MIMO-VLC kanal ile iletimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaların başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Önerilen sistemin literatürdeki mevcut sistemlere göre en temel üstünlüğü gerek Hermityen simetri kullanımı, gerekse DC gerilim eklemekten ya da asimetrik kırpma işlemi uygulamadan yüksek bant verimliliğinin elde edilmesidir.

4.1 DC Eklemesiz Optik OFDM Tekniği (NDC-O-OFDM)

NDC-O-OFDM'de LED'ler yalnızca $x(k)$ 'nın mutlak değeriği gönderir ve sembolün işareti ilgili LED'in indeksi ile temsil edilir. NDC-O-OFDM modülasyonu ile diğer modülasyon türleri arasındaki temel fark NDC-O-OFDM'nin gerçel ve hayali ayırıcı bloklara ihtiyaç duymamasıdır. Çünkü NDC-O-OFDM, karmaşık sayıyı gerçeğe dönüştüren Hermityen simetri bloğu kullanır. NDC-O-OFDM'de, pozitif ve negatif (bipolar) değeriği sembolleri iletmek için iki farklı LED kullanılır (2x2). DC eklemeli olmayan (NDC) OFDM, bipolar OFDM sinyalini iletmek için uzamsal boyuttan yararlanır. Şekil 4.1'de 2x2 MIMO NDC-O-OFDM'nin blok şemasını gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Klasik NDC-O-OFDM Blok Şeması

Burada, $\frac{N}{2} - 1 \log_2 M$ gelen veri bitleri $\frac{N}{2} - 1$ QAM sembollerine eşlenir; M , QAM işaret yıldız boyutudur, yani modülasyon derecesidir. DC alt taşıyıcısı (yani X_0) sıfıra ayarlanır. $\frac{N}{2} - 1$ QAM sembolleri, 1 ila $\frac{N}{2} - 1$ arasındaki alt taşıyıcılara eşlenir, yani, $\{X_1, X_2, \dots, X_{\frac{N}{2}-1}\}$ olur. Karmaşık sayıyı gerçeğe dönüştüren Hermityen (Hermitian) simetri bloğu kullanılır. Hermityen simetrisi kalan $\frac{N}{2}$ alt taşıyıcılara uygulanır, yani ilk $\frac{N}{2}$ alt taşıyıcılardaki sembollerin karmaşık eşlenikleri, ikinci yarı alt

taşıyıcılar üzerinde ters sırada eşlenir, burada $\frac{N}{2} + 1$ 'inci alt taşıyıcı sıfıra ayarlanır. Yani, N -noktasına IFFT girişi şu şekilde verilir:

$$\left[0, X_1, X_2, \dots, X_{\frac{N}{2}-1}, 0, X_{\frac{N}{2}-1}^*, \dots, X_2^*, X_1^*\right]^T \quad (4.1)$$

Hermityen simetri işlemi, IFFT çıktısının gerçek ve iki kutuplu olmasını sağlar. $x(n)$ bipolar IFFT çıkışı olsun. Bu çıkış, $x(n)$ 'nin pozitif ve negatif kısımlarını ayıran bir polarite ayırıcıya iletilir. Bu nedenle, belirli bir zamanda, aktif LED'in (yani, LED1 ve LED2) indeksine OFDM sinyalinin işareti ile karar verildiğinde yalnızca bir LED aktif olacaktır. Elde edilen gerçel pozitif işaretler LED'ler vasıtasıyla çok yollu optik kanal ile iletilerek alıcı tarafta foto-diyotlar aracılığıyla alınarak toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) ile bozulur. Bu şema, belirli bir kanal kullanımında etkinleştirilecek LED'in işarete göre seçildiği, uzaysal modülasyonlu (SM) OFDM olarak görülebilir. Alıcı kısımda verici taraftaki işlemlerin tam tersi işlemler yapılır. Kestirimci bloğunda; Hermityen simetrisi nedeniyle, OFDM sembolü başına iletilen bağımsız QAM sembollerinin sayısı N 'den $\frac{N}{2} - 1$ 'e düşürülür. Böylece, NDC-O-OFDM'nin elde edilen veri hızı aşağıdaki gibi olur.

$$\eta_{nac} = \frac{N - 2}{2N} \log_2 M \quad (4.2)$$

FFT çıkışından, N -noktalı, 1 ila $\frac{N}{2} - 1$ arasındaki alt taşıyıcılar, iletim verilerini geri almak için demodüle edilir. NDC-O-OFDM'nin, çoklu LED ayarlarında diğer OFDM şemalarına kıyasla daha iyi performans elde ettiği görülür.

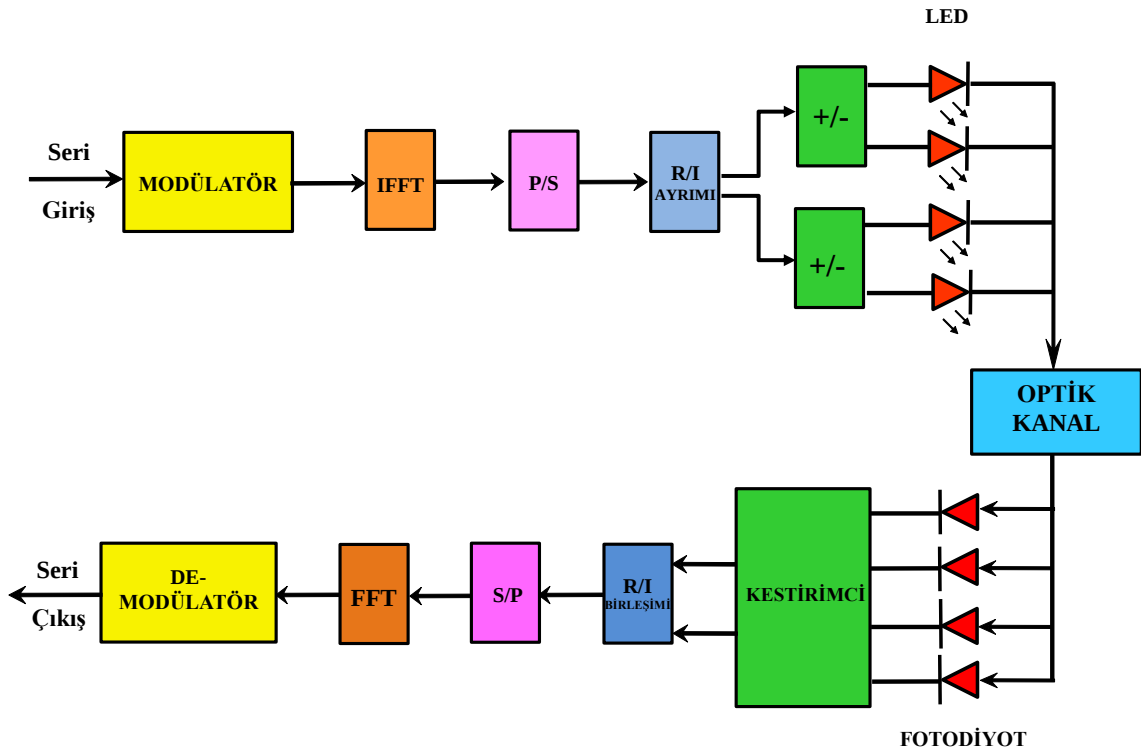
Özetle; NDC-O-OFDM'de, pozitif ve negatif değerli sembolleri iletmek için iki farklı LED kullanılır ve alıcı bölümünde, sembollerin işaretini ve büyüklüğünü tahmin etmek üzere bir tahminci kullanılır. NDC-O-OFDM'de, DCO-OFDM modülasyon bloğundan sonra semboller farklı LED'ler tarafından iletilir. Pozitif OFDM sembolü bir LED tarafından iletilir ve negatif sembol başka bir LED tarafından iletilir. LED sadece pozitif sinyaller iletebildiğinden, negatif sembolün mutlak değeri iletilir. Vericilerin indeksleri iletilen sinyalin işaretlerini temsil eder ve sinyalin mutlak değeri optik yoğunluk sinyalleri olarak gönderilir. Bir sembol süresi boyunca sadece bir LED aktif olur. İletilen sembol pozitif ise, sembolü göndermek için ilk LED etkinleştirilecektir.

Sembol negatif ise, mutlak değeri diğer LED tarafından gönderilecektir. Elde edilen pozitif ve gerçel işaretler $n_R \times n_T$ boyutlu bir MIMO VLC kanal aracılığıyla iletilir. Burada n_T ve n_R sırasıyla verici ve alıcı sayısını göstermektedir. Bu MIMO tasarımı için $n_T = 2$ olmaktadır. Alıcı birim sayısı ise, $n_R = 2$ olarak seçilmiştir.

Ele alınan 2x2 optik MIMO kanal matrisi H , (4.3) numaralı eşitlikteki gibidir.

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

MIMO ve OFDM tabanlı özgün iletim tekniklerinin geliştirilmesi üzerine, 2x2 MIMO NDC-O-OFDM (klasik NDC-O-OFDM) sistemine alternatif olarak 4x4 MIMO NDC-O-OFDM sistemi ile de çalışmalar yapılmıştır. Şekil 4.2’de, bu tez çalışmalarında da kullanılan 4x4 MIMO NDC-O-OFDM blok diyagramı verilmektedir. Bu sistemde MIMO teknolojisi yer almış ve karmaşık OFDM işaretleri pozitif-negatif ve gerçel-sanal kısımlarına ayrılarak bu işaretlerin MIMO-VLC kanal ile iletimi gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde literatürdeki mevcut sistemlere göre en temel üstünlük, gerek Hermityen simetri gerekse DC gerilim eklemekten ya da asimetrik kırpma işlemi uygulamadan yüksek bant verimliliğinin elde edilmesidir.



Şekil 4.2. 4x4 MIMO NDC-O-OFDM blok diyagramı.

Şekilde; her bir OFDM bloğunun iletimi için $N \log_2 M$ bit içeren u vektörü vericiye gelmektedir. N ve M değişkenleri sırasıyla OFDM alt-taşıyıcı sayısını (FFT vektörü boyutu) ve dik genlik modülasyonu (M-QAM) işaret uzayının eleman sayısını göstermektedir. Bu sistemde, modülasyon işlemi sonrası elde edilen $N \times 1$ boyutlu karmaşık frekans bölgesi vektörü x_F , NDC-O-OFDM, DCO-OFDM ve ACO-OFDM sistemlerinin tersine, iletilecek sinyallerin karmaşık olması problemine çözüm getirdiğinden, Hermityen simetri işlemine tabi tutulmadan IFFT işlemi bloğunda işlem görmektedir.

IFFT işleminin ardından oluşan $N \times 1$ boyutlu zaman bölgesi vektörü $x_T = [x_1, \dots, x_N]^T$ ise çift kutuplu ve karmaşık değerli (bipolar) olması sebebiyle anten yerine kullanılan LED'ler üzerinden iletimi mümkün değildir. Paralel/Seri (P/S) dönüşümünün ardından her bir karmaşık OFDM işareti $x_k = x_{k,R} + jx_{k,I}$, gerçel ve sanal kısımlarına ayrıştırılır. Elde edilen çift kutuplu ve gerçel işaretler olan $x_{k,R}$ ve $x_{k,I}$, pozitif-negatif (+/-) ayırıcılar sayesinde aşağıdaki pozitif değerli ve gerçel işaretler elde edilir;

$$\begin{aligned}
 x_{k,R}^+ &= \begin{cases} x_{k,R} & \text{eğer } x_{k,R} > 0 \\ 0 & \text{eğer } x_{k,R} < 0 \end{cases} \\
 x_{k,R}^- &= \begin{cases} 0 & \text{eğer } x_{k,R} > 0 \\ -x_{k,R} & \text{eğer } x_{k,R} < 0 \end{cases} \\
 x_{k,I}^+ &= \begin{cases} x_{k,I} & \text{eğer } x_{k,I} > 0 \\ 0 & \text{eğer } x_{k,I} < 0 \end{cases} \\
 x_{k,I}^- &= \begin{cases} 0 & \text{eğer } x_{k,I} > 0 \\ -x_{k,I} & \text{eğer } x_{k,I} < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Elde edilen pozitif ve gerçel (tek kutuplu) işaretler $n_R \times n_T$ boyutlu bir MIMO VLC kanal vasıtasıyla iletilirler. Burada n_T ve n_R sırasıyla verici ve alıcı sayısını belirtmektedir. Bu MIMO tasarımı için $n_T = 4$ olmaktadır. Alıcı birim sayısı $n_R = 4$ olarak ayarlanmıştır. Bu sistemde LED'ler $x_{k,R}$ ve $x_{k,I}$ işaretlerinin mutlak değerlerini IM/DD yapısıyla göndermekte ve alıcıda alınmasını sağlamaktadır. İletime dahil olan LED'lerin indisleri ise klasik NDC-O-OFDM sistemine benzer şekilde gönderilen işaretlerin pozitif/negatif olma durumu hakkında bilgi vermektedir. Ancak klasik NDC-O-OFDM sisteminde yalnızca iki LED'den oluşan bir verici yapısı kullanılmasıyla sadece tek bir gerçel simgenin indisi ve mutlak değeri iletilmektedir. Bu 4x4 MIMO

sisteminde ise dört LED'in kullanılmasıyla birlikte, karmaşık bir OFDM işareti olan x_k 'nin iki gerçel işarete ($x_{k,R}$ ve $x_{k,I}$) ayrıştırılması sonucu VLC kanalı ile iletimi gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda 4x4 MIMO sisteminin bant verimliliği, $\eta = \log_2(M)$ [bit/sn/Hz] olmaktadır ve bu değer tipik radyo frekansı haberleşmesindeki OFDM sistemlerinin bant verimliliğiyle aynı olup klasik NDC-O-OFDM sisteminin bant verimliliğinin iki katı kadardır. Bunun nedeni, bu yapıda gerçel değerli OFDM işaretleri elde edilmesi ve dolayısıyla da Hermityen simetriye gereksinim olmamasıdır. Gerçel ve pozitif değerli işaretler $x_{k,R}^+$, $x_{k,R}^-$, $x_{k,I}^+$ ve $x_{k,I}^-$, 4x4 boyutlu optik MIMO kanalından iletilir.

Bu MIMO sistem için, $x = [x_{k,R}^+ \ x_{k,R}^- \ x_{k,I}^+ \ x_{k,I}^-]^T$ şeklindedir. Başka bir ifadeyle x 'in elemanları LED'lerden gönderilen işaretleri göstermektedir. (4.4) numaralı denkleme göre karmaşık bir OFDM sinyali için x 'in dört elemanından yalnızca ikisi sıfırdan farklıdır. Buna göre, sistemdeki dört LED'den ikisi ışık saçarken diğer ikisi kapalı olmaktadır.

Ele alınan 4x4 optik MIMO kanal matrisi H , aşağıdaki (4.5) numaralı eşitlikte gösterilmektedir.

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} & h_{1,4} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & h_{2,3} & h_{2,4} \\ h_{3,1} & h_{3,2} & h_{3,3} & h_{3,4} \\ h_{4,1} & h_{4,2} & h_{4,3} & h_{4,4} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Burada $h_{r,t}$, t . verici birim (LED) ile r . alıcı birim (PD) arasındaki optik telsiz kanalın kazancını göstermektedir $(t, r) \in \{1,2,3,4\}$.

4.2 Sistem Başarımını Artırmaya Yönelik Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, VLC sistemlerinin başarımını iyileştirmek için NDC-O-OFDM yöntemine, lifting dalgacık dönüşümü tekniği uygulanmıştır. Uygulanan dalgacık dönüşümü bu bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Önerilen yöntem, lifting dalgacık dönüşümü ile DC eklemesiz optik OFDM'in birleşimiyle oluşan (LWT-NDC-O-OFDM) ve literatürde var olmayan yeni bir yöntemdir.

4.2.1 Lifting Dalgacık Dönüşümü (LWT)

Dalgacıklar, veriyi farklı frekans bileşenlerine ayıran ve kendi ölççekleriyle eşleştirilmiş bir çözünürlüğe sahip bileşenler ile çalışan matematiksel fonksiyonlardır.

Dalgacık dönüşümü sinyal işleme uygulamalarında uzun zamandır kullanılmasına rağmen, iletişim alanında son yıllarda ilgi görmeye başlamıştır.

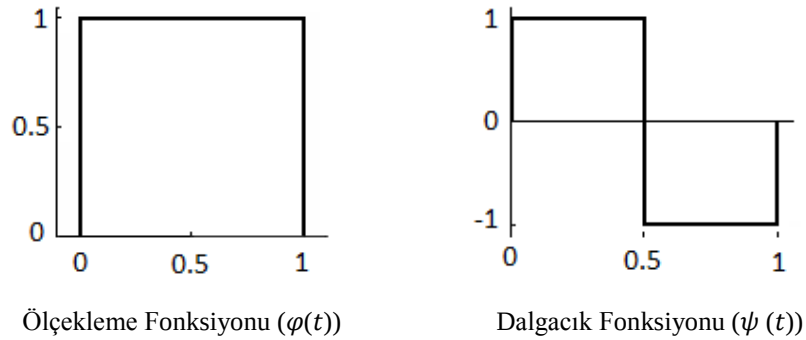
Dalgacık dönüşümü; resim sıkıştırma, ses tanıma, işaret işleme, bilgisayar görme, özellik çıkarma gibi birçok alanda kullanılır [43]. Dalgacık dönüşümüyle çok fark edilebilir ayrışım olmadan işaret üzerinde gürültü bastırılabilir. Dalgacık dönüşümünden önce filtreye karar verilmelidir. Filtreler, dalgacık aileleri olarak isimlendirilirler ve seçimleri oldukça önemlidir.

4.2.1.1. Dalgacık Aileleri

Dalgacık aileleri olarak Biorthogonal, Coiflets, Symlets, Daubechies, Haar dalgacıkları ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılırlar. Yaygın olarak kullanılan dalgacıkların bazıları detaylı olarak bahsedilmiştir.

4.2.1.1.1. Haar Dalgacığı

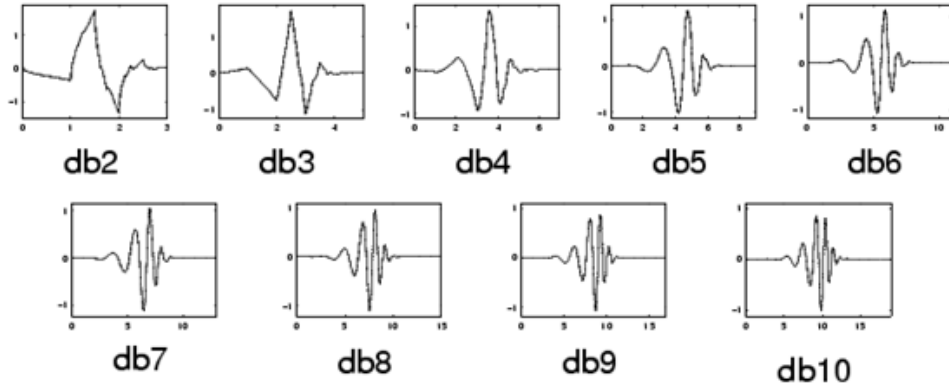
Haar dalgacığı ilk ve en basit dalgacıktır. Haar dalgacığı süreksizdir ve basamak fonksiyonuna benzer. Daubechies (db1) ile aynı dalgacıktır. Bu dalgacığın dalgacık fonksiyonu ($\psi(t)$) ile ölçekleme fonksiyonu ($\phi(t)$) Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Haar Dalgacığına ait Ölçekleme fonksiyonu ($\phi(t)$) ve Dalgacık fonksiyonu ($\psi(t)$).

4.2.1.1.2. Daubechies Dalgacığı

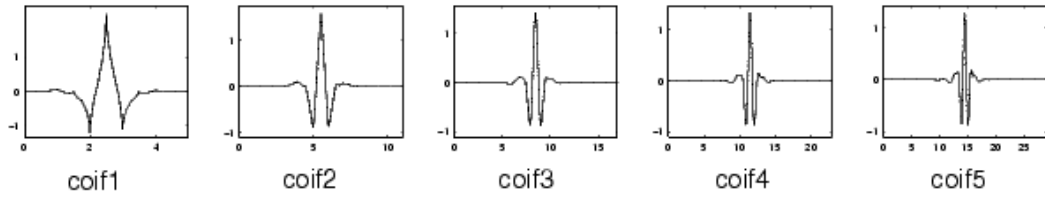
Daubechies sıkıştırılmış taşıyıcı birimlik dalgacıklardır. Daubechies ailesine ait dalgacıkların adları DbN sembolü ile gösterilir, burada N, 1 ile 10 arasında değişen sabit bir sayıyı ifade eder ve Db dalgacığının soyadıdır. Bahsedildiği gibi Db1 dalgacığı, Haar dalgacığı ile aynı dalgacıktır. Daubechies ailesinin kalan dokuz üyesinin dalgacık fonksiyonları $\psi(t)$; Db2, Db3, Db4, Db5, Db6, db7, Db8, Db9 ve Db10 dalgacığı olarak isimlendirilir. Bu dalgacıklar Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Daubechies Ailesine Ait Dalgacık Fonksiyonları.

4.2.1.1.3. Coiflet Dalgacı

Coiflet dalgacık fonksiyonunun 0'a eşit $2N$ momentli ve ölçekleme fonksiyonu 0'a eşit $2N-1$ momentli vardır. İki fonksiyonun uzunluğu $6N-1$ 'dir. Coiflet fonksiyonu coifN olarak gösterilir ve N, 1 ile 5 arasında değişmektedir. Şekil 4.5'te fonksiyon örnekleri gösterilmektedir.

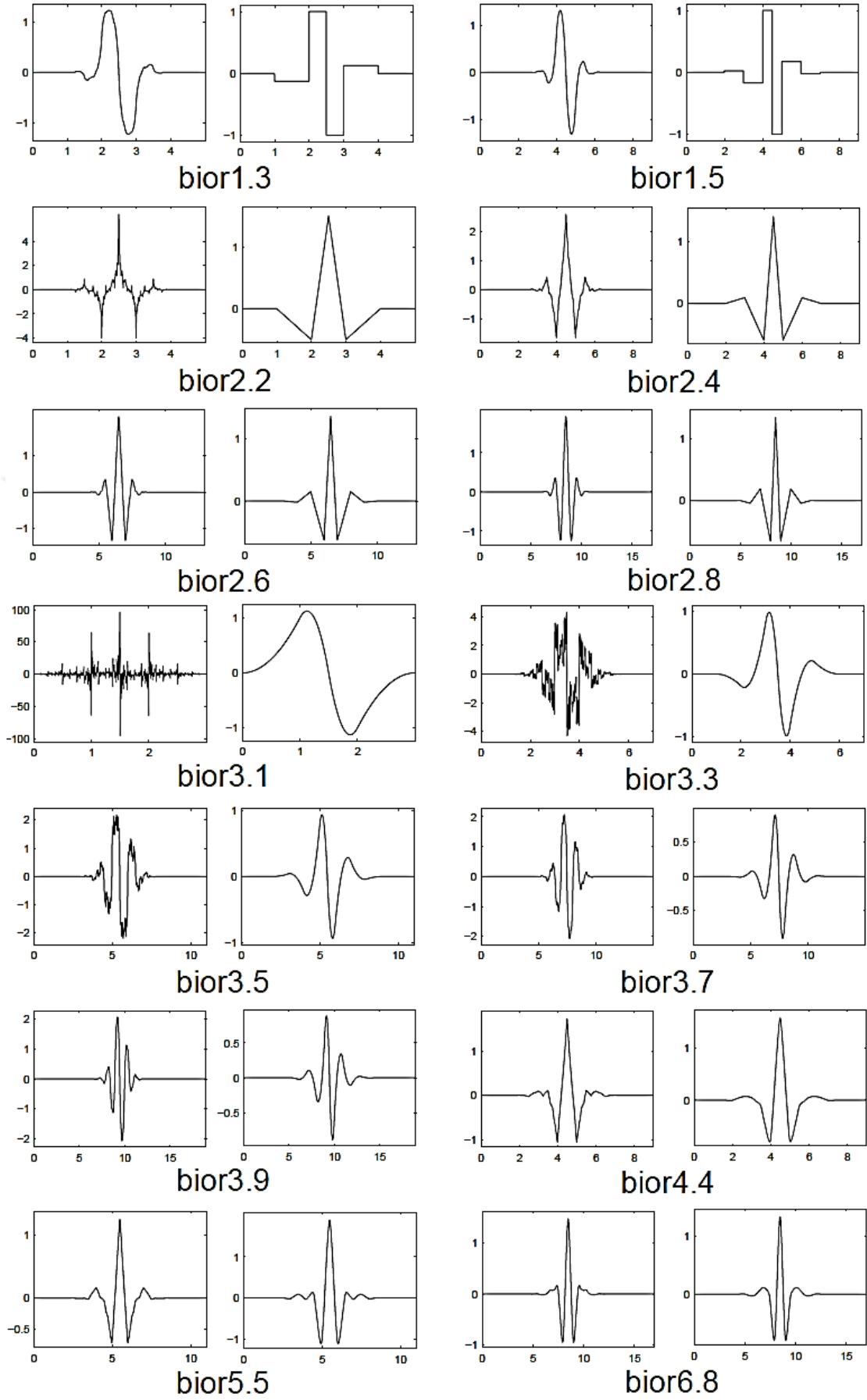


Şekil 4.5. Coiflet Ailesine Ait Bazı Dalgacık Çeşitleri.

4.2.1.1.4. Bi-Ortogonal Dalgacık

Bu dalgacık ailesi, görüntünün ve sinyalin yeniden oluşturulması için gerekli olan doğrusal fazın özelliğini taşır. Bunlar, ayrıştırılmak ve yeniden oluşturulmak için kullanılan iki dalgacık içerir. Bu dalgacıklar, "BiorNr.Nd" ile gösterilir. Bu gösterimdeki Nr ve Nd sırasıyla yeniden yapılandırma ve ayrıştırma filtrelerinin sıralarını gösterir. Bu çift dikgen dalgacıklar Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şekilde yer alan sağ taraftaki dalgacıklar yeniden yapılandırma için ve sol taraftaki dalgacıklar ayrıştırma için kullanılırlar.

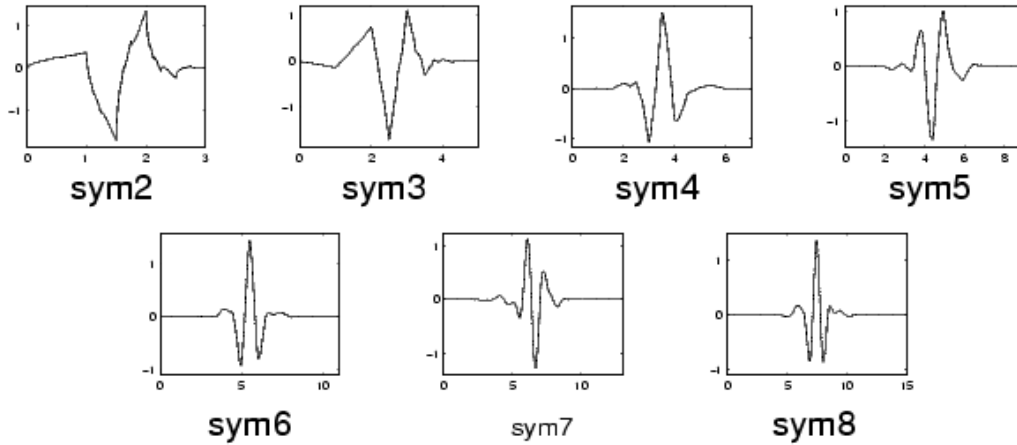
Çift dikgen dalgacıkların, mümkün olan en az hata ile görüntüyü yeniden yapılandırdığı bilinmektedir. Bu fonksiyonun bior 1.3, bior 2.2, bior 2.6, bior 3.1, bior 3.5, bior 3.9 ve bior 5.5 dalgacıkları ayrık dalgacık dönüşümünde (ADD) kullanılır.



Şekil 4.6. Bior Ailesinin Dalgacık Fonksiyonları.

4.2.1.1.5. Symlet Dalgacı

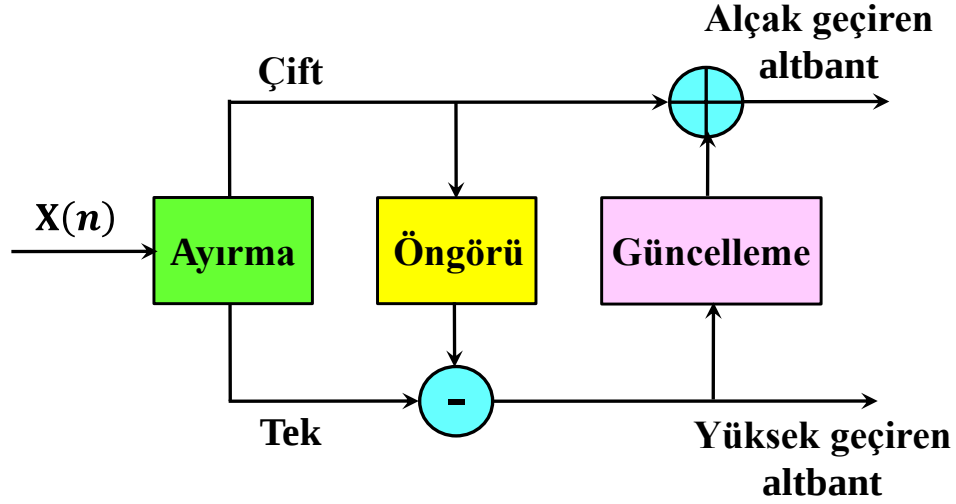
Symlets, Daubechies tarafından Db ailesine modifikasyon olarak önerilen simetrik dalgacıklardır. İki dalgacık ailesi birbirine benzerlik göstermektedir. Symlets, Daubechies'in simetriği şeklindedir. SymN şeklinde gösterilir. N, 1 ile 8 arasında değişmektedir. Şekil 4.7'de fonksiyon örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Symlets Ailesinin Dalgacık Fonksiyonları

Sweldens tarafından önerilen Lifting Dalgacık Dönüşümü (LWT: Lifting Wavelet Transform), Lifting Şemaya dayanan “ikinci nesil dalgacıkları” olarak adlandırılan yeni dalgacık şeklidir. Lifting şema; ayırma, öngörü ve güncelleme olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Lifting dalgacık dönüşümü uzaysal domen yöntemidir; dönüşümün hızlı gerçekleştirilmesini sağlar; gerçekleştirilmesi kolaydır; non-lineer, adaptif, düzensiz örneklenmiş ve tam sayıdan tam sayıya dönüşüm işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlar, ayrıca ters dönüşümünü almak kolaydır [44].

Lifting dalgacık dönüşümünde, iki kanal Lifting şeması, sinyali iki alt banda ayırmaktadır. Bu alt bantlardan biri tek sayı indisli örneklerden oluşurken, diğeri çift sayı indisli örneklerden oluşmaktadır. Lifting şeması; ayırma, öngörü ve güncelleme olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Şekil 4.8’ de tek boyutlu alt örnekleme Lifting dalgacık dönüşümüne ait şema verilmektedir.



Şekil 4.8. Lifting dalgacık dönüşümü şeması.

Ayırma işlemi: $x[n]$ sinyali $x_c[n] = x[2n]$ ve $x_t[n] = x[2n + 1]$ olmak üzere $x_c[n]$ ve $x_t[n]$ alt kümelerine ayrılmaktadır. Lifting dalgacık dönüşümünde ayırma işlemi aşağıdaki gibidir:

$$x[n] = \{x_1, x_2, \dots, x_{2m}\} \begin{cases} x_c[n] = \{x_2, x_4, \dots, x_{2m}\} \\ x_t[n] = \{x_1, x_3, \dots, x_{2m-1}\} \end{cases} \quad (4.6)$$

Burada $x_t[n]$ tek sayı indisli örnekler iken; $x_c[n]$ çift sayı indisli örneklerdir.

Öngörü işlemi: $x_t[n]$ alt kümesi, $P(\cdot)$ öngörü operatörü sayesinde $x_c[n]$ alt kümesi üzerinden öngörülür. $x[n]$ sinyaline ait detay bilgi ise, $x_t[n]$ alt kümesi ile öngörülen $P(x_c[n])$ arasındaki fark alınarak elde edilir. $P(\cdot)$ öngörü operatörü, komşu tek alt kümenin doğrusal bir kombinasyonudur [45].

$$P(x_c[n]) = \sum_i (p_i x_c[n + i]) \quad (4.7)$$

Eşitlik (4.7)'deki p_i , yüksek geçiren filtre katsayılarıdır.

Sinyalin detay kısmının elde edilmesine ait formül, denklem (4.8)'deki gibidir.

$$d_1[n] = x_t[n] - P(x_c[n]) \quad (4.8)$$

Güncelleme işlemi: Sinyale ait yaklaşık bilgi, $x_c[n]$ alt kümesi ile, $U(.)$ güncelleme operatörüne giren detay bilginin toplanması sonucu elde edilir. $U(.)$ güncelleme operatörü, komşu d değerlerinin doğrusal kombinasyonudur. $U(.)$ güncelleme operatörüne ait formül, eşitlik (4.9)'daki gibidir.

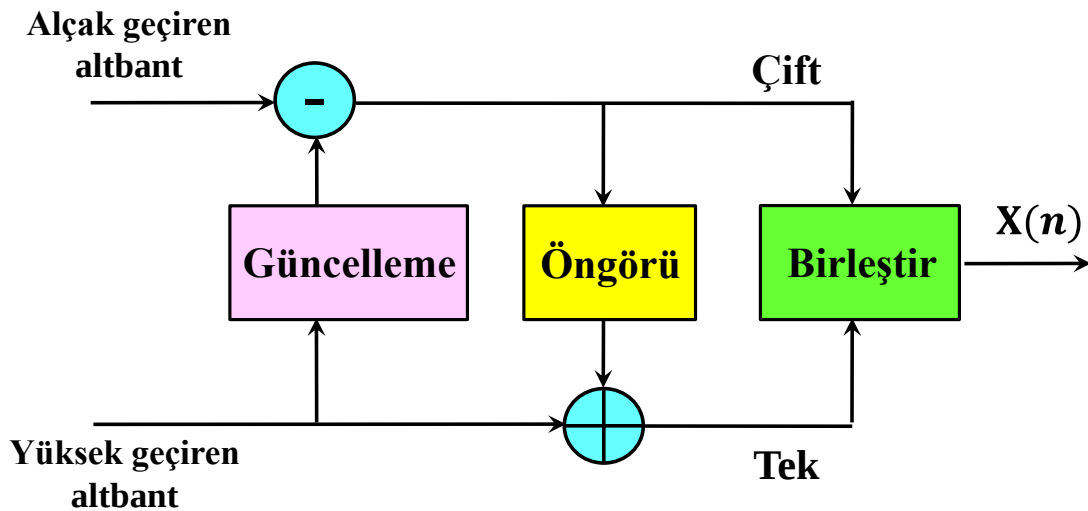
$$U(d[n]) = \sum_j (u_j d[n + j]) \quad (4.9)$$

Formül (4.9)'daki u_j , alçak geçiren filtre katsayılarıdır.

Güncelleme işleminde sinyalin alçak geçiren süzgeçten geçirilerek elde edilen yaklaşık değeri, $d_1[n]$ öngörü farkının doğrusal kombinasyonunun güncellenmesiyle elde edilir. Bu durumda $x_c[n]$ sinyali, eşitlik (4.10)'da yer alan $s_1[n]$ ile yer değiştirilir. Sinyalin yaklaşık kısmının elde edilmesine ilişkin formül, eşitlik (4.10)'da verilmektedir [45].

$$s_1[n] = x_c[n] + U(d_1[n]) \quad (4.10)$$

Ters Lifting dalgacık dönüşümü ile orijinal sinyal elde edilebilir. Tersine dönüşüm açıkça kolaydır. Tahmin (öngörü) ve güncelleme adımı geri alarak, orijinal sinyale ulaşmak mümkündür. Tahmin ve güncelleme adımlarının işaretlerini tam olarak değiştirerek, orijinal düzgün ve tek örnek yeniden oluşturulur. Sonunda, çift ve tek örnekler, orijinal sinyali oluşturmak üzere işbirliği içinde birleştirilir, Şekil 4.9'da ters Lifting dalgacık dönüşümü verilmektedir.



Şekil 4.9. Ters Lifting dalgacık dönüşümü şeması.

Ters Lifting dalgacık dönüşümü aşağıdaki eşitlikler kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

$$x_c[n] = s_1[n] - U(d_1[n])$$

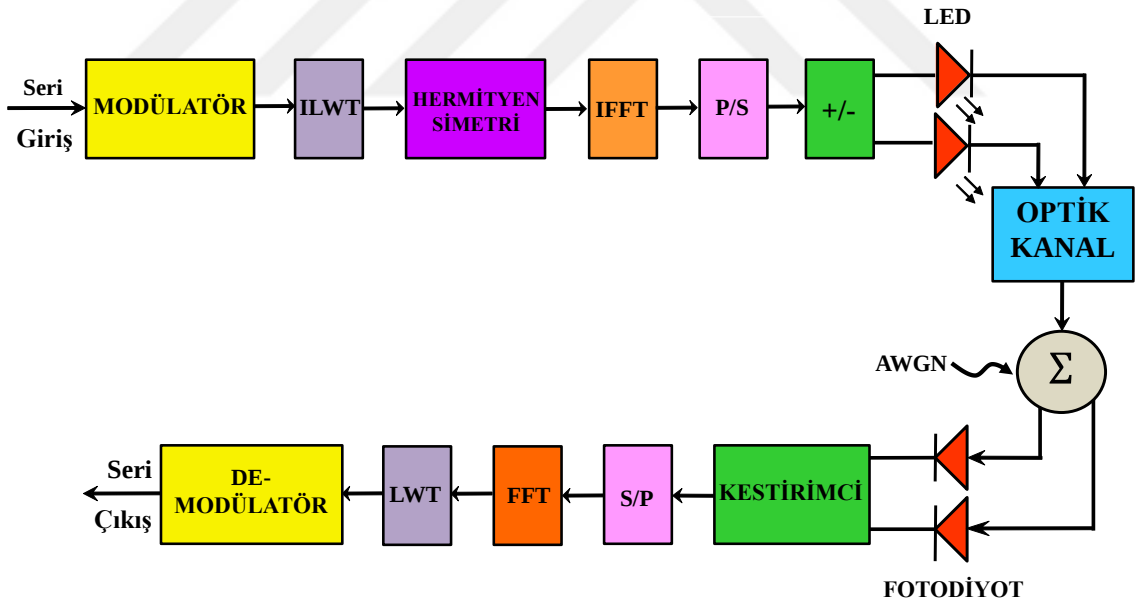
$$x_t[n] = d_1[n] + P(x_c[n]) \quad (4.11)$$

$$x[n] = \text{Birleştir} \{x_c[n], x_t[n]\}$$

Bu bölümün ana katkısı, MIMO ve OFDM tabanlı görünür ışık haberleşmesi (VLC) başarımı arttırmak için LWT ile NDC-O-OFDM'i birleştirmektir.

4.3. Önerilen LWT-NDC-O-OFDM Dalga Formu

LWT-NDC-O-OFDM, IM/DD sistemlerinde OFDM yöntemine alternatif olarak önerilmiş bir NDC-O-OFDM çeşididir. Bu tezde; önerilen LWT-NDC-O-OFDM sisteminin 2x2 MIMO ve 4x4 MIMO yapıları ele alınmıştır. VLC sistemlerde 2x2 MIMO NDC-O-OFDM'in blok şeması Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. 2x2 MIMO LWT-NDC-O-OFDM verici alıcı yapısı.

Şekil 4.10 detaylı olarak bölüm 4.1'de anlatılmıştır. Bu şekli, bölüm 4.1'de anlatılan klasik NDC-O-OFDM'den ayıran en önemli özelliği, Lifting dalgacık dönüşümü kullanılmış olmasıdır. Şekilde, gönderilen sinyal modülatör bloğunda modüle edilerek alt taşıyıcılara eşlenir. Eşlenen semboller ortogonal dönüşümün

yapılacağı, ters LWT (Inverse LWT, ILWT) bloğunda eşitlik (4.12) aracılığıyla yayılmaya tabi tutulur.

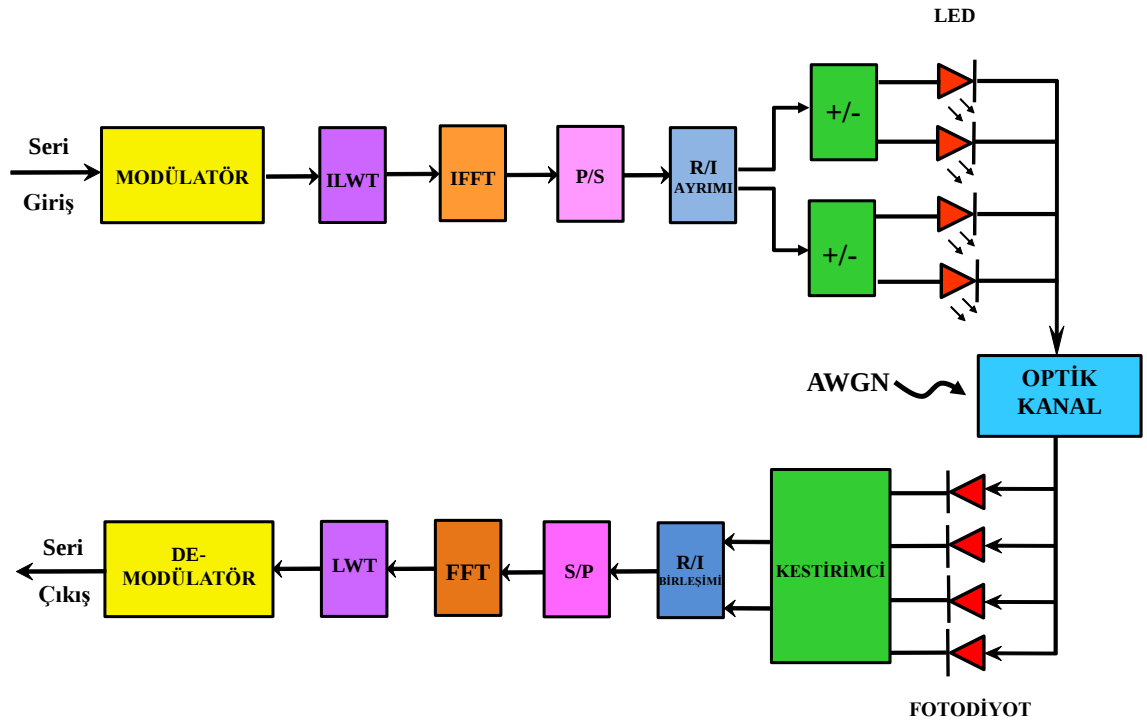
$$Tx_{ILWT}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k^m 2^{\frac{m}{2}} \psi(2^m t - k) \quad (4.12)$$

Burada, X_k dalgacık bölgesindeki sinyali ve $\psi(\cdot)$ 'da dalgacık fonksiyonunu ifade etmektedir.

Yayılan veriler optik OFDM bloğuna aktarılır. Üretilen LWT-NDC-O-OFDM veri paketleri optik kanaldan gönderilip AWGN ile bozulduktan sonra alıcıya ulaşmaktadır. Alıcıya ulaşan sinyaller, fotodiyot tarafından elektriksel işarete dönüştürülmüş işaretleri içermektedir. Optik OFDM demodülasyon işleminden önce hangi LED'lerin etkin olduğuna karar verilip, karmaşık işaretlerin geri elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sinyal, kestirimci bloğuna tabi tutulur. Vericideki işlemlerin tersi yapılarak LWT bloğu çıkışında eşitlik (4.13) aracılığıyla dalgacık bölgesindeki sinyaller elde edilir.

$$X_{LWT}_k^m = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) 2^{\frac{m}{2}} \psi(2^m t - k) dt \quad (4.13)$$

LWT bloğu çıkışında veriler de-modüle edilerek istenen başarımlar hesaplanır.



Şekil 4.11. 4x4 MIMO LWT-NDC-O-OFDM verici alıcı yapısı.

Önerilen LWT-NDC-O-OFDM'in 4x4 MIMO VLC sistemlerdeki blok şeması Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, şekil 4.10'dan farklı olarak 4 led ve 4 fotodiyot kullanılmasının yanında hermityen simetri uygulanmamasıdır. Ele alınan 4x4 optik MIMO kanal matrisi H , önceki bölümde (4.5) numaralı denklemde gösterilmişti. Bu çalışmada basitlik açısından doğrudan-iletim-hatlı (line-ofsight, LOS) karakteristiklerine sahip optik iletim hatları ele alınmıştır. Bu durumda H kanal matrisinin elemanları şu şekilde hesaplanmaktadır [45].

$$h_{r,t} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_r}{2\pi d_{r,t}^2} \cos^m(\phi_t) T_s(\psi_r) \cos(\psi_r), & 0 \leq \psi_r \leq \Psi_c \\ 0 & \psi_r > \Psi_c \end{cases} \quad (4.14)$$

Burada;

$m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{\frac{1}{2}})$ = Lambertian yayılımının mertebesini,

$\Phi_{1/2}$ = verici yarım açısını,

A_r = alıcının fiziksel dedektör alanını,

$d_{r,t}$ = verici birim t ile alıcı birim r arasındaki uzaklığı,

ϕ_t = verici eksenine göre ayrılma açısını,

ψ_r = alıcı eksenine göre geliş açısını,

Ψ_c = foto dedektörün görüş alanı (field of view, FOV) yarım açısını,

$T_s(\psi_r)$ = optik filtre kazancını,

göstermektedir.

5. BÖLÜM: BİLGİSAYAR BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

Bilgisayar benzetim çalışmaları 2 bölümde incelenmiştir. 1. bölümde 2x2 MIMO sistemlerde önerilen yöntem ile diğer dalgacıkların flat kanal karşılaştırmaları yapılmıştır. 2. bölümde 4x4 MIMO sistemler için çeşitli benzetim çalışmaları yapılmış, önerdiğimiz yöntem ile diğer dalgacıklar flat kanalda karşılaştırılmıştır.

Bu yüksek lisans tez kapsamında bilgisayar benzetim çalışmalarında, BER/SNR karşılaştırmaları yapılmıştır. BER ve SNR açıklamaları aşağıdaki gibidir.

- Bit Hata Oranı (Bit Error Rate – BER); haberleşme sistemlerinin performansını yani kalitesini belirlemede karşımıza çıkan kavramlardan biridir. Temel olarak BER, belirli bir zaman aralığında gönderilen hatalı bit sayılarının toplam bit sayılarına oranıdır. Hatalı bitler, girişim ve gürültü gibi istenmeyen bazı parametreler sonucu oluşmaktadır. Yani bir sistemde bit hata oranı fazlaysa sistem performansı/kalitesi düşüktür. Bu nedenle yapılan çalışmalarda amaç; haberleşme sisteminin BER değerini düşürmektir. BER hesabı eşitlik 5.1'deki gibidir.

$$BER = \frac{\text{Alıcıda Algılanan Hatalı Bit Sayısı}}{\text{Gönderilen Toplam Bit Sayısı}} \quad (5.1)$$

- Haberleşme sistemleri için önemli bir diğer kavram ise Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio - SNR)'dır. Bu parametre de, bit hata oranı değeri gibi haberleşme sistemlerinin performansını/kalitesini belirler. Temel olarak sinyal gürültü oranı, sinyal gücü ile gürültü gücü arasındaki oranı ifade etmektedir. Yani sinyal gürültü oranı değeri yüksekse sistemin performansı/kalitesi iyidir. Sinyal gürültü oranı, eşitlik 5.2'deki formül ile hesaplanmaktadır.

$$SNR = \frac{P_{sin\gamma al}}{P_{g\ddot{u}r\ddot{u}lt\ddot{u}}} \quad (5.2)$$

Görünür ışık haberleşme sistemlerinde, SNR oranının yüksek olması ve BER oranının düşük olması, sistem performansının yani kalitesinin yüksekliğini belirtir. Bu nedenle görünür ışık haberleşmesi için yapılan bütün çalışmalarda SNR ve BER değerleri incelenmektedir.

5.1. 2x2 MIMO Sistemleri Bilgisayar Benzetim Çalışmaları ve Sonuçları

Bu bölümde karşılaştırması yapılan dalgacık şekilleri, 2x2'lik MIMO-VLC sistemde çalışmaktadır. VLC sistemler için önerilen yöntem olan LWT-NDC-O-OFDM ile diğer dalgacıkların FLAT kanallarda BER-SNR performansları analiz edilmektedir. Ek olarak, analiz edilen yeni yöntem ile DCO-OFDM, ACO-OFDM, Klasik VLC-OFDM ve NDC-OFDM ile karşılaştırılmaktadır. Bu nedenle, sayısal simülasyonlar için eşitlik (5.3)'te gerçekleştirilen basit bir pratik optik MIMO kanalı seçilmiştir.

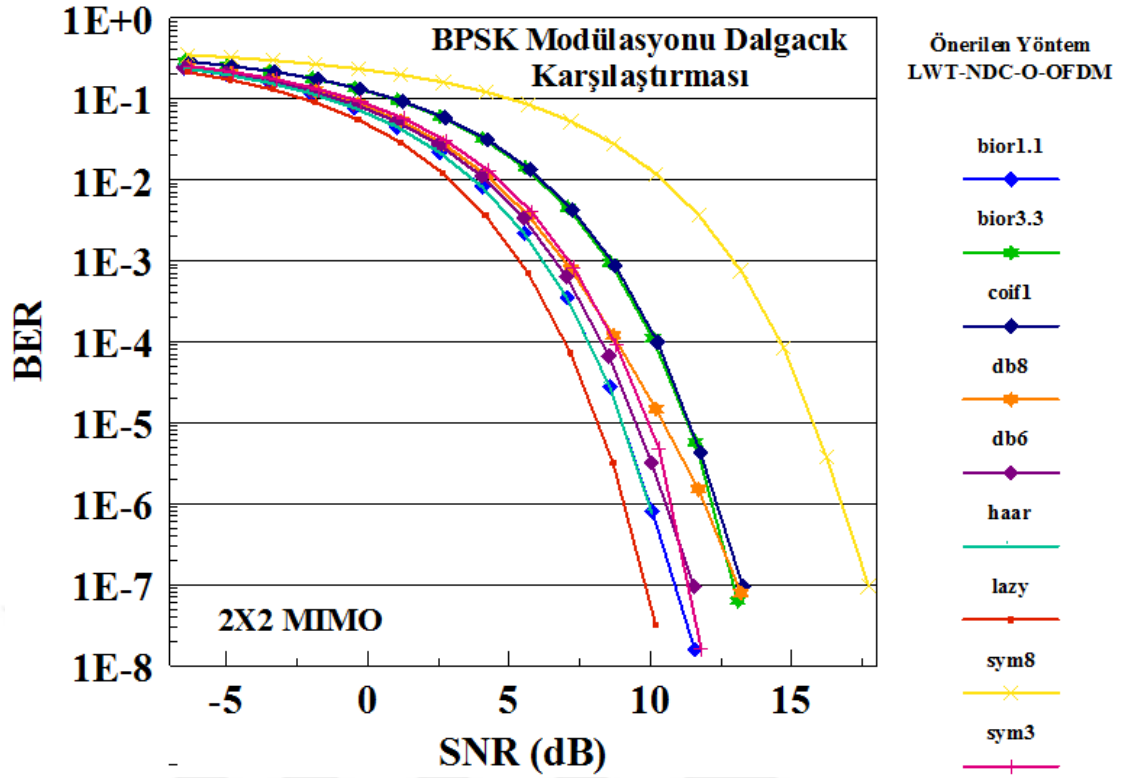
$$H = 10^{-5} \times \begin{bmatrix} 0.1889 & 0.0713 \\ 0.0713 & 0.1889 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Bu matristeki değerler, PD'ler ve LED'ler arasında yer alan yol kaybını tanımlamaktadır.

Bu bölümde karşılaştırması yapılan DCO-OFDM'in, mevcut simülasyonlardaki eklenen DC öngerilim seviyesi, tutarlılık için 3 dB, 7 dB ve 13 dB'ye ayarlanmıştır. Karşılaştırması yapılmak üzere kullanılan işaret yıldız boyutları, yani modülasyon dereceleri BPSK, 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM ve 64-QAM' dir. Önerilen LWT-NDC-O-OFDM'de kullanılan dalgacıklar; bior 1.1, bior 3.3, coif 1, db6, db8, haar, lazy, sym3 ve sym8'dir. Simülasyonlar 1000 Monte Carlo döngüsü kullanılarak yapılmıştır.

Aşağıdaki şekilde BPSK modülasyonu kullanılarak, 1000 Monte Carlo döngüsü üzerinden optik Flat kanallarda önerdiğimiz yöntemde, karşılaştırması yapılan dalgacık şekilleri gösterilmektedir. Kullanılan OFDM veri paketleri IEEE 802.11a Standardına uygun olarak 64 noktalı FFT'den oluşmaktadır.

Şekil 5.1'de BPSK modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanaldaki dalgacık ailesi karşılaştırması yapılmıştır.

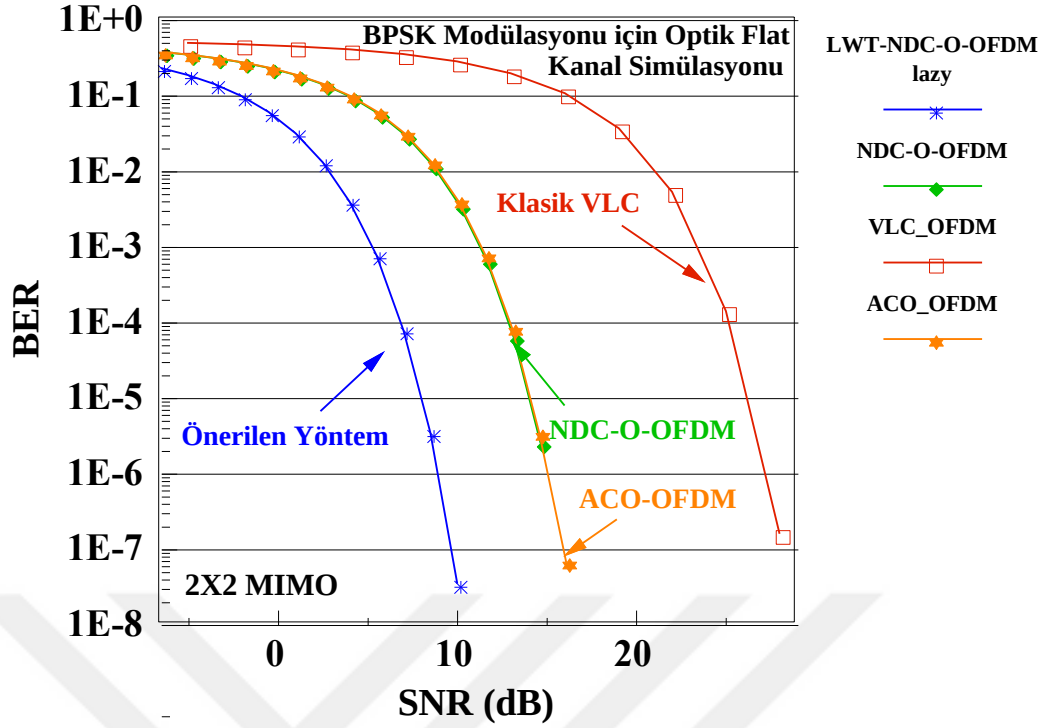


Şekil 5.1. BPSK modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması.

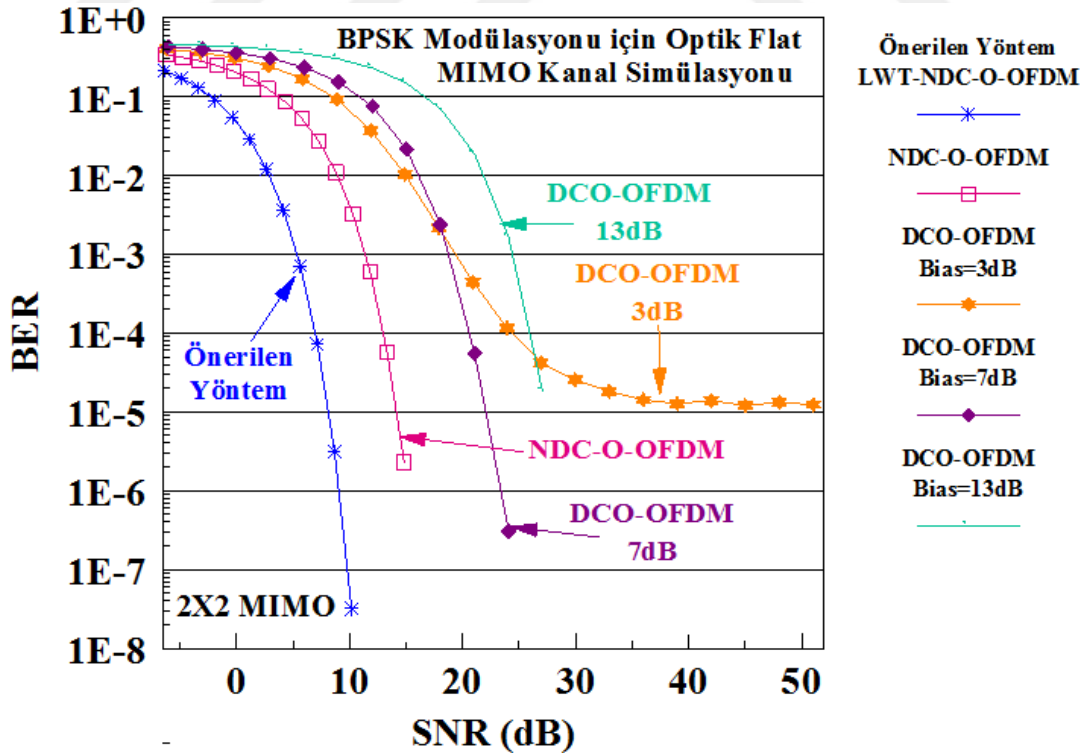
Şekil 5.1 incelendiğinde, önerdiğimiz yöntem BPSK modülasyonunda yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym8 dalgacığının en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki BPSK modülasyonu karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.2’de önerilen yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile BPSK modülasyonunda karşılaştırmaları verilmektedir.

Şekil 5.2 incelendiğinde en iyi performansı önerilen dalga formunun verdiği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM aynı performansı sergilemiştir. Klasik VLC ise en kötü performansa sahiptir. $1E-4$ BER değeri için önerilen yöntem, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerine göre yaklaşık olarak 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Klasik OFDM yöntemine göre ise yaklaşık 18 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Hem NDC-O-OFDM hem de ACO-OFDM Klasik OFDM’e karşı yine aynı BER değerinde yaklaşık 12 dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

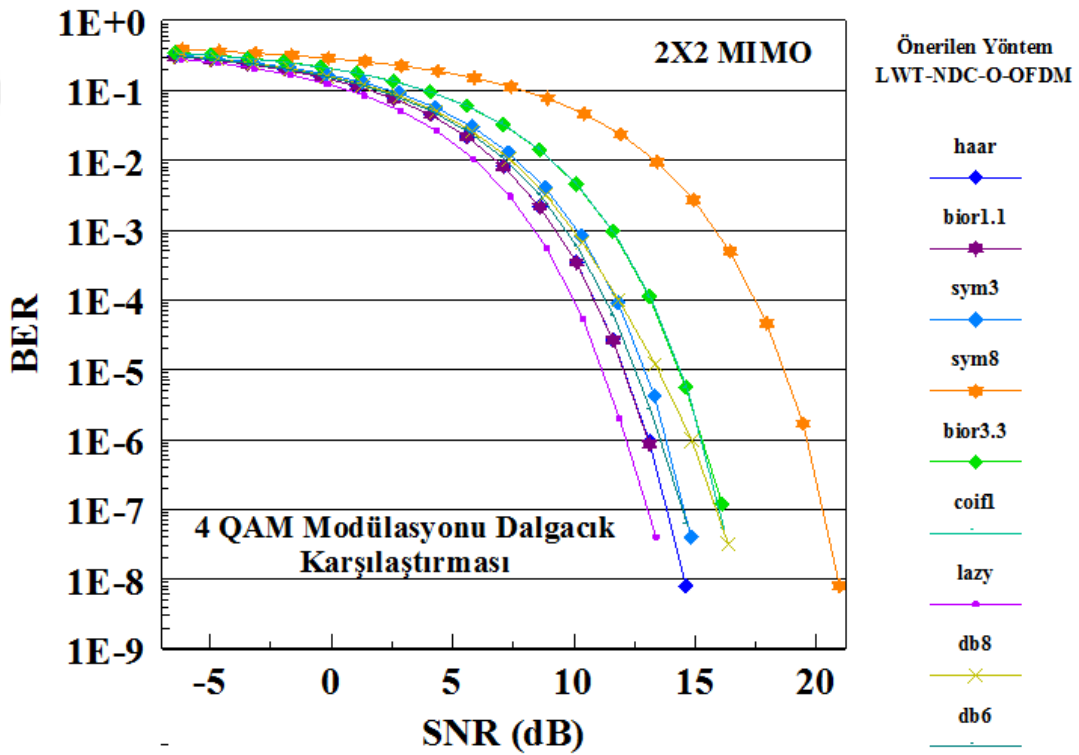


Şekil 5.2. BPSK modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



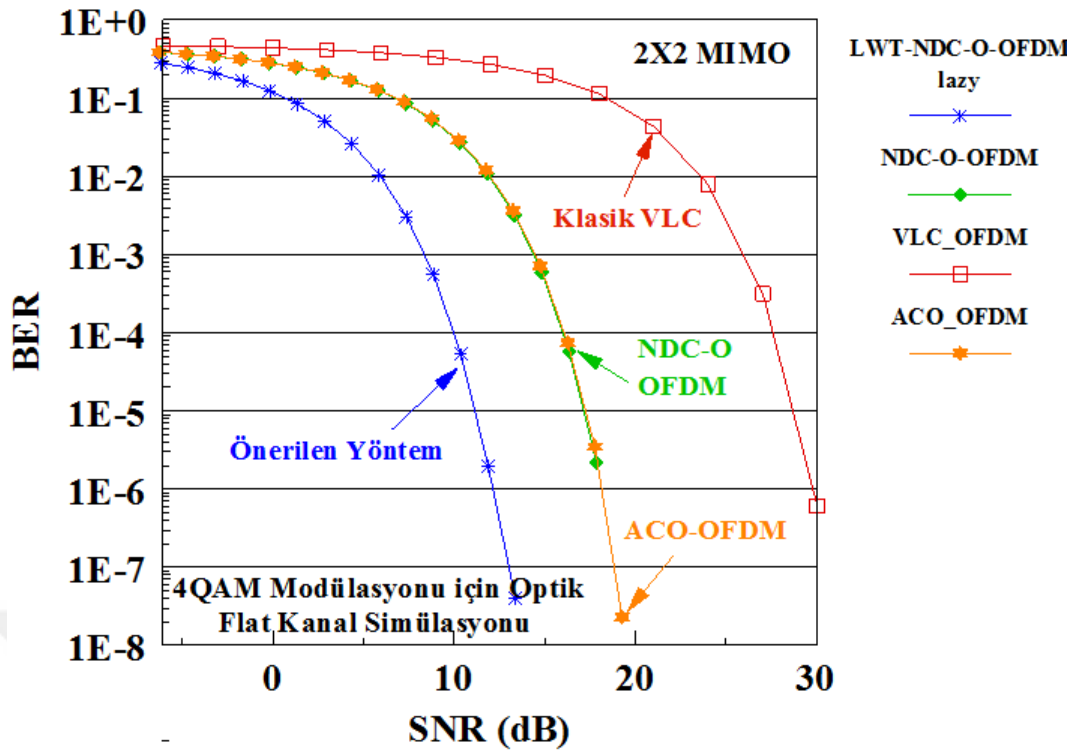
Şekil 5.3. BPSK modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması.

Şekil 5.3'te önerilen yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde en iyi performansın önerilen yönteme ait olduğu görülmektedir. En kötü performansı, DC bias (DC önekleme) değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer yöntemler ise bu iki yöntem arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM $1E-4$ BER değerinde sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6dB SNR kazancı sağlamaktadır. DC bias değeri 7 dB ve 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden sırasıyla yaklaşık olarak 14 dB ve 19 dB SNR kazancı elde edilmektedir.



Şekil 5.4. 4-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem'in Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.4'de 4-QAM modülasyonunun Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonunda yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym8 dalgacığının en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 4-QAM modülasyonu karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



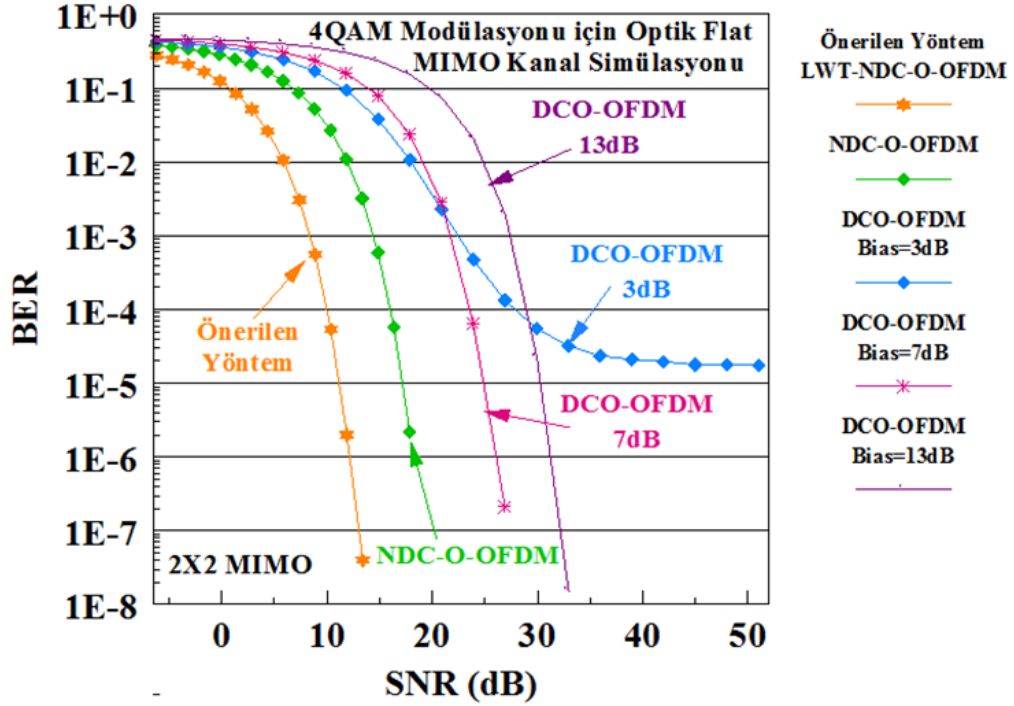
Şekil 5.5. 4-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.5’de önerilen yöntem ile NDC-O-OFDM, Klasik VLC ve ACO-OFDM’in 4-QAM modülasyonunda karşılaştırması verilmektedir.

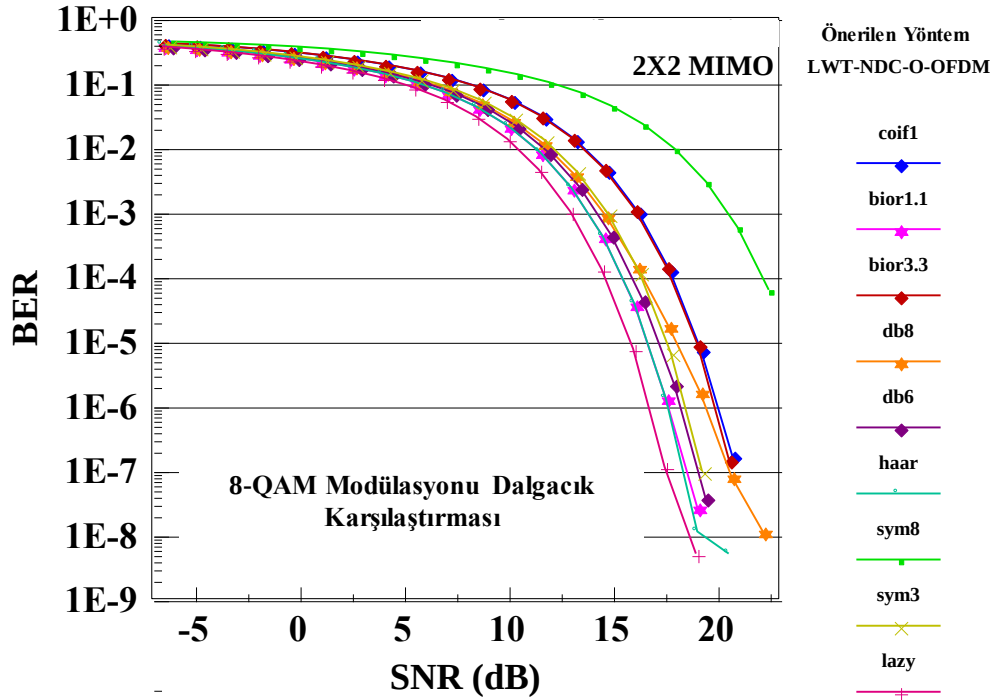
Şekil 5.5 incelendiğinde en iyi performansı önerilen dalga formunun verdiği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM aynı performansı sergilemiştir. Klasik VLC ise en kötü performansa sahiptir. 1E-4 BER değeri için önerilen yöntem NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerine göre yaklaşık olarak 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Klasik OFDM yöntemine göre ise yaklaşık 18 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Hem NDC-O-OFDM hem de ACO-OFDM Klasik OFDM’e karşı yine aynı BER değerinde yaklaşık 12 dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

Şekil 5.6’da önerilen yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir. Şekil 5.6 incelendiğinde en iyi performansın önerilen yönteme ait olduğu görülmektedir. En kötü performansı DC bias (DC önekleme) değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer dalgacık şekilleri ise bu dalgacıklar arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM 1E-4 BER değerinde sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden

yaklaşık 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen yöntemle DC bias değeri 7 dB ve 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden sırasıyla yaklaşık olarak 14 dB ve 19 dB SNR kazancı elde edilmektedir.



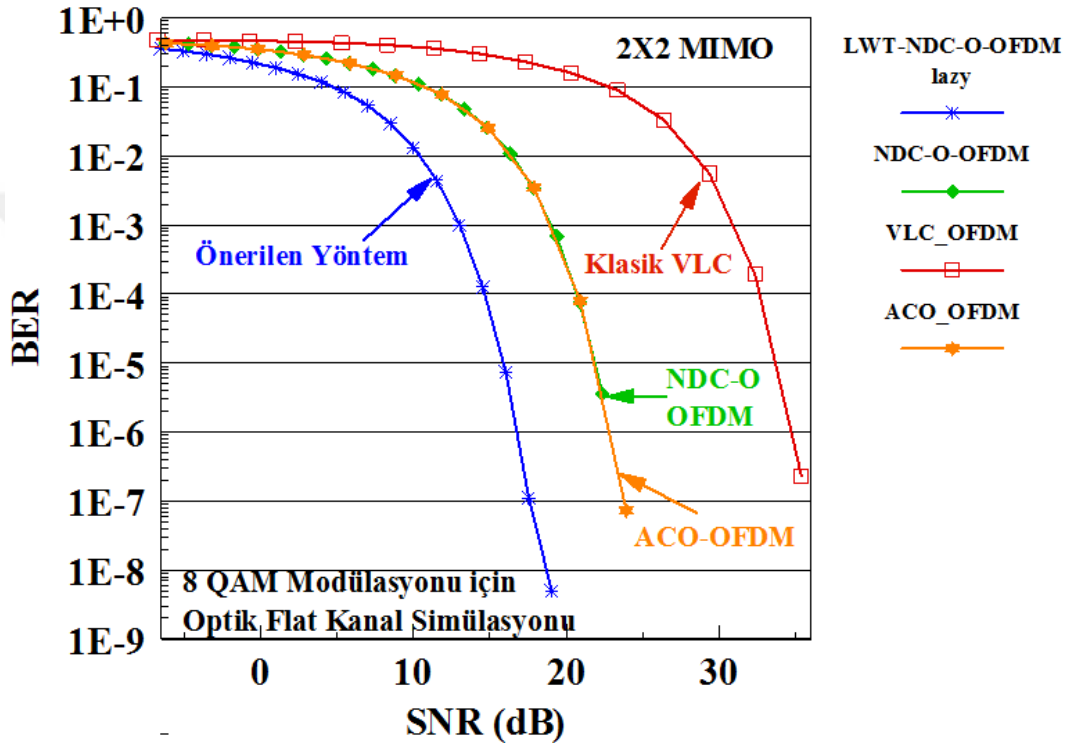
Şekil 5.6. 4-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması.



Şekil 5.7. 8-QAM modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.7’de, 8 QAM modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir.

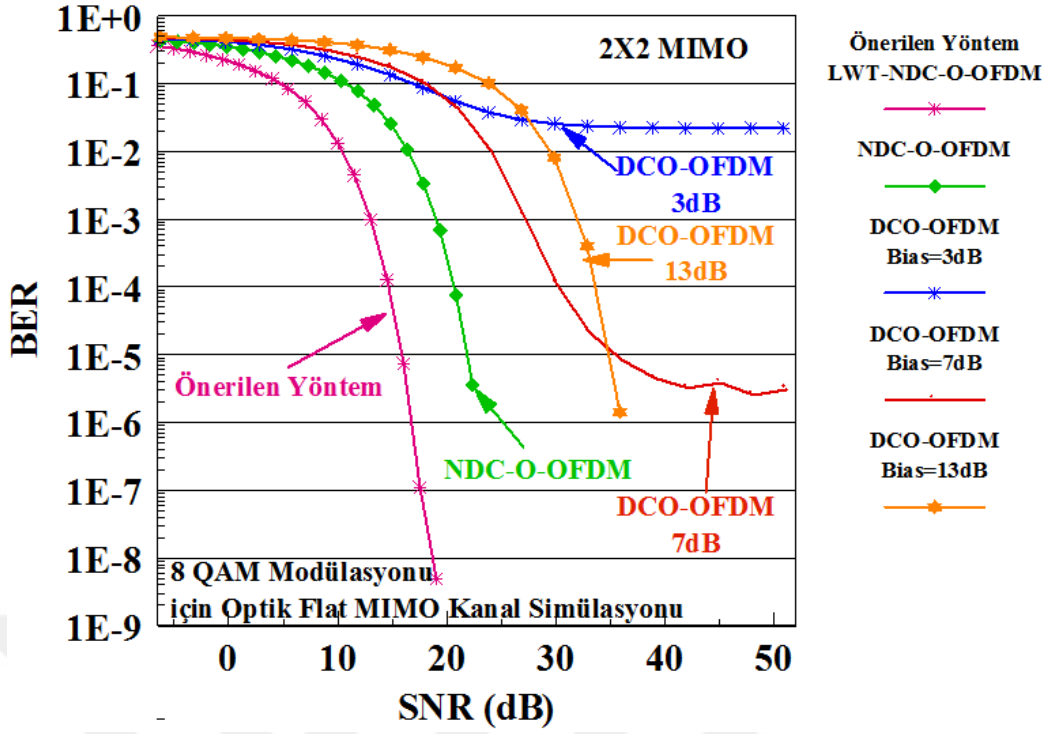
Şekil 5.7 incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonunda yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym8 dalgacığının en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 8-QAM modülasyonu karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.8. 8-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.8’de önerilen yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile 8-QAM modülasyonunda karşılaştırması verilmektedir.

Şekil 5.8 incelendiğinde en iyi performansı önerilen dalga formunun sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM aynı performansı sergilemiştir. Klasik VLC ise en kötü performansa sahiptir. 1E-4 BER değeri için önerilen yöntem NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerine göre yaklaşık olarak 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Klasik OFDM yöntemine göre ise yaklaşık 18 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Hem NDC-O-OFDM hem de ACO-OFDM Klasik OFDM’e karşı yine aynı BER değerinde yaklaşık 12 dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

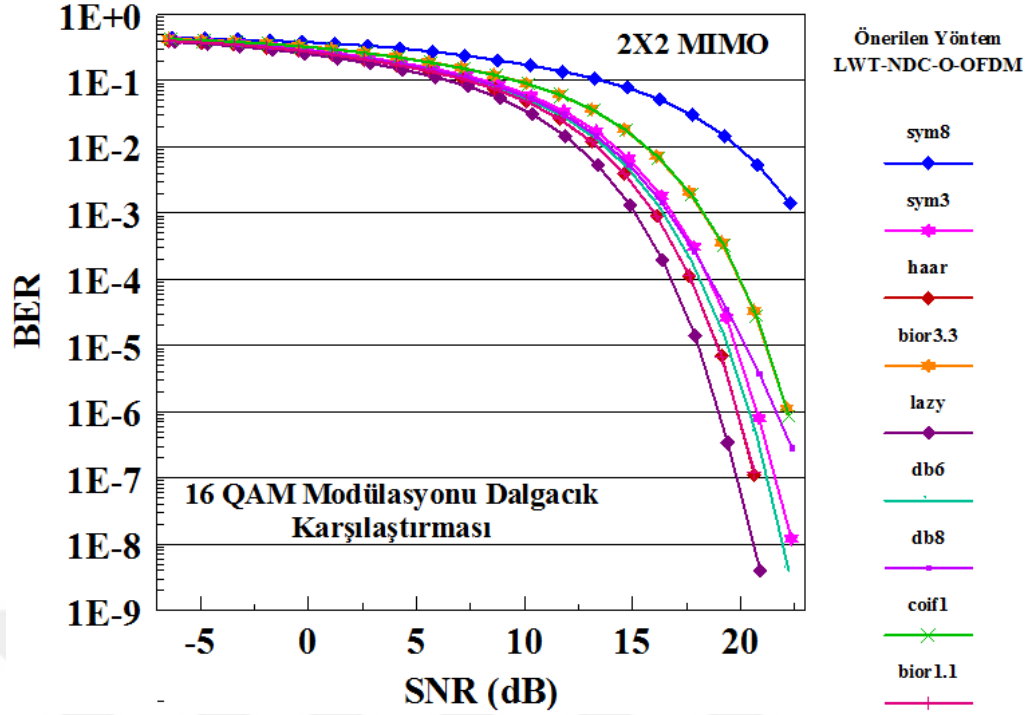


Şekil 5.9. 8-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması.

Şekil 5.9'da önerilen yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir.

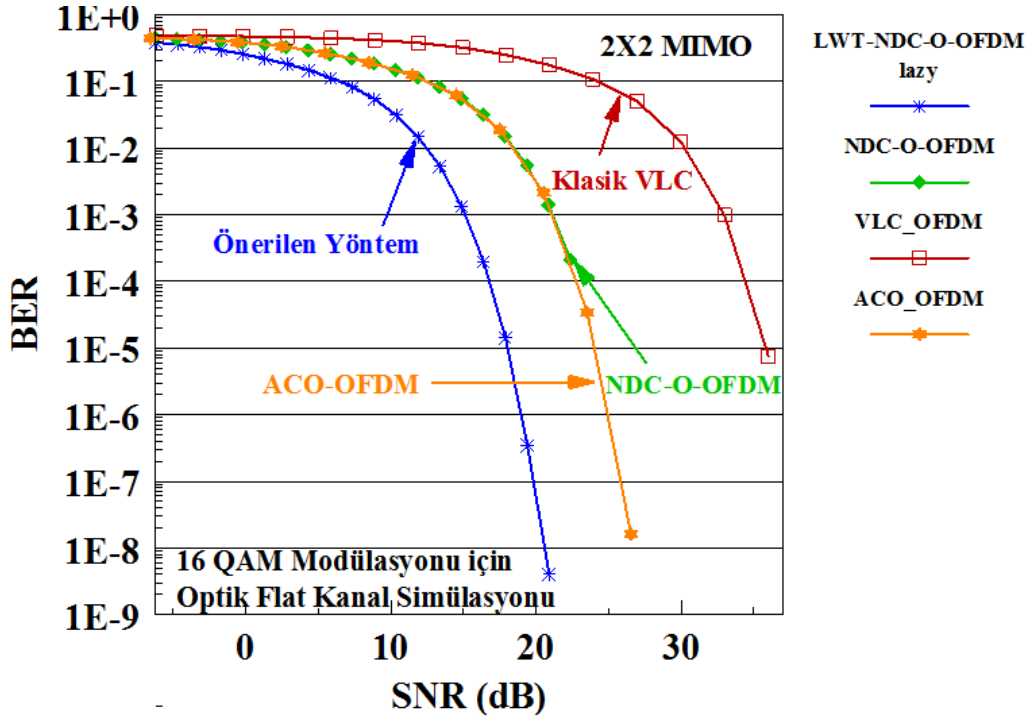
Şekil 5.9 incelendiğinde en iyi performansın önerilen yönetime ait olduğu görülmektedir. En kötü performansı DC bias (DC önekleme) değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer yöntemler ise bu iki yöntem arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM'in 1E-1 ile 1E-2 BER değerleri arasında, DC bias değeri 7dB olan DCO-OFDM'in ise 1E-4 BER değerinden sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. DC bias değeri 7 dB ve 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden sırasıyla yaklaşık olarak 13 dB ve 19 dB SNR kazancı elde edilmektedir.

Şekil 5.10'da, 16-QAM modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil 5.10 incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonunda yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym8 dalgacığının en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.10. 16-QAM modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması.

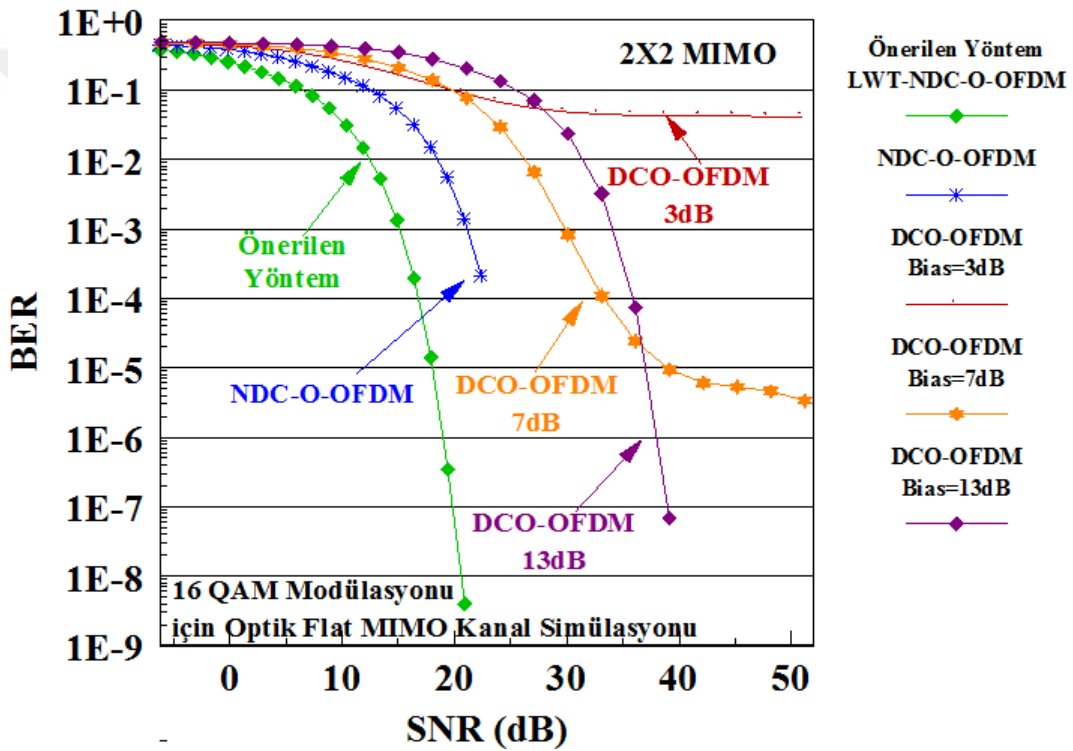
Bundan sonraki 16-QAM modülasyonu karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.11. 16 -AM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.11’de önerilen yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile 16-QAM modülasyonunda karşılaştırması verilmektedir.

Şekil 5.11 incelendiğinde en iyi performansı önerilen dalga formunun verdiği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM aynı performansı sergilemiştir. Klasik VLC ise en kötü performansa sahiptir. $1E-4$ BER değeri için önerilen yöntem NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerine göre yaklaşık olarak 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Klasik OFDM yöntemine göre ise yaklaşık 18 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Hem NDC-O-OFDM hem de ACO-OFDM Klasik OFDM’e karşı yine aynı BER değerinde yaklaşık 12 dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

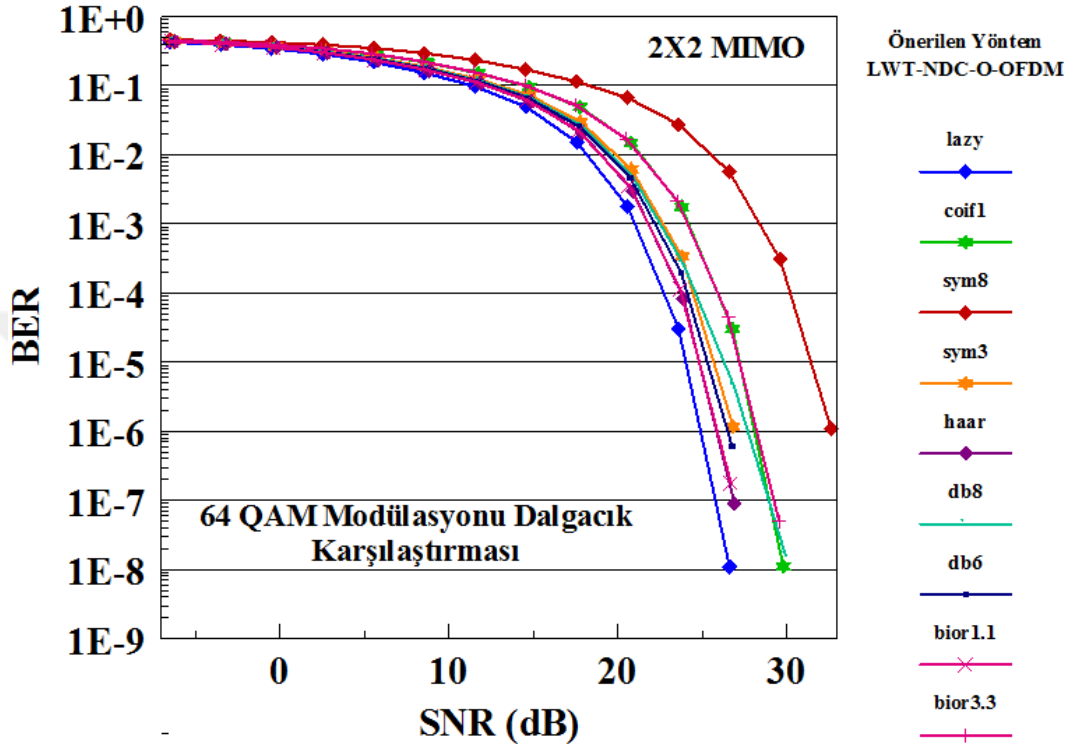


Şekil 5.12. 16-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM’in karşılaştırması.

Şekil 5.12’de önerilen yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir.

Şekil 5.12 incelendiğinde en iyi performansın önerilen yönteme ait olduğu görülmektedir. En kötü performansı DC bias (DC önekleme) değeri 3dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer yöntemler ise bu iki yöntem arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM’in $1E-1$ BER değerinden sonra, DC bias değeri

7dB olan DCO-OFDM'in ise $1E-5$ BER değerinden sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem $1E-3$ BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen yöntemle $1E-4$ BER değerinde ise DC bias değeri 7 dB ve 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden sırasıyla yaklaşık olarak 18 dB ve 20 dB SNR kazancı elde edilmektedir.

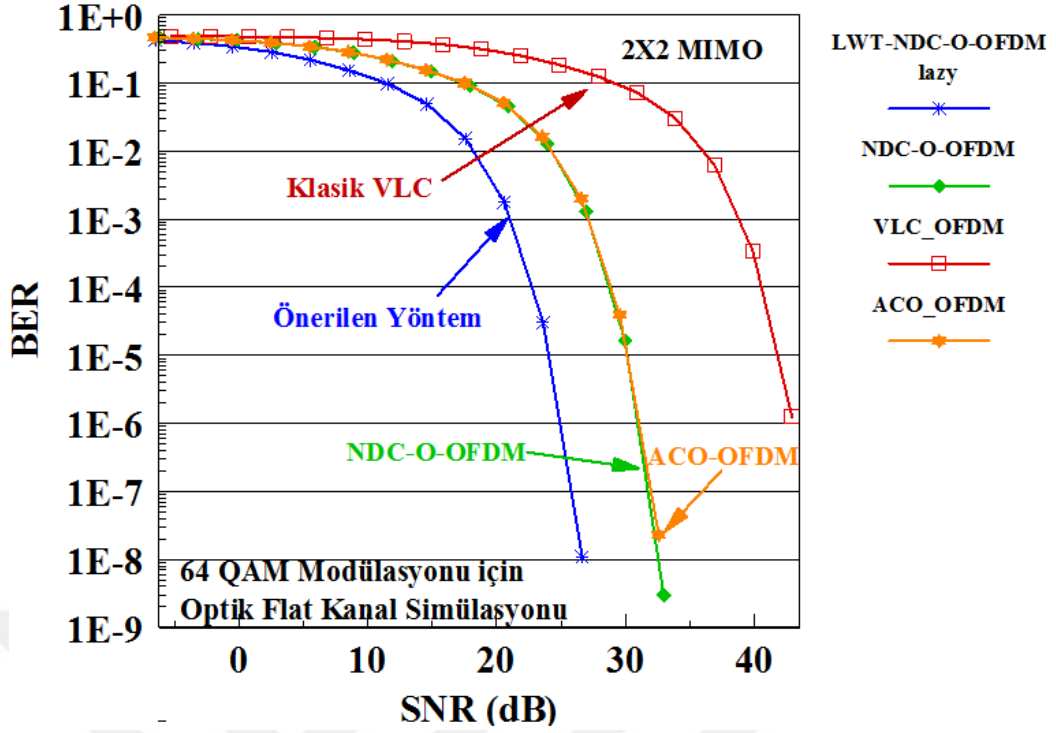


Şekil 5.13. 64-QAM modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.13’de, 64-QAM modülasyonunda önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir.

Şekil 5.13 incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonunda yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym8 dalgacığının en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 64-QAM modülasyonu karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.14’de önerilen yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile 64-QAM modülasyonunda karşılaştırması verilmektedir.

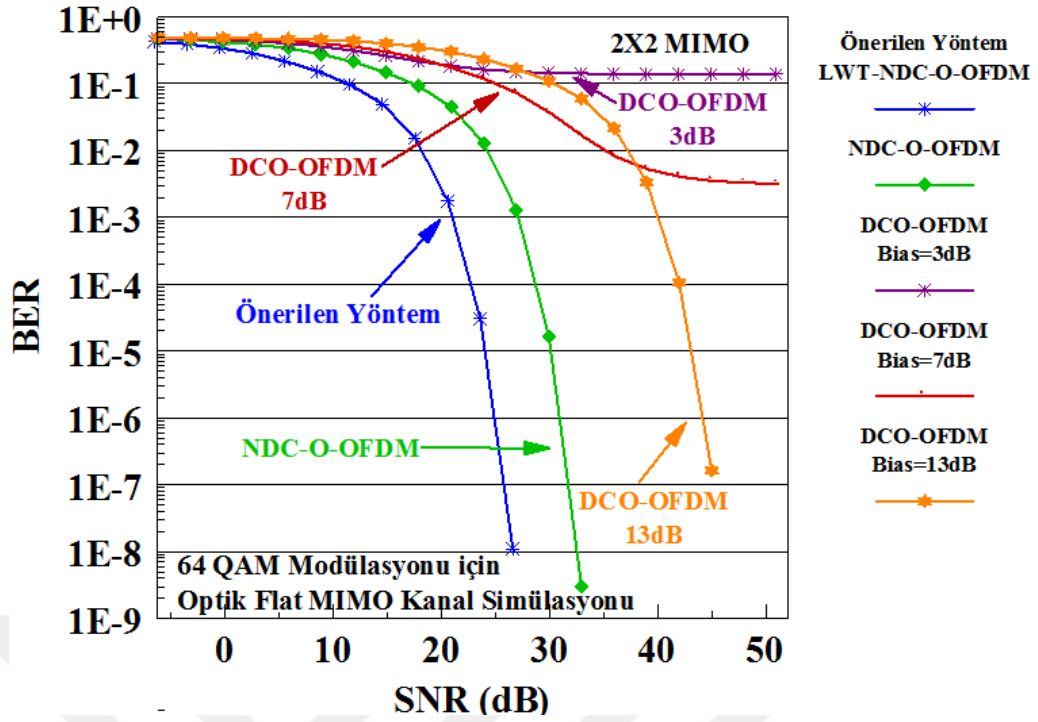


Şekil 5.14. 64-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.14 incelendiğinde en iyi performansı önerilen dalga formunun verdiği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM aynı performansı sergilemiştir. Klasik VLC ise en kötü performansa sahiptir. $1E-4$ BER değeri için önerilen yöntem NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerine karşı yaklaşık olarak 6 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Klasik VLC-OFDM yöntemine karşı ise yaklaşık 18 dB SNR kazancı sağlamaktadır. Hem NDC-O-OFDM hem de ACO-OFDM Klasik VLC-OFDM'e karşı yine aynı BER değerinde yaklaşık 12 dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

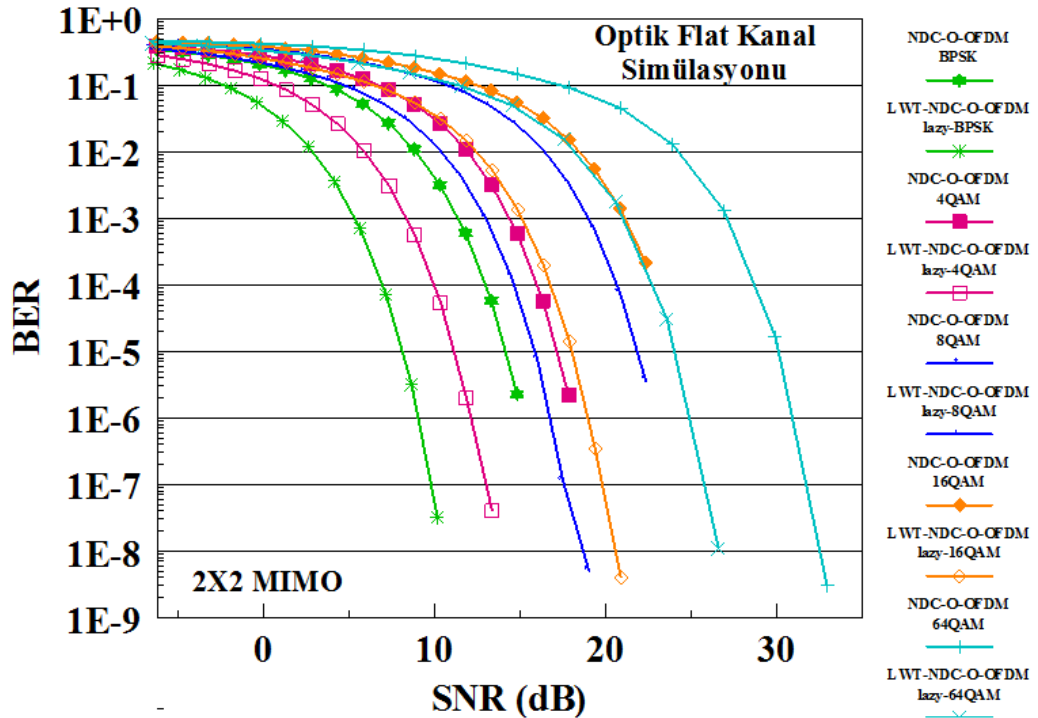
Şekil 5.15'de önerilen yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir.

Şekil 5.15 incelendiğinde en iyi performansın önerilen yönteme ait olduğu görülmektedir. En kötü performansı DC bias (DC önekleme) değeri 3dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer yöntemler ise bu iki yöntem arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM'in $1E-1$ BER değerlerinden önce, DC bias değeri 7dB olan DCO-OFDM'in ise $1E-2$ BER değerinden sonra hata tabanına gittiği şekilden görülmektedir. Önerilen yöntemle $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB daha fazla SNR kazancı, DC bias değeri 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden ise yaklaşık olarak 12 dB daha fazla SNR kazancı elde edilmektedir.



Şekil 5.15. 64-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması.

Tüm bu karşılaştırmalar ele alınarak bütün modülasyon değerlerinde, önerilen LWT-NDC-O-OFDM yönteminde en iyi performansı gösteren lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM karşılaştırması yapılmış ve şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. 2x2'lik MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile tüm modülasyonlarda karşılaştırması.

Şekil 5.16 incelendiğinde, önerdiğimiz yöntem her modülasyon türünde NDC-O-OFDM'e göre iyi performans sergilediği görülmektedir. Daha detaylı inceleyecek olursak; LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 4-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM BPSK modülasyonundan daha iyi performans sergilemiştir. Aynı şekilde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 8-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 4-QAM modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 16-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 8-QAM modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 64-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 16-QAM modülasyonundan daha iyi performansa sahiptir.

5.2. 4x4 MIMO Sistemleri Bilgisayar Benzetim Çalışmaları ve Sonuçları

Bu bölümde karşılaştırması yapılan dalgacık şekilleri, 4x4'lük MIMO-VLC sistemde çalışmaktadır. Sistem; verici tarafta 4 adet LED'den ve alıcı tarafta 4 adet fotodiyottan oluşmaktadır. VLC sistemler için önerilen yöntem olan LWT-NDC-O-OFDM ile diğer dalgacıkların FLAT kanallarda BER-SNR performansları analiz edilmektedir. Analiz edilen sistemlerin farklı bant verimlilikleri için, alıcı anten başına sinyal gürültü oranı değerlerine göre BER başarımları hesaplanmıştır. Ek olarak, önerilen bu yeni yöntem ile DCO-OFDM, ACO-OFDM, Klasik VLC-OFDM ve NDC-OFDM ile karşılaştırılmaktadır. Bu tezde sistemin başarımını değerlendirmek için altı farklı d_{TX} değeri göz önüne alınmıştır ($d_{TX} \in \{0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.45m, 0.6m, 0.7m\}$). Bu değerler için elde edilen MIMO-VLC kanal matrisleri, LED'ler arası değişen mesafelere göre aşağıdaki eşitliklerde olduğu gibidir.

$$H_{d_{TX} = 0.2} \approx 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 1.0708 & 0.9937 & 0.9937 & 0.9226 \\ 0.9937 & 1.0708 & 0.9226 & 0.9937 \\ 0.9937 & 0.9226 & 1.0708 & 0.9937 \\ 0.9226 & 0.9937 & 0.9937 & 1.0708 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$H_{d_{TX} = 0.3} \approx 10^{-3} \times \begin{bmatrix} 0.1403 & 0.1118 & 0.1118 & 0.0895 \\ 0.1118 & 0.1403 & 0.0895 & 0.1118 \\ 0.1118 & 0.0895 & 0.1403 & 0.1118 \\ 0.0895 & 0.1118 & 0.1118 & 0.1403 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$H_{d_{TX} = 0.4} \approx 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 0.9226 & 0.7964 & 0.7964 & 0.6888 \\ 0.7964 & 0.9226 & 0.6888 & 0.7964 \\ 0.7964 & 0.6888 & 0.9226 & 0.7964 \\ 0.6888 & 0.7964 & 0.7964 & 0.9226 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$H_{d_{TX}} = 0.45 \approx 10^{-3} \times \begin{bmatrix} 0.1183 & 0.0848 & 0.0848 & 0 \\ 0.0848 & 0.1183 & 0 & 0.0848 \\ 0.0848 & 0 & 0.1183 & 0.0848 \\ 0 & 0.0848 & 0.0848 & 0.1183 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

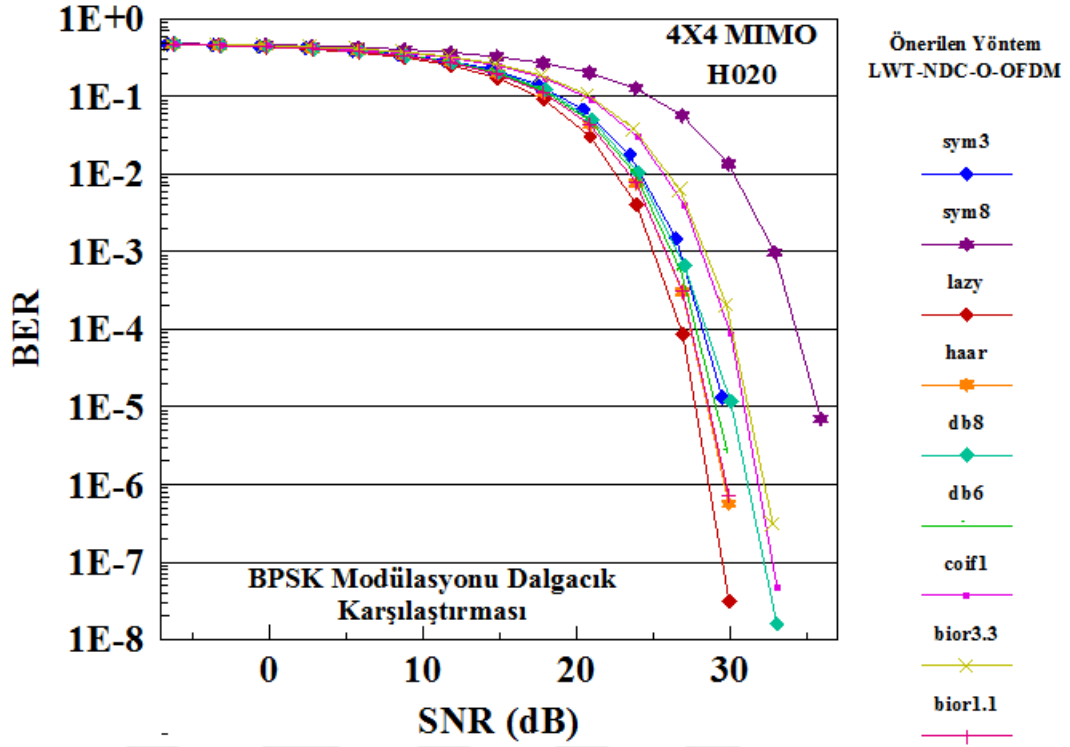
$$H_{d_{TX}} = 0.6 \approx 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 0.8954 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8954 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8954 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8954 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$H_{d_{TX}} = 0.7 \approx 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 0.5658 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5658 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5658 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5658 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Bu matrislerdeki değerler $d_{TX} = 0.2$, $d_{TX} = 0.3$, $d_{TX} = 0.4$, $d_{TX} = 0.45$, $d_{TX} = 0.6$ ve $d_{TX} = 0.7$ kanallarına ait ilinti metrik değerlerini ifade etmektedir. İlinti metrik değerlerinden, vericiler arasındaki mesafe çoğaldıkça MIMO kanallarının ilinti düzeyinin azaldığı açıkça görülmektedir.

Bu bölümde karşılaştırması yapılan DCO-OFDM'in, mevcut simülasyonlardaki eklenen DC öngerilim seviyesi, tutarlılık için 3 dB, 7 dB ve 13 dB'ye ayarlanmıştır. Karşılaştırması yapılmak üzere kullanılan işaret yıldız boyutları, yani modülasyon dereceleri BPSK, 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM ve 64-QAM'dir. Önerilen LWT-NDC-OFDM'de kullanılan dalgacıklar; bior 1.1, bior 3.3, coif 1, db 6, db 8, haar, lazy, sym 3 ve sym 8'dir. Simülasyonlar 1000 Monte Carlo döngüsü kullanılarak Optik MIMO kanallarda yapılmıştır.

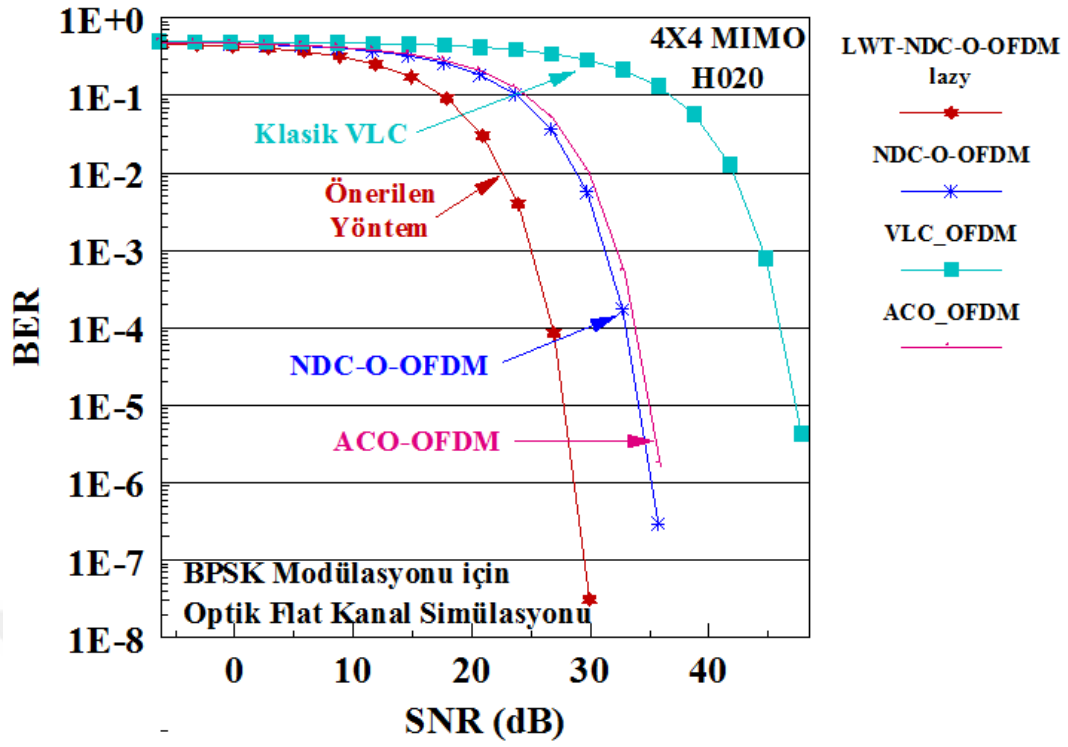
Bu kısımdan sonraki şekillerde çeşitli modülasyonlar ve kanallar kullanılarak, 1000 Monte Carlo döngüsü üzerinden optik Flat kanallarda yapılan performans analizleri verilmektedir. Bu performans değerlerinin önerdiğimiz yöntem ile karşılaştırması yapılmaktadır. Kullanılan OFDM veri paketleri IEEE 802.11a Standardına uygun olarak 64 noktalı FFT'den oluşmaktadır.



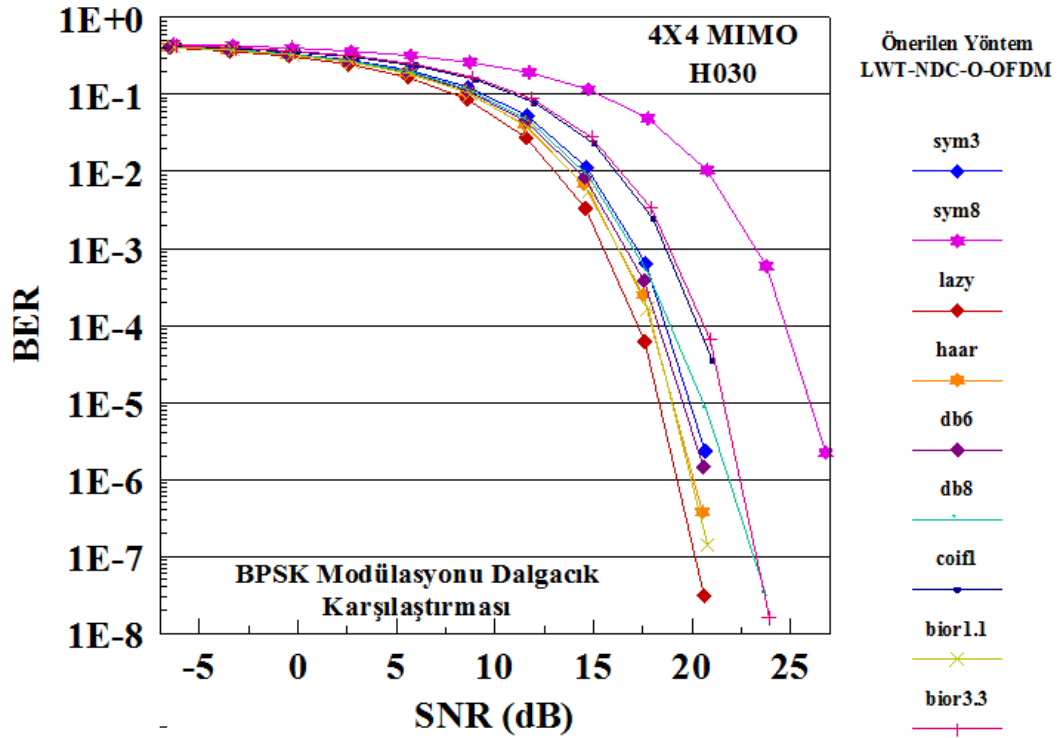
Şekil 5.17. Bpsk modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.17’de, BPSK modülasyonu H020 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu H020 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki BPSK modülasyonu H020 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.18’de BPSK modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H020 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM’den 7 dB, Klasik-VLC’den ise 20 dB SNR kazancı elde edilmiştir

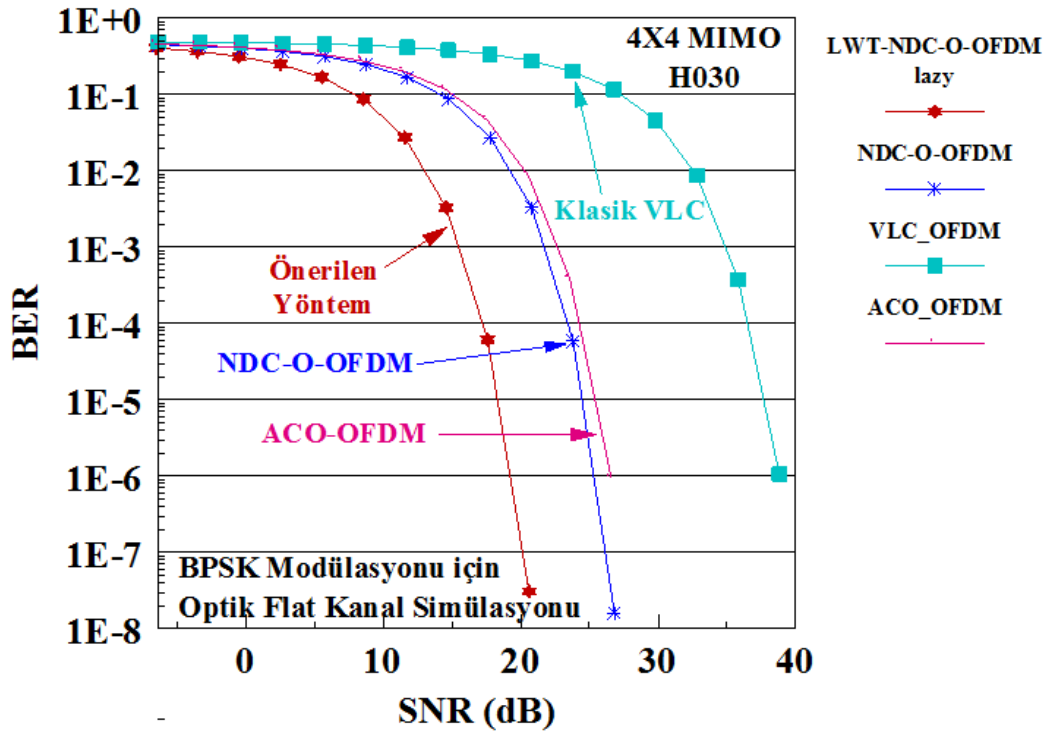


Şekil 5.18. BPSK modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



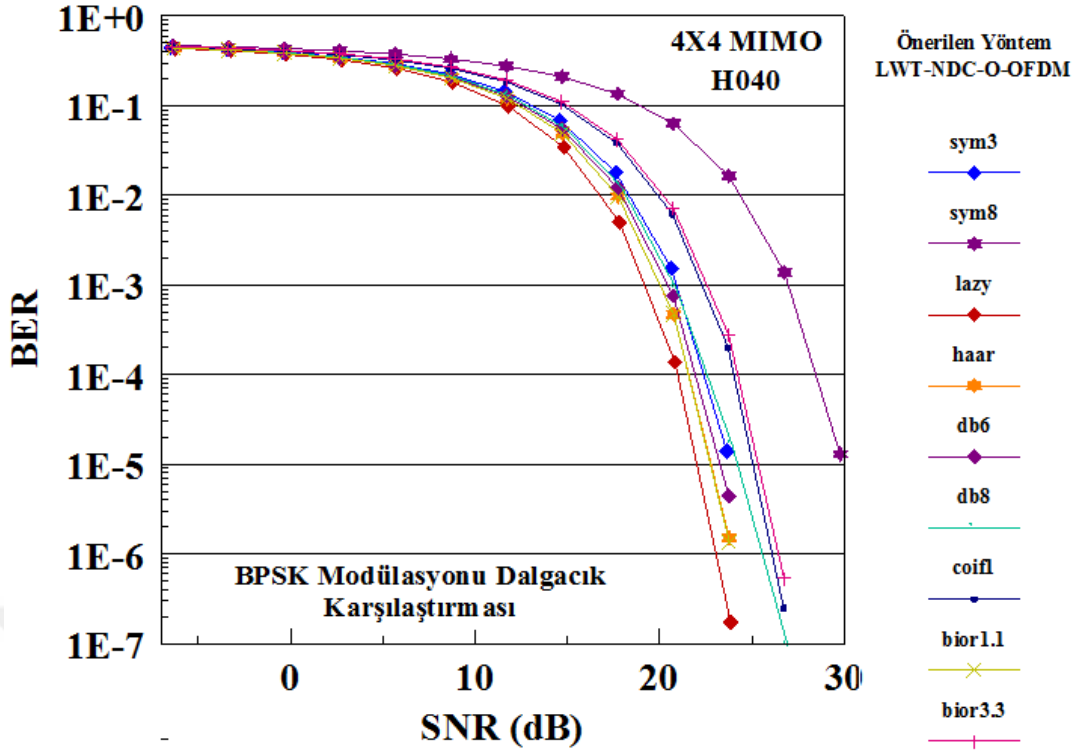
Şekil 5.19. Bpsk modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.19’da, BPSK modülasyonu H030 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu H030 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki BPSK modülasyonu H030 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.20. BPSK modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

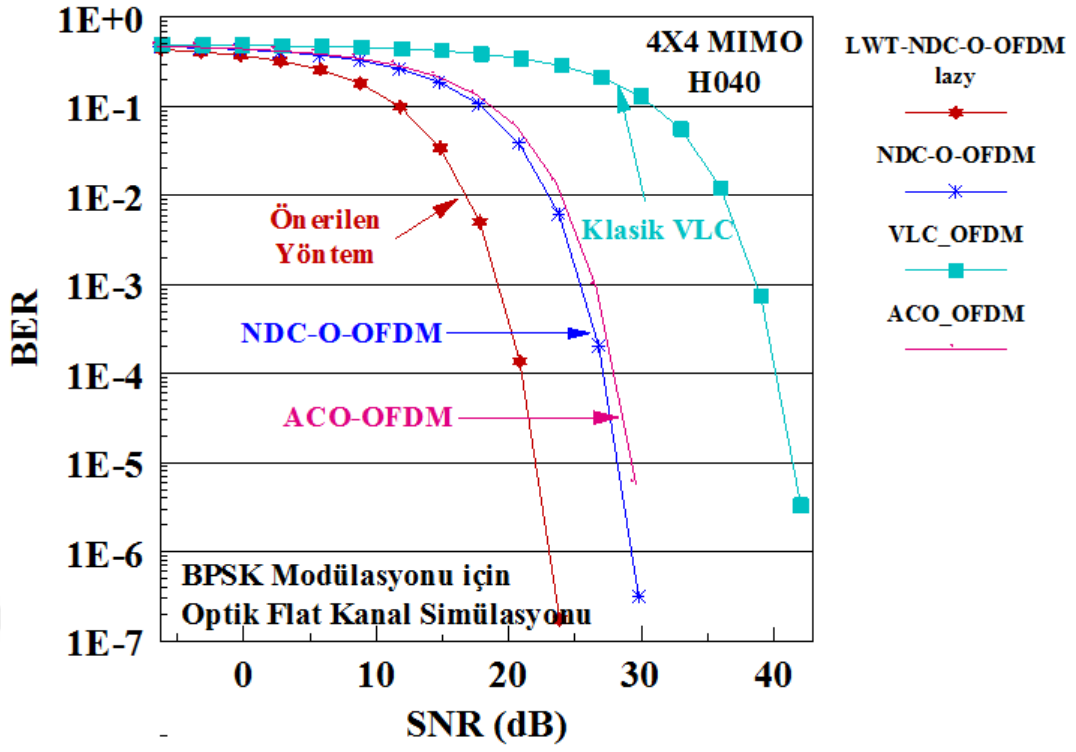
Şekil 5.20’de BPSK modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H030 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM’den 7 dB, Klasik-VLC’den ise 19 dB SNR kazancı elde edilmiştir



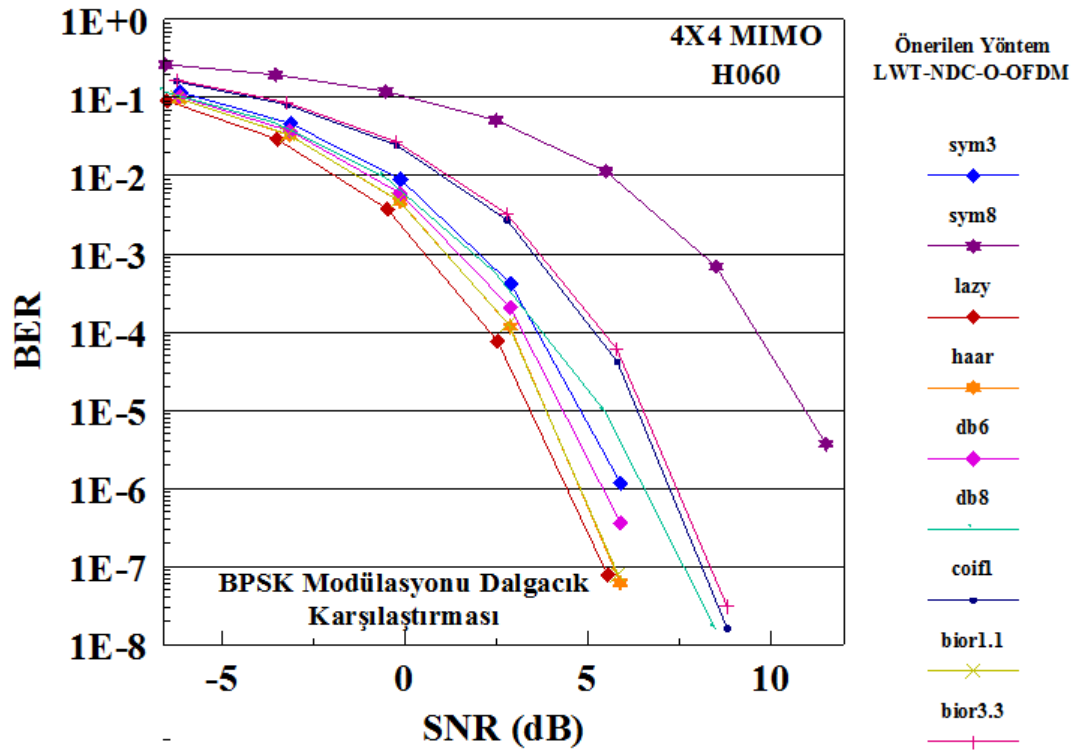
Şekil 5.21. BPSK modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.21’de, BPSK modülasyonu H040 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu H040 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki BPSK modülasyonu H040 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.22’de BPSK modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H040 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6,5 dB, ACO-OFDM’den 7 dB, Klasik-VLC’den ise 20 dB SNR kazancı elde edilmiştir

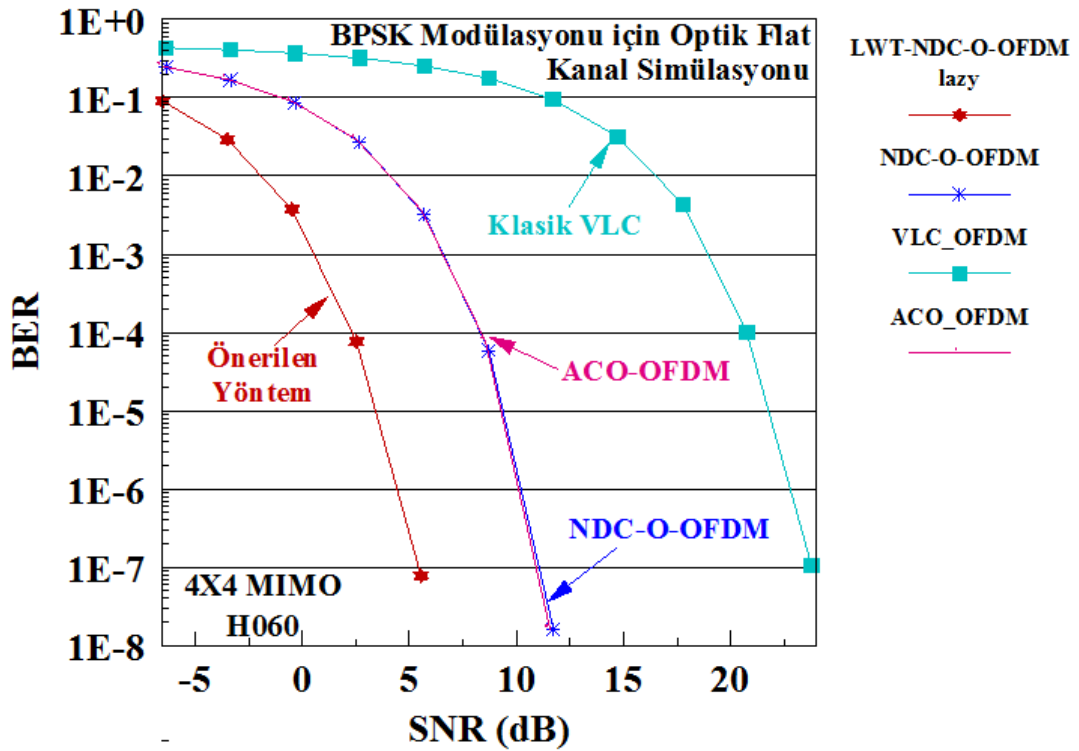


Şekil 5.22. BPSK modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



Şekil 5.23. BPSK modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması.

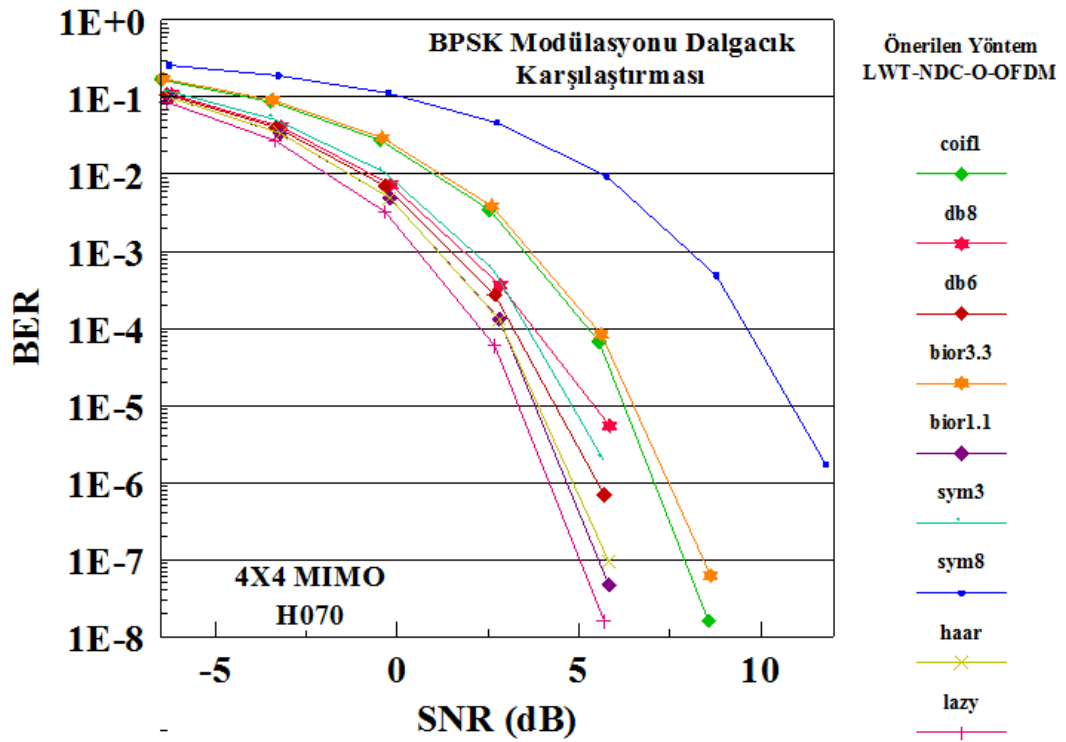
Şekil 5.23’de, BPSK modülasyonu H060 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu H060 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki BPSK modülasyonu H060 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.24. BPSK modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

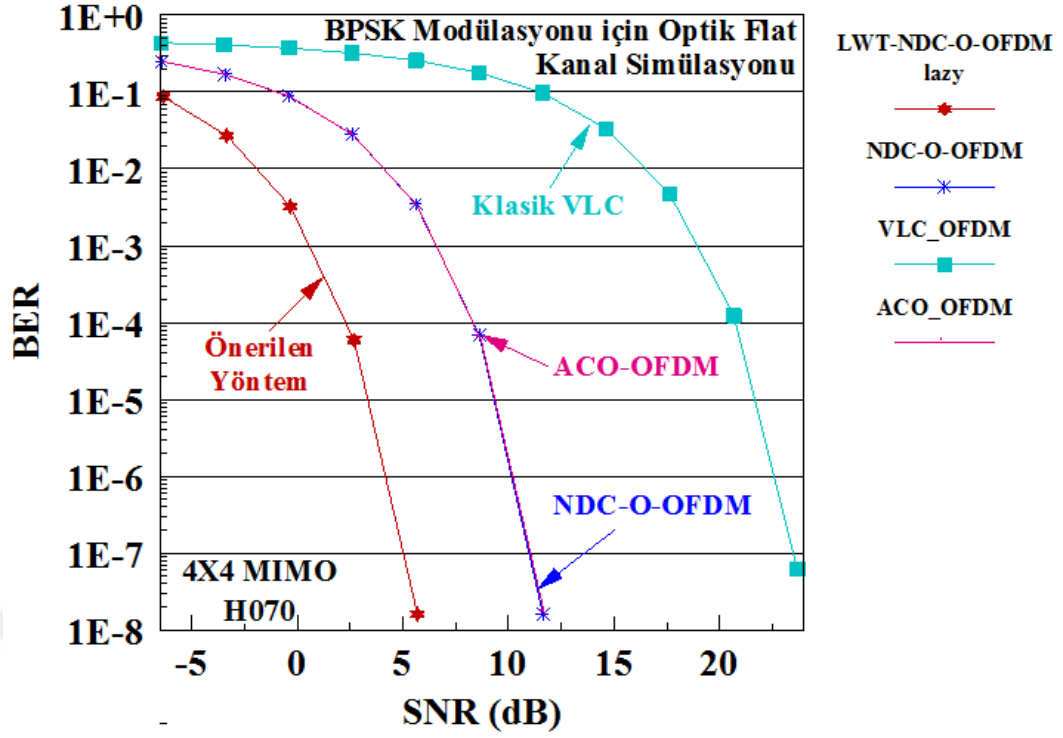
Şekil 5.24’de BPSK modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H060 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM hemen hemen aynı performansı sergilemektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM yöntemlerinden yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC’den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

Şekil 5.25'te, BPSK modülasyonu H070 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu H070 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki BPSK modülasyonu H070 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

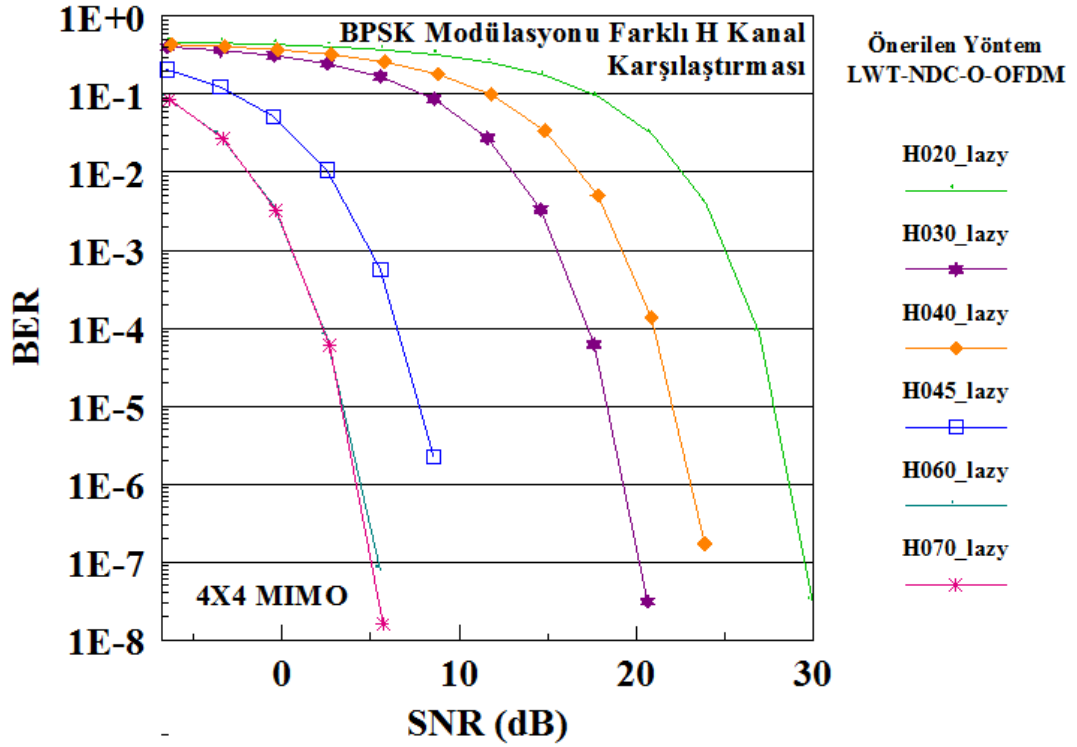


Şekil 5.25. BPSK modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.26'da BPSK modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H070 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC'nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM hemen hemen aynı performansı sergilemektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM yöntemlerinden yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC'den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

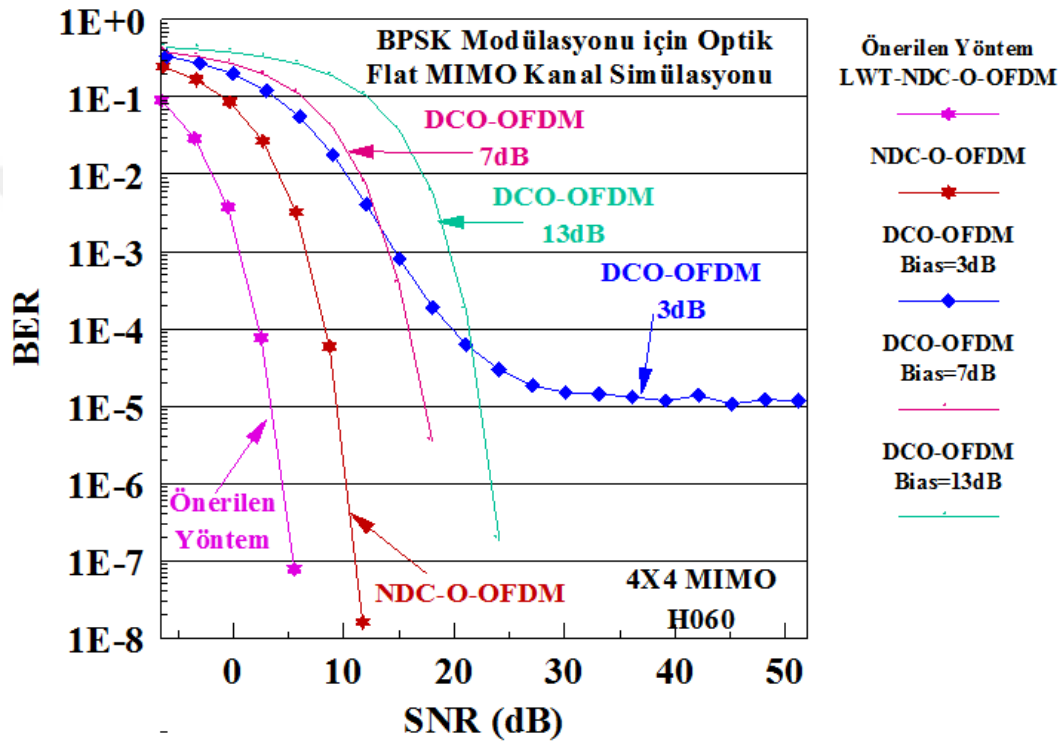


Şekil 5.26. BPSK modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



Şekil 5.27. BPSK modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması.

Şekil 5.27’de BPSK modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması verilmektedir. BPSK modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H kanallara ait karşılaştırmalar incelendiğinde; en iyi performansın H060 ve H070 kanalları olduğu görülmektedir. H020 kanalı ise en kötü performansı sergilemiştir. Diğer kanallar bu 3 kanal arasında değişik performanslara sahiptir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak şekil 5.28’deki karşılaştırmalar H060 kanalı kullanılarak elde edilmiştir.

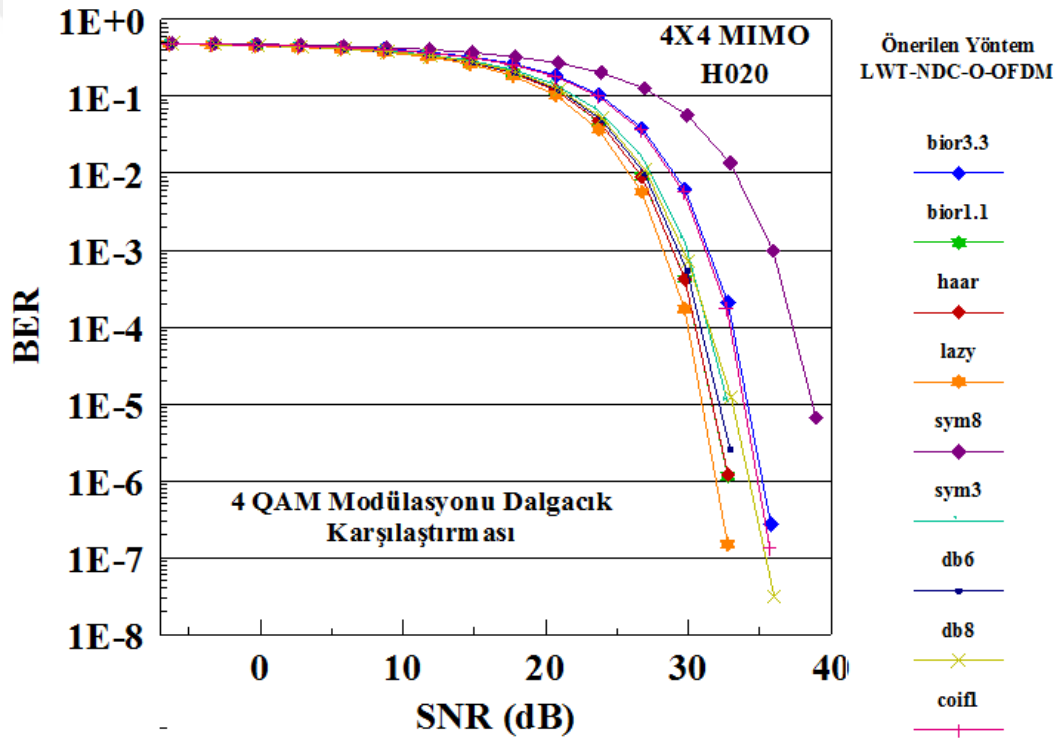


Şekil 5.28. BPSK modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM’in karşılaştırması.

Şekil 5.28’de BPSK modülasyonu H060 kanalında önerilen yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde en iyi performansın önerilen yonteme ait olduğu görülmektedir. En kötü performansı DC bias değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer dalgacık şekilleri ise bu dalgacıklar arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM’in 1E-3 BER değerlerinden sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB, DC bias değeri 7 dB olan DCO-OFDM

yönteminden yaklaşık olarak 11 dB, DC bias değeri 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 16,5 dB SNR kazancı elde edilmektedir.

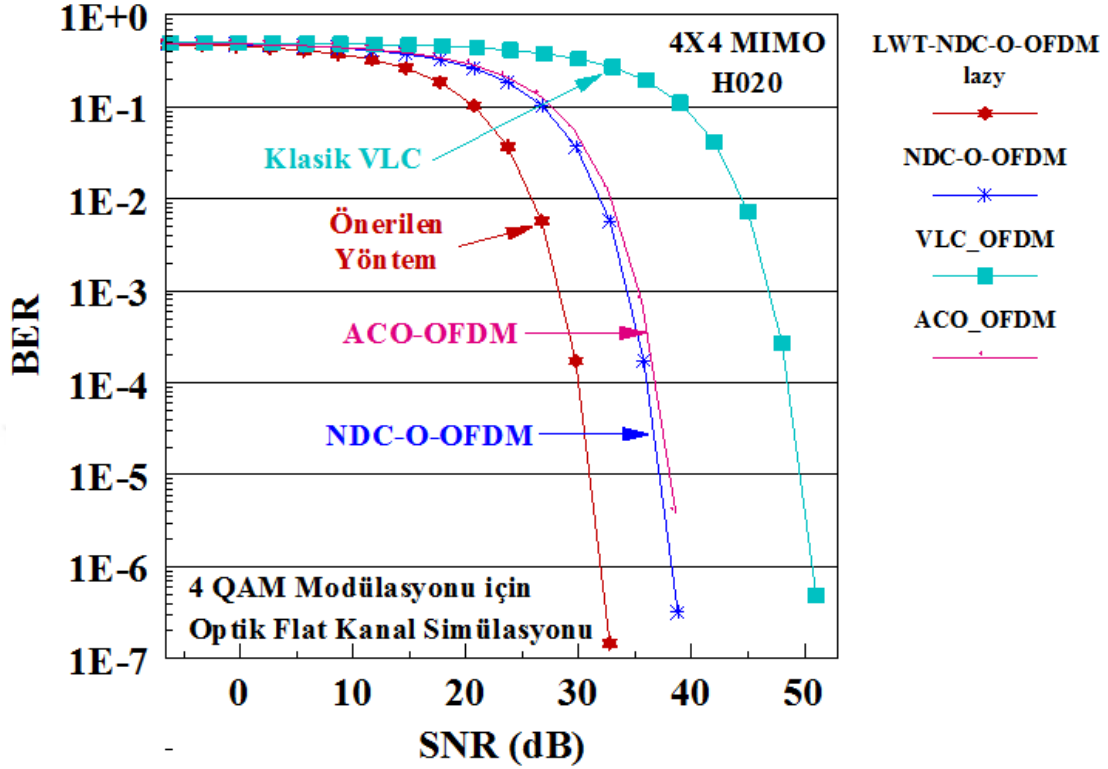
Şekil 5.29’da, 4-QAM modülasyonu H020 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu H020 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 4-QAM modülasyonu H020 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.29. 4-QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması.

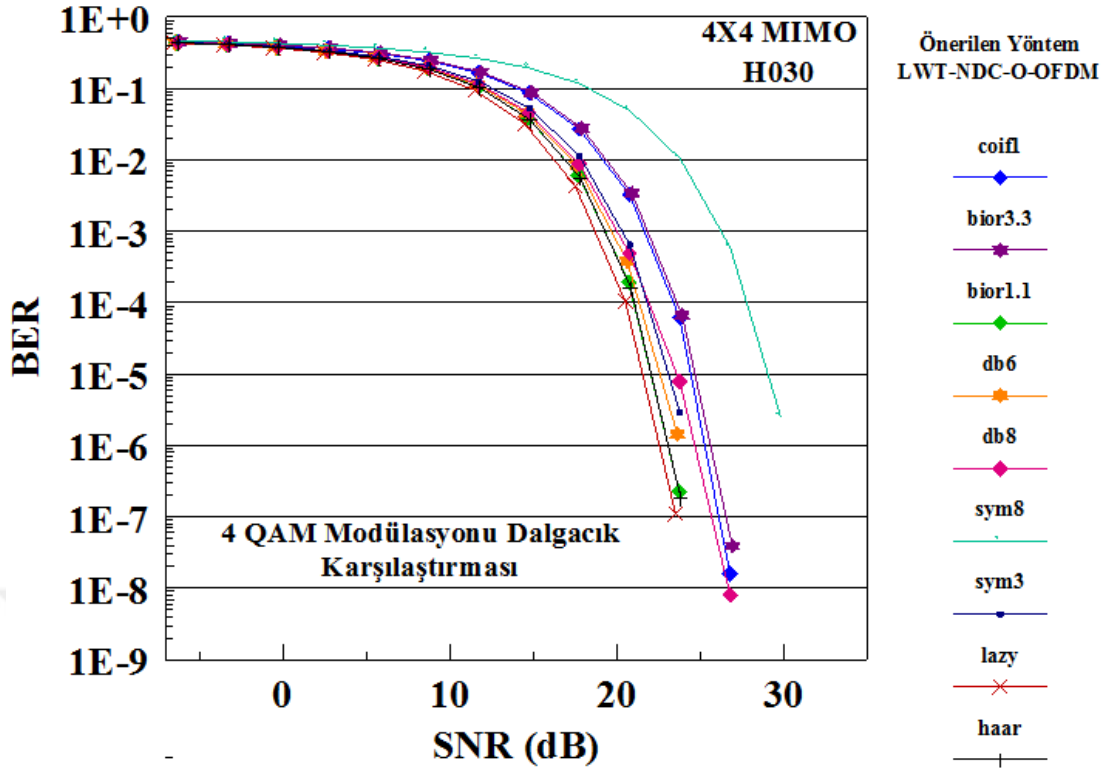
Şekil 5.30’da 4-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H020 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB,

ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 7 dB, Klasik-VLC’den ise 16 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

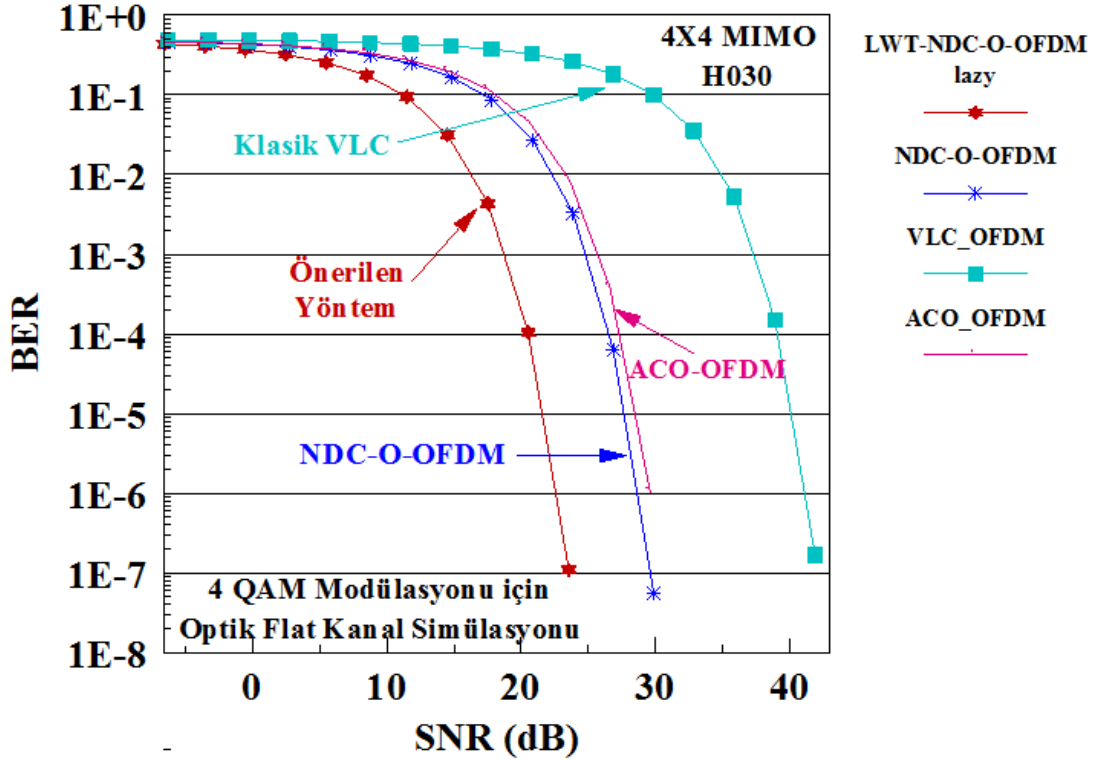


Şekil 5.30. 4-QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.31’de, 4-QAM modülasyonu H030 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu H030 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 4-QAM modülasyonu H030 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

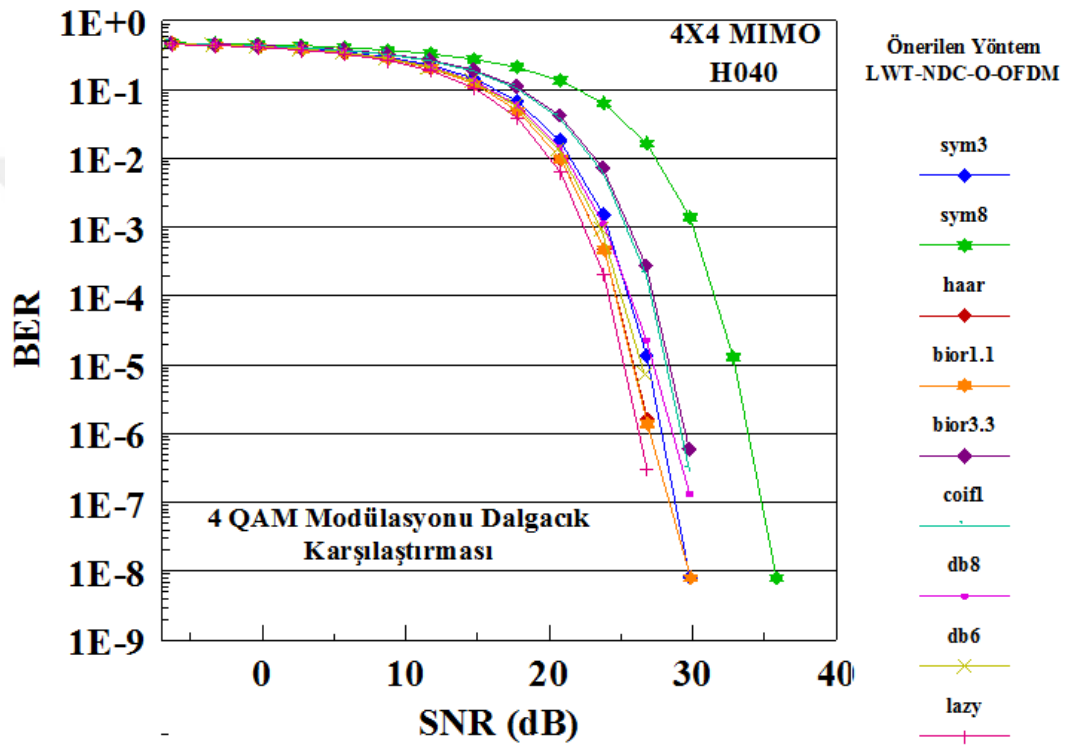


Şekil 5.31. 4-QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması.



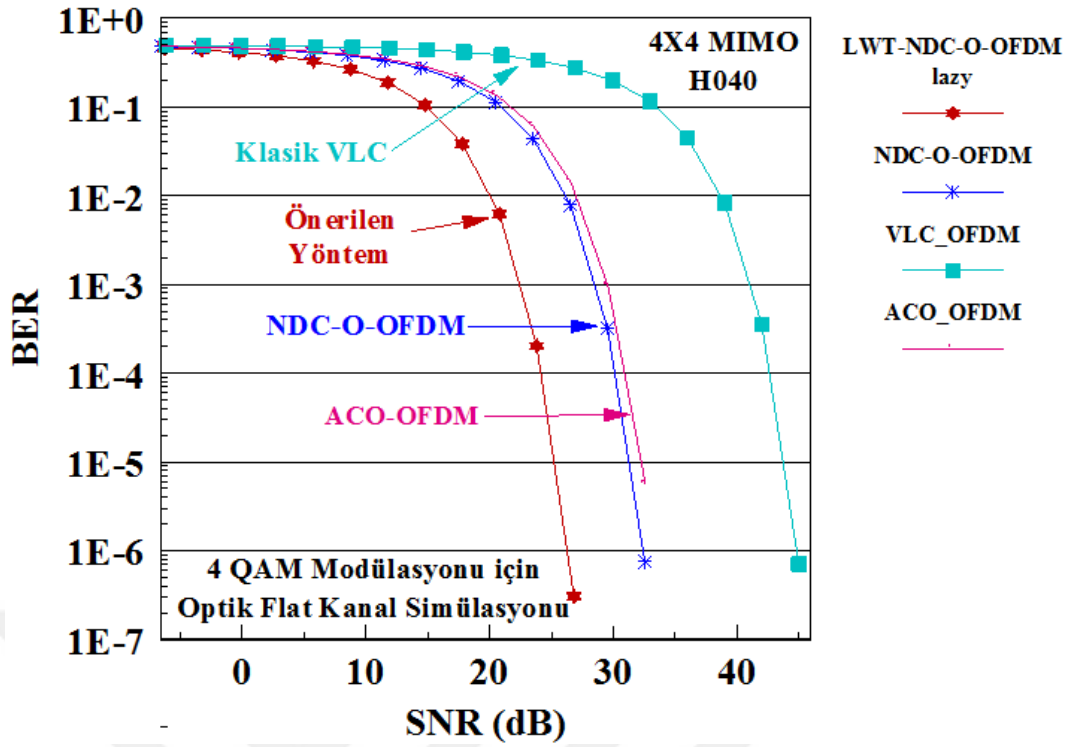
Şekil 5.32. 4-QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.32’de 4-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H030 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6,8 dB, Klasik-VLC’den ise 18,8 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



Şekil 5.33. 4-QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması.

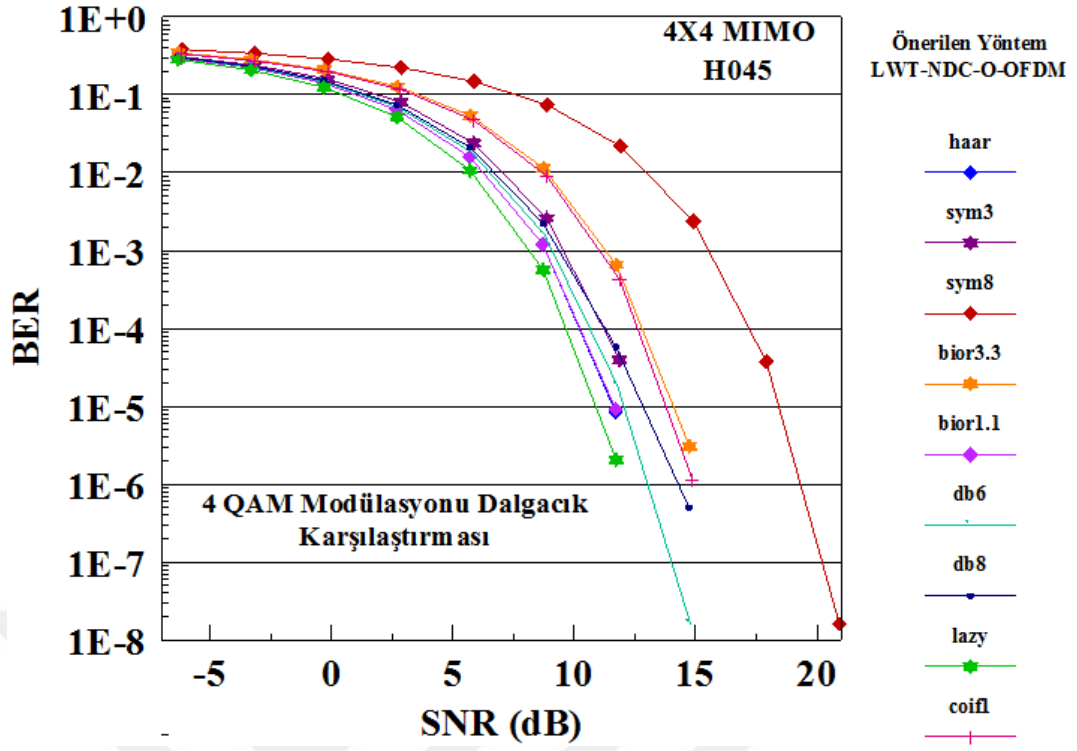
Şekil 5.33’de, 4-QAM modülasyonu H040 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu H040 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 4-QAM modülasyonu H040 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



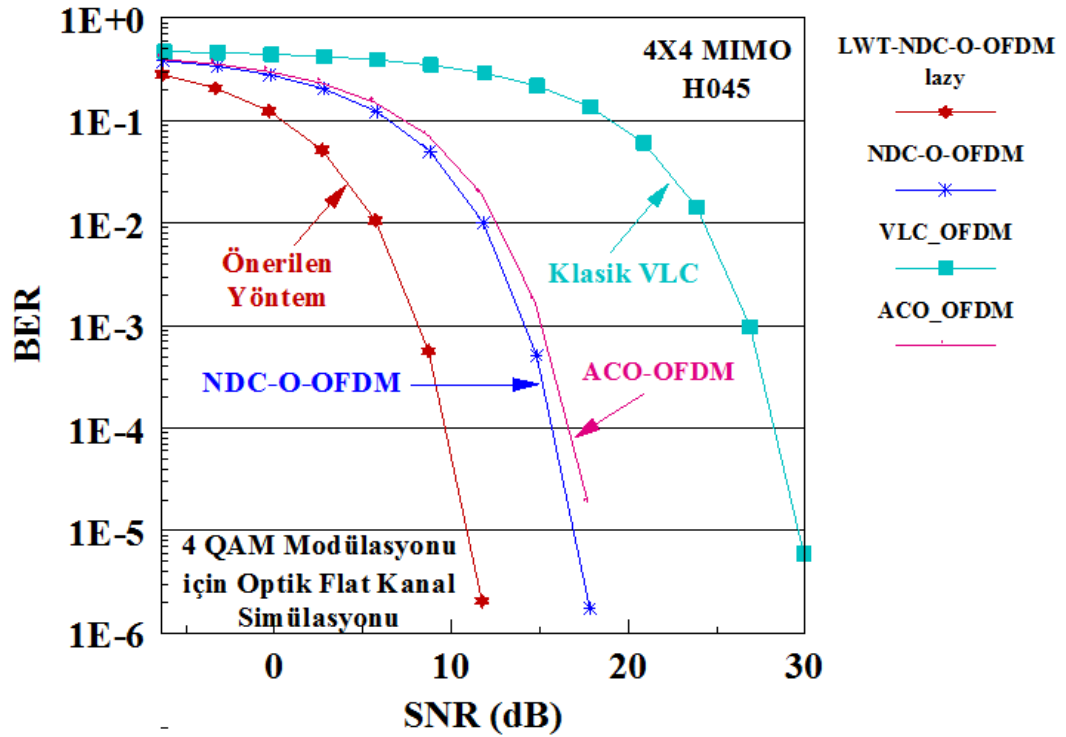
Şekil 5.34. 4-QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.34'te 4-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H040 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC'nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6,8 dB, Klasik-VLC'den ise 18,8 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

Şekil 5.35'te, 4-QAM modülasyonu H045 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu H045 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 4-QAM modülasyonu H045 kanal karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

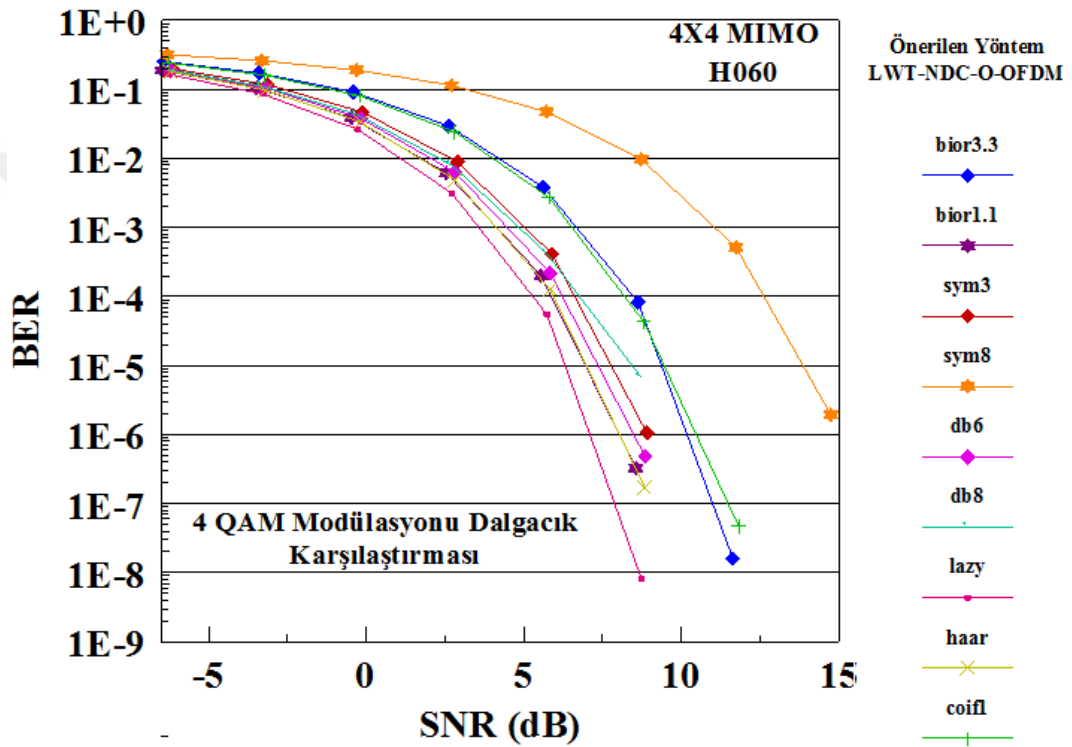


Şekil 5.35. 4-QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması.



Şekil 5.36. 4-QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

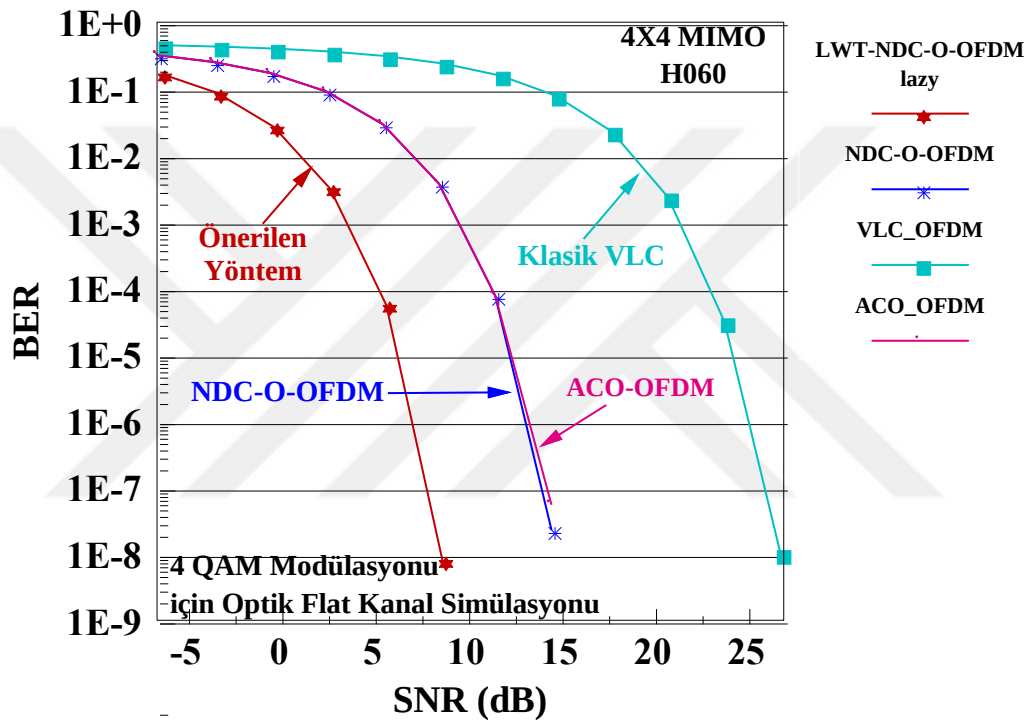
Şekil 5.36’da 4-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H045 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 7 dB, Klasik-VLC’den ise 18,5 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



Şekil 5.37. 4-QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması.

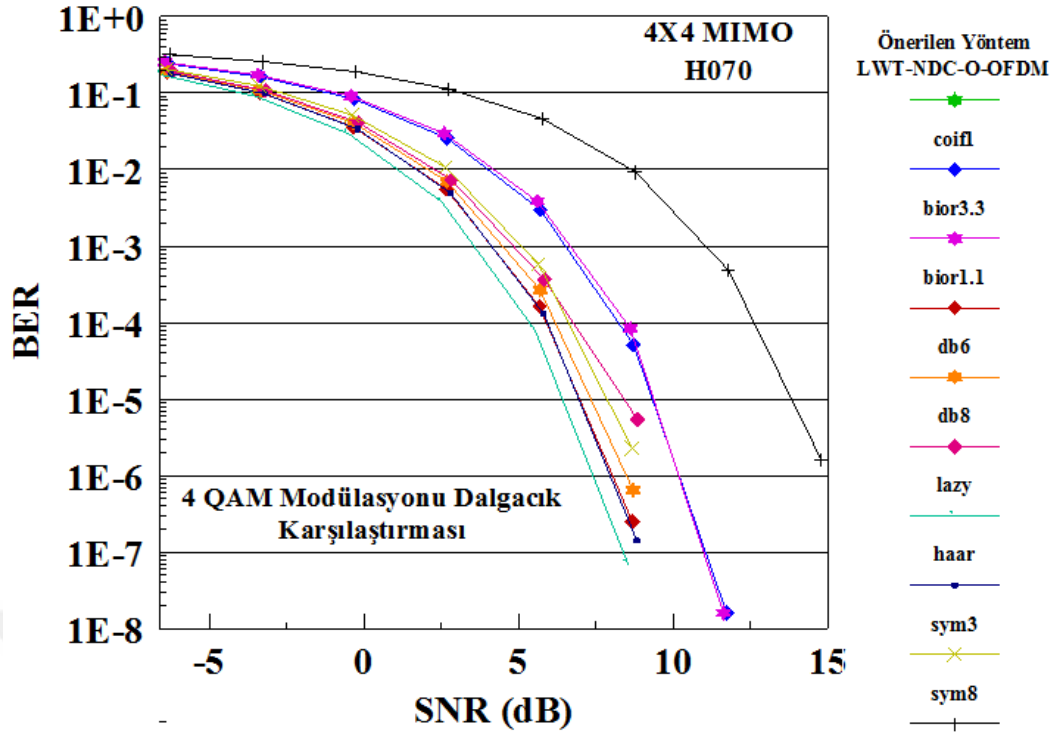
Şekil 5.37’de, 4-QAM modülasyonu H060 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu H060 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 4-QAM modülasyonu H060 kanal karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.38’de 4-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H060 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM hemen hemen aynı performansı sergilemektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC’den ise 17,5 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

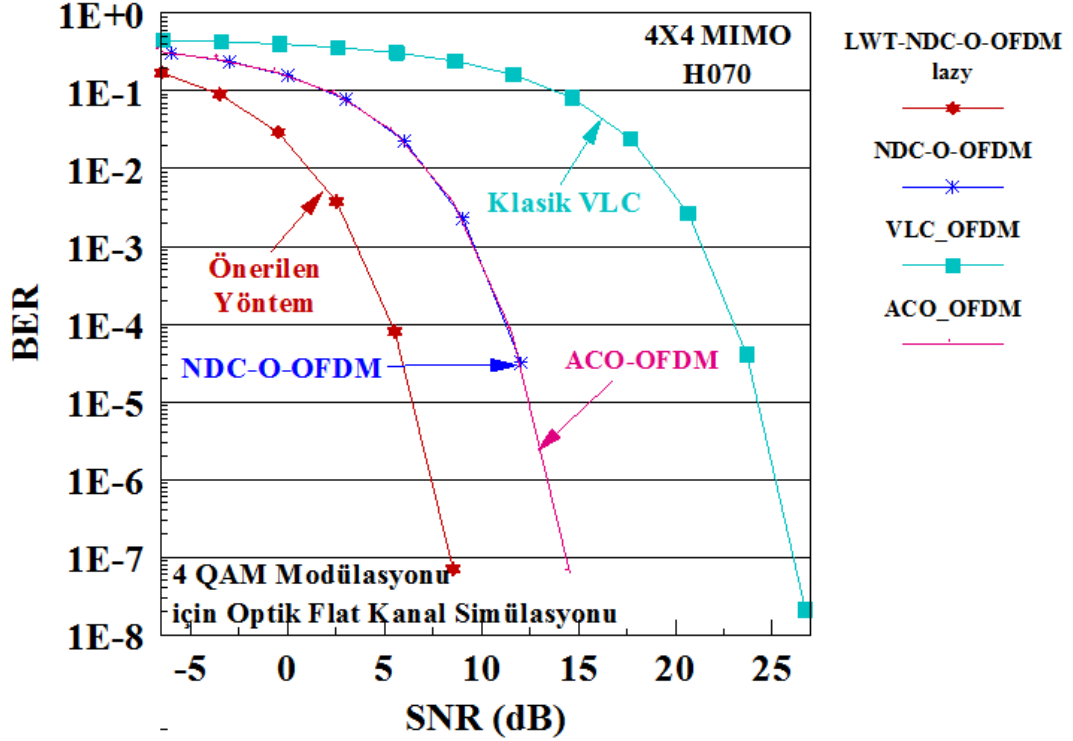


Şekil 5.38. 4-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.39’da, 4 QAM modülasyonu H070 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4 QAM modülasyonu H070 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 4 QAM modülasyonu H070 kanal karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

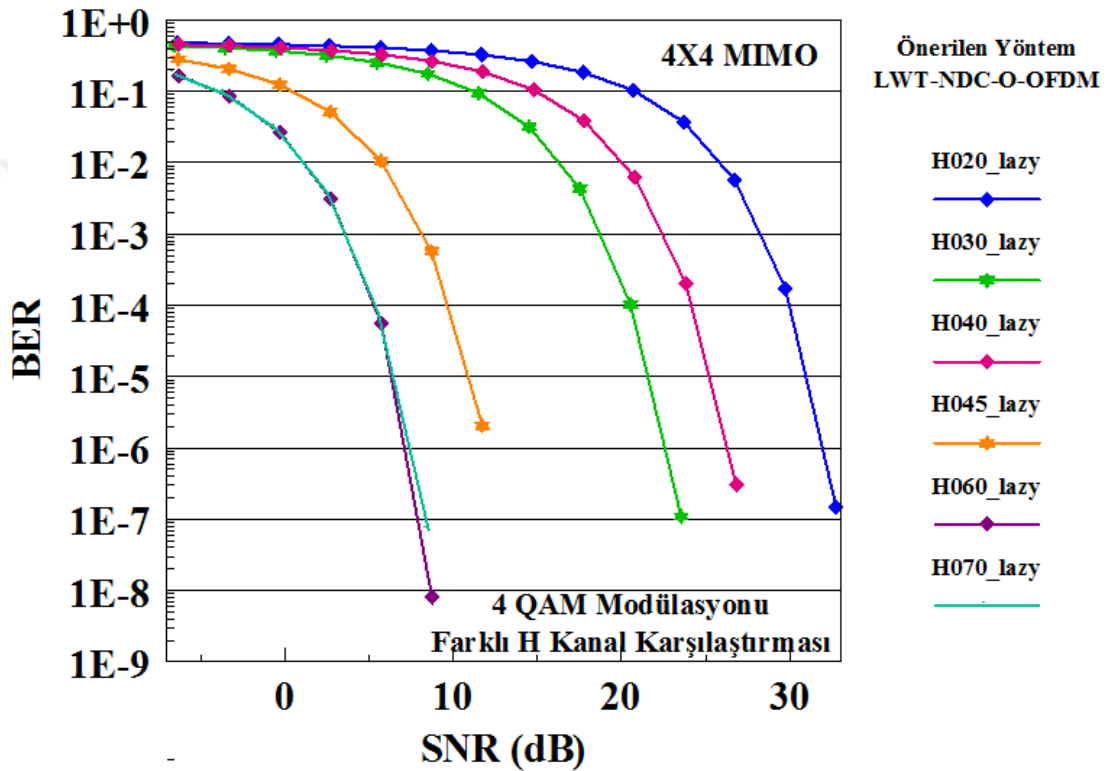


Şekil 5.39. 4-QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması.



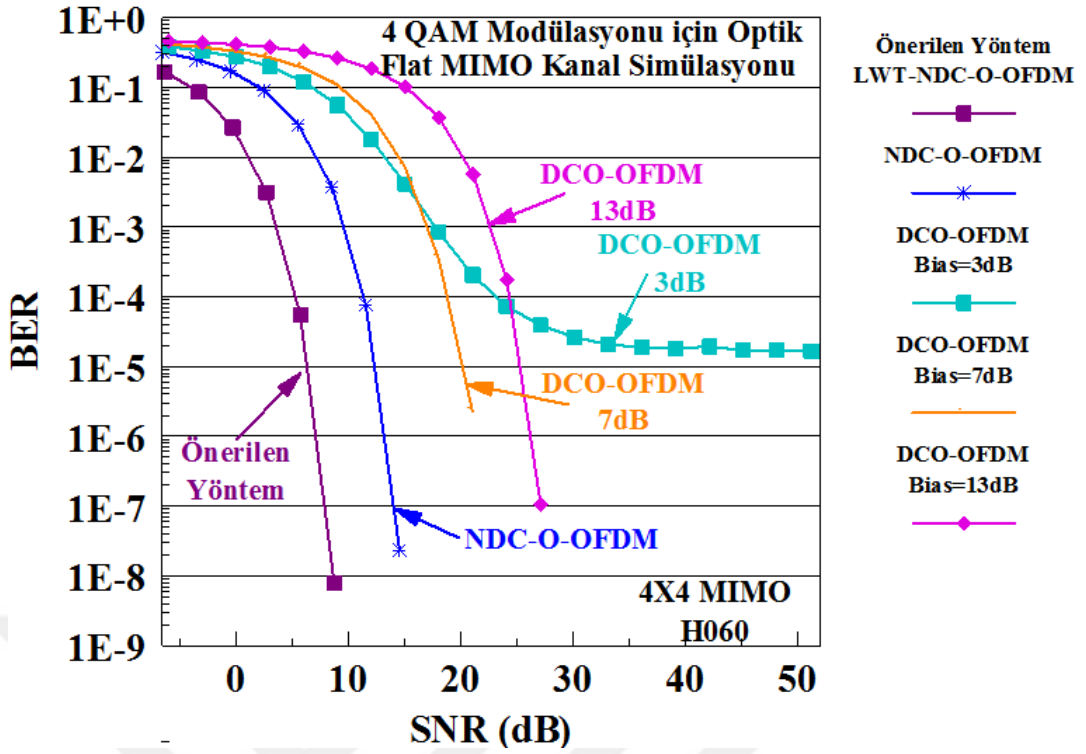
Şekil 5.40. 4-QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.40’da 4-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H070 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM hemen hemen aynı performansı sergilemektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC’den ise 17 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



Şekil 5.41. 4-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması.

Şekil 5.41’de 4-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması verilmektedir. 4-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H kanallara ait karşılaştırmalar incelendiğinde; en iyi performansın H060 ve H070 kanalları olduğu görülmektedir. H020 kanalı ise en kötü performansı sergilemiştir. Diğer kanallar bu 3 kanal arasında değişik performanslara sahiptir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak şekil 5.42’deki karşılaştırmalar H060 kanalı kullanılarak elde edilmiştir.

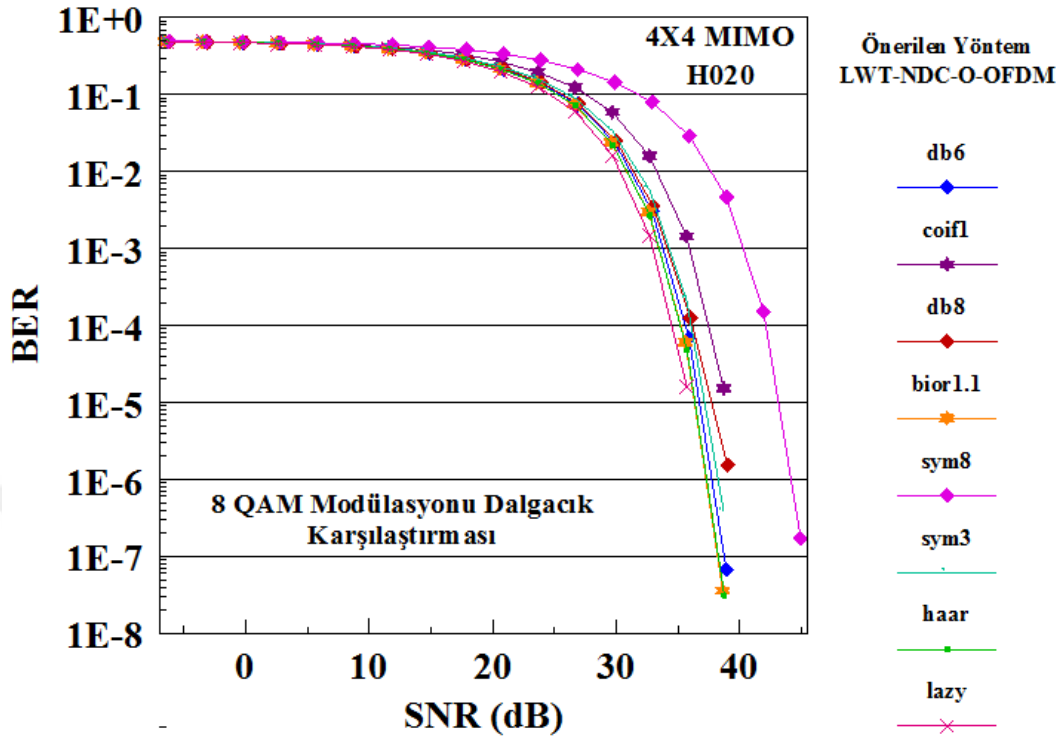


Şekil 5.42. 4-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması.

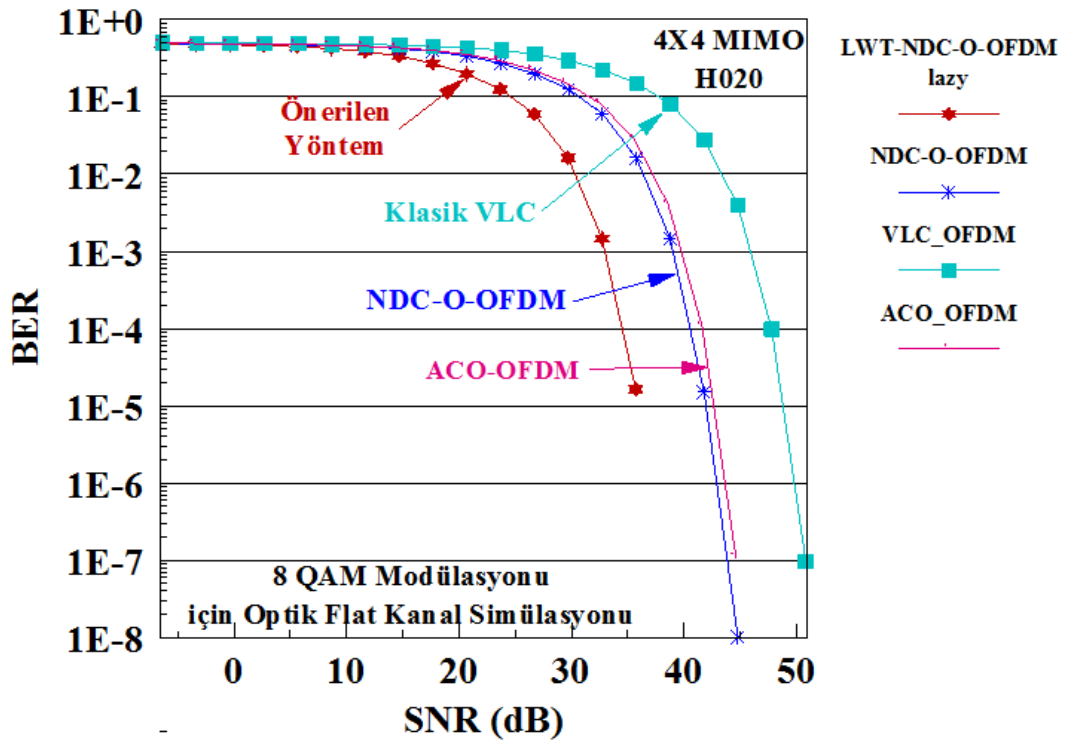
Şekil 5.42'de 4-QAM modülasyonu H060 kanalında önerilen yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde en iyi performansın önerilen yönteme ait olduğu anlaşılmaktadır. En kötü performansı DC bias değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer dalgacık şekilleri ise bu dalgacıklar arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM'in 1E-3 BER değerlerinden sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB, DC bias değeri 7 dB olan DCO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 14 dB, DC bias değeri 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 19 dB SNR kazancı elde edilmektedir.

Şekil 5.43'de, 8 QAM modülasyonu H020 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8 QAM modülasyonu H020 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 8 QAM

modülasyonu H020 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

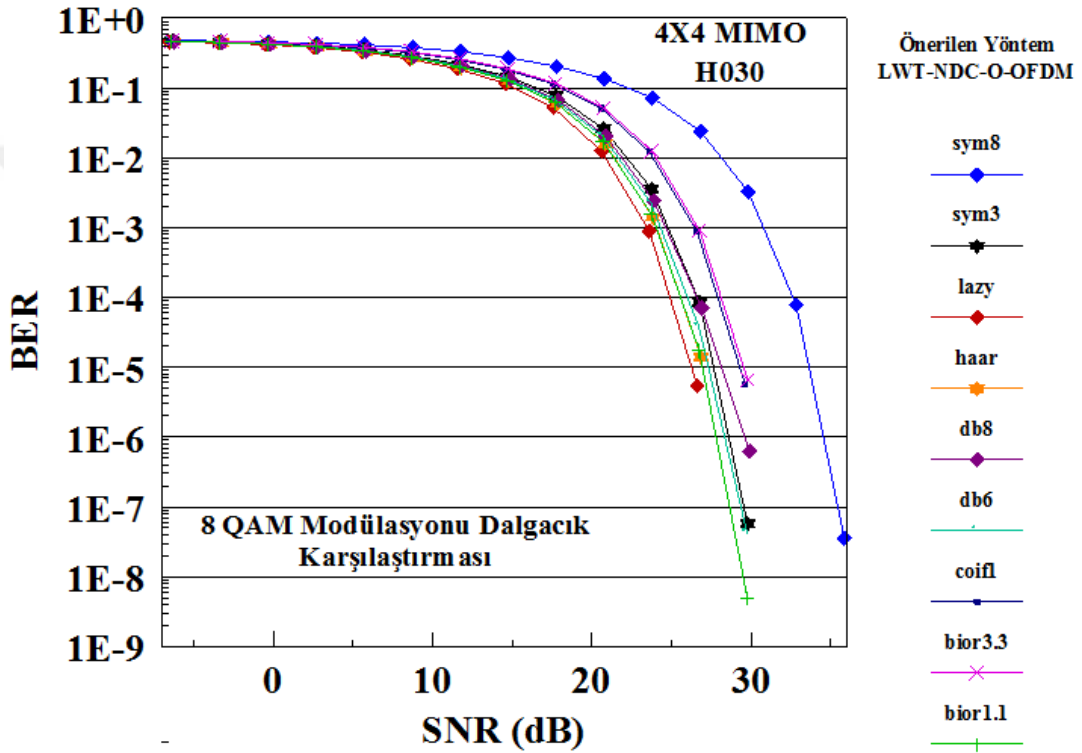


Şekil 5.43. 8-QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması.



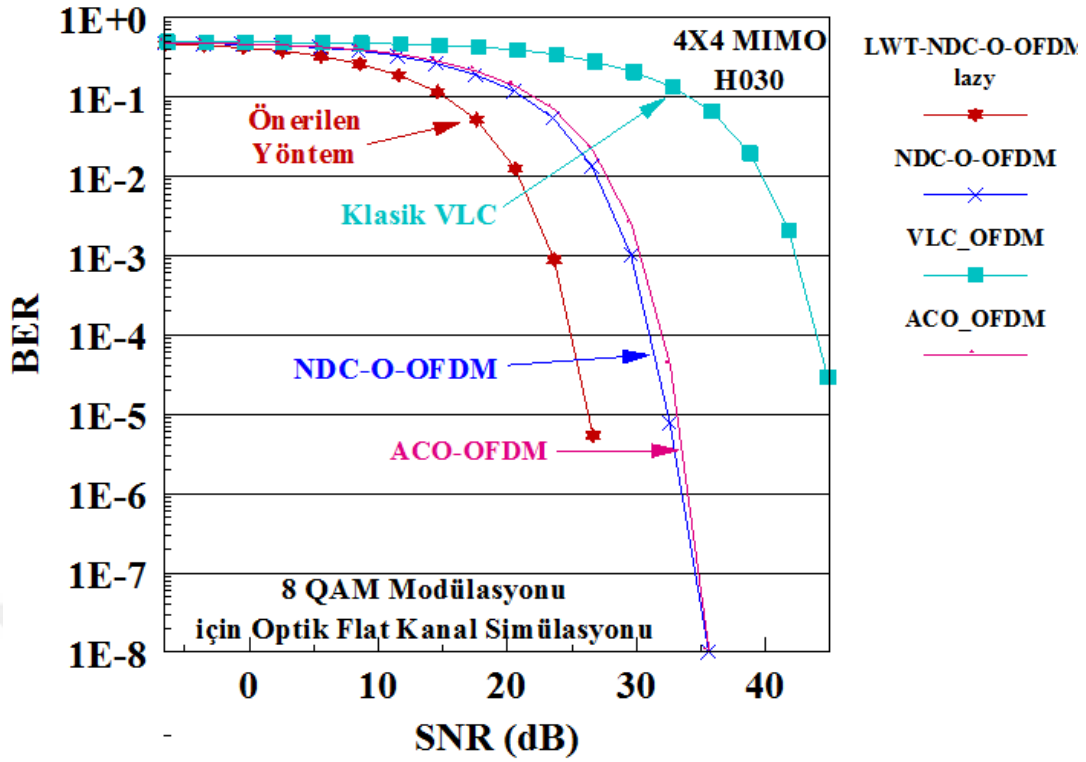
Şekil 5.44. 8-QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.44’de 8-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H020 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 7,2 dB Klasik-VLC’den ise 14 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



Şekil 5.45. 8-QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması.

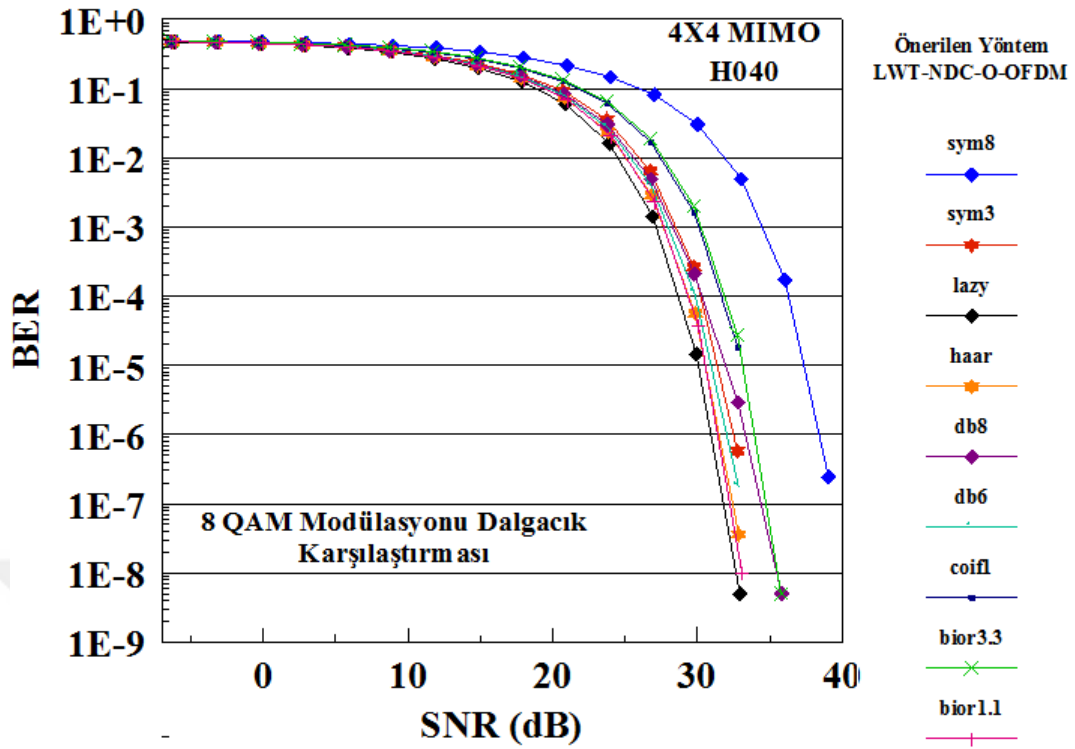
Şekil 5.45’te, 8-QAM modülasyonu H030 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu H030 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 8-QAM modülasyonu H030 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



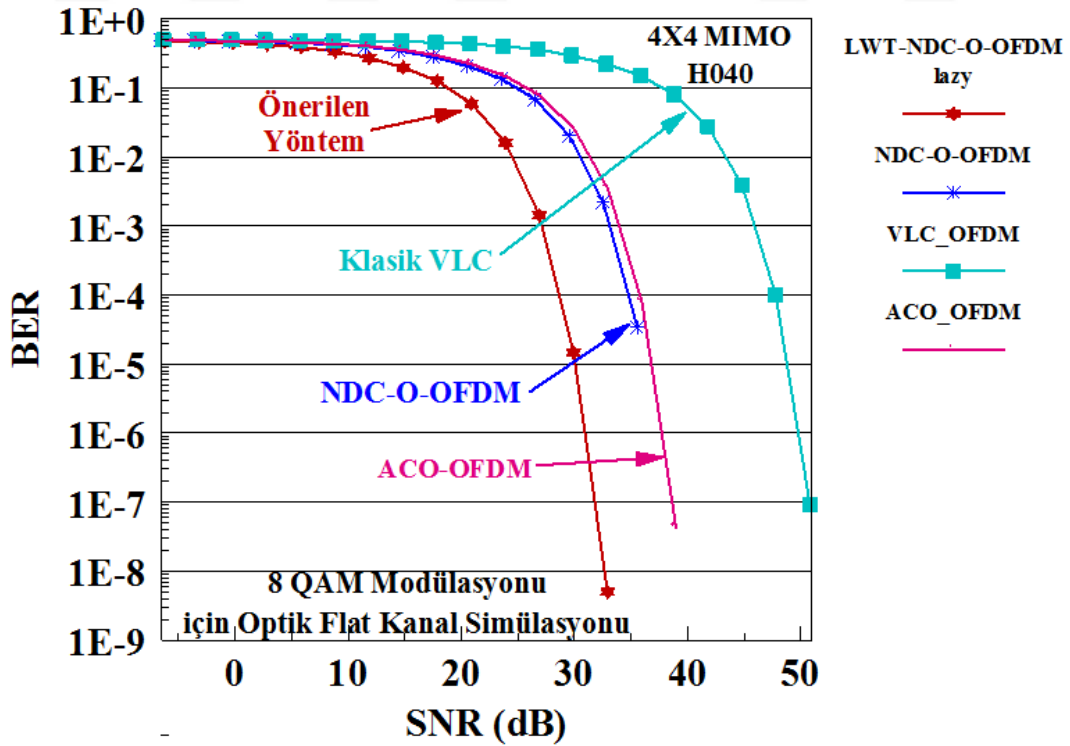
Şekil 5.46. 8-QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.46’da 8-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H030 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 7 dB, Klasik-VLC’den ise 18,8 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

Şekil 5.47’de, 8-QAM modülasyonu H040 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu H040 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 8-QAM modülasyonu H040 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

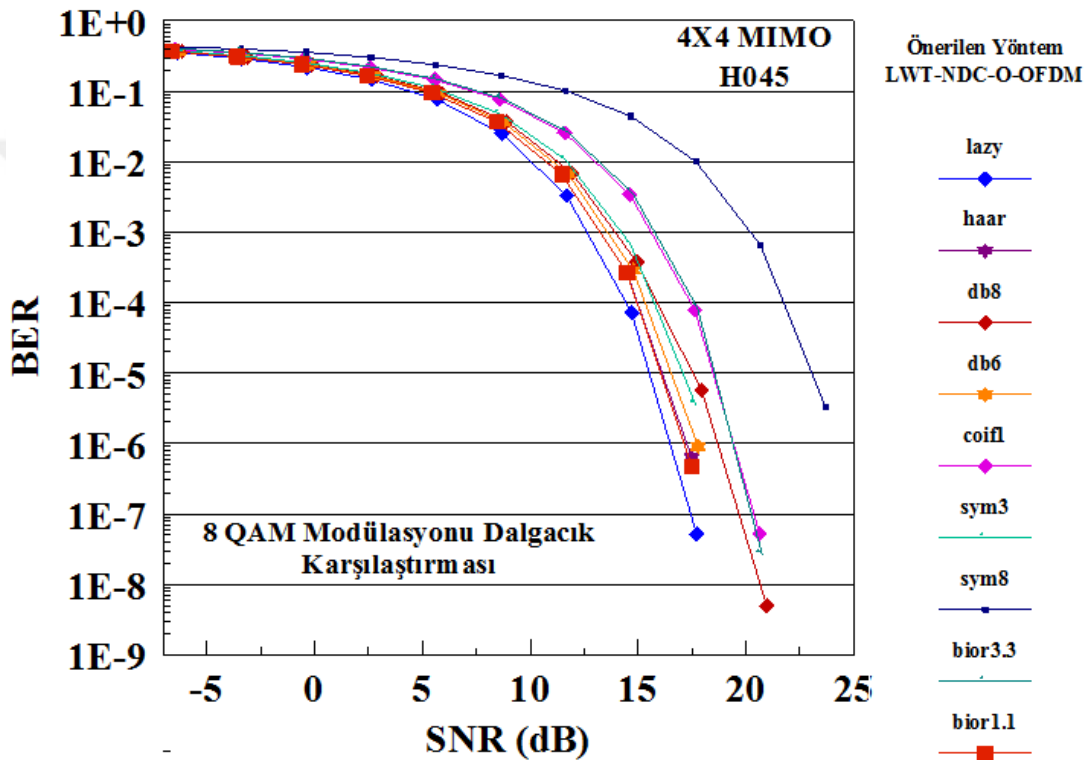


Şekil 5.47. 8-QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması.



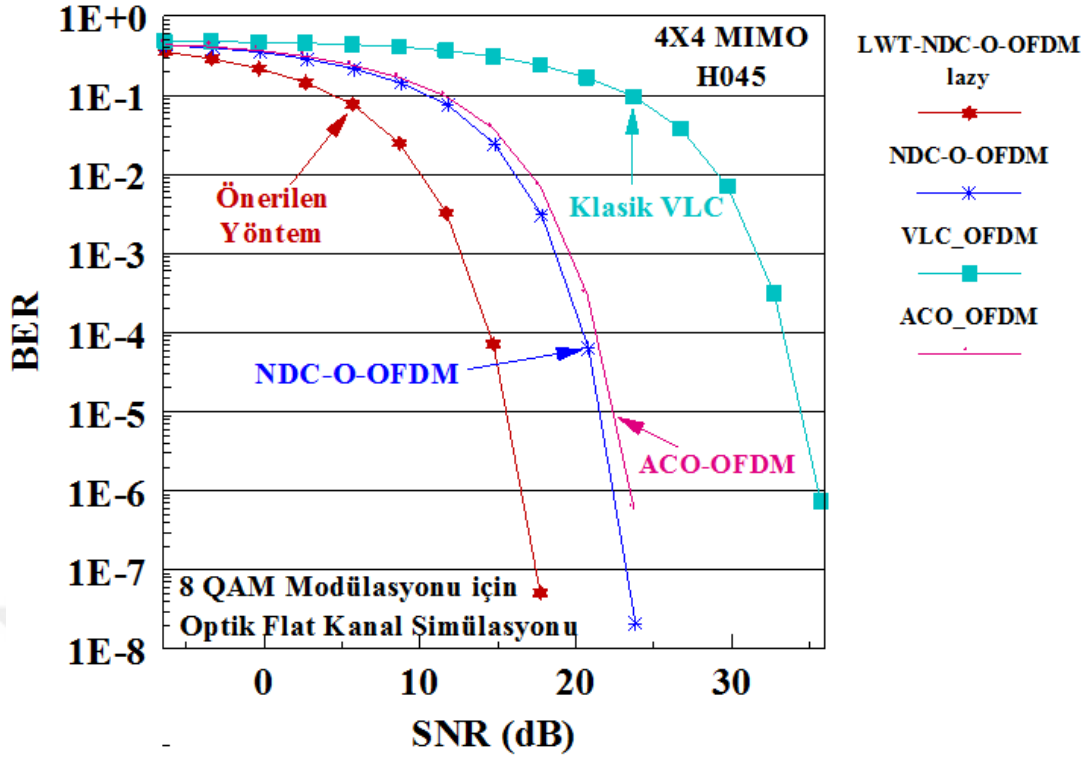
Şekil 5.48. 8-QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.48’de 8-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H040 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6,5 dB, ACO-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 7 dB, Klasik-VLC’den ise 19,5 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



Şekil 5.49. 8-QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması.

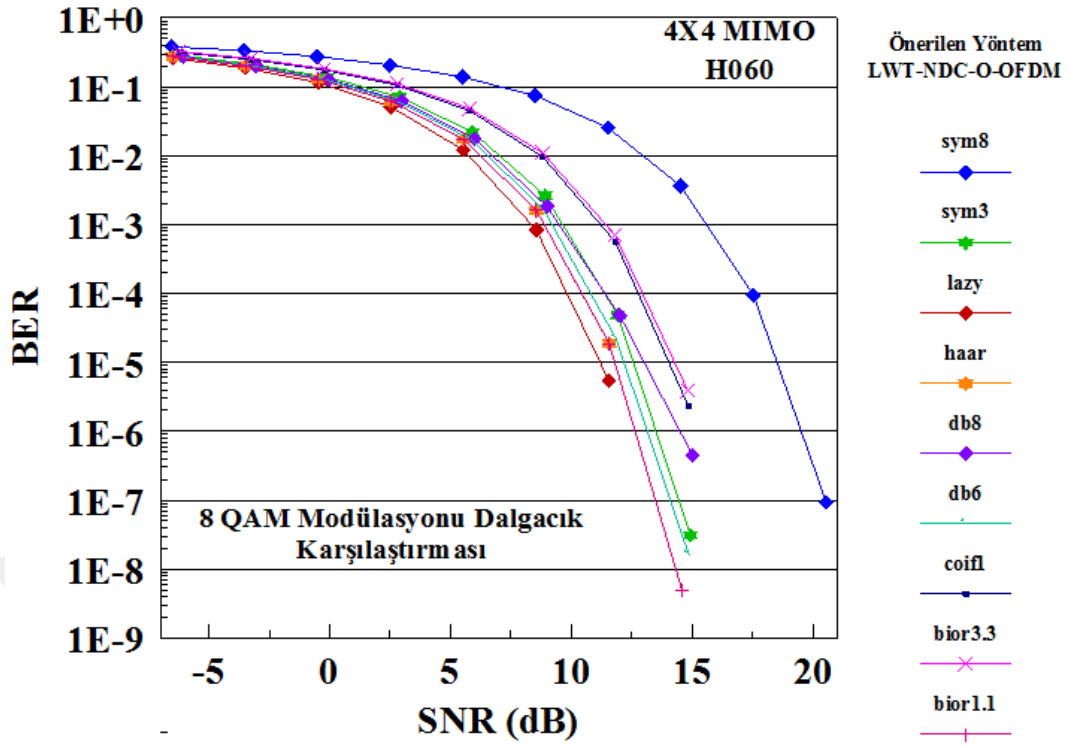
Şekil 5.49’da, 8-QAM modülasyonu H045 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu H045 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 8-QAM modülasyonu H045 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



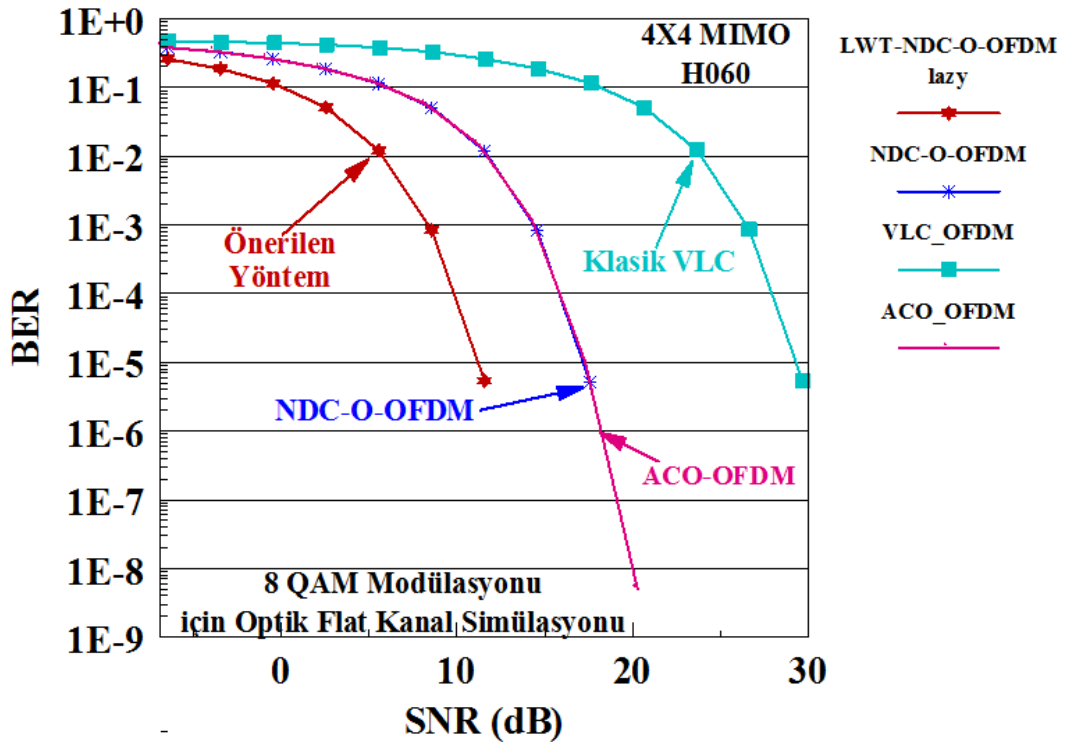
Şekil 5.50. 8-QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.50’de 8-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H045 kanalına ait NDC-O-OFDM, ACO-OFDM, Klasik OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6,8 dB, Klasik-VLC’den ise 18,8 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

Şekil 5.51’de, 8-QAM modülasyonu H060 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu H060 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 8-QAM modülasyonu H060 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

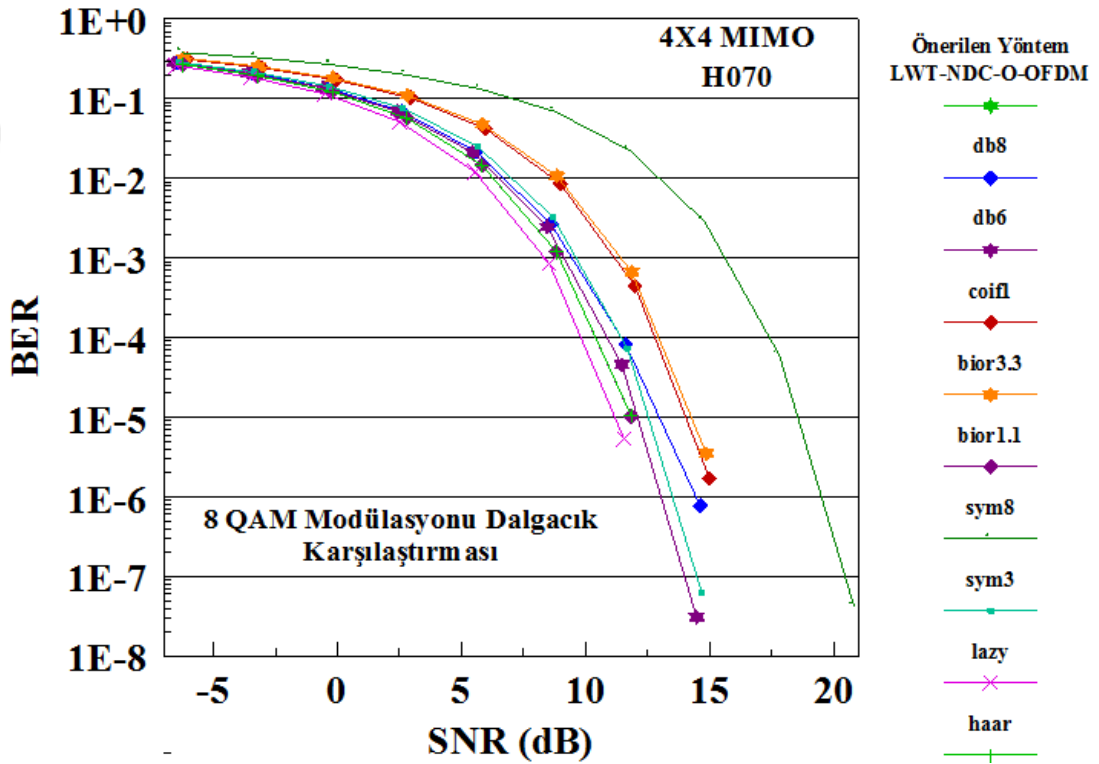


Şekil 5.51. 8-QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması.



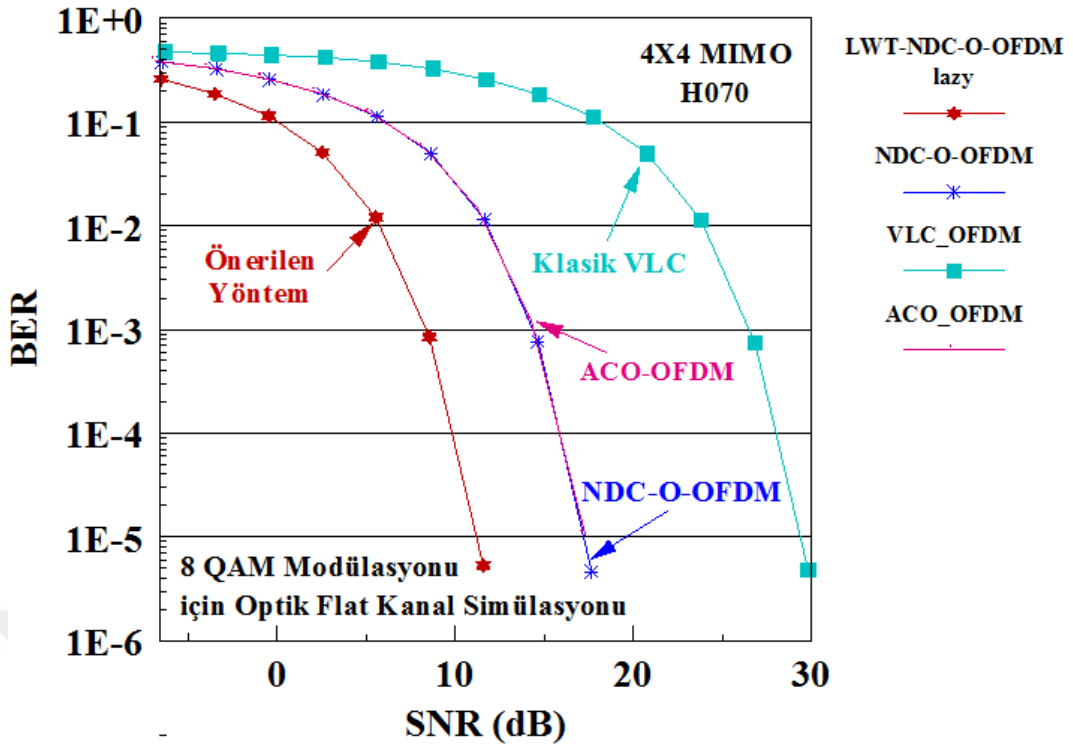
Şekil 5.52. 8-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, ACO-OFDM ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.52’de 8-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H060 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. ACO-OFDM ile NDC-O-OFDM hemen hemen aynı performansı sergilemektedir. Önerilen Yöntem ile $1E-4$ BER değerinde NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC’den ise 18,3 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



Şekil 5.53. 8-QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması.

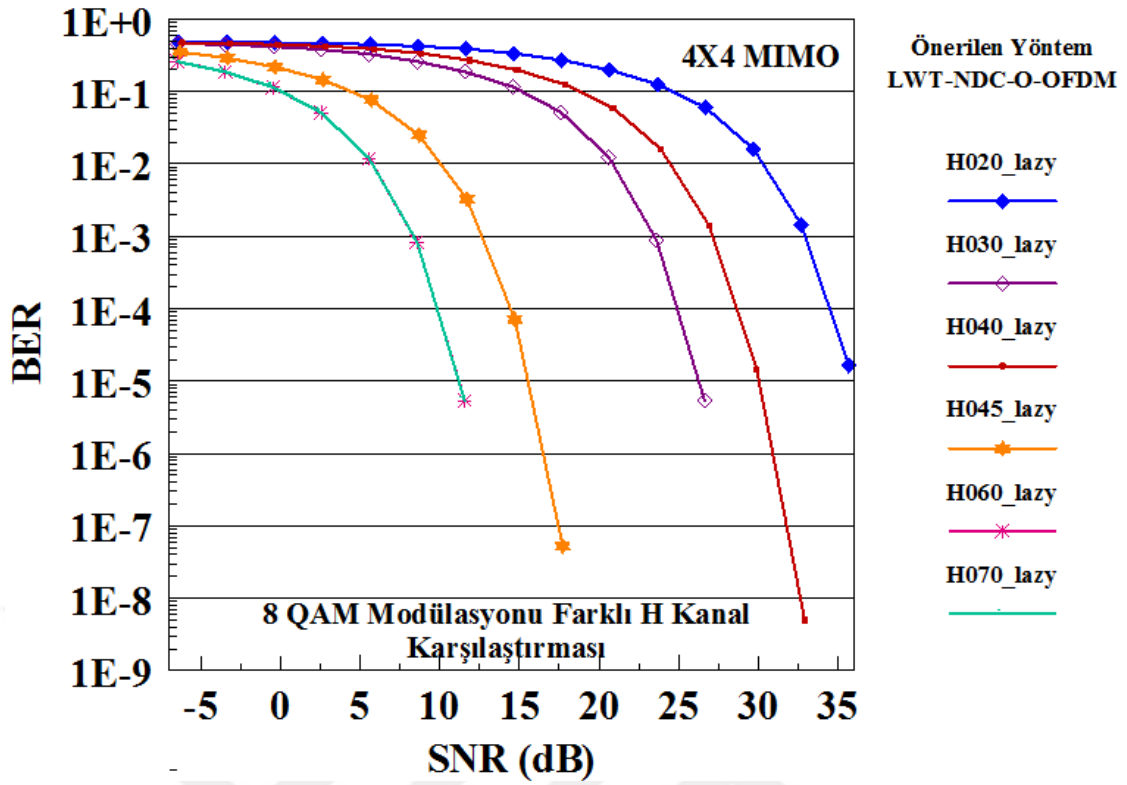
Şekil 5.53’te, 8-QAM modülasyonu H070 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu H070 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 8-QAM modülasyonu H070 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.54. 8-QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.54’de 8-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H070 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. ACO-OFDM ile NDC-O-OFDM hemen hemen aynı performansı sergilemektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 6,3 dB, Klasik-VLC’den ise 18,5 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

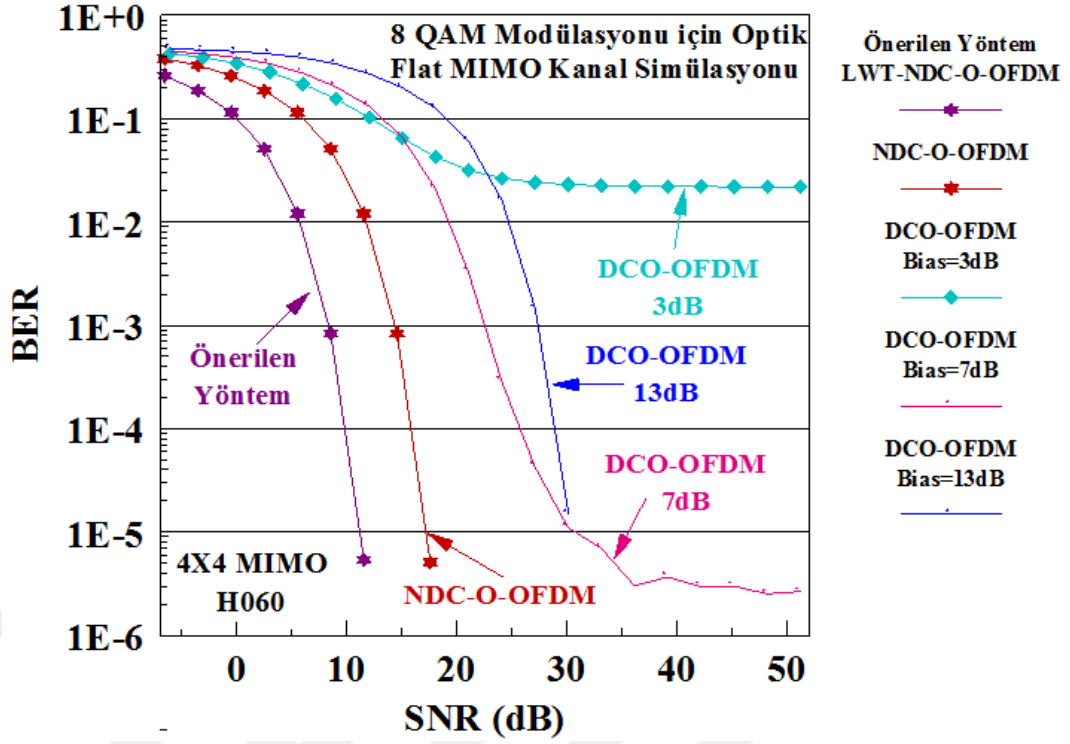
Şekil 5.55’te 8-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması verilmektedir. 8-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H kanallara ait karşılaştırmalar incelendiğinde; en iyi performansın H060 ve H070 kanalları olduğu görülmektedir. H020 kanalı ise en kötü performansı sergilemiştir. Diğer kanallar bu 3 kanal arasında değişik performanslara sahiptir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak şekil 5.56’daki karşılaştırmalar H060 kanalı kullanılarak elde edilmiştir.



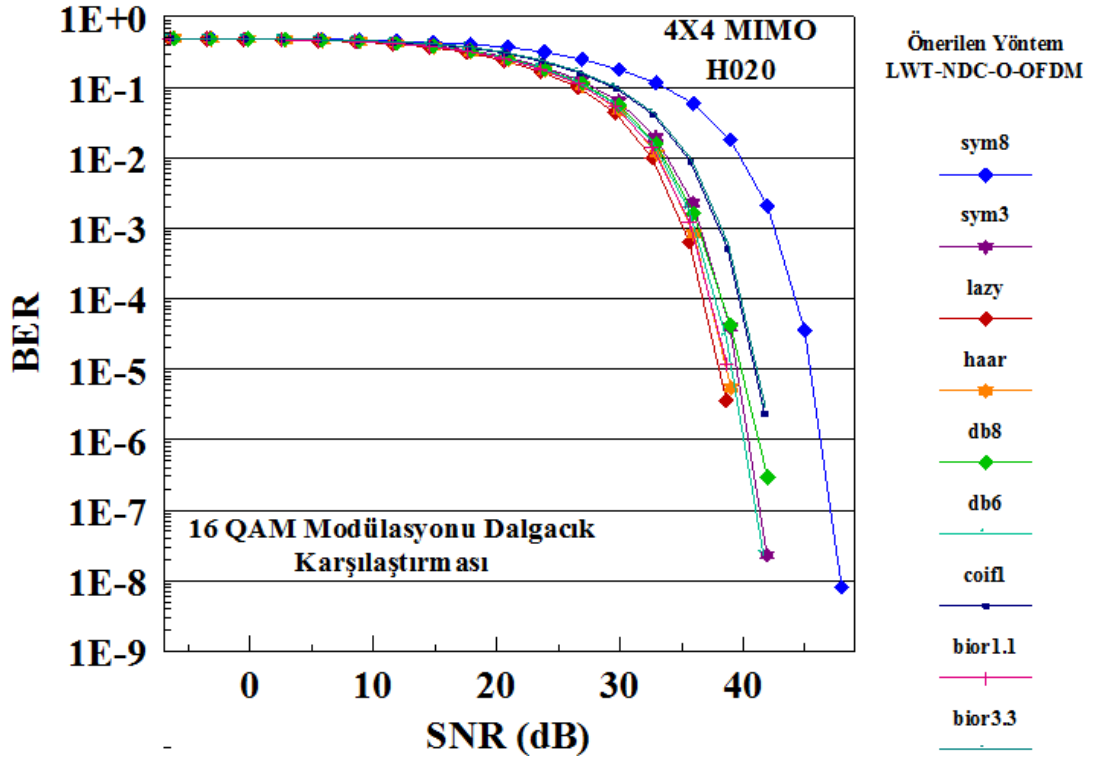
Şekil 5.55. 8-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması.

Şekil 5.56’da 8-QAM modülasyonu H060 kanalında önerilen yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde en iyi performansın önerilen yöneme ait olduğu anlaşılmaktadır. En kötü performansı DC bias değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer dalgacık şekilleri ise bu dalgacıklar arasında değerlere sahiptir.

DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM’in 1E-1 ile 1E-2 BER değerleri arasında, DC bias değeri 7dB olan DCO-OFDM’in 1E-5 BER değerinden sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB, DC bias değeri 7 dB olan DCO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 16 dB, DC bias değeri 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 18 dB SNR kazancı elde edilmektedir.

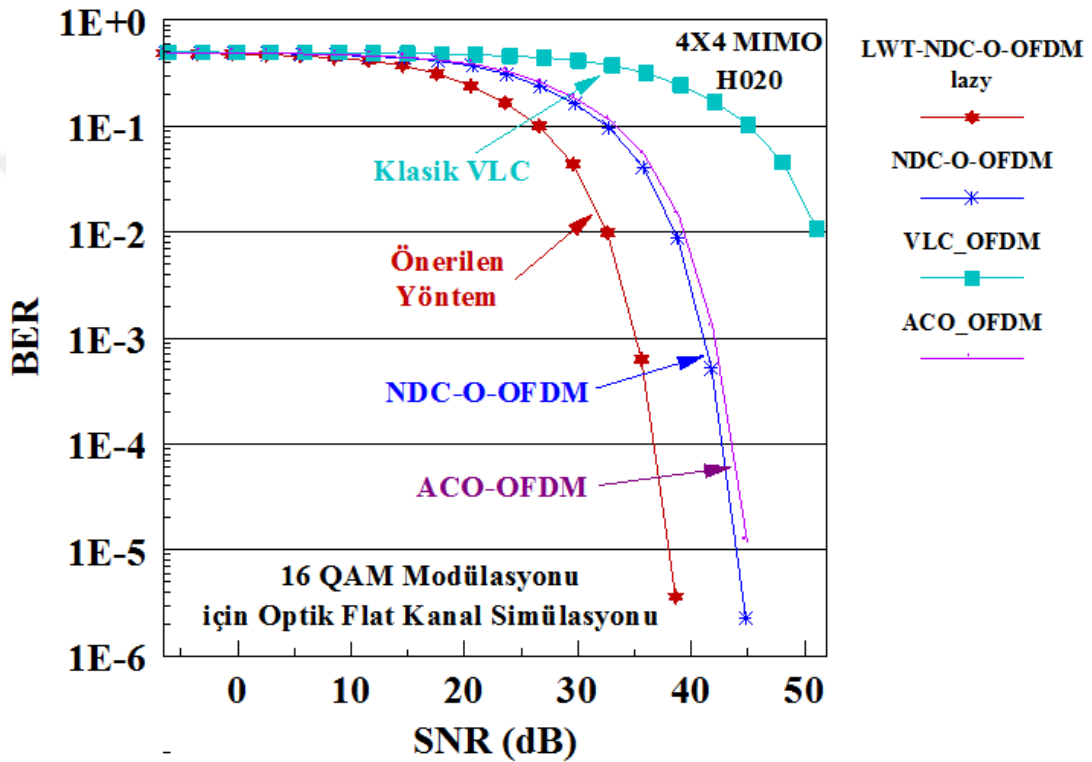


Şekil 5.56. 8-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması.



Şekil 5.57. 16-QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması.

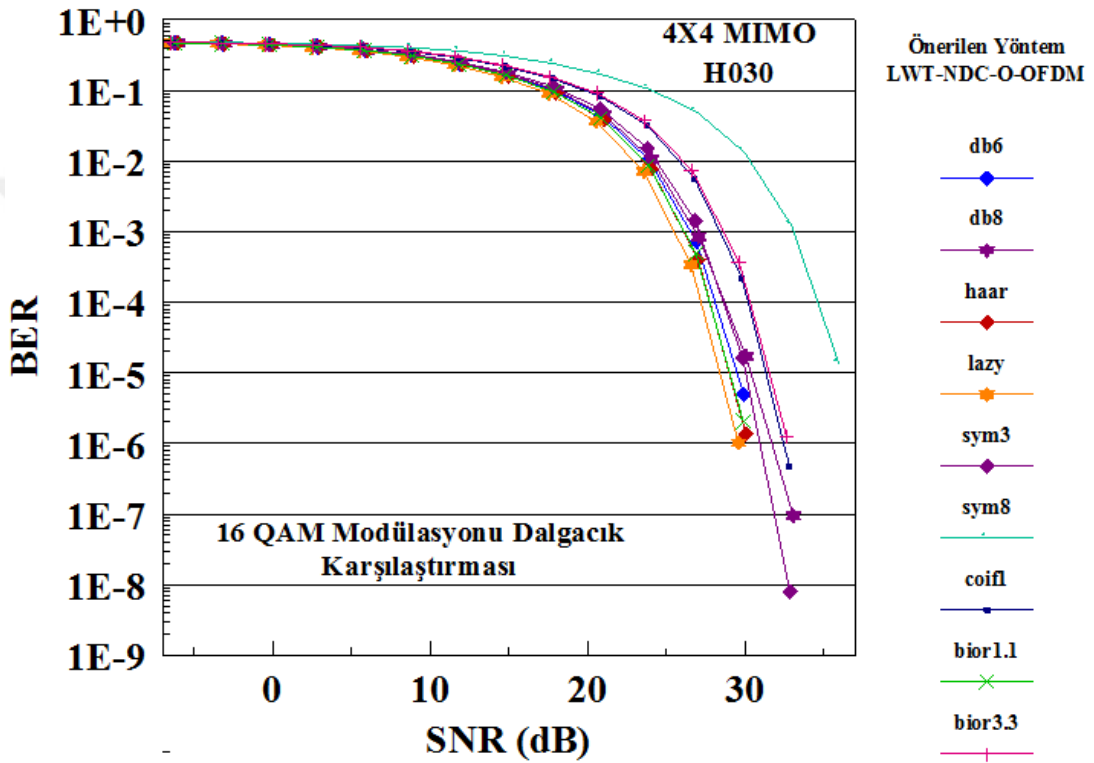
Şekil 5.57’de, 16-QAM modülasyonu H020 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu H020 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 16-QAM modülasyonu H020 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.58. 16-QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

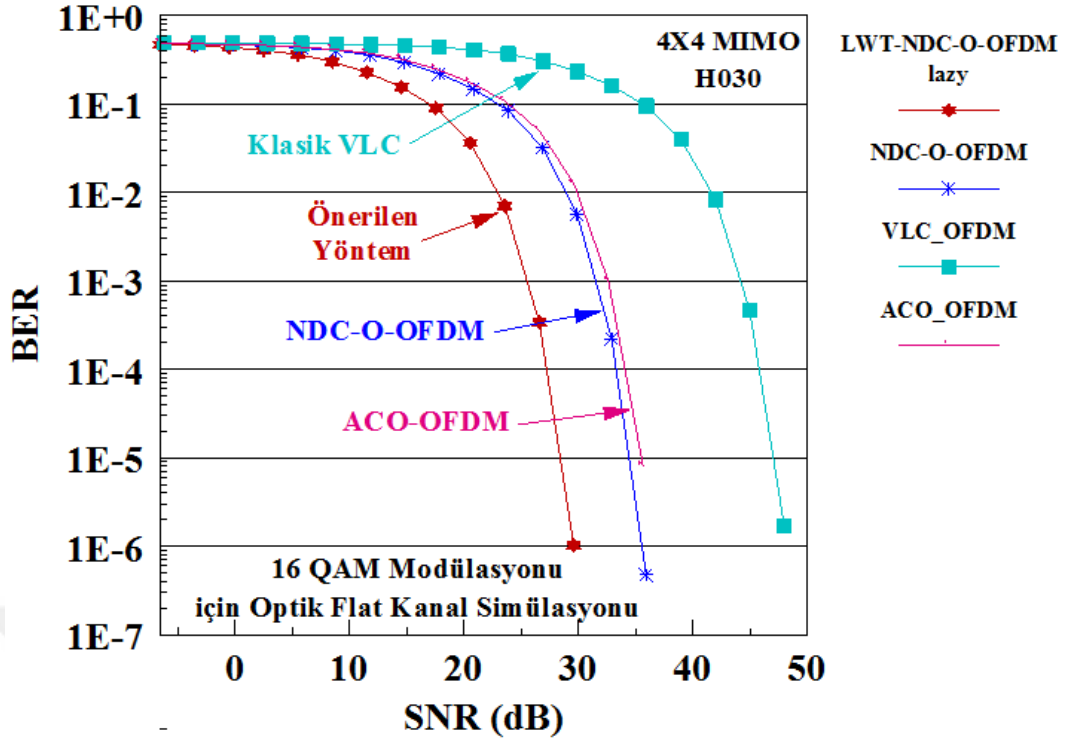
Şekil 5.58’de 16-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H020 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-2 BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6 dB, ve ACO-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 6,8 dB, Klasik-VLC’den ise 19 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

Şekil 5.59’da, 16-QAM modülasyonu H030 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu H030 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 16-QAM modülasyonu H030 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

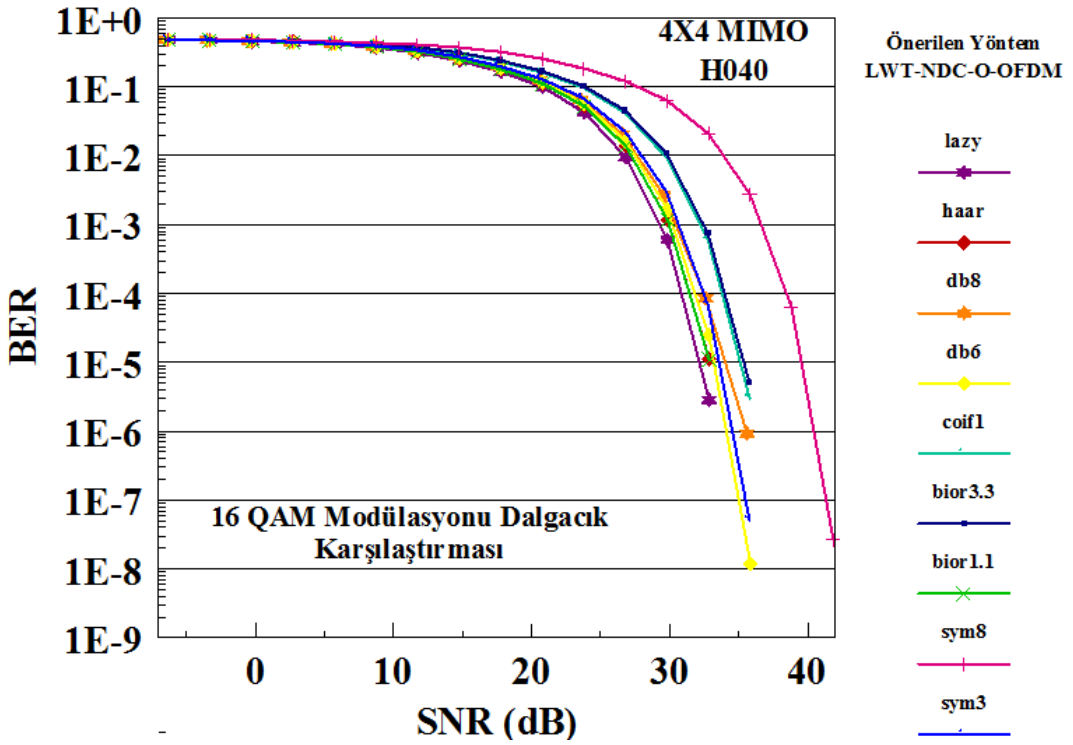


Şekil 5.59. 16-QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.60’da 16-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H030 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6 dB, ve ACO-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 7 dB, Klasik-VLC’den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

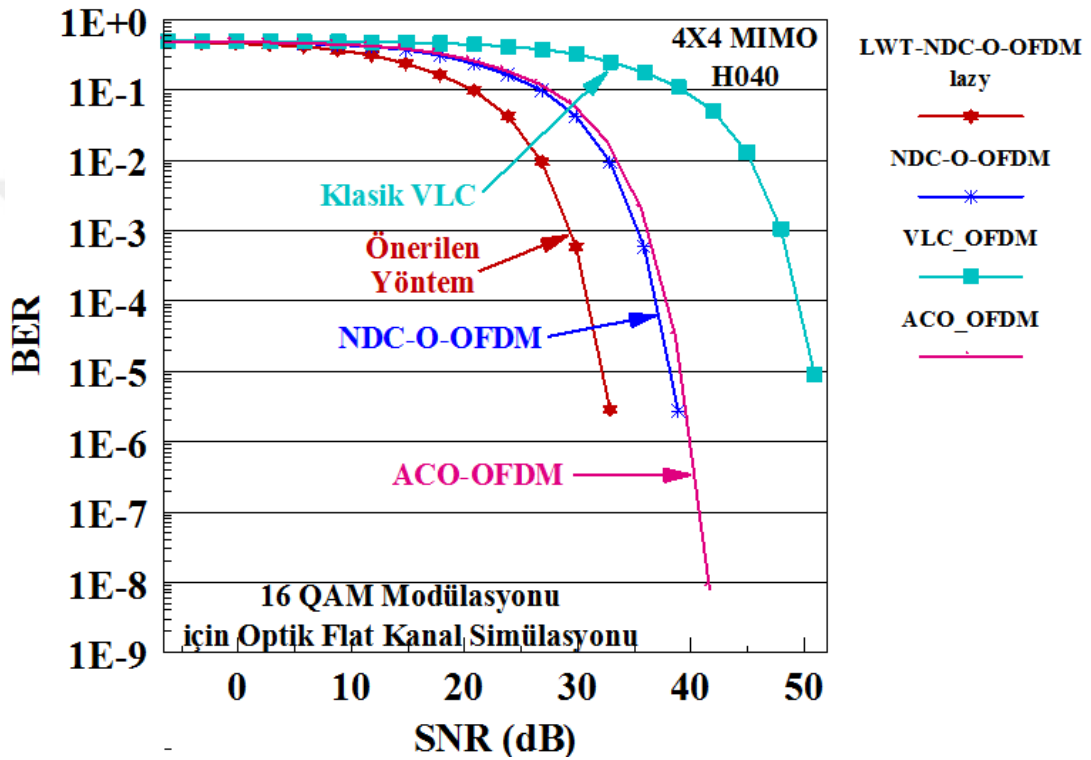


Şekil 5.60. 16-QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



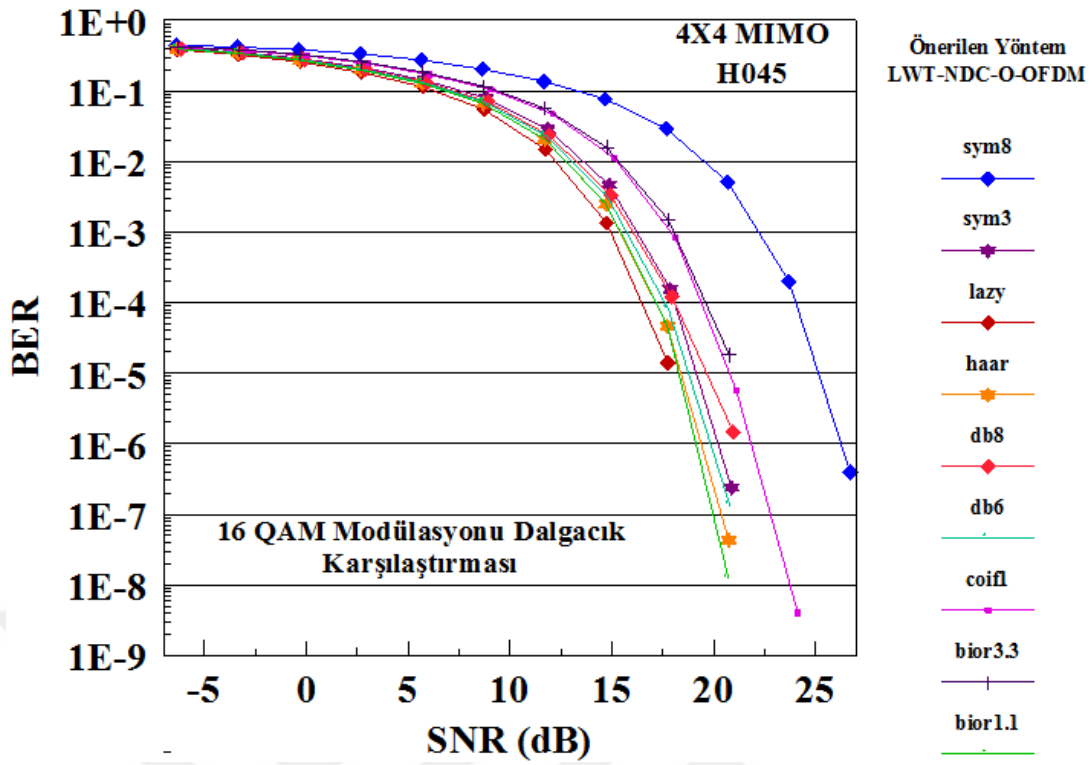
Şekil 5.61. 16-QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.61’de, 16-QAM modülasyonu H040 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu H040 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 16-QAM modülasyonu H040 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.62. 16-QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

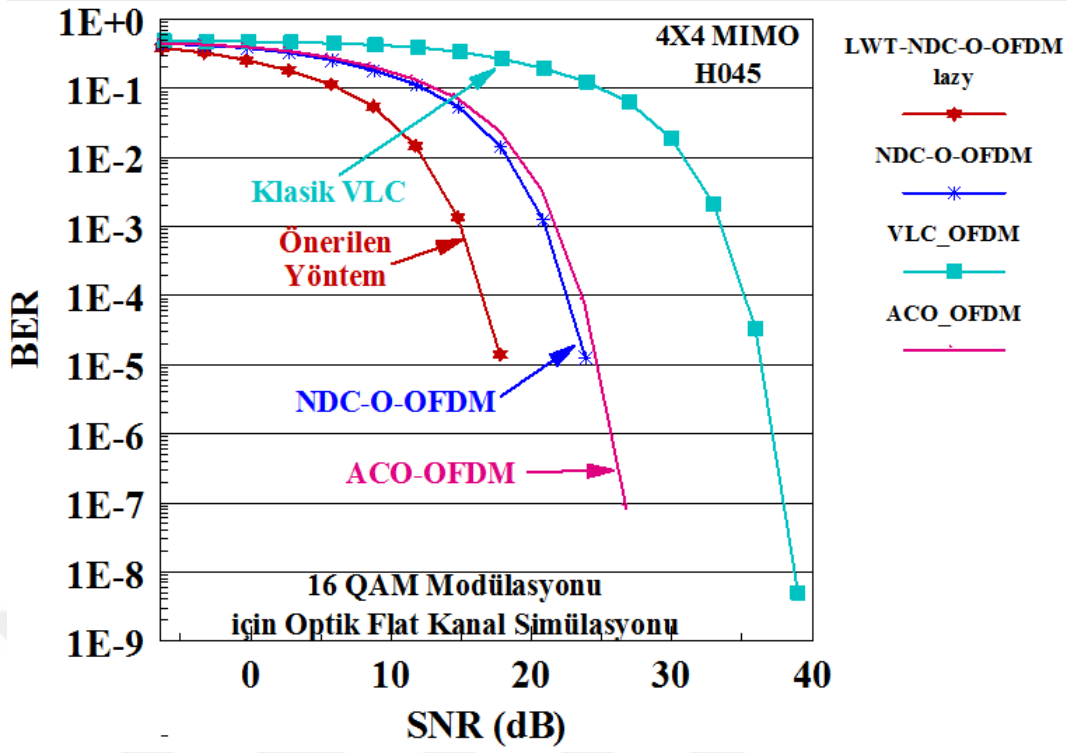
Şekil 5.62’de 16-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H040 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6 dB, ve ACO-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 7 dB, Klasik-VLC’den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



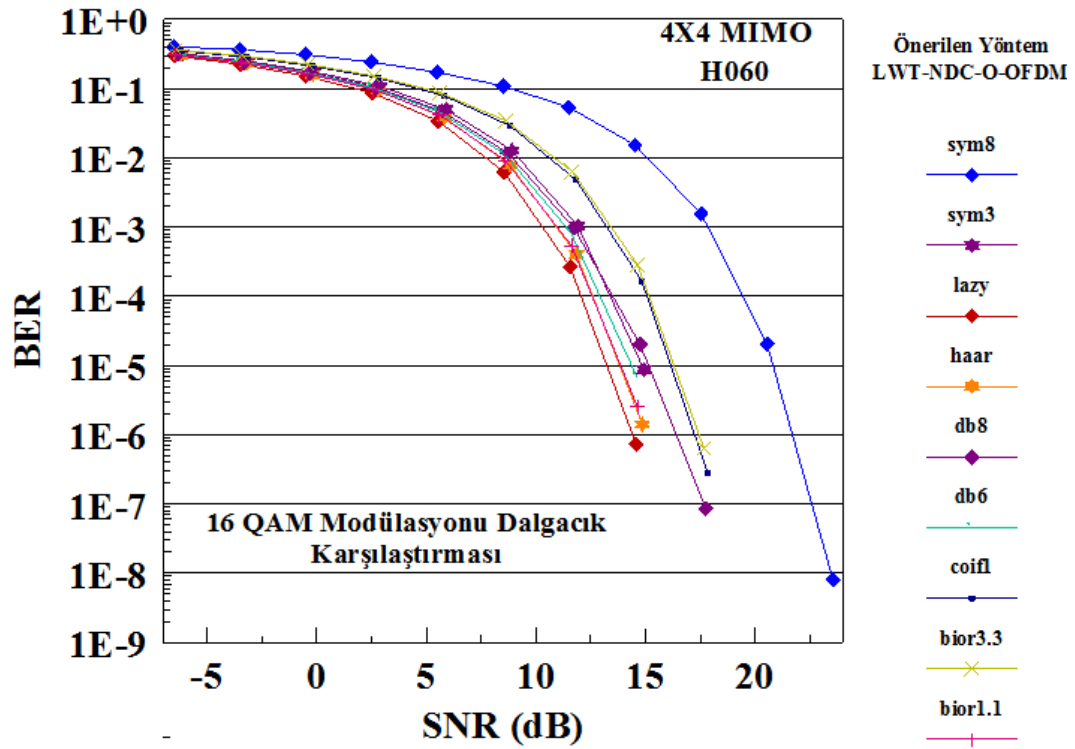
Şekil 5.63. 16-QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.63’de, 16 -AM modülasyonu H045 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu H045 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 16-QAM modülasyonu H045 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.64’de 16-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H045 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yöntemi yaklaşık olarak 6 dB, ve ACO-OFDM yöntemleri yaklaşık olarak 7 dB, Klasik-VLC’den ise 19 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

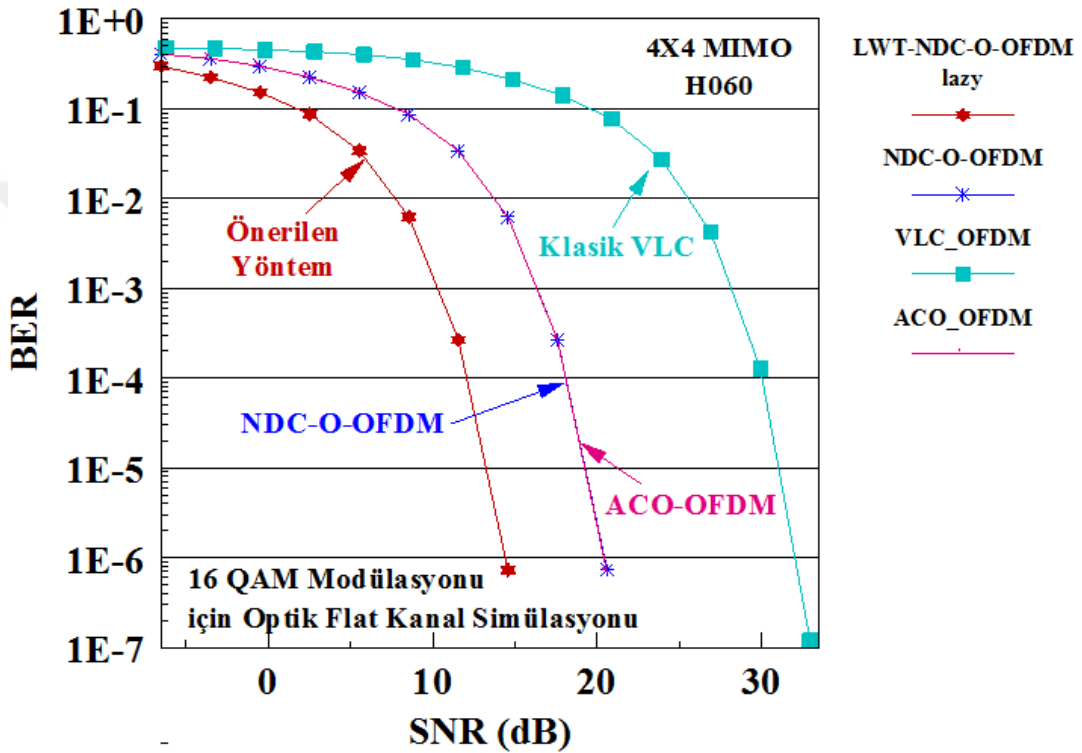


Şekil 5.64. 16-QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



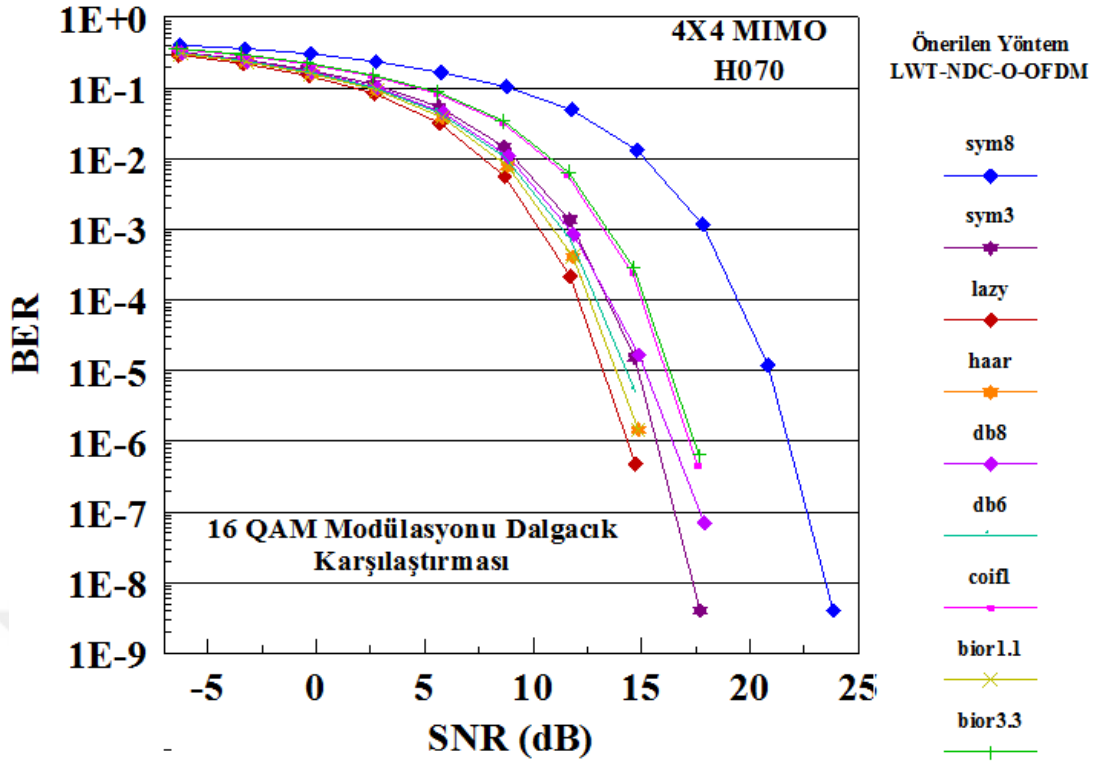
Şekil 5.65. 16-QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.65'te, 16-QAM modülasyonu H060 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu H060 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 16-QAM modülasyonu H060 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.66. 16-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

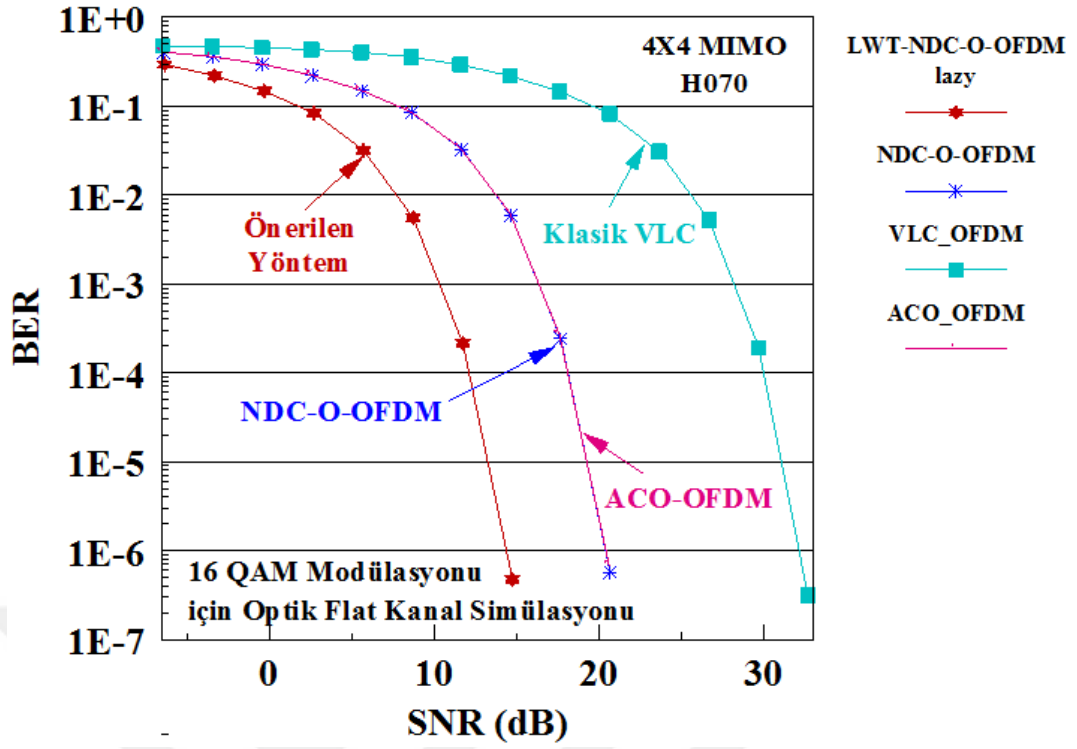
Şekil 5.66'da 16-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H060 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC'nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM ise aynı performansı sergilemiştir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerinden yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC'den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



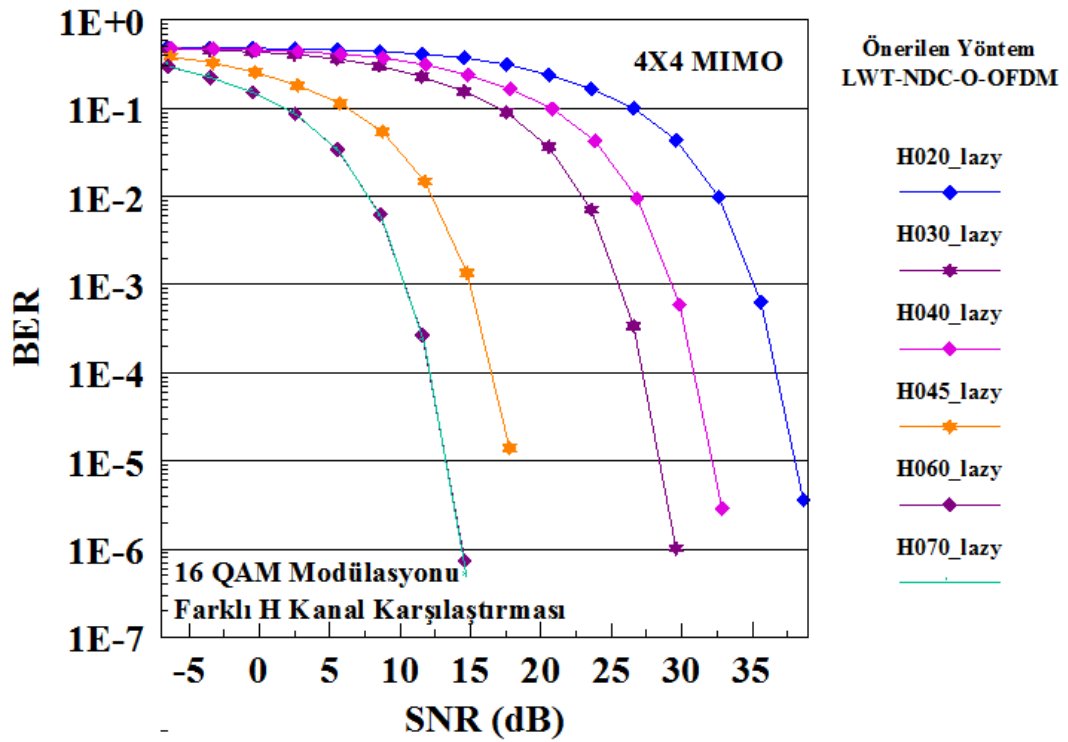
Şekil 5.67. 16-QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.67’de, 16-QAM modülasyonu H070 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu H070 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 16-QAM modülasyonu H070 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.68’de 16-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H070 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM ise aynı performansı sergilemiştir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerinden yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC’den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

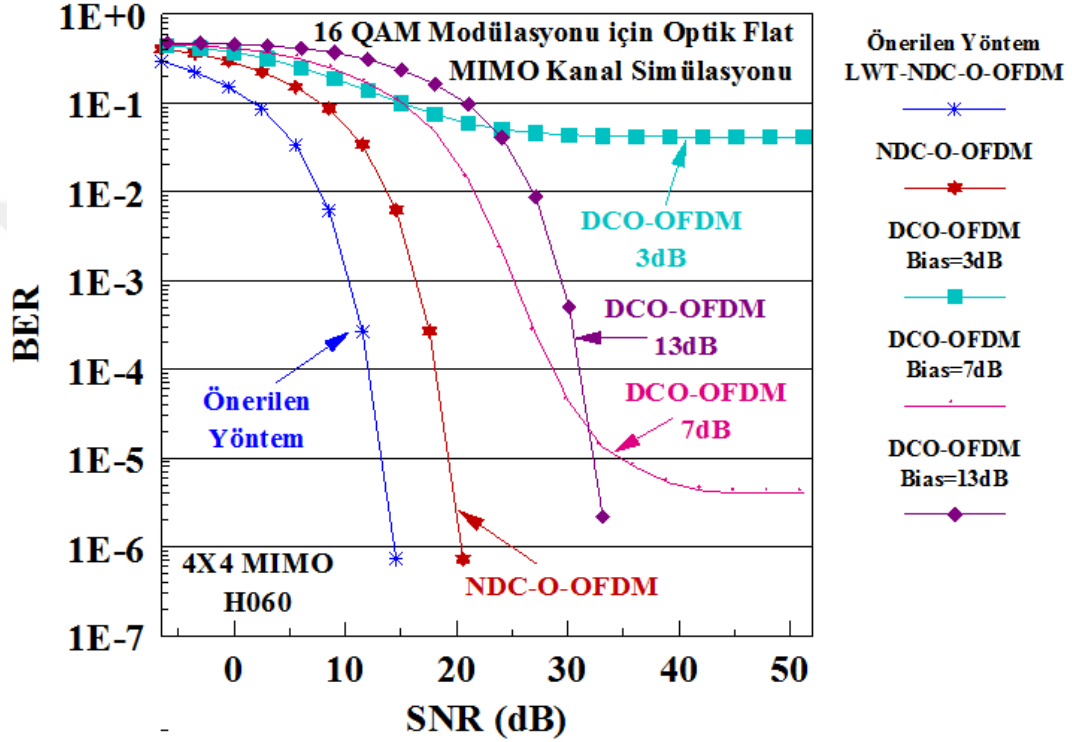


Şekil 5.68. 16-QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



Şekil 5.69. 16-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması.

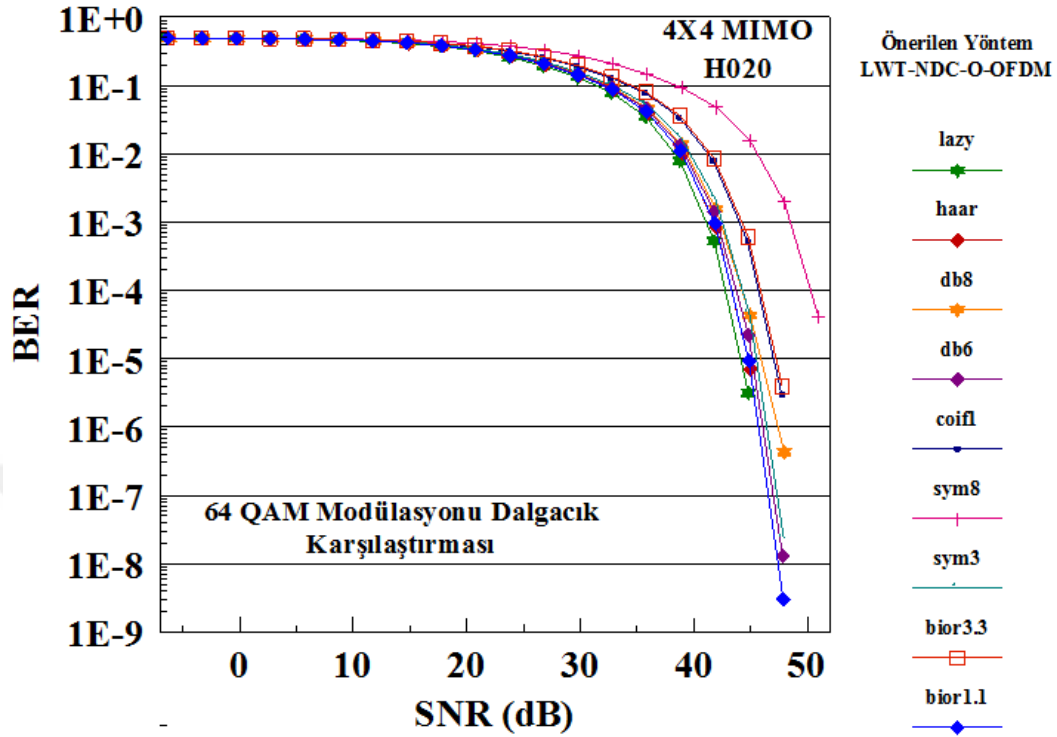
Şekil 5.69’da 16-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması verilmektedir. 16-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H kanallara ait karşılaştırmalar incelendiğinde; en iyi performansın H060 ve H070 kanalları olduğu görülmektedir. H020 kanalı ise en kötü performansı sergilemiştir. Diğer kanallar bu 3 kanal arasında değişik performanslara sahiptir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak şekil 5.70’deki karşılaştırmalar H060 kanalı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.70. 16-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM’in karşılaştırması.

Şekil 5.70’de 16-QAM modülasyonu H060 kanalında önerilen yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde en iyi performansın önerilen yöneme ait olduğu anlaşılmaktadır. En kötü performansı DC bias değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer dalgacık şekilleri ise bu dalgacıklar arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM’in 1E-1 ile 1E-2 BER değerleri arasında, DC bias değeri 7dB olan DCO-OFDM’in 1E-5 BER değerinden sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB, DC bias değeri 7 dB olan DCO-OFDM

yönteminden yaklaşık olarak 16,5 dB, DC bias değeri 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 19 dB SNR kazancı elde edilmektedir.

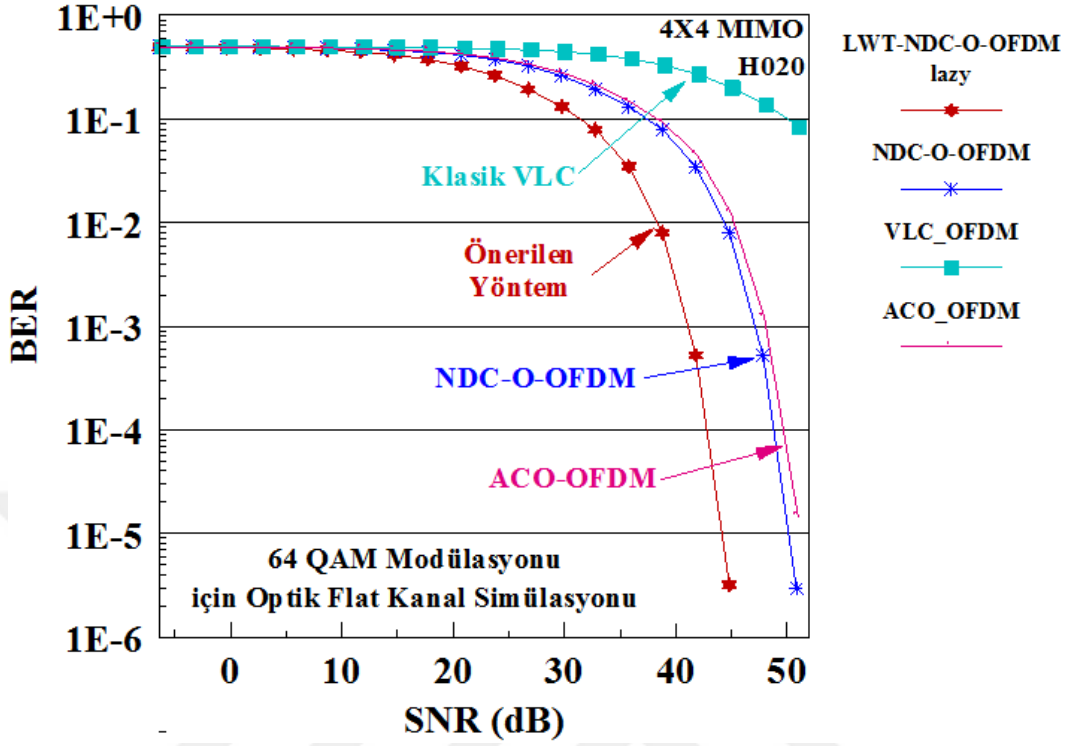


Şekil 5.71. 64-QAM modülasyonu H020 kanalı dalgacık karşılaştırması.

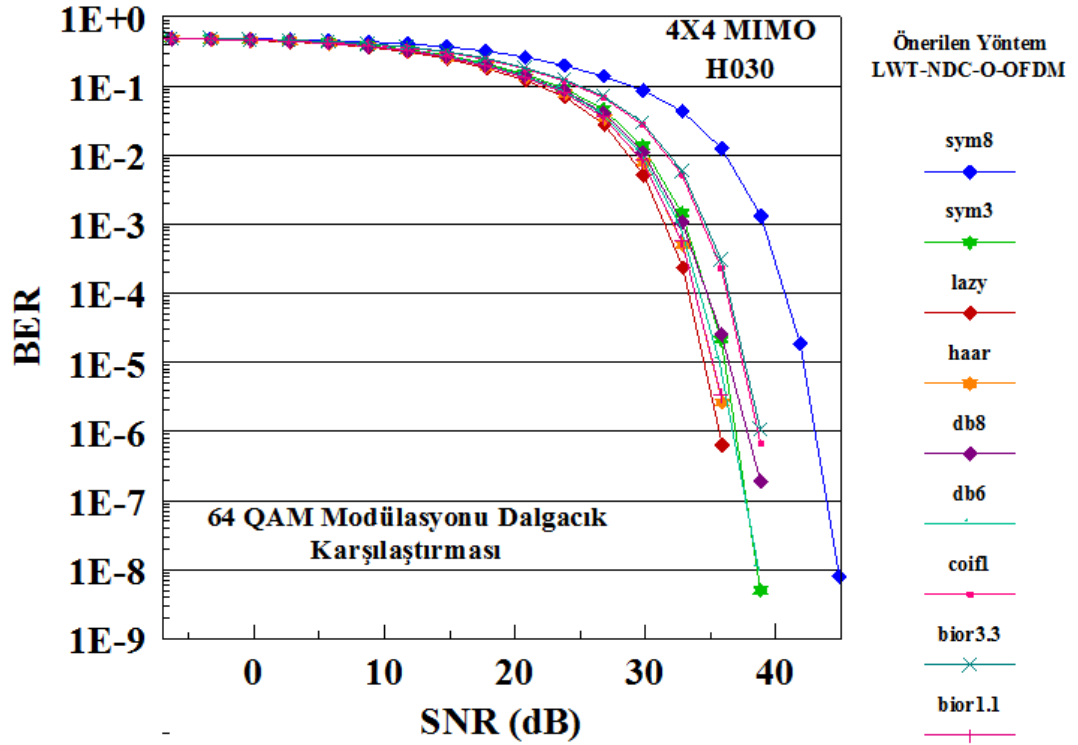
Şekil 5.71’de, 64-QAM modülasyonu H020 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu H020 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 64-QAM modülasyonu H020 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.72’de 64-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H020 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 7 dB SNR kazancı elde edilmiştir. Ayrıca

Önerilen Yöntem ile $1E-1$ BER değerinde ise Klasik-VLC'den 19 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

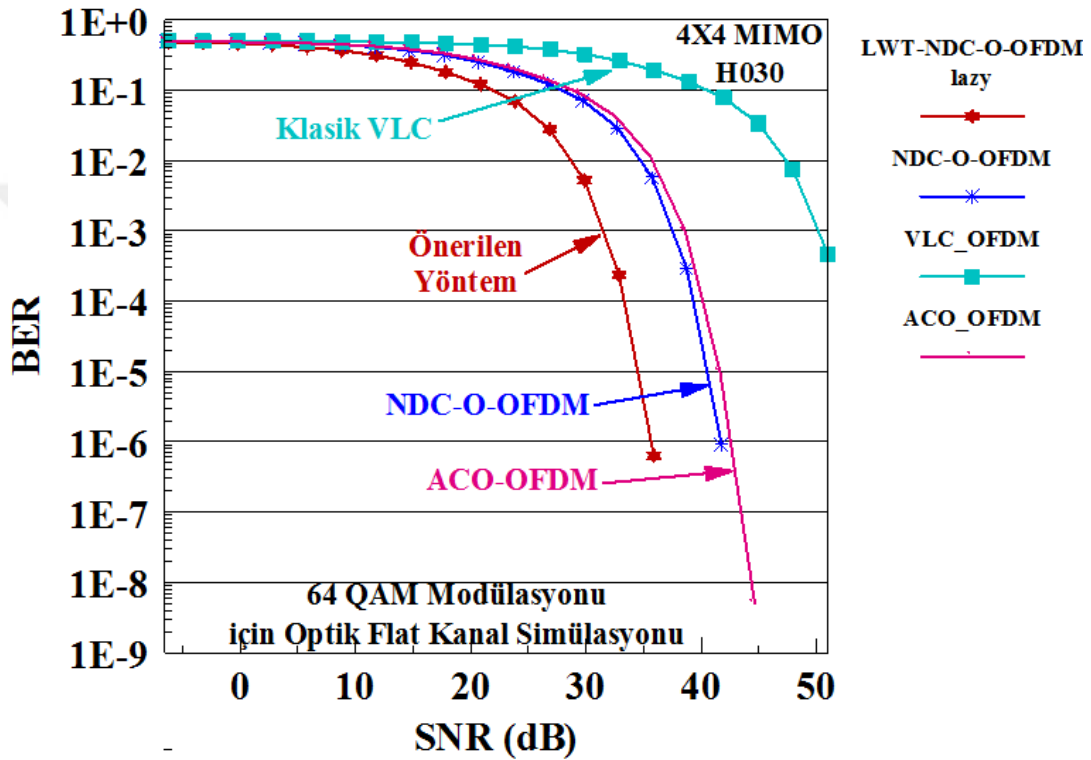


Şekil 5.72. 64-QAM modülasyonu H020 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



Şekil 5.73. 64-QAM modülasyonu H030 kanalı dalgacık karşılaştırması.

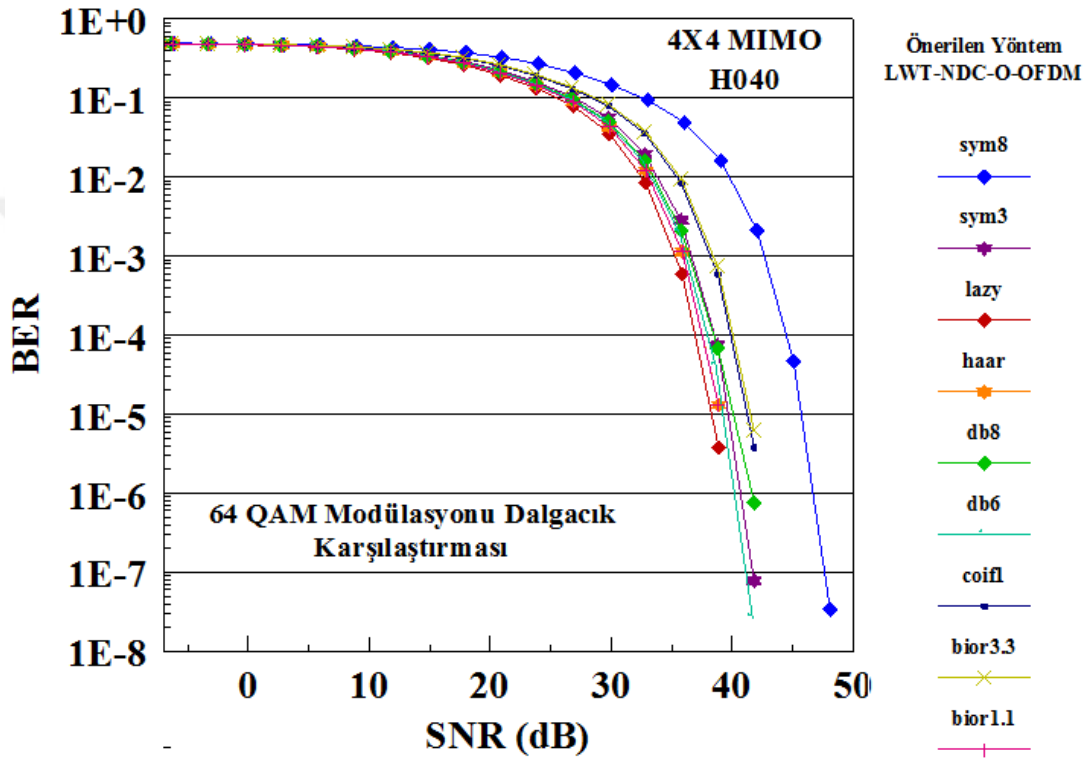
Şekil 5.73'te, 64-QAM modülasyonu H030 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu H030 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 64-QAM modülasyonu H030 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.74. 64-QAM modülasyonu H030 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

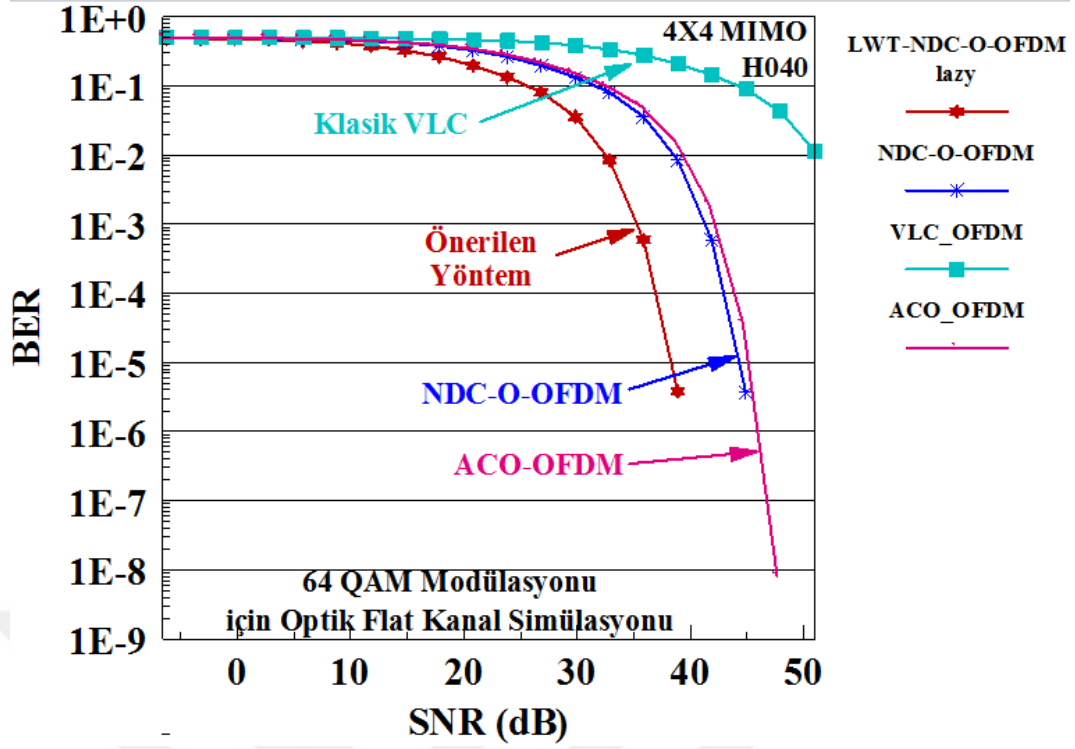
Şekil 5.74'te 64-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H030 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC'nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 7 dB SNR kazancı elde edilmiştir. Ayrıca Önerilen Yöntem ile 1E-3 BER değerinde ise Klasik-VLC'den 19 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

Şekil 5.75'te, 64-QAM modülasyonu H040 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu H040 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 64-QAM modülasyonu H040 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

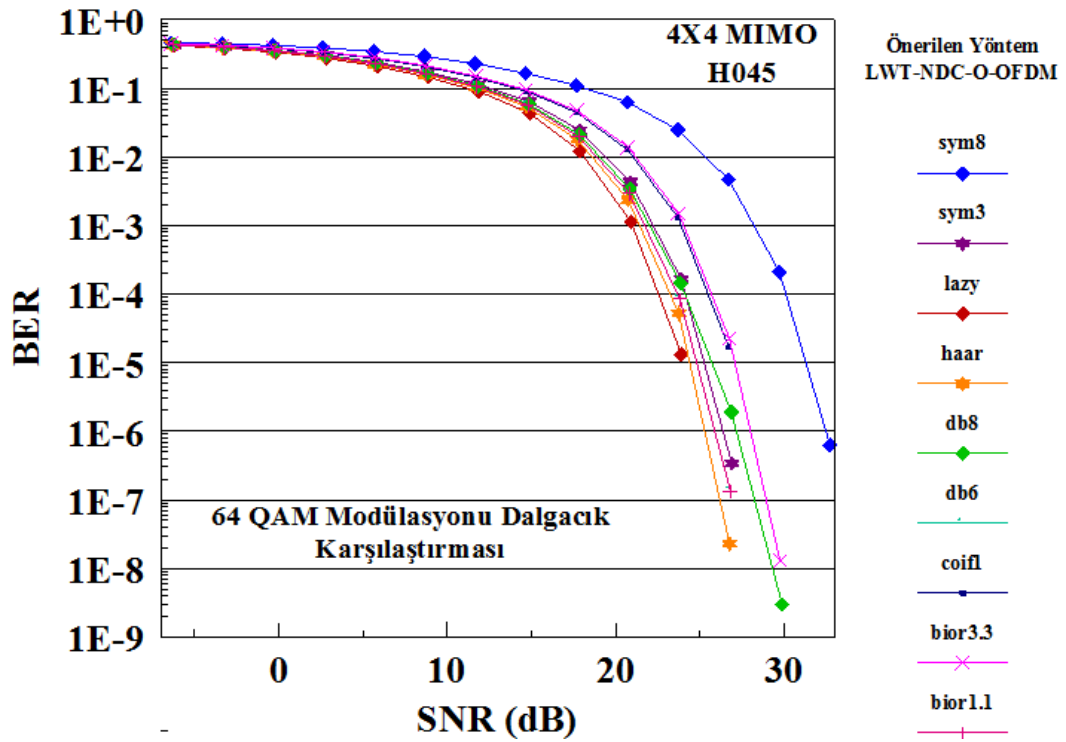


Şekil 5.75. 64-QAM modülasyonu H040 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.76'da 64-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H040 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC'nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 7 dB SNR kazancı elde edilmiştir. Ayrıca Önerilen Yöntem ile 1E-2 BER değerinde ise Klasik-VLC'den 16 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

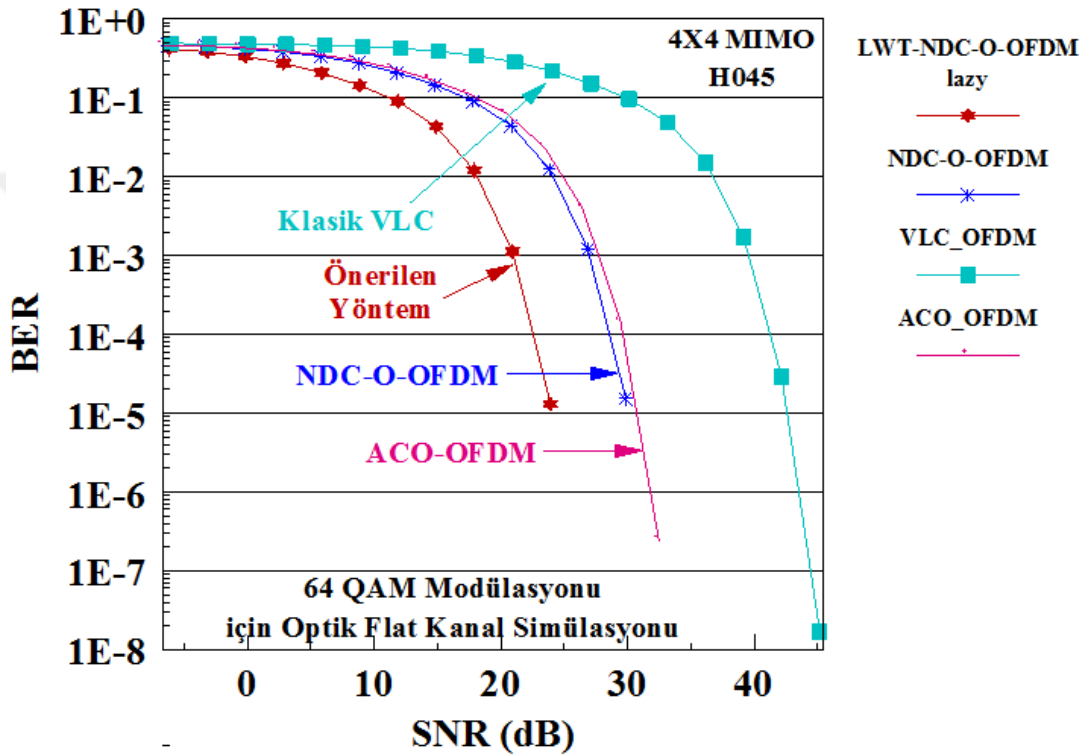


Şekil 5.76. 64-QAM modülasyonu H040 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



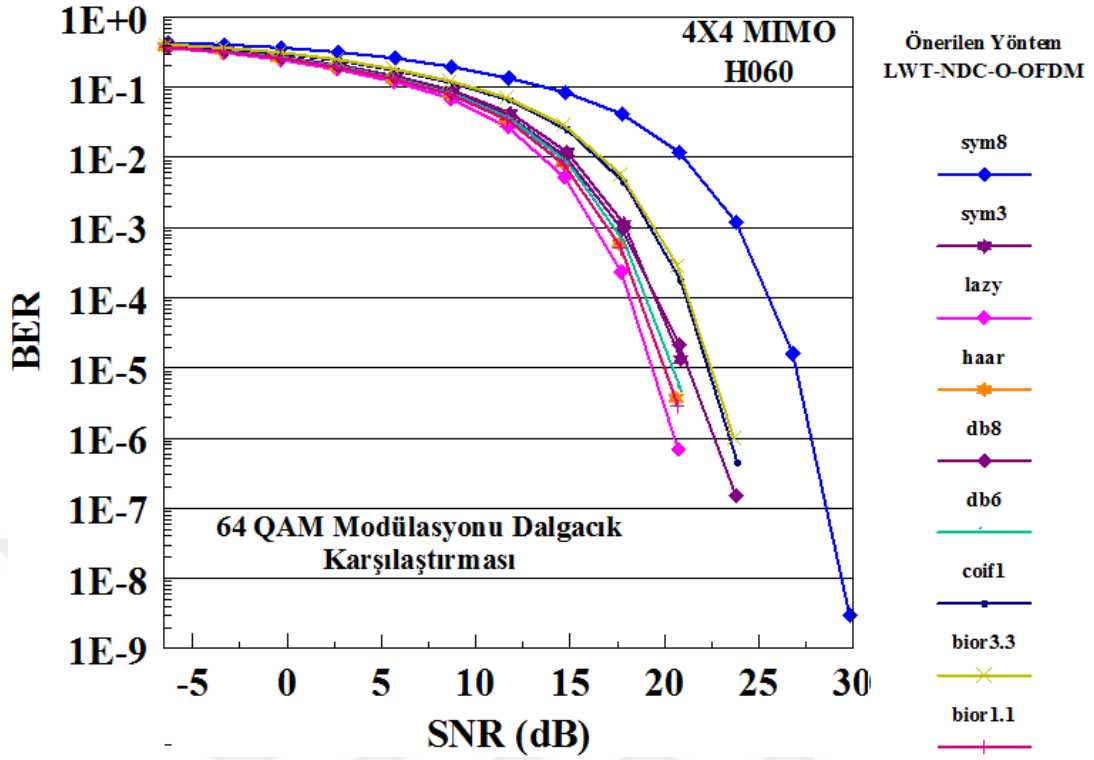
Şekil 5.77. 64-QAM modülasyonu H045 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.77’de, 64-QAM modülasyonu H045 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu H045 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 64-QAM modülasyonu H045 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.78. 64-QAM modülasyonu H045 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

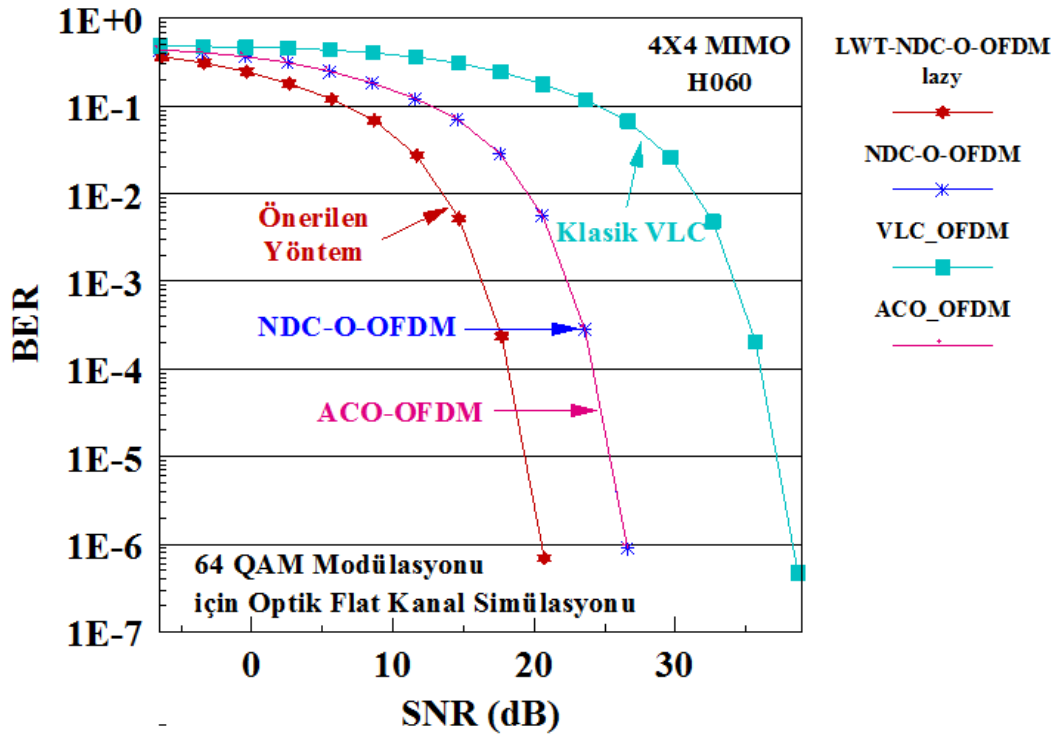
Şekil 5.78’de 64-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H045 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 6 dB, ACO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 7,2 dB, Klasik-VLC’den ise yaklaşık olarak 19 dB SNR kazancı elde edilmiştir.



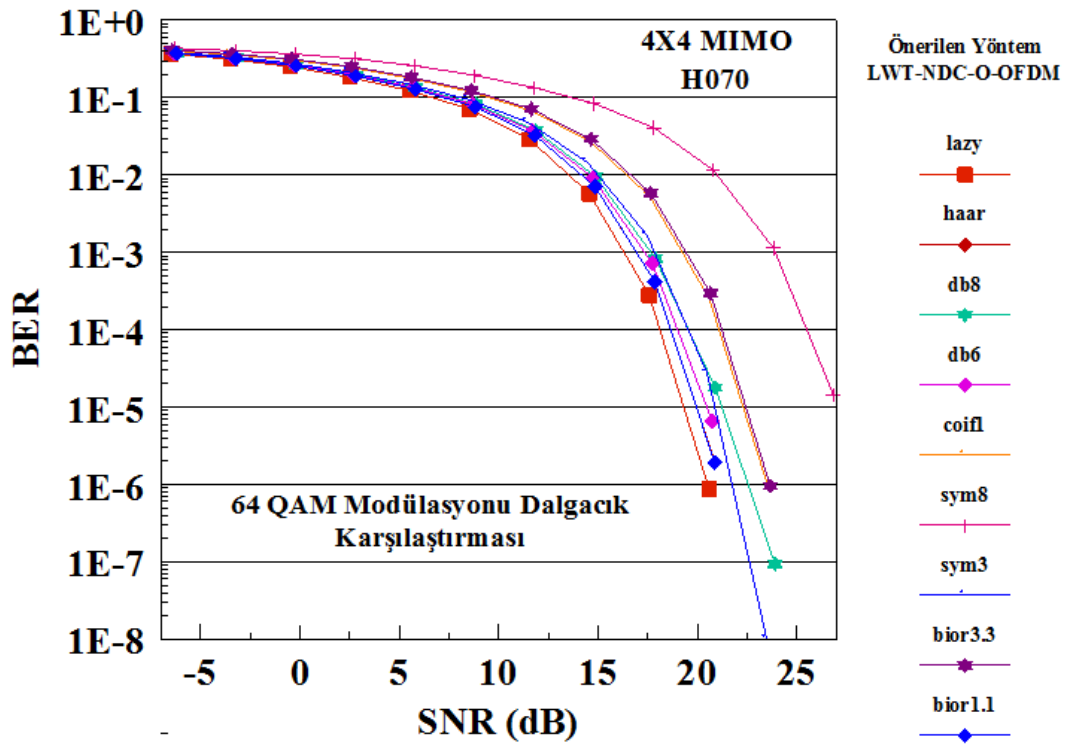
Şekil 5.79. 64-QAM modülasyonu H060 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.79’da, 64-QAM modülasyonu H060 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu H060 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 64-QAM modülasyonu H060 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.

Şekil 5.80’de 64 -AM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H060 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM ise aynı performansı sergilemiştir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerinden yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC’den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

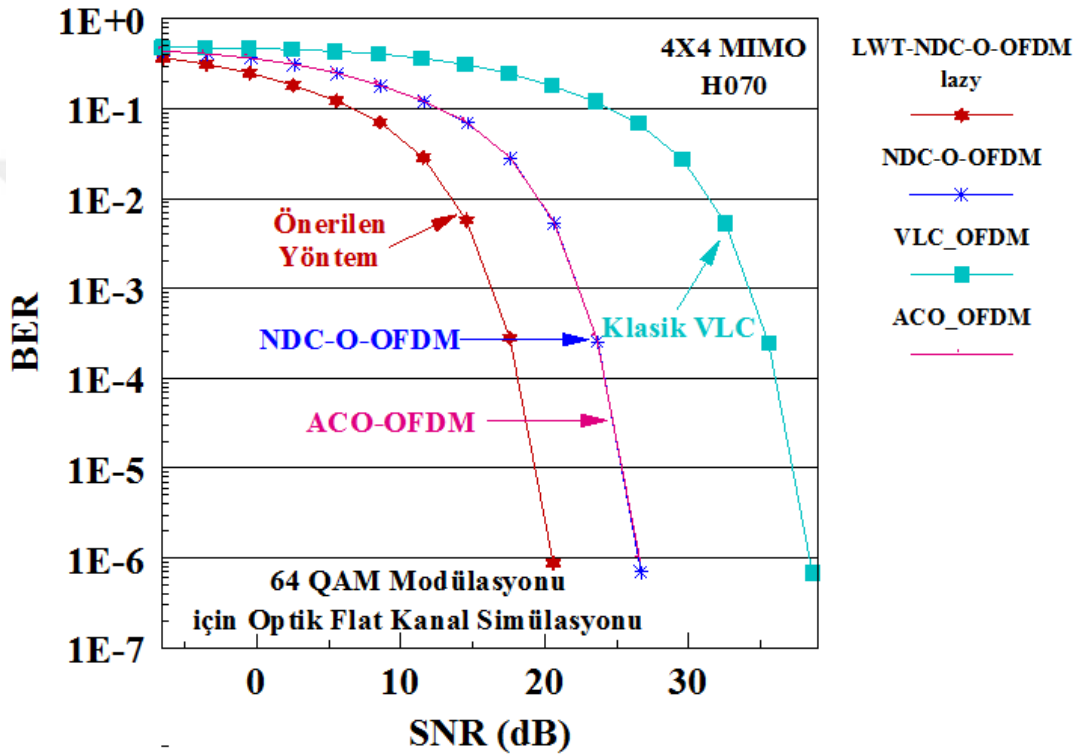


Şekil 5.80. 64-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.



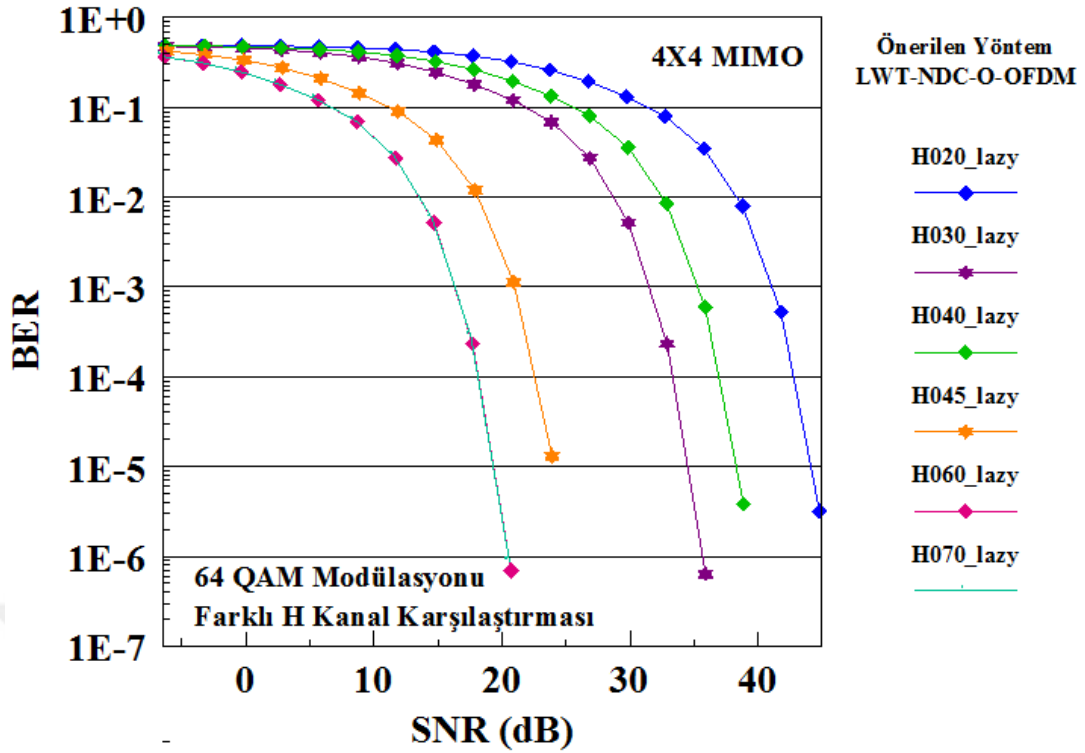
Şekil 5.81. 64-QAM modülasyonu H070 kanalı dalgacık karşılaştırması.

Şekil 5.81’de, 64-QAM modülasyonu H070 kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu H070 kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. Bundan sonraki 64-QAM modülasyonu H070 kanalı karşılaştırmalarımızda kullanılan önerilen yöntemimize ait veriler, lazy dalgacığının kullanılarak yapıldığı veriler olacaktır.



Şekil 5.82. 64-QAM modülasyonu H070 kanalında Önerilen Yöntemin Klasik VLC, NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM ile karşılaştırması.

Şekil 5.82’de 64-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H070 kanalına ait NDC-O-OFDM, Klasik OFDM, ACO-OFDM ve Önerilen Yöntemin karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde Önerilen Yöntemin en iyi performansı, Klasik VLC’nin en kötü performansı sergilediği görülmektedir. NDC-O-OFDM ile ACO-OFDM ise aynı performansı sergilemiştir. Önerilen Yöntem ile 1E-4 BER değerinde NDC-O-OFDM ve ACO-OFDM yöntemlerinden yaklaşık olarak 6 dB, Klasik-VLC’den ise 18 dB SNR kazancı elde edilmiştir.

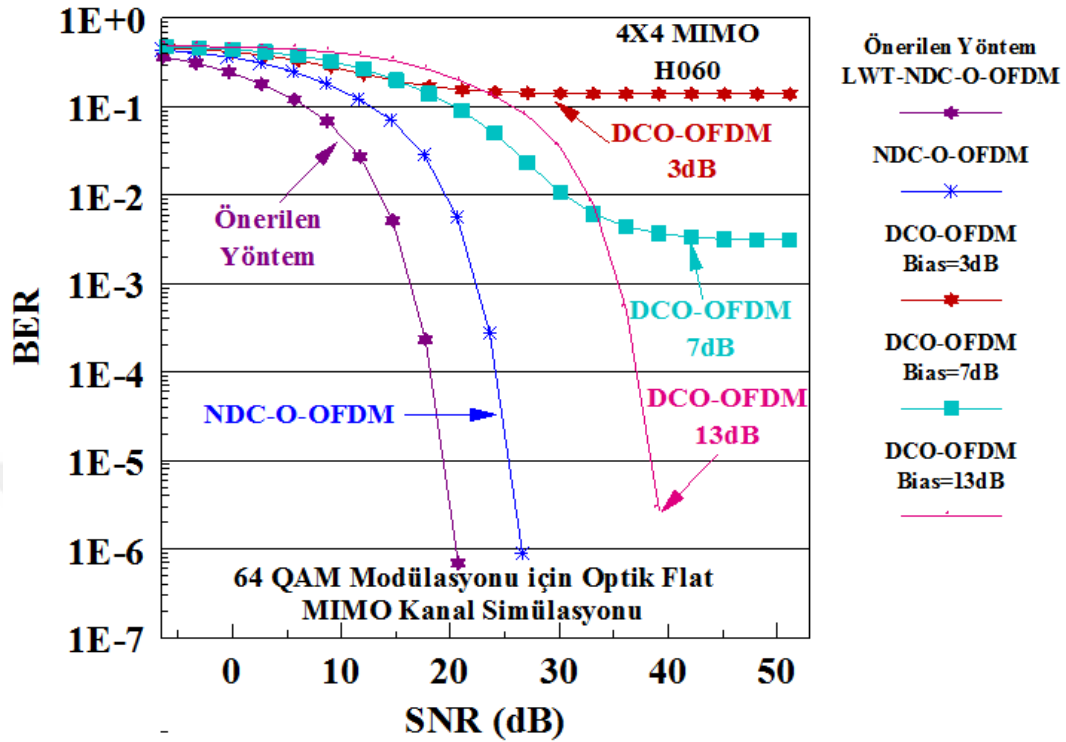


Şekil 5.83. 64-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması.

Şekil 5.83'te 64-QAM modülasyonunda Önerilen Yöntem Lazy dalgacığının farklı H kanal karşılaştırması verilmektedir. 64-QAM modülasyonu ve 4x4 MIMO sistemler kullanılarak elde edilen H kanallara ait karşılaştırmalar incelendiğinde; en iyi performansın H060 ve H070 kanalları olduğu görülmektedir. H020 kanalı ise en kötü performansı sergilemiştir. Diğer kanallar bu 3 kanal arasında değişik performanslara sahiptir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak şekil 5.84'teki karşılaştırmalar H060 kanalı kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 5.84'te 64-QAM modülasyonu H060 kanalında önerilen yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı DC öngerilim seviyesi ayarlanmış DCO-OFDM performans karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde en iyi performansın önerilen yönteme ait olduğu anlaşılmaktadır. En kötü performansı DC bias değeri 13dB olan DCO-OFDM göstermektedir. Diğer dalgacık şekilleri ise bu dalgacıklar arasında değerlere sahiptir. DC bias değeri 3dB olan DCO-OFDM'in 1E-0 ile 1E-1 BER değerleri arasında, DC bias değeri 7dB olan DCO-OFDM'in 1E-2 BER değerinden sonra hata tabanına gittiği şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem 1E-4 BER değerinde

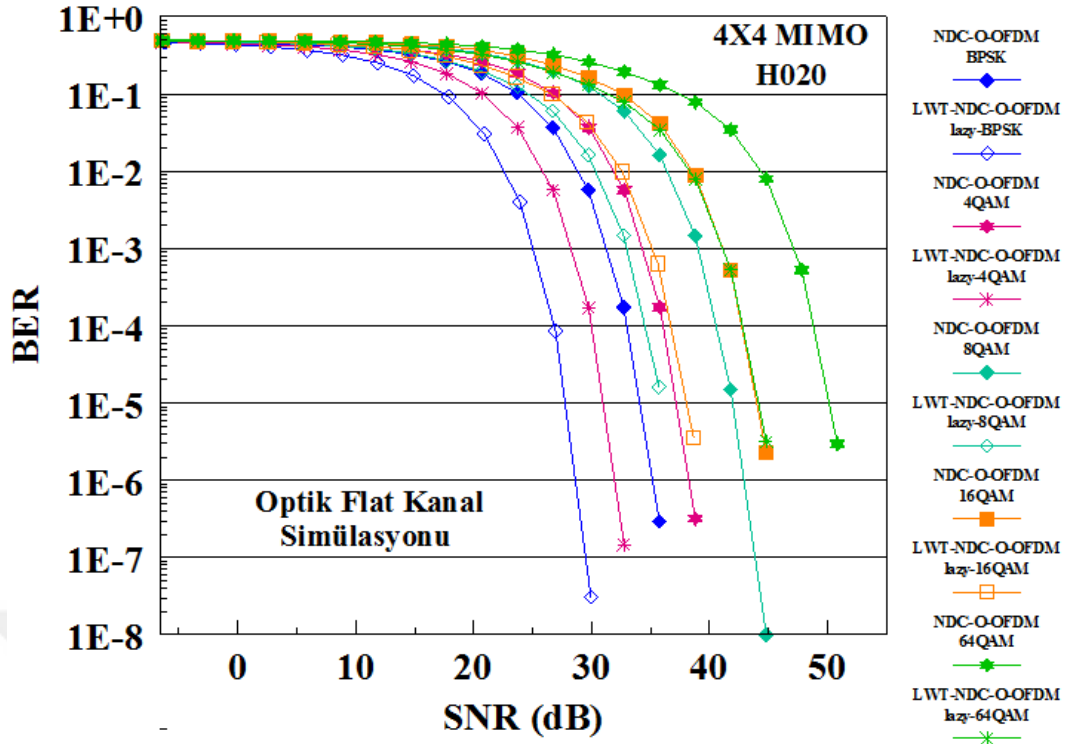
NDC-O-OFDM yönteminden yaklaşık 6 dB, DC bias değeri 13 dB olan DCO-OFDM yönteminden yaklaşık olarak 18,5 dB SNR kazancı elde edilmektedir.



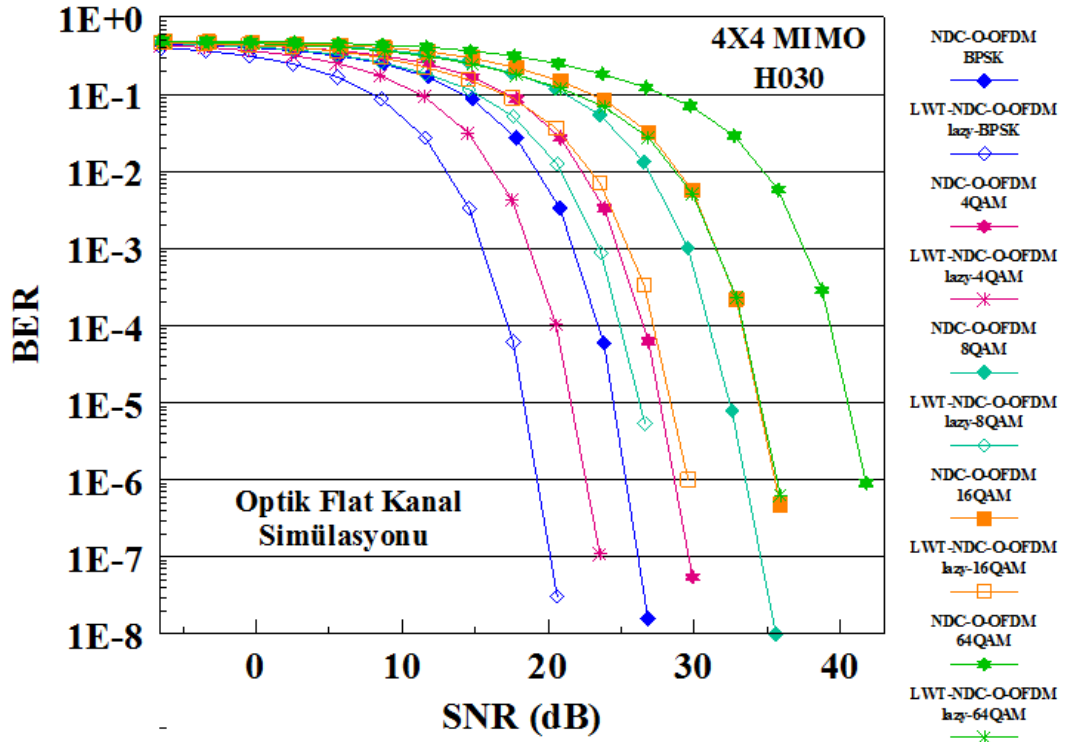
Şekil 5.84. 64-QAM modülasyonu H060 kanalında Önerilen Yöntem Lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM ve farklı bias değerlerine sahip DCO-OFDM'in karşılaştırması.

Tüm bu karşılaştırmalar ele alınarak kullanılan bütün modülasyon değerlerinde ve kanallarda, önerilen LWT-NDC-O-OFDM yönteminde en iyi performansı gösteren lazy dalgacığı ile NDC-O-OFDM karşılaştırması yapılmış ve aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Şekil 5.85 incelendiğinde, H020 kanal matrisi kullanılarak elde edilen her modülasyon türünde önerdiğimiz yöntem NDC-O-OFDM'e göre en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Daha detaylı inceleyecek olursak; 1E-4 BER değerinde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 4-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM BPSK modülasyonundan daha iyi performans sergilemiştir. Aynı şekilde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 8-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 4-QAM modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 16-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 8-QAM modülasyonundan daha iyi performansa sahiptir. LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 64-QAM modülasyonu ile NDC-O-OFDM 16-QAM modülasyonu ise aynı performansı sergilemişlerdir.

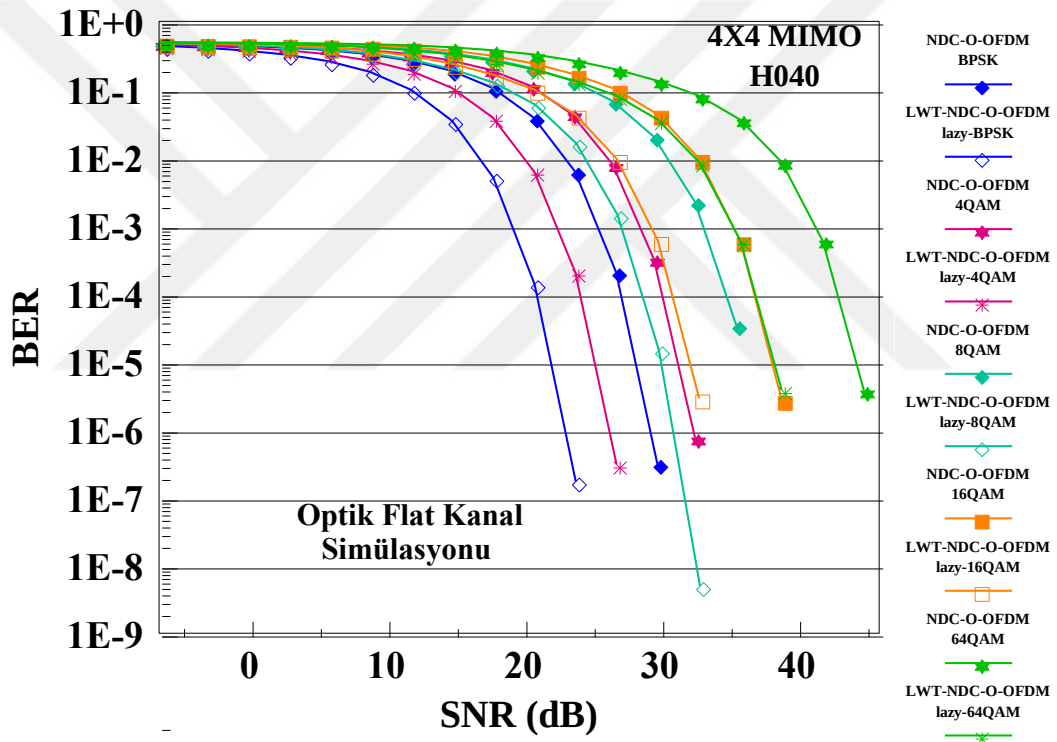


Şekil 5.85. 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H020 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması.



Şekil 5.86. 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H030 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması.

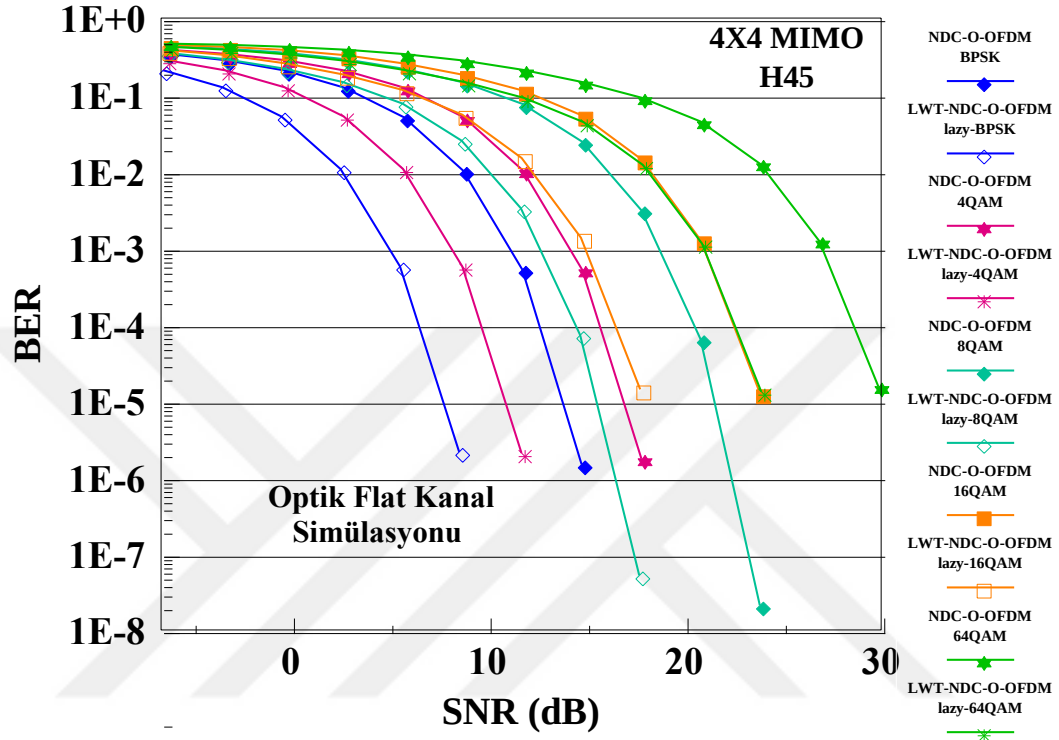
Şekil 5.86 incelendiğinde, H030 kanal matrisi kullanılarak elde edilen her modülasyon türünde önerdiğimiz yöntem NDC-O-OFDM'e göre en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Daha detaylı inceleyecek olursak; $1E-4$ BER değerinde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 4-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM BPSK modülasyonundan daha iyi performans sergilemiştir. Aynı şekilde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 8-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 4-QAM modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 16-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 8-QAM modülasyonundan daha iyi performansa sahiptir. LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 64-QAM modülasyonu ile NDC-O-OFDM 16-QAM modülasyonu ise aynı performansı sergilemişlerdir.



Şekil 5.87. 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H040 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması.

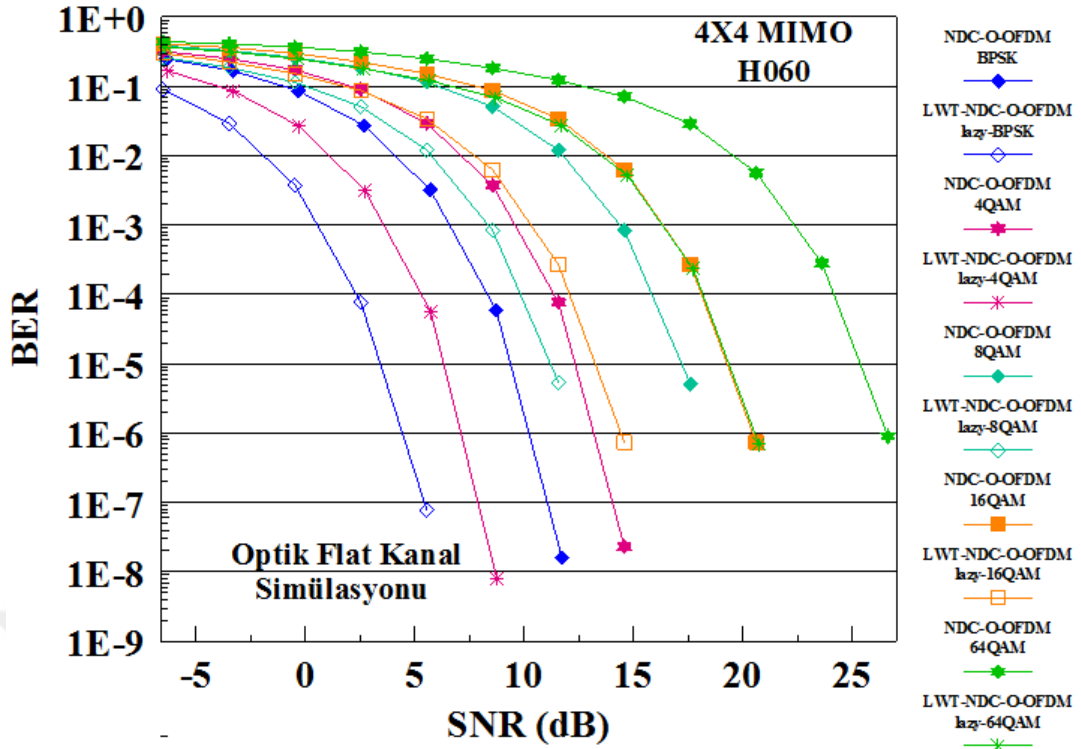
Şekil 5.87 incelendiğinde, H040 kanal matrisi kullanılarak elde edilen her modülasyon türünde önerdiğimiz yöntem NDC-O-OFDM'e göre en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Daha detaylı inceleyecek olursak; $1E-4$ BER değerinde, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 4-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM BPSK modülasyonundan daha iyi performans sergilemiştir. Aynı şekilde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 8-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 4-QAM

modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 16-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 8-QAM modülasyonundan daha iyi performansa sahiptir. LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 64-QAM modülasyonu ile NDC-O-OFDM 16-QAM modülasyonu ise aynı performansı sergilemişlerdir.



Şekil 5.88. 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H045 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması.

Şekil 5.88 incelendiğinde, H045 kanal matrisi kullanılarak elde edilen her modülasyon türünde önerdiğimiz yöntem NDC-O-OFDM'e göre en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Daha detaylı inceleyecek olursak; 1E-4 BER değerinde, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 4-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM BPSK modülasyonundan daha iyi performans sergilemiştir. Aynı şekilde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 8-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 4-QAM modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 16-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 8-QAM modülasyonundan daha iyi performansa sahiptir. LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 64-QAM modülasyonu ile NDC-O-OFDM 16-QAM modülasyonu ise aynı performansı sergilemişlerdir.

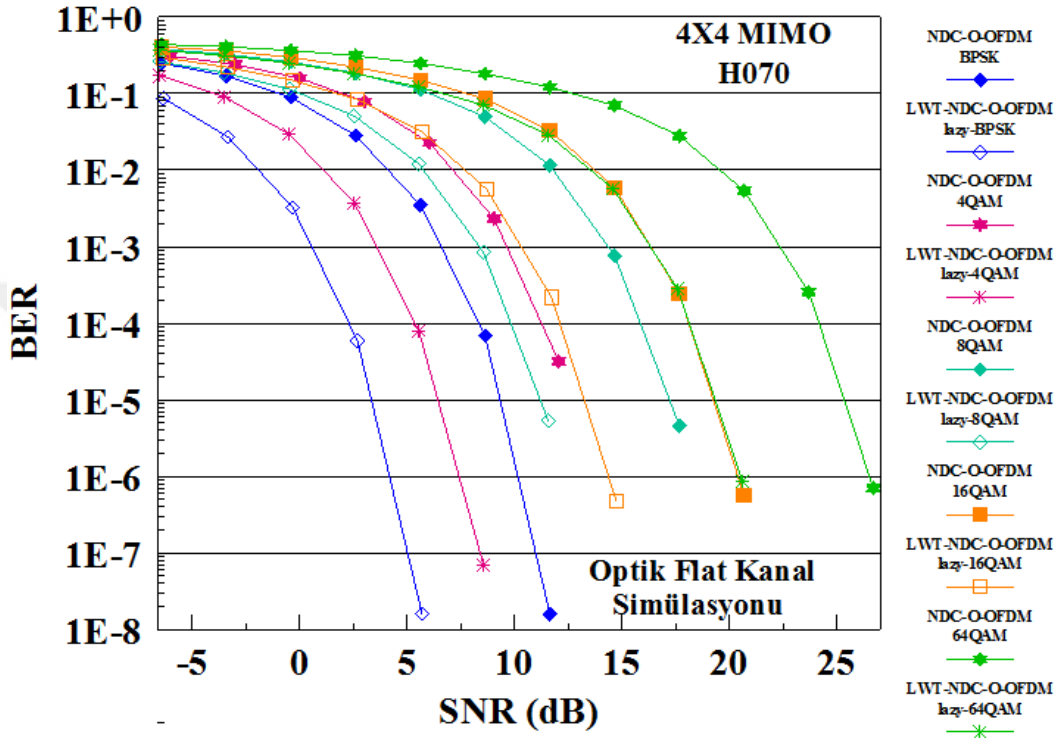


Şekil 5.89. 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H060 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması.

Şekil 5.89 incelendiğinde, H060 kanal matrisi kullanılarak elde edilen her modülasyon türünde önerdiğimiz yöntem NDC-O-OFDM'e göre en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Daha detaylı inceleyecek olursak; 1E-4 BER değerinde, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 4-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM BPSK modülasyonundan daha iyi performans sergilemiştir. Aynı şekilde LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 8-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 4-QAM modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 16-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 8-QAM modülasyonundan daha iyi performansa sahiptir. LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 64-QAM modülasyonu ile NDC-O-OFDM 16-QAM modülasyonu ise aynı performansı sergilemişlerdir.

Şekil 5.90 incelendiğinde, H070 kanal matrisi kullanılarak elde edilen her modülasyon türünde önerdiğimiz yöntem NDC-O-OFDM'e göre en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Daha detaylı inceleyecek olursak; 1E-4 BER değerinde, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacı 4-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM BPSK modülasyonundan daha iyi performans sergilemiştir. Aynı şekilde LWT-NDC-O-

OFDM Lazy dalgacığı 8-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 4-QAM modülasyonundan, LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 16-QAM modülasyonu NDC-O-OFDM 8-QAM modülasyonundan daha iyi performansa sahiptir. LWT-NDC-O-OFDM Lazy dalgacığı 64-QAM modülasyonu ile NDC-O-OFDM 16-QAM modülasyonu ise aynı performansı sergilemişlerdir.



Şekil 5.90. 4x4'lük MIMO sistemlerde Önerilen Yöntemin NDC-O-OFDM ile H070 kanalı tüm modülasyonlarda karşılaştırması.

Tüm bu performans karşılaştırmalarının yanında, bundan sonraki karşılaştırmamızda alıcı dizisinin konumunun değıştiği durumu ele alıyoruz. x_{RX} ve y_{RX} 'i, alıcı dizisinin kurulum yapılan alanın merkezine göre x ve y eksenı üzerindeki konum ofsetleri olarak tanımlarız. Bu ofsetler, verici dizisi ve alıcılar arasındaki hem mesafeyi hem de yanlış hizalamayı artırır. Göz önünde bulundurulan konum ofsetleri:

E) $x_{RX} = 0.5m, y_{RX} = 0m$

N) $x_{RX} = 0.25m, y_{RX} = 0.75m$

A) $x_{RX} = 0.5m, y_{RX} = 1.0m$

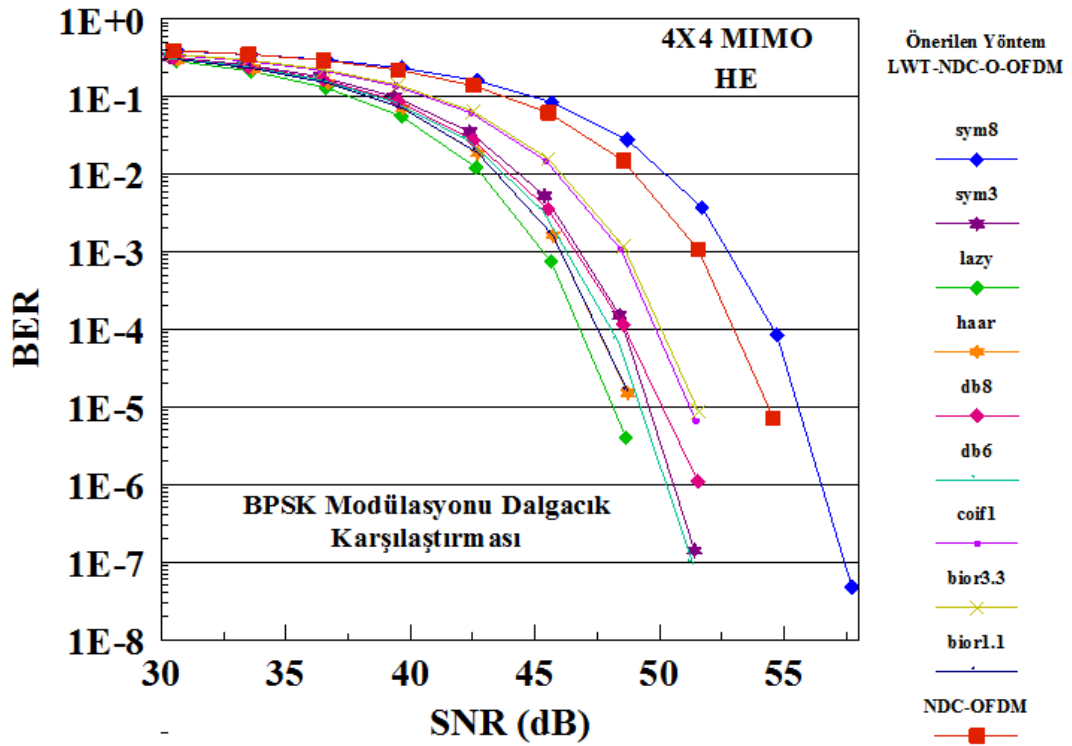
şeklindeđir.

Bu konumların kanal matrisleri aşağıdaki gibidir. Bu kanal matrisleri kullanılarak önerdiğimiz yöntemde performans analizleri yapılmış ve NDC-O-OFDM ile karşılaştırılmıştır.

$$H_E \approx 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 0.2293 & 0.2013 & 0.1462 & 0.1290 \\ 0.2013 & 0.2293 & 0.1290 & 0.1462 \\ 0.7964 & 0.6888 & 0.6410 & 0.5559 \\ 0.6888 & 0.7964 & 0.5559 & 0.6410 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

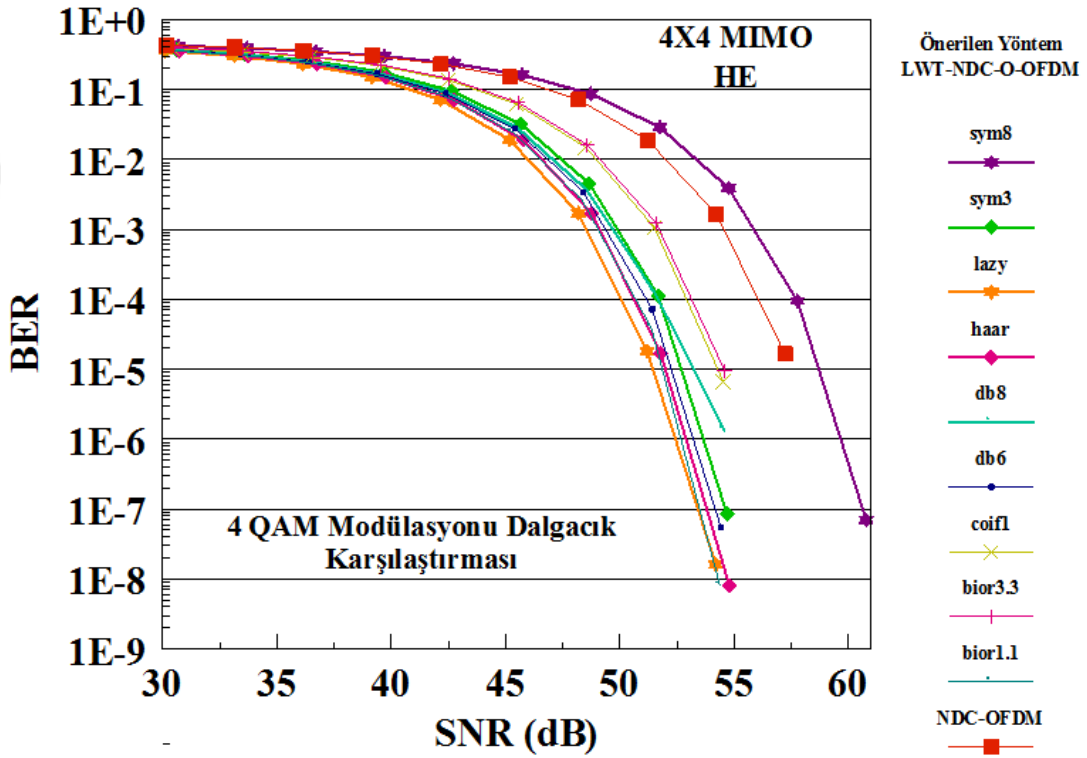
$$H_N \approx 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 0.0461 & 0.0272 & 0.0358 & 0.0213 \\ 0.2573 & 0.1798 & 0.1917 & 0.1352 \\ 0.0735 & 0.0424 & 0.0713 & 0.0412 \\ 0.4426 & 0.3040 & 0.4275 & 0.2940 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$H_A \approx 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 0.0061 & 0.0035 & 0.0044 & 0.0025 \\ 0.0442 & 0.0283 & 0.0299 & 0.0194 \\ 0.0150 & 0.0082 & 0.0128 & 0.0071 \\ 0.1290 & 0.0792 & 0.1071 & 0.0663 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$



Şekil 5.91. BPSK modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

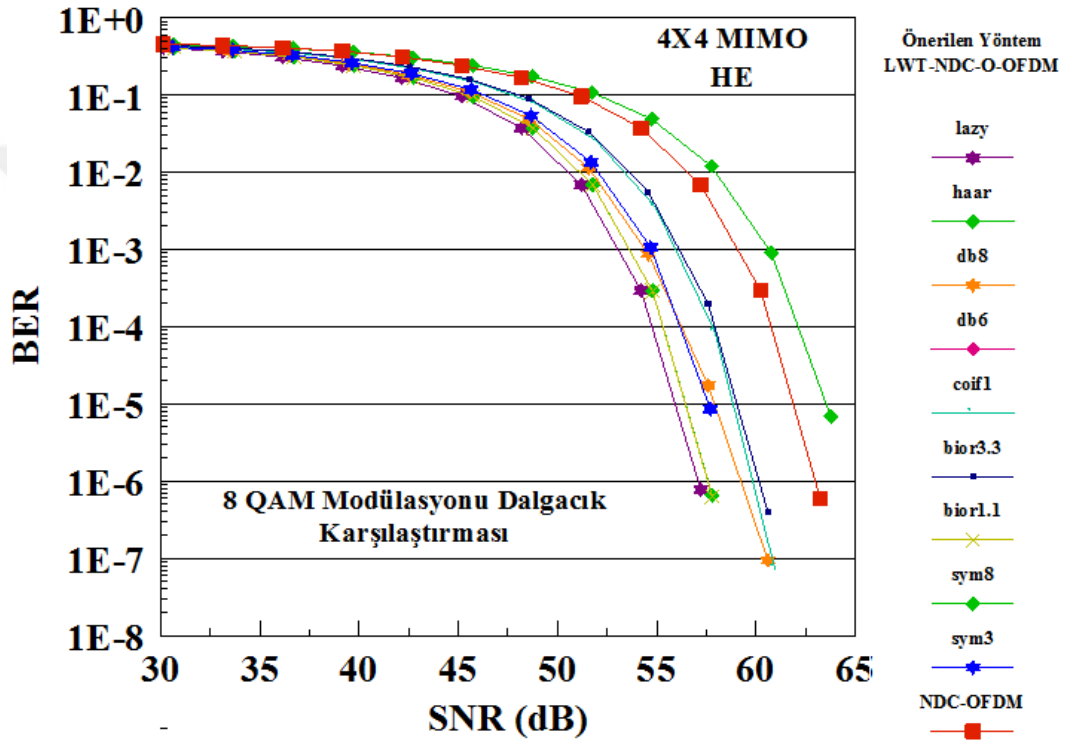
Şekil 5.91’de, BPSK modülasyonu HE kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu HE kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.



Şekil 5.92. 4-QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

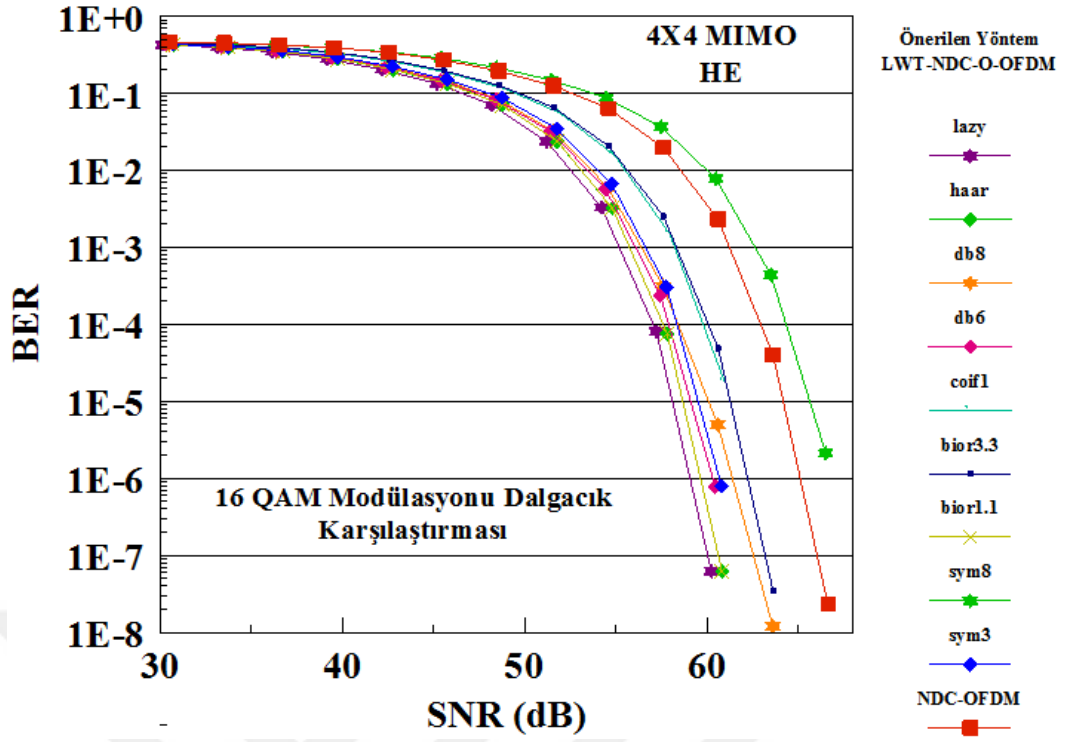
Şekil 5.92’de, 4-QAM modülasyonu HE kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu HE kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

Şekil 5.93'te, 8-QAM modülasyonu HE kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu HE kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

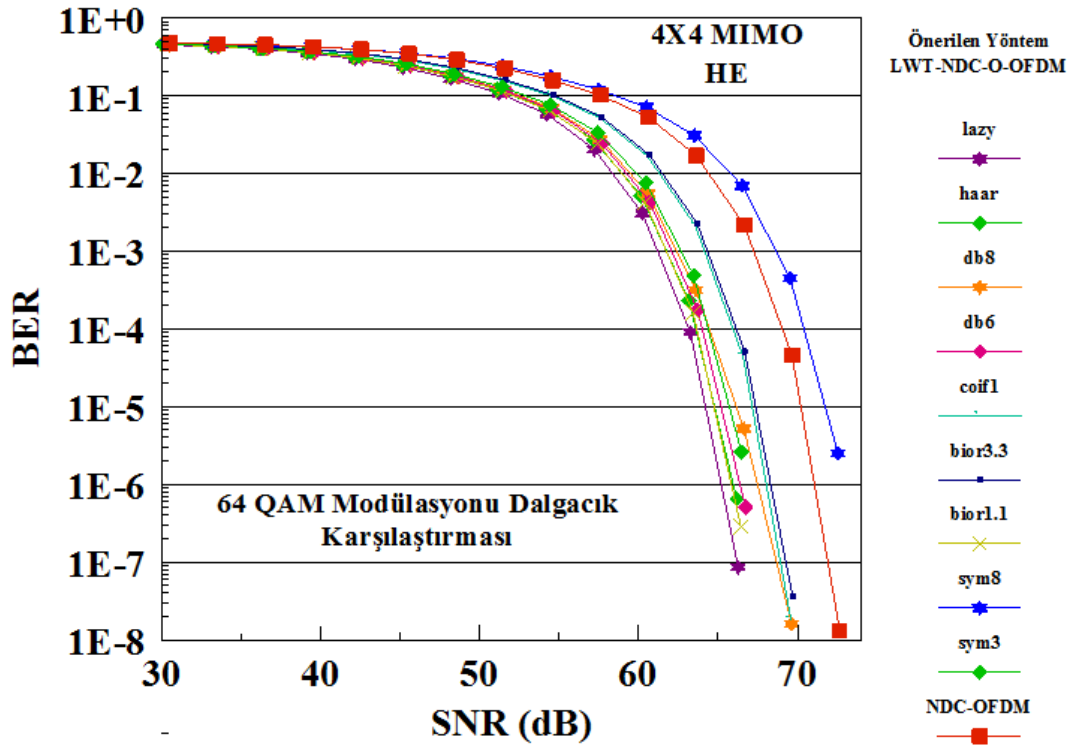


Şekil 5.93. 8-QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.94'te, 16-QAM modülasyonu HE kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu HE kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

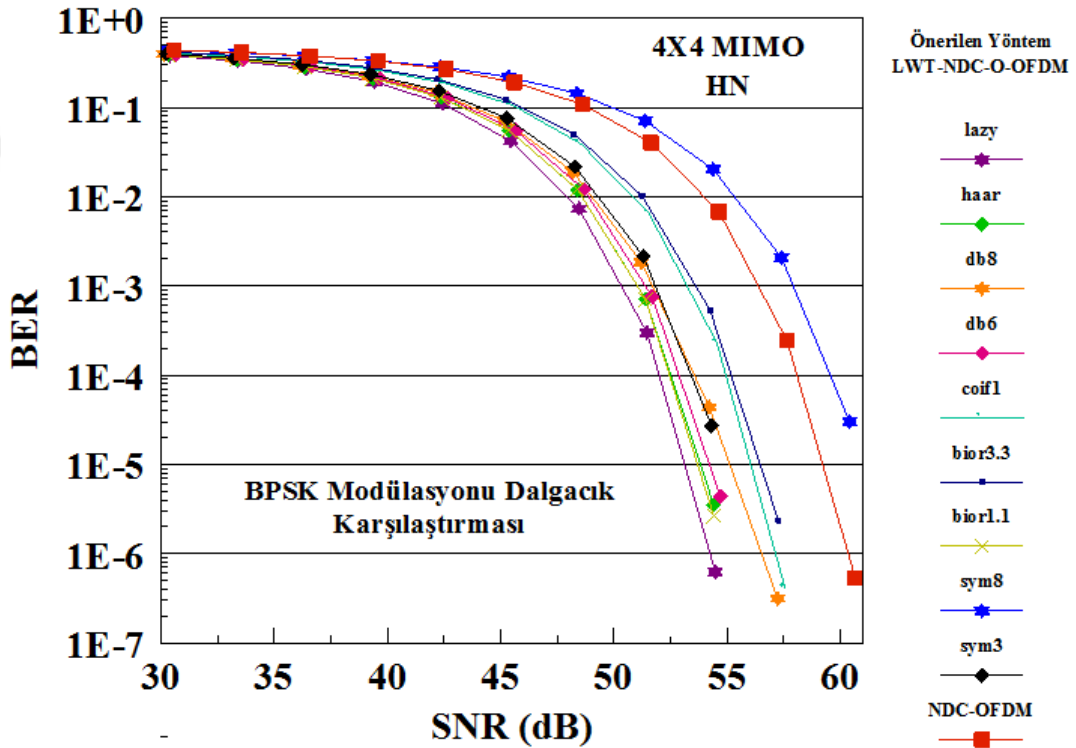


Şekil 5.94. 16-QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.



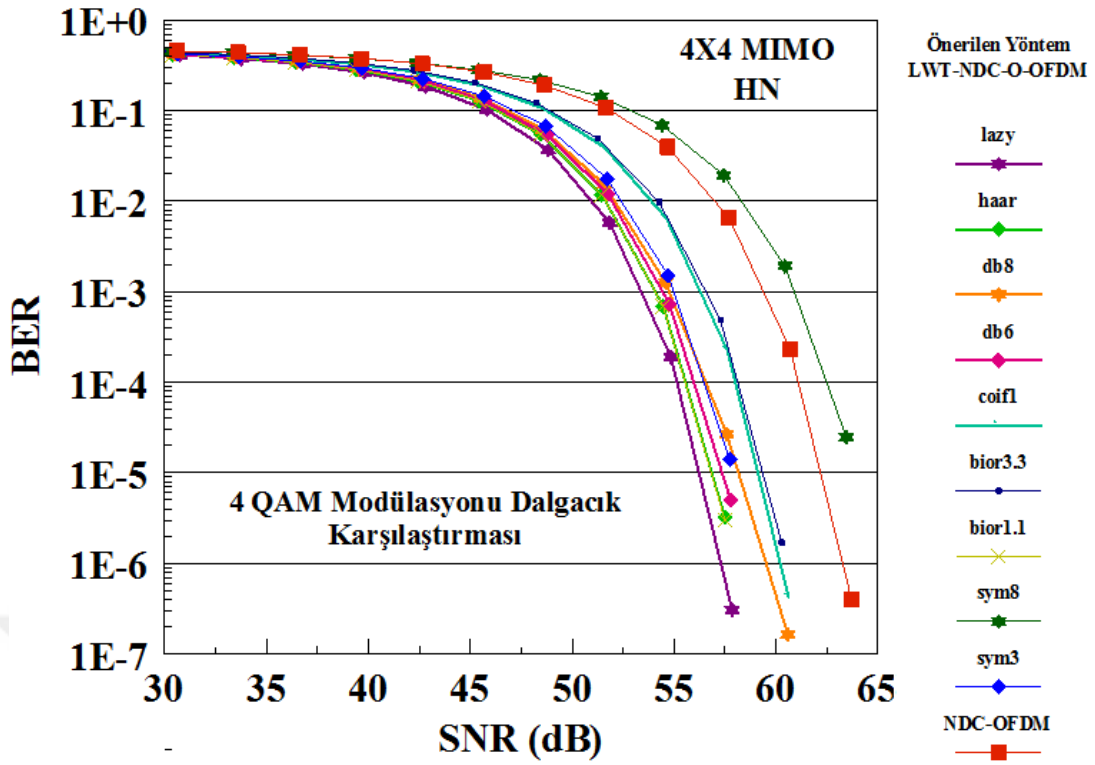
Şekil 5.95. 64-QAM modülasyonu HE kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.95'te, 64-QAM modülasyonu HE kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu HE kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.



Şekil 5.96. BPSK modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

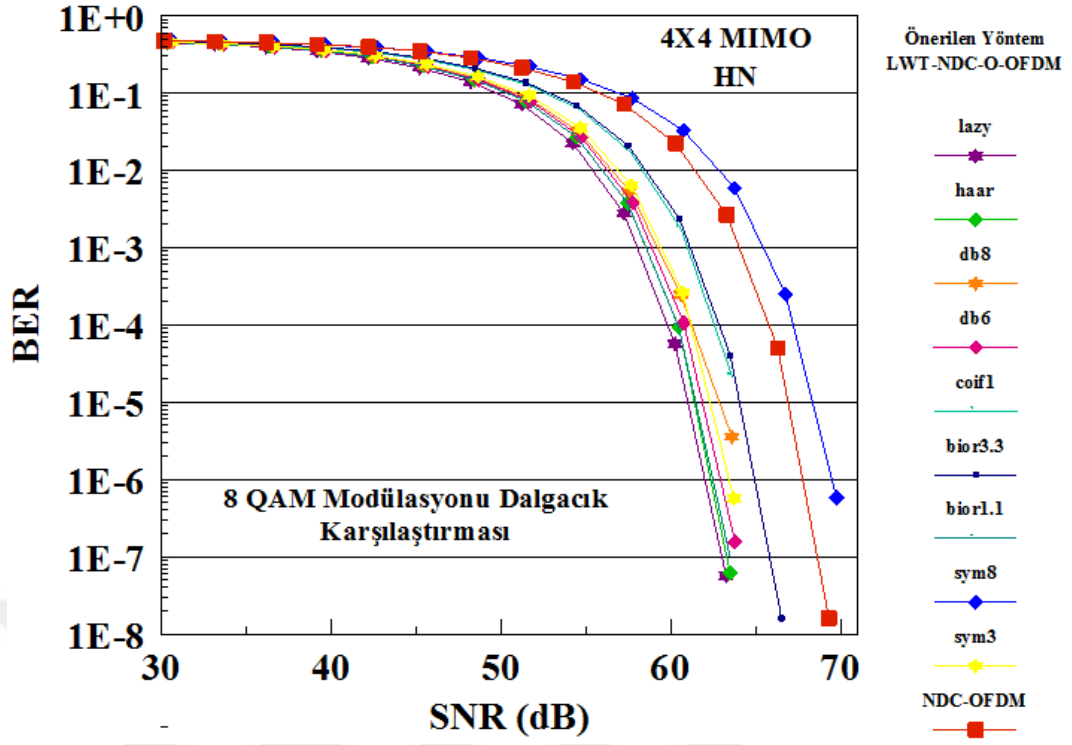
Şekil 5.96'da, BPSK modülasyonu HN kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu HN kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.



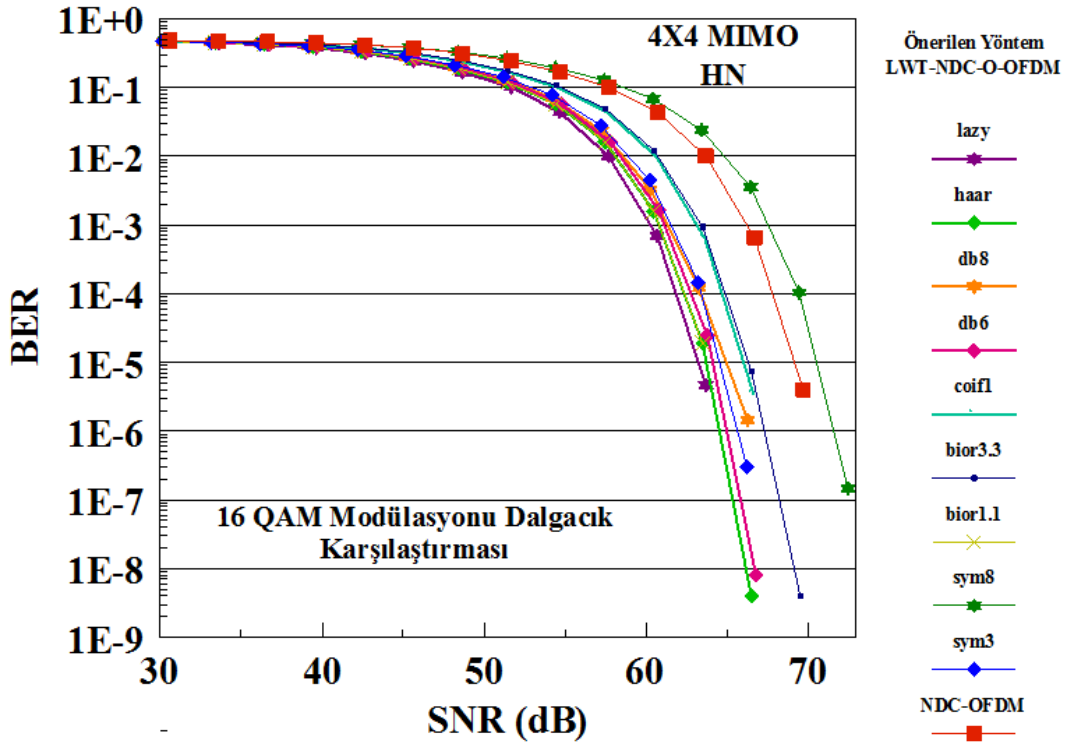
Şekil 5.97. 4-QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.97’de, 4-QAM modülasyonu HN kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu HN kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

Şekil 5.98’de, 8-QAM modülasyonu HN kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu HN kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

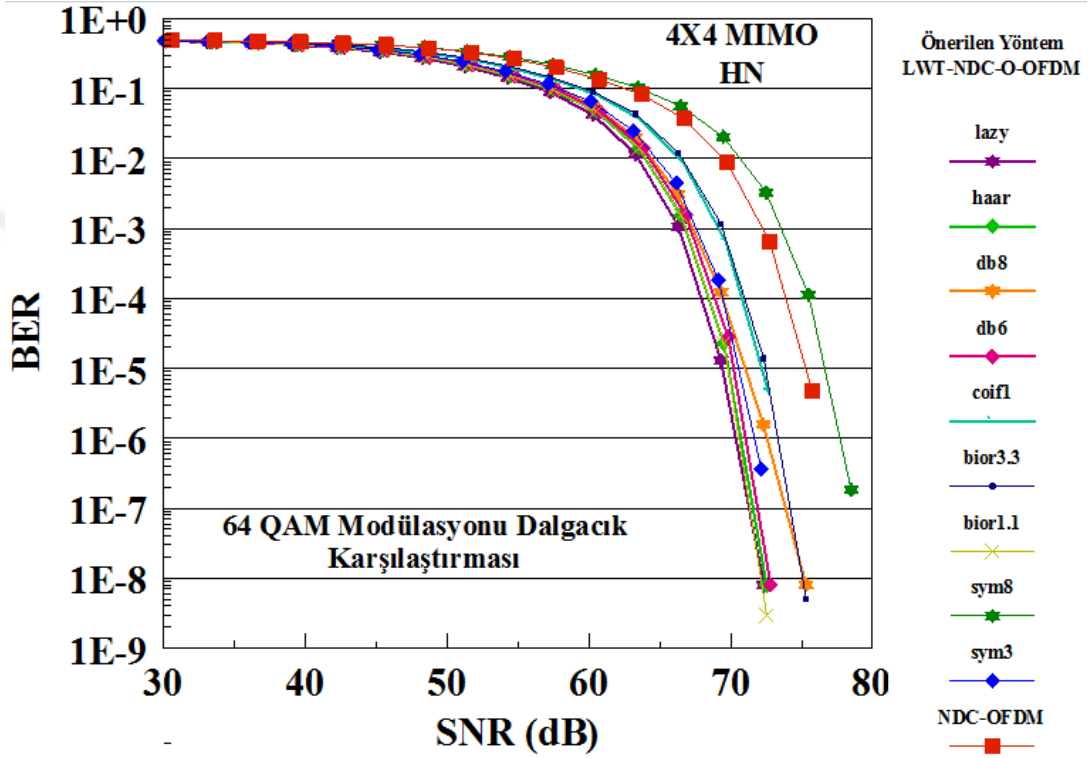


Şekil 5.98. 8-QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.



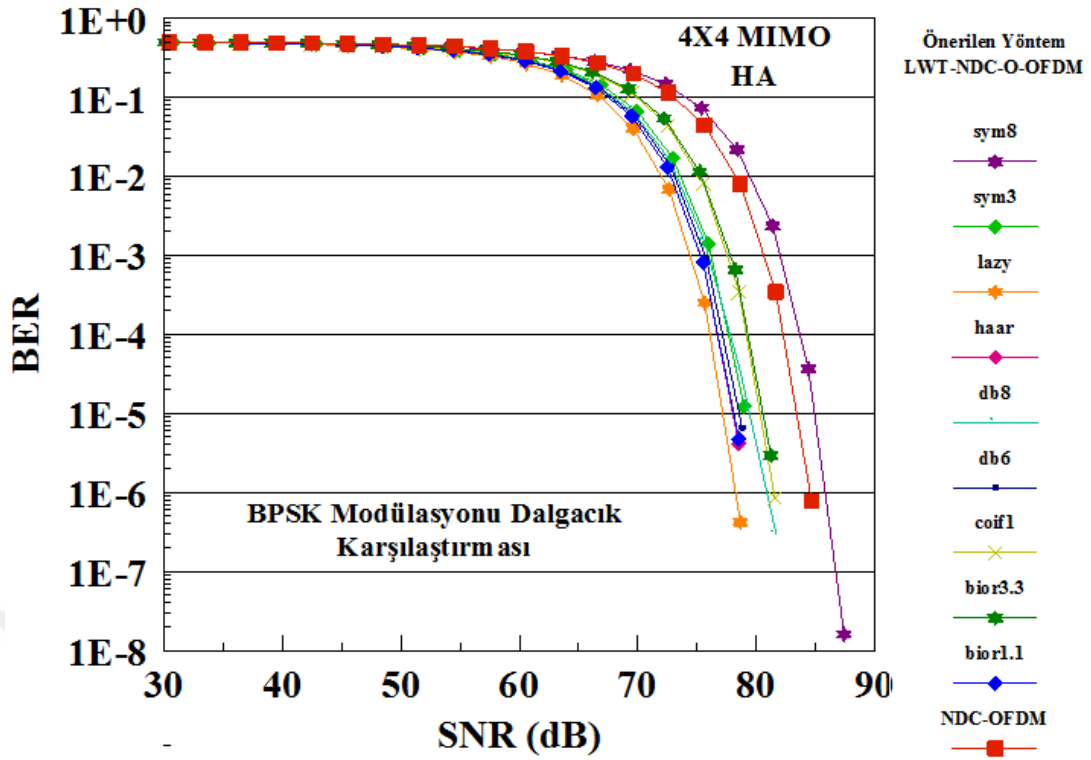
Şekil 5.99. 16-QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.99’da, 16-QAM modülasyonu HN kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu HN kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.



Şekil 5.100. 64-QAM modülasyonu HN kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

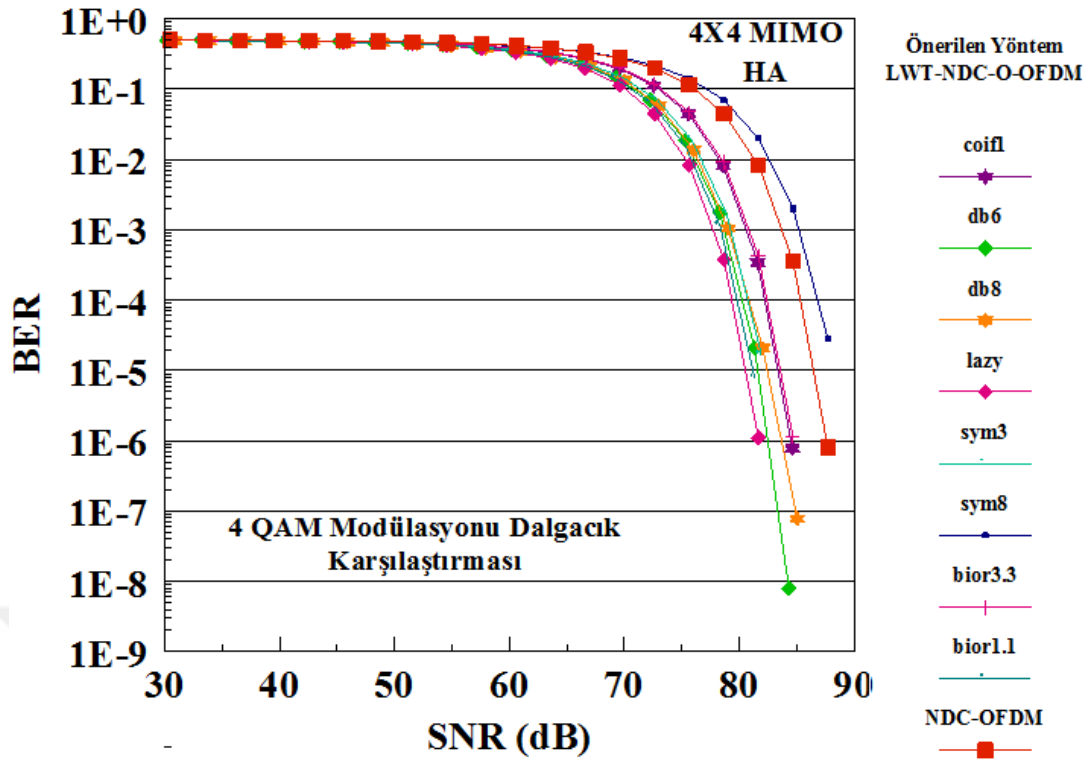
Şekil 5.100’de, 64-QAM modülasyonu HN kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu HN kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.



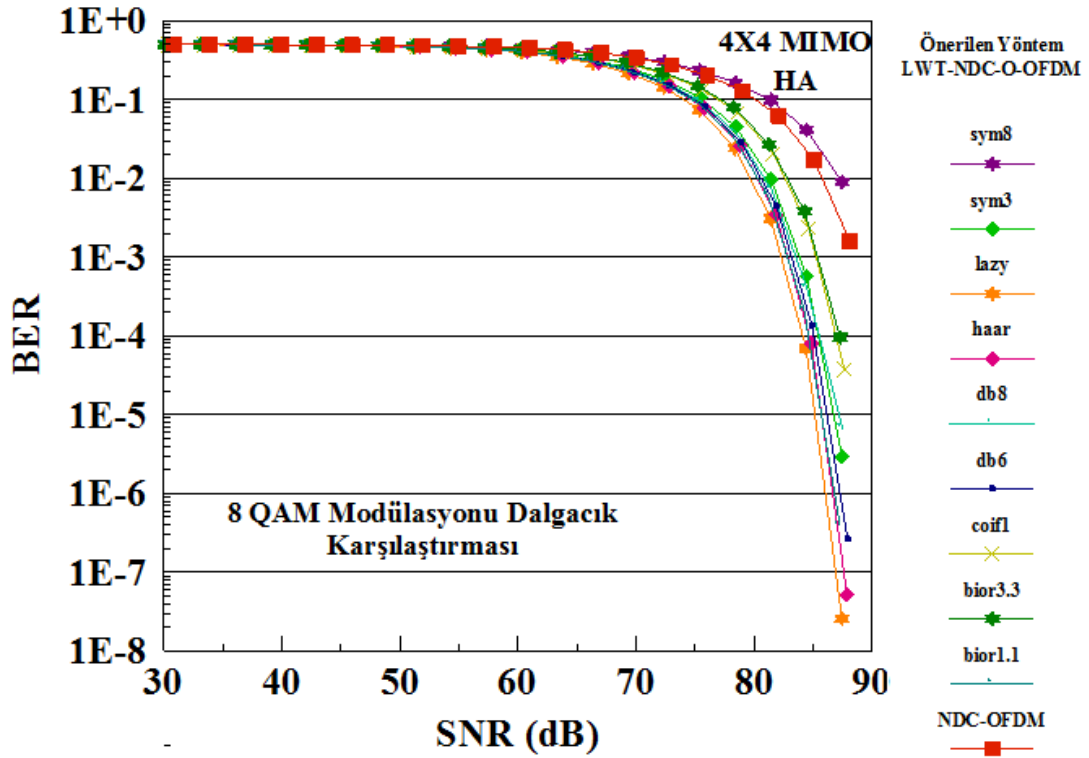
Şekil 5.101. BPSK modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.101’de, BPSK modülasyonu HA kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin BPSK modülasyonu HA kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

Şekil 5.101’de, 4-QAM modülasyonu HA kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 4-QAM modülasyonu HA kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

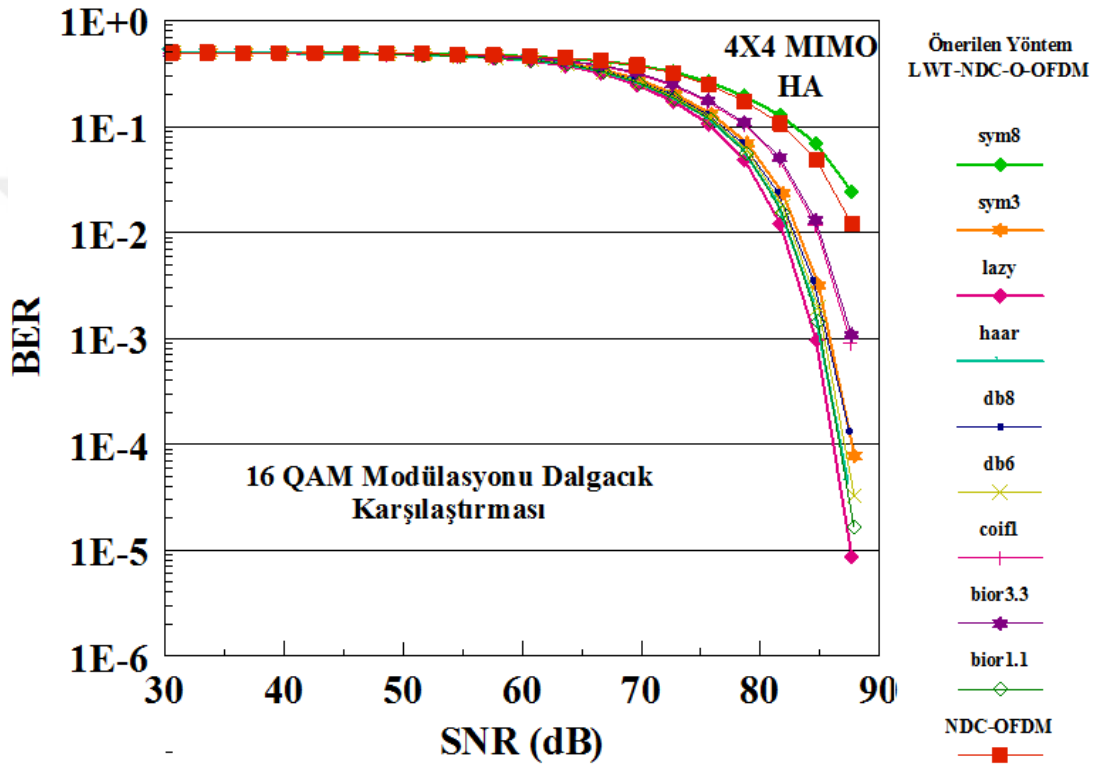


Şekil 5.102. 4-QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.



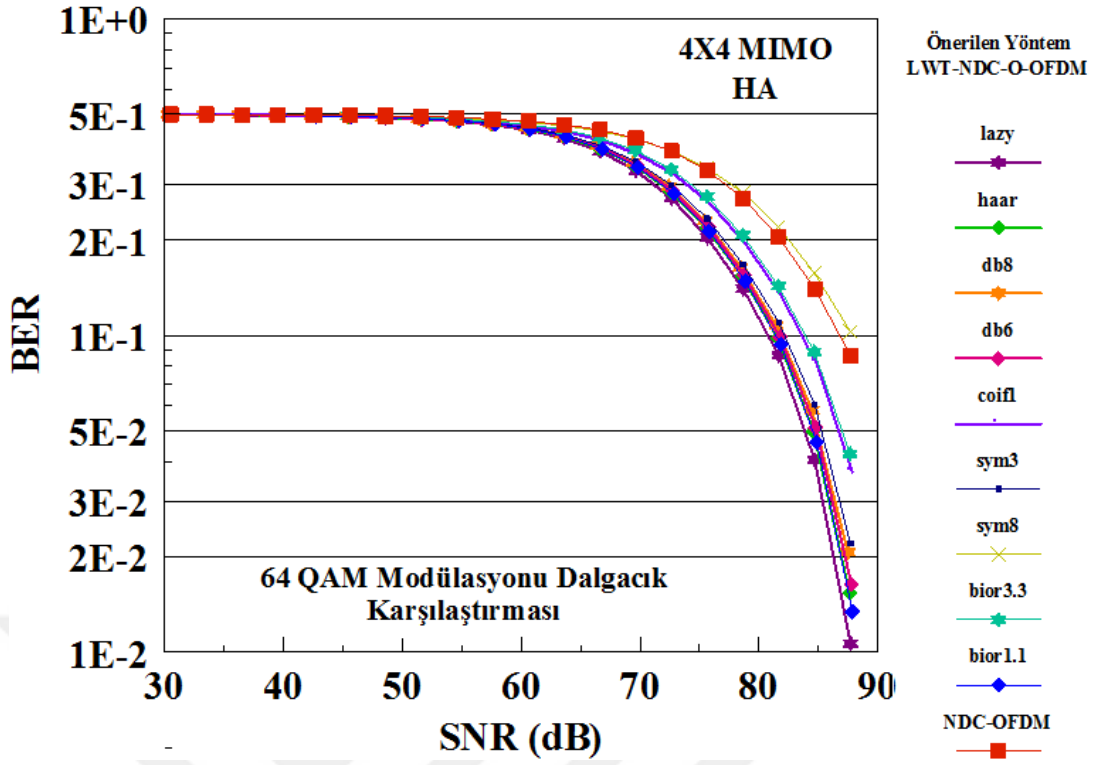
Şekil 5.103. 8-QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.103'te, 8-QAM modülasyonu HA kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 8-QAM modülasyonu HA kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.



Şekil 5.104. 16-QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.104'te, 16-QAM modülasyonu HA kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 16-QAM modülasyonu HA kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.



Şekil 5.105. 64-QAM modülasyonu HA kanalı dalgacık ve NDC-OFDM karşılaştırması.

Şekil 5.105'te, 64-QAM modülasyonu HA kanal matrisi kullanılarak elde edilen, önerilen yöntemin Optik Flat kanalda dalgacık ailesi grafiği görülmektedir. Elde edilen bu dalgacıkların NDC-OFDM ile karşılaştırması verilmektedir. Şekil incelendiğinde, önerdiğimiz yöntemin 64-QAM modülasyonu HA kanalında yapılan dalgacık karşılaştırmalarında en kötü performansı sym 8 dalgacığının, en iyi performansı lazy dalgacığının gösterdiği görülmektedir. NDC-OFDM ise sym 8 dalgacığından sonraki en kötü performansa sahip yöntem olmuştur.

6. BÖLÜM: SONUÇLAR

Son zamanlarda kablosuz iletişim teknolojileri hızlı bir şekilde ilerleme kaydetmektedir. Gelişen radyo frekans kablosuz iletişime karşı rakip olabilecek aydınlatma amaçlı kullanımı ile birlikte adından söz ettiren görünür ışıkla haberleşme teknolojisi zamanla hak ettiği değeri görmeye başlamıştır. Özellikle radyo frekans haberleşmesinin yaydığı radyasyona karşı insan sağlığı için daha az olumsuz etkileri olan görünür ışıkla haberleşme teknolojisi kapalı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Görünür ışık haberleşmesi, ışık rengini veya şiddetini insan gözünün algılayamayacağı hızda değiştirerek ortam aydınlatmasını ve kablosuz veri transferini beraber gerçekleştirmektedir. Bu özelliği sayesinde gelecek vadeden haberleşme teknikleri arasında yerini almıştır. Bu nedenle, yüksek performanslı ve işlevsel görünür ışık haberleşme sistemlerini geliştirmek için çalışmalar hız kazanmıştır. Tezimizde de; görünür ışık haberleşme sistemlerinde kullanılan OFDM tekniklerinin yüksek spektral verimlilik sağlayan türlerinden birisi olan, VLC sistemlerinin başarımını artırmak için yeni bir yöntem ele alınmıştır. Aynı zamanda pratik OWC sistemlerinin uyarlanabilir MIMO tekniklerinden büyük ölçüde yararlanabileceği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında; ilk olarak literatür taraması yapılmış ve mevcut VLC sistemleri incelenmiştir. Daha sonra kapalı ortamlarda OWC'ye uygulanan MIMO tekniklerinin performansı incelenmiş ve varolan tekniklerle karşılaştırılmıştır. Farklı verici aralıklarına ve alıcı dizisinin farklı konumlarına sahip birkaç 2x2 ve 4x4 kurulumları göz önünde bulundurulmuştur. 4x4'lük MIMO sistemlerde gerçel/sanal ve pozitif/negatif sembolleri aktarmak için birbirini takip eden dört led kullanılırken, 2x2'lik MIMO sistemler için birbirini takip eden iki led tarafından pozitif/negatif semboller iletilmiştir.

Bu tez çalışmasında ele alınan, önerilen yeni bir modülasyon yöntemi olan LWT-NDC-O-OFDM, bir optik Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama (O-OFDM)

modülasyon yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, optik telsiz iletişim sistemlerinin önemli dalga formlarından biri olan NDC-OFDM dalga formunun performansını arttırmak için ortogonal dönüşüm tekniği ile NDC-OFDM dalga formunun birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu yeni yöntemin teorik ve pratik performansları analiz edilmektedir. Bu yeni yöntemde, O-OFDM ile LWT uygulanmış NDC yöntemi birleştirilmiş ve OWC sistemine uygulanmıştır.

Simülasyon çalışmaları MATLAB programında yapıldı ve BER/SNR performans karşılaştırmaları incelendi. Karşılaştırmalarda anlaşılacağı üzere önerdiğimiz yöntem LWT-NDC-O-OFDM, OSM sisteminde uygulanan geleneksel OFDM tabanlı modülasyon şemalarından (DCO-OFDM, ACO-OFDM, VLC-OFDM ve NDC-OFDM) daha yüksek enerji verimliliği elde etme yeteneği sergilemiştir. DCO-OFDM ile karşılaştırıldığında yeni yöntem, DC-bias ihtiyacını ortadan kaldırır ve yüksek DC-bias seviyesinin neden olduğu kırpma bozulma problemini çözmektedir. Ek olarak, ACO-OFDM'e göre spektral verimlilikte daha az azalma ile güç tüketimini azaltır. Sonuç olarak, aynı spektral verimlilik için önemli bir güç verimliliği kazancı sergilemektedir. Bu nedenle, minimum aydınlatma koşullarını sağlamak için birden fazla LED ile donatılmaya yönelik VLC sistemleri geliştirildiğinde önerdiğimiz yöntem, NDC-OFDM ve ortogonal dönüşüm etkili ve verimli bir modülasyon şeması olarak kullanılması ve literatüre kazandırılması hedeflenmektedir.

7. BÖLÜM: KAYNAKÇA

- [1]. Armstrong J. and Lowery A. J., "Power efficient optical OFDM," in **Electronics Letters**, volume 42, no. 6, pp. 370-372, Mar. 2006.
- [2]. <https://www.aselsan.com.tr/tr/inovasyon/haber-detay/5g-nedir-6346>
- [3]. <https://www.aselsan.com.tr/tr/inovasyon/haber-detay/5g-otesi-sirada-ne-var-3463>
- [4]. Giordani M., Polese M. and etc., "Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies," pp. 1–7, 2019.
- [5]. Zhang Z., Xiao Y. and etc., "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture and Key Technologies," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, volume 14, no. 3, pp. 28–41, September 2019.
- [6]. Xu X., Pan Y. and etc., "3D holographic display and its data transmission requirement," in *International Conference on Information Photonics and Optical Communications*, October 2011, pp. 1–4.
- [7]. Fath T. and Haas H., "Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments," *IEEE Transactions on Communications*, volume 61, pp. 733-742, 2013.
- [8]. Zhang Q., Liu J. and Zhao G., "Towards 5g enabled tactile robotic telesurgery," arXiv preprint arXiv:1803.03586, 2018.
- [9]. Lee J., Bagheri B. and Kao H. A., "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," **Manufacturing Letters**, volume 3, pp. 18 – 23, January 2015
- [10]. Lu N., Cheng N., Zhang N. and etc., "Connected vehicles: Solutions and challenges," *IEEE Internet Things J.*, volume 1, no. 4, pp. 289–299, August 2014.
- [11]. Rehman S. U., Ullah S. and etc., "Visible light communication" A system perspective Overview and challenges, *Sensors (Switzerland)*, volume 19, no. 5, pp. 1–22, 2019.
- [12]. <https://ckk.com.tr/em/6G/6G.html>

- [13]. Tariq F., Khandaker M. and etc., “A Speculative Study on 6G,” volume XX, no. X, pp. 1–8, 2019.
- [14]. Ghassemlooy Z. and etc., 2013, **Optical Wireless Communication System and Channel Modelling with MATLAB**, CRC Press, New York.
- [15]. <http://energy.gov/energysaver/articles/led-lighting>, LED Lighting, 18 october 2018.
- [16]. Pathak, P. H. and etc., “Visible light communication, networking, and sensing” A survey, potential and challenges, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17,4, 2015.
- [17]. Cailean, A. M. and Dimian M., “Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications” A Survey, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19, 4, 2017.
- [18]. Wu S. and etc., “Visible Light Communications for 5G Wireless Networking Systems” *From Fixed to Mobile Communications*, 2014, IEEE Network, 28, 6.
- [19]. Dimitrov S. and Haas H., “Principles of LED Light Communications” Towards Networked Li-Fi, Cambridge University Press., Cambridge, 2015.
- [20]. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Slika:EMspectrumrevised>. Wikipedia, 2023, EM spectrum.
- [21]. Lee Chia Ching and etc., of Multimedia University and Mazlaini Yahya of TM Innovation Centre, “Visible Light Communication (VLC) and Its Future Prospective”.
- [22]. Celik Y., Doktora Tezi “Görünür Işık Haberleşmesi İçin Yeni Nesil Fiziksel Katman Teknikleri”, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Haziran, 2018.
- [23]. Grubor J., Randel S., and etc., “Bandwidth Efficient Indoor Optical Wireless Communications with White Light Emitting Diodes,” in In the Proceeding of the 6th *International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, volume 1, 23–25, pp. 165–169, Graz, Austria, June, 2008,.
- [24]. Komine T. and Nakagawa M., “Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, volume 50, no. 1, pp. 100–107, (2004).
- [25]. Kahn J.M., and Barry, J.R., *Wireless Infrared Communications, Proceedings of the IEEE*, volume 85 no. 2, pp. 265-298, 1997.
- [26]. Wilson S. K. and Armstrong J., “Transmitter and Receiver Methods for Improving Asymmetrically-Clipped Optical OFDM”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, volume 8, no. 9, pp. 4561–4567, (2009).

- [27]. Elgala H., Mesleh R. and Haas H., “Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art”, **Communications Magazine**, IEEE, volume 49, no. 9, pp. 56-62, September 2011.
- [28]. Kimyacı M., Yüksek Lisans Tezi “Bina İçi Görünür Işık Haberleşmesinde Konfigürasyonun Kanal Karakteristiği Üzerine Etkisi” İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Haziran 2019.
<https://hdl.handle.net/20.500.12508/1350>.
- [29]. Uzun P., Yüksek Lisans Tezi “Görünür Işık Haberleşmesinde Modülasyon Türlerinin İncelenmesi” Fen Bilimleri Enstitüsü / Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Temmuz 2019, Tokat.
<https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/684092>.
- [30]. Armstrong J., “OFDM for Optical Communications” *Journal of Lightwave Technology*, Volume 27, No 3, February 1, 2009.
- [31]. Albayrak C., Doktora Tezi, “Kapalı Mekanlarda Görünür Işık Haberleşmesi İçin Oransız Kodlara Dayalı Hız Uyarlaması”, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mayıs 2018, Trabzon.
- [32]. Armstrong J. and Lowery A., 2006, “Power Effecient Optical OFDM”, **Electronics Letters**, volume 42 (6), pp. 370 -372.
- [33]. Damjanovic A., Montojo J., and etc., “A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks”, *IEEE Wireless Communications*, volume 18, no. 3, pp. 1536-1284, (2011).
- [34]. Dissanayake S.D. and Armstrong J., “Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems”, *J. Lightwave Tech.*, volume 31, no. 7, pp. 1063-1072, 2013.
- [35]. Bölcskei H., “MIMO-OFDM Wireless Systems” Basics, Perspectives, and Challenges, *IEEE Wireless Commun.*, volume 13, issue 4, pp. 31-47, 2006.
- [36]. Mesleh R., Elgala H. and Haas H., “Optical Spatial Modulation”, *Journal of Optical Communications Networking*, volume 3, issue 3 pp. 234-244, 2011.
- [37]. Bass M., Berg M. and Dhingra V. Drivers and path to 5G. Bell Labs Consulting (2017).
- [38]. Basar E., 2016., Index modulation techniques for 5G wireless networks, *IEEE Communication Magazine.*, 57, 7.

- [39]. Yıldırım, M., "Kablosuz haberleşme sistemlerinde zeki optimizasyon teknikleri ile tepe gücü/ortalama güç oranının düşürülmesi", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018 Kayseri.
- [40]. Li Y., Tsonev D. and Haas H., "Non-DC-biased OFDM with optical spatial modulation," *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, UK, 2013, pp. 486-490.
- [41]. Armstrong J. and Schmidt B. J. C., "Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN," **Communications Letters**, IEEE, vol. 12, no. 5, pp. 343–345, May 2008
- [42]. Dimitrov S., Sinanovic S., and Haas H., "Clipping Noise in OFDM based Optical Wireless Communication Systems," *IEEE Transactions on Communications (IEEE TCOM)*, vol. 60, no. 4, pp. 1072–1081, April 2012.
- [43]. Yakut E., "An Intelligent Classification System Based on Wavelet Transform For Analog Modulations", Master Thesis, Firat University, 2007.
- [44]. Akdoğan A., "Lifting Wavelet Transform Based Clutter Suppression Technic For Ground Penetrating Radar", Master Thesis, İstanbul Teknik University, September 2013.
- [45]. Claypoole R.L., Davis G.M., Sweldens W., et al., "Nonlinear wavelet transforms for image coding via lifting", *IEEE Transactions on Image Processing*, Volume: 12, Issue: 12, pp. 1449-1459, December 2003.
- [46]. Yichen L., Tsonev D., and Haas H., "Performance Analysis of Non-DC-Biased OFDM." arXiv preprint arXiv:1905.05822 (2019).