

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ İLE VERİ İLETİMİ VE
PERFORMANS ANALİZİ**

Fethiye Merve KAVAK

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Telekomünikasyon Bilim Dalı

TEMMUZ 2023

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ İLE VERİ İLETİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Tez Yazarı

Fethiye Merve KAVAK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Duygu KAYA

TEMMUZ 2023

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Görünür Işık Haberleşmesi ile Veri İletimi ve Performans Analizi
Yazarı: Fethiye Merve KAVAK
İlk Teslim Tarihi: 06.06.2023
Savunma Tarihi: 07.07.2023

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Duygu KAYA Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi Yavuz EROL Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Taha ETEM Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım ‘‘Görünür Işık Haberleşmesi ile Veri İletimi ve Performans Analizi’’ Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteğı olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

07.07.2023

Fethiye Merve KAVAK



ÖNSÖZ

Haberleşme, insanlık için her zaman önemli bir ihtiyaç olduğundan geçmiş dönemlerden beri üzerinde çalışmalar yapılmakta ve haberleşme sistemleri hızla gelişim kaydetmektedir. Bu sebeple ilerleyen teknoloji ile birlikte kablosuz haberleşme sistemleri hayatımıza girmiştir. Son yıllarda, kablosuz haberleşme sistemlerinin bir alt dalı olan görünür ışık haberleşmesi yeni bir teknoloji olarak karşımıza çıkmakta ve avantajları ile her geçen gün kullanım alanını genişletmektedir. Bu tez çalışması görünür ışık haberleşmesi uygulamalarına katkı sağlamak amacı ile yapılmıştır.

Yüksek Lisans eğitimim süresince ilgilerinden ötürü, bana yol gösteren, bilgi ve deneyimi ile çalışmamı her açıdan destekleyen kıymetli hocam, tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Duygu KAYA'ya, tez çalışmam katkılarından dolayı, benden yardımlarını ve desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Fatmanur ŞERBET'e, lisansüstü eğitimim süresince her anımda olduğu gibi beni destekleyen, tez yazım sürecimde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Andaç İMAK'a ve son olarak eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri için, her daim yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fethiye Merve KAVAK

ELAZIĞ, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. HABERLEŞME SİSTEMLERİ	8
2.1. Görünür Işık Haberleşmesi	10
2.1.1. Görünür Işık Haberleşmesi Sistemlerinin Teknik Özellikleri	10
2.1.2. Verici.....	11
2.1.3. Alıcı.....	12
2.1.4. Görünür Işık Haberleşmesinin Standartları	12
2.1.5. Görünür Işık Haberleşmesinin Avantajları ve Dezavantajları	13
2.2. Li-Fi (Light Fidelity)	16
2.2.1. Li-Fi Teknolojisinin Çalışma Prensibi	16
2.2.2. Li-Fi'nin Wi-Fi'ye Göre Avantajları.....	18
2.2.3. Verimlilik	18
2.2.4. Kapasite.....	18
2.2.5. Emniyet	19
2.2.6. Güvenlik.....	19
2.2.7. Li-Fi Teknolojisinin Uygulama Alanları	19
3. MATERYAL VE METOT	21
3.1. Modülatörler	21
3.1.1. Optik Modülatörler.....	21
3.1.2. Direkt Modülasyon.....	21
3.1.3. Harici Modülasyon.....	21
3.1.4. Modülatör Çeşitleri	22
3.1.5. Mach-Zender Modülatörü	22
3.1.6. Electroabsorption Modülatörü (EA Modülatör)	23
3.2. Optik Filtreler	24
3.2.1. Frekans Cevabına Göre Filtre Çeşitleri	25
3.3. Sezgisel Optimizasyon	28
3.3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	28
3.4. Optisystem Yazılımı ve Elemanları	29
3.4.1. Rastgele Bit Sayı Üretici (Pseudo Random Bit Sequence Generator)	30
3.4.2. NRZ Darbe Üretici (NRZ Pulse Generator)	31
3.4.3. CW Lazer	31
3.4.4. MZ Modülatör.....	32
3.4.5. APD Fotodedektör (Photodetector APD).....	32
3.4.6. 3R Rejeneratör (3R Regenerator).....	33

3.4.7. OWC Kanal (OWC Channel).....	33
3.4.8. Direkt Modüle Edilmiş Lazer (Directly Modulated Laser Measured).....	34
3.4.9. FSO Kanal (FSO Channel).....	35
3.4.10. BER Analizör	35
3.4.11. Alçak Geçiren Bessel Filtre (Low Pass Bessel Filter).....	36
3.4.12. Alçak Geçiren Butterworth Filtre (Low Pass Butterworth Filter)	36
3.4.13. Alçak Geçiren Gauss Filtresi (Low Pass Gaussian Filter).....	37
3.4.14. Alçak Geçiren Chebyshev Filtre (Low Pass Chebyshev Filter)	37
3.4.15. Alçak Geçiren Raised Cosine Filtre (Low Pass Raised Cosine Filter)	37
3.5. Performans Analizi	38
3.5.1. BER Analizi	38
3.5.2. Q Faktör Analizi.....	39
3.5.3. Göz Yüksekliği (Eye Height) Analizi	39
4. DENEYSEL SONUÇLAR	40
4.1. Uygulama 1: Farklı Hava Koşullarında Çeşitli Modülatör Tiplerinin Sistem Performansına Etkilerinin Karşılaştırılması	40
4.1.1. Hava Koşullarının Sinyal Üzerinde Sebep Olduğu Kayıplar	41
4.1.2. Farklı Modülasyon Teknikleri İçin FSO Sistem Tasarımı	42
4.1.3. Simülasyon Analizi	43
4.2. Uygulama 2: Farklı Filtreler Kullanılarak Tasarlanan Optik Kablosuz Haberleşme Sisteminin Performans Analizi	48
4.2.1. Optik Kablosuz Haberleşme Sisteminde Filtre Kullanımı	49
4.2.2. Farklı Filtre Çeşitleri ile OWC Sistem Tasarımı	49
4.2.3. OWC Sistem Analizi	52
4.2.4. Max. Q Faktör Analizi	54
4.2.5. Göz Yüksekliği Analizi	55
4.2.6. Min. BER Analizi.....	55
4.3. Uygulama 3: Kapalı Alanda Kablosuz Görünür Işık Haberleşmesi Performansının Farklı Filtreler ile Analizi ve Karşılaştırılması.....	57
4.3.1. Kapalı Ortam İçin VLC Sistem Tasarımı	57
4.3.2. Simülasyon Analizi	60
4.3.3. Sistemden Elde Edilen Sinyalin PSO ile Optimize Edilerek Tasarlanmış FIR Filtre ile Filtrelenmesi	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Görünür Işık Haberleşmesi ile Veri İletimi ve Performans Analizi

Fethiye Merve KAVAK

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2023, Sayfa: xiv + 72

Kablosuz iletişim teknolojileri üzerinde her geçen gün artmakta olan veri transferinden dolayı çalışmalar yapılmaktadır. Kablosuz haberleşme teknolojisinin dallarından biri olan Görünür Işık Haberleşmesi (VLC) de bu çerçevede gelişme göstermektedir. Görünür Işık Haberleşmesi gerek sağladığı enerji verimliliği, yüksek bant genişliği, gerekse güvenilirlik açısından diğer haberleşme dallarına göre avantajlı konumdadır. Bu bağlamda Görünür Işık Haberleşmesi temeline dayanan Li-Fi teknolojisi ile ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bu Li-Fi teknolojisi ile oluşturulan sistemlerde, bir LED ampul aracılığıyla veri gönderilerek aydınlatma yoluyla veri iletimi sağlanmaktadır.

Bu tezde, veri iletiminin görünür ışık haberleşmesi ile sağlandığı sistemlerin performansını analiz etmek amacıyla 3 farklı çalışma yapılmıştır. Serbest Uzay Optik İletişimi (FSO), Optik Kablosuz İletişim (OWC) ve Görüş Hattı (LOS) kanal koşullarında farklı filtreleme teknikleri ile tasarlanmış sistemler kullanılarak iletilmiş sinyallerin Bit Hata Oranı (BER) analizi yapılmış, Q faktörü ve Göz Yüksekliği değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda genlik spektrumları da analiz edilen bu sistemlerin farklı parametre değerleri ile elde edilen sinyal sonuçları karşılaştırılmıştır. Son olarak görünür ışık haberleşmesinin farklı bileşenler altındaki iletim performansının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Görünür ışık haberleşmesi (VLC), Li-Fi, Serbest uzay optik (FSO), Optik kablosuz iletişim (OWC), Bit hata oranı (BER), Q faktör

ABSTRACT

Data Transmission and Performance Analysis with Visible Light Communication

Fethiye Merve KAVAK

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

July 2023, Pages: xiv + 72

Due to the increasing data transfer in wireless communication technologies, studies are being conducted to improve wireless communication technology. Visible Light Communication (VLC), which is one of the branches of wireless communication technology, is also developing within this framework. Visible Light Communication is advantageous compared to other communication branches in terms of energy efficiency, high bandwidth, and reliability. In this context, research on Li-Fi technology based on Visible Light Communication has gained momentum in recent years. In systems created with this Li-Fi technology, data transmission is achieved through illumination by sending data through an LED bulb.

In this thesis, three different studies were conducted to analyze the performance of systems where data transmission is achieved through visible light communication. Systems designed with different filtering techniques under Free Space Optical Communication (FSO), Optical Wireless Communication (OWC), and Line-of-Sight (LOS) channel conditions were used to analyze the Bit Error Rate (BER) of transmitted signals, obtain Q-factor and Eye Height values. Additionally, the amplitude spectra of these systems were analyzed, and the signal results obtained with different parameter values were compared. Finally, the transmission performance of visible light communication under different component conditions was evaluated.

Keywords: Visible light communication (VLC), Li-Fi, Free space optical (FSO), Optical wireless communication (OWC), Bit error rate (BER), Q-factor

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrumda görünür ışık dalgalarının gösterimi [35]	9
Şekil 2.2. Görünür ışık haberleşmesi sisteminin blok diyagramı	11
Şekil 2.3. Işık dalgası ve radyo dalgası	14
Şekil 2.4. Işık yoluyla veri aktarımı [54]	16
Şekil 2.5. Li-Fi'nin çalışması [6]	17
Şekil 3.1. Direkt modülasyon [67]	22
Şekil 3.2. Harici modülasyon [67]	22
Şekil 3.3. Mach-Zehnder modülatör yapısı	23
Şekil 3.4. EA modülatörün genel yapısı [66]	24
Şekil 3.5. PSO akış diyagramı	29
Şekil 3.6. Rastgele bit sayı üretici	30
Şekil 3.7. NRZ darbe üretici	31
Şekil 3.8. CW lazer	31
Şekil 3.9. MZ modülatör	32
Şekil 3.10. APD fotodedektör	32
Şekil 3.11. 3R rejeneratör	33
Şekil 3.12. OWC kanal	34
Şekil 3.13. Direkt modüle edilmiş lazer	35
Şekil 3.14. FSO kanal	35
Şekil 3.15. BER analizör	36
Şekil 3.16. Alçak geçiren Bessel filtre	36
Şekil 3.17. Alçak geçiren Butterworth filtre	36
Şekil 3.18. Alçak geçiren Gaussian filtre	37
Şekil 3.19. Alçak geçiren Chebyshev filtre	37
Şekil 3.20. Alçak geçiren Raised Cosine filtresi	38
Şekil 4.1. Direkt modülasyonlu (DM) FSO sistem tasarımı	42
Şekil 4.2. Mach-Zehnder Modülatör (MZ) kullanılmış FSO sistem tasarımı	43
Şekil 4.3. Electroabsorption Modülatör (EA) kullanılmış FSO sistem tasarımı	43
Şekil 4.4. $V=0.3$ km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları ..	44
Şekil 4.5. $V=0.8$ km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları ..	44
Şekil 4.6. $V=4$ km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları	45

Şekil 4.7. V=20 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları ...	45
Şekil 4.8. DM, MZ ve EA Modülatörle tasarlanan sistemin kanal uzunluğunun değişimine göre elde edilen performans grafiği.....	45
Şekil 4.9. V=0.3 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri..	46
Şekil 4.10. V=0.8 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri.	46
Şekil 4.11. V=4 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri...	46
Şekil 4.12. V=20 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri.	47
Şekil 4.13. Bir OWC sistemin blok diyagramı.....	49
Şekil 4.14. Alçak geçiren Gaussian filtre ile tasarlanmış OWC sistem.....	50
Şekil 4.15. Alçak geçiren Bessel filtre ile tasarlanmış OWC sistem.....	50
Şekil 4.16. Alçak geçiren Butterworth filtre ile tasarlanmış OWC sistem.....	51
Şekil 4.17. Alçak geçiren Chebyshev filtre ile tasarlanmış OWC sistem.....	51
Şekil 4.18. Alçak geçiren Raised Cosine filtre ile tasarlanmış OWC sistem.....	51
Şekil 4.19. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Gaussian filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları.....	52
Şekil 4.20. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Bessel filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları.....	52
Şekil 4.21. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Butterworth filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları.....	53
Şekil 4.22. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Chebyshev filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları.....	53
Şekil 4.23. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Raised Cosine filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları.....	54
Şekil 4.24. Alçak geçiren Gaussian, Bessel, Butterworth, Chebyshev ve Raised Cosine filtre ile tasarlanan OWC sistemin kanal uzunluğunun değişimine göre elde edilen performans grafiği	56
Şekil 4.25. Alçak geçiren Bessel filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı.....	58
Şekil 4.26. Alçak geçiren Butterworth filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı.....	58
Şekil 4.27. Alçak geçiren Chebyshev filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı.....	59
Şekil 4.28. Alçak geçiren Gaussian filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı.....	59
Şekil 4.29. Alçak geçiren Raised Cosine filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı.....	59
Şekil 4.30. Sistemin giriş sinyali	60
Şekil 4.31. Filtrelenmemiş sinyal	60
Şekil 4.32. Bessel ve Butterworth alçak geçiren filtreler ile filtrelenmiş sinyaller.....	61
Şekil 4.33. Chebyshev ve Gaussian alçak geçiren filtreler ile filtrelenmiş sinyaller.....	61
Şekil 4.34. Raised Cosine alçak geçiren filtresi ile filtrelenmiş sinyal.....	62
Şekil 4.35. Kapalı ortam VLC sistemin göz yüksekliği analizi.....	62

Şekil 4.36. Yakınsama grafiği	63
Şekil 4.37. Pencere fonksiyonları spektral gösterimleri	64
Şekil 4.38. Fotodiyot çıkışındaki sinyal	64
Şekil 4.39. Filtrelenmiş sinyaller.....	65
Şekil 4.40. Filtrelenmiş sinyallerin farkı	65



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. VLC ve RF haberleşme sistemlerinin karşılaştırılması.....	14
Tablo 2.2. Li-Fi ve Wi-Fi karşılaştırılması	20
Tablo 4.1. Simülasyon parametreleri	41
Tablo 4.2. Kanal uzunluğuna bağlı Max. Q faktörü, göz yüksekliği ve Min. BER değerleri	44
Tablo 4.3. OWC kanal uzunluğuna bağlı Max. Q faktörü değerleri	54
Tablo 4.4. OWC kanal uzunluğuna bağlı göz yüksekliği değerleri	55
Tablo 4.5. OWC kanal uzunluğuna bağlı Min. BER değerleri	55
Tablo 4.6. İletim kanalının özellikleri.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Genlik ölçek faktörü
cm ²	: Santimetrekaare
dB	: Desibel
dBm	: Desibel miliwatt
Gbps	: Saniye başına gigabit
GHz	: Gigahertz
kHz	: Kilohertz
L	: Modülatör kol etkileşim uzunluğu
m	: Metre
Mbps	: Saniye başına megabit
n	: Polinom düzeyi
nm	: Nanometre
q	: Saçılan parçacıkların boyut dağılımı
THz	: Terahertz
V	: Görünürlük
$\Delta\alpha$	: Güç zayıflama sabiti
$\Delta\beta$	: Faz sabiti
ε	: Eşlik düzeyi
λ	: Dalga boyu
λ_0	: Referans dalga boyu
ω	: Açısal frekansı
ω_0	: Sınırlayıcı değer
ω_c	: Kesim frekansı

Kısaltmalar

3R	: Yeniden oluşturma-zamanlama-yeniden şekillendirme
APD	: Çığ fotodiyot
BER	: Bit hata oranı
CSRZ	: Taşıyıcıyı aşan dönüşüz sıfıra dönüş
CW	: Sürekli dalga
DML	: Doğrudan modüle edilmiş lazer
EA	: Electroabsorption
EM	: Elektromanyetik
FDE	: Eşitlenmiş frekans alanı
FOV	: Görüş alanı açısı
FSO	: Serbest uzay optik
LD	: Lazer diyet
LED	: Işık yayan diyet
Li-Fi	: Işık bağlantısı
LOS	: Görüş hattı
MRI	: Manyetik rezonans görüntüleme
MZ	: Mach zehnder
NLOS	: Görüş hattı dışı
NRZ	: Sıfıra dönüş olmayan
OFDM	: Dikgen frekans bölmeli çoklama
OOK	: Açık-kapalı anahtarlama
OSC-FDCE	: Optik tek taşıyıcı frekans alanı kanal eşitleyici
OWC	: Optik kablosuz iletişim
PD	: Fotodiyot
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
RC	: Raised cosine
RF	: Radyo frekans
RFID	: Radyo frekansı ile tanımlama
RGB LED	: Kırmızı-yeşil-mavi LED
RMSE	: Ortalama karekök sapması
RZ	: Sıfıra dönüş
TCP	: İletim kontrol protokolü
UDP	: Kullanıcı veri bloğu iletişim kuralları
VLC	: Görünür ışık haberleşmesi
VLCC	: Görünür ışık ile haberleşme konsorsiyumu
WDM	: Dalgaboyu bölmeli çoğullama
Wi-Fi	: Kablosuz bağlantı alanı

1. GİRİŞ

Haberleşme, insanlar için geçmişten beri önemli bir ihtiyaç durumundayken gelişen teknolojiyle birlikte kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu sebeple, üzerinde sıklıkla çalışmalar yapılan bir alandır. Uzun mesafeler arasında haberleşmeyi sağlayabilmek için kablolar yardımı ile sistemler kurulmuş olsa da bu sistemlerin karmaşıklık, maliyet ve performans gibi dezavantajlarından dolayı kablosuz haberleşme sistemleri önem kazanmış ve üzerinde yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Günümüzde kablosuz haberleşme sistemleri genellikle radyo frekansı (RF) bantlarına dayanmaktadır. Fakat RF spektrumunun önemli eksiklikleri bulunmaktadır ve gün geçtikçe artan veri iletim taleplerini karşılayamayacağı görülmektedir. Bundan dolayı alternatif bir kablosuz haberleşme sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Çözüm olarak çeşitli öneriler bulunmakla birlikte bunlardan biri de görünür ışık haberleşmesi (VLC)'dir.

Yakın zamanda görünür ışık haberleşmesini temel alan Li-Fi (Light Fidelity) adında yeni bir teknoloji geliştirilmiştir. Bu teknolojiye günlük hayatta kullandığımız LED ışık kaynakları ile aydınlatmanın yanı sıra güvenli bir şekilde veri iletimi de yapılabileceği ortaya konulmuştur. İnsan sağlığına herhangi bir olumsuz etkisi bulunmayan bu teknolojiyle ilgili çalışmalar devam etmektedir. Görünür ışık haberleşmesine dayanan ve taşıyıcı olarak ışığı kullanan Li-Fi teknolojisi, ilk kez 2011 yılında Edinburgh Üniversitesi araştırmacıları tarafından geliştirilmiş ve 2012 yılında Tüketici Elektronik Fuarı'nda sunulmuştur [1]. Yakın gelecekte görünür ışık haberleşmesine dayanan Li-Fi teknolojisinin şehir ışıkları, ekranlar, araç ışıkları ve ev aletleri gibi LED bulunduran cihazların kendi iletişim ağlarının oluşumunu sağlayabileceği düşünülmektedir. Li-Fi teknolojisinin gelecekte popüler haberleşme sistemlerinin başında gelebileceği öngörülmektedir.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte günümüzde verimli ve yüksek hızlı kablosuz haberleşme bir ihtiyaç halini almıştır. Bundan dolayı son yıllarda literatürde kablosuz haberleşme sistemleri ile ilgili yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Fakat kablosuz haberleşme sistemlerindeki veri hızlarının üst sınırı Shannon tarafından belirlenmiştir ve belirlenen sınır kablosuz iletişimin bant genişliğine bağlı değişmektedir [2].

Günümüzde kullanılan kablosuz haberleşme sistemleri genellikle RF tabanlıdır. Bilgiye hızlı ve verimli ulaşma ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Buna karşın RF frekans bandı da dolmak üzeredir. Bu doluluk sebebiyle 5G sistemler için yetecek bir frekans aralığı belirlemek zor olacaktır. Dolayısıyla alternatif teknolojilere gereksinim duyulmuş ve bu amaçla çalışmalar yapılmıştır. Çalışılan bu alanlardan biri de optik kablosuz haberleşme sistemlerinin bir kolu olan VLC'yi kapsamaktadır. VLC'nin geçmişinin eski medeniyetlere dayandığı bilinmektedir [3].

VLC sistemlerinde veri, LED ya da LD gibi ışık kaynakları ile gözün algılayamayacağı şekilde hızlı bir şekilde modüle edilerek aktarılmaktadır [4].

Görünür ışık haberleşmesini, aydınlatma ile birlikte kablosuz veri iletimi gerçekleştirebilen ve bunun için ışık yayan diyot (LED)'lerin kullanıldığı yeni bir teknoloji olarak tanımlamışlardır. Görünür ışık haberleşmesi, büyük bant genişliğine sahip görünür ışığı iletişim ortamı olarak kullanmaktadır. Bu teknoloji insan sağlığı için güvenilir olup, yüksek güç iletimine imkân sağlamaktadır [5].

Prof. Dr. Harald Haas'ın 2011 yılında Edinburgh Üniversitesi'nde yaptığı çalışmalar sonucunda icat ettiği Li-Fi (Light Fidelity), veri transferini görünür ışık haberleşmesini kullanarak ışık üzerinden yapmaya yarayan bir teknolojidir. Üzerinde çalışmaların sürdürüldüğü bu yeni teknoloji yapılan deneylerde saniyede 224 Gbps gibi yüksek bir hıza ulaşmayı başarmıştır. Bu hız kullandığımız mevcut internet altyapılarının sağladığı hıza göre oldukça avantajlı bulunmaktadır. Prof.Dr. Harald Haas yalnızca bir LED kullanarak, veri transferi konusunda bir baz istasyonundan daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Li-Fi teknolojisinin çalışma prensibi, insan gözün fark edemeyeceği kadar hızlı bir şekilde yanıp sönmekle veri iletimi sağlayan LED'lere dayanmaktadır [6].

Sandeep Kumar Jain, "Li-Fi teknolojisi üzerine bir inceleme makalesi" adlı çalışmasında Li-Fi üzerine araştırmalar yapmıştır [7].

Al_Barazanchi ve arkadaşları radyo frekansı tabanlı akıllı trafik kontrol sistemlerini, Li-Fi teknolojisi kullanılarak bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Li-Fi teknolojisine sahip 70 araç ve entegre edilmemiş 90 araçtan oluşan bir etnografik araştırma yapılmıştır. Sonuçlar pratik olarak not edilmiş ve bağımlı (Işık tepkisi) ve bağımsız değişken frekans tabanlı (RFID izleme sinyali) arasındaki gerileme çıkarılmıştır. Sanal etnografik araştırma, dar sokaklardaki trafik sıkışıklığının yönetimini iyileştirmeye yardımcı olduğu için Li-Fi teknolojisinin kullanımının daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir [8].

Hassan ve arkadaşları kodlanmış ve kodlanmamış verilerin iletimi için bir uygulama oluşturmuşlardır. Çalışmadaki amaç iletim oranı ve ağ çıkışı dahil olmak üzere çeşitli performans ölçütlerini takip ederek Li-Fi performansını analiz etmektir. Uygulama kısmında NS-3 Ağ Simülasyonu kullanılmıştır. Li-Fi teknolojisinin veri iletiminde güvenilirliğini ölçmek için İletim Kontrol Protokolü (TCP) ve Kullanıcı Datagram Protokolü (UDP) performans kriterleri hesaplanarak gözlemlenmiştir [9].

Anbalagan ve arkadaşları LED'ler yardımı ile araçtan araca iletişim sağlanarak kazaların azaltılması konusunda bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Li-Fi teknolojisi kullanılarak ışık teknolojisi yardımı ile karmaşık kablosuz ağlara ve farklı protokollere olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Yapılan uygulamada gerçekleştirilen prototip hareket eden bir arabanın ön-arkası arasındaki mesafeyi ölçmek için ultrasonik sensör, aracın hızını kaydetmek için U-slot sensörü kullanılmıştır. Elde edilen bilgi Li-Fi vericiye yüklenmektedir. Alıcı bölümü, iletim bölümünden gönderilen tüm verileri toplamak için kullanılan bir Li-Fi modülüne sahiptir. Alınan veriler bir

LCD ekranda araç kullanıcısına gösterilmektedir. Kaza anında aynı bilgiler buluta yüklenerek kaza ile ilgili bilgilerin belirlenmesi için yardımcı olacak bir uygulama olmuştur [10].

Yuvaraju ve arkadaşları sürücünün sürüş sırasında konsantrasyon eksikliği, motor arızası vs. sebeplerden dolayı araçların çarpışma durumunu azaltmak için Li-Fi teknolojisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [11].

Pradhan ve arkadaşları gerçekleştirdikleri bu çalışmada Li-Fi iletişiminin farklı modülasyon teknikleri altında ve çeşitli ortam gürültü kaynaklarını kullanarak performansını analiz etmişlerdir. Alıcının farklı kaynaklardan kaynaklanan ortam gürültü gücü altındaki performansı incelenmiştir. Farklı modülasyon teknikleri uygulanarak; kareleme faz kayması modülasyon tekniğinin darbe genlik modülasyonu, darbe konum modülasyonu ve diferansiyel faz kayması modülasyonuna kıyasla performansının üstün olduğu gözlemlenmiştir [12].

Ismail ve arkadaşları Li-Fi tabanlı ev otomasyon sistemi prototipinin bir uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Sistemde mikrodenetleyici olarak arduino, sıcaklık sensörü, ışık sensörü ve MQ2 gaz sensörü kullanılmıştır. Veri iletiminde Li-Fi teknolojisi kullanılarak ev otomasyon sistemi için ışık spektrumuna dokunulmadığı için daha yüksek veri güvenliği sağlaya bilineceğini önermişlerdir [13].

Eğitim ve tıp gibi alanlarda giderek daha kullanışlı hale gelen Telepresence robotlarının iletişimi için bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Wi-Fi, bluetooth ve Li-Fi teknolojileri kullanılarak iletişim sistemindeki farklılıklar için sonuçlar gözlemlenmiştir [14].

Köse yaptığı çalışmada, OptiSystem 18.1 simülasyon programını üzerinde CSRZ (Carrier Surpassed Return to Zero), RZ (Return to Zero), NRZ (Non-Return to Zero) ve Duobinary modülasyon türlerini kullanarak fiber optik kablo, FSO (Free Space Optical Communication) ve OWC (Optical Wireless Communications) iletim hatları için benzetimler yapmış ve farklı filtreler ile tasarlanan sistemlerde CSRZ modülasyon tekniğinin iletim sistemlerinde kalite farkı oluşturduğunu ortaya koymuştur [15].

Poulouse çalışmasında, Optisystem benzetim programını kullanarak iç mekânda Görünür Işık İletişim sisteminin performansı üzerinde araştırmalar yapmış, hem LOS (görüş hattı) hem de NLOS (görüş hattı dışı) yayılım modellerini kullanarak iç mekânda VLC sistemi için simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Çalışmada, NLOS yayılım modeli ile kurulan VLC sistemi, çift LED verici kullanılarak benzetilmiştir. Bunun amacı, engeller tarafından oluşturulmuş zorlukları aşmak ve NLOS koşulunda sistemin performansını yükseltmektir. Çift LED vericiler, daha fazla iletim gücü sağlamış ve ışık sinyallerini oldukça geniş bir alana yaymak için kullanılmıştır. Bu sayede, engellerin neden olmuş olduğu sinyal zayıflamasını azaltmak ve de iletim kalitesini iyileştirmek hedeflenmiştir. Çift vericilerin kullanılması ile sistem güvenilir bir şekilde çalışarak iç mekân ortamında VLC iletişimde iyi bir performans sergilenmesi amaçlanmıştır [16].

Manivannan ve arkadaşlarının yaptığı çalışma incelendiğinde, görünür ışık iletişiminin hem aydınlatma hem de veri iletişimi için LED'leri kullanan hızla gelişen bir araştırma alanı olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, Optisystem simülasyon aracını kullanarak beyaz bir LED'nin iç mekânda gerçek ölçümlere dayanan kanal özellikleri araştırılmıştır. Görünür Işık İletişim sisteminin performansını değerlendirmek için farklı bit hızları ve bağlantı mesafeleri için kalite faktörü ve BER (Bit Hata Oranı) değerlerinin logaritmasını kullanılmıştır. Bu sistem, 3 metrelik bir bağlantı mesafesine kadar tam 2 Gbps veri hızını destekleyebilmektedir ve bu sistemin Q faktörü 5.76 olarak ölçülmüştür. İletişim için NRZ-OOK ve RZ-OOK modülasyon çeşitleri kullanılmıştır. Ayrıca, VLC sistemi performansını dış atmosferik ışık etkisi altında da değerlendirilmiştir. Tasarlanan sistemde, NRZ-OOK sinyaline kıyasla RZ-OOK için daha iyi bir kalite faktörü sağlandığı görülmüş ve bununla birlikte, iç mekandaki VLC sisteminde, dış aydınlatma koşulları -80 dBm'nin üzerine çıktığı durumda alınan sinyal önemli ölçüde bozulmaya maruz kalmaktadır [17].

Savaşcıhabeş yaptığı çalışmada, yüksek hızda veri iletimi sağlayabilen, dış etkenlerden dolayı az bozunma yaşayan ve görünür ışık kullanarak iletim sağlayan görünür ışık haberleşmesi sistemlerini incelemiştir. Çalışmada temel olarak görünür ışık haberleşmesinde (OWC) önemli bir yeri olan güç analizi ele alınmıştır. OWC sistemlerinin performansını değerlendirmek ve farklı senaryolarda nasıl davrandıklarını anlamak amacıyla benzetimler yapılmıştır. Kurulan sistemin çıkışının zaman ve frekans domenindeki değişimleri ile birlikte alıcıdaki nominal güç değişimleri analiz edilmiştir. Yapılmış analizler sonucunda, 14dB seviyelerinde yaklaşık 200Mbps veri hızlarına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bu da RF (Radyo Frekansı) teknolojisinin kısıtlı spektrum dezavantajına sahip olduğu durumlarda, Görünür Işık Haberleşmesi (OWC) sistemlerinde VLC kullanımı ile girişimsiz ve girişimli olan kanallarda yüksek veri hızlarına ulaşmanın olası olduğunu göstermektedir [18].

Fişne ve arkadaşı yaptıkları çalışmada, görünür ışık haberleşmesi için kullanılan kanalın yapısını incelemişlerdir. Bu inceleme, benzetim çalışmaları ile desteklenerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, iletişimi etkileyen faktörler arasında alıcı ve verici arasındaki geometrinin analizi yapılmıştır. Bina içi VLC sistemlerinin modülasyon karakteristikleri çalışmanın odak noktası olmakla birlikte iletişim kanalının yapısı ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen gözlemler üzerine yapılan analizlerde, alıcıdaki sinyal gürültü oranının yüksek olmasının iletişim kapasitesini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca farklı aydınlatma seviyelerinin kullanıldığı iletişim sistemleri için modülasyon tekniklerinin geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır [19].

Sert ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, optik iletişim sistemleri ve bunun bir uygulaması olan görünür ışık iletişim sistemi hakkında önemli teknik ve işlemsel üstünlüklerin olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmanın temel noktası ise optik tek taşıyıcılı VLC sistemlerinin çok yönlü optik kanal ortamında bozulan verileri onarmak için tek taşıyıcılı frekans bölgesi kanal

denkleştiricisinin kullanılması önerisidir. Bu öneri doğrultusunda, bilgisayar benzetim çalışmaları ile 5, 6 ve 10 dallı olan optik kanal ortamında OSC-FDCE yönteminin başarımı, bit hata oranı (BER) performans ölçütü üzerinden test edilmektedir. Benzetim sonuçlarına göre, OSC-FDCE yönteminin VLC-OFDM-FDE yönteminden daha iyi bir performansa sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu, OSC-FDCE yönteminin, bozulmuş verilerin düzeltilmesi ve iletişim performansının iyileştirilmesi konularında daha etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, optik iletişim sistemlerinde çok yollu ortamlarda kanal denkleştirme yöntemi olarak OSC-FDCE'nin kullanımının önerildiğini ve bu yöntemin VLC sistemlerinde daha iyi performans sağladığını ortaya koymaktadır. Bu tarz çalışmalar, optik iletişim sistemlerinin geliştirilebilmesi ve optimize edilebilmesi için ciddi bir katkı sağlamaktadır [20].

Aziz ve arkadaşları görünür ışık iletişim sistemlerinde performansı değerlendirme amacı ile Optisystem benzetimini kullanmışlardır. Kurdukları sistem için Mach Zehnder modülasyonu kullanmışlardır. Sistem temel olarak iletişim sistemi performansını farklı parametreler altında değerlendirmek için tasarlanmıştır. Değerlendirmeye yardımcı olan parametreler arasında verici ile alıcı arasındaki mesafe, sistemin modülasyon hızı ve iletim ortamındaki zayıflatma oranı gibi faktörler bulunmaktadır. Çalışmada edindikleri sonuçlar alıcı ve verici arası mesafe arttıkça gürültü seviyesinin arttığı yönündedir. Ve bu artışın sinyalde güç kaybına yol açtığını tespit etmişlerdir [21].

Yaşar ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışma tek taşıyıcılı görünür ışık haberleşme sistemlerinin çok yollu sönümlemeli optik kanallardaki performansının incelenmesi üzerinedir. Çok yollu optik kanalların varlığı, iletilmek istenen verilerde bozulmalara sebep olmaktadır. Yapılan çalışmada, dengeleyiciler arasında karşılaştırmalar yapılarak, kodlanmamış ve kodlanmış bit hata oranı performanslarını görmek için simülasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda katlamalı kodlayıcı ve turbo kodlamalı sistemlerin, her bir iterasyonda mevcut hata tabanını tamamen ortadan kaldırdıklarını gözlemlemişlerdir. Bu da kodlanmış halde olan verilerin iletiminde daha etkili bir hata düzeltme yeteneği sağladıklarını göstermektedir [22].

De Lausnay ve arkadaşları görünür ışık iletişimi (VLC) uygulamalarında modülasyon tekniklerinin performansını elde edebilmek için bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Manchester kodlaması için hazırlanan sistemlerde, eşleştirme filtresi işleminden sonra alınmış olan sinyalin istatistiki olarak Gauss dağılımlı olduğu ortaya konulmuştur. Bu, Gauss dağılımları için kalite fonksiyonunu kullanarak Bit Hata Oranı (BER) değerleri tahmininde bulunmayı mümkün kılmışlardır. Elde edilen sonuçlar, tahmini BER'in alıcı tarafındaki örnekleme hızına bağlı olduğunu ortaya koymuştur [23].

Madavi ve arkadaşları, diğer kablosuz iletişim yöntemlerine kıyasla daha güvenli bir iletişim türü olan kapalı mekanlarda ve açık hava uygulamalarında geniş bir yelpazeye sahip olan görünür ışık iletişimi üzerinde çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada bir mobil telefon kullanılarak

hazırlanan görünür ışık iletişiminde alınan ışık, karanlık ve de aydınlık şeritler halinde algılanmaktadır. Ve sonra alınan bu ışık, bilgisayar ortamında MATLAB kullanılarak çözümlenmiştir. Kullanılan LED ışığın parlak noktasının mevcut girişiminin azaltılması ve de VLC iletişiminin kanal mesafesinin uzatılması için farklı görüntü işleme türleri kullanılmıştır. Görüntü işleme sayesinde veri iletiminde performans artışı kaydedilmiştir [24].

Zafrilla ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada görünür ışık iletişimi için MATLAB bir benzetim aracı olarak kullanılmıştır. Benzetim aracı, verici kısmında yalnızca bir adet LED ile alıcı kısmında bir adet fotodiyot (PD) kullanmışlardır. Hazırlanan benzetim sisteminde LED ve PD özellikleri ile konumlarının değerlendirilmesine olanak sağlanırken, doğrudan gelen ışınlar ve birinci dereceden yansımakta olan ışınlar da dikkate alınmıştır. Benzetimden elde edilmiş sonuçlar, kullanılan MATLAB aracının VLC iletişimi çalışmalarında oldukça büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir [25].

Putra ve arkadaşları çalışmalarında, RF kablosuz haberleşme sistemlerinin tamamlayıcısı olarak, iletilmek istenilen veri için ışığı sinyal olarak kullanmakta olan Optik Kablosuz İletişim (OWC) teknolojisini alternatif olarak kullanmışlardır. Optik tabanlı iletim sisteminin avantajlarının yüksek kapasite ve düşük gecikme süresi olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmanın benzetim sonuçlarından elde edilen verilere göre, Serbest Uzay Optiği (FSO)'nun, mevcut veriyi daha da uzak mesafelere iletebilme ile farklı hava koşullarında çok daha iyi bir performans ile sürdürebilme avantajına sahip olduğu görülmüştür [26].

Princy ve arkadaşları, Optisystem benzetim programı ile Mach Zehnder Modülasyon türü üzerinden kurdukları sistemde görünür ışık iletişiminin performansını incelemişlerdir. Benzerim programı ile çeşitli bağlantı mesafelerindeki Bit Hata Oranı (BER) ve kalite değerlerini analiz etmişlerdir. Kurmuş oldukları sistem, harici gürültü etkisi olmadan 50 metre kadar bir bağlantı mesafesi için 5 Gbps veri hızı ile 15.71 kalite faktörünü desteklemiştir. Harici gürültü etkisi söz konusu olduğunda ise kurdukları sistem 20 metre bağlantı mesafesi için 2 Gbps veri hızı ile 11.935 kalite faktörünü desteklemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar harici gürültü etkisinin bulunduğu sistemin kalitesinin olmayan sisteme göre düşük olduğunu ortaya koymuştur [27].

Al-Khaffaf ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Kablosuz optik iletişim modellerinden biri olan OWC modeli ele alınmıştır. Bu model ile kurdukları sistemde küçük hücre ağları için görünür ışık iletişiminin bir bölümü olarak kablosuz bir bağlantı kanalı ile optik sinyal kullanarak, yaklaşık 320 Mbps veri hızına sahip dijital sinyal iletimi için öneride bulunmuşlardır. Sistemin benzetim sonuçları, 10 m kablosuz bağlantı mesafesinde düşük bir hata oranı ve yüksek Q faktörü ile 320 Mbps veri hızının başarı ile iletildiğini göstermiştir. Bu çalışmada RF girişimsiz ve düşük maliyetli bir optik bağlantı sağlanabileceğini göstermiştir.[28]

Refas ve arkadaşları araçlar arası haberleşmenin görünür ışık iletişim sistemi ile sağlanması için bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu haberleşme sistemi için güvenilirliğin değişik

çevresel faktörlerden etkilendiği bilinilmektedir. Bu çevresel faktörler doğrudan bağlantısının kopması, iletişimin kalitesi ve iletim hızı için gerekli verici gücünün sağlanabilmesine atmosfer kaynaklı hava koşullarıdır. Yürütülen çalışmada bu haberleşme sistemi için çoklu atlama röle sistemlerinin kullanımı önerilmiştir. Kurulan sistemde araçlar birer kablosuz röle olarak çalışmaktadır. Kaynak araçtan direkt gelen sinyali almakta çözümlemekte ve alıcı hedefteki araca ulaşana dek bir sonraki araca tekrar ileterek iletişimi sağlamaktadır. Araçlar arası haberleşme sisteminin performansını maksimum derecede sağlamak ve maksimum iletişim mesafesinin türetilmesi için yapılan çalışma, yalnızca bir atlama rölesi için kötü hava koşullarında dahi 50 metreden fazla bir bağlantının mümkün olduğunu göstermiştir.[29]

Esmail ve arkadaşlarının çalışmasında sisli havanın serbest uzay optik (FSO) sistemlerinde bir sorun kabul edildiği belirtilmiştir. Sisi hava koşullarının sistemlerde zayıflamaya neden olduğunu belirten çalışmacılar, sis zayıflamasının doğru olacak şekilde modellenmesi gerektiğini açıklamışlardır. Birleşik kanal zayıflama modeli türeten çalışmacılar, önerdikleri modelinin literatürde mevcut olan zayıflama modellerine göre RMSE oranının düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmacılar aynı zamanda, kurulan FSO sistemin sinyal gürültü oranını, bit hata oranını ve kanal kapasitesini de içeren farklı performans ölçütlerini de incelemişlerdir. Sonuçlar, sis oranı fazla olan iletişim ortamlarında haberleşme bağlantısının genellikle kısa mesafeli veri iletimini sağladığını göstermiştir [30].

Haberleşme sistemlerinde, veri iletiminin doğru şekilde gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ancak veri iletimi çeşitli faktörlerden etkilenebilmekte ve bozulmalara uğrayabilmektedir. Kablosuz haberleşme sistemlerinin alt dallarından biri olan görünür ışık haberleşmesi (VLC)'nin de veri iletimi esnasında sınırlayıcı faktörleri olduğu bilinmektedir. Bu sınırlayıcı faktörlerin iyileştirilmesi ve çözümlenmesi adına çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında görünür ışık haberleşmesi uygulamalarına katkıda bulunmak amacıyla 3 farklı uygulama yapılmıştır. Uygulamalar, Optisystem benzetim programında tasarlanmıştır. Uygulamalarda kurulan sistemlerin analizi ise Optisystem ve Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde haberleşme sistemleri tanıtılmış, üçüncü bölümünde ise uygulamalarda kullanılan bileşenlerin ve analiz süreçlerinin açıklaması yapılmıştır. Tezin dördüncü bölümünde yer alan uygulama 1'de farklı hava koşulları baz alınarak çeşitli modülatör tipleri ile sistemler tasarlanarak performanslarda karşılaştırmalar yapılmıştır. Uygulama 2'de farklı filtreler kullanılarak optik kablosuz haberleşme sistemleri tasarlanmış ve kurulan sistemlerin performans analizi yapılmıştır. Uygulama 3'te ise kapalı alan ortamında tasarlanan kablosuz görünür ışık haberleşmesi sistemlerinden elde edilen sinyaller, çeşitli IIR filtreler ve optimizasyon yardımıyla tasarlanmış FIR filtre ile filtrelenmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır.5. bölümde ise tez çalışmasının sonuçlarına yer verilmiştir.

2. HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Haberleşme, insanlık tarihinin en eski dönemlerinden bu yana insanoğlunun birincil ihtiyaçları arasında yerini almıştır. İnsanlar, ilk çağlardan beri en önemli ihtiyaçlarından biri olan haberleşmeyi sağlayabilmek için ilkel yöntemlere başvurmuşlardır. Daha sonrasında gelişen teknoloji ile ilerleyen haberleşme sistemleri insan hayatında büyük bir yer kaplamaya başlamıştır. İnsan hayatını kolaylaştırmak ve ihtiyaçlarını karşılamak adına haberleşmenin kullanılması, bu sistemlerin geliştirilmesine ve ilerlemesi adına çalışmalar yapılmasına zemin hazırlamıştır. Geçmişten günümüze haberleşme sistemleri ile ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Haberleşme sistemlerinin temeli, gönderilen bir verinin en iyi şekilde alıcıya ulaştırılmasına dayanmaktadır. Fakat kayıpsız bir haberleşme sistemi mümkün olamayacağı için, sistemlerde en az seviyedeki kayıp ile veriyi göndermek esastır. Haberleşme sistemleri, çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilmek ile birlikte, temelde kablolu haberleşme ve kablosuz haberleşme olarak iki başlıkta incelenebilmektedir.

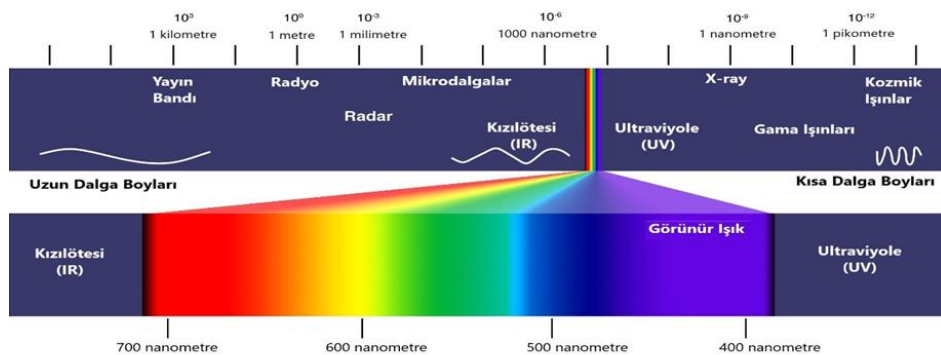
Kablolu haberleşmede bilgi sinyallerinin aktarılabilmesi için iletim ortamı olarak; bakır kablo, koaksiyel kablo ve fiber kablo kullanılır. Uzun mesafeli haberleşme için maliyeti fazla olan, kısa mesafeli haberleşme için ise karmaşık bir görüntüye sebebiyet veren kablolu haberleşme verimli bir seçenek olarak görülmemiştir. Aynı zamanda artmakta olan veri oranına karşın, veriye hızlı bir şekilde ulaşma ihtiyacı insanları haberleşmede yeni yollar aramaya yöneltmiştir. Mekanik anlamda ilk kablosuz optik haberleşme sistemi, Claude Chappe tarafından 1792 yılında geliştirilmiş olan mekanik telgraf sistemidir. Bu sistemde optik iletişim, birbirlerinin görüş mesafesinde bulunan kulelere yerleştirilmiş olan ve ucunda iki adet hareketli kol bulunan direklerle sağlanmıştır. Bu kolların çeşitli pozisyonları farklı işaretleri temsil etmiş ve bu pozisyonlar kulelerde yer alan teleskoplar sayesinde gözlemlenmiştir [31]. İnsanoğlunun RF tabanlı ilk kablosuz haberleşme deneyimi ise 1897 yılında, Marconi tarafından geliştirilmiş olan kablosuz telgraf ile başlamıştır [32]. Son yıllarda hızla gelişmekte olan yarı iletken temelli ve elektronik üzerine yoğunlaşan teknolojiler, haberleşme sistemlerinde önemli teknik ilerlemelere de yol açmıştır. Kablolu haberleşme, gelişen bu teknolojilerle birlikte birçok alanda yerini kablosuz haberleşmeye bırakmıştır.

Günümüzde kablosuz haberleşme sistemleri çoğunlukla Radyo Frekansı (RF) tabanlı olmakla birlikte, yıllar içerisinde bu konuda birçok çalışma yapılmış ve kablosuz haberleşme sistemlerini geliştirebilmek amacıyla birçok farklı sistem gerçekleştirilmiştir. Tüm bu gelişmeler sonucunda haberleşme sistemlerinin kullanım alanları son derece artmıştır. Bu kadar gelişmeye rağmen RF tabanlı kablosuz haberleşme sistemleri sağladığı avantajların yanında çeşitli dezavantajlar ve eksiklerle karşımıza çıkmaktadır. RF, elektromanyetik spektrumda 3 Kilohertz

ile 300 Gigahertz arasında olan aralığı kapsamaktadır. Fakat, RF bandındaki spektrum tahsisi hem ulusal hem de uluslararası düzeyde belirlenmiştir ve RF bandının bir alt bandını kullanmak için lisans gerekmektedir [33]. Bu durumdan dolayı RF tabanlı kablosuz haberleşme belirli bir aralıkta tutularak kullanımı kısıtlanmaktadır. Bunun yanı sıra günümüzde yüksek miktardaki veri oranı ile belirlenen bu aralığın dolmak üzere olması da bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu problemi çözmek ve söz konusu kısıtlamaların önüne geçebilmek amacıyla RF tabanlı haberleşmeye alternatif olabilecek yeni teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektromanyetik spektruma bakıldığında hem geniş hem de lisanslandırılmamış bir bant aralığına sahip görünür ışık bandı dikkat çekmektedir. Görünür ışık bandında frekans aralığı 380 nm – 750 nm olduğundan ötürü, burada veri iletiminin belli bir zaman aralığında sonsuz genişliğe sahip olduğu söylenebilir [34]. Bu durumlardan dolayı son yıllarda Görünür Işık Haberleşmesi (VLC) üzerinde yapılan çalışmalar hızlanmıştır.

Görünür ışık haberleşmesi (VLC)'de, bilgiler ışık sinyalleri aracılığıyla aktarılmaktadır. Yani görünür ışık haberleşmesinde aydınlatmanın yanı sıra haberleşme ihtiyacı da aynı anda karşılanabilmektedir. Bu durum enerji tüketimini sınırlandırarak, daha ekonomik bir haberleşme sağlamaktadır. Ayrıca ışık, kapalı alanlarda duvar gibi ışığı geçirmeyen engellere maruz kalacağı için bu haberleşmede, diğer haberleşme sistemlerine göre veri güvenliği daha iyi bir şekilde sağlanabilmektedir. Bu haberleşme sisteminde aydınlatma ve haberleşme işini sağlamak için ışık yayan diyotlar (LED'ler) kullanılmaktadır ve bu LED'lerin insan sağlığına herhangi bir zararı bulunmamaktadır. Bu nedenlerden ötürü görünür ışık haberleşmesi, bilhassa kapalı alanlarda, güvenli, sağlıklı ve aynı zamanda ekonomik bir haberleşme imkânı sağlayan teknoloji olarak nitelendirilebilir. Görünür ışık haberleşmesi, RF tabanlı haberleşme sistemleri ile karşılaştırıldığı zaman özellikle kapalı alanlarda avantaja sahip olan VLC'nin çeşitli kullanım alanları ile günlük hayatta yerini almaya başladığı, ilerleyen yıllarda daha da geliştirilmesi için bu konuda birçok çalışmanın yapılacağı öngörülmektedir. Şekil 2.1'de Elektromanyetik spektrumda görünür ışık dalgalarının bir gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrumda görünür ışık dalgalarının gösterimi [35]

2.1. Görünür Işık Haberleşmesi

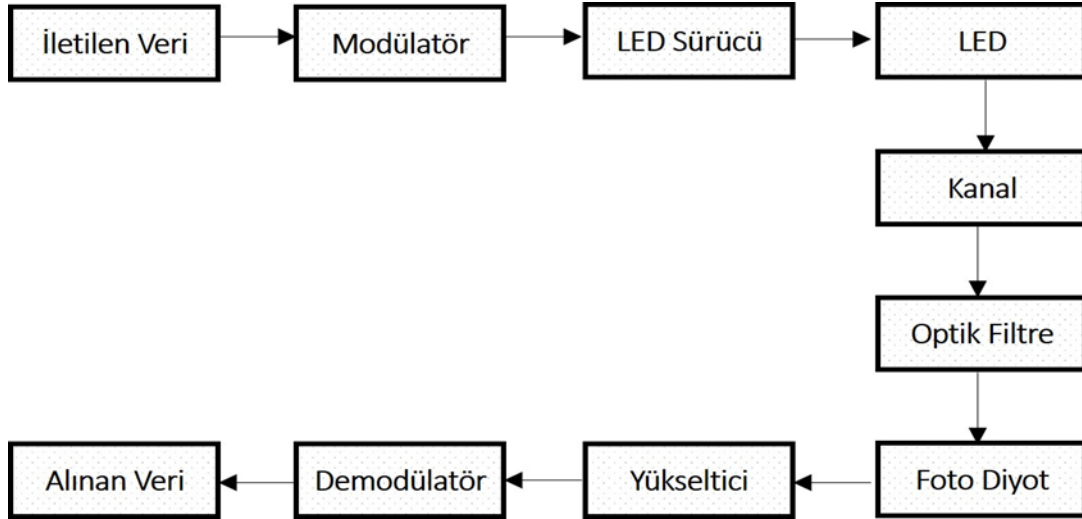
Görünür Işık ile Haberleşmesi (VLC) ile ilgili yapılan araştırmalar ilk kez Japonya'da başlatılmıştır. 2003 yılında Japonlar, kendilerine ait Görünür Işık ile Haberleşme teknolojilerini standardize ederek, farklı protokollerin ve çeşitli uygulamaların karmaşıklığını önlemek, ekonomik sistem kullanımını artırmak, Görünür Işık ve haberleşme ile ilgili kamusal farkındalığı arttırmak için Görünür Işık ile Haberleşme Konsorsiyumu (VLCC) kurmuşlardır [36].

Görünür Işık Haberleşmesi (VLC), Optik Kablosuz Haberleşmenin bir kolu olmakla birlikte, ışık spektrumunun kullanıldığı bir iletişim teknolojisi. Bugün gelişmekte olan bu teknoloji, kablosuz kişisel alan ağlarındaki RF tabanlı iletişim sistemlerine bir alternatif olarak görülmektedir. Görünür ışık haberleşmesi (VLC), 380 nm ile 750 nm dalga boyları arasında bulunan görünür ışık ile sağlanır. Görünür ışık haberleşmesi, Bant genişliği yönünden bakıldığında yaklaşık olarak 400 THz genişliğinde bir iletişim bandına sahiptir. Işık yayan diyot (LED) kullanılarak gerçekleştirilen bu teknoloji, LED'lerin hem iletişim hem de aydınlatma fonksiyonlarını birlikte gerçekleştirmesinden ötürü avantajlı konumdadır ve kullanım alanlarının gün geçtikçe arttığı görülmektedir. LED'ler, elektromanyetik spektrumdaki renk kullanımına göre farklılaşabilmektedir. LED'lerin single LED, COB LED, RGB (kırmızı, yeşil, mavi) LED gibi çeşitleri bulunmaktadır.

Görünür Işık haberleşmesi sistemde, LED'lerde aydınlatmanın sağlandığı ışığın şiddetinin, insan gözü ile fark edilemeyecek kadar yüksek frekanslarla ve çok daha hızlı bir şekilde modüle edilmesi ile haberleşme sinyalleri oluşturulur. Böylece LED'ler hem aydınlatma hem de veri iletimi görevini yerine getirmiş olurlar. Bu durum aynı zamanda tasarruf edilmesini sağlarken, LED'lerin uzun ömürlü olmaları ve EM girişiminden etkilenmemeleri ise daha sağlıklı bir iletişimin kurulmasına neden olmakta ve bu da VLC sisteminin popüleritesini artırmaktadır. LED'lerden yayılan görünür ışığın duvarları geçememesinden ötürü güvenli bir kablosuz haberleşme imkânı sunan VLC sistemi, aynı zamanda LED'lerin yayılım mesafesinden dolayı kısa menzilli bir iletişim teknolojisi olmak durumundadır.

2.1.1. Görünür Işık Haberleşmesi Sistemlerinin Teknik Özellikleri

Görünür Işık haberleşmesi (VLC) sisteminde, Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, verici bölümü; modülatör, optik kaynak ve sürücü devresinden oluşurken, alıcı bölümü ise optik detektör, yükselteç ve demodülatörden oluşmaktadır [37]. Bir VLC sisteminin çalışma prensibi incelendiği takdirde sürücü devresinin, LED'lerden geçen akımı, iletilecek olan işarete göre kontrol edip anahtarlama frekansını değiştirerek LED'lerden yayılan ışığın parlaklığını bu şekilde modüle ettiği görülmektedir. Alıcı kısmında ise optik detektöre ulaşmış olan modüleli ışığın gücü ile ilişkili olacak şekilde akım üreterek de modülasyonu gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.2. Görünür ışık haberleşmesi sisteminin blok diyagramı

2.1.2. Verici

Verici bölümü, veriyi optik ortam üzerinden görünür ışık ile gönderebilen ve iletilere dönüştüren kısımdır. Vericinin temel amacı ışığı yayarken aynı zamanda veriyi iletmektir ve veriler iletilirken aydınlatma ve sinyal verme amacı da yerine getirilmelidir. Verici titreşime maruz kalmayacak şekilde stabil yapıda olmalıdır [38]. Görünür ışık haberleşmesi (VLC) sisteminin vericisinin ana bileşeni; kablosuz iletişim ve aydınlatma işini aynı anda gerçekleştirebilen çift işlevli LED'lerdir. LED'ler ışığın belli dalga boylarını yayabilen yarı iletken malzemeden oluşan bir diyot türüdür. LED'lerden yayılan ışığın rengi yapımında kullanılan malzemelere ve yapısına bağlıdır fakat LED'ler aydınlatma amacıyla kullanıldığında beyaz ışık yaymaları gerekmektedir. Beyaz ışık ise iki yolla üretilebilir. Genellikle fosfor kaplı mavi LED'ler kullanılmaktadır. Fosfor kaplamalar üretilen mavi ışığa ait spektrumu diğer renklere yayar, böylece görünen ışık beyaz renk olur. Fakat fosfor kaplamaların uzun gevşeme süresi görünür haberleşme sisteminde veri hızını sınırlamaktadır. Beyaz ışık üretmede kullanılan ikinci yol ise ana renkleri birleştirecek şekilde üretilmiş çok renkli LED'ler kullanmaktır. RGB (kırmızı, yeşil, mavi) LED'lerin yaydıkları ışık kullanılan bu renklerin karışımı olan beyaz renk olarak algılanır. Bu cins LED'lerin bant genişliği de diğerlerine göre çok daha yüksektir, fakat yapıları da bir o kadar karmaşıktır. LED'den önce yer alan sürücü devresi, LED'lerden geçmekte olan akımı kontrol edip, anahtarlama frekansını değiştirerek LED'den yayılan ışığın parlaklığını ayarlama görevini üstlenir. LED'in, güç tüketimi, verilerde sinyal zayıflamalarının en aza indirilmesi ve görünür ışık haberleşmesi (VLC) sisteminin hızının artırılması yine sürücü devresi sayesinde sağlanmaktadır. VLC sisteminde kullanılacak olan modülasyon tekniğinin seçimi ise sistemde ihtiyaç duyulan sinyal gücü, veri hızı ve maliyet durumu göz önüne alınarak yapılmaktadır.

2.1.3. Alıcı

Alıcı bölümü, modüle edilmiş ışık demetinden veriyi çıkarmak için kullanılan sisteme ait kısımdır. Yani, bu kısımda optik detektör üzerine düşen ışığın yoğunluğunda oluşan değişiklikler elektriğe dönüştürülmektedir. Görünür haberleşme sistemlerinde genellikle kullanılan detektör tipi çığ foto diyot ya da p-i-n tipi detektördür fakat güneş paneli kullanıldığı da bilinmektedir [39]. Işık, önce dekoder modülü ile demodüle edilip daha sonra kodlanarak elektrik sinyaline dönüştürülmektedir. Dekoder olarak FPGA gibi bir paralel işlem yapıcı veya bir mikro denetleyici kullanılabilir. Alıcı performansı, sistemin genel performansı üzerinde büyük etkiye sahip olduğundan ötürü parazitlere karşı dayanıklılık ve iletişim alanı üzerindeki etkileri de göz önüne alınarak Görünür ışık haberleşme alıcısı dikkatle tasarlanmalıdır [40]. Görünür ışık haberleşmesi sisteminde performansı artırmak için kullanılması gereken zorunlu bloklara ek olarak sisteme farklı işlevler için çeşitli bloklar eklenebilir. Bunlardan biri optik filtrelerdir. Görünür ışık haberleşmesi alıcıları yüksek hızlı iletişime imkân sağlayan ve yüksek bant genişliğine sahip elemanlarla kurulur fakat vericiden alması gereken ışığın yanı sıra alıcı devre, ortamda bulunan suni veya doğal ışığa da maruz kalır. Alıcı devre bu istenmeyen spektrum bileşenlerini reddetmek için optik filtre kullanır. Optik filtre aynı zamanda girişim sinyallerinin sebep olduğu gürültüyü de filtreler. Alıcıda fazla güç toplayabilmek için büyük alanlı detektör kullanmak avantajlı olabilmektedir, fakat bu durum gürültü ve maliyeti artırırken alıcının bant genişliğinin azalmasına sebep olacaktır. Bu sebeple detektör alanını büyütmekten ziyade süzme alanının yüzeyinde ışığı yoğunlaştırarak efektif toplama alanını artırmaya yarayan yoğunlaştırıcı mercekler kullanılmaktadır. Bu sayede detektör alanı kapasitansı büyük ölçüde etkilenir bu durum da kapasitenin yanı sıra bant genişliğini etkiler.

2.1.4. Görünür Işık Haberleşmesinin Standartları

Görünür ışık haberleşmesi teknolojisinin gelişmesi ve kullanım alanının artmasından dolayı ulusal ve uluslararası standardizasyon kuruluşlarının dikkatini çekmiştir. VLC teknolojisindeki ilerlemeler sonucunda medya erişim kontrolü katman protokollerini ve fiziksel katman protokollerini uyumlu hale getirebilmek için gerekli standartları geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda görünür ışık haberleşmesinin haberleşme amacıyla kullanılabilmesi için çözüme ulaştırılması gereken bazı durumlar olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durumlar;

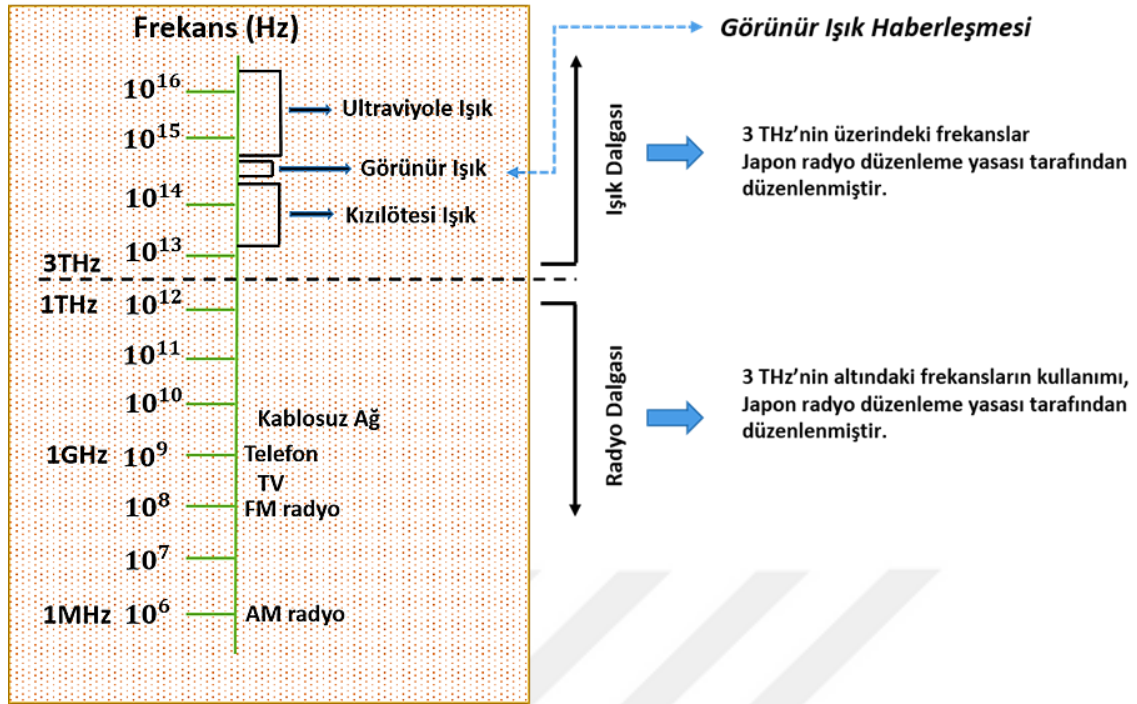
- Karartma desteği,
- Titreşimin azaltılmasıdır

Titreşim, ark oluşumu veya ışık yoğunluğu dalgalanmaları gibi zamana bağlı değişen yüklerin sebep olduğu rahatsız edici ve istenmeyen bir sorundur [41]. Işıktaki meydana gelen titreşimler

insanlarda baş ağrısı gibi sağlık sorunlarına da yol açabileceğinden dolayı ışık yoğunluğundaki değişimlerin insan gözünün algılayabileceğinden daha hızlı sağlanması gerekmektedir [42]. IEEE 802.15.7 standardı titremenin yol açtığı zararlı etkilerden korunmak için titremenin 200 Hz'den hızlı olması gerektiğini önermektedir [43]. Dolayısıyla görünür ışık haberleşmesi için kullanılan modülasyonun yüksek veri hızı sağlamanın yanı sıra titremeyi de azaltması gerekmektedir. Çeşitli aktiviteler için farklı aydınlık seviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır [44]. Örneğin, ofis veya ev ortamında 300-1000 lüks aralığında yüksek bir aydınlatma seviyesi gerekmektedir [45]. Karartma desteği, bu aralığın kontrolünü sağlamaktadır. Karartma kavramı aydınlatma elemanlarının daha az enerji tükettiği ve kullanım ömrü açısından avantajlı olması anlamına gelmektedir [46]. LED teknolojisindeki gelişmeler sonucunda enerji tasarrufu sağlamak amacıyla LED'i karartmak ve istenilen seviyeye getirmek mümkün olmuştur. Bu karartma yapılırken haberleşmenin karartmadan etkilenmemesine dikkat edilmelidir. Verilerin herhangi bir karartma seviyesinin desteklenebileceği şekilde modüle edilmesi gerekmektedir. IEEE 802.15.7 standardında karartma desteği ve titreşim konularına yönelik fiziksel standartlar belirlenmiş bulunmaktadır [47].

2.1.5. Görünür Işık Haberleşmesinin Avantajları ve Dezavantajları

Görünür ışık haberleşmesi (VLC), RF haberleşmesine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptir. VLC, RF haberleşmesine göre bant genişliği ve hizmet açısında avantajlıdır. Ancak, hareketli kullanım ve kapsama alanı açısından RF haberleşmesine göre dezavantajlı olduğu bilinmektedir. Şekil 2.3'de ışık dalgası ve radyo dalgası detaylandırılmıştır. Aydınlatmanın olduğu kapalı alanlarda kullanılabilen VLC'nin kullanım alanları oldukça fazladır. VLC teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte kapalı alanlarda RF haberleşmesinin yerini alabilmesi söz konusu olmaktadır. Aynı zamanda kaynak temini ve güç tüketiminin az olması da VLC sistemlerini RF haberleşme sistemlerine göre avantajlı kılmaktadır. VLC sistemleri gerek düşük maliyetli oluşu gerekse veri iletiminde harcadığı düşük güçten kaynaklı karbondioksit emisyonunu azaltarak insan sağlığına zarar vermeyen yeşil bir haberleşme teknolojisi olmasından dolayı avantajlı konumdadır. Tablo 2.1'de VLC ve RF sistemlerinin karşılaştırması yer almaktadır.



Şekil 2.3. Işık dalgası ve radyo dalgası

Tablo 2.1. VLC ve RF haberleşme sistemlerinin karşılaştırılması

Özellik	VLC	RF
Bant Aralığı	400THz-785 THz	3kHz-300 GHz
Sistem Karmaşıklığı	Düşük	Yüksek
Mesafe	Kısa	Kısa-Uzun
Yayın Alanı	Sınırlı	Geniş
Elektromanyetik Girişim	Yok	Var
Güvenlik	İyi	Kötü
Maliyet	Düşük	Yüksek
Kapsama Alanı	Aydınlatma-Haberleşme	Haberleşme

Avantajlar:

- İnsan sağlığı için güvenlik: Görünür ışık ile veri aktarımı ve haberleşmenin sağlanması insan sağlığı üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye yol açmamaktadır. RF haberleşmesinde ise elektromanyetik dalgaların kanser nedeni olarak sınıflandırılmasından ötürü insan sağlığı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu söylenebilmektedir [48]. Kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan IR ışığının da yüksek güçlerde kullanılması korneada geri dönüşümü olmayan hasarlara yol

açabileceğinden ötürü insan sağlığı üzerinde olumsuz etkisi olduğu bilinmektedir. Bu da görünür ışığa dayalı haberleşme sistemlerinin bir avantajı olarak ortaya çıkmaktadır [49].

- **Güvenlik:** Işık, duvarlara nüfuz edemez; bu da görünür ışık, haberleşme sistemlerinde veri hırsızlığı olaylarına karşı yüksek güvenlik sağlar. VLC sistemlerinde veriler gözle görülebilen ışık ile iletilir, bu verilerin güvenliğini sağlamak için kapalı mekânda kapıyı kapatarak sağlanabilmektedir. Bu özelliğinden ötürü VLC sistemleri yüksek güvenlik gerektiren veya askeri alanlarda kullanılabilir [48].
- **Yüksek bant genişliği:** RF haberleşme sistemleri 300 GHz'lik bir spektrumda faaliyet gösterir ve bu bant işletimi için bir lisansa sahip olduğu anlamına gelmektedir. RF spektrumu çeşitli uygulamalar tarafından kullanılmakta olduğu için boş alanlar çok azdır ve bant genişliğini arttırmak oldukça pahalıdır. Aynı zamanda yüksek frekans spektrumuna geçerken, kullanılan ekipman sayısı artmakta ve bunlar maliyeti de arttırmaktadır. Görünür ışık haberleşmesi ise 380 nm-750 nm arasındaki görünür ışığı kullanmaktadır. RF'e kıyasla çok büyük bir bant genişliği sağladığı söylenebilir [50].
- **Sınırsız teknoloji:** RF sistemleri, elektromanyetik dalgaların elektronik cihazların bozulmasına etki edebilme durumundan dolayı her yerde kullanılamamaktadır. Bu durum RF sistemlerinin sınırlandırılmasına sebep olmaktadır. VLC sistemlerinde ise görünür ışığın elektronik cihazlar üzerinde herhangi bir bozucu etkisi olmayacağı için kullanım alanında herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır [51].

Dezavantajlar:

- **Sık sinyal kaybı durumu:** Verici ve alıcı arasında bir nesne bulunduğu takdirde verinin iletebileceği alternatif bir yol bulunmuyorsa iletişim bozulabilmektedir [50]. Bu görünür ışık haberleşmesinin en büyük dezavantajlarından biridir. Bu durumu çözebilmek için görünür ışık haberleşmesi ile RF'i birleştirmektir. Böylece VLC'de meydana gelebilecek iletim kopukluklarında RF devreye girerek haberleşme sağlanabilir [52].
- **Dar iletim mesafesi:** Görünür ışık haberleşmesi iletim mesafesi açısından RF kadar avantajlı değildir. VLC sistemlerinde iletim mesafesi RF sistemlerinden oldukça kısa durumdadır. Verici ve alıcı tarafında dar görüş alanı alıcısı (FOV) kullanma, iletim gücünü artırma gibi iyileştirmeler yapılarak VLC sistemlerinin iletim mesafesi artırılabilir.
- **Dış etkenlere duyarlılık:** VLC sistemlerindeki diğer bir dezavantajlı durum ise sistemin parazitlere duyarlılığıdır. Çünkü, görünür ışık haberleşmesi floresan gibi suni ışık kaynaklarını sağlayan aydınlatma cihazlarından etkilenebilir. Suni ışık kaynaklarının yanı sıra dış mekân uygulamalarında güneş ışığı tarafından da bozucu etkiye maruz kalabilmektedirler. Bu ışık kaynakları düşük frekanslı gürültü

üretebilmektedirler ve bu durum yüksek geçiren filtre kullanılarak çözüme ulaştırılabilmektedir. Yine de parazitlerin etkisi tam olarak yok edilememekte ve iletişim performansı bu durumdan olumsuz etkilenmektedir [53].

2.2. Li-Fi (Light Fidelity)

Li-Fi, kısa menzilli kablosuz iletişim sistemi için yeni bir teknoloji olarak bilinmektedir ve bu iletişim LED aydınlatma aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sistem elektromanyetik spektrumun bir parçası olan görünür ışığın sinyal taşıyıcı olarak kullanılmasına dayanır. Kullanımı, sinyal taşıyıcı olarak RF kullanan Wi-Fi teknolojisi kadar yaygın olmasa da sistem gün geçtikçe yayılım göstermektedir. Li-Fi teknolojisi ilk kez 2011 yılında Edinburgh Üniversitesi'nde bu alanda çalışmalar yapmakta olan Dr. Harald Haas tarafından geliştirilmiştir. Li-Fi teknolojisinde, insan gözüne herhangi bir olumsuz etkisi olmadan LED'lerin çok yüksek hızlarda modüle edilmesi söz konusudur.

Günümüzde LED'lerin hem iç mekanlarda hem de dış mekanlarda kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu durumdan, yüksek bant genişliğinde çalışmaya olanak sağladığından ve kullanım lisansına ihtiyaç duymayan optik frekanslar ile çalışmasından ötürü Li-Fi teknolojisi üzerinde yapılan çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Görünür ışık haberleşmesine dayanan Li-Fi, kablosuz haberleşme protokolü olarak PAN IEEE 802.15.7 standardına tabidir. Şekil 2.4'te, veri aktarımının ışık yoluyla nasıl gerçekleştiğine dair bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Işık yoluyla veri aktarımı [54]

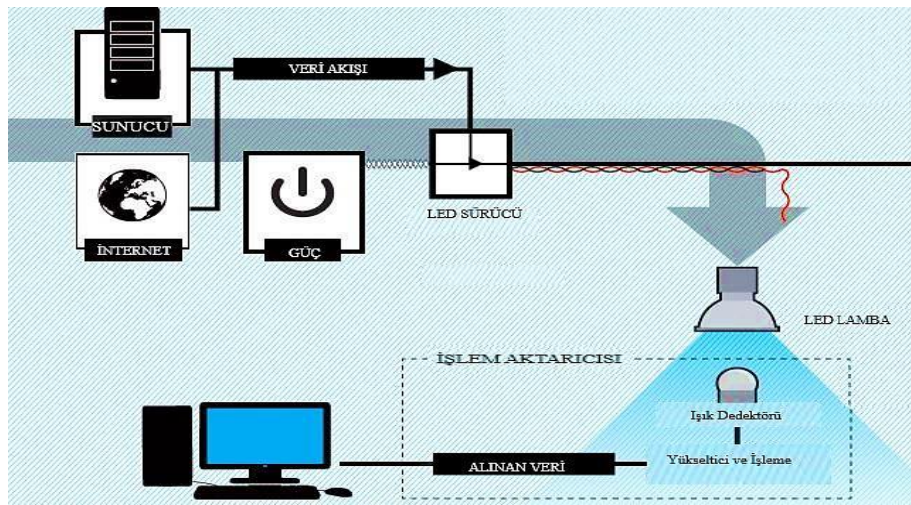
2.2.1. Li-Fi Teknolojisinin Çalışma Prensibi

Görünür ışık haberleşmesi sistemi (VLC)'ne dayanan Li-Fi, optik taşıyıcı olarak 400 THz (750 nm) ve 785 THz (380 nm) arasında görünür ışığı kullanır. Bu teknolojiye kablosuz veri

iletimini sağlamak ve aynı zamanda aydınlatmayı sağlamak için son derece hızlı ışık darbeleri kullanılır. Li-Fi teknolojisinin ana bileşenleri şunlardır;

- İletişim kaynağı olarak işlev gören beyaz LED
- Alıcı eleman olarak görünür ışık dalga boyuna uyumlu silikon fotodiyot

LED'ler açılıp kapatıldığında 1'ler ve 0'lardan oluşan dijital diziler oluşmaktadır. LED yanmıyorsa dijital 1, yanmıyorsa dijital 0 iletilmektedir. Veriler, LED'in kırpışma etkisi önlenerek, yeni bir veri akışı oluşturmak için ışıktaki kodlanmaktadır. Yani, LED'ler yaydıkları ışığın veri sinyali ile modüle edilmesi ile aydınlatmanın yanı sıra bir iletişim kaynağı olarak da kullanılabilir. LED'in yaydığı ışığın şiddeti insan gözünün algılayamayacağı hızda değiştirilmektedir. Ayrıca, uygun çoğullaşma tekniklerine sahip yüksek hızlı LED'ler kullanarak 100 Mbps'den daha büyük bir veri hızı sağlamak mümkün olmaktadır. VLC veri hızı, her bir LED'in farklı bir veri akışı ilettiği LED dizileri kullanılarak oluşturulan paralel veri iletimi ile artırılabilir. VLC'de ışık kaynağı olarak floresan lamba, akkor ampul vb. aydınlatma cihazlarının yerine LED'lerin tercih edilmesinin sebebi; çok hızlı yanıp sönebilmeleri ve bu yanıp sönmeye hızının değiştirilmesi ile ışıktaki verilerin kodlanabilmesidir. Sonuç olarak Li-Fi teknolojisinde veri göndermek için LED'lere ve bu LED'lere veri kodlayan bir denetleyiciye, veri almak için ise detektör olarak kullanılan bir Görüntü Sensörü ve fotodiyota ihtiyaç duyulmaktadır. Veri iletimi tek veya çoklu LED ile yapılabilir. Alıcı tarafında, ışığı elektrik sinyallerine dönüştüren ve elektrik sinyallerini bağlı olduğu cihaza verecek bir fotodedektör bulunmaktadır. Sistemin her iki tarafında, verici ve alıcı arasındaki voltaj seviyesini dönüştürmek veya korumak için voltaj regülatörü ve seviye değiştirici devreler kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te Li-Fi sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Li-Fi'nin çalışması [6]

2.2.2. Li-Fi'nin Wi-Fi'ye Göre Avantajları

Li-Fi; yüksek hızlı kablosuz iletişime uygulanan görünür ışık iletişim teknolojisini tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Wi-Fi'ye benzerliği nedeniyle Li-Fi adını alan bu yeni teknoloji, Wi-Fi'deki radyo dalgaları yerine ışık dalgaları kullanmaktadır. Li-Fi kapalı alanda yüksek yoğunluklu kablosuz veri kapsama alanı ve Wi-Fi'de yaşanan parazit sorunlarıyla karşılaşmadığı ile avantajlı bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

2.2.3. Verimlilik

Wi-Fi kullanımı için kurulan Radyo istasyonlarının tükettiği enerji miktarı fazla iken LED'lerin tükettiği enerji çok daha azdır. Bundan dolayı Li-Fi teknolojisi enerji verimliliği açısından daha avantajlıdır [55].

- **Düşük Maliyet:** Li-Fi, elektromanyetik dalga ekipmanına kıyasla LED'lerin ve dijital bileşenlerin fiyatlarının ucuz olması nedeniyle radyo teknolojisinden daha düşük maliyetlidir.
- **Enerji:** LED aydınlatma kendi başına verimlidir ve bu LED'ler ile veri yayılımı ek güç gerektirmedikinden ötürü sistemde az miktarda enerjiye gereksinim duyulur.
- **Çevre:** RF iletimi ve yayılımı su içerisinde son derece zordur fakat Li-Fi bu ortamda rahatlıkla çalışır [56].

2.2.4. Kapasite

Li-Fi de araba ışıkları, tavan ışıkları, sokak lambaları vb. gibi herhangi bir aydınlatma cihazı internet sunucusu olarak kullanılabilir. Bu, herhangi bir ışığın interneti VLC ile yayabileceği anlamına gelmektedir. Bu durum hotspot (internet sunucusu) mimarisinin daha düşük maliyetli hale gelmesine sebep olmaktadır [57]. Buradaki en önemli sorunlar bant genişliği, veri yoğunluğu ve hızdır.

- **Bant Genişliği:** Görünür ışık spektrumu, RF spektrumuna kıyasla 10.000 kat daha fazladır.
- **Veri Yoğunluğu:** Li-Fi, Wi-Fi veri yoğunluğunun yaklaşık 1000 katına ulaşabilir, çünkü görünür ışık dar bir aydınlatma alanında bulunurken, RF yayılma ve parazite neden olma eğilimindedir.
- **Yüksek Hız:** Li-Fi 'de düşük parazit nedeniyle dakikada 500 Mbps veya 30 Gbps'a kadar çok yüksek veri hızları elde edilebilmektedir [58].

2.2.5. Emniyet

Işık yaşamın doğal bir parçasıdır ve çevremizdeki her yerde bulunmaktadır. Bu nedenle iletişim aracı olarak kullanılmasının insan sağlığı üzerinde olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır. RF dalgaları gibi insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaz [59].

2.2.6. Güvenlik

Işık duvardan geçemediğinden dolayı, dışarıdan Li-Fi sinyallerine kolayca ulaşılabilmesi mümkün değildir. Dolayısıyla verilerin istenmeyen kişilerce ele geçirilmesi zorlaşmaktadır. Verilerin nereye gittiği gözle görülebileceği için RF ara bağlantılarının güvenliği için gerekli olan eşleştirme gibi durumlara ihtiyaç duyulmamaktadır [60].

2.2.7. Li-Fi Teknolojisinin Uygulama Alanları

Görünür ışık haberleşmesi (VLC)'ne dayanan Li-Fi teknolojisinin, ilerleyen teknoloji ile birlikte gün geçtikçe kullanım alanları artmaktadır. Li-Fi'nin geleceğin kablosuz iletişim teknolojilerinde önemli bir konumda yer alacağı düşünülmektedir. Aydınlatma işiyle birlikte gerçekleşebilmesi, ekipman maliyetinin düşüklüğü ve düşük seviyeli enerji tüketimi sayesinde yaygınlaşmaktadır. VLC haberleşmesinin genel kullanım alanı kapalı mekanlar olmasına rağmen dış mekanlarda da kullanılabilmesi mümkündür [61]. Enerji verimliliğini hedefleyen bu teknolojiye akıllı bina, akıllı ulaşım ve aydınlatma gibi alanlarda kullanım olanağı sağlanmaktadır. Li-Fi'nin bina içindeki uygulamalarına hastaneler, kimyasal tesisler, uçak kabinleri örnek verilebilmektedir.

Aşağıda Li-Fi teknolojisi ile ilgili uygulama örneklerine ilişkin açıklamalar verilmiştir.

- **Hastaneler ve Sağlık Hizmetleri:** Hastanelerde kullanılmakta olan MRI tarayıcıları gibi elektromanyetik girişimden etkilenebilecek cihazların olduğu ortamlarda Wi-Fi kullanımı uygun görülmemektedir. Fakat, Li-Fi elektromanyetik girişime sebebiyet vermeyeceğinden ötürü kullanımında bir sakınca bulunmamaktadır [62].
- **Taşıma ve Ulaşım:** Ulaşım esnasında araçların arasındaki haberleşmenin sağlanabilmesi adına verilerin iletilmesi LED'lerle sağlanabilir. Bu teknoloji ile sürücüler ve trafik işaretleri arasında iletişim bağlantısı kurularak günlük trafik yoğunluğu ve kaza gibi yol durumları bilgi atarımı için kullanılmaktadır [63].
- **Savunma ve Güvenlik Uygulamaları:** Askeri haberleşme için bilgi iletiminin güvenliği ve veri iletim hızı önem arz etmektedir. Li-Fi teknolojisinde kapalı ortamda gerçekleşen veri iletişiminin dışarıdan dinlenmesi mümkün değildir [64].
- **Havacılık:** Li-Fi teknolojisi ile yolcu koltuklarının üzerinde bulunan lambalar sayesinde yolcuların aydınlatma ile birlikte internet bağlantısı kurabilmeleri mümkündür [65].

Li-Fi ve Wi-Fi teknolojilerinin karşılaştırılması Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Li-Fi ve Wi-Fi karşılaştırılması

Özellik	Li-Fi	Wi-Fi
Çalışma Prensibi	LED Ampuller yardımıyla görünür ışık kullanarak veri iletilir.	RF dalgaları kullanılarak veri iletilir.
Girişim	Girişim sorunu yaşanmaz.	Girişim sorunu yaşanır.
Uygulama	Havayollarında, Denizaltı keşiflerinde, Hastanelerde, ofislerde, evlerde kullanılabilir.	Wi-Fi erişim noktaları ile internette gezinmek için kullanılır.
Gizlilik	Işık, duvardan geçemeyeceği için daha güvenli veri aktarımı sağlar.	RF sinyali duvarlar tarafından engellenemez ve bu nedenle güvenli veri aktarımı elde etmek için farklı teknikler kullanılması gerekir.
Veri Hızı	Yaklaşık 1 Gbps	150 Mbps
Çalışma Frekansı	RF spektrumunun 10.000 katı	2.4GHz, 4.9GHz ve 5GHz
Veri Yoğunluğu	Yüksek yoğunluklu ortamda çalışır.	Girişim sorunlarından dolayı az yoğunluklu ortamda çalışır.
Kapsama Mesafesi	Yaklaşık 10 m	Yaklaşık 32 m
Sistem Bileşenleri	LED Ampul, LED sürücü ve fotodetektör	Kablosuz Yönlendirici, Abone Cihazları

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Modölatörler

Modölatörler, kullandıkları bilgi sinyalinin türüne göre analog veya sayısal modölatörler olarak ikiye ayrılırlar. Analog modölasyon, sürekli ve değışken olan bir bilgi sinyalini taşıyan bir taşıyıcı sinyalle birleştirme işlemidir. Bu işlemde, bilgi sinyali, taşıyıcı sinyalin özelliklerini değıştirerek iletilir. Modölasyon sürecinde, taşıyıcı sinyalin genliğı, frekansı veya fazı, anlık olarak değışen bilgi sinyaline uygun olarak değışir.

Sayısal modölasyon, dijital verilerin iletimi için kullanılan bir iletişim tekniğidir. Bu teknikte, dijital veriler analog bir taşıyıcı sinyal üzerine dönüştürölerek kodlanır ve iletilir. Sayısal modölasyon, verilerin sürekli ve değışken bir analog sinyal yerine belirli seviyelerde ayrık değerlerle temsil edilmesini sağlar. Sayısal modölasyon, analog modölasyona kıyasla daha fazla güvenilirlik, daha iyi spektral verimlilik ve daha düşük hata oranı sunar.

3.1.1. Optik Modölatörler

Optik modölatörler, optik fiber sistemlerinde farklı fonksiyonları gerçekleştiren bileşenlerdir. Bu modölatörler polarizasyon, frekans, faz ve genlik modölasyonu gibi işlevleri yerine getirir. Kaynak ışığı, modölatör malzemesinin optik özelliklerinin değıştirilmesiyle elektriksel bir kontrol sinyali tarafından modöle edilir. Kontrol sinyali, manyeto-optik, elektro-optik ve akusto-optik ve mekanizmalar aracılığıyla modölatör malzemesi ile ilişkilendirilir [66].

Optik haberleşme sistemlerinde, iletilen sinyaller iki farklı yöntemle modöle edilebilirler. Bunlar, direkt modölasyon ile harici modölasyon yöntemleridir.

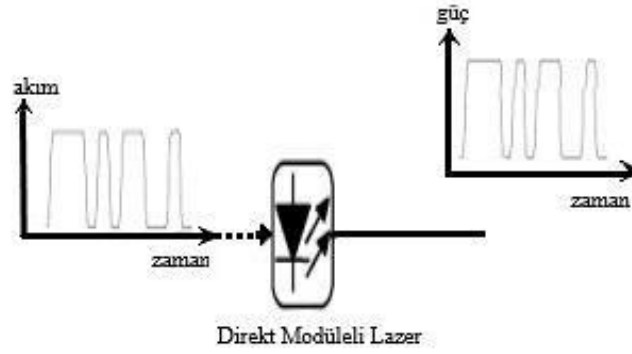
3.1.2. Direkt Modölasyon

Direkt modölasyon tekniğinde lazer ışınının genliğı giriş optik sinyaline göre doğrudan olacak modöle edilmektedir. Sinyal kaybı, sınırlı bant genişliğı ve darbe yayılması direkt modölasyon yöntemini sınırlayan faktörlerdir. Şekil 3.1’de Direkt modölasyon şeması gösterilmiştir [67].

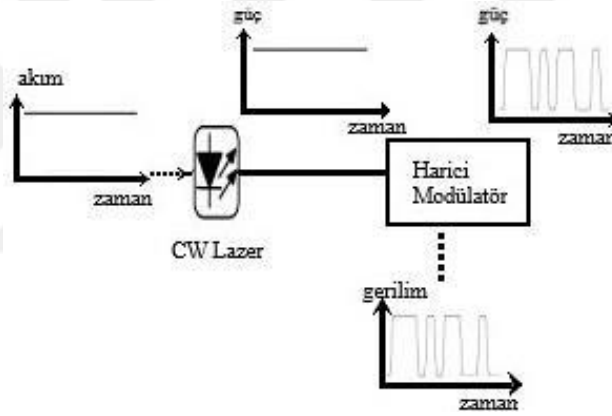
3.1.3. Harici Modölasyon

Harici modölasyon için modöle edilmemiş bir optik sinyal kaynağı gereklidir. Bu modölasyon tekniğinde optik giriş sinyali, harici bir optoelektronik eleman kullanılarak modöle edilmektedir. Harici modölasyon tekniğı, direkt modölasyon tekniğine göre daha karmaşık bir

yapıya sahip olup yüksek maliyetli bir tekniktir. Şekil 3.2’de Harici modülasyon şeması gösterilmiştir [67].



Şekil 3.1. Direkt modülasyon [67]



Şekil 3.2. Harici modülasyon [67]

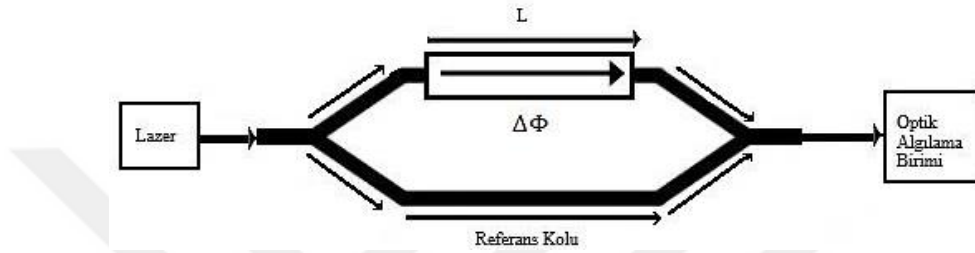
3.1.4. Modülasyon Çeşitleri

Direkt modülasyon tekniği, harici modülasyon tekniğine göre daha ucuz olmasına rağmen yüksek hızlarda uğradığı kromatik dispersiyon ve oluşan yüksek gürültüden ötürü harici modülasyon tekniği daha avantajlı durumdadır [2]. Harici modülasyon için farklı malzemelerden üretilmiş harici modülasyonlar bulunmaktadır. Mach-Zehnder modülasyonu ve Electroabsorption Modülasyonu (EA Modülasyon) bu modülasyonlara örnek verilebilir.

3.1.5. Mach-Zehnder Modülasyonu

Mach-Zehnder modülasyonları, uzun mesafe telekomünikasyon sistemlerinde yüksek veri hızı performansı gösteren önemli bir modülasyon türüdür. Bu modülasyonun en dikkate değer özelliklerinden biri, iletilen sinyalin chirp özelliğinin ait olduğu p-i-n dalga kılavuzunun elektro-

optik özelliklerine bağlı olmasıdır. Ayrıca, iki Y-bağlantısının bölünme oranları ve dengesiz interferometrenin iki kolu arasındaki diferansiyel faz kayması da modülatörün her bir koluna uygulanan modüle edici gerilimlerin formatına bağlıdır. Bu özellikler, modülatörün sahip olduğu iletim performansını gerekli şekilde optimize etmek için ciddi bir esneklik sağlar. Mach-Zehnder modülatörü, bir adet giriş Y-bağlantısı, bir adet çıkış Y-bağlantısı ve bağımsız sürücü elektrotlarına sahip iki adet faz modüle edilmiş kol içermektedir. Şekil 3.3’de Mach-Zehnder modülatör yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Mach-Zehnder modülatör yapısı

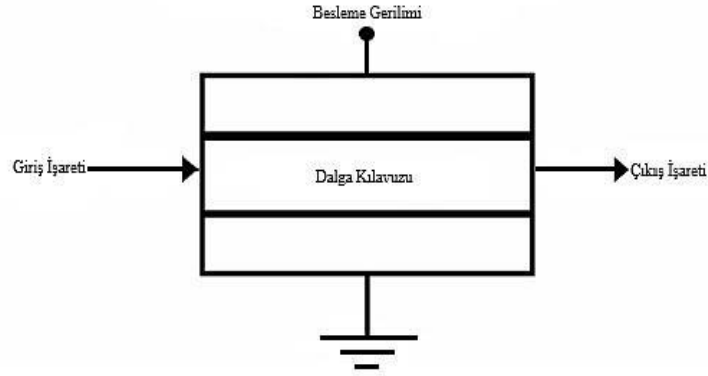
Mach-Zehnder modülatörünün kollarına uygulanan gerilimden kaynaklanmış optik alan değişimi Denklem 3.1’de verildiği şekildedir.

$$E(V) = E_0 \exp \left\{ - \left[\frac{\Delta\alpha(V)}{2} + j\Delta\beta(V) \right] L \right\} \quad (3.1)$$

Burada güç zayıflama sabiti ($\Delta\alpha$), faz sabiti ($\Delta\beta$), modülatör kol etkileşim uzunluğu (L) olarak verilmiştir [68].

3.1.6. Electroabsorption Modülatörü (EA Modülatör)

EA modülatörü, lazer diyotu ile benzer bir yapıya sahip olan yarıiletken bir modülatör türüdür. Lazer diyotlarında, uyarılmış bir emisyon elde etmek amacı ile yeterli miktarda akım yüklemesi yapılır. EA modülatörlerinde, emilim spektrumunu değiştirmek amacı ile elektrik alan uygulanmaktadır. Aktif bölgeye taşıyıcı yüklemesi yapılmaz edilmez, fakat ışığın emilmesinin sonucunda taşıyıcı oluşumu sağlanmaktadır. EA modülatörü p-n jonksiyonu ile jonksiyonlar arasında bulunan aktif yarı iletken bölgeden oluşmaktadır. Şekil 3.4’te EA modülatörün yapısı gösterilmiştir [66].



Şekil 3.4. EA modülatörün genel yapısı [66]

EA modülatörlerinin çalışabilmesi amacı ile herhangi bir ön gerilime gereksinim duyulmaz. Yani, EA modülatörü elektriksel olarak sıfır voltaj ile çalışabilmektedir. EA modülatörlerinin çalışabilmesi için gerekli sürücü gerilimi düşük düzeydedir. Bu da modülatörün enerjisel verimliliğini artırmakta ve az güç tüketimine sebep olmaktadır. Aynı zamanda EA modülatörlerinde sinyal modülasyon edildiği sırada üretilen frekans değişimi yani cıvıldaama düşük olur. Bu, sinyalin spektral genişliğini etkiler ve iletim mesafesi artırarak sinyal kalitesinin iyileşmesi sağlanır. Bu modülatör türü yüksek bant genişliğinde çalışabilmektedir. Ve böylece modülatörün yüksek veri iletim hızında aktif olması sağlanır. EA modülatörünün söndürme oranı Denklem 3.2 ve Denklem 3.3’de verilmiştir.

$$R_{1/2} = \frac{P_{\text{Çıkış}}(V_1=0)}{P_{\text{Çıkış}}(V_2=V)} = \frac{e^{-\alpha(0)L}}{e^{-\alpha(V)L}} \quad (3.2)$$

$$R_{1/2}(dB) = 10 \log(R_{1/2}) = 4.343[\alpha(V) - \alpha(0)]L \quad (3.3)$$

Modülatör verimliliği kavramı, bir modülatörün verimli şekilde bir optik sinyali modüle edebilme yeteneğini ifade etmektedir. EA modülatörün enerji verimlilik denklemi Denklem 3.4’te verilmiştir.

$$\frac{R_{1/2}}{\Delta V} = 4.343 \frac{[\alpha(V) - \alpha(0)]L}{\Delta V} = 4.343 \frac{\Delta \alpha}{\Delta F} \quad (3.4)$$

3.2. Optik Filtreler

Optik filtreler, belirli dalga boyuna sahip ışık demetlerini yansıtma veya soğurma yolu ile belirli frekanslarda geçirmeyen optik bileşenler olarak bilinmektedir. Bu filtreler, istenmeyen ışık bileşenlerini engellemektedirler. Ayrıca, belirli bir dalga boyuna sahip ışığı yansıtarak ya da soğurarak belirli bir renk ve dalga boyu spektrumunu vurgulama veya ortaya çıkarma işlemi için de kullanılmaktadır. Temel olarak belirli frekans aralığındaki sinyalleri geçirme ve engelleme

prensibine sahip olan optik filtreler, alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yüksek geçiren filtreler, belirli bir kesim frekansından daha yüksek frekanslı sinyalleri geçirirken daha düşük frekans bileşenlerini engelleyen filtre çeşididir. Kesim frekansının üzerindeki sinyaller neredeyse hiç değiştirilmeden geçebilirken, kesim frekansının altında kalan sinyaller azaltılmakta ya da engellenmektedir. İdeal yüksek geçiren filtrenin frekans cevabı Denklem 3.5'teki gibidir [69].

$$H_{yg}(e^{j\omega}) = \begin{cases} 0 & \omega < \omega_c \\ 1 & \omega_c < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (3.5)$$

Burada, ω_c ideal filtrenin geçirme bandının kesim frekansını belirtmektedir.

Alçak geçiren filtreler ise belirli kesim frekansından daha düşük frekanslı sinyalleri geçirebilirken, daha yüksek frekans bileşenlerini engelleyen filtre çeşididir. Yani, kesim frekansının altında kalan sinyaller bu filtre tarafından hiç değiştirilmeyecek şekilde geçerken, kesim frekansının üstünde yer alan sinyaller azaltılmakta veya engellenmektedir. İdeal alçak geçiren filtrenin frekans cevabı şu şekildedir [68];

$$H_{ag}(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-jn_0\omega} & |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & \omega_c \leq |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (3.6)$$

Burada, n_0 pozitif bir sayıyı belirtmektedir.

3.2.1. Frekans Cevabına Göre Filtre Çeşitleri

Filtreler iletim ya da durma bandındaki dalgalanmalara tolerans gösterip göstermeme ve çeşitli hedeflere yönelik uygun frekans cevabı karakteristiğini verip vermeme gibi parametreler göz önünde bulundurularak değişkenlik göstermektedirler. Filtrelerin, Gaussian, Butterworth, Bessel, Chebyshev ve Raised Cosine filtre gibi çeşitleri bulunmaktadır.

3.2.1.1. Gaussian Filtre

Gaussian filtreler, frekans cevap eğrisinin gauss fonksiyonuna benzemesi sebebi ile bu isimle anılmaktadır. Gauss filtresinin, frekans cevabı Denklem 3.7'de verilmiştir [70].

$$H_{GS}(j\omega_x, j\omega_y) = e^{-\{2\pi\sigma^2\{\omega_x^2 + \omega_y^2\}\}}, (\omega_x, \omega_y) \in (-\infty, \infty)^2 \quad (3.7)$$

Burada, bant genişliği parametresi σ büyüklüğü olarak belirtilmiştir. Bu büyüklük büyüdükçe bant genişliği daralmakta ve böylece daha işlevli bir alçak geçiren filtre gerçekleştirilmiş olacaktır.

3.2.1.2. Butterworth Filtre

Butterworth filtresi, düzgün şekilde bir frekans tepkisi sağlayabilen ve geçiş bölgesi, bant genişliği ile kesim frekansı gibi çeşitli parametrelerle karakterize edilebilen bir çeşit alçak geçiren filtre olarak tasarlanmaktadır. Butterworth filtresi, kesim frekansının etrafında yer alan frekanslarda maksimum düzlük sağlayabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Butterworth filtresinin, diğer filtre türlerine göre frekans tepkisinin daha düz olması çalışmalarda daha fazla tercih edilmesine sebep olmaktadır. Butterworth filtresinin frekans cevabı Denklem 3.8’de verilmiştir [71].

$$|B(\omega)|^2 = \frac{1}{1+(\omega/\omega_c)^{2N}} \quad (3.8)$$

3.2.1.3. Bessel Filtre

Bessel Filtresi, frekansa bağlı olmayan gecikme zamanlı bir filtre türüdür. Yani frekans ile orantılı faz kaymalı bir filtre özelliğine sahip olan optimal kare davranışı gösteren bir filtre türüdür [72]. Bessel Filtreler diğer filtre çeşitlerine göre daha iyi bir faz tepkisi gösterme özelliğine sahiptir. Filtre tarafından geçirilebilen frekans bileşenlerinin faz kayması, faz tepkisi olarak nitelendirilir. Bessel filtresi, filtrelenmiş sinyalin faz tepkisini bozmayarak geçirebilen ve bu sebeple zamansal sinyallerde bozulmanın en aza indirilmesini sağlayan bir geçiş bölgesi sunmaktadır. Bu özelliğinden dolayı Bessel filtresi, zaman domenindeki sinyallerin daha hassas şekilde yeniden oluşturulmasını sağlamaktadır. Bessel filtreleri frekans tepkisinden ötürü Butterworth filtresine benzerlik göstermektedir. Fakat Bessel filtresi daha geniş geçiş bölgesine sahiptir ve bu da düşük kesim frekansındaki sinyallerin daha iyi korunmasına yol açmaktadır. Bessel filtresinin fonksiyonu şu şekildedir [73];

$$\omega_0(t) = d. \omega_0. (1 - c. h(t)) \quad (3.9)$$

Burada, ω_0 parametresi Bessel yaklaşımından kaynaklanmış olan ve $\omega_0(t)$ ’nin yakınsamakta olduğu sınırlayıcı değerdir. $h(t)$ ise sistemin zaman adımı sonucu verdiği tepkiyi ifade etmektedir.

3.2.1.4. Chebyshev Filtre

İsmi matematikçi Pafnuty Chebyshev’den alan Chebyshev filtresi, frekans tepkisinin belirli bir bant için en düşük düzeyde dalgalanmasını sağlamak amacı ile tasarlanan bir filtre çeşididir. Chebyshev filtresi de diğer filtre türleri gibi belirli frekanslarda bulunan sinyalleri iletmek ya da engellemek için kullanılmaktadır. Fakat Chebyshev filtresi, bant içinde yer alan dalgalanma toleransına izin verebilirken diğer filtre türlerinden daha dik geçiş bölgesi oluşturmaktadır. Bu da filtrenin daha keskin olacak şekilde geçiş kenarları içermesine yol açmaktadır. Ayrıca Chebyshev filtresinin derecesi arttıkça, geçiş bölgesinde bulunan dalgalanma

miktarı azalmakta, buna rağmen filtre gecikmesi artmaktadır. Durdurma bandında gerçekleşmesi en az istenen azalmanın sağlanması amacı ile filtrenin derecesi seçilebilmektedir. Chebyshev filtresinin frekans cevabı şu şekildedir:

$$H(\omega) = 1 / \sqrt{[1 + \varepsilon^2 \text{Cn}(\omega/\omega_c)^2]} \quad (3.10)$$

Burada, ω parametresi açısal frekansı temsil etmektedir. ω_c , kesim frekansını, ε ise eşlik düzeyini göstermektedir. Cheyshev filtresi, eşlik düzeyi yani ε 'yi sağlayan belli bir Chebyshev polinom derecesi (n) kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu polinom değeri, frekans cevabının sahip olduğu eşlik düzeyinde belli bir dalgalanma oluşmasını sağlamaktadır. Chebyshev filtresinin tasarımında, ε değeri ile n derecesi filtrenin özelliklerini belirleyen parametrelerdir.

3.2.1.5. Raised Cosine Filtre

Raised cosine filtresi, iletilen sinyali üzerindeki darbelerin frekans ile genlik karakteristiklerini düzenlemek amacıyla kullanılmaktadır. Haberleşme sistemlerinde, verilerin gönderimi çoğunlukla darbe modülasyonu yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Raised cosine filtresi, darbe modülasyonunda yer alan darbelerin genlik ile süre karakteristiklerini şekillendirmekte olan bir filtre türüdür. Bu filtre genellikle "RC filtresi" olarak kısaltılmaktadır. Raised cosine filtresi, darbelerin spektral olan özelliklerini düzenlemekte, darbe aralıkları arasında oluşabilme ihtimali olan girişimleri azaltmakta ve iletilen verilerin güvenilirliğini artırmaktadır. Raised cosine filtresi, çeşitli parametrelere sahiptir. Bunlardan biri köşe frekansı parametresidir. Bu parametre, filtrenin geçiş bölgesinin sahip olduğu genişliğini kontrol etmektedir. Yüksek köşe frekans değerleri, daha da keskin bir geçiş bölgesinin oluşmasını sağlamaktadır, fakat aynı zamanda darbenin sonlandırma süresini de uzatmaktadır. Düşük köşe frekans değerleri ise daha da yumuşak geçiş bölgesi sağlamakta, fakat aynı zamanda daha da geniş bant genişliğinin kullanımına sebep olmaktadır. Raised cosine filtresi, genel olarak darbelerin spektral şekildeki genlik özelliklerini düzenleyerek verilerin iletimindeki girişimleri azaltır ve darbelerin süresel karakteristiklerini aynı anda korumaya çalışır. Bu sayede, haberleşme sistemlerinde çok yüksek veri hızları ile daha iyi düzeyde bit hata oranları elde etme amacıyla kullanılmaktadır. Raised Cosine filtrenin genlik cevabı şu şekildedir:

$$H(f) = A \text{sinc}(fT) \cos(\alpha\pi f) / \sqrt{[1 - (2\alpha f)^2]} \quad (3.11)$$

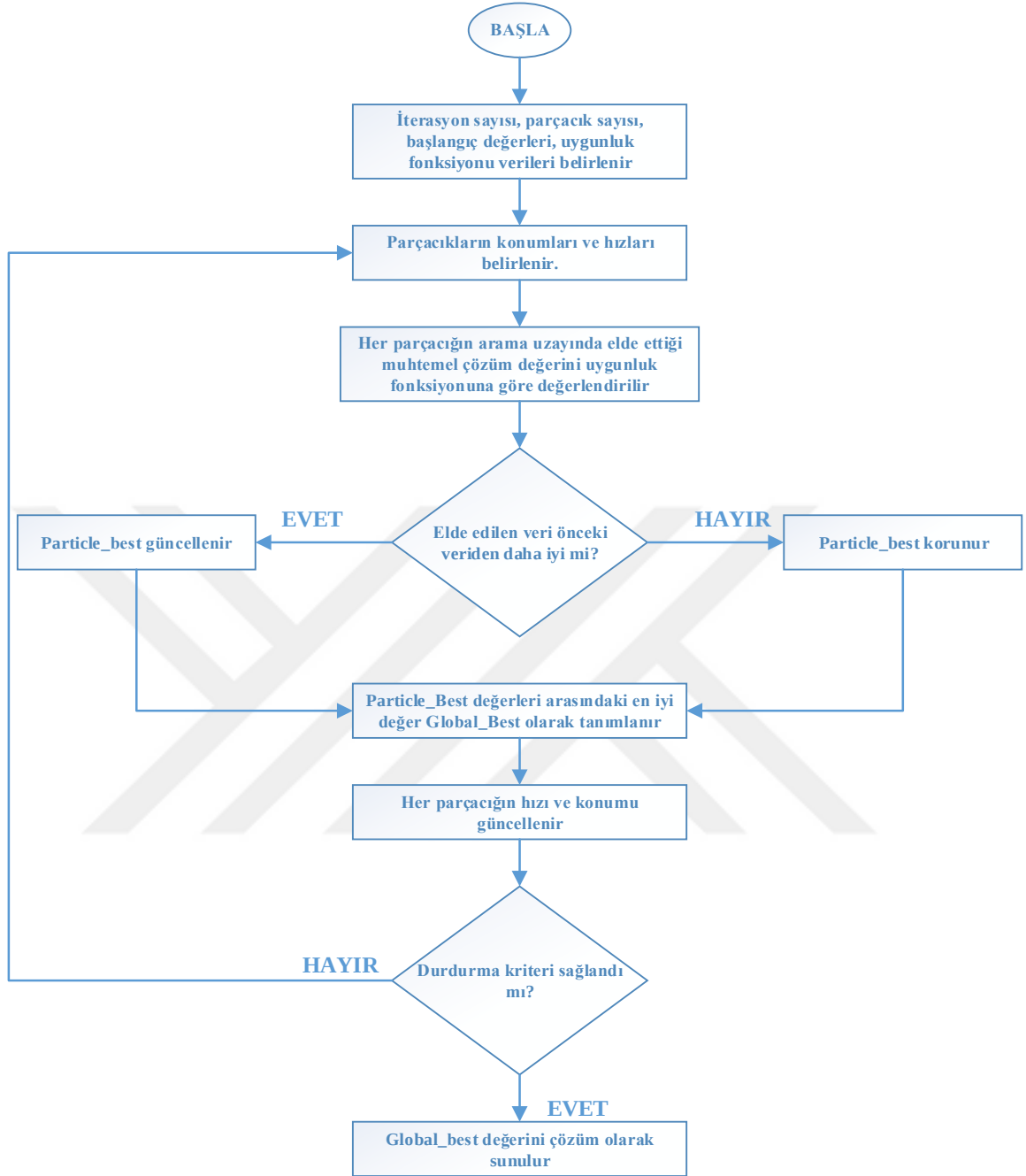
Burada, A genlik ölçek faktörünü ifade etmektedir. α , filtrenin şeklini kontrol eden faktör olarak belirtilmiştir. A değeri genellikle 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır.

3.3. Sezgisel Optimizasyon

Optimizasyon kavramı, tasarlanan bir sistem için gerekli olan standartlara ulaşmak için en kısa sürede, en uygun olacak şekilde üretilen çözümleme işlemini ifade etmektedir. Optimizasyon, genellikle boyutu büyük ve karmaşık problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Optimizasyon algoritmaları, sistemde yer alan problemler için en iyi çözümü ararken matematiksel yollar kullanmaktadır. Sezgisel optimizasyon yöntemlerinin çıkış noktası doğa olaylarıdır. Bu optimizasyon yönteminde kullanılan algoritmalar, bu doğa olaylarının taklit edilmesi ile oluşturulmaktadır [74]. Sezgisel optimizasyon yöntemlerinin çeşitli uygulama türleri bulunmaktadır. Bunlardan biri de parçacık sürü optimizasyonu (PSO)'dur.

3.3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

1955 yılında, sürü halinde hareket eden hayvanların davranışından ilham alınarak Kenedy ve Eberhart tarafından geliştirilen Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) çeşitli uygulama alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir [74]. PSO'nun hızlı ve zahmetsiz çözüm üretebilme yeteneği sayesinde diğer yöntemlere göre daha iyi performans sunmaktadır. PSO'da her biri potansiyel çözüm olan parçacıklar, arama uzayına rasgele dağılarak uygunluk fonksiyonunun kriterini sağlamaya çalışırlar. Parçacıkların kendi en iyi çözümleri Particle_best, parçacıkların tümü arasındaki en iyi çözüm Global_best olarak adlandırılır. En iyi çözüme ulaşabilmek için her parçacığın pozisyonu, sürüdeki en iyi parçacığın konumuna göre güncellenir. Durdurma kriteri sağlanınca algoritma durdurulur ve çözüm, bulunan en iyi değer olan Global_Best olarak sunulur. Parçacık sürü optimizasyonunun bu çalışmadaki iterasyon sayısı 1000, parçacık sayısı ise 51 olarak belirlenmiştir. Algoritmada iterasyon sayısının tamamlanmasıyla durdurma kriteri sağlanmış olur, sonuç görüntülenir. PSO akış diyagramı Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. PSO akış diyagramı

3.4. Optisystem Yazılımı ve Elemanları

Optisystem, optik haberleşme sistemlerinin tasarımı ve benzetimi için kullanılmakta olan bir yazılımdır. Optik haberleşme, ışık kullanılarak veri iletiminin sağlandığı bir iletişim yöntemidir. Optisystem yazılımı, optik ağlar, fiber optik haberleşme sistemleri, optik sensörler ve çeşitli optik sistemlerin modellenebilmesi ve analiz edilmesi için kullanılan bir benzetim aracıdır.

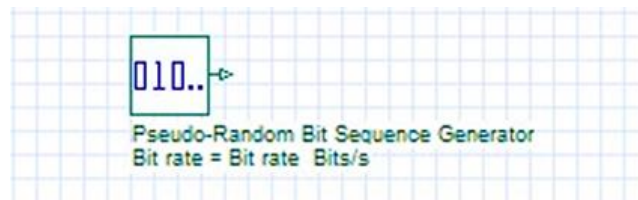
Optisystem yazılımı, optik sistemlerin tasarımında çeşitli bileşenleri ve parametreleri modelleme ve simüle etme amacıyla gelişmiş araçlar sunmaktadır. Program kullanıcıları, optik fiberler, lazerler, foto-alıcılar, optik bileşenler, modülatörler ve diğer çeşitli optik elemanları kurmak istedikleri sistemlerine entegre edebilmekte ve bu bileşenlerin sahip olduğu özellikleri ayarlayabilmektedirler. Optisystem yazılımı ile aynı zamanda farklı modülasyon teknikleri, sinyal işleme algoritmaları, sinyal bozulmaları ve iletişim protokolleri de simüle edilebilmektedir.

Optisystem, program kullanıcılarının optik haberleşme sistemlerini optimize edebilmelerine ve performanslarını analiz edebilmelerine yardımcı olmaktadır. Program, veri hızını artırmak, sinyalin kalitesini iyileştirmek ya da hata düzeltme yöntemlerini değerlendirebilmek amacı ile farklı parametrelerin ayarlatılarak benzetimler yapılmasına imkân sağlamaktadır. Ayrıca, Optisystem programı ile sistem performansının metrikleri ölçülebilmekte, görselleştirilebilmekte ve analiz edilebilmektedir.

Sonuç olarak bu yazılım, sistem tasarımlarının ve performans analizlerinin sanal olarak yapılabilmesini sağlamakta, zaman ve maliyet tasarrufuna imkân vermektedir. Ayrıca yazılım, farklı senaryoların ve parametrelerin hızlı olacak şekilde test edilmesine imkân sunarak, sistemlerin iyi anlaşılmasına hatta optimize edilmesine yardımcı olmaktadır.

3.4.1. Rastgele Bit Sayı Üreteci (Pseudo Random Bit Sequence Generator)

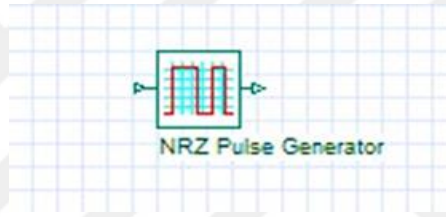
Rastgele bit sayı üreteci anlamına gelen elemanın görevi, deterministik bir süreç tarafından belirlenen, rastgele gibi görünen bir bit dizisi üretmektedir. Gerçek bir rastgele sayı üreteci ile karşılaştırıldığı takdirde, Rastgele bit sayı üreteci matematiksel hesaplamalar kullanmakta ve rastgele gibi görünen bitleri üretmektedir. Rastgele bit sayı üreteci temel özelliği değişik istatistiksel testlerden geçerek rastgelelik durumu için bir dizi sayı üretebilmesidir. Bu testler, bağımsızlık, eşitlik ve tahmin edilemezlik gibi özellikleri değerlendirmektedir. Rastgele bit sayı üreteci genellikle bir başlangıç değeri ile çalışmaya başlamaktadır. Rastgele bit sayı üreteci genel amaçlı Rastgele bit sayı üreteçlerinden farkı ise üretecin uzun bir dönem için tekrarlanan bit desenleri üretmek amacıyla tasarlanmış olmasıdır. Rastgele bit sayı üreteçleri belirli bir sayıda bitin ardından çıktılarını tekrarlamaktadırlar. Rastgele bit sayı üreteci Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Rastgele bit sayı üreteci

3.4.2. NRZ Darbe Üretici (NRZ Pulse Generator)

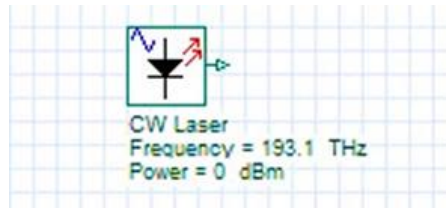
NRZ (Non-Return to Zero) darbe üretici, bir dijital sinyal oluşturucu olarak bilinmektedir ve genellikle haberleşme sistemlerinde veri iletimi için kullanılmaktadır. NRZ kodlama, dijital veriyi iki seviyeli olan bir sinyalde temsil edebilmek için kullanılmakta olan bir yöntemdir. Bu yöntemde, veriler "1" ise bir seviyede eğer "0" ise diğer seviyede temsil edilmektedir. NRZ darbe üretici, bu şekilde NRZ sinyalini oluşturabilmek için kullanılmakta olan bir bileşendir. NRZ darbe üretici, haberleşme sistemlerinde verilerin aktarımında kullanılan diğer bileşenlerle birlikte çalışmaktadır. Temel olarak, bir NRZ darbe üretici, bir veri kaynağından gelen sinyalleri almakta, bunları NRZ sinyaline dönüştürmekte ve ardından da bu sinyali iletim ortamına aktarmaktadır. Alıcı kısmında ise gelen NRZ sinyali alınmakta ve bir alıcı devresi tarafından işlenerek orijinal veri haline geri dönüştürülmektedir. Şekil 3.7'de NRZ darbe üretici gösterilmiştir.



Şekil 3.7. NRZ darbe üretici

3.4.3. CW Lazer

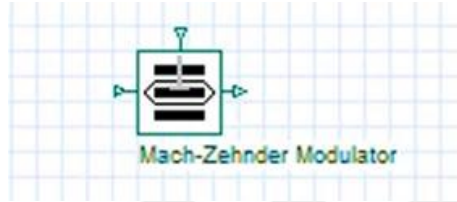
CW (Continuous Wave) lazer, sürekli olarak bir ışık demeti yayımlayan lazer türüdür. CW lazerler darbe lazerlerinin aksine sürekli bir lazer çıkışı üretmektedir. Bu tip lazerler, sürekli olarak ışık yaymakta oldukları için genellikle süreklilik gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir. CW lazerler, yüksek güçlü lazerlerden düşük güçlü lazerlere kadar değişik güç seviyelerinde kullanılabilmektedirler. CW lazerler farklı dalga boylarında ve frekanslarda çalışabilmektedirler. Şekil 3.8'de CW lazer gösterilmiştir.



Şekil 3.8. CW lazer

3.4.4. MZ Modölatör

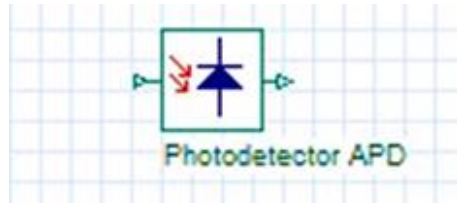
MZ (Mach-Zehnder) modölatör, optik haberleşme sistemlerinde kullanılmakta olan bir modölasyon cihazıdır. Bu tip modölatör, optik sinyallerin yoğunluğunu ya da fazını değıştirmek için kullanılmaktadır. Modölasyon işlemleri, temel olarak bilgiyi taşıyan elektriksel bir sinyali optik bir sinyale dönüştürebilmek için gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.9'da MZ modölatör gösterilmiştir.



Şekil 3.9. MZ modölatör

3.4.5. APD Fotodedektör (Photodetector APD)

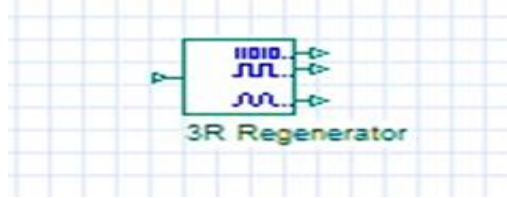
APD (Avalanche Photodiode), fotodedektör türlerinden biridir. Fotodedektörler, ışığı algılayan ve elektriksel sinyallere dönüştürmeye yarayan cihazlardır. APD'ler, özellikle düşük seviyeye sahip ışık sinyallerini yüksek hassasiyet ile tespit etmek amacıyla kullanılmaktadırlar. APD'ler, avalanche çoğaltma yöntemini kullanarak çalışmaktadırlar. Avalanche çoğaltma, herhangi bir elektronun çarpmış olduğu diğer elektronların serbest bırakılması ve bunun sonucunda da daha fazla elektronun çoğaltılmasına yol açmaktadır. Bu, fotodiyotun içinde yer alan bir pn birleşiminden oluşmuş alan yoğunlaşma bölgesinin içerisinde gerçekleşmektedir. APD'lerin sahip olduğu en önemli özelliği, diğer fotodiyotlara kıyasla daha fazla duyarlılık ile daha düşük derecede sinyal gürültü oranı imkânı sağlamasıdır. APD'ler bu sayede optik haberleşme sistemlerinde, lazer iletişimde ve farklı uygulamalarda çoğunlukla tercih edilmekte olan bir fotodedektör türüdür. Fotodedektör APD Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. APD fotodedektör

3.4.6. 3R Rejeneratör (3R Regenerator)

3R rejeneratör, optik haberleşme sistemlerinde kullanılmakta olan bir cihazdır. "3R" terimi, Regeneration (Yeniden Oluşturma), Retiming (Yeniden Zamanlama) ve Reshaping (Yeniden Şekillendirme) kavramlarını ifade etmektedir. Bu bileşen, optik sinyallerin yeniden düzenlenmesi, yeniden şekillendirilmesi ve zamanlama amacıyla kullanılmaktadır. Bir optik sinyal iletimi esnasında, mevcut sinyal kaynaklarından gelen optik sinyaller, iletim hattı boyunca uzun mesafede iletilirken zayıflamaya ve bozulmaya uğramaktadır. Bu durum sinyalde bozulma, hız kaybı ve zamanlama hatası gibi sorunlara sebep olabilmektedir. Bu tarz durumlarda 3R rejeneratör devreye girmektedir. 3R rejeneratör, iletim hattından gelen optik sinyali almakta ve önce sinyali yeniden düzenlemektedir. Bu adımda, sinyalde bulunan gürültü ve bozulmayı ortadan kaldırmakta ve sinyal kalitesini iyileştirmektedir. Daha sonrasında, sinyali yeniden şekillendirmektedir. Sinyalin yeniden şekillendirmesi işlemi, sinyalin uğradığı şekil bozulmalarını gidermektedir ve istenilen sinyal şeklini yeniden oluşturmaktadır. Son olarak, sinyali zamanlamaktadır. Bu adımda, sinyal doğru zamanlama ile tekrar senkronize edilmektedir. Temel olarak 3R rejeneratör, optik haberleşme sistemlerinde kullanılan ve özellikle uzun mesafe iletim hatlarında sinyalin kalitesini yeniden iyileştirme amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 3.11'de 3R rejeneratör gösterilmiştir.



Şekil 3.11. 3R rejeneratör

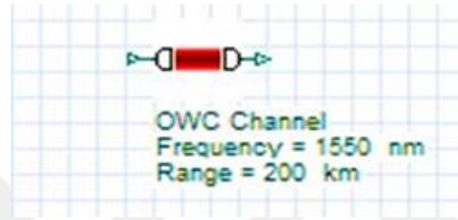
3.4.7. OWC Kanal (OWC Channel)

Türkçe karşılığı "Optik Kablosuz İletişim Kanalı" olan OWC Channel, optik kablosuz haberleşme sistemlerinde, optik sinyaller kullanılarak gerçekleştirilen bir iletişim yöntemidir. Bu teknoloji, veri iletimi için görünür ya da kızılötesi ışık kullanmaktadır.

OWC Channel, optik kablosuz haberleşme sisteminde veri iletiminin gerçekleşmekte olduğu yol ya da bağlantıyı ifade etmektedir. Bu kanal, verinin bir noktadan diğer noktaya optik olarak iletilmesini sağlamaktadır. Verici tarafından üretilmekte olan optik sinyaller, OWC Channel üzerinden alıcı tarafına iletilmektedir. OWC Kanal'ın sahip olduğu çalışma prensibi, optik sinyalin serbest hava ya da diğer ortamlar aracılığı ile iletimine dayanmaktadır. Bu kanal, çeşitli faktörlerden etkilenebilmektedir. Bu faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- Gürültü: Elektromanyetik girişimler ya da diğer optik kaynakların neden olduğu gürültü, OWC Channel üzerindeki sinyalin kalitesini etkileyebilmektedir.
- Engeller: OWC Channel, verinin iletimi esnasında fiziksel engellerden etkilenebilmektedir.
- Uzaklık: OWC Kanal'ın performansını etkileyebilecek etkili bir faktördür. Verici ve alıcı arasındaki mesafe kanalın iletim performansını etkilemektedir. Mesafe arttıkça, sinyalde zayıflama meydana gelebilmektedir.

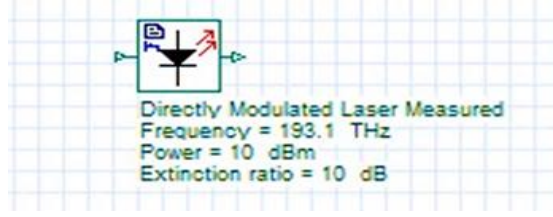
OWC Kanal'ın yüksek bant genişliği, elektromanyetik kaynaklı parazitlere karşı direnç ve düşük gecikme süresi gibi avantajları bulunmaktadır. Şekil 3.12'de OWC Channel gösterilmiştir.



Şekil 3.12. OWC kanal

3.4.8. Direkt Modüle Edilmiş Lazer (Directly Modulated Laser Measured)

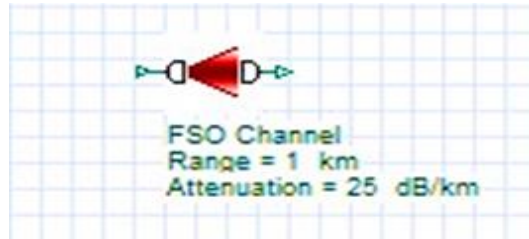
Doğrudan modüle edilmiş lazer yani DML, veri iletimi amacıyla kullanılmakta olan bir lazer türüdür. DML'ler, optik haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. DML'ler, elektrik sinyallerini doğrudan optik sinyallere dönüştürebilen yarıiletken lazer diyotları olarak bilinmektedir. Bu lazer diyotları, elektriksel sinyalleri lazer ışığına dönüştürebilmek amacıyla doğrudan modülasyon yöntemini kullanılmaktadırlar. DML, aktif bölgesi bir lazer diyotundan oluşmaktadır. Bu aktif bölge, içerdiği elektronların enerji seviyelerinin değiştiği ardından lazer ışığının üretildiği alandır. Aktif bölgeye verilen elektrik akımı, bu lazer diyotun çalışmasını sağlamaktadır. DML'lerde, elektrik sinyali direkt lazer diyotun akımına uygulanmaktadır. Elektrik sinyali, lazer diyotun ışık çıkışını etkileyerek akım seviyesini değiştirmektedir. Bu sebeple, elektrik sinyalindeki değişimler direkt lazer çıkışında bulunan optik sinyallerin değişimlerine dönüşmektedir. Modüle edilen lazer ışığı, optik iletim kanalı aracılığıyla iletim hattı boyunca taşınmaktadır. Bu optik sinyal, iletim hattı boyunca ilerlemekte ve alıcıya doğru iletilmektedir. DML'lerin bazı frekans cevabı ve modülasyon hızı gibi sınırlayıcı faktörleri bulunmaktadır. Şekil 3.13'te doğrudan modüle edilmiş lazer gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Direkt modüle edilmiş lazer

3.4.9. FSO Kanal (FSO Channel)

FSO (Free Space Optics), serbest kablosuz optik iletişim olarak bilinmekte olan bir iletişim teknolojisidir. FSO Channel, veri iletiminde görünür ya da kızılötesi ışık kullanmaktadır. Ayrıca FSO, hava veya boşluk gibi açık alanlarda da veri transferi yapabilmektedir. FSO sisteminde kanal olarak, verici ve alıcı noktaların arasında doğrudan hava boşluğu bulunmaktadır. Bu kanaldaki verilerin iletimi için, genellikle lazer diyotları ya da LED gibi yüksek yoğunluğa sahip ışık kaynakları kullanılmaktadır. Bu ışık kaynağı, iletilen sinyalleri taşımakta olan elektrik sinyallerini optik sinyallere dönüştürmektedir. Veri iletimi için FSO kanalı genellikle çok kısa mesafelerde kullanılmaktadır. Ayrıca yoğun bulutlu hava, sis ve yağmur gibi atmosferik koşullar bu kanal üzerindeki iletimlerde sinyalin kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Şekil 3.14'te FSO kanal gösterilmiştir.



Şekil 3.14. FSO kanal

3.4.10. BER Analizör

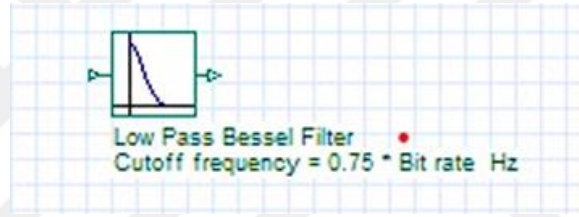
BER (Bit Error Rate) analizörü, bir haberleşme sisteminde veya bir optik ağın performansını değerlendirebilmek amacıyla kullanılan bir cihazdır. BER analizörü, bir haberleşme sisteminde iletim hattındaki hataları ve bu hataların oranını ölçmek için kullanılmaktadır. Şekil 3.15'te bir BER analizörü gösterilmiştir.



Şekil 3.15. BER analizör

3.4.11. Alçak Geçiren Bessel Filtre (Low Pass Bessel Filter)

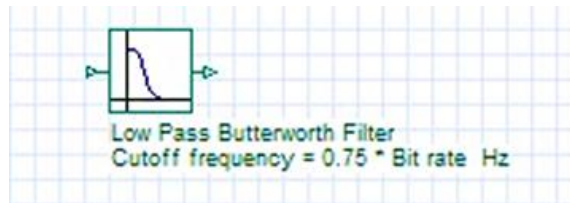
Alçak geçiren Bessel filtre bileşeni, Optisystem simülasyon yazılımında optik sinyallerdeki frekans bileşenlerinin sınırlanmasını ve istenmeyen frekansların filtrelenmesini sağlayan bir optik bileşendir. Bu filtrenin tasarımı, frekans tepkisi gibi faktörlerin optimize edilmesine ve doğru filtreleme işleminin gerçekleştirilmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 3.16'da alçak geçiren Bessel filtre gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Alçak geçiren Bessel filtre

3.4.12. Alçak Geçiren Butterworth Filtre (Low Pass Butterworth Filter)

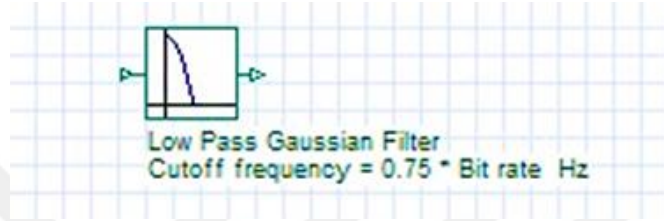
Optisystem yazılımı içerisinde bulunan Butterworth düşük geçişli filtre bileşeni, filtre parametrelerinin ayarlanması ve belirli bir kesim frekansına ait bir filtre oluşturulması için kullanılmaktadır. Bu bileşen, optik sinyallerin frekans spektrumunu modifiye edebilmek için Optisystem benzetimleri içinde kullanılabilir. Şekil 3.17'de alçak geçiren Butterworth filtre gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Alçak geçiren Butterworth filtre

3.4.13. Alçak Geçiren Gauss Filtresi (Low Pass Gaussian Filter)

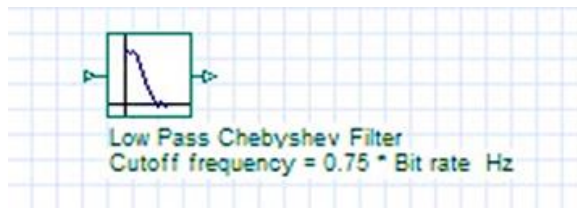
Optisystem programında bulunan alçak geçiren Gaussian filtre bileşeni, filtre parametrelerini ayarlayarak istenilen kesim frekansına sahip bir filtreyi simüle edebilmek için kullanılmaktadır. Optisystem yazılımının ara yüzünde, filtrenin geçiş bant genişliği gibi farklı filtre parametre özellikleri belirlenebilmektedir. Bileşen doğru biçimde yapılandırdıktan sonra, Optisystemde simülasyon çalıştırabilmekte ve filtrenin sinyal üzerindeki etkisi gözlemlenebilmektedir. Şekil 3.18’de alçak geçiren Gaussian filtre gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Alçak geçiren Gaussian filtre

3.4.14. Alçak Geçiren Chebyshev Filtre (Low Pass Chebyshev Filter)

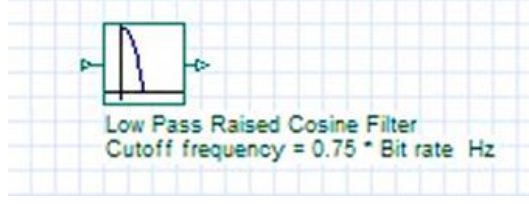
Optisystem bileşenlerinden biri olarak kullanılmakta olan alçak geçiren Chebyshev filtresi, optik haberleşme sistemlerinde sinyalin işleme aşamasında kullanılmaktadır. Optik sinyallerin frekans bileşenlerini kontrol etmek amacıyla filtreleme işlemi yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu filtre, tasarlanan haberleşme sisteminin daha iyi performans göstermesine yardımcı olmaktadır. Şekil 3.19’da alçak geçiren Chebyshev filtre gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Alçak geçiren Chebyshev filtre

3.4.15. Alçak Geçiren Raised Cosine Filtre (Low Pass Raised Cosine Filter)

Alçak geçiren Raised Cosine filtresi Optisystem simülasyon programında yer alan ve tasarlanan sistemlerde genellikle verici kısmında kullanılmakta olan bir filtre türüdür. Alçak geçiren Raised Cosine filtresi genellikle faz tepkileri düzgün ve darbe genişliği sınırlanmış olan sinyallerin iletiminde tercih edilmektedir. Şekil 3.20’de alçak geçiren Raised Cosine filtre gösterilmiştir



Şekil 3.20. Alçak geçiren Raised Cosine filtresi

3.5. Performans Analizi

Tasarlanmış bir optik haberleşme sistemin performans analizi, sistemin bit hata oranı, sinyal gürültü oranı, kalite faktörü gibi belirli performans ölçütlerine ne kadar uyum sağladığını belirlemek için yapılmaktadır. Bu analizin yapılması, sistemde yer alan bileşenlerin ve parametrelerin nasıl değiştiğini ve bu değişimlerin sistem performansına ne tür etkilerde bulunduğunu anlamak için önem taşımaktadır. Yapılan performans analizi, optik haberleşme sistemlerinin optimize edilmesine de yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda analiz sayesinde farklı bileşenlerin ve parametrelerin kombinasyonları değerlendirilerek, sistemin maksimum performansı elde etmek amacıyla nasıl düzenleneceğini belirlemek de mümkün kılınmaktadır. Ayrıca performans analizi sayesinde haberleşme sistemlerindeki hatalar tanımlanmakta ve sorunların giderilmesinde faydalı olmaktadır.

3.5.1. BER Analizi

Bit hata oranı (BER), bir sistemin performansının belirlenebilmesine olanak sağlayan parametrelerden biridir [75]. Bir BER analizörü, haberleşme sisteminin çıkışında oluşan bit hata sayısını ölçmekte ve bu değeri haberleşme sisteminin girişindeki bit sayısına bölerek sistemin BER değerini hesaplamaktadır. Bit hata oranı Denklem 3.12’de verildiği gibi ifade edilebilmektedir [76].

$$BER = \frac{\text{Hatalı Bit Sayısı}}{\text{Toplam Bit Sayısı}} \quad (3.12)$$

BER analizi, haberleşme sistemlerinde kullanılmakta olan sayısal verilerin iletimi sırasında meydana gelen bit hata oranını (BER) ve sinyalin performansını değerlendirmek amacıyla yapılan bir analiz yöntemi olarak bilinmektedir. BER analizi, verilerin doğru şekilde iletilmesi için kullanılacak iletim hattı, modülasyon tekniği, kodlama yöntemi ve diğer çeşitli sistem parametrelerinin etkilerini değerlendirebilmek amacıyla kullanılmaktadır.

3.5.2. Q Faktör Analizi

Q faktör analizi, optik haberleşme sistemlerinde iletilen sinyalin kalitesini değerlendirmek için kullanılmakta olan bir yöntemdir. Bu analiz, iletim kanalındaki gürültü gibi olumsuz durumlardan kaynaklı kayıpların etkilerini hesap ederek sinyalin kalitesini nicel olarak ölçmektedir. Q faktörü, haberleşme sisteminin performans ve hata toleransını belirleyebilmek için kullanılan bir ölçüt olarak bilinmektedir. Bir sistemin yüksek Q faktörüne sahip olması, daha yüksek sinyal kalitesine ve daha düşük hata oranına sahip olduğu anlamına gelirken, düşük Q faktörüne sahip olması ise daha düşük sinyal kalitesine ve daha yüksek hata oranına sahip olduğu anlamına gelmektedir. Tasarlanan bir sistemde kullanılan devre elemanları, iletim kanalında dış etkilerden kaynaklı oluşan gürültü ve sinyalin iletim hattı boyunca ilerledikçe güç kaybetmesi sistemin kalite faktörünü (Q Faktör) olumsuz yönde etkilemekte kalitenin düşmesine sebep olmaktadır [77].

3.5.3. Göz Yüksekliği (Eye Height) Analizi

Göz Yüksekliği (Eye Height), tasarlanan bir sistemde iletilen 0 ve 1 bitlerinin alınması durumu için doğruluk derecesini ifade etmekte olan bir parametredir [78]. Göz Yüksekliği analizi ise, haberleşme sisteminde iletilen bir sinyalin göz diyagramının üzerindeki yükseklik ölçümünü içeren bir analiz yöntemidir. Göz diyagramı, bir haberleşme sistemine konu olan optik sinyalin görsel temsili olarak belirtilebilmektedir. Göz diyagramı, genel olarak birkaç sinyal döngüsünü birden içeren bir dalga formunun grafiği olarak görüntülenebilmektedir. Bu diyagram, iletilen sinyalin kalitesini değerlendirme ve sinyalin hatalı algılama olasılığını gözlemleyebilmek için kullanılmaktadır. Bu analiz sistemin farklı parametreler ışığında nasıl tepki verdiğini analizlemek için önem arz etmektedir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Uygulama 1: Farklı Hava Koşullarında Çeşitli Modülatör Tiplerinin Sistem Performansına Etkilerinin Karşılaştırılması

Serbest Uzay Optik iletişim (FSO) teknolojisi, serbest uzayda yayılmış ışık hüzmelerini kullanarak atmosfer aracılığıyla veri aktarımı yapmaktadır. Geleneksel kablolu veya kablosuz iletişim yöntemlerine göre daha yüksek hızlı ve uzun mesafeli veri aktarımı imkânı sunmaktadır. FSO, veri aktarımını atmosfer aracılığıyla yaptığı için atmosferik koşullarından etkilenebilmektedir. Bu çalışmada dahili ve harici modülasyon teknikleri kullanılarak tasarlanan sistemler için çeşitli hava koşullarının sisteme olan etkileri göz önüne alınarak kanal uzunluğu değişkenine göre Q faktörü analizi yapılmıştır. Serbest Uzay Optik İletişimi (FSO), özellikle geleneksel iletişim altyapısının mevcut olmadığı veya güvenilir olmayan alanlarda tercih edilebilecek önemli bir teknolojidir. FSO'nun ana ilgi alanlarından biri, hücresel ağlar için kablosuz ana taşıyıcı sağlama potansiyelidir. Yüksek hızlı veri hizmetlerine yönelik artan talep ve kullanımda olan kablosuz cihazların sayısının artmasıyla birlikte, hücresel ağlar önemli kapasite kısıtlamalarıyla karşı karşıyadır. FSO, bu kısıtlamaları hafifletmeye yardımcı olabilecek yüksek bant genişliğine sahip, düşük gecikmeli bir ana taşıyıcı çözümü sağlayabilmektedir. FSO'nun bir diğer önemli uygulaması, endüstriyel, bilimsel ve askeri uygulamalar için yüksek hızlı, uzun mesafeli veri bağlantıları sağlamasıdır. FSO, geleneksel kablolu veya kablosuz yöntemlerle bağlanması zor veya pahalı olan uzak konumlar veya mobil platformlar arasında yüksek bant genişliğine sahip bağlantılar sağlayabilmektedir. Genel olarak, FSO teknolojisi, kablosuz iletişim sistemlerinin yeteneklerini önemli ölçüde genişletme potansiyeline sahiptir [79,80]. Yüksek hızlı kablosuz iletişim için son on yılda popüler bir çalışma konusu olmuştur [81,82]. Bu alanda FSO sistemlerinin performansını, güvenilirliğini ve ölçeklenebilirliğini geliştirmek için araştırmalar devam etmektedir.

Verilerin bir yerden başka bir yere iletilmesinde taşıyıcı olarak ışığın kullanıldığı optik haberleşme sistemlerinde, modülasyon, çoğullama ve kodlama gibi teknikler, sistemin performansının ve güvenilirliğinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Modülasyon, yoğunluğu, fazı veya dalga boyu gibi özelliklerini ayarlayarak bir optik sinyal üzerindeki bilgileri kodlama işlemidir. Çokluma, mevcut bant genişliğini farklı kanallara bölerek tek bir optik fiber üzerinden birden çok veri akışının iletilmesine olanak tanır. Kodlama, sinyal-gürültü oranını iyileştirmek ve sistemin hata düzeltme yeteneklerini artırmak için kullanılır. Bu teknikler, optik iletişim sistemlerinde yüksek hızlı, yüksek kaliteli veri iletimi elde etmek için gereklidir [83].

4.1.1. Hava Koşullarının Sinyal Üzerinde Sebep Olduğu Kayıplar

Sis, yağmur ve pus gibi hava koşulları görüş mesafesinin azalmasına sebep olmakta ve bu da iletim sisteminin performansında kayıplara yol açmaktadır [84]. Sinyal gücündeki azalma, aynı zamanda görünürlükle doğrudan ilişkilidir. Tüm bu faktörlerin sisteme olan etkileri, görünürlük-zayıflama modeli gibi durumlar analiz edilerek daha iyi anlaşılabilir. Atmosferik koşullarının yarattığı sinyal kaybının hesaplanabilmesi için ise çeşitli modeller ortaya konulmuştur. Bunlardan biri de Kim Model'dir [85]. Kim Modeline göre atmosferik zayıflama katsayısı Denklem 4.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (4.1)$$

Burada;

q=Saçılan parçacıkların boyut dağılımı

V=Görünürlük(km)

λ =Dalga boyu(nm)

λ_0 =Referans alınan dalga boyu(550)

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km (Yüksek Görünürlük-Açık Hava)} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km (Ortalama Görünürlük-Açık Hava)} \\ 0.16V + 0.34 & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km (Puslu Hava)} \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \text{ km (Hafif Sisli Hava)} \\ 0 & V < 0.5 \text{ km (Yoğun Sisli Hava)} \end{cases} \quad (4.2)$$

Tasarlanan sistemde ele alınana atmosferik koşulların meydana getirdiği kaybın Kim Modeli ile hesaplanmış değerleri Tablo 4.1'de yer almaktadır.

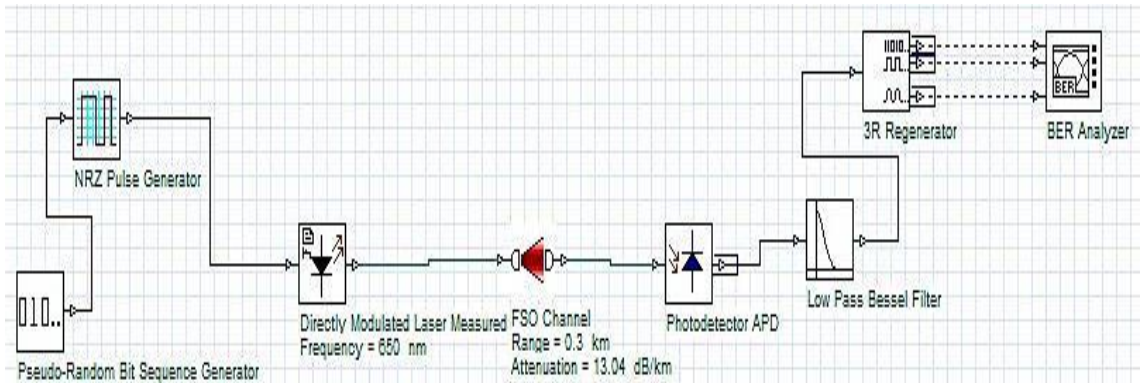
Tablo 4.1. Simülasyon parametreleri

Dalga Boyu (nm)	Görünürlük (km)	Saçılan	Zayıflama (dB/km)	Hava Koşulları
		parçacıkların boyut dağılımı (q)		
650	0.3	0	13.04	Yoğun Sisli
650	0.8	0.3	4.6509	Hafif Sisli
650	4	0.98	0.8303	Puslu
650	20	1.3	0.1574	Açık

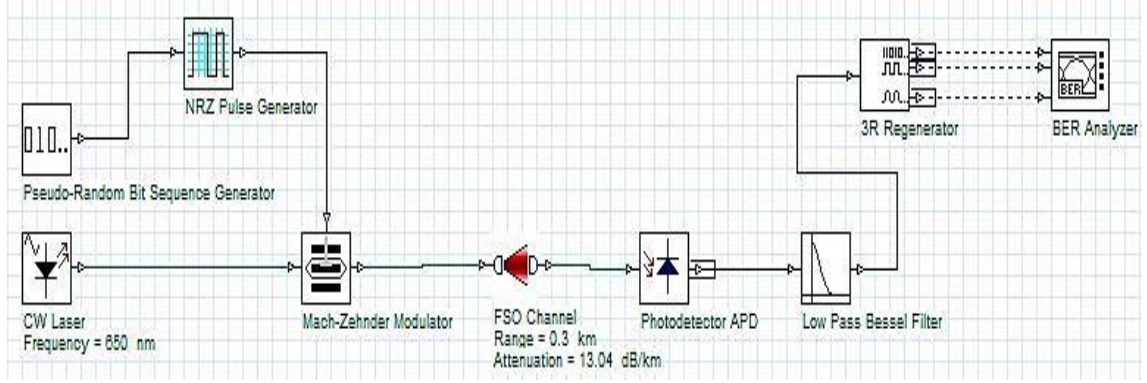
4.1.2. Farklı Modülasyon Teknikleri İçin FSO Sistem Tasarımı

Yapılan çalışmada FSO sisteminde dahili ve harici modülatörler kullanılarak farklı hava koşullarının da olumsuz etkilerinin göz önüne alınması ile kanal uzunluğunun sisteme olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan haberleşme sisteminin kurulumu ve analizi Optisystem 7.0 simülasyon programı ile yapılmıştır. Verici, FSO kanalı ve alıcı kısımlarından oluşan sistemin BER analizi yapılmış, Q faktör değerleri elde edilmiştir. Sistemin verici kısmında CW Lazer, modülatör, taşıyıcı için Rastgele bit sayı üretici ve kodlama tekniği olarak NRZ darbe üretici kullanılmıştır. Alıcı kısmında ise vericiden gelen optik sinyali algılamak için bir APD Fotodiyot ve istenmeyen yüksek frekanslı sinyalleri kesmek için Bessel alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Sistemin parametre değerleri analiz edilmek istenen sisteme uygun şekilde seçilmiştir. FSO teknolojisi kullanıcılara geniş bant aralığında çalışabilme imkânı sunmaktadır. Referans sistemde ise iletilen sinyalin dalga boyu 650 nm olarak belirlenmiştir. Sistemde kullanılan CW Lazer gücü 30 dBm'dir. Kanal uzunluğu ise 0.3 km, 0.8 km, 4 km ve 20 km olarak belirlenerek oluşturulan sistemin analizi yapılmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

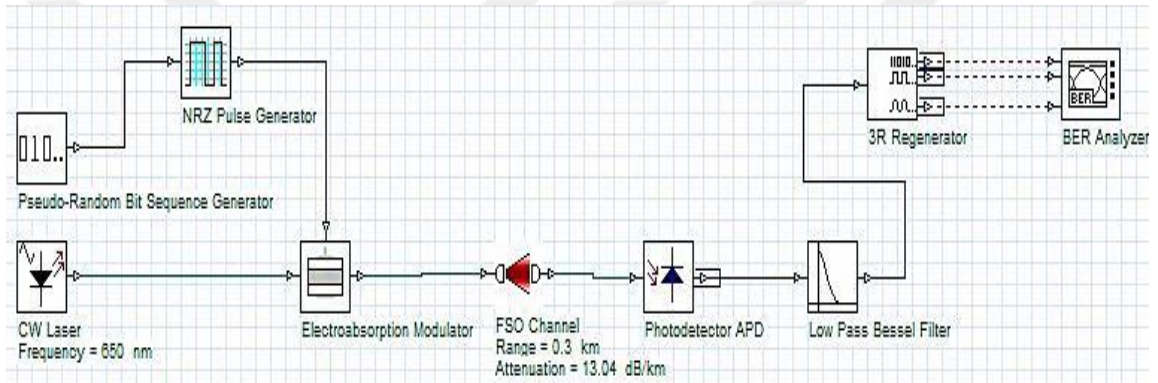
Optik sinyallerin modüle edilmesinde harici ve dahili modülasyon olmak üzere iki türlü modülasyon tekniği kullanılabilmektedir [66]. Şekil 4.1'de Direkt modülasyonlu bir sistem tasarımı görülmektedir. Bu aşamada harici modülatör yerine direkt modüle edilmiş lazer kullanılmıştır. Şekil 4.2'de ve Şekil 4.3'te ise harici modülatör kullanılarak sistem modüle edilmiştir. Sırasıyla sistemler Şekil 4.1'deki direkt modülasyon elemanının sahip olduğu değerlere eşdeğer özelliklerde Mach-Zehnder (MZ) ve Electroabsorption (EA) Modülatörü ile kurulmuştur. MZ ve EA modülatörleri elektrik giriş portu, optik giriş portu ve çıkış portundan oluşmaktadırlar. MZ ve EA modülatörlerin direkt modülasyona göre daha yüksek veri hızına ulaşma özelliğine sahip olduğu bilinmektedir [86].



Şekil 4.1. Direkt modülasyonlu (DM) FSO sistem tasarımı



Şekil 4.2. Mach-Zehnder Modülatör (MZ) kullanılmış FSO sistem tasarımı



Şekil 4.3. Electroabsorption Modülatör (EA) kullanılmış FSO sistem tasarımı

4.1.3. Simülasyon Analizi

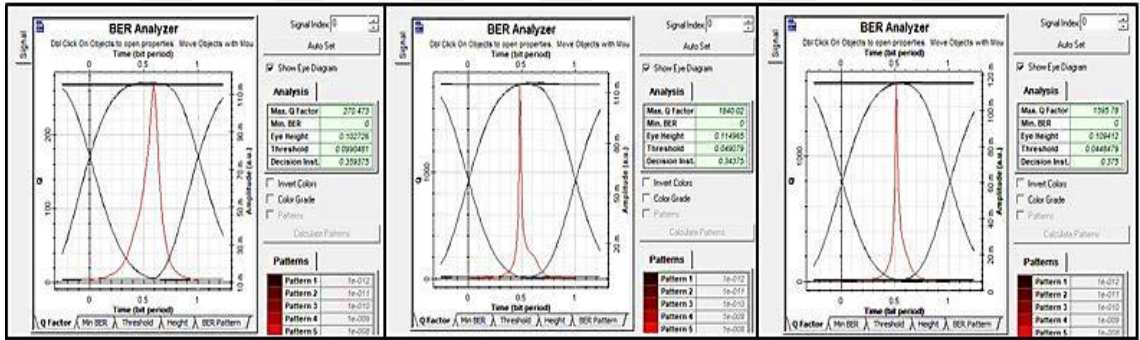
4.1.3.1. Q Faktör Analizi

Q faktörü sinyalin kalitesini ifade etmektedir. Bit Hata Oranı (BER) ise iletilen verilerde meydana gelen hata sayısını göstermektedir. Bu hatalara zayıflama gibi bozulmalar neden olabilmektedir. BER, iletilen veriler ve alınan veriler karşılaştırılarak hesaplanmaktadır. Hata analizi, optik iletişim sistemlerinin tasarımı ve uygulanması bakımından önemli bir araçtır. Kullanıcılar, hata kaynaklarını ve bunların sistem performansı üzerinde etkilerini belirleyerek hata oranını en aza indirebilmekte ve sistem performansını iyileştirmek için sistem tasarımı ve bileşen seçimi hakkında bilinçli kararlar alabilmektedirler. Yapılan çalışmada tasarlanan sistemin performansını analiz etmek amacıyla Q faktörü, göz yüksekliği ve minimum BER değerleri elde edilmiştir. Tablo 4.2’de kanal uzunluğuna bağlı değişen maksimum Q faktörü, göz yüksekliği ve minimum BER değerleri gösterilmiştir.

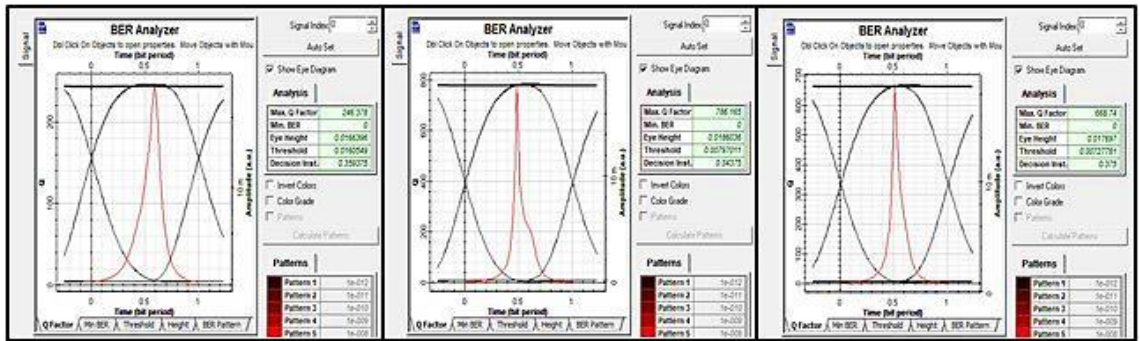
Tablo 4.2. Kanal uzunluğuna bağlı Max. Q faktörü, göz yüksekliği ve Min. BER değerleri

		Kanal uzunluğu			
		0.3 km	0.8 km	4 km	20 km
Max. Q faktörü	DM	270.473	246.378	104.022	10.7435
	MZ	1840.02	786.165	140.801	12.8114
	EA	1595.78	668.74	129.2	12.2604
Göz yüksekliği	DM	10.27×10^{-3}	16.63×10^{-4}	75.28×10^{-6}	2.34×10^{-5}
	MZ	11.49×10^{-3}	18.6×10^{-4}	84.18×10^{-6}	2.77×10^{-5}
	EA	10.94×10^{-3}	17.69×10^{-4}	79.95×10^{-6}	2.59×10^{-5}
Min. BER	DM	0	0	0	2.92×10^{-27}
	MZ	0	0	0	6.63×10^{-38}
	EA	0	0	0	6.91×10^{-35}

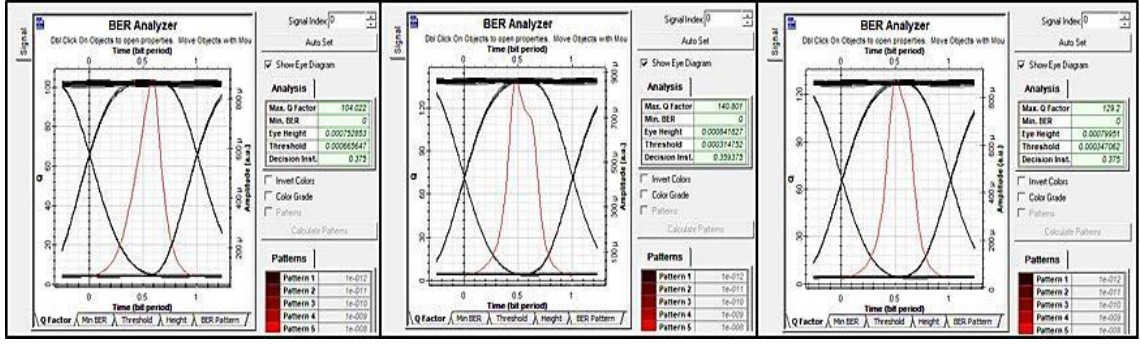
Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de DM, MZ ve EA Modülör kullanılarak tasarlanan sistemin kanal uzunluğuna bağlı değişimi ile elde edilen maksimum Q faktör diyagramları gösterilmiştir. Şekil 4.8’de sistemde elde edilen Q faktör değerleri alınarak oluşturulmuş performans grafiği yer almaktadır.



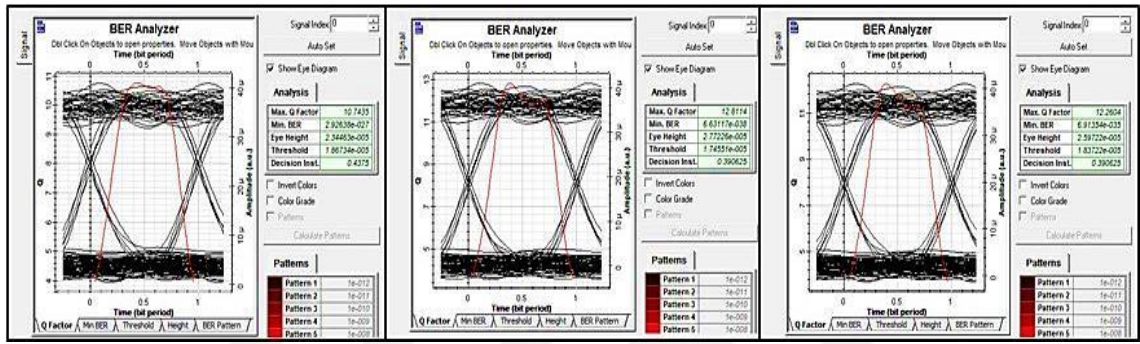
Şekil 4.4. V=0.3 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları



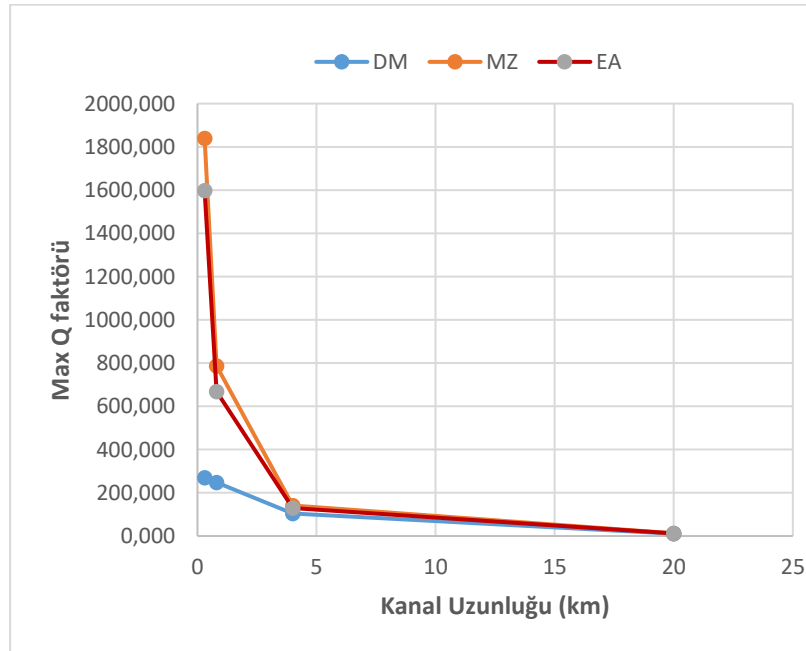
Şekil 4.5. V=0.8 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları



Şekil 4.6. V=4 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları



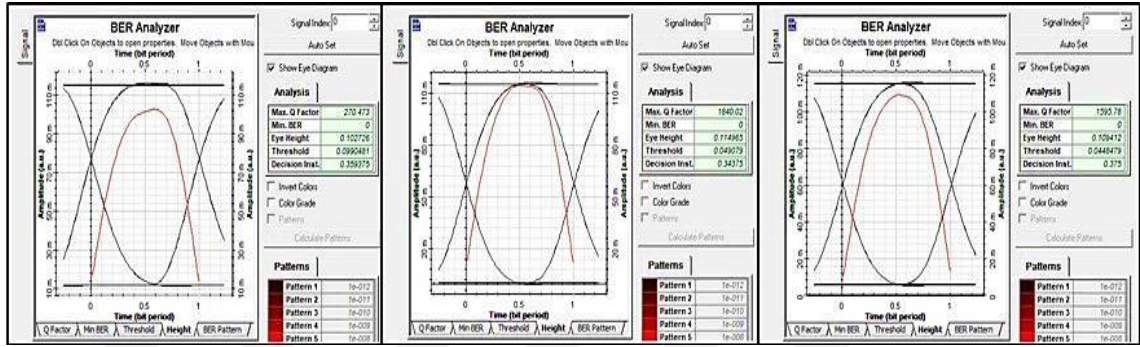
Şekil 4.7. V=20 km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülör kullanılarak elde edilen Q faktör çıktıları



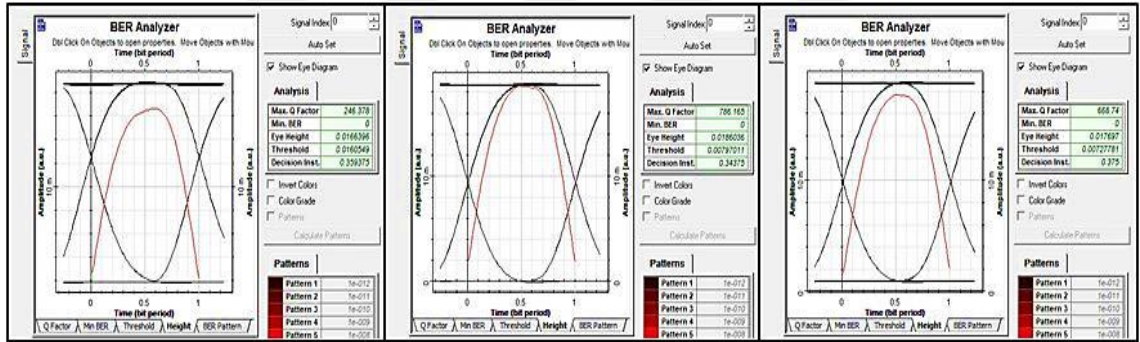
Şekil 4.8. DM, MZ ve EA Modülörle tasarlanan sistemin kanal uzunluğunun değişimine göre elde edilen performans grafiği

4.1.3.2. Göz Yüksekliği Analizi

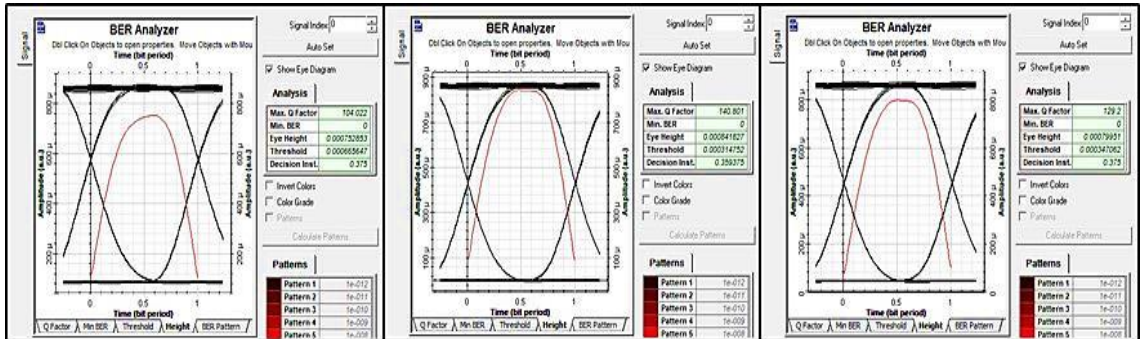
Göz diyagramı, bir haberleşme sisteminin iyiliğini göstermektedir. İletilen verilerin hatasız aktarımı ise göz yüksekliğinde açıklık meydana getirmektedir [87]. Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de DM, MZ ve EA modülatör kullanılarak tasarlanan sistemin kanal uzunluğuna bağlı değişimi ile elde edilen göz yükseklikleri yer almaktadır.



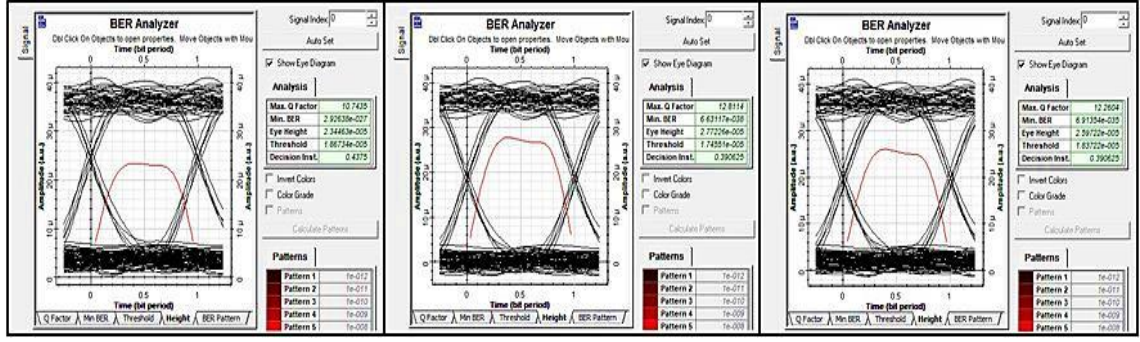
Şekil 4.9. $V=0.3$ km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri



Şekil 4.10. $V=0.8$ km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri



Şekil 4.11. $V=4$ km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri

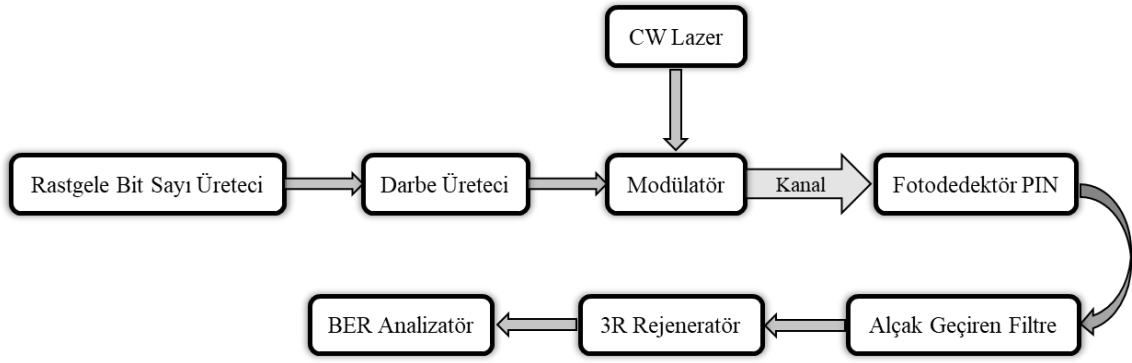


Şekil 4.12. $V=20$ km için sırasıyla DM,MZ ve EA Modülatör kullanılarak elde edilen göz yükseklikleri

4.2. Uygulama 2: Farklı Filtreler Kullanılarak Tasarlanan Optik Kablosuz Haberleşme Sisteminin Performans Analizi

Son yıllarda gelişmekte olan serbest uzay optik iletişim (FSO) teknolojisi, yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi ve yüksek güvenlik gibi özelliklerinden ötürü diğer kablosuz iletişim teknolojilerine kıyasla avantajlı durumdadır. FSO sistemi atmosferik olaylara karşı hassasiyet içerdiğinden sinyalin kalitesinde gerçekleşen bozulmaların azaltılması için çeşitli sinyal işleme ve filtreleme tekniklerine ihtiyaç duymaktadır. FSO serbest uzay kanalının dağınık kanal ve optik kablosuz iletişim (OWC) kanalı gibi çeşitli kanal türleri bulunmaktadır. Bu çalışmada optik kablosuz iletişim (OWC) iletim kanal modeli kullanılarak tasarlanan bir FSO sisteminde çeşitli filtreler kullanılarak karşılaştırmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar üzerinden sistem analiz edilmiştir. Serbest uzay optik teknolojisi (FSO), yüksek bant genişliğinde veri ileten bir optik haberleşme sistemidir. Fakat veri iletim kanalı atmosfer olduğundan sistem performansı doğrudan atmosfer koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, araştırmacılar FSO sistemlerinin performansını geliştirmek için çalışmalar yapmaktadır [88]. Optik kablosuz iletişim (OWC) ise iki nokta arasındaki sinyal, veri ve bilgi iletimi için görüş hattını kullanan bir iletişim teknolojisidir. OWC, yalnızca optik iletişime dayanır ve iletim hattı olarak boş uzayda yayılan bir iletim ortamı kullanmaktadır. Bu bağlamda Optik kablosuz haberleşme (OWC), serbest alan optik iletişim (FSO) içeren bir teknolojidir. OWC teknolojisi, fiziksel bağlantının mümkün olmadığı durumlarda kullanılmaktadır [89]. Bir OWC sistemi ile FSO sisteminin farkını iletim ortamları belirlemektedir. OWC sistemi de serbest alan optiği (FSO) gibi görüş hattı tabanlı bir iletişim teknolojisidir ancak yalnızca optik iletişime dayalıdır ve iletim ortamı olarak havayı kullanmaktadır. FSO ise iletim ortamı olarak optik fiber kablo veya optik gibi bir iletim hattı kullanabilmektedir. Farklı iletim ortamlarından kaynaklanan bu farklılıklar, OWC ve FSO arasındaki performans ve verimlilik açısından farklılıklara neden olabilmektedir [90].

Bir OWC sistemde sinyal iletimi gerçekleştirilirken analog sinyallerin dijital formata dönüştürülmesi için bir PRBS üretici, optik modülasyon için bir harici modülatör kullanılmaktadır. Sistem, genellikle 1550 nm dalga boyuna sahip CW lazer dizisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu lazer sinyalleri, WDM teknolojisiyle bir araya getirilmekte ve aynı frekans aralığına sahip olan bir CW lazer oluşturmaktadırlar. Dijitalleştirilmiş sinyal, çoklanmış lazer sinyali yardımıyla modüle edilmektedir ve OWC ile iletim sağlanmaktadır [91]. Sistemde kullanılan alçak geçiren filtre, yüksek frekans bileşenlerini bastırmak ve düşük frekans bileşenlerini geçirmek amacıyla kullanılan bir filtre türüdür. Bu filtre, frekans transfer fonksiyonu kullanarak sinyal işleme işlemi gerçekleştirir [92]. Şekil 4.13'te OWC sistemin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Bir OWC sistemin blok diyagramı

4.2.1. Optik Kablosuz Haberleşme Sisteminde Filtre Kullanımı

İletişim sistemlerinde, belirli bir frekans cevabını sağlamak için kullanılan iki portlu yapılar, filtre olarak tanımlanmaktadır [93]. Optik filtreler, özellikle belirli dalga boylarındaki ışınların seçici olarak geçirilmesini veya engellenmesini sağlayan optik elemanlardır. Bu filtreler, farklı tipteki optik ağlarda ve cihazlarda kullanılarak iletim özelliklerini değiştirmektedirler. Optik filtrelerin çeşitli türleri vardır, yarıiletken teknolojisi kullanılarak üretilenler gibi diğer optik malzemeler de kullanılabilir. Bu filtreler, dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemlerinde, optik fiber haberleşme sistemlerinde, optik sensörlerde, lazerlerde, optik spektroskopide ve optik mikroçiplerde kullanılabilirler.

Alçak geçiren optik filtreler, optik sistemlerde kullanılan filtre teknolojilerindendir. Bu filtreler, belirli bir dalga boyu veya frekansın altındaki sinyalleri geçirirken, daha yüksek dalga boylarındaki veya frekanstaki sinyalleri engelleyerek seçici bir filtreleme işlevi görmektedirler. Örneğin, bir alçak geçiren optik filtre, belirli bir dalga boyu veya frekansın altındaki ışık sinyallerini geçirirken, üstündeki ışık sinyallerini engelleyebilmektedirler. Bu sayede, filtrelenen optik sinyalin frekans spektrumu düşürülür ve genliği azaltılarak sinyalin keskinliği azaltılır ve düzeltilmektedir. Alçak geçiren optik filtreler, renk düzeltmesi, kamera lensleri, fotoğraf makineleri, optik sensörler ve analiz cihazları gibi birçok optik uygulamada kullanılabilir. Bu filtreler, optik sinyalin özelliklerini değiştirmeden istenmeyen sinyallerin filtrelenmesine olanak tanımaktadır.

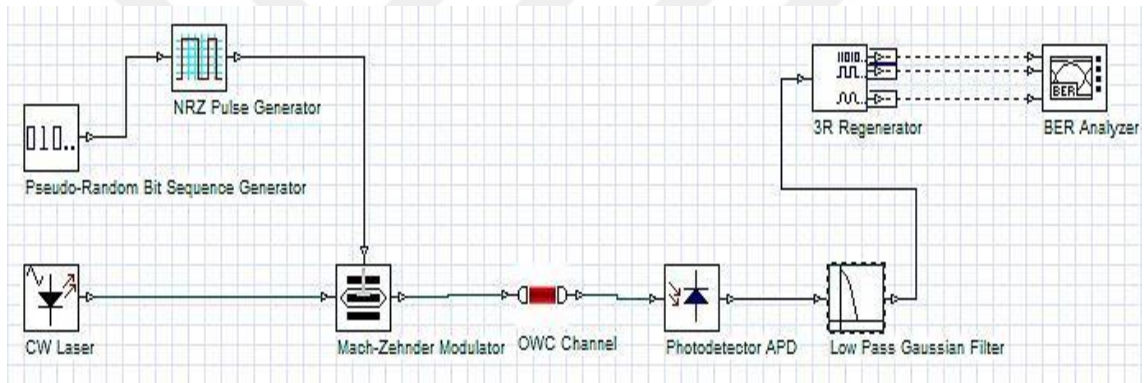
4.2.2. Farklı Filtre Çeşitleri ile OWC Sistem Tasarımı

OWC sistemde filtre türlerinin performansını analiz etmek amacıyla Optisystem benzetim programı kullanılmıştır. Sistem temel olarak verici, alıcı ve OWC kanaldan oluşmaktadır. Verici bölümü, alıcının kablosuz şekilde iletişim kurabilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Giriş sinyali bir darbe üreticiden beslenmektedir. Sistemde kullanılan CW lazer sinyali uzağa iletmekten

sorumludur. İletilecek sinyal, kablosuz haberleşme sisteminde yüksek performans ile çalıştığı bilinen Mach Zehnder modülatörü ile modüle edilmiştir. Alıcı bölümü, OWC Kanaldan iletilen lazer sinyallerini alan Fotodiyot, sinyalde oluşan gürültüyü azaltan ve sinyal kalitesini arttıran bir filtreden oluşmaktadır. Tasarlanan sistemin analizini yapmak amacıyla bir BER analizörü kullanılmıştır. Sistemde kullanılan CW lazer gücü 20 dBm olarak seçilmiştir ve lazer 550 nm dalga boyunda çalışmaktadır. OWC kanalın alıcı ve verici açıklık çapı 30 cm, sistemde analiz için kullanılan OWC kanal uzunlukları sırasıyla 100, 200, 300, 400 ve 500 m’dir.

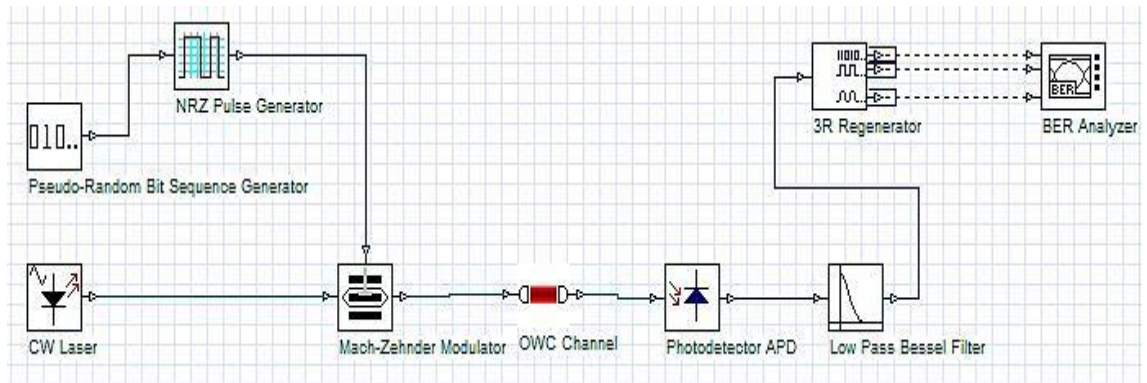
Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de sırasıyla alçak geçiren Gaussian filtre, alçak geçiren Bessel filtre, alçak geçiren Butterworth filtre, alçak geçiren Chebyshev filtre ve alçak geçiren Raised Cosine filtre ile kurulan OWC sistemler gösterilmiştir.

- **Alçak Geçiren Gaussian Filtre**



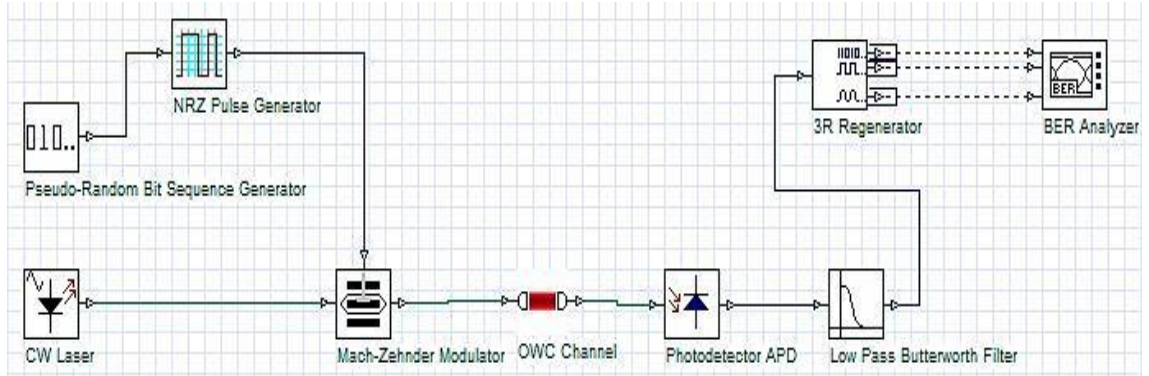
Şekil 4.14. Alçak geçiren Gaussian filtre ile tasarlanmış OWC sistem

- **Alçak Geçiren Bessel Filtre**



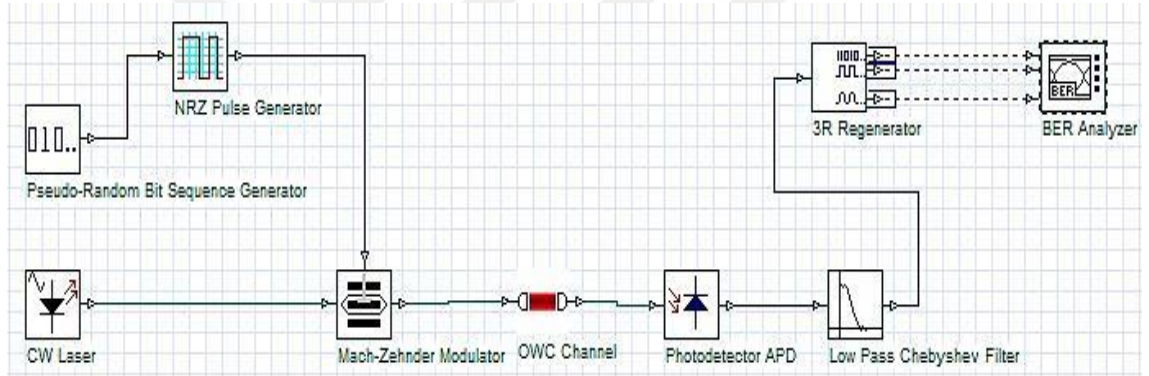
Şekil 4.15. Alçak geçiren Bessel filtre ile tasarlanmış OWC sistem

- Alçak Geçiren Butterworth Filtre



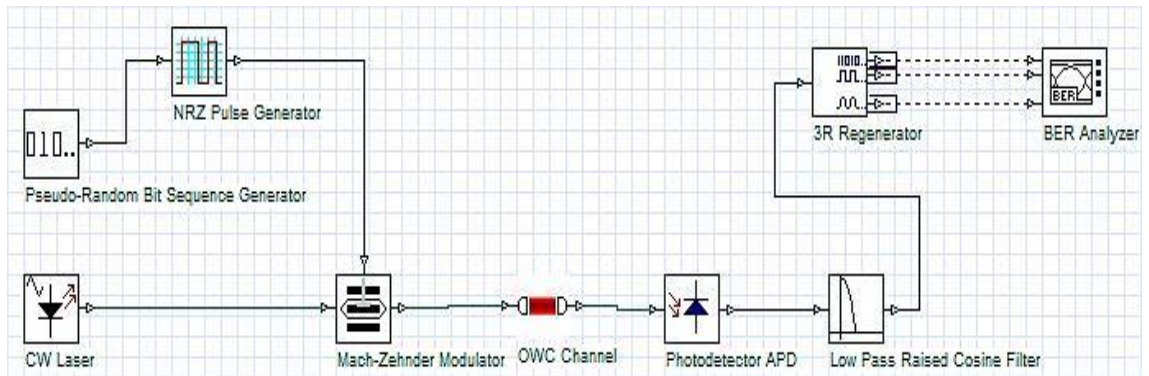
Şekil 4.16. Alçak geçiren Butterworth filtre ile tasarlanmış OWC sistem

- Alçak Geçiren Chebyshev Filtre



Şekil 4.17. Alçak geçiren Chebyshev filtre ile tasarlanmış OWC sistem

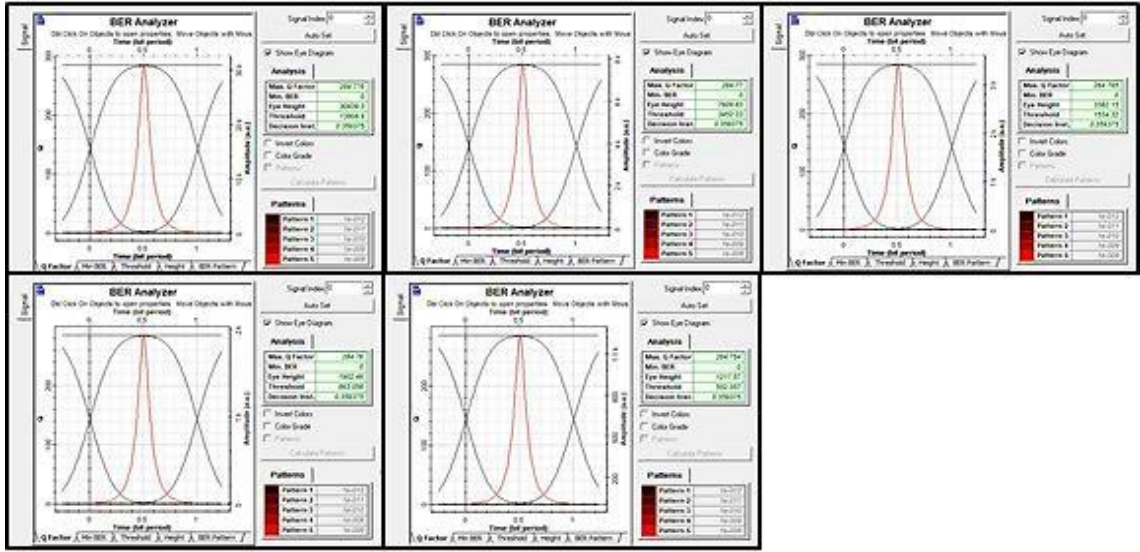
- Alçak Geçiren Raised Cosine Filtre



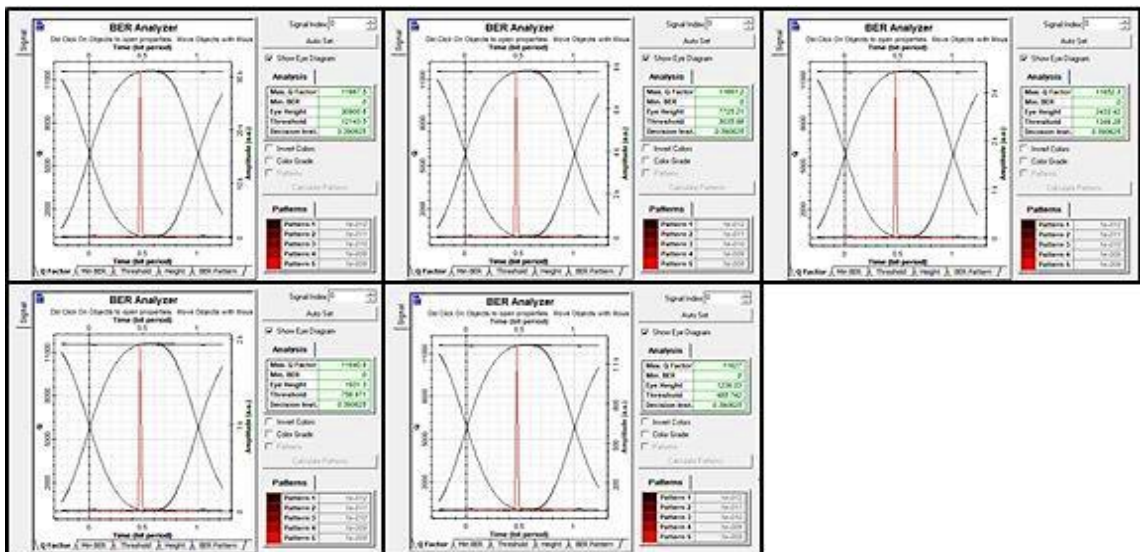
Şekil 4.18. Alçak geçiren Raised Cosine filtre ile tasarlanmış OWC sistem

4.2.3. OWC Sistem Analizi

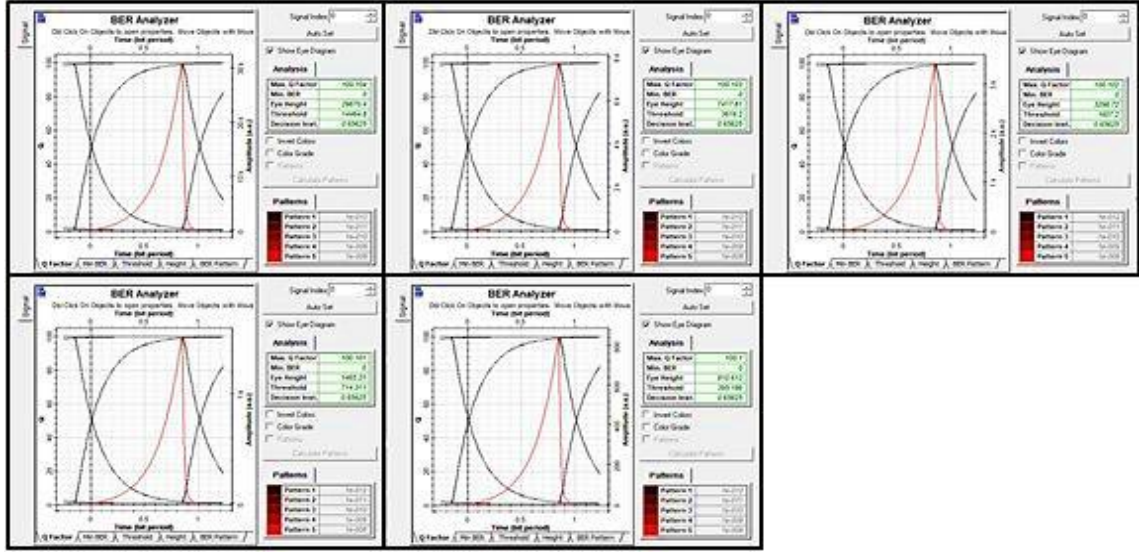
Bu kısımda, Optisystem adlı haberleşme sistem simülasyonu programı ile BER analizörü kullanılarak simüle edilen sistemler incelenmiştir. BER analizörü ile sistemin kalitesini göstermek için göz diyagramları elde edilmiştir. Göz diyagramlarındaki açıklık oranı sistemin çalışma performansının iyiliğini göstermektedir. Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te sırasıyla alçak geçiren Gaussian, Bessel, Butterworth, Chebyshev ve Raised Cosine filtre ile tasarlanan OWC sistemin BER analizöründen elde edilen göz diyagramları gösterilmiştir.



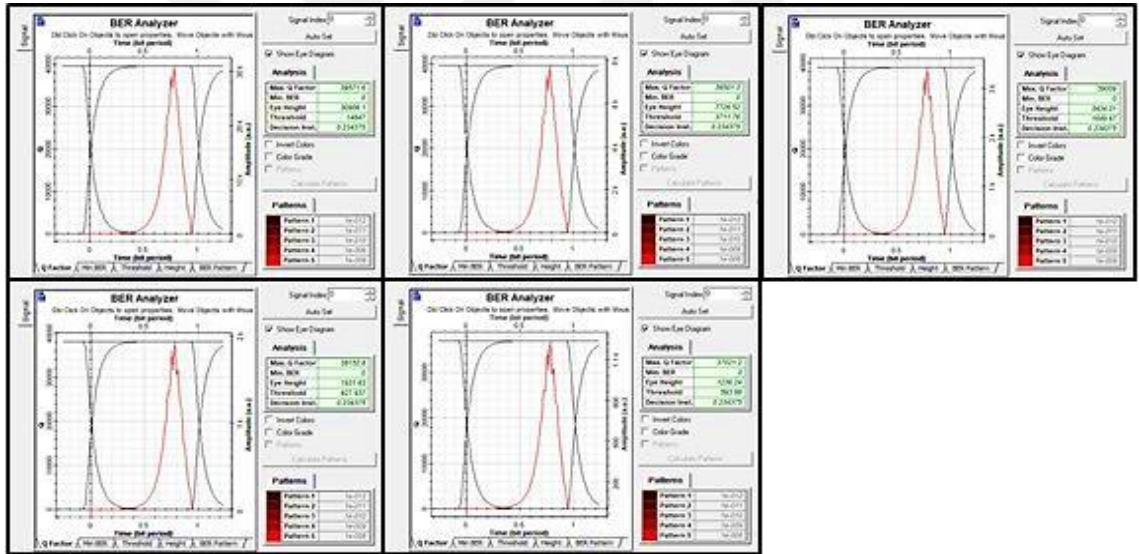
Şekil 4.19. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Gaussian filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları



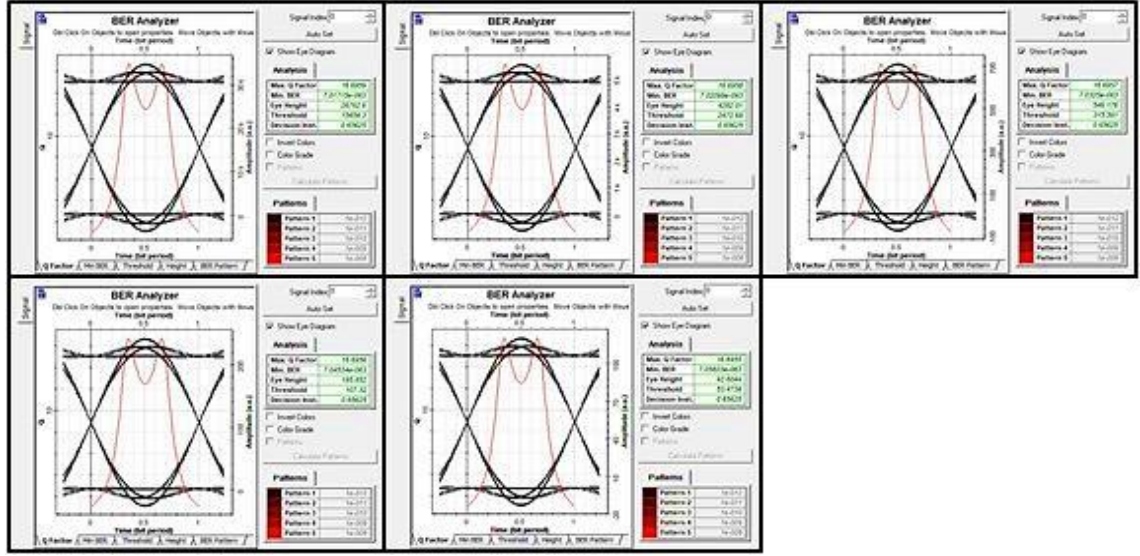
Şekil 4.20. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Bessel filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları



Şekil 4.21. $V=100,200,300,400,500$ m için alçak geçiren Butterworth filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları



Şekil 4.22. $V=100,200,300,400,500$ m için alçak geçiren Chebyshev filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları



Şekil 4.23. V=100,200,300,400,500 m için alçak geçiren Raised Cosine filtre ile kurulan OWC sistemin göz diyagram çıktıları

4.2.4. Max. Q Faktör Analizi

Kablosuz haberleşme sistemlerinde Max. Q faktörü, sinyal gücünün en yoğun olduğu noktayı ifade etmektedir. Max. Q faktörü, kablosuz haberleşme sistemlerinde sinyal gücünün optimize edilmesi için kullanılan bir parametredir. Özellikle uzun mesafelerde veya yüksek hızlarda veri transferi yapıldığında, sinyalin en yoğun olduğu noktanın tespiti ve bu noktaya odaklanılması, veri kaybını önlemeye yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, Max. Q faktörü analizi, kablosuz haberleşme sistemlerinin performansını artırmak için önemli bir araçtır. Tablo 4.3'te kanal uzunluğuna bağlı değişen Max. Q faktörü değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.3. OWC kanal uzunluğuna bağlı Max. Q faktörü değerleri

		Kanal uzunluğu				
		100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
Max Q faktörü	LP Bessel Filtre	11667.5	11661.2	11652.3	11640.9	11627
	LP Gaussian Filtre	284.776	284.77	284.765	284.76	284.754
	LP Butterworth Filtre	100.104	100.103	100.102	100.101	100.100
	LP Chebyshev Filtre	39571.6	39501.3	39009	38152.8	37021.2
	LP Raised Cosine Filtre	16.6959	16.6958	16.6957	16.6956	16.6955

4.2.5. Göz Yüksekliği Analizi

Kablosuz haberleşme sistemlerinde, iletilen sinyal kalitesini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bunlardan biri de göz yüksekliğidir. İletilen sinyal veri bitlerinden oluşmaktadır ve bu bitler sinyalin modülasyonu esnasında belirli bir seviyede bulunmaktadırlar. Göz yüksekliği, bu sinyal seviyelerinin en düşük ve en yüksek noktaları arasındaki mesafeyi ifade etmektedir ve sinyal kalitesinin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Tablo 4.4'te kanal uzunluğuna bağlı değişen göz yüksekliği değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.4. OWC kanal uzunluğuna bağlı göz yüksekliği değerleri

	Kanal uzunluğu				
	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
Göz yüksekliği					
LP Bessel Filtre	30900.8	7725.21	3433.42	1931.3	1236.03
LP Gaussian Filtre	30439.3	7609.83	3382.15	1902.46	1217.57
LP Butterworth Filtre	29670.4	7417.61	3296.72	1465.21	810.612
LP Chebyshev Filtre	30906.1	7726.52	3434.01	1931.63	1236.24
LP Raised Cosine Filtre	26762.6	4282.01	546.176	185.852	92.6044

4.2.6. Min. BER Analizi

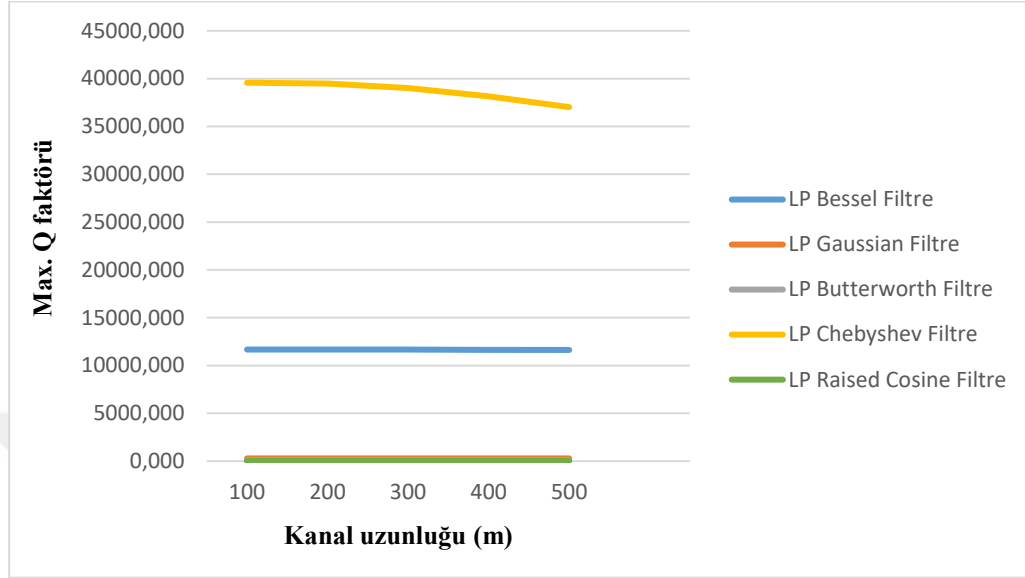
Min. BER analizi, bir haberleşme sistemine ait minimum hata oranını ifade etmektedir. Bit hata oranı, bir iletim sisteminde veri aktarımı esnasında kaç tane hata yapılacağını gösteren bir ölçüttür. Min. BER, belirli bir sinyal kalitesinde en düşük hata oranını gerçekleştirebileceği seviyeyi ifade eder. Bu değer, bir iletim sisteminin performansını ölçmek amacıyla önem arz eder. Tablo 4.5'te kanal uzunluğuna bağlı değişen Min. BER değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.5. OWC kanal uzunluğuna bağlı Min. BER değerleri

	Kanal uzunluğu				
	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
Min. BER					
LP Bessel Filtre	0	0	0	0	0
LP Gaussian Filtre	0	0	0	0	0
LP Butterworth Filtre	0	0	0	0	0
LP Chebyshev Filtre	0	0	0	0	0
LP Raised Cosine Filtre	7.01×10^{-63}	7.02×10^{-63}	7.03×10^{-63}	7.04×10^{-63}	7.05×10^{-63}

Sistemde lazer gücünün 20 dBm olarak seçilmesi, serbest uzay ortamındaki yüksek yayılmanın etkilerinin azalmasına sebep olmuş, sistemin BER değerleri sıfıra yakın çıkmıştır.

Şekil 4.24'te sistemden elde edilen Max. Q faktör değerleri alınarak oluşturulmuş performans grafiği yer almaktadır.



Şekil 4.24. Alçak geçiren Gaussian, Bessel, Butterworth, Chebyshev ve Raised Cosine filtre ile tasarlanan OWC sistemin kanal uzunluğunun değişimine göre elde edilen performans grafiği

4.3. Uygulama 3: Kapalı Alanda Kablosuz Görünür Işık Haberleşmesi Performansının Farklı Filtreler ile Analizi ve Karşılaştırılması

Kablosuz görünür ışık haberleşme teknolojisi açık ve kapalı alanlarda kullanım imkânı sağlamaktadır. Görünür ışık spektrumu kullanılarak veri iletişimini gerçekleştiren bu teknoloji LED lambalar ya da diğer ışık kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu haberleşme yöntemi, çoğunlukla iç mekanlarda veri transferinin gerçekleşmesine yönelik çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada kapalı ortamda görünür ışık ile veri iletim sistemi tasarlanmış ve sistemin iletim performansı farklı filtreler kullanılarak analiz edilmiştir.

Görünür ışık haberleşmesinde LOS (Line-of-Sight) ile NLOS (Non-Line-of-Sight) terimleri, iletim bağlantısının hat yapısını tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu iletim bağlantısı doğrudan engelsiz ve engel içeren olacak şekilde iki türlü olabilmektedir [16]. LOS kavramı, doğrudan görüş hattı anlamına gelmektedir. Bu durumda, verici ile alıcı arasında mevcut bir engel olmadığından ötürü iletilen sinyaller engelsiz bir şekilde alıcıya ulaşabilmektedir. Bağlantı yolunda engelin olmadığı durumu ifade eden LOS bağlantısı, sistem için en iyi performansı sağlamakta ve iletimin güçlü olmasına olanak tanımaktadır. NLOS kavramı ise doğrudan görüş hattının mevcut olmadığı durumu ifade etmektedir. Bu durumda, verici ile alıcı arasında engeller bulunabilmekte ve iletim sinyali bu engellerden yansıyarak ya da kırılarak vericiye ulaşabilmektedir. Engellerin varlığı, iletilen sinyallerin zayıflamasına, iletimde gecikmelere aynı zamanda sinyal kayıplarına da neden olabilmektedir. Bu sebeplerden ötürü NLOS bağlantısı LOS bağlantısına göre daha zayıf bir iletim oluşturmaktadır. NLOS durumu, iç mekanlarda ya da karmaşık yapıların içerisinde görünür ışık haberleşmesi sağlanmaya çalıştığı takdirde ortaya çıkmaktadır. Ayna ve cam gibi yüzeylerden kaynaklı yansımalar ya da oda içerisindeki mobilya ve duvarlar bu durumun oluşmasına örnek olacak etmenlerden sayılabilmektedir. İletim performansı bu engellerin sayısına bağlı olarak değişebilmekte bu performans, yaşanan yansımanın ortadan kaldırılması, doğru yerleştirme, hassas alıcı ve gürültü giderici teknikler kullanılarak artırılabilir.

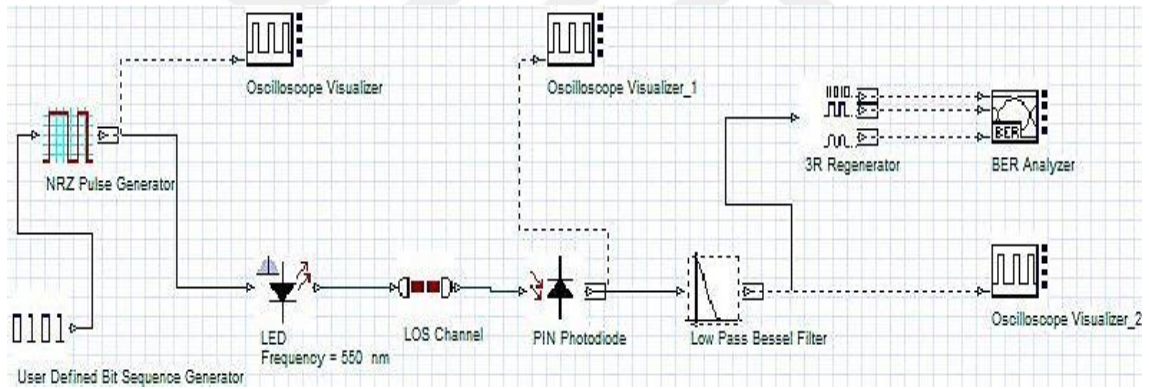
4.3.1. Kapalı Ortam İçin VLC Sistem Tasarımı

Yapılan çalışmada tek LED kullanılarak bir görünür ışık haberleşmesi sistemi tasarlanmıştır. Optisystem 20.0 simülasyon programı kullanılarak tasarlanan sistemde LOS kanal kullanılmıştır. Kurulan sistemin özellikleri Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

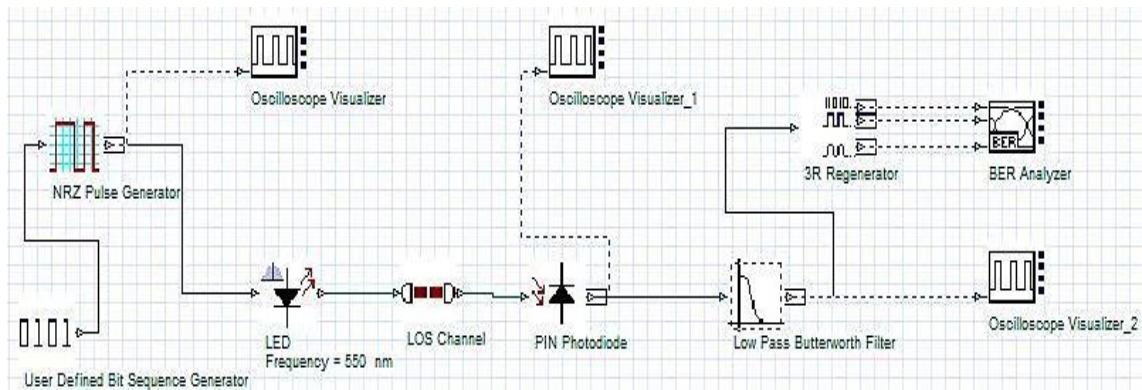
Tablo 4.6. İletim kanalının özellikleri

İletim Kanalı	Özellikleri
Mesafe	10.44 m
Verici Yarı Açısı	70
Işın Yoğunluğu Yarı Açısı	10
Giriş Yarı Açısı	10
Algılama Yüzey Alanı	1 cm ²
Optik Yoğunlaşma Faktörü	90
Kırılma İndisi Yoğunlaşma Faktörü	1.5
Yayılma Gecikmesi	0 ps/m

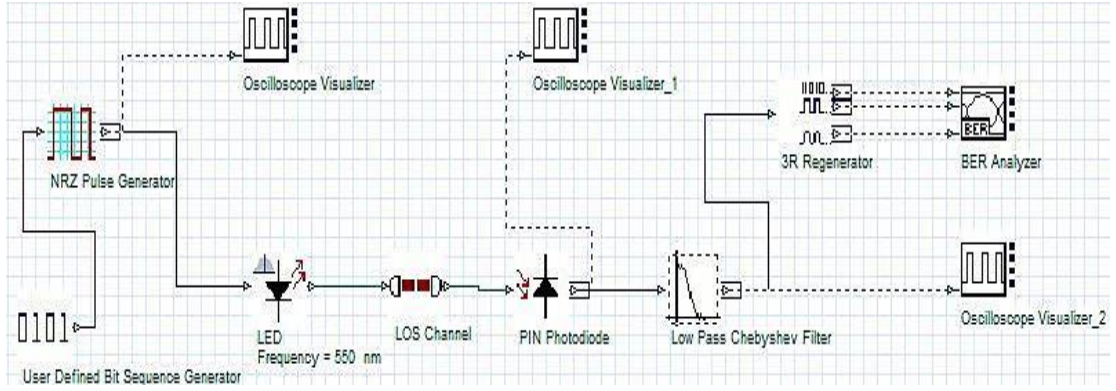
Kurulan sistemde bit dizisi üretici, NRZ darbe üretici, verici olarak 550 nm dalga boyuna sahip LED ışık kaynağı, alıcı olarak bir adet PIN fotodiyot, fotodiyot çıkışındaki sinyali filtrelemek için IIR alçak geçiren sayısal filtreler ve analiz için osiloskop, 3R rejeneratör, BER analizörü kullanılmıştır. Sistemde kullanılan IIR filtreler Bessel, Butterworth, Chebyshev, Gaussian ve Raised Cosine alçak geçiren filtreler olup bu filtreler ile tasarlanan sistemler sırasıyla Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



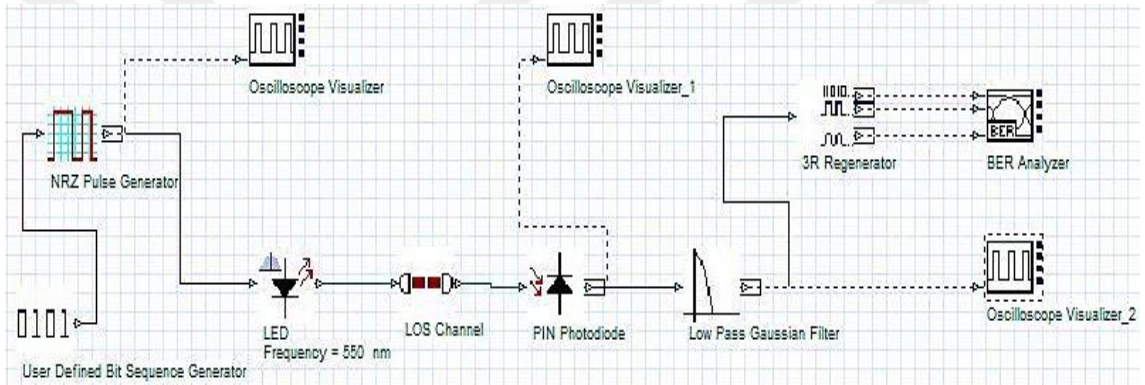
Şekil 4.25. Alçak geçiren Bessel filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı



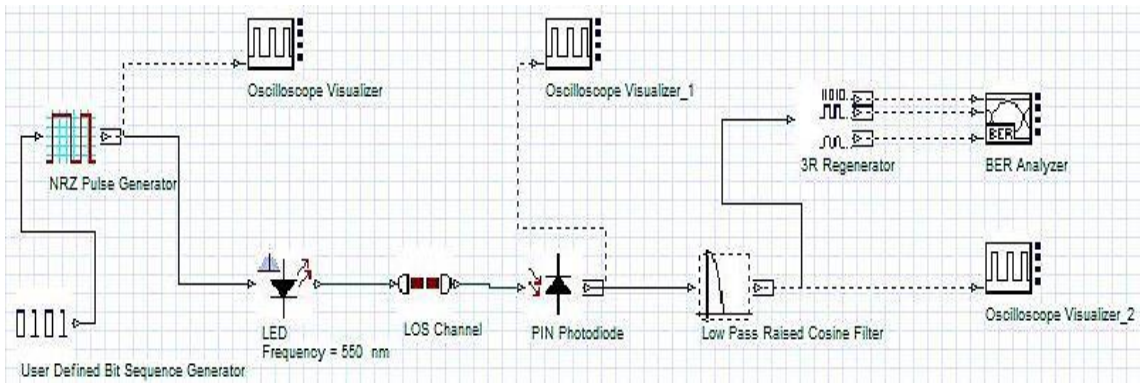
Şekil 4.26. Alçak geçiren Butterworth filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı



Şekil 4.27. Alçak geçiren Chebyshev filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı



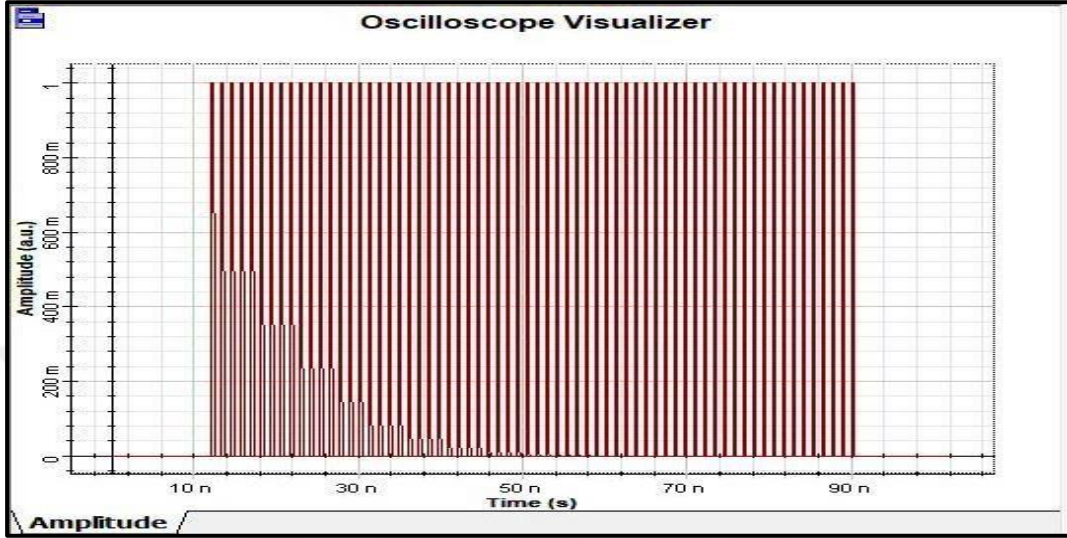
Şekil 4.28. Alçak geçiren Gaussian filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı



Şekil 4.29. Alçak geçiren Raised Cosine filtre ile kapalı ortam VLC sistem tasarımı

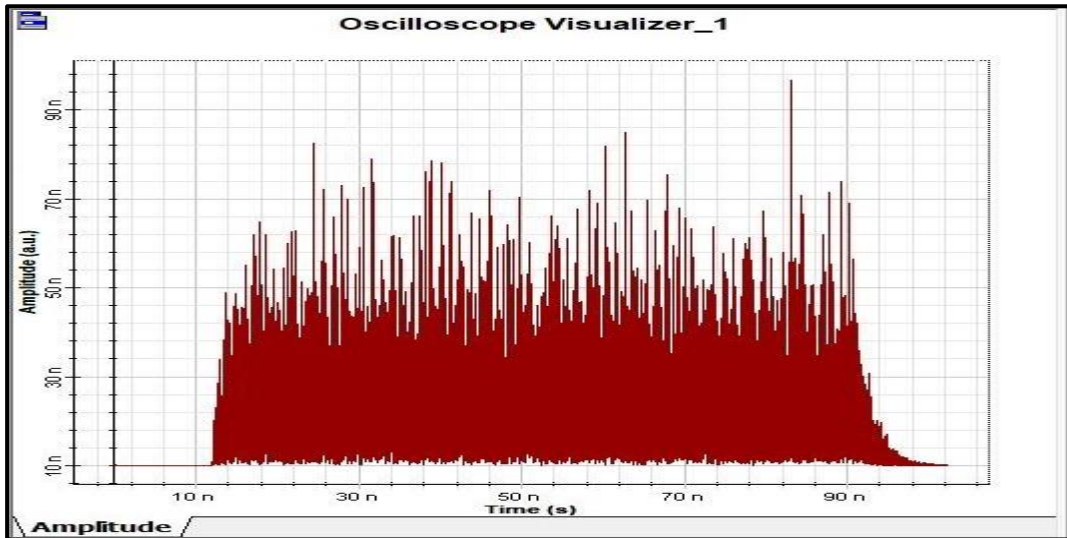
4.3.2. Simülasyon Analizi

Sistemin girişine bağlanan osiloskop sayesinde giriş sinyali görüntülenmiştir. Elde edilen giriş sinyal görüntüsü Şekil 4.30’da verilmiştir.



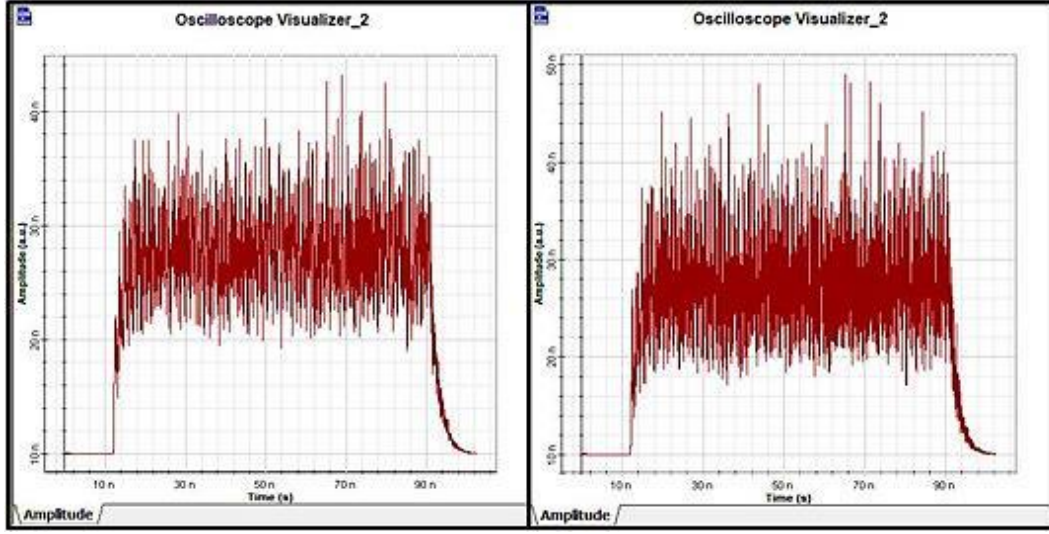
Şekil 4.30. Sistemin giriş sinyali

İletilen sinyal ortamdaki yansıma etkisinden dolayı bozulmaya uğramaktadır. LOS kanalından iletilen sinyalin filtrelenmeden önceki görüntüsü Şekil 4.31’de verilmiştir.



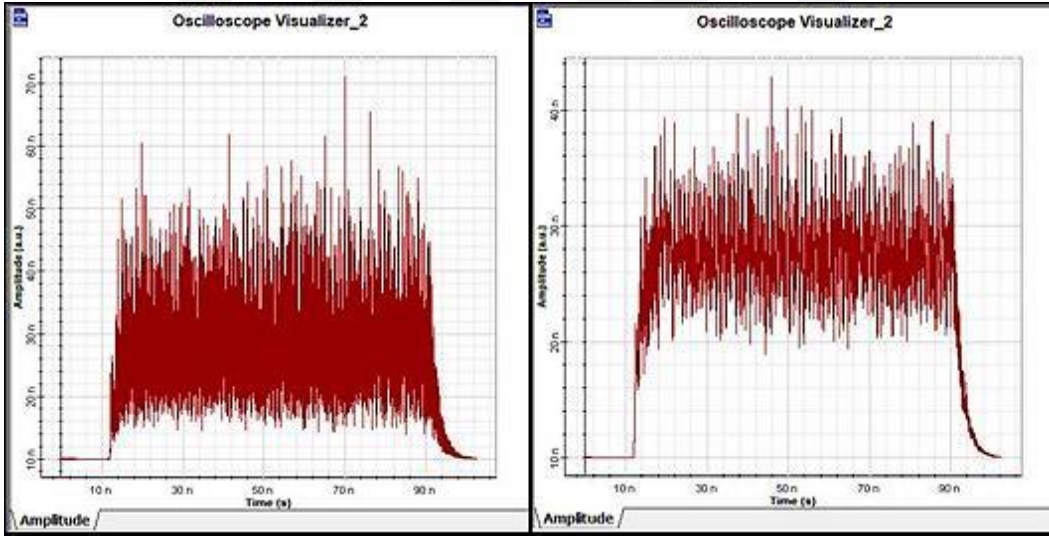
Şekil 4.31. Filtrelenmemiş sinyal

Sırasıyla Bessel ve Butterworth alçak geçiren filtre ile filtrelenen sinyal görüntüsü görüntüleri Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



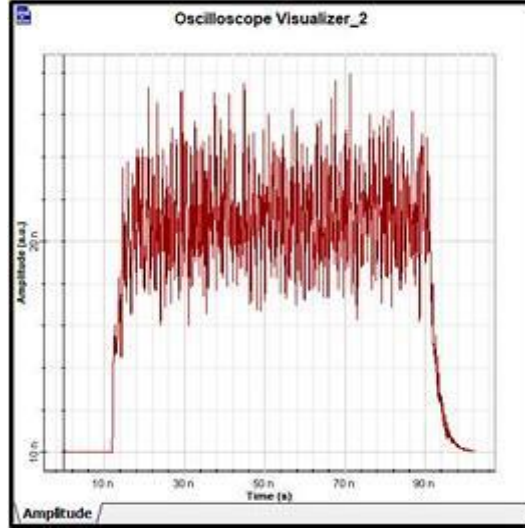
Şekil 4.32. Bessel ve Butterworth alçak geçiren filtreler ile filtrelenmiş sinyaller

Sırasıyla Chebyshev ve Gaussian alçak geçiren filtre ile filtrelenen sinyal görüntüsü görüntüleri Şekil 4.33'te gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Chebyshev ve Gaussian alçak geçiren filtreler ile filtrelenmiş sinyaller

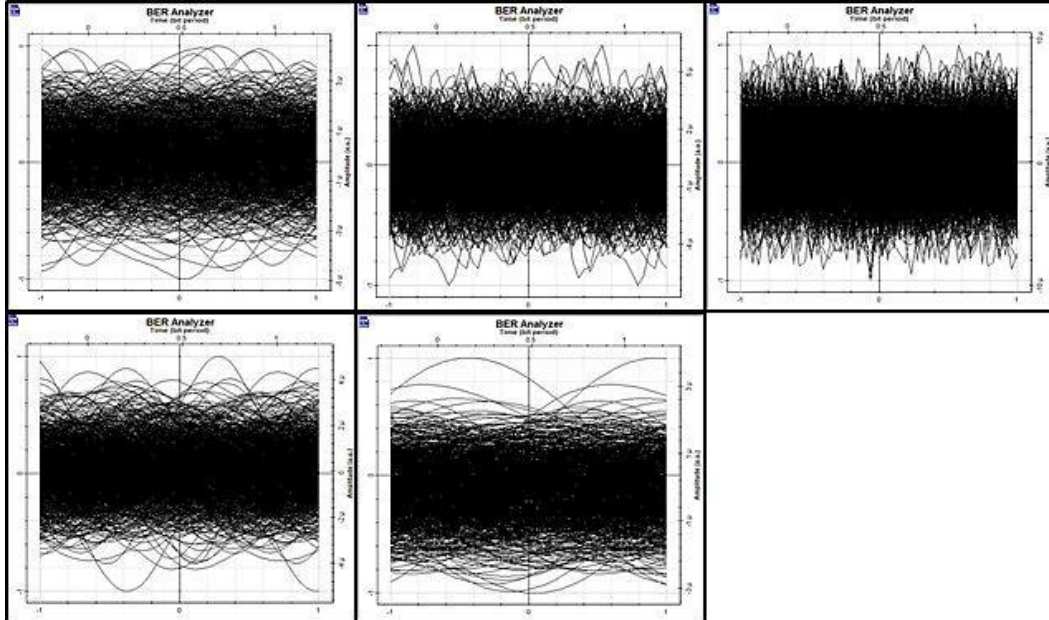
Raised Cosine alçak geçiren filtre ile filtrelenen sinyal görüntüsü Şekil 4.34'te gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Raised Cosine alçak geçiren filtresi ile filtrelenmiş sinyal

Bir sistemin göz yüksekliğinin açıklığı, sinyaldeki uç değerler arasında bulunan mesafeyi ifade etmektedir. Bu mesafenin genişliği sinyalin kalitesinin iyiliğini belirtirken göz açıklığının darlığı sinyaldeki bozulma oranını göstermektedir.

Şekil 4.35'te sırasıyla Bessel, Butterworth, Chebyshev, Gaussian ve Raised Cosine filtreler ile kurulan sistemlerin göz yükseklikleri gösterilmiştir.



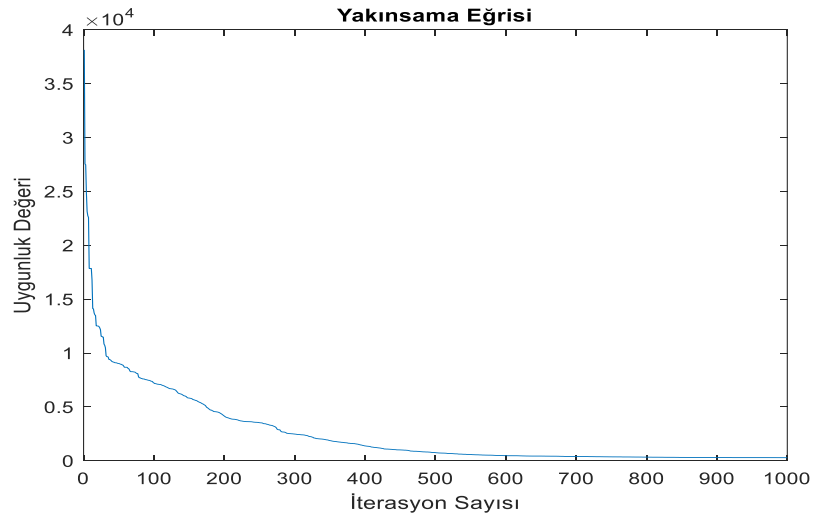
Şekil 4.35. Kapalı ortam VLC sistemin göz yüksekliği analizi

Çalışmanın sonraki aşamasında, sistemin fotodiyot çıkışından elde edilen sinyal Matlab ortamına aktarılmıştır. Bu sinyal, PSO ile optimize edilerek tasarlanmış FIR filtre ile filtrelenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

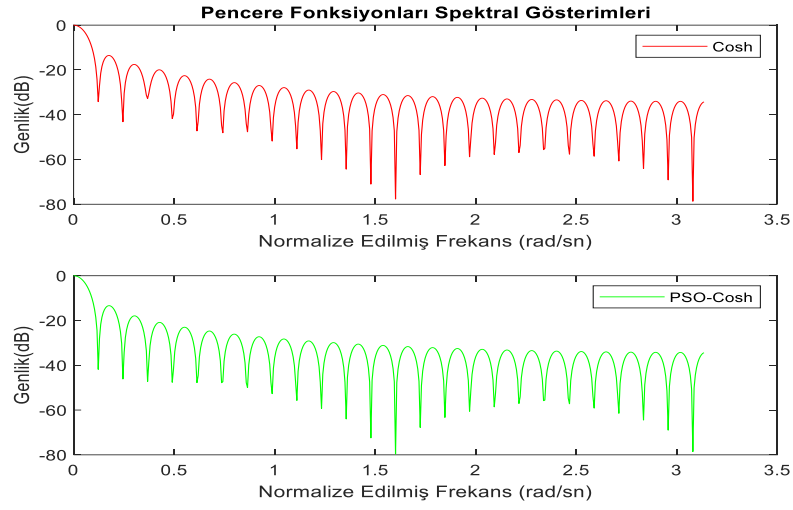
4.3.3. Sistemden Elde Edilen Sinyalin PSO ile Optimize Edilerek Tasarlanmış FIR Filtre ile Filtrelenmesi

Fourier Serisi Yöntemi ile sayısal FIR filtre tasarımının pratikte gerçekleştirilmesi için impals cevabının sınırlandırılmasıyla genlik cevabında istenmeyen salınımlar meydana gelir. Bu salınımları ortadan kaldırmak için pencere fonksiyonları kullanılmaktadır. Pencere fonksiyonları sayesinde filtre performansında iyileşmeler meydana gelir. Bu çalışmada, filtre tasarımı için kullanılacak olan pencere fonksiyonu Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile tasarlanarak farklı bir tasarım yöntemi sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan optimizasyon uygulamasında uygunluk fonksiyonu, referans olarak alınan cosh pencere fonksiyonunu ile optimizasyon kullanılarak tasarlanan pencere fonksiyonunun farkı olarak belirlenmiş, aradaki hata oranı minimize edilmeye çalışılmıştır. PSO kullanılarak tasarlanan pencere fonksiyonu sayısal filtre tasarımında kullanılarak sonuçlar çalışma içerisinde sunulmuştur. Her iterasyondan elde edilen uygunluk değerleri yakınsama eğrisi olarak Şekil 4.36’da verilmiştir. Algoritma, minimizasyon işlemi gerçekleştirdiğinden azalan bir grafik elde edilmiştir. Şekil 4.37’de referans alınan cosh pencere fonksiyonunun ve PSO ile tasarlanan cosh pencere fonksiyonunun (PSO-cosh) spektral gösterimleri bulunmaktadır.

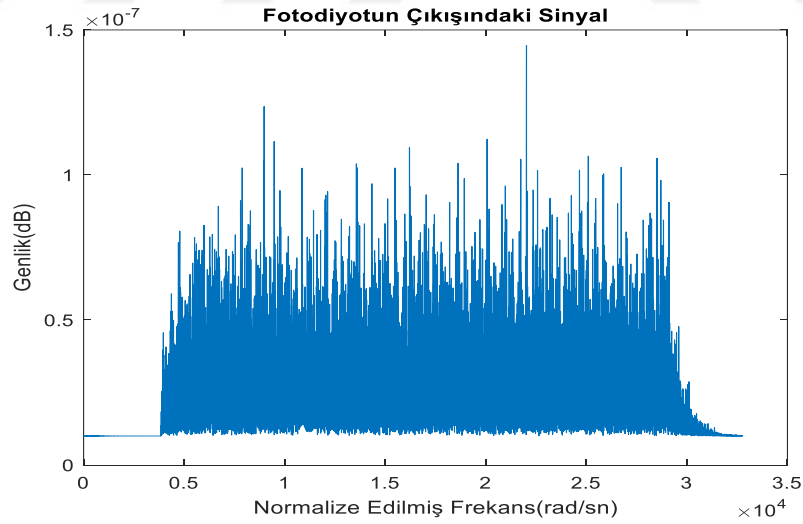


Şekil 4.36. Yakınsama grafiği

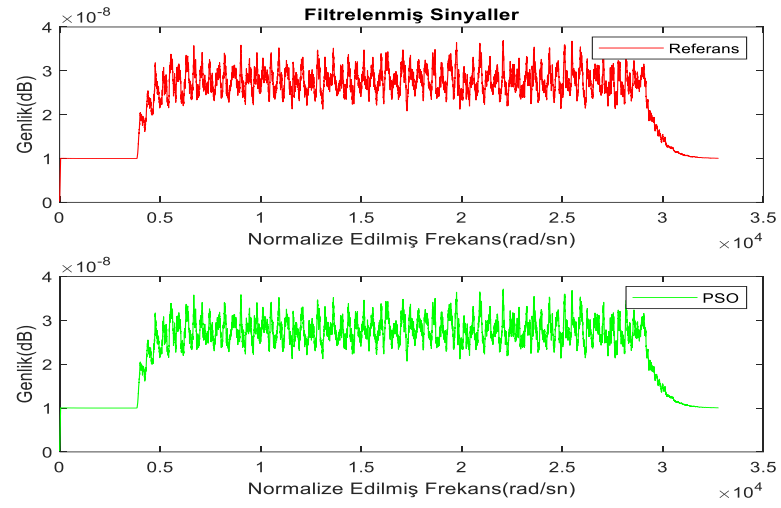


Şekil 4.37. Pencere fonksiyonları spektral gösterimleri

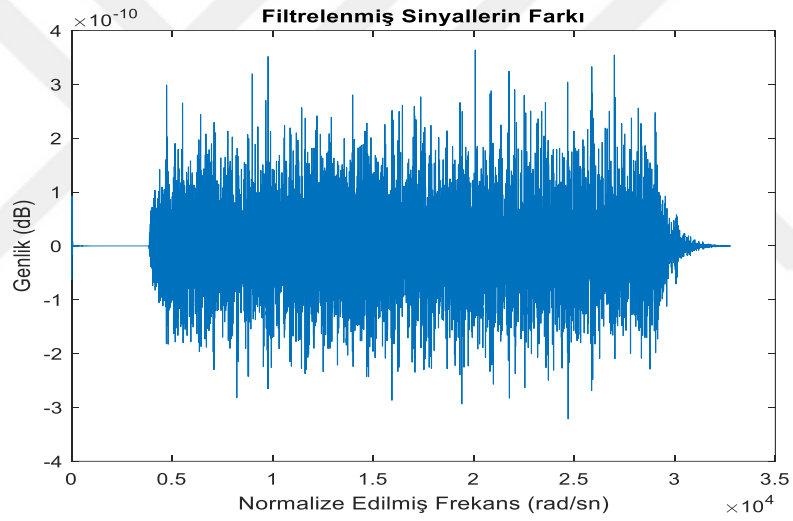
Referans pencere fonksiyonu ve PSO-cosh pencere fonksiyonu ile FIR filtre tasarımı gerçekleştirilmesiyle Şekil 4.38'te uygulama 3'te kullanılan fotodiyotun çıkışındaki sinyal ve Şekil 4.39'daki sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen filtrelenmiş sinyallerin sayısal olarak kıyaslanabilmesi için sinyallerin farkı alınmış, Şekil 4.40'ta sunulmuştur.



Şekil 4.38. Fotodiyot çıkışındaki sinyal



Şekil 4.39. Filtrelenmiş sinyaller



Şekil 4.40. Filtrelenmiş sinyallerin farkı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kablosuz haberleşme, büyük öneme sahip olan bir iletişim teknolojisidir. Görünür ışık haberleşmesi ise veri iletimini görünür ışık kullanarak gerçekleştirmekte olan, kablosuz haberleşmenin bir türü olarak bilinmektedir. Verici olarak LED gibi bir ışık kaynağı kullanan görünür ışık teknolojisinin temel çalışma prensibi, veri içeren sinyallerin hızlıca yanıp sönen ışık darbeleri şeklinde kodlanmasına dayanmaktadır. Haberleşmenin ışıkla sağlandığı sistemler açık ortamlarda ve iç mekanlarda kullanım alanı bulabilmektedir. Günümüzde Li-Fi teknolojisi adı altında çeşitli uygulama alanlarında yüksek performans sağlayan görünür ışık haberleşmesinin bazı sınırlayıcı faktörleri bulunmaktadır.

Bu tezde, görünür ışık haberleşmesinin sınırlayıcı faktörleri de göz önüne alınarak, simülasyon programı yardımıyla 3 ayrı çalışma yapılmıştır. Uygulama 1 bölümünde yer alan çalışmada 3 farklı modülatör için kurulan sistemde yoğun sisli, hafif sisli, puslu ve açık havada iletilen sinyalde meydana gelecek kayıplar hesaplanarak sisteme girilmiş, sistemin kanal uzunluğu değiştirilerek kalite faktörü ve göz yükseklikleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırılmış ve sistem performansı ile ilgili sonuçlar ortaya konulmuştur. Analiz sonuçlarına bakıldığında hava şartları kötüleştikçe bozulmanın arttığı, görüş mesafesinin uzunluğunun sistem performansını etkilediği görülmüştür. Görüş mesafesi arttıkça kalite faktöründe azalma meydana gelmiştir. Veri iletimindeki kalitenin azalmasıyla sistemin göz açıklığında da azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte harici modülatörle tasarlanan sistemlerin direkt modülasyonlu sisteme göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Elde edilen kalite faktörü değerlerinden yola çıkılarak FSO sisteminde harici modülatör olarak Mach-Zehnder modülatörünün kullanımının Electroabsorption modülatörüne göre daha avantajlı olacağı görülmüştür.

Uygulama 2 bölümünde yer alan çalışmada 5 farklı filtre kullanılarak Optik Kablosuz İletişim (OWC) sistemi tasarlanmıştır. Öncelikle çalışmada kanal uzunluğunun iletim sistemine olan etkisi incelenmiştir. Analiz sonucunda OWC sistemde kanal uzunluğu arttıkça sistemin kalitesinde bir azalma meydana gelmiştir. Bu azalma Optisystem benzetim programından elde edilen göz diyagramlarında açıkça görülmektedir. Kanal uzunluğu arttıkça sistemin göz açıklığında azalma meydana gelmiştir, bu da iletim kalitesinin düştüğü anlamına gelmektedir. Daha sonra, alçak geçiren Gaussian filtre, alçak geçiren Bessel filtre, alçak geçiren Butterworth filtre, alçak geçiren Chebyshev filtre ve alçak geçiren Raised Cosine filtre için tasarlanan OWC sistemlerin kanal uzunluğu değiştirilerek Max. Q faktörü, Min. BER analizi ve göz yüksekliği sonuçları elde edilmiştir. Kurulan OWC sistemlerinden elde edilen sonuçlar, alçak geçiren Bessel filtrenin diğer filtre türlerinden daha iyi bir sinyal elde edilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

Uygulama 3'te yer alan çalışmada, vericisi ile alıcısı arasında 10.44 m mesafe bulunan bir kapalı alanda oluşturulan sistemde gerçekleştirilen sinyal iletiminin sonuçları elde edilmiştir. Öncelikle tasarlanan sistemden elde edilen fotodiyotun çıkışındaki sinyal alçak geçiren IIR sayısal filtrelerden Bessel, Butterworth, Chebyshev, Gaussian ve Raised Cosine filtre ile filtrelenmiş, Bessel filtrenin daha başarılı olduğu Şekil 4.35'te yer alan göz yüksekliği analizi verilerinde gözlenmiştir. Uygulamanın devamında fotodiyot çıkışındaki sinyal, bir diğer sayısal filtre türü olan FIR filtre kullanılarak filtrelenmiştir. Bu uygulama kapsamında filtre tasarımında kullanılmak üzere literatürde bulunan cosh pencere fonksiyonu referans alınmış, PSO ile cosh pencere fonksiyonu (PSO-cosh) tasarlanmıştır [74]. Bu pencere fonksiyonlarından elde edilen FIR filtreler ile fotodiyot çıkışındaki sinyal filtrelenerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu elde edilen Şekil 4.40'taki hata grafiği incelendiğinde alternatif tasarım yöntemi olarak sunulan PSO-cosh pencere fonksiyonun başarılı olduğu görülmektedir.

Görünür ışık haberleşmesi üzerine yapılan bu tez çalışmasında, çeşitli iletim ortamlarının ve bu ortamlarda meydana gelen bozucu etkilerinin haberleşme performansını etkilediği bozucu etkilerin giderilmesi ile güvenli şekilde verinin iletilebileceği ortaya koyulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlardan hareketle çeşitli koşullarda iletim imkânı sağlayan bu haberleşme sisteminin gündelik hayatta avantajlı bir seçenek olarak karşımıza çıkacağı söylenebilir. Bu haberleşme sistemi daha farklı iletim ortamları için simüle edilerek kullanım alanları geniş çerçevede gözlemlenebilir ve haberleşme performansının iyileştirilmesi adına alternatif çözümler üretme üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Haas, H., Yin, L., Wang, Y., & Chen, C. (2015). What is lifi?. Journal of lightwave technology,34(6), 1533-1544.
- [2] Shannon, C.E., 1998. Communication in the Presence of Noise. Proceedings of the IEEE, 86 (2), 447-457.
- [3] Elgala, H., 2010. A Study on the Impact of Nonlinear Characteristics of LEDs on Optical OFDM. (Doktora Tezi), School of Engineering and Science Jacobs University, Bremen.
- [4] Komine, T. ve Nakagawa, M., 2004. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 50 (1), 100-107.
- [5] Le Minh, H., vd., 2008. High-speed visible light communications using multipleresonant equalization. Photonics Technology Letters, IEEE, 20(14), pp. 1243– 1245.
- [6] Mit S. P., 2017.Light Fidelity (Li-Fi) In The Field Of Internet Of Things. International Journal For Technological Research In Engineering. Volume 4, Issue 11.
- [7] Ertuna, A. D., 2016, Görünür Işık İle Haberleşme ve Sistem Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [8] Al_Barazanchi I., Sahy S. A. ve Jaaz Z. A., 2021, Traffic Management with Deployment of Li-Fi Technology. In Journal of Physics: Conference Series,1804(1), 12141.
- [9] Hassan R., Flayyih M. S., Mahdi A., Inn A., Sadeq A. S. ve Murad D. F., 2020, Visible Light Communication Technology For Data Transmission Using Li-Fi, In 2020 2nd International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS), IEEE, 1-5.
- [10] Anbalagan R., Hussain M. Z., Jayabalakrishnan D., Muruga D. N. ve Prabhakar M., 2020, Vehicle to vehicle data transfer and communication using LI-FI technology, Materials Today: Proceedings.
- [11] Yuvaraju M., Mansingh P. B. ve Sekar G., 2021, A Li-Fi Based Collision Avoidance System For Vehicles Using Visible Light Communication. In 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), IEEE,114-116.
- [12] Pradhan J., Kappala V. K. ve Das S. K., 2020, Performance Analysis of a Li-Fi System under Ambient Light Conditions. In 2020 National Conference on Communications (NCC), IEEE, 1-6.
- [13] Ismail S., Ahmad N. ve Arshad I. D., 2020, Implementation of Li-Fi based home automation system. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 767(1), 12051.
- [14] Tota P. ve Vaida M. F., 2020, Light Fidelity (Li-Fi) Communications Applied to Telepresence Robotics, In 2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC), IEEE, 1-5.
- [15] Köse, A.H.(2022).Optik haberleşme sistemlerinde performans analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] Poulouse, A. (2022). Simulation of an Indoor Visible Light Communication System Using Optisystem. Signals, 3(4), 765-793.
- [17] Manivannan, K., Raja, A. S., & Selvendran, S. (2016). Performance investigation of visible light communication system using optisystem simulation tool. Int J Microwave Opt Technol India.
- [18] Savaşçıhabeş, A. İçortam Görünür Işık Haberleşme Kanallarında Güç Analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (32), 536-541.

- [19] Fişne, A., & Toker, C. (2014, April). Investigation of the channel structure in visible light communication. In 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1646-1649). IEEE.
- [20] Sert, S., Akıllı, A. H., Bilbay, Ö., Cengiz, C., & Özen, A. (2020, October). Optical Single Carrier Frequency Domain Channel Equalizer for Visible Light Communication. In 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- [21] Aziz, M. A., & Idris, S. K. (2021). An optisystem simulation for visible light Communication system performance using Mach Zehnder modulation. INOTEK 2021, 1, 55-56.
- [22] Yaşar, S., Sinop, H., Tek, Y. İ., Tuna, E. B., Karaerik, K., & Özen, A. (2020, October). Investigation of the Performance of Single Carrier Visible Light Communication Systems in Multi-Path Fading Optical Channels. In 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- [23] De Lausnay, S., De Strycker, L., Goemaere, J. P., Stevens, N., & Nauwelaers, B. (2014, May). Matlab based platform for the evaluation of modulation techniques used in VLC. In 2014 International Conference on Development and Application Systems (DAS) (pp. 57-61). IEEE.
- [24] Madavi, S. M., & Harne, R. R. (2018). Visible Light Communication using MATLAB.
- [25] Zafrilla, R., & Monserrat, J. F. A Matlab-based ray launching simulation tool for VLC applications.
- [26] Putra, A. D. S., Samijayani, O. N., Astharini, D., & Syahriar, A. (2022, November). Simulation of Visible Light Communication and Free Space Optic For IoT Using Optisystem. In 2022 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD) (pp. 1-5). IEEE.
- [27] Princy, S. L., Jenefer, W., & Anita, H. V. (2020). Performance Analysis of Visible Light Communication (Vlc) with and Without Consider the External Noise Using Mach Zehnder (Mz) Modulator.
- [28] Al-Khaffaf, D. A. J., & Hujijo, H. S. R. (2018). High data rate optical wireless communication system using millimeter wave and optical phase modulation. ARPN J Eng Appl Sci, 13, 9086-92.
- [29] Refas, S., Acheli, D., Yahia, S., Meraihi, Y., Ramdane-Cherif, A., Gabis, A. B., & Eldeeb, H. B. (2022, May). Performance Analysis of Multi-Hop V2V VLC System under Atmospheric Weather Conditions. In 2022 IEEE 9th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT) (pp. 414-419). IEEE.
- [30] Esmail, M. A., Fathallah, H., & Alouini, M. S. (2016). Outdoor FSO communications under fog: attenuation modeling and performance evaluation. IEEE photonics journal, 8(4), 1-22.
- [31] Holzmann, G. ve Pehrson, B., 1994, The Early History of Data Networks, WileyIEEE Computer Society Press, Washington, DC.
- [32] Uysal, M., Miramirkhani, F., Narmanlioglu O. ve ark. (2017). IEEE 802.15.7r1 reference channel models for Visible Light Communications. IEEE Communications Magazine, 55(1), 212-217.
- [33] Uysal, M. ve Nouri, H., 2014. Optical Wireless Communications an Emerging Technology. 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Avusturya.
- [34] Ghassemlooy, Z., Popoola, W. ve Rajbhandari, S. (2017). Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB.
- [35] Cosic, I., Cosic, D., and Lazar, K. (2017). Tesla, bioresonances and resonant recognition model. In Proceedings of the 2nd International Congress Nikola Tesla, Belgrade, Serbia Jun. (2).
- [36] Le Minh, H., vd., 2008. High-speed visible light communications using multipleresonant equalization. Photonics Technology Letters, IEEE, 20(14), pp. 1243– 1245.

- [37] Cailean, A., 2014. Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field., Université De Versailles Saint-Quentin En Yvelines Ecole Doctorale Stv, Doc Thesis, Versailles.
- [38] Hanzo, L., vd., 2012. Wireless Myths, Realities, and Futures: From 3G/4G to Optical and Quantum Wireless, Proceedings of the IEEE , vol.100, no.Special Centennial Issue, May 13, pp.1853-1888.
- [39] (2014) pureLiFi. [Online]. <http://purelifi.com/>
- [40] Raunak, Akshay Sanganal Rahul R. Sharma, "Li-Fi Technology Transmission of data through light," al , Int.J.Computer Technology & Applications, Navi Mumbai, India, 2014.
- [41] Rea, M. S. 2000. The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application. Illuminating Engineering Society of North America, 1004 p. Kuzey Amerika.
- [42] Prerna Chauhan, Ritika Tripathi Jyoti Rani, "Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless communication," International Journal of Applied Engineering Research, Nov 2012.
- [43] Rajagopal, S., Roberts, R. D., & Lim, S. K. (2012). IEEE 802.15. 7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. IEEE Communications Magazine, 50(3), 72-82.
- [44] Zukauskas, A., Shur, M. ve Gaska, R., 2002. Introduction to Solid-State Lighting. Wiley, 224 p. Hoboken, NJ, Amerika Birleşik Devletleri.
- [45] Lehman, B. ve Wilkins, A. J., 2014. Designing to Mitigate the Effects of Flicker in LED Lighting. IEEE Power Electronics Magazine, 1 (3), 18 -26.
- [46] Anonim, 2011. Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. IEEE Standart 802.15.7, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Parça 15.7. New York, Amerika Birleşik Devletleri.
- [47] Anonim, 2014. The IEEE 802.15.7r1 Study Group. <http://www.ieee802.org/15/> (12.10.2018).
- [48] Uçar, S., Turan, B., Çöleri Ergen, S., Özkasap, Ö. ve Ergen, M., 2016. Dimming Support for Visible Light Communication in Intelligent Transportation and Traffic System. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. İstanbul, Türkiye.
- [49] Devereux, H., Smalley, M., 1995. "Are infra red illuminators eye safe?," Security Technology, 1995. Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers 29th Annual 1995 International Carnahan Conference on , vol., no., 18-20 Oct., pp.480-481.
- [50] International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, 2011. IARC Classifies Radio Frequency Electromagnetic Fields as Possible Carcinogenic to Humans, Press Release No. 208, 31 May.
- [51] Kratika Khandelwal, S. K. J., "A Review Paper on Li-Fi Technology", (IJIRST/Conference/VIMPACT, 2016.
- [52] Kim, Hyun-Seung, et al., 2013. An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique. Journal of Lightwave Technology 31(1), 134-144.
- [53] Cailean, A., 2012. Cagneau, B.; Chassagne, L.; Topsu, S.; Alayli, Y.; Blossville, J-M, "Visible light communications: Application to cooperation between vehicles and road infrastructures," Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE , vol., no., pp.1055-1059.
- [54] Tarbouche, Eng Simon. Light Fidelity (Li-Fi) Technology.
- [55] Rahaim, M.B., Vegni, AM., Little, T.D.C, 2011. A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system, GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), IEEE , vol., no. , 5-9 Dec., pp.792-796.

- [56] Rahaim, M., Borogovac, T., Little, T.D.C., Mirvakili, A., Joyner, V., 2011. Demonstration of a Software Defined Visible Light Communication System.
- [57] Dharmrajsinh N. Parmar, Khushbu V. Mehta Jay H. Bhut, "LI-FI Technology – A Visible Light Communication," Internal Journal Of Engineering Development And Research, Jan 2014.
- [58] Ravi Prakash, Prachi Agarwal —The New Era of Transmission and Communication Technology : LiFi (Light Fidelity) LED & TED Based Approach, International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 3, Issue 2, February 2014.
- [59] N. Kumar, D. Terra, N. Lourenço, L. N. Alves, and R. L. Aguiar, Visible light communication for intelligent transportation in road safety applications, in Proc. 7th Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf, pp. 1513– 1518, 2011.
- [60] Jitender Singh, Vikash A New Era in Wireless Technology using Light-Fidelity International Journal of Recent Development in Engineering and Technology ISSN 2347- 6435(Online) Volume 2, Issue 6, June 2014.
- [61] Cui, K., Chen, G., Xu, Z. ve Roberts, R. D., 2011. 2nd IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 5 -9 Kasım 2011. Houston, Amerika Birleşik Devletleri.
- [62] Bondyopadhyay PK. Sir JC Bose diode detector received Marconi's first transatlantic wireless signal of December 1901 (the "Italian Navy Coherer" Scandal Revisited). Proceedings of the IEEE, Cilt.86, 1998, s.259-285.
- [63] Haruyama, S., "Visible light communications", 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, pp. 1–22, IEEE, 2010.
- [64] Visible Light Communications Consortium, (2008). www.vlcc.net.
- [65] R.Karthika, S.Balakrishnan —Wireless Communication using Li-Fi Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG-IJECE) volume 2 Issue 3 March 2015.
- [66] Tari, E. (2010). Optik modölatörlerde performans analizi.
- [67] Singh, R., Ahlawat, M., & Sharma, D. (2017). Study and performance evaluation of Radio over Fiber using Mach Zehnder Modulator. International Journal of Advanced Research in Computer Science, 8(5), 1095-1100.
- [68] Lawetz, C., Cartledge, J. C., Rolland, C., & Yu, J. (1997). Modulation characteristics of semiconductor Mach-Zehnder optical modulators. Journal of Lightwave technology, 15(4), 697-703.
- [69] Kaya, T., & İnce, M. C. (2011, May). Genetik Algoritma Yardımıyla Elde Edilen Yüksek Performanslı Pencere Fonksiyonlarının Yinelemesiz Sayısal Filtre Tasarımında Kullanımı. In 6th International Advanced Technologies Symposium-IATS (Vol. 11, pp. 114-119).
- [70] Alpay, M. (2007). Yön seçici ve hızı ayarlı filtreler, Gauss ve Gabor filtrelerinde son gelişmeler.
- [71] Tanyıldızı, T. (2012). Akıllı yöntemlerle sayısal filtre tasarımı/null.
- [72] Kaçmaz, M. Aktif Filtreler. Elektrik Mühendisleri Odası Aylık Yayın Organı, 181, 5.
- [73] Kaszynski, R., & Piskowski, J. (2005, May). Bessel filters with varying parameters. In 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings (Vol. 1, pp. 757-761). IEEE.
- [74] Şerbet, F. (2018). Parçacık sürü optimizasyon algoritmasıyla Labview ortamında sonlu impuls cevaplı sayısal filtre için gerçek zamanlı pencere fonksiyonu tasarımı/Real-time window function design for finite impulse response digital filter in Labview with particle swarm optimization algorithm.

- [75] Cepheli, Ö., & Kurt, G. K. (2013, April). Analysis on the effects of artificial noise on physical layer security. In 2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- [76] Kahveci, S. Sayısal Modülasyon Tekniklerinin Simülasyonu.
- [77] Kazancili, U. U., & Ünverdi, N. Ö. (2021, June). Pulse Generator Applications in Radio Over Fiber Communication Systems. In 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- [78] Korkmaz, E., & Ünverdi, N. Ö. (2021, June). Benchmarking on Performances of Active and Passive Optical Networks. In 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- [79] Sadiku, M. N., Musa, S. M., & Nelatury, S. R. (2016). Free space optical communications: an overview. *European scientific journal*, 12(9), 55-68.
- [80] Chan, V. W. (2006). Free-space optical communications. *Journal of Lightwave technology*, 24(12), 4750-4762.
- [81] Sahoo, P. K., & Yadav, A. K. (2020). A comprehensive road map of modern communication through free-space optics. *Journal of Optical Communications*.
- [82] Sahoo, P. K., & Yadav, A. K. (2023). Impact of misalignment parameter on performance of free-space optical communication system. *Optical and Quantum Electronics*, 55(2), 153.
- [83] Agrawal, G. P. (2012). *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons.
- [84] Gupta, R., & Aggarwal, A. (2019). Fog and Atmospheric Turbulence in FSO: Models to mitigate. *Int. J. Contemp. Technol. Res*, 2(3).
- [85] Duvey, D., & Gupta, R. (2014). Analysis of fog attenuation models for multitransceiver FSO system for different frequencies. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 3(6), 216-220.
- [86] Garg, Nitin, and Sanjeev Kumar. "Design of free space optical communication link with Mach-Zehnder optical modulator for long distance." 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE, 2013.
- [87] Sağ, E., & Kavas, D. Ö. Ü. A. Uydulararası Optik Haberleşmede Performans Analizi.
- [88] Bayraktar, M. Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemlerinde Turbo Çarpım Kodların Performans Analizi Performance Analysis of Turbo Product Codes on Free Space Optics Communication Systems. *ile*, 1(2), 1-2.
- [89] Yadav, S. K., & Chouhan, S. (2014). Performance analysis of optical wireless communication link by multiple Tx/Rx with and without amplifier. *Int J Eng Res Technol (IJERT)*, 3(6).
- [90] Goyal, H., Saxena, J., & Dewra, S. (2015). Performance analysis of optical communication system using different channels. *Int J Adv Res Comput Commun Eng*, 4, 19-22.
- [91] Tiwari, P., Jaiswal, A. K., Agrawal, N., & Nitin, N. (2015). Analysis of Bidirectional Wireless Optical Channel Integrated with Optical Fiber. *International Journal of Computer Applications*, 121(5).
- [92] Uzun, P. (2019). Görünür ışık haberleşmesinde modülasyon türlerinin incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [93] Arslan, E. (2020). Mikroşerit alçak geçiren filtre tasarımı ve analizi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

ÖZGEÇMİŞ

Fethiye Merve KAVAK

[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Bildiriler:

1. F. M. Kavak, D. Kaya, Comparison of the Effects of Various Modulator Types on System Performance in Different Weather Conditions, 2nd International Conference on Innovative Academic Studies, Konya, Turkey, (2023), (Full Text Paper).