
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YENİ NESİL KABLOSUZ VE HİBRİT HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Muharrem AÇIKGÖZ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muharrem AÇIKGÖZ

17/06/2025

YENİ NESİL KABLOSUZ VE HİBRİT HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Muharrem AÇIKGÖZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Mobil kullanıcı sayısının artışı ve daha önemlisi kullanıcıların yüksek bant genişliği gerektiren nesnelerin interneti (IoT) ve kaliteli video akışı gibi gibi taleplerinin yaygınlaşması nedeniyle mevcut radyo frekansı (RF) teknolojilerinin sunmuş olduğu çözümler ve bant genişliği yetersiz kalmaktadır. Bu aşamada RF teknolojisini tamamlamak için optik kablosuz haberleşme (OWC) teknolojileri ve bu teknolojilerin hibrit sistem yaklaşımıyla ürettiği çözümler ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, yeni nesil mobil haberleşme sistemleri olan 5G ve 6G'nin gereksinimleri ile bu sistemlerin sorunsuz bir şekilde çalışması için gerekli kablosuz optik alt yapı bileşenleri hakkında araştırma yapılarak, bu alt yapı bileşenlerinin daha verimli bir iletim için oluşturduğu hibrit sistemler ve bu sistemlerin performans analizi çalışmaları yapılmış ve aynı zamanda optik kablosuz haberleşme sistemlerinde yapay zeka yöntemlerine ait farklı modellerin Matlab® ve Python™ programları ile optik sistemlerin modellenmesi, performans izlemesi, analizi ve optimizasyonu çalışmaları aşamasında kullanımı ile ilgili literatürde çok fazla çalışması bulunmayan konularda yeni modellemeler önerilmiştir. Kablosuz hibrit modeller olarak; RoFSO, RoFSO-VLC, FSO-VLC, RF/FSO-VLC gibi farklı hibrit kablosuz sistemlerin analiz çalışmaları yapılmıştır. Hibrit sistem yaklaşımında, optik sistemlerin farklı parametreleri için Optisystem yazılımı kullanılarak farklı tasarımlar geliştirilmiş ve optik performansları incelenmiştir. Bu tasarımların simülasyonundan elde edilen verilerden oluşan giriş parametreleri ile birlikte ML modellerinin eğitilmesi ve tutarlı tahminler elde edilmesi sağlanmıştır. Aynı zamanda, Matlab ve Optisystem programlarının birlikte kullanımı temelinde tasarlanan FSO-VLC hibrit sisteminin Matlab üzerinden çalıştırıldığı ve elde edilen çıktılarla birlikte Matlab ortamında ML yöntemlerinin eğitildiği yeni bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan ML modeli optik sistemin takip edilmesini ve istenilen çıktı değerine göre girdi parametresinin optimize edilmesini sağlayabilmektedir. Ayrıca, Optisystem ile oluşturulan RF/FSO-VLC hibrit sisteminin parametrelerinin belirlenmesi, uçtan uca performansının takip edilmesi ve eğitilen ML modelleri yardımıyla sert anahtarlama yapılarak sistemler arası geçişin sağlanması da Matlab programı ile gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu	:	93420
Anahtar Kelimeler	:	OWC, 5G, 6G, hibrit kablosuz haberleşme, RF, FSO, VLC, makine öğrenmesi
Sayfa Adedi	:	203
Danışman	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF NEXT-GENERATION WIRELESS AND HYBRID COMMUNICATION SYSTEMS

(Ph. D. Thesis)

Muharrem AÇIKGÖZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

The solutions and bandwidth offered by existing radio frequency (RF) technologies are insufficient, due to the increase in the number of mobile users and, more significantly, the widespread demands of users such as the Internet of Things (IoT) and high quality video streaming, which require higher bandwidth. At this stage, optical wireless communication (OWC) technologies and the solutions produced by these technologies with a hybrid system approach come to the fore to complement RF technology. In this dissertation, research has been carried out on the requirements of 5G and 6G, which are the next-generation mobile communication systems, and the wireless optical infrastructure components required for the proper operation of these systems, hybrid systems formed by these infrastructure components for more efficient transmission and performance analysis studies of these systems have been carried out, and at the same time, new models have been proposed on topics that have not been widely studied in the literature on the use of different models of artificial intelligence methods in optical wireless communication systems during the modelling, performance monitoring, analysis and optimization of optical systems with Matlab® and Python™ programs. As wireless hybrid models; different hybrid wireless systems such as RoFSO, RoFSO-VLC, FSO-VLC, RF/FSO-VLC have been analysed. In the hybrid system approach, different designs were developed using Optisystem software for different parameters of optical systems and their optical performances were analyzed. With the input parameters consisting of the data obtained from the simulation of these designs, ML models are trained and consistent predictions are obtained. Furthermore, a novel model was developed in which the FSO-VLC hybrid system designed on the basis of the integrated use of Matlab and Optisystem programs was implemented via Matlab and ML methods were trained in Matlab environment with the outputs obtained. The ML model can monitor the optical system and optimize the input parameter according to the desired output value. In addition, determining the parameters of the RF/FSO-VLC hybrid system created with Optisystem, monitoring the end-to-end performance and providing the handover between the systems by hard switching with the help of the trained ML models were also realized with the Matlab program.

Science Code	:	93420
Key Words	:	OWC, 5G, 6G, hybrid wireless communication, RF, FSO, VLC, machine learning
Page Number	:	203
Supervisor	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından itibaren destek ve yardımlarını esirgemeyen ve aynı zamanda pozitif enerjisini her zaman hissettiğim değerli hocam ve danışmanım sayın Prof. Dr. Murat YÜCEL'e, manevi destekleri için sevgili eşim Berna AÇIKGÖZ'e ve kıymetli kızlarım Beren'e ve Zeynep'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ 9

3. YENİ NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ 13

3.1. Yeni Nesil Mobil Haberleşme Sistemleri 14

3.1.1. 5G haberleşme 18

3.1.2. 5G ötesi (5GB) haberleşme 22

3.2. Optik Kablosuz Haberleşme (OWC) Sistemleri 26

3.2.1. FSO haberleşme sistemi 31

3.2.2. VLC haberleşme sistemi 34

3.2.3. OCC haberleşme sistemi 45

3.3. RoF ve THz Sistemler 47

4. HİBRİT KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ 55

5. MAKİNE ÖĞRENMESİ ve OPTİK PERFORMANS ANALİZİ 65

5.1. OPM, MFI ve QoT 67

5.2. ML Yöntemleri 70

Sayfa

6. TASARIMI YAPILAN SİSTEMLER VE ANALİZ ÇALIŞMASI 77

6.1. RoFSO Hibrit Haberleşme 77

6.1.1. OOK-RoFSO performans analizi 80

6.1.2. QAM/PSK-RoFSO performans analizi 86

6.2. RoFSO-VLC Hibrit Haberleşme 113

6.3. FSO-VLC Hibrit Haberleşme 128

6.4. RF/FSO-VLC Hibrit Haberleşme 154

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 181

KAYNAKLAR 185

ÖZGEÇMİŞ 202

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Kablosuz haberleşme teknolojileri 13

Çizelge 3.2. 1G'den 6G'ye detaylı karşılaştırma 17

Çizelge 3.3. Optik kablosuz haberleşme yöntemleri 46

Çizelge 4.1. VLC ve RF kanal modellerinin karşılaştırması 59

Çizelge 4.2. FSO/VLC/RF teknolojilerinin karşılaştırması 63

Çizelge 6.1. Tasarımı gerçekleştirilen RoFSO sistem özellikleri 81

Çizelge 6.2. RoFSO sistem parametreleri 93

Çizelge 6.3. Farklı modülasyon türleri için Q-faktör değerleri 106

Çizelge 6.4. Farklı modülasyon türleri için Q-faktör ortalamaları 106

Çizelge 6.5. RoFSO-VLC sistem özellikleri 116

Çizelge 6.6. ML modellerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması 128

Çizelge 6.7. FSO-VLC sistemi simülasyon parametreleri 132

Çizelge 6.8. Matlab üzerinden optik simülasyon işlemi 142

Çizelge 6.9. ML öğrenme ve test işlemleri 144

Çizelge 6.10. Kesinti olasılığı tahmin işlemleri 146

Çizelge 6.11. ML en iyi girdi tahmin modeli işlemleri 149

Çizelge 6.12. Q-faktör iyileştirme (optimizasyon) sonuçları karşılaştırması 153

Çizelge 6.13. Optimizasyon için yapılan farklı deneme sonuçları 154

Çizelge 6.14. Kesinti olasılığı hesaplaması için işlemler 161

Çizelge 6.15. RF/FSO-VLC hibrit sistemi simülasyon parametreleri 165

Çizelge 6.16. Sert anahtarlama süreci işlemleri 177

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Mobil haberleşme sistemlerinin evrimi 15

Şekil 3.2. 3GPP/ETSI standartlarının temel özellikleri 16

Şekil 3.3. 5G kullanım senaryoları 20

Şekil 3.4. 5G uygulamaları 21

Şekil 3.5. 2020-2030 yılları arasında küresel mobil veri trafiği tahmini 23

Şekil 3.6. 6G teknolojisi için temel gereklilikler 25

Şekil 3.7. Optik kablosuz haberleşme tipleri 27

Şekil 3.8. Temel bir FSO haberleşme sistemi yapısı 33

Şekil 3.9. VLC frekans spektrumu 35

Şekil 3.10. Farklı ağ altyapılarında VLC kullanımı 37

Şekil 3.11. VLC iletim sistemi 38

Şekil 3.12. VLC kanal yapısı 39

Şekil 3.13. OFDM blok diyagramı 42

Şekil 3.14. RoF teknolojisi temel diyagramı 48

Şekil 3.15. Tipik bir RoF sistemi yapısı 49

Şekil 4.1. Hibrit bağlantı türleri 61

Şekil 4.2. Kentsel alan RoFSO-fiber hibrit yapısı 62

Şekil 4.3. 5G Kablosuz-VLC hibrit modeli 63

Şekil 5.1. Makine öğrenmesi kategorileri ve örnekleri 66

Şekil 5.2. Makine öğrenmesi algoritmaları 70

Şekil 5.3. SVM kullanarak veri seti sınıflandırması 71

Şekil 5.4. (a) ANN temel yapısı (b) Yapay nöron yapısı 72

Şekil 5.5. ANN fonksiyon yapısı 73

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.6. ANN dropout işlemi 74

Şekil 5.7. (a) Karar ağacı ve (b) Rasgele orman şematik diyagramları 76

Şekil 6.1. RoFSO transmisyon sistemi 78

Şekil 6.2. Benzetimi yapılan RoFSO devre şeması 80

Şekil 6.3. Optisystem RoFSO simülasyon devresi 81

Şekil 6.4. Farklı FSO uzunluğu ve zayıflama değerleri için a) Q-faktör ve b) BER değerleri 83

Şekil 6.5. Farklı FSO zayıflama ve hat uzunluğu değerlerinde göz diyagramları 84

Şekil 6.6. Farklı FSO uzunluğu ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör ve b) BER değerleri 85

Şekil 6.7. Farklı lazer gücü ve hat uzunluğu değerlerinde göz diyagramları 86

Şekil 6.8. Kümelenme diyagramları a) 4-QAM b) QPSK c) 16-QAM d) 16-PSK 90

Şekil 6.9. RoFSO devre şeması..... 92

Şekil 6.10. QAM/PSK-RoFSO simülasyon devresi 94

Şekil 6.11. RF spektrumu çıktıları a) RF sinyali b) QM çıktı sinyali c) Fotodedektör çıktı sinyali d) LPF çıktı sinyali 95

Şekil 6.12. Optik spektrum analizör çıktıları a) MZM+QM çıktı sinyali b) MZM+QM+RF sinyali modülasyonu c) Optik yükselteç öncesi d) FSO çıkışı (optik yükselteç sonrası)..... 96

Şekil 6.13. 4-QAM a) Q-faktör b) BER ile 16-QAM c) Q-faktör d) BER grafikleri 98

Şekil 6.14. 4-QAM (a ve b) ile 16-QAM (c ve d) göz diyagramı ve kümelenme grafikleri 100

Şekil 6.15. Farklı CW lazer güçleri ve RF frekans değerleri için QAM modülasyon tepkileri 101

Şekil 6.16. QPSK a) Q-faktör b) BER ile 16-PSK c) Q-faktör d) BER grafikleri..... 102

Şekil 6.17. QPSK (a ve b) ile 16-PSK (c ve d) Q göz diyagramı ve kümelenme grafikleri 105

Şekil 6.18. Python girdi/çıktı veri seti tablosu..... 108

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.19. ML tahmin modeli yapısı 109

Şekil 6.20. MLR modelinin tahmin performansı 110

Şekil 6.21. DT modelinin tahmin performansı 110

Şekil 6.22. RF modelinin tahmin performansı 111

Şekil 6.23. SVR modelinin tahmin performansı 111

Şekil 6.24. ANN modelinin tahmin performansı 112

Şekil 6.25. ML modellerinin tahmin performanslarının karşılaştırması 112

Şekil 6.26. RoFSO-VLC hibrit ağ yapısı 115

Şekil 6.27. RoFSO-VLC simülasyon devre şeması 115

Şekil 6.28. Farklı FSO mesafe ve zayıflama değerleri için a) Q-faktör
b) BER grafikleri 118

Şekil 6.29. Farklı FSO mesafe ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör
b) BER grafikleri 119

Şekil 6.30. Farklı FSO mesafe ve LED frekans değerleri için a) Q-faktör
b) BER grafikleri 121

Şekil 6.31. Farklı VLC mesafe ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör
b) BER grafikleri 122

Şekil 6.32. Tasarlanan ML algoritmasının girdi/çıktı yapısı 124

Şekil 6.33. Python girdi/çıktı veri tablosu görüntüsü 125

Şekil 6.34. Python modeli tahmin sonuçları a) MLR R^2=0,674 b) SVR R^2=0,885
c) DT R^2=0,927 d) RF R^2=0,967 e) Tahmin performansları 125

Şekil 6.35. Matlab modeli tahmin sonuçları a) DT tahminleri b) ANN tahminleri 127

Şekil 6.36. Matlab modeli ANN sonuçları a) 1 gizli katmanlı b) 2 gizli katmanlı 127

Şekil 6.37. Matlab modelleri tahmin performansları 128

Şekil 6.38. FSO-VLC hibrit sistemi diyagramı 131

Şekil 6.39. FSO-VLC hibrit kanal modeli 133

Şekil 6.40. VLC için kanal modeli 137

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.41. Performans izleme ve tahmin döngüsü 140

Şekil 6.42. Optik simülasyon sonuçları (a) Q-faktör/FSO mesafesi
(b) SNR/FSO mesafesi (c) BER/FSO mesafesi (d) BER/SNR 141

Şekil 6.43. Matlab ML işlemleri 141

Şekil 6.44. ML öğrenme ve iyileştirme işlemleri 143

Şekil 6.45. Aktif öğrenme ve performans izleme süreci 143

Şekil 6.46. Eğitilen ANN modeli 145

Şekil 6.47. ML modelleri R^2 ve RMSE sonuçları 145

Şekil 6.48. a) ANN modeli R sonucu b) ANN c) SVM d) DT
e) RF modelleri için gerçek ve tahmin değerleri 146

Şekil 6.49. FSO-VLC hibrit sistemi için kesinti olasılığı sonuçları 147

Şekil 6.50. Seçilen ortalama üstü değerler için yeni tahmin sonuçları a) Q-faktör
b) SNR c) ML modelinin tahminleri için ortalama değerler 148

Şekil 6.51. Girdi parametresi tahmini için ML işlemleri 150

Şekil 6.52. Q-faktör optimizasyon sonuçları a) Giriş verisi sırasına göre
b) Q-faktör sıralamasına göre ile c) Tahmin edilen giriş güçleri
ve ilk güç değerleri 152

Şekil 6.53. RF/FSO-VLC hibrit şebeke mimarisi 156

Şekil 6.54. Nakagami-m katsayıları için RF, VLC ve RF-VLC kesinti olasılıkları 162

Şekil 6.55. Farklı işaretleme hatası değerleri için FSO kesinti olasılığı 163

Şekil 6.56. Farklı türbülans değerleri için FSO, VLC ve FSO-VLC kesinti olasılığı 164

Şekil 6.57. RF/FSO-VLC hibrit sistem şeması 164

Şekil 6.58. Farklı VLC-FOV değerleri için sonuçlar (a) Q-faktör/VLC uzunluğu
(b) BER/ VLC uzunluğu 167

Şekil 6.59. Farklı lazer gücü değerleri için sonuçlar (a) Q-faktör/VLC uzunluğu
(b) BER/ VLC uzunluğu 168

Şekil 6.60. Farklı FSO zayıflama değerleri için a) Q-faktör/FSO mesafesi
b) BER/FSO mesafesi grafikleri 169

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.61. Farklı lazer gücü değerleri için sonuçlar (a) Q-faktör/ FSO mesafesi (b) BER/ FSO mesafesi 171

Şekil 6.62. RF/FSO VLC performans izleme sistemi 172

Şekil 6.63. Hibrit sistem sert anahtarlama şeması 173

Şekil 6.64. Hibrit sistem anahtarlaması a) Akış şeması ve b) Eşik değerlere göre anahtarlama geçişleri 174

Şekil 6.65. ML tahmin ve anahtarlama modeli yapısı 175

Şekil 6.66. Eğitilen a) ANN ve b) DNN modelleri 176

Şekil 6.67. ML modelleri için hibrit sistem tahmin performansları a) R^2 b) MSE c) Matlab görüntüsü 176

Şekil 6.68. ML modelleri anahtarlama geçişi ve tahmin grafikleri a) ve c) ANN b) ve d) DNN 178

Şekil 6.69. ML modelleri anahtarlama geçişi ve tahmin grafikleri a) ve b) SVM c) ve d) DT e) ve f) RF 179

Şekil 6.70. ML modellerinin tahmin ve anahtarlama geçişi işlem adımları (ANN ve DNN) 180

Şekil 6.71. ML modellerinin tahmin ve anahtarlama geçişi işlem adımları (SVM, DT ve RF) 180

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
dB	Desibel
dBm	Desibel/miliwatt
Gb/s	Gigabit/saniye
GHz	Giga Hertz
Kb/s	Kilobit/saniye
kHz	Kilo Hertz
Mb/s	Megabit/saniye
MHz	Mega Hertz
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
nm	Nanometre
ns	Nanosaniye
Tb/s	Terabit/saniye
THz	Terahertz

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AI	Yapay zeka
ANN	Yapay sinir ağı
ASK	Genlik kaydırmalı anahtarlama
B5G	5G ötesi
BER	Bit hata oranı
CDF	Kümülatif dağılım fonksiyonu
CDMA	Kod bölmeli çoklu erişim
EMI	Elektromanyetik girişim
FDMA	Frekans bölmeli çoklu erişim

Kısaltmalar	Açıklamalar
FiWi	Fiber-kablosuz
FOV	Görüş alanı
FSK	Frekans kaydırmalı anahtarlama
FSO	Serbest uzay optiği
GSM	Küresel mobil iletişim sistemi
ICI	Kanallar arası girişim
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IM/DD	Yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama
IoE	Her şeyin interneti
IoT	Nesnelerin interneti
IRS	Akıllı yansıtıcı yüzey
ISI	Sinyaller arası girişim
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
KPI	Anahtar performans göstergeleri
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
Li-Fi	Işık doğruluğu (Light fidelity)
LOS	Görüş hattı
LTE-A	Uzun süreli evrim-gelişmiş
M2M	Makineden makineye
MFI	Modülasyon format belirleme
MIMO	Çok girişli-çok çıkışlı
ML	Makine öğrenmesi
MZM	Mach-zehnder modülatör
NLOS	Görüş hattı olmayan
OCC	Optik kamera haberleşmesi
OFDM	Dikgen frekans bölmeli çoğullama
OOK	Açık-kapalı anahtarlama
OPM	Optik performans izleme
OWC	Optik kablosuz haberleşme
PAM	Darbe genlik modülasyonu
PAPR	Tepe ortalama güç oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
PDF	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
PLC	Güç hattı haberleşmesi
PSK	Faz kaydırmalı anahtarlama
PSTN	Halka açık telefon şebekesi
QAM	Dörtlü genlik modülasyonu
QoS	Servis kalitesi
QoT	İletim kalitesi
RF	Radyo frekansı
RoF	Fiber üzerinden radyo
RoFSO	FSO üzerinden radyo
SDN	Yazılım tanımlı ağ
SER	Sembol hata oranı
SISO	Tek girişli-tek çıkışlı
SNR	Sinyal gürültü oranı
SSL	Katı hal aydınlatma
TDMA	Zaman bölmeli çoklu erişim
UDN	Ultra yoğun ağ
UE	Kullanıcı ekipmanı
UMTS	Evrensel mobil haberleşme sistemi
VLC	Görünür ışık haberleşmesi
Wi-Fi	Kablosuz doğruluk (Wireless fidelity)
WiMAX	Mikrodalga erişimi için kablosuz birlikte çalışabilirlik
WLAN	Kablosuz yerel alan ağı
WPAN	Kablosuz kişisel alan ağı

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz on yıllar boyunca, birinci nesil (1G) ile başlayan mobil iletişim teknolojileri, ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci nesiller (2G, 3G, 4G ve 5G) ile devam etmektedir. Ayrıca, kısa menzilli kablosuz iletişim için Kablosuz Doğruluk (Wi-Fi) standartları (IEEE 802.11) özellikle veri hızı, kapasite ve ortam erişim yöntemleri açısından hızla gelişmektedir. Bu gelişmelere paralel olarak kullanıcı sayısındaki artış ve buna eşlik eden yüksek veri hızı ihtiyacı ile optimize edilmiş bant genişliği kullanımı ve iyileştirilmiş kalite, servis sağlayıcılar için önemli bir zorluk ve yeni nesil iletişim sistemleri tarafından çözülmesi gereken bir sorun teşkil etmektedir [1-3].

Kablosuz bağlantı talebi sürekli olarak artmakla birlikte, buna karşılık radyo frekansı spektrumunun sınırlı olması nedeniyle spektral verimlilik, gelecekteki kablosuz haberleşme sistemleri ile ilgili yapılan araştırmaların temelini oluşturan en önemli unsur olmaktadır. Veri ve kablosuz bağlantıdaki bu artışının günümüzdeki ilk adımı olan 5G teknolojisi, devasa cihaz bağlantısı, yoğun sistem kapasitesi, ultra düşük gecikme süresi, yüksek seviyeli güvenlik, son derece düşük güç tüketimi ile muazzam bir deneyim kalitesi gibi çeşitli çekici hizmetler sunmaktadır. 5G'nin 2019 yılı sonunda ticari olarak yaygınlaşmasından sonra, farklı ülke ve kuruluşlar 6G ile ilgili araştırma çalışmaları yürütmeye başlamıştır. 6G ağlarının 5G'den daha iyi performans sağlaması ve Endüstri 4.0, sanal varlık, kişiselleştirilmiş sağlık ve diğer zorlu uygulamalar için oluşturulan hizmetleri karşılaması gerekecektir. Bu nedenle, 6G'nin 5G'den 100 ila 1 000 kat daha yüksek aktarım hızlarını desteklemesi beklenmektedir [4].

Nesnelerin İnterneti (IoT) ve 5G gibi güncel ağ teknolojilerinin ortaya çıkması, yenilikçi ve yoğun veri içeren uygulama ve hizmetlerin sunulacağına işaret etmekle birlikte, bu teknolojilerin hızla gelişmesi mobil trafik hacminin de çok hızlı bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Aylık küresel mobil trafiğin 2025 yılında 607 EB'ye (exabyte), 2030 yılında ise 5016 EB'ye ulaşacağı tahmin edilmekte [5] olup, bu da hem veri merkezleri içinde hem de veri merkezleri arasında veri alışverişinin artmasına neden olacaktır. 5G ve 5G ötesi ağlar (B5G) tarafından sunulan çok yönlü yetenekleri sağlamak için değerlendirilen teknolojiler arasında Optik Kablosuz Haberleşme (OWC), kablosuz verim kısıtlamalarının ve Radyo Frekansı (RF) spektrum tıkanıklığının üstesinden gelmek ve esas olarak RF spektrumu

üzerindeki baskıyı hafifletmek için umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. OWC, özellikle iç ve dış mekan uygulamalarında en güvenilir ve en hızlı veri aktarımını sağlayan RF kablosuz sistemlerini tamamlayıcı bir sistemdir [6-9].

RF teknolojilerinde kaydedilen ilerlemeler, bu benzeri görülmemiş veri büyümesinin yarattığı zorluklara bir çözüm üretse de mevcut RF spektrumu hızla doygunluğa ulaşacak şekilde tıkanmaktadır. OWC teknolojileri, mevcut yüksek hızlı omurga optik fiber iletişim ağlarıyla uyumlu, düzenlenmemiş bant genişliği (THz düzeyinde) sunmaktadır [10].

Optik şebekeler dünya çapındaki tüm büyük ağ servis sağlayıcılarının fiziksel altyapısını oluşturmakta ve diğer özelliklerin yanı sıra düşük maliyetle yüksek veri aktarım hızı sağlayabilmektedir. İnternet trafiği açısından bakıldığında önümüzdeki yıllarda optik ağlar tarafından desteklenen hizmetlerin sayısının ciddi oranda artması beklenmektedir. Bu nedenle ağın önceki şebeke performansından elde edilen verileri kullanarak yeni duruma uyarlanabilir olması gerekmektedir [11].

Optik tabanlı iletimlerin avantajları, büyük kapasite (Gb/s'den Tb/s'ye kadar), düşük girişim ve çok düşük gecikmedir. Bant genişliği serbestçe mevcut olduğundan veriler daha yüksek iletim hızlarıyla iletilebilmektedir. Düşük gecikme süresi, sanayileşmiş dünyadaki e-sağlık veya M2M uygulamaları dahil olmak üzere birçok IoT uygulamasında gerekli olan gerçek zamanlı izleme ve yüksek doğruluk ihtiyaçlarını güçlü bir şekilde desteklemektedir [12].

Optik tabanlı OWC teknolojisi kısa mesafelerde yüksek hızlı iletişim için tercih edilen ve bilgilendirici verilerin optik sinyaller yardımıyla kablosuz ortam üzerinden iletilmesinden sorumlu esnek bir ağ teknolojisidir. Geleneksel RF erişim noktalarına kıyasla, elektromanyetik spektrum lisanslama gereksinimlerinin bulunmaması nedeniyle maliyet etkinliği, kısıtlı alanlarda konuşlandırmayı mümkün kılan elektromanyetik girişim bağışıklığı, düşük güç tüketimi (enerji verimliliği) ve geniş spektrum tahsisi gibi dikkate değer avantajlar sunmakta ve veri iletimi, optik fibere benzer bir verimle sonuçlanmaktadır [8, 13].

Dış mekan iletişim bağlantıları için yaygın olarak kullanılmakta olan Serbest Uzay Optiği (FSO) haberleşme sistemi, en yaygın kullanım alanı olan ve en çok bilinen OWC teknolojilerinden birisidir. Son metre bağlantı sorununun çözümü, hücresel sistemler için

ana taşıyıcı, binalar arası bağlantılar, uzak konumlarda geniş bant erişimi ve kablosuz metropol alanı ağ uzantıları dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [9].

FSO serbest uzayda bilgi göndermek için ışığı kullanan bir veri aktarım teknolojisidir. FSO ayrıca büyük bant genişlikli kanal uygulamalarını yerine getirme avantajına da sahiptir ve FSO iletişiminde veri aktarım hızı 10 Gb/s'dir. 6G beklentilerini karşılayabilmek için, Gb/s aralığında iletim hızı sunan FSO iletişimi, düşük maliyeti ve kolay kurulumu sayesinde fiber optik iletişime iyi bir alternatif olmaktadır. FSO iletimi için lisanssız spektrum kapsamına giren yakın kızılötesi (750-1 600 nm) frekans bandı aralığında lazer kullanılmaktadır [14-17].

FSO iletişimi, birçok kablosuz iletişim uygulaması için daha düşük maliyet, daha yüksek veri hızları ve daha yüksek güvenlik avantajlarından dolayı büyük ilgi görmektetedir. Bu nedenle FSO iletişimi, beşinci nesil ve hatta altıncı nesil iletişim araştırmalarında önemli bir rol oynayacak umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir [18].

FSO iletişim sistemleri için en önemli sorun olarak görülen atmosfer koşullarının etkisini hafifletmek için; (i) kodlama (coding), (ii) açıklık ortalaması (aperture averaging), (iii) röle destekli (relay-assisted), (iv) karmaşık modülasyon (complex modulation), (v) çeşitlilik (diversity) ve (vi) uyarlanabilir eşik tespiti (adaptive threshold detection) gibi teknikleri içeren çeşitli azaltma uygulamaları bulunmaktadır [9].

Görünür spektrumdaki OWC teknolojisi Görünür Işık Haberleşmesi (VLC) olarak bilinmektedir ve şu anda çoğunlukla kısa menzilli iç mekan uygulamaları, yani son metre erişim ağları için tasarlanmıştır. VLC'nin ana özelliği, aydınlatma, yüksek hızlı veri iletişimi ve son derece hassas iç mekan konumlandırması için Işık Yayan Diyot (LED) tabanlı ışık kaynakları kullanmasıdır. Bununla birlikte, VLC sistemlerinde ana darboğaz, beyaz fosfor için 3 MHz civarında ve RGB (kırmızı, yeşil ve mavi) LED'ler için 20+ MHz civarında olan LED bant genişliği (B_{LED})'dir. Bu değer, birkaç metrelik tipik bir bağlantı açıklığında yüksek veri hızı (R_b) elde etmek için yeterli değildir [10].

VLC hem aydınlatma hem de ağ hizmeti sunabildiği için yüksek hızlı iç mekan kablosuz erişimi için potansiyel bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Düşük güç tüketimi, daha

yüksek bina içi güvenlik iletimi, lisanssız bant genişliği ve yüksek veri hızı iletiminin sağlanması gibi avantajlarından dolayı büyük ilgi görmüştür [19, 20].

VLC ilk olarak 2003 yılında Japonya'nın Keio Üniversitesi'ndeki Nakagawa Laboratuvarı'nda başlatılmıştır. VLC'ye olan ilgi LED'lerin geliştirilmesiyle birlikte artmıştır. LED'ler, elektromanyetikten ziyade güvenliğe göre RF teknolojisine kıyasla yeşil teknolojiyi dikkate alır ve elektromanyetik girişime neden olmaz. LED'ler yaklaşık 400 THz ile 800 THz arasında muazzam bir bant genişliği sunmaktadır.

Görünür ışık, kısa mesafelerde aydınlatma ve iletişim için LED kullanan optik kablosuz iletişimdir. LED'in, düşük güç tüketimi, yüksek parlaklık ve yüksek bant genişliği gibi etkileri nedeniyle akkor ve floresan lambalar gibi geleneksel ışık kaynaklarından daha verimli bir optik kaynak olduğu düşünülmektedir. VLC veri iletimi, ışık yoğunluğu değişiminin insan gözünün tahmin edemeyeceği kadar küçük genliklerde değiştirilmesiyle sağlanır [21].

OWC, görünür spektrum da dahil olmak üzere kızılötesinden ultraviyoleye kadar dalga boylarını gerçekleştiren, havadaki optik radyasyonu kullanan verileri temsil etmektedir. Işık Doğruluğu (Li-Fi), LED'in aydınlatılması ve kablosuz iletişim için geliştirilmiştir. Li-Fi, duvarları delmediği için elektromanyetik girişimden etkilenmeden güvenlik sağlayarak ve kurulum kolaylığı nedeniyle geniş kapasite için mekansal yeniden kullanım ve artan güvenlik hastane için cazip hizmetler sunabilmektedir. Li-Fi ağ bağlantılarından biri olarak FSO etkisi altında ve görünür ışık spektrumunda (380 nm ila 700 nm) ışık yayan diyotlar kullanan yüksek hızlı veri iletimi için önemli bir teknolojidir [22].

Li-Fi'nin bant genişliği, Wi-Fi teknolojisinden neredeyse 10 000 kat daha yüksektir. Li-Fi sisteminin veri hızı LED ampulün açma-kapama geçiş hızına bağlıdır. İnsan beyni, aralarında 0,1 saniyeden fazla fark bulunan iki durumu ayırt edemediğinden, Li-Fi sisteminde kullanıldığında, tipik olarak ns aralığındaki LED ampulün açma-kapama geçiş durumunu insan gözünün algılaması imkansızdır. Li-Fi teknolojisi Wi-Fi gibi radyo frekansıyla karşılaştırıldığıda, teknolojinin veri aktarım hızına, güvenliğe, bilgisayar korsanlarına ve daha az sağlıklılığa göre zayıflıkların üstesinden gelebileceğini göstermektedir [21, 23].

Bant genişliğine olan talebin artması, ağ operatörleri ve hizmet sağlayıcılar üzerinde ağlarını bu tür hizmetleri destekleyecek şekilde yükseltmeleri konusunda baskı oluşturmaktadır. Bu talebi karşılamak için değerli bir çözüm, RF gibi diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında yüksek bant genişliği nedeniyle optik ağların kullanılması olmakla birlikte, gelecekteki optik ağların, kanal durumuna ve son müşteri talebine bağlı olarak farklı modülasyon formatlarını ve farklı baud hızlarını destekleyecek şekilde heterojen olması beklenmektedir [24].

5G ve 6G'nin ötesinde iletişim sistemlerinden beklenen, yüksek güvenilirlik, yüksek verim, düşük gecikme süresi ve yüksek enerji verimliliği hizmetleri sunmalarıdır. Geleceğin kablosuz ağlarında, özellikle kapalı ortamlardaki mobil cihazlar düşünüldüğünde, çok sayıda kullanıcı için düşük gecikme ile gerekli yüksek veri hızını korumak amacıyla iç mekan kablosuz ağını iyileştirmenin olası bir yolu, birden fazla ağ içeren hibrit sistem kullanmaktır. Hibrit ağ tasarımı, iki teknoloji arasında girişim olmaksızın tamamlayıcı iş birliğini mümkün kılmakta, böylece genel sistem veri hızını artırmakta, yük dengelemeyi iyileştirmekte ve kapsama dışı alanları azaltmaktadır [25, 26].

Hibrit ağ tasarımına örnek olarak hem FSO hem de RF tabanlı iletişim sistemlerinin sınırlamalarını gidermek ve daha iyi performans ve güvenilirlik elde etmek için farklı teknolojilerin avantajlarını bir araya getiren RF/FSO hibrit iletişim sistemleri geliştirilmiştir. Hibrit sistem, acil durum müdahalesi, afet yönetimi ve askeri iletişim gibi uygulamalarda çok önemli olan çeşitli hava ve çevre koşullarında kesintisiz iletişim sağlayabilmektedir [24-27].

Diğer bir örnek olarak hibrit FSO/VLC sistemleri ise son nokta bağlantılarında oluşan boşluğunun giderilebilmesi ve gelecekteki geniş bant kablosuz haberleşme sistemleri için önem arz eden bir sistem olarak ön plana çıkmaktadır [9].

Tezin organizasyonu

Bu çalışmada, sürekli gelişmekte olan haberleşme sistemleri altyapısının gelecek perspektifinin araştırılması ve gelecek için öngörülen teknolojik yeniliklerin ele alınması amacıyla, geniş bir literatür incelemesi yapılmıştır. İlave olarak 5G iletişim sistemlerinin getireceği yenilikler, sunulacak hizmetler, 5G altyapısı ve 5G sonrasında kullanımı öngörülen mobil haberleşme teknolojileri hakkında araştırma yapılmıştır.

Ayrıca, 5G ve 5G sonrası mobil haberleşme sistemlerinin gereksinimlerine paralel olarak gelişmekte olan yeni nesil optik haberleşme altyapısı ile ilgili araştırma yapılmış ve OWC, FSO, VLC, Li-Fi ve Optik Kamera Haberleşmesi (OCC) hakkında bilgi verilmiştir. Bunlara ilave olarak gelecek nesil yüksek frekanslı haberleşme sistemlerinde altyapı bileşeni olarak kullanılan Fiber-Kablosuz (FiWi), THz ve Fiber üzerinden Radyo (RoF) iletim sistemleri, RoF ile FSO sistemi entegrasyonu olan RoFSO ve RF/FSO/VLC sistemlerinin farklı hibrit entegrasyonlu yapıları ve bu sistemlerin performans kriterleri incelenmektedir.

Bu çalışma kapsamında ayrıca, hibrit kablosuz RF/FSO/VLC haberleşme sistemlerinin uçtan uca performans takibi, analizi, anahtarlama sistemi oluşturulması ve iyileştirilmesi aşamalarında Makine Öğrenmesi (ML) yöntemlerinin kullanılması ile yeni ve farklı modeller oluşturularak sistemlerin gerçek ortama ihtiyaç duymadan iyileştirme öngörülerinin elde edilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın üçüncü bölümünde, yeni nesil mobil haberleşme sistemleri olan 5G ve 5GB teknolojileri ile bu teknolojilerin gerçekleştirilmesi aşamasında kullanılması öngörülen veya kullanılmaya başlanan özellikle optik haberleşme teknolojileri (FSO, VLC ve OCC) ile RF ve THz sistemleri hakkında yapılan çalışmalar ve sistemlerin genel yapıları hakkında bilgi verilmektedir.

Dördüncü bölümde, çalışmanın temel konusunu oluşturan hibrit kablosuz haberleşme sistemleri olan RF/FSO/VLC hibrit yapıları ve bu konularda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

Çalışmanın beşinci bölümü, hibrit sistemlerde performans analizi ve iyileştirilmesi ile ilgili olarak bir diğer temel konu olan ML yöntemleri, bu yöntemlerin haberleşme sistemlerinde özellikle hibrit sistemlerde performans analizi amacıyla kullanımı ve diğer bilgileri içermektedir.

Altıncı bölümde, bu çalışma kapsamında araştırılan hibrit kablosuz haberleşme sistemlerinin optik simülasyon programı kullanılarak tasarım ve simülasyon çalışması yapılarak elde edilen sonuçların grafik ve tablolarla değerlendirilmektedir. Optik performans olarak gözlemlenen bu verilerin ML yöntemleri kullanılarak da takip edilmesi ve performans analizi ile hibrit sistemler arası geçiş sağlanması (anahtarlama) ve iyileştirme çalışmalarının

ML yöntemleri ile yapılması konularında farklı yöntemler kullanılarak yapılan tasarım çalışmaları da bu bölümde ele alınmaktadır.

Yedinci ve son bölümde ise yapılan tasarım ve performans inceleme çalışmalarının sonuçları değerlendirilerek, gelecek öngörüleri ve sonrasında yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

Araştırmanın amacı

Özellikle 5G ve sonrası mobil haberleşme ile birlikte oluşan kapasite ve kalite başta olmak üzere talep ve gerekliliklerin karşılanması noktasında RF ve mevcutta yaygın olarak kullanılan teknolojilerin yetersiz kalacağı bilinmektedir. Bu amaçla, gelişen bu ihtiyaçların aynı oranda ve fazlasıyla gelişen bir iletim ortamı altyapısına ve bu iletim ortamını denetleyen etkin ve verimli mekanizmalara olan gereksinimi farklı teknik yaklaşımlar ortaya koyularak çözümlenmeye çalışılmaktadır.

Bu nedenle, literatürde sıklıkla araştırılan hibrit ve/veya heterojen esnek altyapı sistemlerinin detaylı incelenmesi ve özellikle yapay zeka temelinde etkin ve verimli bir denetim sistemi geliştirilerek sistemlerin daha faydalı olacak şekilde desteklenmesi amaçlanmıştır.

Literatür incelendiğinde, özellikle RF/FSO/VLC hibrit ağ yapısının çok yoğun olarak araştırılmakla birlikte makine öğrenmesi temelli model geliştirilerek perfromans analizi ve iyileştirmesi yapılması amacıyla yapılan çalışma çok fazla bulunmamaktadır. Bu tez çalışması ile literatürde bu alandaki çalışmalara yeni bir bakış açısı kazandırılması ve eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

Araştırmanın önemi

Yapılan hibrit optik kablosuz haberleşme sistemleri tasarımları ve performans izleme için oluşturulan ML temelli izleme ve iyileştirme tasarımları ile özellikle literatürde henüz çok fazla çalışma bulunmayan ve araştırmaya açık olduğu öngörülen hibrit FSO sistemleri ve ML yöntemlerinin bir arada kullanımı alanında yeni yöntem geliştirilmiş ve sisteme giriş olarak verilen herhangi bir değişkenin istenilen değer aralıklarına göre optimize edilmesi

ML yöntemleri ile oluşturulan yapay zeka modeli kullanılarak sağlanmıştır. Böylece gerçek bir sistem kurulumu veya simülasyonu gerektirmeden ML yöntemleri ile oluşturulan tahmin, izleme ve iyileştirme modeli ile optimizasyon sağlanarak her aşamada verimli bir sistem yapısı geliştirilmiştir.

Ayrıca, diğer bir yeni model tasarımı olarak, iki paralel hibrit hat arasında uçtan uca sistem kalite perfromansı kullanılarak ve ML destekli sert anahtarlama sistemi oluşturulmuş ve önerilmiştir.

Diğer taraftan, bu çalışma kapsamında bilgi verilen ve geliştirilen sistemler özellikle gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde öngörülen büyük veri kapasitelerinin ve kullanıcı yoğunluğu taleplerinin oluşturacağı destekleyici ve denetim açısından da verimliliğin sürekliliğini sağlamayı amaçlayan yeni teknoloji altyapı sistemlerini kapsamaktadır. Bu açıdan, çalışma ile incelenen sistemlerin ve elde edilen sonuçların gelecek nesil optik/hibrit haberleşme sistemleri geliştirilmesi aşamasındaki sistemsel zorlukların aşılması için deneysel çalışmaları doğrulamak açısından gereken stratejilerin belirlenmesi için önem taşıdığı değerlendirilmektedir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Bu bölümde, tez kapsamında araştırması yapılan ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilen hibrit kablosuz haberleşme sistemleri ile ilgili yapılan önemli çalışmalar yer almaktadır. Özellikle araştırılan konular ile en çok benzerliğe sahip çalışmalar hakkında önemli hususlar açıklanmaktadır. Diğer taraftan, tez içerisinde incelenen konular ile ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalar hakkında ilgili kısımlarda ayrıca bilgi yer almaktadır.

Çalışma alanı konusunda yapılan araştırmalar incelendiğinde, hibrit haberleşme sistemlerinin özellikle yeni nesil haberleşme altyapılarının ortaya çıkması ile birlikte ilgi gören bir alan olarak öne çıktığı ve bundan dolayı da yapılan çalışmaların genel olarak son on yıllık süreçte yoğunlaştığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmalar ortak özellikleri açısından gruplandırılırsa; RF-optik sistemler ve optik-optik sistemler, bu sistemlerin veri kapasitesi, güvenliği, kesinti olasılığı, iletim kalitesi ve benzeri performans göstergeleri açısından optimize edilmesi, her durumda iletimin kesintisiz ve en uygun olacak şekilde devamlılığının sağlanması gibi hususların öne çıktığı görülmektedir.

Literatürde kendisine en fazla araştırma alanı bulan RF/optik hibrit sistemi olan RF/FSO hibrit sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, [28]'de FSO/RF hibrit sistemi için kapalı-form kesinti olasılığı ifadeleri elde edilerek yumuşak anahtarlama sistemi oluşturulmuş, [29]'da FSO/RF anahtarlama sistemi için BER/SNR ortalama değerleri analiz edilerek yine nümerik yöntemlerle analiz yapılmış ve [30]'da ise yine nümerik analiz yapılarak elde edilen gizlilik oranı (secrecy rate) sonuçları incelenmiştir.

ML yöntemleri kullanılarak oluşturulan RF/FSO sert anahtarlama sistemlerinde ise [31] ve [32]'de alınan sinyalin güç göstergesi (RSSI) ve karar ağacı ML yöntemi kullanılmış ve [33]'te de farklı ML yöntemlerinin kullanıldığı ML destekli sert anahtarlama için görüş mesafesi ile hat sınırlarının tahmin çalışması yapılmıştır. [34] ve [35]'te ise RF/FSO yumuşak anahtarlama işlemi için sırasıyla, rasgele orman ve karar ağacı regresyon yöntemleri kullanılmıştır.

[14] ve [36]'da RF-FSO yükselt-ilet (amplify-forward) röle sistemi uygulaması için kesinti olasılığı ve uçtan uca SNR fonksiyonları kullanılmaktadır. [37]'de iki atlamalı (2-hop) RF-

FSO yükselt-ilet röle sistemi için ortlama kanal kapasite analizi Matlab kullanılarak yapılmaktadır. [17]'de ise yine Matlab kullanılarak kesinti olasılığı ve performans analizi yöntemleriyle, hibrit FSO- Akıllı Yansıtıcı Yüzey (IRS)/RF sistemi için sert anahtarlama sistemi oluşturulmuştur. [38]'de RF/FSO/THz hibrit sisteminin farklı atmosfer koşulları ve türbülans etkileri için kesinti olasılığı analizi Matlab ile yapılmıştır.

İncelenen literatür çalışmalarında en fazla kullanılan diğer hibrit sistem yapısı olan RF/VLC hibrit sistemi ile ilgili, [39]'da RF/VLC hibrit hatları arasında enerji seviyesine göre kanal seçimi yapılması, [40]'da Servis Kalitesi (QoS) kısıtlamalarını hesaplanması ile kanal seçimi yapılması, [41] ve [42]'deki tez çalışmaları kapsamında ise RF-VLC hibrit sistemleri için Görüş Alanı (FOV), Sinyal Gürültü Oranı (SNR), kesinti olasılığı, optimizasyon gibi konularda nümerik analizler, simülasyon çalışması ve deneysel çalışmalar yapılması gibi konular ele alınmıştır.

[43]'te bilişsel hibrit RF-VLC sistemlerinin sensör sistemleriyle çalışması incelenmiş ve [44]'te ise Sembol Hata Oranı (SER) ve kesinti olasılığı hesaplamaları ile QoS için nümerik analiz çalışması yapılmış, ayrıca [26]'da RF(Wi-Fi)-VLC hibrit sistemi için SNR ve veri işlem kapasitesi ML yöntemi (pekiştirmeli öğrenme) kullanılarak hesaplanmıştır.

Diğer bir hibrit sistemi olan FSO/RF-FSO hibrit sistemi ile ilgili yapılan çalışmalardan [45]'te SNR/BER kullanılarak kapasite analizi nümerik yöntemler ile hesaplanmış, [46]'da ortalama BER ve kapasite analizi ile SNR için kesinti olasılığı analizleri yapılmış ve [27]'de ise kesinti olasılığı ve anahtarlama işlemleri Matlab kullanılarak yapılmıştır.

[13]'te VLC-FSO-VLC kod çöz-ilet (decode-forward) sıralı hibrit sistemi için Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF), Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF), SNR ve Bit Hata Oranı (BER) hesaplamaları yapılmış ve anahtarlama işlemi için ise SNR ve kesinti olasılığı gibi parametreler kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında da tasarımı ve hibrit anahtarlama performansı analiz edilen RF/FSO-VLC hibrit sistemi ile ilgili yapılan çalışmalardan [47]'de kesinti olasılığı, ortalama BER/SNR analizinin nümerik yöntemlerle hesaplanmış, [15]'te ise SNR ve kesinti olasılığı analizi çalışması monte-carlo analizi ile yapılmıştır. [16]'da ise RF-FSO-VLC sıralı hibrit

sistemi için gizlilik kesinti olasılığı (secrecy outage probability-SOP) ve SNR nümerik analiz çalışmaları yapılmıştır.

FSO-VLC, RF/FSO-VLC ve RoF-VLC hibrit sistemleri için performans iyileştirme çalışmalarında kullanılan yöntemler ise, performans iyileştirme için OIRS (optik IRS) kullanımı [48] ve performans analizi için taşıyıcısız genlik-faz (m-CAP) modülasyonunu içermektedir [10]. [13, 45, 47, 49]'de eşdeğer SNR'ın PDF ve CDF gibi istatistiklerin kapalı form ifadeleri türetilmekte ve bu formüller kullanılarak kesinti olasılığı ve hata olasılığı hesaplanmaktadır.

FSO-VLC hibrit sistemleri, veri dağıtımı için iç mekan bağlantı noktası [50], akıllı ulaşım sistemleri [51] ve güvenli uçtan uca IoT ağı [52] uygulamaları gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek hızlı tren uygulamalarında geniş bant internet erişimi için FSO-FSO-VLC bağlantısı [53] ve VLC-FSO-VLC bağlantısı [13] gibi başka hibrit bağlantılar da bulunmaktadır.

[54]'te kanal durum bilgisine (channel state information-CSI) göre her iki linkin de kullanılabildiği hibrit sistem için bir algoritma kullanılmış, [55]'te hibrit Güç Hattı Haberleşmesi (PLC)/VLC Açık-Kapalı Anahtarlama (OOK) ardışık ağının performansı Matlab/Simulink ve deneysel çalışmalarla gösterilmiş ve [34]'te ise ML yöntemleri (rasgele orman) kullanılarak hibrit FSO/RF yumuşak anahtarlama bağlantısı için adaptif modülasyon gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hibrit optik sistemlerde federasyonlu öğrenme [56], aktif öğrenme [57] gibi yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Literatürde FSO/VLC ve RF/FSO/VLC hibrit sistemlerinin performans analizi çalışmaları farklı performans parametreleri/ölçütleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. En yaygın kullanılan performans ölçütleri SNR [19, 21, 22, 51, 52], Q-faktörü [9, 12, 21, 22], BER [9, 19, 21, 22, 53, 58] ve göz diyagramıdır [9, 21].

Öte yandan, hibrit OWC sistemlerinin performans analizi için ML yöntemlerinin kullanımı da artmaktadır ve bu da verimlilik, analiz kolaylığı ve güvenilirlik açısından avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, literatürde FSO-VLC hibrit ağ yapısı üzerine çok fazla araştırma bulunmadığından, bu alan hala araştırmaya ve geliştirilmeye açıktır.

Bunların yanında son yıllarda yapılan VLC/RF [1, 25], FSO/RF [59] ve genel RF/optik [60], hibrit sistem çalışmaları hakkında detaylı bilgi ve kapsamlı değerlendirmeler içeren inceleme çalışmaları da bulunmaktadır.

3. YENİ NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Mobil geniş bant sistemleri üzerindeki kullanıcı sayısının artışı ve giderek daha fazla insanın hareket halindeyken daha hızlı internet erişimi, daha gelişmiş cep telefonları ve genel olarak başkalarıyla anında iletişim veya bilgiye anında erişim talep etmesi gibi nedenlerden dolayı hücresel hizmet sağlayıcıları, yeni kablosuz uygulamaların gerektirdiği yüksek veri hızları, yüksek spektral verimlilik, daha yüksek enerji verimliliği, daha büyük ağ kapasitesi ve daha yüksek mobilite için sürekli artan taleplerle karşı karşıya kalmaktadır (Çizelge 3.1). Dördüncü nesil (4G) ağlar, mevcut teknolojilerle veri hızı üzerindeki teorik sınıra neredeyse ulaştığından yukarıdaki talepleri karşılamak için yeterli olmamaktadır. Bu anlamda, trilyonlarca kablosuz cihazın neden olduğu yukarıdaki sorunları çözmek için çığır açan kablosuz teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır ve beşinci nesil (5G) kablosuz tekniklerin ötesinde araştırmalara başlanmıştır [61].

Çizelge 3.1. Kablosuz haberleşme teknolojileri [62]

Teknoloji	Spektrum	Veri Hızı	Sinyal Mesafesi	Kullanım Alanı
GSM	900 / 1800 MHz	9,6 Kb/s	35 km	Ses
GPRS	900 / 1800 MHz	160 Kb/s	35 km	Veri
UMTS	873 / 1900 MHz	2 Mb/s	2 km	Ses, Veri, Çoklu Ortam
802.11 a	5 GHz	54 Mb/s	100 / 30 m	WLAN
802.11 b	2,4 GHz	11 Mb/s	110 / 35 m	WLAN
802.11 g	2,4 GHz	54 Mb/s	110 / 35 m	WLAN
802.11 n	2,4 / 5 GHz	150 Mb/s	250 / 70 m	WLAN
ZigBee	2,4 GHz	250 Kb/s	10 m	WPAN
Bluetooth	2,4 GHz	2,1 Mb/s	10 m	WPAN
LTE	1,8 / 2,6 GHz	100 Mb/s	1 km	Yüksek Hızlı Veri
LTE-A	1,8 / 2,6 GHz	1 Gb/s	1 km	Yüksek Hızlı Veri
UWB	3,1 – 10,6 GHz	> 100 Mb/s	10 m	WPAN
Mm-Dalga	57 – 64 GHz	> 1 Gb/s	10 m	WPAN

Son yıllarda, kablosuz bağlantı kapasitesi çok hızlı bir büyüme sergilemiş olup, 4G'den çok daha fazla özelliğe sahip yeni nesil olan 5G'nin yakında dünya çapında kullanıma sunulması

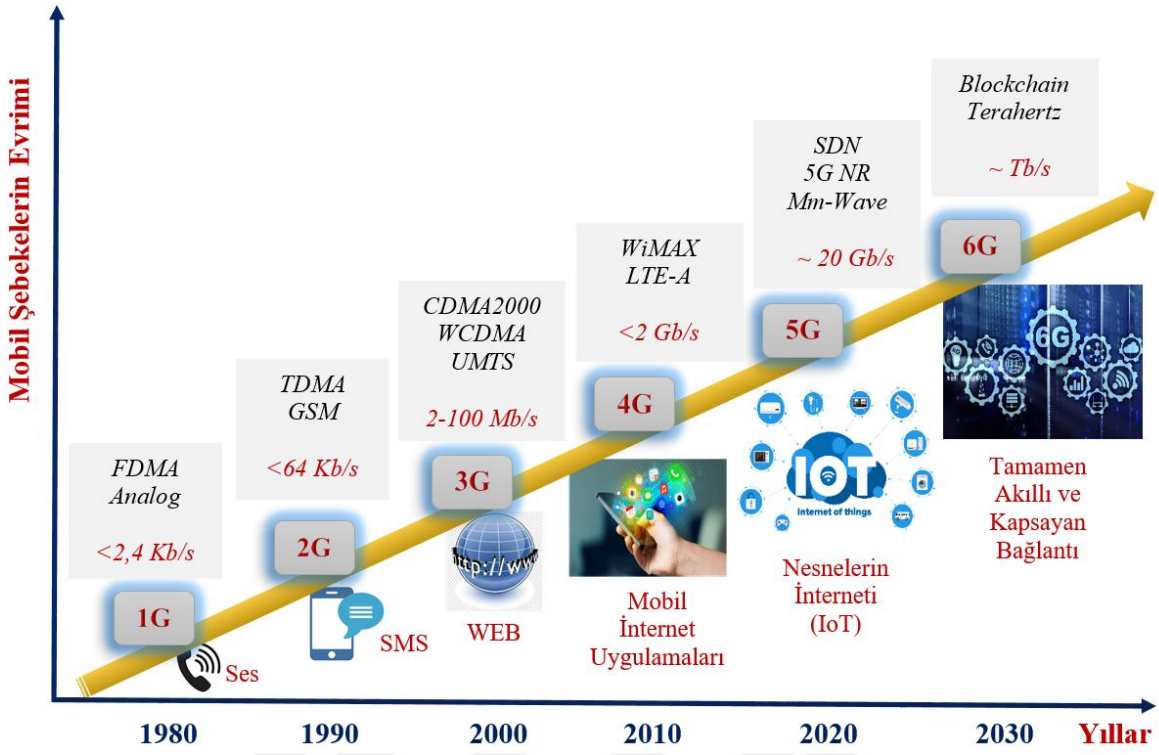
beklenmektedir. 2027'den 2030'a kadar, tamamen yapay zeka tarafından desteklenen altıncı nesil (6G) kablosuz haberleşme sistemi, kablosuz iletişim için etkin bir yaklaşım haline gelecektir. 5G'nin ötesinde, dikkate alınması gereken ana faktörler, mevcut 5G sistemlerine kıyasla daha yüksek sistem kapasitesi, daha yüksek veri hızları, azaltılmış gecikme süresi, gelişmiş güvenlik ve iyileştirilmiş hizmet kalitesidir [63].

Optik şebekeler, yeni nesil iletişim sistemlerinin ortaya çıkmasıyla birlikte oluşan veri trafiğiyle başa çıkabilecek çözümler sağlamak için sürekli olarak gelişmektedir. Bu tür şebekeler kapasite olarak, RF ve bakır kablo ağlarından daha iyi performans göstermektedir. Bu nedenle fiber optik altyapı; akıllı şehirler, IoT, veri merkezleri ve 5G gibi gelecek nesil olarak ortaya çıkan teknolojiler ve şebekeler için temel itici güç olmaktadır [64].

B5G'de sunulan çok yönlü özellikleri karşılamak için çok sayıda dönüştürücü teknoloji ve metodoloji değerlendirilmektedir. Bunlar arasında OWC, RF spektrum tıkanıklığı ve kablosuz verim kısıtlamalarının üstesinden gelmek için potansiyel bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. OWC sistemlerinde, elektrik sinyali optik bir taşıyıcı üzerinde modüle edilerek daha sonra görünür spektrumu kapsayan ultraviyoleden kızılötesine kadar uzanan dalga boyları kullanılarak serbest uzayda iletilmektedir. Bu teknoloji, geleneksel RF erişim noktalarına kıyasla elektromanyetik spektrum lisanslama gerekliliklerinin olmaması nedeniyle maliyet etkinliği, kısıtlı alanlarda konuşlandırmaya olanak tanıyan elektromanyetik parazit bağışıklığı, düşük güç tüketimi (enerji verimliliği) ve veri iletimi için optik fibere benzer bir verimle sonuçlanan kapsamlı bir spektrum tahsisi gibi dikkate değer avantajlar sunmaktadır [8].

3.1. Yeni Nesil Mobil Haberleşme Sistemleri

Mobil kablosuz haberleşme sanayisi, 1970'lerin başından bu yana teknoloji evrimini başlatmıştır. Son yıllarda, mobil kablosuz teknolojiler, birinci nesil (1G)'den 4G'ye kadar beş nesil teknoloji evrimi yaşamaktadır. 1980'lerde analog iletişim şebekesinin ilk ortaya çıkışından bu yana mobil iletişim şebekesinde olağanüstü bir ilerleme kaydedilmiştir. Bu ilerleme tek adımda oluşan bir süreç olmayıp farklı standartlara, kapasitelere ve tekniklere sahip farklı nesillerden oluşmaktadır. Her bir yeni haberleşme nesli neredeyse her on yılda bir (Şekil 3.1) tanıtılmaktadır [65, 66].



Şekil 3.1. Mobil haberleşme sistemlerinin evrimi [65]

Ses hizmetleri için tasarlanan 1G mobil şebeke 1980'lerde 2,4 Kb/s'ye kadar veri hızıyla tanıtılmıştır ve 10 kHz ila 30 KHz arasında bir bant genişliğine sahiptir. 1G radyo erişim şeması olarak Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA) kullanır ve frekans bandı 824-894 MHz aralığıdır, veri iletimi için ise analog sinyal kullanılmıştır. 1G'de bilgi iletmek için evrensel kablosuz standart yoktur ve düşük iletim verimliliği ve güvenlik gibi birçok dezavantaja sahiptir [67, 68].

Analog sinyaller aracılığıyla bilgi aktaran bu teknoloji için; hücre geçişi (handover) sıkıntıları, güvenlik ve gizlilik dahil olmak üzere birçok dezavantaj bulunduğundan, kablosuz standartlar oluşturulmamıştır. Telefon hizmetleri şifreli olmadığı için telefon görüşmeleri ve veri aktarımları özel veya güvenli hale getirilemez. Analog sinyaller zaman ve ortam içinde bozulduğundan, aramadaki ses verileri çoğu zaman düşük kalitede olmaktadır [69].

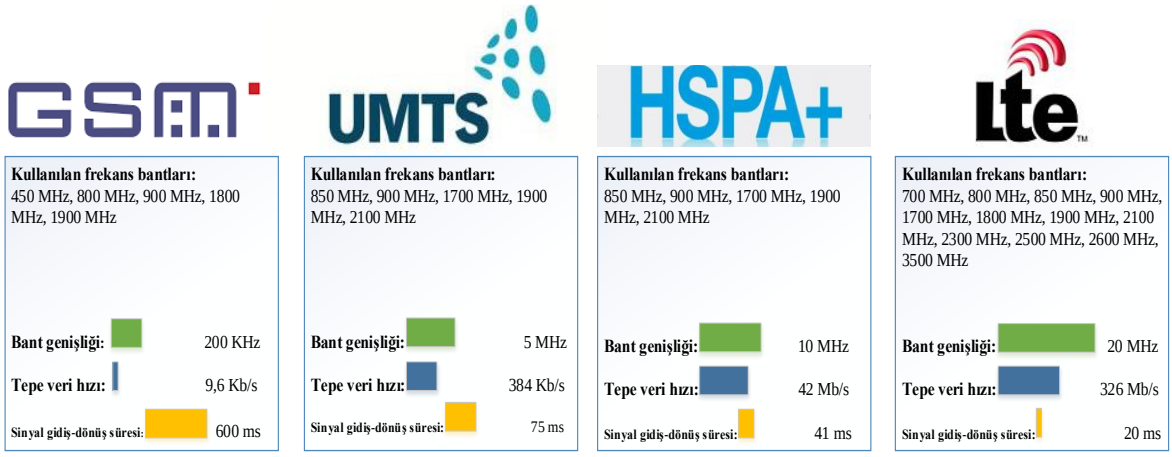
1G sistemlerle karşılaştırıldığında, ikinci nesil (2G), Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) ve Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA) gibi dijital modülasyon teknolojilerini kullanmıştır. 64 Kb/s'ye kadar veri hızına sahip olan 2G sadece daha iyi ses hizmetlerini değil, aynı

zamanda Kısa Mesaj Servisi (SMS) gibi hizmetleri de desteklemektedir. 2G döneminde baskın olan mobil iletişim standardı GSM olmuştur.

2G sistemlerinin ilk fazı 9,6 Kb/s'ye kadar bir veri hızı sunmuştur ve ikinci fazda 200 KHz'den fazla bant genişliği ile veri hızı 300 Kb/s'den daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Anahtarlama, ikinci fazdan başlayarak devre anahtarlamaya ek olarak paket anahtarlama olmaya başlamış ve radyo erişimi TDMA/FDMA olmuştur. Frekans bandı 850-1900 MHz'dir. GSM teknolojisi, tam hız kanalında brüt veri hızı 22,8 Kb/s ve 4,6 ms süreli bir çerçeve ile taşıyıcı başına sekiz kanal kullanmıştır [67].

Üçüncü nesil (3G), yüksek hızlı veri aktarımı sunmak amacıyla 2000 yılında önerilmiştir. 3G şebekesi, en az 2 Mb/s veri aktarım hızının yanı sıra yüksek hızlı internet erişimi de sağlamıştır. Web tarama, TV akışı, navigasyon haritaları ve video servisleri dahil 1G ve 2G ağları tarafından desteklenmeyen gelişmiş hizmetler sunmuştur. Küresel dolaşım elde etmek amacıyla teknik şartnameler, mobil standartlar ve sistemlerin belirlenebilmesi için 3. Nesil Ortaklık Projesi (3GPP) adı verilen bir organizasyon kurulmuş çalışmalar yapılmıştır [70].

3GPP/Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından bazı mobil iletişim teknolojileri için tanımlanan temel özellikler Şekil 3.2'de yer almaktadır.



Şekil 3.2. 3GPP/ETSI standartlarının temel özellikleri [71]

4G, 2000'lerin sonlarında piyasaya sürülen, indirme hızı (downlink) 1 Gb/s'ye kadar ve yükleme hızı (uplink) 500 Mb/s'ye kadar yüksek hızlı veri hızları sağlayabilen tamamen IP tabanlı bir ağdır. Spektral verimliliği geliştirir ve gecikmeyi azaltır, Dijital Video Yayını

(DVB), Yüksek Çözünürlüklü Televizyon (HDTV) içeriği ve görüntülü sohbet gibi gelişmiş uygulamaların gereksinimlerini karşılar. Uzun Süreli Evrim-Gelişmiş (LTE-A) ve Mikrodalga Erişimi için Kablosuz Birlikte Çalışabilirlik (WiMAX) 4G standartları olarak kabul edilmektedir [72].

4G'de yüksek hızlı, yüksek kaliteli ve yüksek kapasiteli hizmetler sunarak, geliştirilmiş güvenlik ile İnternet Protokolü üzerinden Ses (VoIP), multimedya ve IP üzerinden internet maliyetleri düşürülebilmektedir. IP tabanlı ağlar, Küresel Mobil İletişim Sistemi (GSM), Evrensel Mobil Haberleşme Sistemi (UMTS) ve CDMA2000 gibi önceki nesil altyapılardan daha yeni teknolojilere sorunsuz geçiş (handover) avantajı sunmaktadır. Bu teknoloji ile birlikte LTE standardında paket anahtarlamanın yanı sıra tam IP ağı tanıtılmıştır. LTE devre anahtarlamalı olmadığından ve bunun yerine Radyo Erişim Ağı (RAN) mimarisini kullandığından dolayı, operatörlerin hizmet kalitesini sağlamak için entegre etmesi gereken önemli altyapı değişiklikleri bulunmaktadır.

Gelecekteki kapasite ihtiyacını karşılamak yeni nesil kablosuz teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. 5G teknolojisi, 4G haberleşmesi ile karşılaştırıldığında, ek frekans bantları, yeni spektrum yönetim teknikleri ve lisanslı ve lisanssız bantların entegrasyonu gibi yeni özellikler sunacak ve daha iyi hizmet kalitesi sağlayacaktır. 5G şebekesi ile birlikte gelişmiş güvenilirliğin, daha kapsamlı sistemlerin ve daha güvenli mimarilerin ortaya çıkışı da gerçekleşecektir. 5G ağlarında ana yenilik, artan sayıda cihazın eşzamanlı bağlantısına izin verilmesi ve tüm cihazlara yüksek kaliteli hizmetler sunulması olacaktır. Ek olarak ağ, Yazılım Tanımlı Ağ (SDN) özellikli IoT ekipmanı da dahil olmak üzere diğer cihazları destekleyecek ve artık desteklenen tek cihaz akıllı telefonlar olmayacaktır [63, 73].

Mobil iletişim nesillerinin (1G ila 6G) temel özelliklerine ilişkin ayrıntılı karşılaştırmalar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. 1G'den 6G'ye detaylı karşılaştırma [74]

Nesiller /Özellikler	1G	2G	3G	4G	5G	6G (*beklenen*)
Zaman Dilimi	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020	2020-2030	2030-2040
Maksimum Veri Hızı	2.4 Kb/s	144 Kb/s	2 Mb/s	1 Gb/s	35.46 Gb/s	100 Gb/s

Çizelge 3.2.(devam) 1G'den 6G'ye detaylı karşılaştırma

Maksimum Frekans	894 MHz	1900 MHz	2100 MHz	6 GHz	90 GHz	10 THz
Servis Seviyesi	Ses	Metin	Resim	Video	3D VR/AR	Dokunsal
Mimari	SISO	SISO	SISO	MIMO	Masif MIMO	Akıllı Yüzeyler
Çekirdek Ağ	PSTN	PSTN	Paket N/W	İnternet	İnternet, loT	loE
Öne Çıkan Özellikler	Mobilite	Sayısallaşma	İnternet	Gerçek-zamanlı akış	Çok yüksek veri hızları	Güvenlik, gizlilik, mahremiyet

3.1.1. 5G haberleşme

5G sistemi için belirlenen gereksinimler arasında, alan başına 1 000 kat daha yüksek mobil veri hacmi, 10 kat ila 100 kat daha yüksek bağlı cihaz sayısı, 10 kat ila 100 kat daha yüksek tipik kullanıcı veri hızı, düşük güçlü cihazlar için 10 kat daha uzun pil ömrü ve 5 kat daha düşük uçtan uca gecikme süresi bulunmaktadır. Ayrıca, 2010 yılına kıyasla 1 000 kat daha yüksek kablosuz alan kapasitesi ve daha çeşitli hizmet yetenekleri sağlamak, sağlanan hizmet başına %90'a kadar enerji tasarrufu sağlamak, ortalama hizmet oluşturma zaman döngüsünü 90 saatten 90 dakikaya düşürmek, 7 milyardan fazla insana hizmet veren 7 trilyondan fazla kablosuz cihazı bağlamak için kablosuz iletişim bağlantılarının çok yoğun dağıtımlarını kolaylaştırmak ve gelişmiş kullanıcı kontrollü gizliliği sağlamak gibi farklı temel zorluklar da belirlenmiştir [75].

5G, herkesi ve her şeyi her yere bağlamak için son derece esnek ve ölçeklendirilebilir bir ağ teknolojisi sunmaktadır. Ağ dilimleme için uçtan uca destek ile esnek bir bulut-yerel çekirdek ağ sağlamaktadır. Geliştirilmiş mobil geniş bant (eMBB), Ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (URLLC) ve Masif makine tipi iletişim (mMTC) olmak üzere üç ana kullanım alanı temelinde yeni hizmetleri destekleyerek yeni değer yaratılmasını olanaklı hale getirmektedir [76].

Mobil haberleşme için en önemli zorluklardan birisi, hücresel iletişim için ayrılan RF spektrumlarının fiziksel kıtlığıdır. Hücresel frekanslar, normalde 300 MHz - 3 GHz arasında değişen cep telefonları için ultra yüksek frekans bantları kullanır. Frekans spektrumları

yoğun bir şekilde kullanılmıştır, bu da operatörlerin daha fazla kazanmasını zorlaştırmaktadır [77].

5G, akıllı telefonlar, tabletler, kablosuz Makineden makineye (M2M) iletişim ve yüksek tanımlı video, 3D, sanal gerçeklik vb. gibi uygulamaların talebindeki muazzam artış ve bant genişliğinin artması gibi kablosuz ekipmanların büyük çapta penetrasyonu ile ilişkili mobil geniş bant hizmetleri için sürekli artan talebe çözümler sunmayı amaçlamaktadır [75].

Yeni nesil haberleşme sistemleri gelişmiş kablosuz teknolojilerin konuşlandırılmasının yüksek enerji tüketimine yol açması sorununu yaşamaktadır. Kablosuz iletişim sistemlerinde enerji tüketiminin artması, şu anda çevre için büyük bir tehdit olarak kabul edilen CO_2 emisyonunun dolaylı olarak artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, hücresel operatörler tarafından baz istasyonlarının (BS) enerji tüketiminin elektrik faturalarının %70'inden fazlasını oluşturduğu bildirilmektedir. Aslında, enerji tasarruflu iletişim, 4G kablosuz sistemlerin ilk gereksinimlerinden biri olmamakla birlikte daha sonraki bir aşamada bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Diğer zorluklar, örneğin, ortalama spektral verimlilik, yüksek veri hızı ve yüksek hareketlilik, kesintisiz kapsama alanı, Servis Kalitesi (QoS) gereksinimleri ve kullanıcı deneyimi (farklı kablosuz cihazların/arayüzlerin ve heterojen ağların uyumsuzluğu) olarak belirtilebilir [78].

5G mimarisi ve özellikleri

5G sistemi, herkesi ve her şeyi her yerde birbirine bağlamak için benzersiz bağlantı sağlamak üzere geliştirilmektedir. 5G sisteminin Kullanıcı Ekipmanı (UE) ile 5G Çekirdek (5GC) ve 5G Yeni Radyo (NR) içeren spesifikasyonların Sürüm 15 (Rel-15) sürümüne dayanan ilk versiyonu hem 6 GHz altı hem de mm-dalga frekanslarında tüm dünyada ticari olarak konuşlandırılmaktadır [76].

NR'nin ilk sürümü 52,6 GHz'e kadar çalışmayı desteklemektedir. Bununla birlikte, bunun en az 100 GHz'e kadar genişletilmesi hakkında tartışmalar sürmektedir. NR'nin daha yüksek frekanslara olası bir uzantısıyla ilgili önemli bir sorun, mevcut Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) tabanlı NR dalga formunun hala en iyi seçim olup olmayacağıdır. "Tek taşıyıcılı" tipteki dalga formlarıyla karşılaştırıldığında OFDM'in güç yükselteci verimliliği açısından açıkça bir dezavantajı vardır. Bu esas olarak cihaz tarafı için, yani uplink iletim

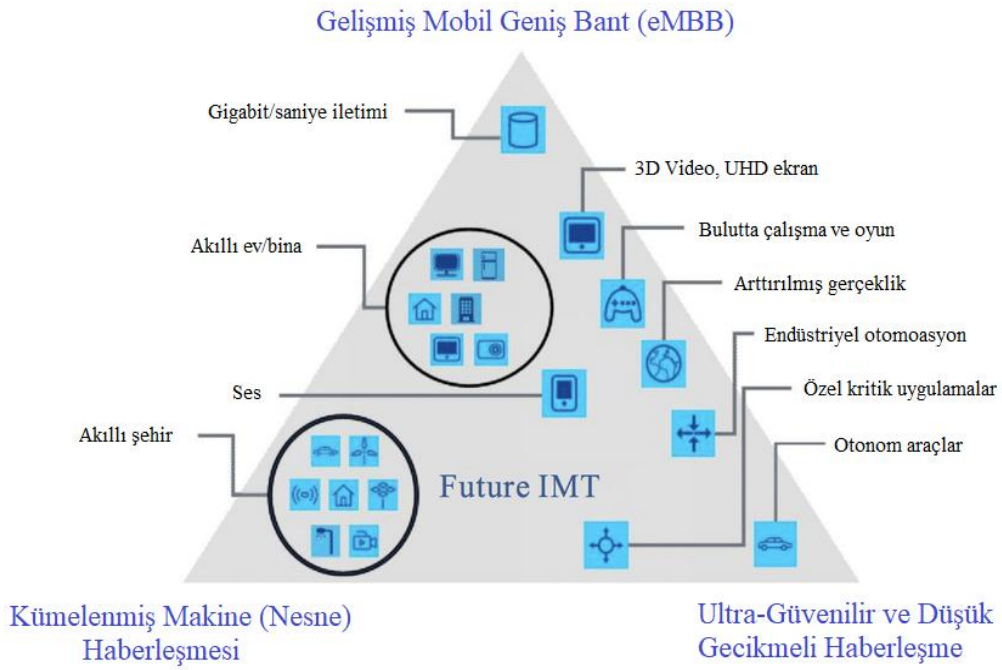
yönü için bir sorun olmuştur. Bununla birlikte, ağ tarafı için, yani downlink iletim yönü için de giderek daha önemli hale gelmektedir. 52,6 GHz üzerindeki spektrumun şu anda 60 GHz civarında mevcut olan nispeten büyük miktarda lisanssız spektrum içereceği belirtilmelidir [79].

Milyarlarca kablosuz aygıtın iletişimini mümkün kılmak için hızı ve kapasiteyi geliştirmek gerekmektedir. Milimetre dalga bantlarındaki (30–300 GHz) Kablosuz Erişim Ağı (WAN), 5G için kullanılacak yüksek hızlı bina içi/hotspot iletişimi için bir alternatif sunan geniş bant genişliğine sahiptir. 5G erişimindeki küçük hücrelerin ve mm-dalga radyosunun kombinasyonunu desteklemek için, fiber optik iletişim hem ana taşıyıcı hem de ön taşıyıcı ağlarında önemli bir rol oynamaktadır [80].

5G şebekelerinin sağladığı hizmetler, çok çeşitli Anahtar Performans Göstergeleri (KPI) ile karakterize edilir. Böylece, tüm KPI'ları verimli bir şekilde sağlayan tek bir platformun tasarımı zorlu bir görevdir. 5G'nin bu zorluğa yönelik yaklaşımı, ağ fonksiyonelliklerinin yazılımsallaştırılması ve sanallaştırılmasının kullanılması üzerine kuruludur. Aynı zamanda, katı veri hızı ve gecikme gereksinimlerinin karşılanması, milimetre dalga iletişiminin kullanılmasını, büyük Çok Girişli-Çok Çıkışlı (MIMO) bağlantıların kullanılmasını ve radyo erişim noktalarının ultra yoğun dağıtımın kullanılmasını gerektirmektedir [81]. 5G, üç ana uygulama senaryosu (Şekil 3.3) altında birçok kullanım durumu (Şekil 3.4) için benzeri görülmemiş haberleşme taleplerini karşılayarak önceki nesil mobil şebekelerden önemli bir evrimi temsil etmektedir [82].



Şekil 3.3. 5G kullanım senaryoları [83]



Şekil 3.4. 5G uygulamaları [*Kaynak: ITU*]

Geliştirilmiş mobil geniş bant (eMBB): Hem çok yüksek veri hızı (20 Gb/s tepe) hem de düşük frekanslı iletişim ve büyük kapsama alanı (10 Mb/s/m^2 trafik kapasitesi, 1 Milyon cihaz/km^2 bağlantı yoğunluğu) sağlar. eMBB kapsama alanı üzerinde daha düzenli bir deneyim ve kullanıcı sayısı arttıkça performansın orantılı olarak devamını sağlar. Ultra yüksek çözünürlüklü video, 3D video, bulutta çalışma ve oynama ve artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) gibi uygulamaları destekler.

Ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (uRLLC): Kullanılabilirlik, gecikme ve güvenilirlik gibi aşırı gereksinimleri olan ağ hizmetleri için ultra güvenilir düşük gecikmeli (1 ms uçtan-uca gecikme) iletişim bağlantıları sağlar. Sürücüsüz arabalar ve insansız hava araçları, endüstri otomasyonu, uzaktan tıbbi uygulamalar ve diğer kritik görev uygulamaları gibi uygulamaları destekler.

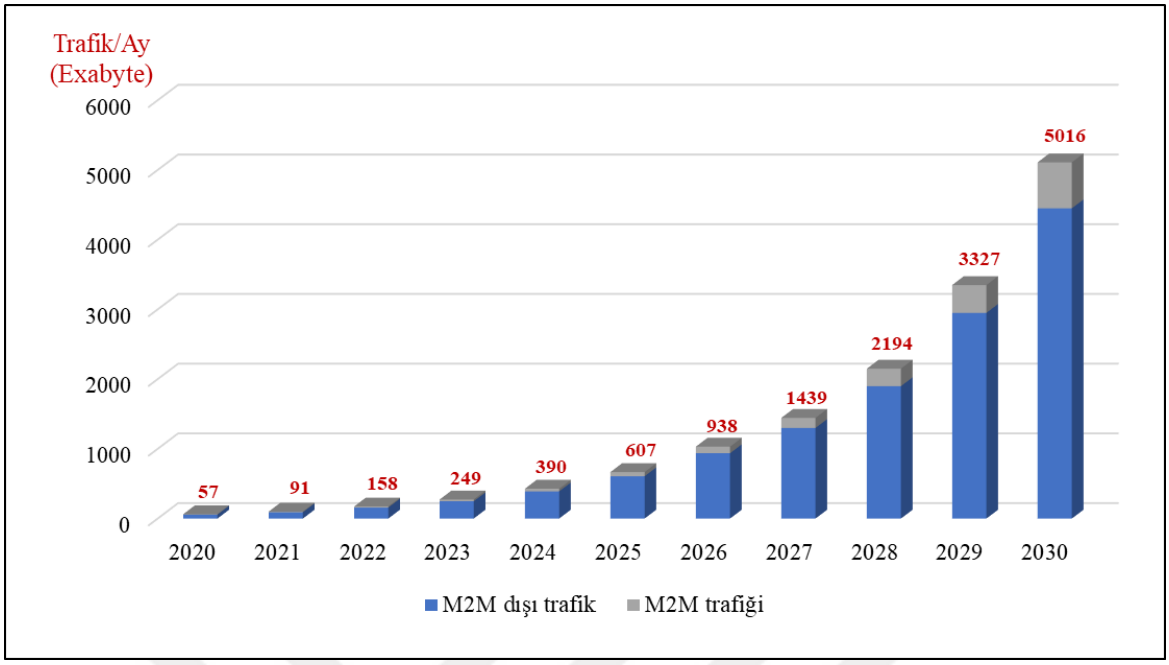
Masif makine tipi iletişim (mMTC): Milyarlarca ağ özellikli cihaz için kablosuz bağlantı, artan cihaz sayısı için ölçeklenebilir bağlantı, küçük yüklerin verimli aktarımı, geniş alan kapsaması ve derin penetrasyon veri hızlarına göre daha önceliklidir. Akıllı ev, akıllı bina, akıllı şehir ve IoT gibi uygulamaları destekler.

5G'nin temel özellikleri olarak; 20 Gb/s tepe veri hızı, 0,1 Gb/s kullanıcı deneyimli veri hızı, 1 ms uçtan uca gecikme, 500 km/sa hareketliliği destekleme, 1 milyon cihaz/km2 bağlantı yoğunluğu, 10 Mb/s/m^2 alan trafik kapasitesi, 3 kat spektrum verimliliği ve 4G kablosuz iletişim sistemlerine kıyasla 100 kat enerji verimliliği gibi özellikler sayılabilmektedir. 5G'nin bu hedeflerine ulaşabilmesi için milimetre dalga, büyük MIMO ve Ultra yoğun ağ (UDN) gibi çeşitli temel teknolojiler kullanılmaktadır [84].

5G'nin olgunlaşması ve ticarileşmesiyle birlikte, her türlü akıllı iletişim terminalinin ve yoğun akışlı uygulamaların yaygınlaştırılması teşvik edilmekte ve Her şeyin interneti (IoE) trendi yaklaşmaktadır. Bu durum kablosuz sistemlerin tasarımında, spektrum algılama, spektrum verimliliği, düşük gecikmeli iletim, bilgi işlem gücü ve yüksek verim gibi büyük zorluklar getirmektedir. Bu nedenle, kendi kendini organize etme, kendi kendini yapılandırma ve kendini kurtarma işlevlerine sahip akıllı kablosuz iletişim ağı, insanlar tarafından önceden programlanması zor olan görevleri gerçekleştirmek için kaçınılmaz bir eğilimdir [85].

3.1.2. 5G ötesi (5GB) haberleşme

Yeni hizmet gereksinimleri ve ölçek artışları, kablosuz ağların gelişiminin arkasındaki itici güç olmaktadır. Ortaya çıkan yeni uygulamaların hızlı gelişimi nedeniyle, mobil veri trafiğinde hiç bitmeyen bir büyümeye yaşanmaktadır. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU)'nin yaptığı tahminlere göre, küresel mobil veri trafiği 2030 yılına kadar 5 zettabayta ulaşacaktır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. 2020-2030 yılları arasında küresel mobil veri trafiği tahmini (K*aynak: ITU*) [65]

Dünyanın en iyi iletişim uzmanları, Mart 2019'da Finlandiya'da düzenlenen dünyanın ilk altıncı nesil (6G) zirvesinde bir araya gelerek ilk 6G raporunu birlikte hazırlamışlardır. Resmi olmayan bir şekilde, 6G'yi bir araştırma alanı olarak resmen başlatan hareket bu zirve olmuştur. 6G araştırmalarına katılma niyetlerini açıklayan hükümet ve sivil toplum kuruluşlarının sayısı giderek artmaktadır. Dünyanın dört bir yanındaki hükümetler, 6G ağlarına uygulanabilecek teknik ve teknolojilere yatırım yapmaktadırlar [86].

6G'nin ne olacağını öngörmeyi amaçlayan birçok çalışma yapılmaktadır. 6G'nin öngörülen geliştirmeleri arasında, mevcut ve yeni uygulama senaryolarını daha iyi desteklemek için aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı hızları, spektrum verimliliği, gecikme süresi, trafik yoğunluğu, bağlantı yoğunluğu, mobilite ve konumlandırma/algılamada sürekli iyileştirmeler yer almaktadır. Bu tür 5G ve ötesi mobil ağlar, modern optik ağlara yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi, doğru senkronizasyon ve ağ dilimleme gerçekleştirme yeteneği gibi yeni gereksinimler getirmektedir [82].

Mobil haberleşmenin gelecek nesli aşamasında oluşan gereksinimleri incelemek için, 5G kullanım durumlarını, teknolojik evrimi, toplumu ve 6G'nin tanıtılacağı 2030'larda dünya görüşünün araştırılması gerekmektedir. 5G'den beklenen kullanım durumları ve sorun çözümleri çoğunlukla 2020'lerde gerçekleşmekle birlikte genişlemeye devam edecektir.

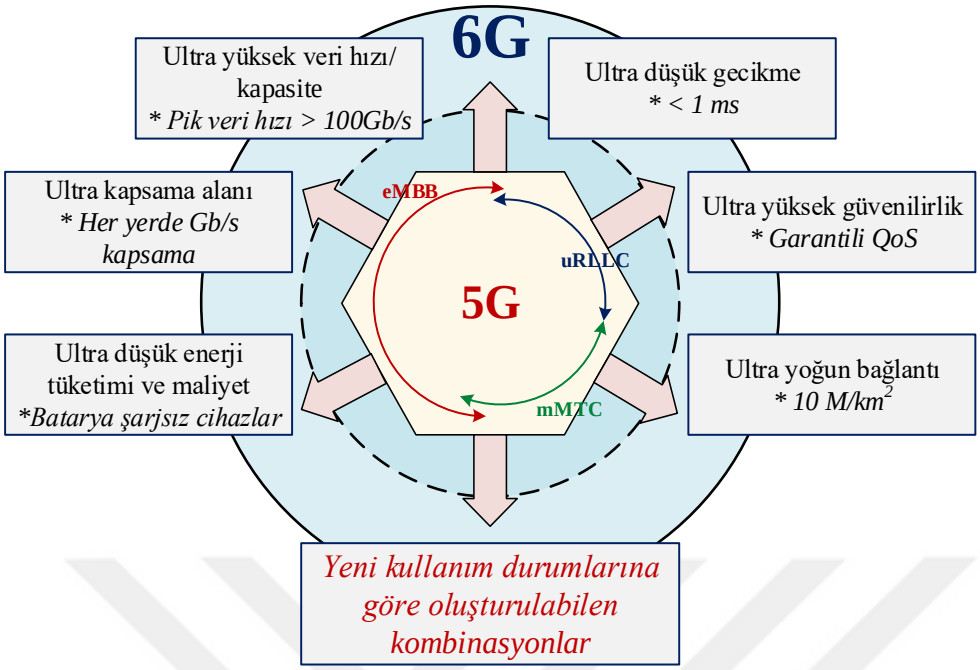
2030'larda, daha fazla gelişimin bir tür sonucu olarak, daha geniş ve daha derin difüzyonun gerekli olacağı düşünülmektedir. Buna ilave olarak, sinyal işlemenin hızlandırılması ve çeşitli cihazların gelişimi ile birlikte daha gelişmiş hizmetlere, çoklu kullanım durumlarının entegrasyonuna ve yeni kullanım durumlarına ihtiyaç duyulacaktır.

ITU, Şubat 2020'de 6G ile ilgili ilk araştırma programını yayınlamış olup 6G vizyonunun holografik tip haberleşme, kritik durumlarda son derece hızlı yanıt süresi ve gelişmekte olan pazar ihtiyaçlarının yüksek hassasiyetli iletişim talepleri gibi yeni ileriye dönük senaryoları desteklemesi beklenmektedir.

6G mimarisi ve özellikleri

5G şebekesine kıyasla 6G kablosuz haberleşme ağlarının çok daha yüksek spektral/enerji/maliyet verimliliği, daha yüksek veri hızı (Tb/s), 10 kat daha düşük gecikme süresi, 100 kat daha yüksek bağlantı yoğunluğu, tam otomasyon için daha fazla zeka, alt-santimetre coğrafi konum doğruluğu, %100'e yakın kapsama alanı ve milisaniyenin altında zaman senkronizasyonu gibi avantajlar sağlaması beklenmektedir [84].

Şekil 3.6, 6G ile 5G evrimi arasında kablosuz teknolojinin gerçekleştirilmesi için gerekenleri göstermektedir. 5G'nin yüksek gereksinimlerine ek olarak, 5G'de dikkate alınmayan yeni gereksinimler eklenmiş ve daha geniş bir şekilde genişletilmiştir. Ayrıca, 5G ile olduğu gibi, tüm gereksinimlerin aynı anda karşılanması gerekmez, ancak gelecekteki yeni kullanım durumları için yeni gereksinim kombinasyonları gerekecektir [87].



Şekil 3.6. 6G teknolojisi için temel gereklilikler

52,6 GHz'in üzerindeki frekans bandı, 6G sistemlerinin potansiyel bandı olarak kabul edilmektedir. 52,6 GHz'in üzerindeki frekanslar daha düşük frekans bantlarıyla karşılaştırıldığında; daha yüksek faz gürültüsü, yüksek atmosferik emilim nedeniyle aşırı yayılma kaybı, daha düşük güç yükselteci verimliliği ve güçlü güç spektral yoğunluk düzenleyicisi gibi daha zorlu durumlarla karşı karşıya olduğundan dolayı 52,6 GHz'in üzerindeki vericiler daha yüksek Tepe Ortalama Güç Oranı (PAPR) gereksinimlerine sahip olmaktadır. Bu nedenle, daha yüksek frekans bantları için uygun dalga biçimini incelemek gereklidir [84].

6G şebekesinde, önceden belirlenmiş standartlar veya spesifikasyonlar yoktur, sadece birçok olası uygulama vardır. 6G ağlarının sadece 5G ağlarının daha hızlı sürümleri olmaması gerektiğini, bunun yerine 5G teknolojisinin genel bir gelişimi olması gerektiğini savunanlar da bulunmaktadır. Kapsama ile ilgili olarak, 5G ağının sınırlamalarına rağmen, yerle sınırlı kalmamalıdır. Denizaltı yüzeyleri tamamen kapsama alanında olmalıdır. Yapay Zeka (AI)'da 6G şebekesinde çok daha gelişmiş olarak yer alacaktır. Birçok araştırmacı, 6G ağının hem AI güdümlü hem de AI etkin olması gerektiğine inanmaktadır ve bu da AI'nın 6G şebekesinin temel bir özelliği olduğu anlamına gelmektedir [88].

5G şebekesi oluşmaya başlarken hem sanayi hem de akademik dünya, 6G ağlarının yüksek kaliteli hizmetleri, yeni ortaya çıkacak uygulamaların (örneğin, sanal ve artırılmış gerçeklik, uzaktan cerrahi, holografik projeksiyon ve çok sayıda akıllı terminal için sınırsız bağlantı) etkili bir şekilde desteklemesinin beklendiği 6G ağları üzerindeki araştırmalara zaten başlamıştır. Önceki nesil ağlardan farklı olarak, 6G ağlarının, 2030'un akıllı bilgi toplumu için daha katı gereksinimleri ve talepleri karşılamak üzere zekâyı gerçekleştirerek kendi devrimini yaratması gerekecektir [89].

Enerji edinme teknolojileri ve yeni malzemelerin kullanımı, sistem enerji verimliliğini büyük ölçüde artıracak ve sürdürülebilir yeşil ağlar gerçekleştirecektir. Üç yeni 6G servis senaryosu şu şekilde açıklanmıştır: her yerde bulunan mobil ultra-geniş bant (uMUB), ultra yüksek hızlı-düşük gecikmeli iletişim (uHSLLC) ve ultra yüksek veri yoğunluğu (uHDD).

Yeşil 6G ağlarının küresel kapsamda enerji verimli ve sosyal olarak kesintisiz kablosuz bağlantılara ulaşması beklenirken, mevcut ağ mimarisi gelecekteki uygulama dağıtım kısıtlamalarını ultra yüksek verim, ultra düşük gecikme ve güvenilirliği garanti etmek için uygundur. Bu nedenle, gelecekteki ağ çerçeveleri üzerinde ileriye dönük araştırmalar gereklidir. FG NET-2030, Ağ 2030 mimarisini formüle etmek için Alt Grup 3'ü kurmuştur. Ancak, gelecekteki ağ mimarisinin ne olacağını doğru bir şekilde göstermek gerçekçi değildir. Alt Grup 3, mimariyi tek bir çerçeveyi reddetmek yerine farklı boyutlardan yorumlayan bir uzlaşmaya ulaşmıştır [65].

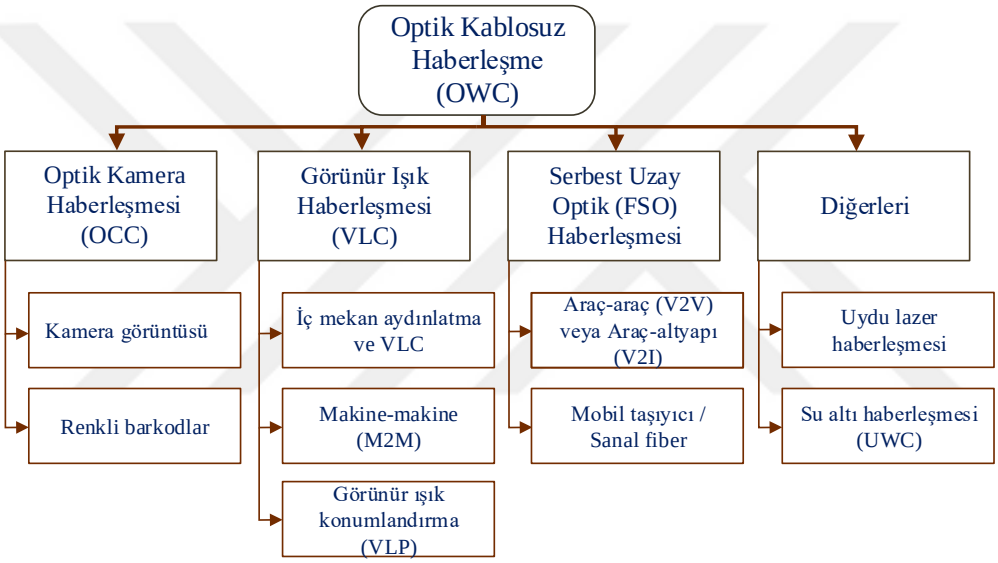
3.2. Optik Kablosuz Haberleşme (OWC) Sistemleri

RF tabanlı haberleşmenin, kablosuz ağlardaki sınırlı spektrum kaynakları nedeniyle daha kısıtlı hale geldiği bilinmektedir. Bu nedenle, artan talebi desteklemek için, birçok araştırmacı şu anda lisanssız optik spektrumu [1 mm-10 nm] RF'nin umut verici bir tamamlayıcı tekniği olarak görmektedir. OWC, iletişim ortamı olarak optik spektrumu kullanan ve RF'nin tamamlayıcı tekniği olarak ele alınan bir sistemdir [60].

OWC, elektromanyetik spektrumun optik kısmını kullandığından, diğer RF cihazlarıyla EMI oluşturmaz ve ayrıca fiber optik iletişime kıyasla esnek ve dinamik bir bağlantı ortamı sağlayabilir. Buna ek olarak, optik spektrum geleneksel RF spektrumundan daha büyüktür.

Ayrıca, OWC'nin teknik olarak uygulanabilir olduğu ve çeşitli uygulamalara uygulanabileceği teorik ve deneysel olarak gösterilmiştir [90].

Işık çevredeki duvarlardan geçmediği için OWC gelişmiş veri güvenliğini desteklemektedir. OWC'de yayılma ortamı olarak görünür ışık (VL), kızılötesi radyasyon (IR) veya ultraviyole (UV) spektrumları kullanılmaktadır. Bu üç optik bant temelinde çok sayıda kablosuz sistem geliştirilmektedir. En umut verici OWC teknolojileri VLC, Li-Fi, OCC ve FSO haberleşmesidir [30]. Bu teknolojilerin her biri için yayılma ortamı, iletişim protokolü, mimari ve uygulama senaryosu birbirinden farklıdır (Şekil 3.7) [60].



Şekil 3.7. Optik kablosuz haberleşme tipleri [90]

RF haberleşmesi kolayca saldırıya uğrayabildiğinden, gizli verilerin iletimi için çok çaba gerekmektedir. Bunun yanında, güvenli RF iletimleri bile çaba ve zamanla durdurulabilmektedir. Öte yandan, OWC'de, veri iletimi aydınlatma ile ilişkili olduğundan, güvenlik sorunları aydınlatılan alanda sınırlı olmaktadır. Fiber ve bakır kablo ağları, yetkisiz erişime karşı daha hassastır. Optik kablosuz sistem, sinyallerin ele geçirilmesi zorluğundan dolayı yüksek derecede fiziksel güvenliğe sahiptir. Ayrıca optik iletimler, en üst düzey güvenliğin sağlanabileceği fiziksel katmanda gerçekleşmektedir [91].

OWC sistemlerinin RF sistemlerine kıyasla çeşitli avantajları vardır; örneğin bir OWC sistemi elektromanyetik spektrumun optik alanında 380 nm ila 10 000 nm arasında lisanssız dalga boylarına sahiptir. Bu nedenle, bir OWC sisteminin bant genişliği 670 THz'den

fazladır; yani bant genişliği 60 GHz olan bir RF spektrumundan 10 000 kat daha büyüktür [92].

RF teknolojisi haberleşme alanında yoğun bir şekilde kullanılmakla birlikte, bant genişliği, veri hızı ve insan sağlığı güvenliği konularında kısıtlamaları bulunmaktadır. Fiber optik teknolojisi, uzun mesafeler için daha fazla bant genişliği ve daha hızlı güvenilir bir iletişim sağlarken, fiber ve sabit erişim dağıtımı nedeniyle hareketliliği sınırlıdır. OWC teknolojisi, RF ağlarının esnekliğini ve optik fiberlerin yüksek bant genişliğini birleştirmektedir [91].

Hızlı bir şekilde artan geniş bant kablosuz iletişim hizmetleriyle birlikte, çoğu mobil haberleşme sisteminin geleneksel mikrodalga frekansı kullanımı azalacak ve 6 GHz bandı kısa bir süre içinde doygun hale gelecektir. Sonuç olarak, artan kapasiteyi sağlayabilmek amacıyla radyo sisteminin kritik uygulamaları daha yüksek frekans bantlarında hizmet verecektir. Yüksek bant genişliği kapasitesi, düşük fiber kaybı ve kablosuz iletişimin rahatlığından dolayı FSO teknolojisi, yüksek güvenlik, hızlı kurulum ve yüksek hızlı kablosuz erişim sağlayan bir aday olarak kabul edilmektedir [93].

Fiber optik iletişim bilgiyi bir noktadan diğerine ışık şeklinde fiber optik kablo ile taşıma aracıdır ve OWC'nin bir türü olan FSO haberleşmesi ise yüksek hızlı verilerin serbest uzay üzerinden optik sinyaller kullanarak uzun mesafelerde iletilmesidir [94]. OWC, son on yılda oldukça önemli bir ilgi kazanmıştır. OWC, 30 kHz'den 300 GHz'e uzanan, düzenlenmiş ve lisanslı bir elektromanyetik spektrum bandına sahip olan geleneksel RF tekniği için hem alternatif hem de en elverişli karşılıklı bağımlı iletişim tekniği olarak algılanmaktadır [95].

Tipik olarak OWC, yakın kızılötesi spektrumundan ultraviyole spektrumuna kadar geniş bir dalga boyu aralığını kapsayan ve birden çok teknolojiyi içeren genel bir kavramdır. Aynı şekilde OWC teknolojileri, ultra-kısa mesafelerden uzun mesafeli iletişimlere kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilen yüksek veri hızlı iletişim bağlantısının mükemmel özelliklerini sunabilmektedir. OWC teknolojilerinin, IoT ve gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinin yoğun bağlanabilirliği tarafından oluşturulan yüksek trafiği destekleyebildiği gösterilmiştir. OWC ve RF'in özellikleri birbirini tamamlayıcı olduğundan, 5G ve ötesi iletişim sistemlerini desteklemek için birleştirilmiş bir uygulama umut verici bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir [60, 96, 97].

OWC, taşıyıcı dalga olarak ışık kullanan ve mesajı hava veya serbest uzay yoluyla ileten bir tekniktir ve bilgi taşıyan sinyal, optik yükselteçleri kullanarak bu taşıyıcı sinyali modüle etmektedir [98]. OWC teknolojisinin standart iç mekan aydınlatmalarında 100 Gb/s'ye ulaşabileceğini ve enerji verimli iletişim sağlayabildiğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Akademik dünya ve endüstriler şu anda, OWC perspektifinde gelecekteki ultra-yoğunluk ve ultra-kapasite ağları için RF'e yeni bir alternatif olarak 1 mm-10 nm'yi kapsayan lisanssız optik spektrumla ilgilenmektedir [96].

OWC'nin avantajları arasında, düzenlenmemiş optik spektrumdan yüzlerce THz erişim, EMI'ya karşı duyarlılık, basit uygulama, gizlilik ve güvenlik gibi hususlar yer almaktadır. Optik spektrumun lisanssız olması nedeniyle iletişim maliyeti düşüktür ve aynı zamanda OWC sistemleri Elektromanyetik Girişim (EMI)'e ve Kanallar Arası Girişim (ICI)'e karşı bağışıklık özelliğine sahiptir. Bu avantajlar, akıllı şehirleri gerçekleştirmek için gerekli akıllı uygulamaları desteklemek için OWC'yi ana taşıyıcı olarak ön plana çıkarmaktadır.

Ayrıca OWC sistemi, navigasyon ekipmanı, kontrol sistemleri ve tıbbi cihazlardan kaynaklanan RF emisyonlarına zarar verebilecek bir girişim özelliği göstermemektedir. Bu özellik uçaklar, hastaneler ve sanayi alanları gibi RF bağlantı kısıtlamaları olan bölgelerde güvenli OWC bağlantılarına olanak tanımaktadır. Optik bölgenin UltraViole (UV), görünür ve kızılötesi spektrumlarından UV, iç mekan uygulamalarına ve sosyal alanlara yakın kullanıma uygun değildir. Yüksek güç iletimi temel olarak gözü ve cildi etkilediğinden dolayı OWC'de göz ve cilt güvenliği önemsenen bir konu olmaktadır. Bu nedenle, iletişim sırasında fiziksel güvenliği ve görsel konforu sağlamak için optimum güç kullanılması gerekmektedir [91].

OWC sistemlerinin avantajlarının yanında, Görüş Hattına (LOS) güçlü bağımlılık, kısıtlı kapsama alanı, bağlantılardaki anlık engellere karşı hassasiyet, farklı ışık kaynaklarının oluşturduğu girişim, dış mekan atmosfer etkileri nedeniyle performansın düşmesi ve kısıtlı iletim gücü gibi bazı sınırlamalar da mevcuttur. Bu nedenlerle, sorunsuz bir OWC dağıtımı için bu sınırlamaların üstesinden gelmek zorlu bir konu olmaktadır. Bir RF bandının (3 kHz–300 GHz) kullanımı, farklı yerel ve uluslararası otoriteler tarafından sıkı bir şekilde düzenlenmiş durumdadır. Ayrıca, girişim RF tabanlı iletişimde ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Ancak, RF ile desteklenen kablosuz teknolojiler, Görüş Hattı Olmayan (NLOS) koşullarda daha yüksek mobiliteyi ve daha iyi performansı desteklemektedir. RF

sistemlerinin bu özel özellikleri, OWC sistemlerinin birkaç sınırlamasının üstesinden gelebilmektedir [60].

OWC ayrıca, geniş bant kablosuz bağlantıya ulaşmak için ultra yüksek ölçeklenebilir bant genişliği nedeniyle, gelecek 6G kablosuz iletişim için potansiyel etkinleştiren teknolojilerden biri olarak tanımlanmaktadır. OWC'nin daha yaygın olarak FSO iletişimi olarak tanımlandığı özellikle 1 300-1 600 nm aralığındaki dalga boylarının kullanımı, fiber tabanlı transmisyon sistemleriyle uyumlu olmasından kaynaklı olarak mevcut durumda daha fazla ilgi görmektedir. Bu sayede yüksek kapasiteli kablolu ve kablosuz iletim alanları arasında sorunsuz bir yakınsama da sağlanmış olmaktadır [97, 99].

OWC sistemlerinde, elektrik sinyalini modüle etmek için optik bir taşıyıcı kullanılır ve görünür spektrum da dahil olmak üzere ultraviyoleden kızılötesine kadar uzanan dalga boylarında serbest uzayda iletilir. OWC uygulamaları çok kısa mesafelerden (milimetre), iç ve dış mekan bağlantılarına (birkaç kilometre) ve hatta uydular arası iletişime (4500 kilometreye kadar) kadar çeşitlilik göstermektedir. OWC dalga boyuna göre üç ana türe ayrılır: ultraviyole ışık (100 nm – 400 nm), görünür ışık (380 nm – 780 nm) ve kızılötesi ışık (IR) (800 nm – 2500 nm) [8,9].

Kablosuz uygulamalar için kullanılan elektromanyetik (EM) spektrumunun görünür bölgesinde (380 nm–780 nm) çalışan iletişim sistemlerine VLC sistemleri denilmektedir. İletişim görünür spektrum aracılığıyla yapıldığından, aydınlatma için kullanılan görünür ışık kaynakları aynı zamanda VLC vericileri olarak da kullanılabilmektedir. VLC sisteminin eşzamanlı aydınlatma ve haberleşme yapabilmesi, Katı Hal Aydınlatma (SSL) kaynakları aracılığıyla sağlanmaktadır. VLC'yi destekleyen başlıca SSL kaynakları LED ve LD'lerdir. Göz ve cilt sağlığı için daha güvenli VLC sistemleri sağlamak için aydınlatma ve iletişim standartlarının karşılanması gerekmektedir [91].

Yeni nesil optik haberleşme altyapıları ve şu an göz önünde bulundurulan başlıca optik teknolojiler OWC ve türleri, FSO, VLC, OCC ve Li-Fi sistemleridir.

3.2.1. FSO haberleşme sistemi

Dış mekân haberleşme bağlantıları için yaygın olarak kullanılan OWC teknolojilerinden biri FSO haberleşme sistemidir. FSO, son metre bağlantı sorunlarını ele almak, binalar arası bağlantıları mümkün kılmak, hücresel ağlar için ana taşıyıcı sağlamak, uzak bölgelerde geniş bant erişimi sunmak ve kablosuz metropolitan alan ağlarını genişletmek gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. FSO iletişimi, daha yüksek veri hızları, daha düşük maliyetler ve gelişmiş güvenlik gibi avantajları nedeniyle büyük ilgi görmüştür ve bu da onu birçok kablosuz iletişim ihtiyacı için cazip bir seçim haline getirmiştir. Sonuç olarak FSO, 5G ve hatta 6G iletişim araştırmalarında önemli bir role sahip, gelecek vaat eden bir teknoloji olarak kabul edilmektedir [18]. Optik sinyalleri iletmek için en yaygın ortam olan fiber optik kabloların aksine, FSO bu sinyalleri açık uzayda iletir. Bu benzersiz özellik, FSO'yu sıkışık yollar, özel mülkler veya nehirler gibi fiber kurulumunun pratik olmadığı veya maliyet açısından engelleyici olduğu senaryolarda ideal bir çözüm haline getirmektedir [24].

Olgunlaşmış bir OWC teknolojisi olan FSO iletişim sisteminin, dış mekan iletişim bağlantıları için yaygın olarak kullanılmasının nedeni FSO sistemlerinin neredeyse sınırsız bant genişliği ve yüksek veri hızı, düşük kurulum maliyeti, gizli dinlemeye karşı üstün güvenlik ve RF kaynaklı elektromanyetik parazitlere karşı direnç sunmasıdır. Avantajlarının yanı sıra FSO bağlantısı yağmur, kar, duman, sis ve türbülans gibi atmosferik bozukluklardan da etkilenir. Dış ortamlarda, hava türbülansı, ışık sinyalinin fazında ve yoğunluğunda rastgele değişimler yaratarak sistem performansının düşmesine neden olduğu için temel zorluk haline gelmektedir [9].

FSO iletişiminin gerçek ve pratik uygulaması uzun menzilli ve yüksek veri hızı iletimini içermektedir. FSO, fiber optik iletişim ağı ile aynı şekilde çalışır. İkisi arasındaki temel fark, FSO'nun fiber optik yerine serbest uzay kullanmasıdır. Ancak bu temel fark nedeniyle, çok uzak noktalar arasında yani farklı ülkeler arasında ve hatta kıtalar arasında veri iletimi sağlamak için fiber optik ağ kullanılması gerekmektedir [100].

FSO belirli bir mesafeyle ayrılmış verici ve alıcı arasında bilgi aktarmak için taşıyıcı olarak ışığı ve ortam olarak serbest uzayı kullanan optik kablosuz bir iletişim teknolojisidir. FSO'nun temel prensibi; veri, ses, video ve görüntü iletimi için yüksek veri hızlarının (1

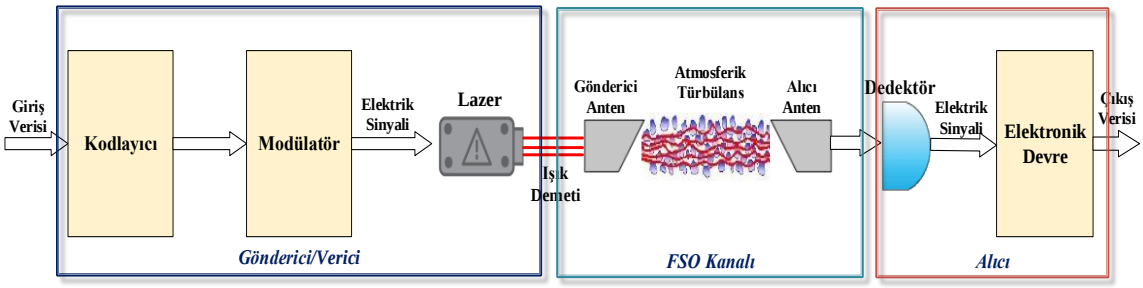
Gb/s ve üzeri) maliyet, zaman ve fayda açısından verimli bir şekilde iletiminin sağlanmasıdır. Ayrıca yönlü olmaları nedeniyle geniş bant kapasitesi ve yüksek güvenlik sağlamaları, düşük maliyetli ve daha basit donanımları bu sistemleri mikrodalga ve RF sistemlerin tamamlayıcısı olarak ortaya çıkarmıştır [101, 102].

FSO sistemleri birkaç kilometrelik bağlantı mesafesine yerleştirilebilir. Fiber optiğe göre daha hızlı ve kurulum kolaylığı ile birlikte yüksek bant genişliği sağlamaktadır. Havada asılı parçacıklara neden olan pus, sis ve yağmur gibi farklı hava koşulları genellikle optik dalga boyundaki fotonlarla etkileşime girerek optik sinyalin saçılmasına neden olmaktadır [103].

FSO sistemleri veri, ses ve video gibi farklı trafik türlerinin iletimi için her iki tarafta tam çift yönlü iletim yeteneğine sahip optik alıcı-vericilerden oluşur. İyi bir FSO iletişim sistemi aşağıdaki özelliklerle değerlendirilebilir [100].

• FSO sistemi daha uzun mesafelerde daha yüksek güç seviyelerinde çalışabilmelidir.
• Yüksek hızlı FSO sistemleri için, yüksek hızlı modülasyon önemlidir.
• Genel sistem tasarımı kompakt olmalıdır.

FSO iletimi, geniş bantlı iletişim için tasarlanmış olan ve kullanılan, modüle edilmiş optik sinyallerin (görünür veya kızılötesi), karasal atmosfer yoluyla iletim sistemidir. En yaygın olarak, lazer sistemleri FSO alıcı-vericileri için kullanılır, ancak küçük güçler için LED veya kızılötesi yayınım diyotu da kullanılmaktadır. FSO teorisi, temel olarak optik fiber yoluyla iletim için olan teori ile aynı olmakla birlikte aradaki fark, enerji ışınının bir optik fiber aracılığıyla yönlendirilmek yerine karasal atmosfer aracılığıyla kaynaktan hedefe iletilmesidir. Kaynağında, görünür veya IR enerjisi, iletilecek verilerle modüle edilmektedir. Hedefte, ışın optik sistem tarafından toplanır, optiğin elektriğe ve veriye dönüştürülmesini sağlayan bir fotodedektöre yansıtılır, elektrik sinyalinden çıkarılır (demodülasyon) ve sonuçta elde edilen veri son kullanıcıya gönderilir (Şekil 3.8). FSO sistemleri, optik fiber altyapısının geliştirilemediği alanlarda geniş bant iletim için iyi bir çözüm olsa da uygulamada karşılaşılan önemli bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Bu kısıtlamalardan en önemlileri olarak sis, duman, yağmur, toz veya kar gibi etkenler optik ışın iletim yolunu zayıflatma ve hatta bloke etme etkisi de oluşturmaktadır [104].



Şekil 3.8. Temel bir FSO haberleşme sistemi yapısı [96]

Mevcut radyo frekansı teknolojileri, veri hızı ve bant genişliği açısından sınırlıdır ve göreve duyarlı veriler için güvenlik sorunları oluşturabilmektedir. Bu uygulamalar için, FSO iletişimi gelecek vaat eden bir teknoloji durumundadır. FSO iletişimi, çoklu yol girişiminden ve atmosferik türbülanstan olumsuz etkilenmektedir. Dolayısıyla sistem tasarımcısının bakış açısından, kanal davranışını önceden tahmin edebilen iyi modellere sahip olmak çok önemlidir [105].

Özellikle, 5G haberleşmesi mevcut kablosuz ağlara kıyasla yüz kat fazla kablosuz cihaz bağlantısının yanı sıra iletim hızına izin veren ultra yoğun heterojen ağlarla tasarlanmaktadır. Araştırmacılar kablosuz haberleşme için alternatif yaklaşım olarak milimetre ve nanometre dalgaları arayışındadır. FSO teknolojisine benzer şekilde, mm-dalga (30–300 GHz) yüksek hızlı iletimi destekler, ancak mm-dalga, V-bandında (57–64 GHz) veya E-bandında (81–86 GHz) 10 Gb/s'ye kadar veri hızına ulaşabilirken, FSO sistemleri ise yaklaşık 100 Gb/s bir veri aralığı sağlamaktadır [96].

FSO tekniği kullanan teknolojiler, uzamsal yoğunluğun yeniden kullanımı, optik akı yönlülüğünün sonucu, düşük güç tüketimi, yüksek veri hızı ve frekans lisanslama gereksinimi üzerindeki kısıtlamaların kaldırılması nedeniyle çekici olmaktadır. Dezavantajlar, optik olarak iletişim kuran noktalar arasında doğrudan bir görüş hattı sağlama zorunluluğu ve görüş hattının kısmen veya tamamen engellenmesi veya hava olayları nedeniyle sinyalin zayıflaması durumunda iletim kalitesinin düşmesi ile ilgili durumlar olmaktadır [106].

FSO haberleşmesi, geniş uygulama yelpazesi nedeniyle yeni nesil iletişim için uygun bir teknoloji olarak düşünülebilir. Uygulamalarından bazıları; uydular (uydular arası iletişim),

yüksek irtifa platformları (High Altitude Platforms-HAP), insansız hava araçları (İHA), karasal iletişim, uçak ve gemiden gemiye iletişimi içeren bağlantılardır [94].

3.2.2. VLC haberleşme sistemi

Bilinen bir diğer OWC teknolojisi de VLC sistemidir. Görünür spektrumdaki OWC teknolojisi olan VLC, şu anda çoğunlukla son mesafe erişim ağları gibi kısa menzilli iç mekân uygulamaları için tasarlanmıştır. VLC'nin en önemli özelliği, aydınlatma, yüksek hızlı veri aktarımı ve hassas iç mekân konumlandırması için LED tabanlı ışık kaynaklarını kullanmasıdır. VLC ayrıca düşük güç tüketimi, iç mekan veri iletimi için gelişmiş güvenlik, yüksek veri hızları ve lisanssız bant genişliği ile dikkat çekerek gelecekteki iç mekan ağları için umut verici bir çözüm olarak görülmektedir. [10, 19, 23].

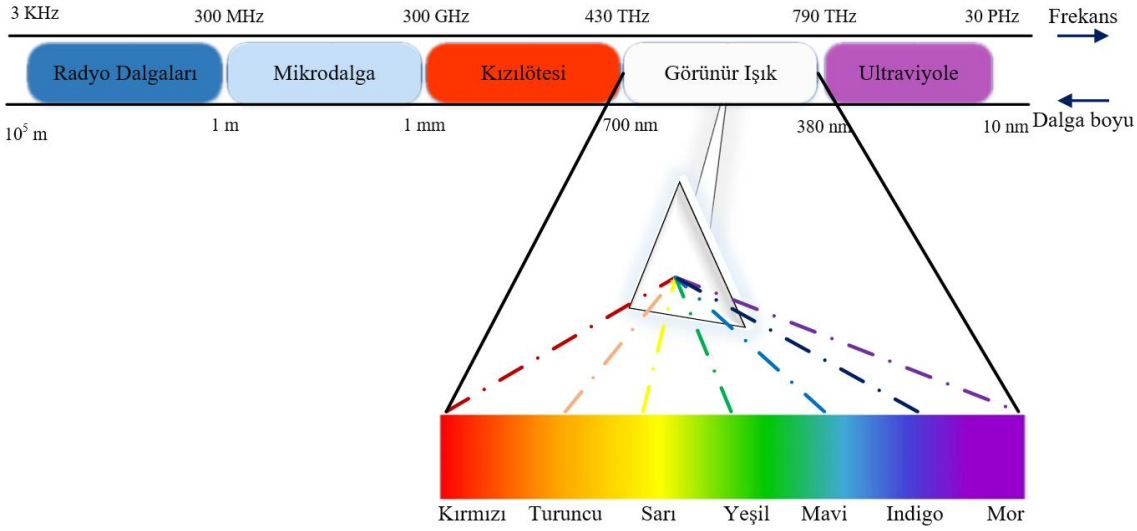
VLC, verici olarak LED lambalar veya LD'ler ve alıcı olarak fotodetektörler (PD'ler) kullanmaktadır. Bu sayede VLC aydınlatma, iletişim ve yer tespiti sağlayabilmektedir. VLC kullanılarak 100 Gb/s veri hızına ulaşılabilmektedir.

VLC tek yönlü veya çift yönlü olabileceği gibi noktadan noktaya veya noktadan çok noktaya da olabilmektedir. VLC'de hareketlilik ve aydınlatma destekleri zorunlu değildir. VLC'nin performansı güneş ışığından ve ortamdaki ışık kaynaklarından büyük ölçüde etkilenmektedir, bu da onu dış mekan uygulamaları için uygunsuz hale getirmektedir. Ayrıca, iç mekan VLC sistemlerinde kapsama boşlukları oluşur ve iletişim mesafesi küçüktür. Bir kapsama boşluğu, alınan sinyal gücünün çok düşük olduğu bir alanı tanımlamakta olup, verici ve alıcı arasındaki iletişimin mümkün olmadığı bir alanı ifade etmektedir [60].

Modern haberleşmede umut verici bir araştırma alanı olan VLC, çıplak gözle ayırt edilmesi zor olan yüksek hızda ve ışık değişimlerinde ışık sinyalleri yaymak için LED gibi görünür ışık kaynaklarını kullanarak bilgileri iletmektedir. Mobil iletişim için genişleyen spektrum kaynaklarının yanı sıra yüksek hız, geniş kapasite, güvenlik ve enerji tasarrufu gibi teknik özelliklere de sahiptir. Aydınlatma ve görüntüleme için LED'ler zaten her yerde bulunmakla birlikte, RF iletişimi için mevcut 5G ve 6G çözümleri enerji-yoğun enerji gerektirmektedir ve bu nedenle gelecekte evrensel ışık ara bağlantısını elde etmek için VLC kullanılabilecektir. Li-Fi, ışık konumlandırma ve akıllı ev sistemleri gibi yenilikçi

uygulamalar, VLC'nin aydınlatma veya görüntüleme ile entegrasyonunun sadece bir rüya olmadığını kanıtlayan uygulamalardır. Bu, Li-Fi teknolojisinin daha büyük teknolojik değişimlere yol açacağını göstermektedir [107].

Günümüzde, VLC uygulamaları iç ve dış mekan senaryolarının elde edilmesinde daha güvenilir ve yüksek verimli bir hale gelmiştir. VLC, 380-700 nm dalga boyu aralıklarında yaklaşık 430-790 THz sınırlı frekans aralıklarını kullanmaktadır (Şekil 3.9). Bu frekans aralığının avantajı, elektrik devresini etkilemeden insan gözüyle uyumlu olmasıdır [108, 109].



Şekil 3.9. VLC frekans spektrumu

LED'lerin yanıp sönme hızındaki son gelişmelerle birlikte VLC, esas olarak iç mekan uygulamalarına uygun, yüksek iletim kapasiteli bir kablosuz iletişim sistemi olarak ortaya çıkmaktadır. Spektrum aralığı olarak mevcut RF spektrumu ile etkileşimi olmayan muazzam bir bant genişliğidir. LED'ler ve PD'ler, tipik bir VLC sisteminde verici ve alıcı olarak kullanılmaktadır. Bölgesel uygulama alanlarında hazır uygulamalar bulması nedeniyle VLC alıcı-vericisi için LOS önemli bir gereklilik olmaktadır. Benzer şekilde, VLC teknolojisi, Wi-Fi sinyallerinin belirli bir derinlikten sonra normalde zayıfladığı su altı haberleşmesi için de kullanılabilmektedir [110].

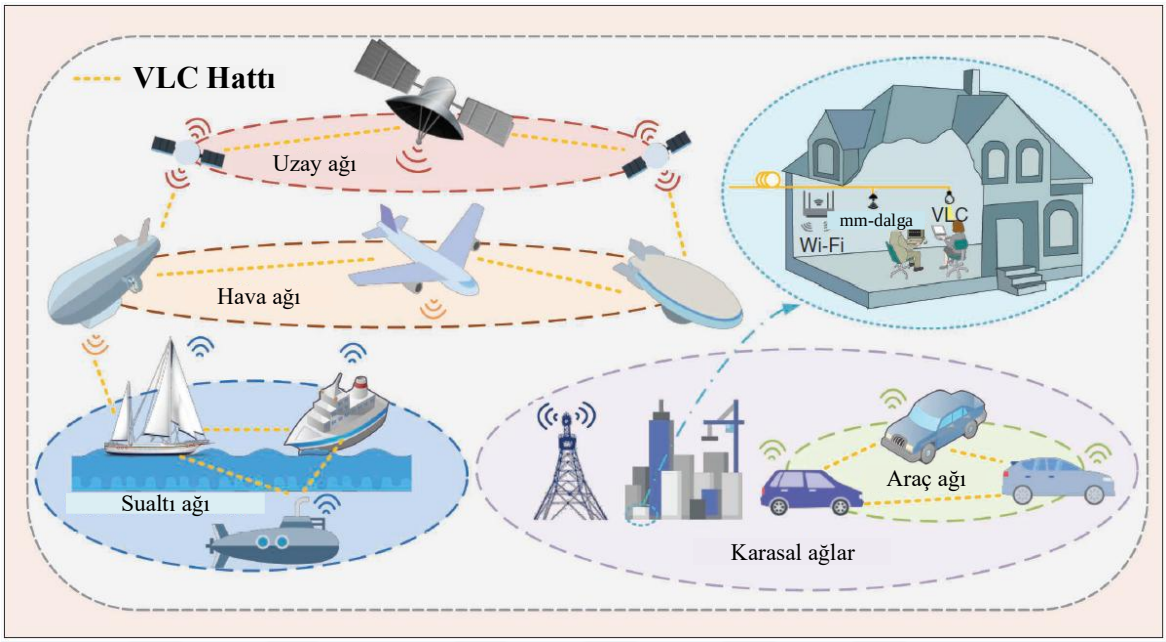
Görünür ışık yoluyla yüksek hızlı ve güvenli iletişimde araştırma ve geliştirme, Görünür Işık İletişim Konsorsiyumu (VLCC) tarafından tartışılmaktadır. Standardizasyon çalışmaları ise,

Japonya Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Endüstrileri Birliği (JEITA) CP-1221, JEITA CP-1222 ve JEITA CP-1223'ün spesifikasyonları aracılığıyla yapılmaktadır. JEITA, girişimi önlemek amacıyla alt taşıyıcı modülasyon tekniğini kullanmaktadır [61, 111, 112].

LED tabanlı iç mekan VLC, geleneksel akkor ve floresan aydınlatmaya kıyasla enerji verimliliği ve daha düşük işletme maliyeti gibi doğuştan gelen fiziksel özellikleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. VLC üzerine yapılan mevcut araştırmalar temel olarak karartma (dimleme) desteği, kırpışma azaltma ve gelişmiş modülasyon şekilleri gibi fiziksel (PHY) katman tekniklerine odaklanmaktadır. Bu çabalar mümkün olan en yüksek veri hızlarına ulaşmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, herhangi bir pratik ağ dağıtımında birlikte çalışabilirliği sağlamak için daha üst düzey ağ oluşturma zorlukları ele alınması gerekmektedir [41].

Fiber optik ve VLC sistemleri optik ara bağlantı, iç mekan interneti, eve kadar fiber (Fiber-to-the-Home-FTTH) ve akıllı evler gibi çok çeşitli uygulamalarda birlikte kullanılmaktadır. Bunun yanında OFDM, yüksek spektral verimliliği, yüksek veri hızları, yüksek hizmet kalitesi ve dar bant girişimlerine (Narrow band interference-NBI) karşı dayanıklı olması nedeniyle entegre VLC sistemlerinde yoğun bir uygulama alanı bulmaktadır [113].

Diğer taraftan VLC, RF bant genişliğinden çok daha yüksek olan 380-700 THz frekans aralığında ultra yüksek bant genişliklerini kullandığından dolayı 6G'deki kullanım senaryoları için uygun bir teknik oluşturmaktadır (Şekil 3.10). Gelecekteki 6G ağlarında optik fiber benzeri performans sağlamak için olası bir tamamlayıcı teknoloji, kısa menzilli bağlantılar (birkaç metreye kadar) için VLC Teknolojileri ile görünür spektrumun kullanımına dayanır. Klasik olarak benimsenen RF bantlarıyla karşılaştırıldığında, VLC ultra yüksek bant genişliği (terahertz), sıfır elektromanyetik girişim, serbest bol lisanssız spektrum ve çok yüksek frekanslı yeniden kullanım sunmaktadır. VLC, önümüzdeki 10 yılda VLC ve 5G teknolojileri arasındaki mevcut performans farkını kapatmak için zaten saniyede gigabit hız deneyimi sağlayan büyük bir potansiyele sahiptir [114-116].



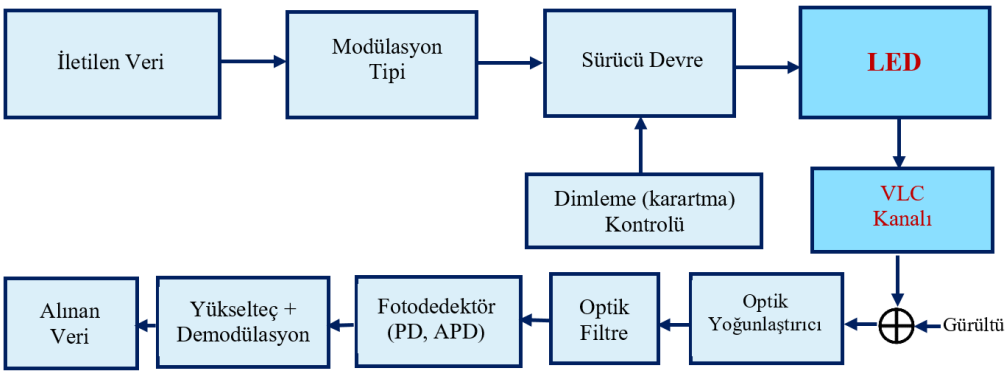
Şekil 3.10. Farklı ağ altyapılarında VLC kullanımı [114]

VLC için potansiyel veri hızları, son zamanlarda yaklaşık 10 Gb/s aralığında bulunmuştur. Bununla birlikte, LED'in bant genişliği ve optik verimlilik arasında yapısal bir dezavantajı vardır. Bu nedenle, Lazer Diyotlar (LD), VLC'nin güvenilir bir ikamesi olabilmektedir. Yapılan araştırmalar, aydınlatma kısıtlamaları ile kullanıma hazır LD'lerin iletişim yeteneklerini vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, optik kablosuz veri hızının 100 Gb/s'yi aşabileceğini ve ortalama iç mekân parlaklık seviyesinde elde edilebileceğini göstermiştir [117].

VLC temelleri ve sistem yapısı

Bir VLC sistemi, LED veya LD gibi ışık yayan bir cihaz tarafından modüle edilen ışık sinyali ile çalışır. İletilen veri elektriksel sinyal üzerinde modüle edilerek iletim aşamasında optik sinyale dönüştürülür. Modüle edilmiş olan ışık serbest uzay üzerinde yayılmaktadır ve sonuçta iletilen veriler, farklı fotodedektörler kullanılarak alıcıda elde edilmektedir. LED'ler gibi yarı iletken cihazlardan oluşan verici kısım, akımı sürmek için sürücü devrelerine bağlanır ve bu yoğunluk modülasyonlu sinyal, PIN fotodiyot veya çığ fotodiyot (APD) tarafından doğrudan alıcıda algılanır. Alıcı tarafında fotodedektör optik sinyalin yoğunluk değişimine bağlı olacak şekilde bir elektriksel sinyal üretir. Dolayısıyla VLC sinyali fotodiyot tarafından ışık yoğunluğunun değişimine bağlı olarak çözümlenir. Şekil 3.11, LED

aracılığıyla veri sinyallerini iletmek için kullanılan bir VLC iletim sisteminin temel diyagramını göstermektedir [118, 119].



Şekil 3.11. VLC iletim sistemi [92]

VLC, iletim ortamı olarak hava kullanarak veri iletimi için görünür ışık kaynaklarının kullanılmasını sağlayan optik bağlantılar oluşturmaktadır. İç mekân uygulamaları için çözüm, aydınlatma için kullanılan enerjiyle aynı enerjiyi kullanarak verileri iletmek için mevcut aydınlatma cihazlarının kullanılmasıdır. Optik iletişim sistemleri için yaygın olarak kullanılan kaynaklar LED'ler ve lazer diyotlardır. Hem LED'ler hem de LD'ler, ışığı yaymak için yarı iletken malzemenin elektronik olarak uyarılma yeteneğini kullanmaktadır [95].

Yayılan kanallardaki yol farklılıkları nedeniyle alınan sinyal Sinyaller Arası Girişim (ISI)'den etkilenmektedir. Optik alıcı, alınan ışığı bir elektrik sinyaline dönüştürür. Mevcut VLC alıcıları PD'ler, APD'ler veya görüntü sensörlerinden oluşur. Akıllı telefon, fotoğraf makinesi ve dizüstü bilgisayar gibi modern elektronik cihazlar, VLC alıcısı olarak tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS) tabanlı görüntü sensörleri kullanmaktadır. Ayrıca, tipik VLC alıcısı bir yükselteç, bir optik filtre, bir yoğunlaştırıcı ve farklı tipte silikon fotodiyotlardan oluşmaktadır [118].

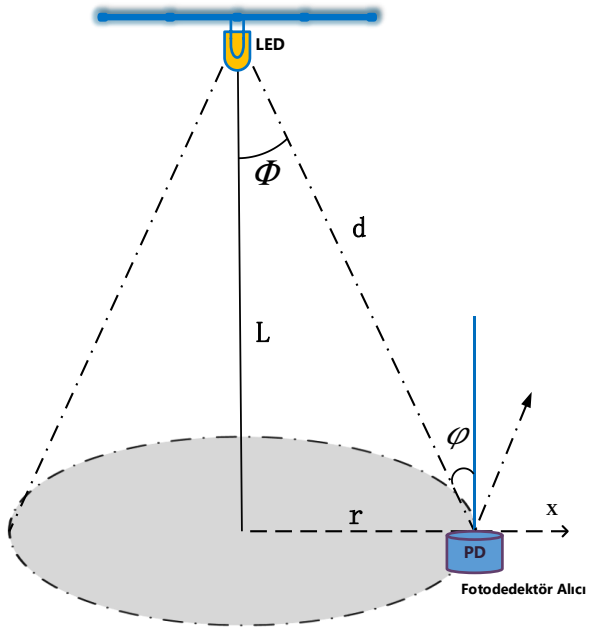
VLC kanal yapısı

LED'lerin çok hızlı gelişmesiyle birlikte VLC, geleneksel aydınlatmayı kablosuz iletişim ve ağ oluşturma yoluyla entegre etmenin yaratıcı bir yolu olarak ortaya çıkmıştır. Veri iletimi için VLC, LED'lerin yoğunluğunu insan gözünün algılama süresinden daha hızlı modüle

etmektedir. VLC modeli, yüksek bant genişliği, esnek kapsama alanı, sağlamlık, düşük maliyet ve frekans düzenlemesi olmaması gibi avantajlara sahiptir [120].

Sinyaller için veri iletim hızları yaklaşık 10 kb/s ve 500 Mb/s'ye kadar olan LED'ler, görüntü ve video gibi çeşitli verileri iletebilmektedir. LED'ler, yüksek anahtarlama hızı özellikleri nedeniyle VLC sistemi için uygun optik ışıklardır. LED'ler, yanıp sönen ışığı insan gözünün algılayamayacağı yüksek bir hızla çalıştırarak veri aktarabilir; bununla birlikte, LED üzerinde yüksek tepe noktalarına sahip çeşitli sinyallerin kırpılmadan belirtilmesi, kısıtlı LED dinamiği ile ilgili zorluklara neden olabilmektedir. Li-Fi teknolojisi, Wi-Fi gibi radyo frekansı ile karşılaştırıldığında, veri aktarım hızı, güvenlik, bilgisayar korsanları ve daha az sağlıklı olma gibi zayıflıkların üstesinden gelebilir. Li-Fi, Wi-Fi'nin daha hızlı, daha ucuz ve daha güvenli olacak optik bir versiyonu olarak tanımlanabilir. Li-Fi teknolojisi başarılı bir şekilde uygulanabilirse, kablosuz veri iletiminde bir devrim yaratacağı kesindir. [21, 121].

Şekil 3.12'de, verici olarak bir LED ve alıcı olarak bir PD kullanılan VLC kanal yapısı görülmektedir. Bu kanal yapısında yayılan ışın hava üzerinden LOS olacak şekilde iletilmektedir [91]. Φ ışıma açısını, φ yansıma (geliş) açısını ve d ise LED-PD arasındaki iletim mesafesini göstermektedir.



Şekil 3.12. VLC kanal yapısı

Lambertian yayınımı genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$R(\phi)=\begin{cases} \frac{m+1}{2\pi}\cos^m\phi\ , & \phi\in\left[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}\right] \\ 0 & , \quad diğer \end{cases} \tag{3.1}$$

m verici (transmitter) yarım açısı ile bağlantılı olarak, Lambert derecesidir:

$$m=\frac{-\log 2}{\log\left[\cos\left(Verici_{yarım_{açısı}}\right)\right]} \tag{3.2}$$

Alıcı tarafında etki alanı (incidence) W/cm^2 olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$I_s(d,\phi)=\frac{P_t R_o(\phi)}{d^2} \tag{3.3}$$

Alıcı tarafındaki sinyal şiddeti ise:

$$P=I_s(d,\phi)A_{eff}(\varphi) \tag{3.4}$$

A_{eff} alıcı için etkin sinyal toplama alanıdır ve sırasıyla alan aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$A_{eff}(\varphi)=\begin{cases} A_{det}T_s G(\varphi)\cos(\varphi) & 0\le\varphi\le\varphi_c \\ 0 & \varphi>\varphi_c \end{cases} \tag{3.5}$$

Eşitlikte A_{det} dedektör alanı, φ_c, $G(\varphi)$ ve T_s sırasıyla görüş alanı (FOV), lens kazancı ve alıcı taraftaki filtre transmisyon kazancıdır. Lens kazancı aşağıdaki şekildedir:

$$G(\varphi)=\begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2\varphi_c} & 0\le\varphi\le\varphi_c \\ 0 & \varphi>\varphi_c \end{cases} \tag{3.6}$$

Elektriksel SNR aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$SNR=\frac{R^2P_r^2}{\sigma_{shot}^2\sigma_{thermal}^2} \tag{3.7}$$

Eşitlikte R alıcının duyarlılığını (responsivity) ve $\sigma_{shot,}^2$ $\sigma_{thermal}^2$ ise aşağıdaki şekilde gürültüleri temsil etmektedir:

$$\sigma_{shot}^2 = 2q_r P_r B + 2q_r I_2 I_B B \tag{3.8}$$

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G}\eta A_e I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_k \Gamma}{g_m}\eta A_e^2 I_3 B^3 \tag{3.9}$$

Yukarıdaki formüllerde; I_B fotoakımı, I_2 ve I_3 gürültü bant genişliği faktörü, B alıcının gürültü bant genişliği, k Boltzmann sabiti, T_k mutlak sıcaklık, G açık-devre gerilim kazancı, Γ kanal gürültü faktörü ve g_m ise transkondüktans değerini temsil etmektedir [121].

OFDM ve VLC'de kullanılan diğer modülasyon teknikleri

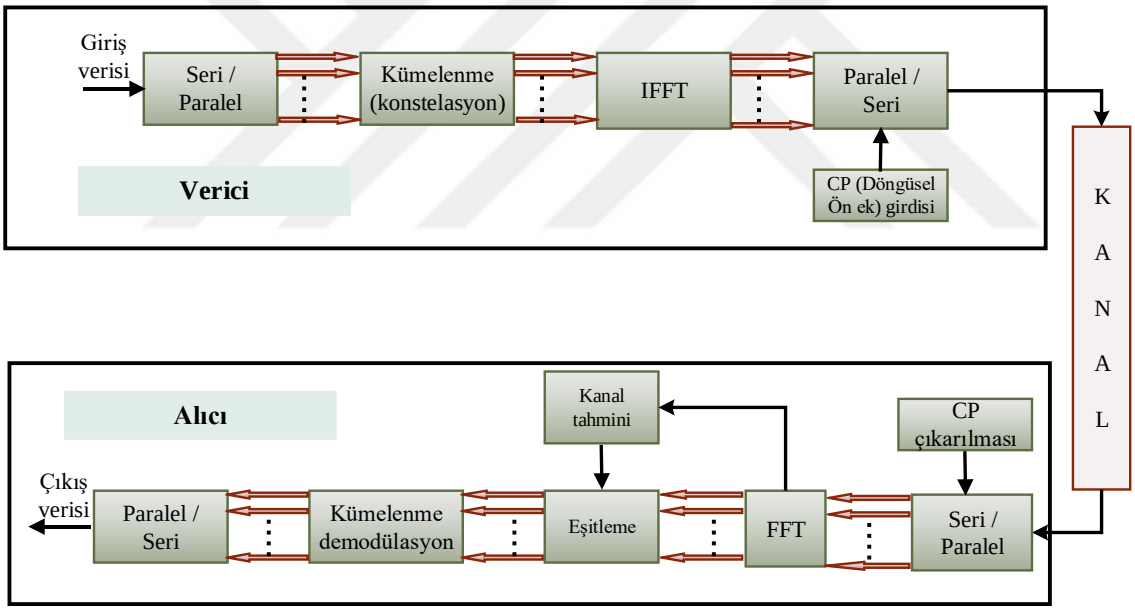
İç mekan uygulamaları için Yoğunluk Modülasyonu/Doğrudan Algılama (IM/DD) basit ve düşük maliyetli modülasyon ve demodülasyon elde etmek için genellikle pratik bir iletim şeması olarak kullanılmaktadır. Bu, yalnızca sinyal yoğunluğunun modüle edildiği ve faz bilgisinin olmadığı anlamına gelmektedir [122].

Yüksek veri hızları, yüksek spektral verimliliği, yüksek kaliteli hizmeti ve dar bant girişimine karşı sağlamlığı nedeniyle VLC sistemlerinde OFDM artan seviyede bir uygulamasının olduğu kanıtlanmış durumdadır [123]. OFDM'in iki temel avantajı; kanal dispersiyonuna karşı kararlılığı ve zamanla değişen bir ortamda faz ve kanal değerlendirme kolaylığıdır. OFDM'in yüksek PAPR ve frekans ve faz gürültüsüne duyarlılık gibi içsel dezavantajları bulunmaktadır [124].

Alt taşıyıcıların yakınlığından kaynaklı olarak spektral olarak da verimli bir modülasyon tekniği olan OFDM, fazla sayıda taşıyıcı üzerinde eş zamanlı olarak iletim yaparak büyük bir çıktı elde etmek için en uygun modülasyon tekniğidir. Uygulanması basit sayılabilecek ve verimli olmasının yanında, çok yollu gecikme sonucu oluşan ISI etkisi ve Doppler kayması ve zamanlama hatalarıyla oluşan ICI etkisini önleyen güçlü bir sistem oluşturmak için uygun bir yayılma ortamında OFDM parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Sinyal sönümlenmesini azaltmak için gelişmiş OFDM modülasyon şemaları kullanılmaktadır. Temel olarak OFDM, bir M-noktalı farklı Fourier dönüşümü, alt taşıyıcı

eşlemesi, seriden paralele dönüştürme ve her OFDM sembolünden önce döngüsel bir önek ve filtre eklenmesini içermektedir [125, 126].

OFDM'in temel konsepti, yüksek hızlı bir veri akışının birden çok daha az veri hızı akışına bölünmesi ve ardından bir dizi dikgen alt taşıyıcı aracılığıyla aynı anda iletiminin sağlanmasıdır (Şekil 3.13). Sonuç olarak, optik fiberler gibi dispersif kanallardan kaynaklanan zaman içindeki dispersiyon miktarını azaltmaya yardımcı olmaktadır. OFDM tabanlı tasarım, her bir OFDM sembolüne periyodik olarak uzatılmış bir koruma süresi dahil etme konusunda doğal bir yeteneğe sahiptir. OFDM sembolü, ICI'yı önlemek ve ortadan kaldırmak için koruma süresi boyunca periyodik bir uzantıya sahiptir. Bununla birlikte, bir OFDM sinyali, QAM veya PSK kullanılarak modüle edilen alt taşıyıcıların toplamından oluşmaktadır [127].



Şekil 3.13. OFDM blok diyagramı [95]

Optik OFDM VLC sistemi için Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM (Asymmetrically Clipped Optical-ACO-OFDM), Doğru Akım Eğilimli Optik OFDM (Direct Current biased Optical-DCO-OFDM) ve Asimetrik Kırpılmış Doğru Akım Eğilimli Optik OFDM (Asymmetrically clipped Direct current biased Optical -ADO-OFDM) gibi çeşitli şemalar önerilmiştir [128].

OOK, Çoklu faz kaydırmalı OOK (MP-OOK), darbe konum modülasyonu (PPM), pasif intermodülasyon (PIM), sayısal darbe aralığı modülasyonu (DPIM) vb. gibi VLC sistemleri için kullanılan çeşitli modülasyon şemaları bulunmaktadır [110].

VLC'de modülasyon türleri, iletişim için ışığın yoğunluğunu kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır ve aydınlatma üzerinde bir etkiye sahiptir. Demodülasyon, alıcıdaki ışık sinyalinin doğrudan algılanmasına bağlı olmaktadır. Işık yoğunluğu farklı LED sürücü devreleri kullanılarak da kontrol edilebilmektedir. OOK, PPM ve m-darbe genlik modülasyonu (PAM), VLC için çok kullanışlı tek taşıyıcılı modülasyon türleridir. Bununla birlikte, LED'ten kaynaklanan doğrusal olmayan sinyal bozulması ve dağınık optik kablosuz kanallardaki frekans kaymasının neden olduğu ISI gibi istenmeyen etkilerden etkilenmektedirler. Bu etkilerin üstesinden gelmek ve yüksek hızlı VLC ağını kolaylaştırmak için çok taşıyıcılı modülasyon (Multi-carrier modulation-MCM) şemaları yaygın olarak kullanılmaktadır [118].

VLC uygulama alanları

IoT uygulamaları, insan etkileşimi ve otomatik endüstriyel makineler için kusursuz yüksek hızlı internet hizmeti gerekmektedir. Büyük veri için büyük depolama alanı, yüksek hızlı bağlantı, güvenlik, makineler ve sunucu arasında kesintisiz bağlantı gibi farklı uygulamaların farklı gereksinimleri vardır. Tüm bu gereksinimler göz önüne alındığında VLC, gelecekteki her türlü uygulama için RF iletişiminden daha iyi bir çözüm sağlayabilecektir. VLC'nin olası uygulamalarından bazıları aşağıda verilmiştir:

Akıllı Ulaşım Sistemleri (ITS): Aydınlatma altyapısı, bina lambaları, sokak lambaları ve otomotiv lambaları için LED'leri benimsemeye başlamıştır. VLC artık araçtan araca ve araçtan merkez ofise iletişim için düşünülmektedir. VLC'yi dış ortamlarda ITS uygulamaları için uygun hale getirmek amacıyla ortam ışığı, sis, yağmur ve duman gibi bazı diğer faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir.

İç mekan konumlandırma (Indoor positioning): Küresel konumlandırma sistemi (GPS) teknolojisi kapalı ortamlarda düzgün çalışmamakla birlikte, tüneller, kömür madenleri, süpermarketler, sergi salonları ve hastaneler gibi kapalı alanlarda iç mekan konumlandırma sistemi çok önemlidir. VLC, iç mekan konum belirleme ve navigasyon sistemleri için

kullanılabilir. VLC tabanlı konumlandırma sistemleri, çok yollu transmisyona karşı daha az tepki verir ve konum doğruluğu, RF tabanlı iç mekan konumlandırma sistemlerinden çok daha iyidir.

Akıllı aydınlatma (Intelligent lighting): Otomatik aydınlatma sistemleri, aydınlatmayı kullanıcıların ihtiyaçlarına göre kontrol edebilmektedir. LED'lerin anahtarlama özelliği, düşük enerji tüketimi ve renk kontrol yeteneği nedeniyle LED tabanlı VLC sistemleri akıllı aydınlatma için kullanılabilir. Dünya genelinde, aydınlatma endüstrilerinin çoğu, akıllı aydınlatma hizmetleri üretmekle ilgilenmektedir. Ulaşım ağlarının ve IoT'nin VLC kullanılarak birbirine bağlanacağı beklentisi bulunmaktadır [118].

Sualtı VLC (UVLC): 450nm~550nm bandındaki mavi ve yeşil ışığın deniz suyuyla zayıflamasının diğer ışık bantlarından çok daha az olduğunu 1963'te bulunmuştur. Bu nedenle, bu fiziksel olgunun keşfi, UVLC'nin gelişimi için teorik bir temel oluşturmuştur. Sualtı akustik haberleşme ve RF haberleşmesi ile karşılaştırıldığında, UVLC, düşük maliyet, yüksek iletim hızı, güçlü girişim önleme yeteneği ve iyi gizlilik avantajlarına sahiptir. Bilimsel araştırmacılar tarafından yürütülen sürekli çabalar sayesinde, UVLC'nin daha yüksek bir iletim hızı ve daha fazla iletim mesafesi elde edebileceği bulunmuştur. Ancak, son derece sert su altı ortamı ve su parçacıklarının görünür ışığı perdelemesi nedeniyle, su sıcaklığındaki değişiklik ve su altı kabarcıkları, VLC kanalının durumunu ciddi şekilde etkileyebilen etkiler olmaktadır [107].

Yeni nesil 5G ötesi kablosuz şebeke sistemine doğru UVLC, coğrafi haritalama, su altı navigasyonu, deniz operasyonları, noktalar arasında veri alma ve yüksek kaliteli su altı sensör ağı gibi çok sayıda denizaltı uygulaması için geçerli olacaktır [109].

Diğer uygulama alanları: VLC sistemi hastaneler, madenler ve petrokimya tesisleri ile ilgili uygulamalarda kullanılabilir. Tıbbi ekipmanın çoğu, radyo frekansı girişiminden (RFI) izolasyon gerektirmektedir ve VLC, tıbbi ekipman ve personel arasında iletişim sağlamak için uygun bir haberleşme tekniğidir. Dahili bir iletişim ağı, endüstriyel aydınlatma ve ateşli malzemelerin bulunduğu alanlarda güvenli iletişim sağlayabilmektedir [118].

3.2.3. OCC haberleşme sistemi

VLC, sonradan modüle edilen ve alıcıya kısa bir mesafe üzerinden iletilen sayısal verileri kodlamak için ışığın çeşitli özelliklerini kullanmaktadır. Böylece VLC teknolojisi, herhangi bir LED ışık kaynağını bir veri aktarım cihazına dönüştürerek doğrudan iletişimi kolaylaştırabilmektedir. Fotodiyotlar, ucuz ve düşük karmaşıklığa sahip olduğundan caziptir, ancak bunların uyum sağlaması amacıyla özel sensörler bulundurmak için mevcut cihazların değiştirilmesi gerekecektir. Öte yandan, OCC'de, mevcut kamera tabanlı alıcılar, renk, yanıp sönme frekansı, yoğunluk ve polarite gibi ışığın özelliklerini kullanarak kodlanmış verileri elde etmek amacıyla kullanılmaktadır [129, 130].

Bir OCC sisteminde, kullanılan modülasyon tipine bağlı olarak veri iletmek amacıyla kullanılan bir ışık kaynağı (LED) bulunmaktadır. Kamera tipi sensörler ayrıca tekil çerçeve işleme için veri almak amacıyla kullanılmaktadır. LED ışıktan gelen verileri içeren çerçeveler, işleme algoritmasına göre yakalanarak işlenmektedir. Ancak bu işlenen veri aynı zamanda akıllı telefonun foto dirençlerinin bulunduğu ön alanından gelen bilgilerle de desteklenmektedir. Girişim ve parazit faktörlerinden kaçınmak amacıyla, her kare yalnızca kısa bir süre ışığa maruz kalır ve çoğu durumda doygunluğa ulaşan ve çok daha yavaş tepki süresine sahip olan foto reseptörde olduğu gibi kamera deklanşörü kontrolü gerçekleştirir.

OCC, düşük aktarım hızları, iç mekân simülasyonları, düşük hareketlilik ve küçük tarama alanları ile uygulamaların kullanılmasını gerektiren kameraların donanım sınırlamalarından kaynaklanan çok yoğun hat bağlantılarını desteklememektedir [129].

OCC, kameranın özelliklerini, cep telefonlarının işlem kapasitesini ve ışığın renkliliğini kullanarak kullanıma hazır bir Li-Fi sistemi elde etmeye yönelik olası bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu tür sistemler cep telefonlarına entegre edilmiş mevcut kameraları kullandığından, fotodiyot gibi ek özel donanıma ihtiyaç duymamaktadır. Bu sistemler araçtan araca iletişim, bina içi konumlandırma, bina içi konumlandırma, bina içi navigasyon ve artırılmış gerçeklikte (AR) kullanılabilmektedir [130].

Bu bölümde ele alınan kablosuz optik haberleşme yöntemlerinin karşılaştırması aşağıdaki Çizelge 3.3'te verilmiştir [60, 96, 109]:

Çizelge 3.3. Optik kablosuz haberleşme yöntemleri

OWC Teknolojisi	Serbest Uzay Optik (FSO) Haberleşmesi	Görünür Işık Haberleşmesi (VLC)	Optik Kamera Haberleşmesi (OCC)	Işık Doğruluğu (Li-Fi)
Spektrum Tipi	Görünür, Yakın-Kızılötesi ve Ultraviole Işık	Görünür Işık	Görünür ve Kızılötesi Işık	Görünür, Kızılötesi ve Ultraviole Işık
Gönderici Tipi	LD	LED veya LD	LED veya LD	LED veya LD
Alıcı Tipi	Fotodedektör (PD)	PD veya Kamera	Görüntü sensörü veya Kamera	PD
Kapsama / Veri Hızı	>10 km / 40 Gb/s	30 m / 10 Gb/s (LED) 100 Gb/s (LD)	200 m / 55 Mb/s	10 m / 10 Gb/s (LED) 100 Gb/s (LD)
Girişim Seviyesi	Düşük	Düşük	Sıfır	Düşük
Özellikleri& Avantajları	* Çift yönlü/Tek yönlü iletişim * Çok yüksek veri hızı * Yüksek yol kaybı * Yüksek güvenlik * Çok uzun menzilli iletişim * Performans yağmurdan önemli ölçüde etkilenmez	* Çift yönlü/Tek yönlü iletişim * Çok yüksek veri hızı * Orta yol kaybı * Yüksek güvenlik * Çok geniş kullanılabilir spektrum * Geniş uygulama yelpazesi * Aydınlatma ve iletişimin eş zamanlı kullanımı	* Tek yönlü iletişim * Girişimsiz iletişim * Düşük yol kaybı * Yüksek güvenlik * Aydınlatma ve iletişimin eş zamanlı kullanımı * Dış mekan koşullarında iyi performans	* Çift yönlü iletişim * Çok yüksek veri hızı * Düşük yol kaybı * Yüksek güvenlik * Noktadan çok noktaya iletişim * Düşük mobilite desteği * Aydınlatma ve iletişimin eş zamanlı kullanımı * Çok geniş kullanılabilir spektrum * Geniş uygulama yelpazesi
Kısıtlamalar	* İletilen-alıcı hizalaması önemli * Performans, sis, kar ve tozdan önemli ölçüde etkilenir * Yalnızca LOS iletişimleri için uygun	* Performans çevre koşullarından etkilenir * Mobilite desteği garanti edilmez * Küçük kapsama alanı * Kapsama alanı boşluğu oluşturabilir * Açık hava uygulamalarında zayıf performans * Çok sınırlı NLOS iletişimleri için uygun	* Sadece düşük veri hızlı uygulamalar * Uzun menzilli iletişimler için değil * Sadece LOS iletişimleri için uygun	* Açık hava uygulamalarında zayıf performans * Küçük kapsama alanı * Kapsama alanı boşluğu yaratabilir * Performans çevre koşullarından etkilenir * Çok sınırlı NLOS iletişimi için uygun
Uygulama Alanları	* Çipler arası bağlantı * Sualtı İletişimi	* Sualtı iletişimi * Havacılık * Hastaneler * İç mekan konum belirleme	* Akıllı Ulaşım Sistemleri (ITS)	* Bulutla bağlantılı akıllı altyapı

3.3. RoF ve THz Sistemler

Ağ trafiğine yönelik artan talep, kablosuz iletişim ağını daha yüksek bir frekansa ve daha geniş bir spektruma itmektedir. Milimetre dalga (mm-wave) 5G mobil iletişim ağında yaygın olarak kullanılırken, 5G ötesi ve 6G'de daha kısa dalga boylarının kullanılması beklenmektedir [131].

Diğer taraftan, akıllı şehir kavramı ile insanlar her an ve her yerde ultra yüksek hızlı veri aktarımı ile yüksek kalitede ve yüz yüze görüşmeye gerek duymadan bağlantı kurma ayrıcalığına sahip olmuşlardır. Bu nedenle, birçok kişinin aynı anda örneğin akıllı telefon, akıllı saat, tablet, bilgisayar gibi birden fazla kablosuz cihaz taşıdığı düşünüldüğünde, mikrodalga sistemine alternatif ve tamamlayıcı bir sistem geliştirmek gereklilik haline gelmektedir [123].

Fiber üzerinden radyo (RoF)

RoF kavramı, televizyon kanallarının dağıtımı için hızlı bir şekilde popülerlik kazanan mikrodalga/ RF alt taşıyıcı çoğullamanın (SCM) tanıtılmasının ardından 1980'lerde ortaya çıkmıştır. RF frekanslarındaki düşük zayıflama, düşük maliyet ve kurulum kolaylığı gibi avantajlar, RF sinyallerinin dağıtımında fiberi, koaksiyel kablolara göre tercih edilen seçenek haline getirmektedir. RoF iletiminin temel prensibi, analog radyo sinyallerinin bir fiber optik bağlantı yoluyla iletilmesidir. Analog RoF, neredeyse otuz yıldır mobil iletişim için mevcut ticari ürünlerde kullanılmakla birlikte, neredeyse kırk yıldır bir araştırma konusu olmuştur [132].

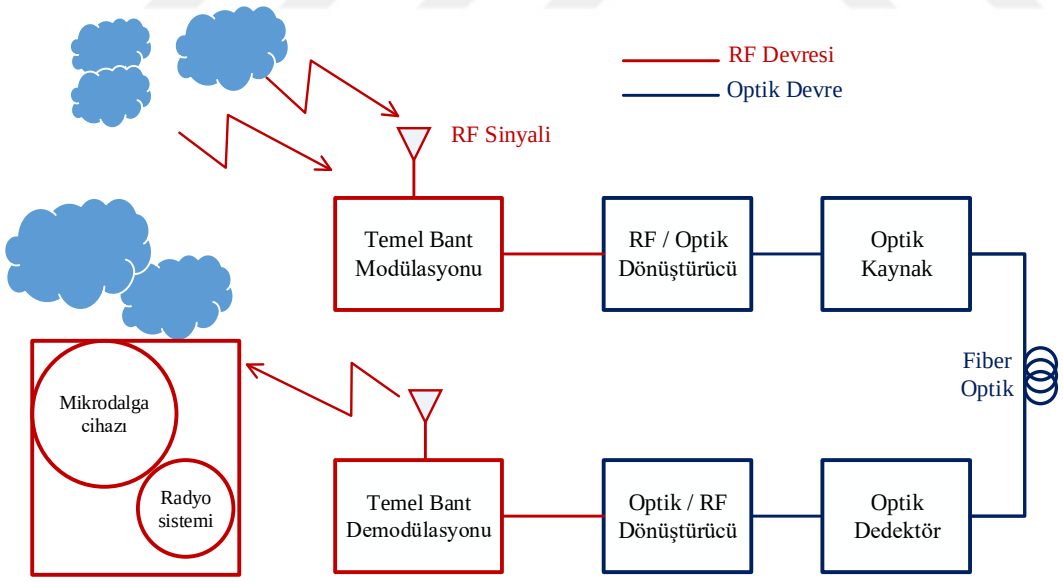
RoF, RF kablosuz sinyallerinin taşınması ve dağıtımının optik ağlar aracılığıyla sağlandığı hibrit bir şebekedir. Bu teknoloji, özellikle yüksek frekansların kullanılması nedeniyle RF iletim mesafesinin kısaldığı 5G iletişimi gibi geleceğin kablosuz ağlarında daha fazla ilgi görmektedir. Hibrit RoF ağı, fiber kullanımı sayesinde RF iletim mesafelerini uzatarak mesafe erişimi sorununu çözebilecektir [64].

RoF, farklı kablosuz erişim ağlarından gelen çoklu RF sinyallerini birbirine bağlayan evrensel bir platform olarak öne çıkmaktadır. RoF sistemi, RF sinyallerini optik taşıyıcılara yerleştirerek, radyo formatlarını değiştirmeden optik fiberler aracılığıyla iletmektedir.

Yüksek veri hızlarından, düşük kayıptan ve sıfır girişim özelliğinden yararlanır, ancak kırsal alanlar gibi yerlerde bulunması zor sayılabilecek fiber optik dağıtımına dayanmaktadır [133].

Fiber üzerinden Radyo bağlantılarının avantajları; elektromanyetik girişime karşı sağlamlıkları, minimum sinyal zayıflaması ile uzun iletim bağlantısı ve RF sinyalleri için basitleştirilmiş uzak erişim noktaları olmasıdır. RoF sistemindeki küçük dağıtım hücresi yapısı, yüksek enerjiye ihtiyaç duyan büyük baz istasyonlarına gerek olmadan sinyal dağıtımı açısından daha fazla esnekliğe sahip bir hücresel sisteme izin vermektedir. RoF sistemi, çok az kurulum uzmanlığı gerektirdiğinden kırsal alanda dağıtım hızını da kolaylaştırmaktadır [134].

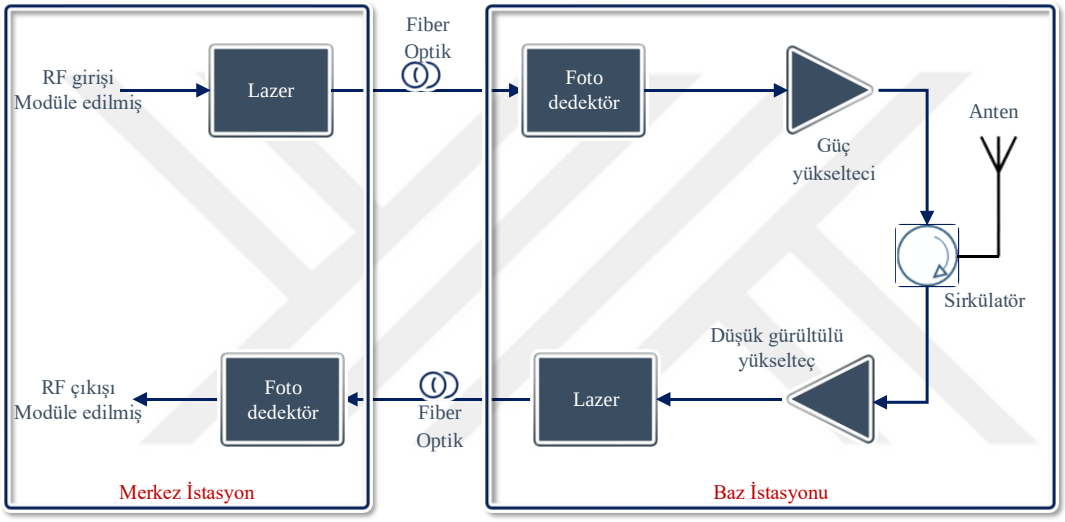
RoF, RF sinyallerinin merkezi bir konumdan uzaktaki anten birimlerine dağıtıldığı fiber optik ağlarla kablosuz bir kombinasyondur. Bununla birlikte, RoF teknolojisi erişim ağındaki kapasiteyi ve mobiliteyi artırmak ve maliyetleri azaltmak için olası bir çözümü temsil eden optik ağların ve mikrodalganın entegrasyonudur (Şekil 3.14) [127].



Şekil 3.14. RoF teknolojisi temel diyagramı

RoF sistemleri, Şekil 3.15'te gösterildiği gibi, verici olarak bir merkezi istasyon, optik fiber ağ ve alıcı olarak bir baz istasyonu olmak her biri farklı işlevleri yerine getiren üç ana alt sisteme ayrılabilir. Sinyal üretimi ve modülasyon teknikleri merkezi istasyonda (CS) kontrol edilirken, baz istasyonu (BS) fiber optik ağdan gelen sinyali algılamaktadır. CS vericisi esas

olarak veri kaynağı ve lazerden oluşurken BS alıcısı fotodiyottan oluşmaktadır. Elektrik sinyali, CS'de optik sinyale dönüşür ve BS'lerle iletişim kurmak için fiber optiği kullanır. Fiber optik ağ, optik sinyalin yükseltildiği ve çoğullama çözme tekniği kullanılarak BS'lere dağıtıldığı uzak düğümlerini kullanmaktadır. BS, optik sinyali tekrar elektriksel alana dönüştüren ve son kullanıcıya veren, uzak anten olarak bilinen küçük anten ünitesinden oluşmaktadır. Benzer şekilde, BS son kullanıcılardan radyo sinyallerini alır, bunları optik alana dönüştürür ve bilgileri fiber optik ağ aracılığıyla CS'ye iletir. Böylece, RoF sistemi, RF sinyal işlemeyi merkezileştirmek için tek bir paylaşımlı konum sağlamaktadır [135].



Şekil 3.15. Tipik bir RoF sistemi yapısı

RoF sistemi, gelecekteki kablosuz veri ağlarını dağıtmak amacıyla kullanılacak mikro hücre ve piko hücre uygulamaları için umut verici bir tekniktir. Sunduğu önemli avantajlar nedeniyle omurga teknolojisi olarak fiber optik kullanmaktadır ve bu nedenle de mikrodalga ve optik ağların entegrasyonunu temsil etmektedir. Ancak, RoF sistemlerinin performansı, kanalın doğrusal olmayan etkileri nedeniyle ciddi şekilde bozulabilmektedir. Ek olarak, RoF sistemleriyle dağıtım aşamasında geniş bant kablosuz ağlardaki genel sistem performansını iyileştirmek amacıyla, OFDM bir standart olarak önerilmektedir [127].

RoF sistemlerinde, ışık taşıyıcı sinyali, bir optik fiber üzerinden iletim için yüksek frekanslı RF sinyali tarafından modüle edilmektedir [136]. Işık kaynaklarının modülasyonu dahili veya harici olarak yapılabilmektedir. Dahili modülasyon, düşük ve orta veri hızları için kullanılırken, harici bir Mach-Zehnder Modülatörü (MZM) veya Elektro Absorpsiyon

Tabanlı Modülatörler (EAM) kullanan harici modülasyon, orta ve yüksek veri hızları için tasarlanmıştır.

RoF teknolojisi, RF sinyalinden bağımsız olan daha düşük yayılma kaybı (yani fiber), geniş bir bant genişliği, RF kaynaklı girişime karşı bağışıklık, düşük karmaşıklık ve düşük güç tüketimi gibi bir dizi avantaj sunmaktadır. Bu nedenle, yüksek kaliteli video dağıtımları ve mobil geniş bant hizmetleri için baz istasyonundan baz istasyonuna, baz istasyonundan mobil anahtarlama merkezine, merkezi hub'lardan ev/ofislere gibi uygulamalar için uygundur [137].

Bir RoF sisteminde temel bant işlemleri ekipmanın paylaşılmasına ve dinamik kaynak tahsisine olanak tanıyan bir merkez ofise (CO) taşınır ve bu da önemli bir dağıtım maliyeti düşüşü sağlamaktadır. CO ve uzak radyo birimlerini (RRU'lar) birbirine bağlayan ön hat bağlantısı, kablosuz veya optik teknoloji kullanılarak uygulanabilir. RoF kullanarak sinyal iletimi, optik ve kablosuz avantajları birleştirerek FiWi sistem oluşturulmasını sağlamaktadır. FiWi tabanlı 5G mimarilerindeki en son teknoloji; 4G ve 5G hizmetlerinin bir arada var olma araştırmasını, RoF bozulmasını azaltmak için dijital sinyal işlemeyi (DSP) ve pasif optik ağlar (PON) üzerinden 5G sinyal dağıtımını içermektedir [138].

Son yıllarda, yüksek hızlı ve dayanıklı kablosuz ağlara olan talep artışını karşılayabilmek için en son çözüm, son kullanıcılar için yüksek verim sağlayabilen FiWi ağ kullanılmasıdır. FiWi, kablosuz ağların mobilitesini ve optik ağların yüksek bant genişliğini desteklemektedir. Bir FiWi erişim ağının iki öğesi, arka uç ve ön uçtur (backend ve front-end). Arka uç bir optik erişim ağı iken ön uç, kullanıcıların internet erişimi elde etmek için üzerinden iletişim kurduğu çok atlamalı bir kablosuz ağdır [139].

FiWi ağlar, optik erişim şebekesinin yüksek bant genişliği kapasitesini kablosuz erişim ağının basitliği ile birleştiren bir teknoloji olarak, 5G haberleşme sistemleri için son nokta erişim aşamasında umut verici bir ağ yapısı haline gelmiştir [140].

Geleceğin geniş bant erişim şebekeleri hem optik hem de kablosuz teknolojilerden faydalanarak ve bunları sorunsuz bir şekilde birleştirerek RoF ve FiWi şebekelerinin genişlemesine olanak sağlayabilecektir. RoF ve FiWi, optik-kablosuz yakınsama sağlamak, kontrolü ve yönetimi basitleştirmek ve kaynak paylaşımına izin vermek için potansiyel

teknolojiler olarak kabul edilmekte ve gelecek nesil haberleşme mimarisi alanında yoğun olarak araştırılmaktadır [135, 138-148].

Mm-dalga frekans bantlarında (ör. 24 – 60 GHz aralığında) çalışabilen RoF sistemleri tek modül fiber (SMF) ve çok modlu fiberin (MMF) geniş bant ve ışık dalga özelliklerini kullanabilmektedir [149]. 6G haberleşmede sistemi ultra yüksek güvenilirliğe ve ultra düşük gecikmeye duyarlı hale getirmek amacıyla etkili verim ve kapasite optimizasyonu için milimetre dalga (mm-wave) ve THz sinyallerinin yakınsamasından faydalanılması gerekecektir. Böylece, mevcut optik şebekelerle karşılaştırılabilir hale gelecek ve mm'yi THz sinyallerine dönüştürebilen ve bunun tersini yapabilen RoF sistemine ihtiyaç duyulacaktır [150].

THz sistemler

Kablosuz veri hızlarının gelişiminin her 18 ayda bir iki katına çıkmasıyla, kablosuz iletişim sistemleri, ultra yüksek veri hızları için patlayan bir büyüme eğilimi göstermektedir. Bilgi iletimindeki daha yüksek veri hızları, gelişmiş fiziksel katman çözümlerinden ve gelişmiş donanım bileşenlerinden (örneğin, kaynaklar, dedektörler ve antenler) yararlanılarak bir dereceye kadar elde edilebilse de geleneksel iletişim sistemlerinin saniyede 100 Gigabit (Gb/s) ve hatta saniyede birkaç Terabit (Tb/s) hızındaki verilere ulaşması hala pratik değildir [151].

Yüksek iletim kapasitesi ve yüksek erişim veri hızları nedeniyle, 5G mm-dalga ve alt THz bantlarında çalışma artan bir ilgi görmektedir. mm-wave ve alt THz bantlarında 5G NR iletişimleri bu nedenle bir sonraki evrimde hayati bir rol oynamaktadır [152].

Dolayısıyla, 5G mobil iletişim sistemlerinin alternatiflerinden birisi, yüzlerce MHz'den birkaç GHz aralığına kadar geniş bir bant genişliği sağlama yeteneğine sahip milimetre dalga haberleşme sistemleri [152-154] olmaktadır. Böyle bir bant genişliği ile milimetre dalga iletişim sistemleri, 5 GHz'in altındaki geleneksel mikrodalga iletişim sistemlerinden çok daha fazla bant genişliği sunabilmektedir. Mm-dalga bandındaki veri hızı birkaç Gb/s'ye ulaşabilse de, gelecekteki kablosuz iletişimde artan veri trafiği ihtiyacını karşılamak için hala yeterli değildir [151].

Kablosuz iletişim sistemlerindeki veri trafiğinin katlanarak büyümesiyle birlikte, Terahertz (THz) frekans bandının, mm-wave ve optik frekans arasındaki boşluğu doldurarak beşinci nesil ötesindeki gelecekte ultra geniş bandı desteklemek için umut verici bir aday olduğu öngörülmektedir [146, 151-153, 155-158].

Geleneksel olarak, 26,5-300 GHz frekans bandı, mm-wave bandı olarak ve 300-10 000 GHz, THz bandı olarak tanımlanmaktadır. Ancak son yıllarda, THz bandı olarak 100-10 000 GHz (veya 0,1-10 THz) tanımı yaygın olarak kabul edilmiştir. Kablosuz iletişim sistemlerindeki veri trafiğinin hızla artmasıyla birlikte THz frekans bantları, yüksek bant genişliği sağlanması ve yakın gelecekteki 6G için yeterli spektrum kaynakları sağlanması gibi konularda umut verici bir aday olarak öne çıkmaktadır. Spesifik olarak, THz iletişimi, yüzlerce Gb/s'den birkaç Tb/s'ye kadar yüksek iletim hızlarını gerçekleştirebilir. Ek olarak, THz bandı, mm-wave ve optik frekans bantları arasındaki boşluğun doldurulması için bir köprü görevi yapmaktadır. Mm-wave frekans bantlarıyla karşılaştırıldığında, THz iletişimi, yüksek iletim bant genişliğine ve daha iyi güvenlik performansına sahiptir [84].

Kablosuz iletişimin gelişme eğilimine göre, THz kablosuz iletişim sistemlerinin mükemmel uygulama beklentileri olduğu açıktır. İletim mesafesinin sınırlandırılması nedeniyle, THz kablosuz iletişim, Kablosuz Kişisel Alan Ağı (WPAN), Kablosuz Yerel Alan Ağı (WLAN) ve iç mekan hücresel ağları dahil olmak üzere iç mekan uygulama senaryoları için yaygın olarak kullanılabilecektir [151].

Özellikle, 200-300 GHz frekans bandı, yükselteç uygulanması için erişilebilir olması ve atmosferde nispeten düşük bir zayıflama katsayısı nedeniyle büyük ilgi görmektedir. 200-300 GHz frekans bandında, çeşitli teknolojiler kullanılarak ~100 Gb/s veri hızına sahip çeşitli iletim sonuçları zaten gösterilmiştir [156].

THz teknolojisi, mikrodalga elektroniği ve optoelektronik arasında yer almaktadır. Sonuç olarak, THz kablosuz iletişimde kullanılan donanım, düşük THz aralığı için mikrodalga tekniklerinden ilham alırken, daha yüksek frekanslarda optoelektronik cihazlardan yararlanmaktadır. THz kablosuz iletişimde sıklıkla kullanılan modülasyon şemaları, OOK, Dörtlü Genlik Modülasyonu (QAM) ve OFDM'dir [155].

Optoelektronik cihazların yüksek kullanılabilir bant genişliğinden ve optik fiberlerin düşük yayılma kaybından yararlanan fotonik destekli THz haberleşme sistemleri, yalnızca kablosuz iletimin veri hızlarını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda kablosuz ön uçlar ile optik erişim ağları arasında sorunsuz bir şekilde bağlantı oluşturulmasını sağlamaktadır [146].

Yaklaşan 6G kablosuz şebekelerinde, THz iletişiminin çok çeşitli uygulama olasılıklarını desteklemesi beklenmekte olup THz dalgalarının güçlü yönlülüğü ve yüksek yol zayıflaması gibi özellikleri nedeniyle, THz iletişiminin iç mekan iletişim senaryoları için geçerli olacağı öngörülmektedir [84].

4. HİBRİT KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Haberleşme, geliştirilmiş güvenlik seviyeleriyle birlikte çok fazla veri hızı gerektirmektedir. Kullanıcı sayısının her geçen gün arttığı günümüzde, daha yüksek veri hızlarına olan talep gerçekten büyük bir zorluktur. 5G kablosuz hizmetleri gibi yüksek kaliteli multimedya hizmetlerinin ortaya çıkması, ana taşıyıcı uygulamaları için büyük bant genişliği gerektirmektedir. 5G ağında, yoğun veri trafiği, hizmetlere kolay erişim ve esneklik sunacak şekilde ele alınmaktadır. Mikrosaniye mertebesinde çok daha az gecikme ve çok yüksek veri hızları, çeşitli ağlarla 5G iletişiminin dikkate değer özellikleri arasında yer almaktadır [92,159].

Bununla birlikte, mobil geniş bant sistemlerine abone olan kullanıcı sayısı her yıl önemli ölçüde artmaktadır. Daha hızlı internet erişimi, daha trend cep telefonları ve genel olarak hareket halindeyken başkalarıyla anında iletişim kurmak veya bilgiye erişmek giderek daha fazla insan tarafından talep edilmektedir. Mobil ortamlar giderek daha karmaşık, heterojen ve gelişmekte olduğundan, bu görevleri yerine getirmek bir zorluk haline gelmektedir.

Kurulmakta olan 5G iletişimi, ultra düşük enerji tüketimi, ultra düşük gecikme süresi, ultra yüksek sistem kapasitesi, devasa cihaz bağlanabilirliği, ultra yüksek güvenlik ve ultra yüksek deneyim kalitesi (QoE) ile birçok yeni hizmet sağlayacaktır. 6G ağlarının 5G'den daha iyi performans göstermesi ve Endüstri 4.0, sanal mevcudiyet, kişiselleştirilmiş sağlık hizmetleri ve talep gören diğer bazı uygulamalar için ortaya çıkan bir dizi hizmeti karşılaması gerekecektir. Bu nedenle 6G'nin 5G'den 100-1 000 kat daha yüksek iletim hızlarına olanak sağlaması beklenmektedir. 2G, 3G ve 4G tarafından 6 GHz'e kadar bir bant genişliği benimsenirken, 5G 24-100 GHz'i birleştirerek 6 GHz'in altındaki aralığı mümkün olduğunca verimli bir şekilde kullanmaktadır [60,114].

Yukarıda bahsedilen yoğun akışlı uygulamalar, yüksek veri hızı, artan kullanıcı sayısı ve verimli iletim gibi ihtiyaçları güvenlikle karşılamak için birçok teknoloji ortaya çıkmaktadır. Bu gereksininlerin sonucu olarak ortaya çıkan hibrit optik haberleşme sistemi temelde, iki veya daha fazla farklı ağ içermektedir. Bu ağlar, uygulama senaryolarına ve mevcut ağların türüne bağlı olarak farklı şekillerde çalıştırılabilmektedir [60].

Hibrit ağ yaklaşımı, her bir teknolojinin önemli avantajlarından yararlanmak için iki veya daha fazla farklı teknolojiyi (Li-Fi/OCC, RF/FSO, VLC/FSO, RF/optik vb. gibi) birleştirmektedir.

Haberleşme ağlarının temel amacı, kullanıcılara kişiselleştirilmiş talep, yüksek QoS ve yüksek genel sistem performansı sağlamaktır. Bu hedefe ulaşmak, kullanıcı talebi ve ağ kaynakları arasında ayrıntılı bir denge kurma ihtiyacı nedeniyle hibrit sistemlerde sürekli bir zorluk oluşturmaktadır [25].

Hibrit sistemler oluşturulurken, tamamlayıcı ağın doğru şekilde seçilmemesi, hibrit sistemin karmaşıklığının önemli ölçüde artırabileceği için, çok kritik bir süreçtir. Hibrit RF/optik ve optik/optik kablosuz sistemler, her bir teknolojinin olumlu özelliklerini sağlamanın yanı sıra her bir sistemin sınırlamalarını gidermek için mükemmel bir çözüm sunmaktadır. Bir RF/optik kablosuz hibrit sistem hem RF hem de optik tabanlı kablosuz teknolojilerden oluşurken, bir optik/optik kablosuz hibrit sistem iki veya daha fazla OWC teknolojisi türünden oluşmaktadır. Kablosuz sistemlerin birlikte konuşlandırılması, bağımsız ağların verimliliği, güvenilirliği ve enerji verimliliği açısından sistem performansını iyileştirebilmektedir [26, 60].

Hibrit bir sistemle ilgili en önemli ve temel konular arasında kaynakların paylaşımı, yukarı bağlantı/aşağı bağlantı (uplink/downlink) paylaşım protokolü, paket zamanlaması, mobilite desteği, yük dengeleme, ağ seçimi ve fiziksel katman güvenliği yer almaktadır. Hibrit ağlar aynı zamanda, enerji verimliliğini artırma, uzak yerlerde kablosuz bağlantı kullanılabilirliği (örneğin, derin uzay, derin okyanus ve derin yer altı durumları), güvenliği artırma ve paraziti azaltmada önemli bir rol oynayabilmektedir. Hibrit sistemi oluşturan ağlar arasında bant genişliğini ve gücü dağıtmak için entegre bir kaynak tahsis mekanizması oluşturulabilmektedir [43, 60].

Yük dengeleme, ağdaki trafiği ve kaynakları yönettiği için hibrit ağa bağlı her cihaz arasında işlem yükünü ve trafiği eşit olarak dağıtmaya yardımcı olur. Bu, ağ tıkanıklığını azaltır, cihazların aşırı ısınmasını önler ve hız, gecikme ve güvenilirlik açısından performansı artırır. Ağ yükü dengelemesindeki temel maç, her kullanıcının konumuna ve hareketliliğine bağlı olarak en yüksek veri hızını sağlayan en iyi erişim noktasının bulunmasıdır.

Handover (el değiştirme) yük dengeleme tekniklerinden birisidir. Handover kullanılarak el değiştirme gecikmesini en aza indirme ve genel ağ verimini artırma hedeflenmektedir. Hibrit bağlantı sistemlerinde handover, bir kullanıcının bağlantıyı kaybetmeden bir ağdan diğerine geçtiği süreçtir. Bahsedilen ağ geçişi, değişiklik sistem içinde gerçekleşiyorsa yatay, sistemler arasında gerçekleşiyorsa dikey olarak sınıflandırılabilir [25].

Araştırma çevreleri, geleceğin kablosuz ağlarındaki gecikme, kapasite ve veri hızı zorluklarının üstesinden gelmek için olası çözümleri araştırmaya çalışmaktadır. Bu çözümleri bulmak için, bağlantı güvenilirliği ve mesafe gibi çeşitli parametreleri dikkate almak gerekmektedir. Örneğin, düşük ve yüksek frekanslar sırasıyla çok yollu ve yağmur zayıflamasından etkilenmektedir. Buna ek olarak, ağ kapasitesi de ana taşıyıcı bağlantısında büyük bir zorluktur. Daha yüksek dereceli modülasyon, kapasiteyi ve spektral verimliliği artırmak için kullanılabilir, ancak iletişim mesafesini azaltır. Bu nedenle, her iki parametreyi de desteklemek için verimli ana taşıyıcı bağlantısına ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar, düşük gecikmeli, yüksek veri hızlı FSO ana taşıyıcısını kolay kurulabilir ve düşük maliyetli NLOS RF ana taşıyıcısıyla birleştirmek için hibrit RF/FSO ağlarına odaklanmıştır.

FSO teknolojisi, tek bir geniş bant FSO bağlantısı kullanarak birden fazla RF cihazını uç noktadaki erişim ağına eşzamanlı olarak bağlayabilmesi nedeniyle IoT'nin kitlesel bağlanabilirliğini sağlamak için kullanılabilmektedir. Ancak FSO teknolojisi, kapsama mesafesinin birkaç yüz metre olmasına neden olan atmosferik türbülans koşullarından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu etkinin üstesinden gelmek için, bağlantı kullanılabilirliğini genişletmek üzere birleşik ve hibrit RF/FSO sistemleri kullanılmaktadır. Hibrit RF/FSO sistemlerinde, örneğin, karlı havalarda FSO bağlantısının kullanılabilirliği %39,49 civarındayken, 40 GHz RF bağlantısı aynı koşullar altında %100 kullanılabilir olmaktadır [59].

FSO haberleşmesi, lisanssız spektrum, geniş bant genişliği, esnek ağ ve yüksek veri hızı avantajlarına sahiptir. Bununla birlikte, FSO bağlantıları kaçınılmaz olarak atmosferik türbülanstan ve kar, sis, toz vb. gibi olumsuz meteorolojik durumlardan etkilenmektedir. RF iletişimi güvenilir bir bağlantı sağlayabilir, ancak özellikle mikrodalga ve milimetre dalga sistemleri için yağmurlu koşullara duyarlıdır. Bu hassasiyetleri gidermek için son on yılda FSO bağlantısı ile RF bağlantısının entegre edilerek hibrit FSO/RF heterojen ağlar

oluşturulmasına yönelik ilgi artmıştır. Bu tür birleştirilmiş sistemler, her iki iletişim teknolojisinin tamamlayıcı güçlerinden yararlanmayı ve böylece daha verimli ve güvenilir veri iletimi sağlamayı amaçlamaktadır [34].

Yeni nesil hücresel ana taşıyıcı ağların ana amacı, hibrit şema kullanılarak bağlantı kullanılabilirliği ve güvenilirliğinin arttırılmasıdır. Son mesafe bağlantı sorununu çözmek için hem RF hem de FSO bağlantılarının hibrit bir şekilde bir araya getirildiği karma RF/FSO mimarisi oldukça ilgi çekmektedir. Bu mimaride, hibrit bir şekilde bağlanan FSO bağlantısı ve RF bağlantısı, yeni nesil mobil ana taşıyıcı ağ altyapısının tasarlanması için önemli bir alternatif veri iletimi yolu sağlayabilmektedir [46].

FSO sistemlerinin özellikleri RF iletim sistemlerindeki bazı problemleri çözebilmektedir. FSO, yoğun veri aktarım gereksinimlerini destekleyen ve yüksek veri hızı sunabilen teknolojilerden biri olmakla birlikte, dinamik hava koşulları, transmisyon demetindeki işaretleme hataları ve atmosferik türbülans FSO sistemlerinin performansında önemli düşüşlere ve zayıflamaya neden olabilmektedir. Öte yandan, RF iletişimi daha düşük veri hızlarına sahiptir ancak hava koşullarına karşı FSO'ya göre daha az etkilenmektedir. Hibrit FSO/RF teknolojisi, kullanılabilirliği ve güvenilirliği önemli ölçüde artırabildiği ve yüksek verimli kablosuz bağlantı, karşılaştırılabilir veri hızları ve hava koşullarına duyarsızlık için iyi bir çözüm oluşturmaktadır [33, 37, 59].

RF ve bir diğer OWC teknolojisi olan VLC'ye dayalı sistemler arasındaki entegrasyonu ifade eden VLC/RF hibrit ağları, RF ve VLC ağları arasında birbirlerine müdahale etmeden iş birliği gerçekleştirebilen tamamlayıcı bir teknoloji olarak sunulmaktadır. VLC/RF ağları, akıllı aydınlatma, ev otomasyonu, konum tabanlı hizmetler, ev otomasyonu, akıllı sağlık hizmetleri ve endüstriyel IoT gibi IoT uygulamaları için güvenilir ve verimli iletişim çözümleri sunabilmektedir. Bu nedenle, hibrit VLC/RF ağları yeni nesil iletişim sistemleri için anahtar teknolojilerdir ve B5G ve gelecek nesil hücresel ağların geliştirilmesi için temel oluşturması beklenmektedir.

Hibrit frekans bantlarının varlığı ve hibrit haberleşme kanalının dinamik koşulları nedeniyle, optimum kanal tasarımı VLC/RF sistemleri için çok önemli ve zor bir sorundur. VLC/RF ağının iletim kanalının optimize edilmesi IoT sistemlerinin geliştirilmesi için çok önemlidir çünkü akıllı cihazlar düzgün çalışması için genellikle kararlı bir bağlantıya ihtiyaç duyar.

Güvenilir ve sağlam bir bağlantı, IoT cihazlarının ömrünü ve uygulanabilirliğini uzatmaya yardımcı olabilir [25].

Kablosuz iletişim, RF ve Görünür Işık (VL) dalgaları gibi kablosuz taşıyıcıların kullanımı yoluyla yönlendirilmemiş yayılma ortamlarında veri iletimini ifade etmektedir. Özellikle iç mekan senaryolarında yüksek veri hızlarına yönelik artan talep, geleneksel RF teknolojileri üzerinde aşırı yük oluşturmaktadır. Bu nedenle, milimetre dalgaları ve bilişsel radyolar gibi teknolojiler, geleneksel RF sistemlerinin spektrum kıtlığı ve kapasite sınırlamalarının üstesinden gelmek için olası çözümler olarak benimsenmiştir. Buna paralel olarak, hem aydınlatma hem de veri iletimi için bir ışık kaynağının kullanıldığı VLC alternatif bir çözüm olarak önerilmiştir. RF bağlantılarına kıyasla, VLC bağlantıları çok daha yüksek veri hızlarına izin veren çok yüksek bir bant genişliği sunmaktadır. VLC ayrıca elektromanyetik kaynaklardan gelen girişimlere karşı bağışıklık gösterir, lisanssız kanallara sahiptir, çok düşük güç tüketimli bir sistemdir ve sağlık açısından hiçbir tehlikesi yoktur. VLC, araç güvenliği iletişimi gibi düşük gecikme süresine sahip güvenilir iletişimler de dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için çok uygundur. VLC teknolojisinin önemli avantajlarına ve çeşitli uygulamalarına rağmen, LOS bağlantısına bağımlı olması gibi dezavantajları nedeniyle kullanımı engellenmektedir.

Hibrit RF/VLC sistemleri, VLC bağlantılarının yüksek kapasitesinden ve RF bağlantılarının daha iyi bağlanabilirliğinden yararlanmak için önerilmiştir. Bu nedenle, hibrit RF/VLC sistemleri, bir yandan kullanıcı oranlarını ve hareketliliğini iyileştirmek, diğer yandan da genel ağın kapasitesini, girişim ve güç tüketimini optimize etmek için önemli bir yardımcı olarak öngörülmektedir [1].

Hibrit RF/VLC sistemlerinde kullanılan RF ve VLC kanal modeli yapılarının karşılaştırması aşağıdaki Çizelge 4.1'de yer almaktadır.

Çizelge 4.1. VLC ve RF kanal modellerinin karşılaştırması [1,25]

Parametreler	VLC Kanalı	RF Kanalı
Kanal modeli	Lambertian	Hermitian
Yayılım modu	Görünür ışık	Elektromanyetik dalga

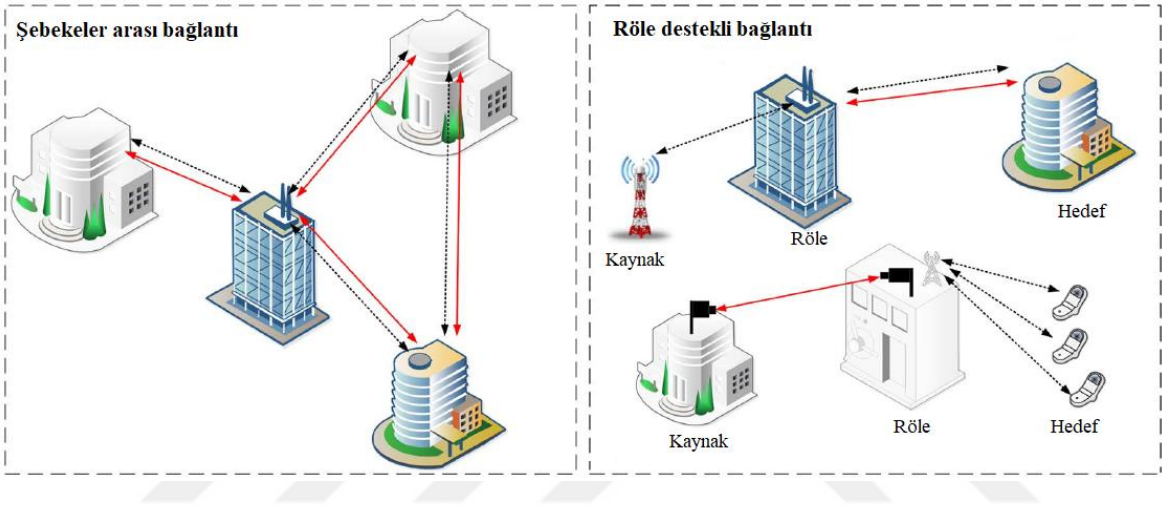
Çizelge 4.1.(devam) VLC ve RF kanal modellerinin karşılaştırması

Kapsama	Düşük (100 m)	Yüksek (1 km)
Çevresel bağımlılık	Duyarlı	Orta düzey
Dış ortam ışık etkisi	Duyarlı	Etkilenmez
EM girişimi	Hayır	Evet
Bant lisansı	Lisanssız	Lisanslı / Lisanssız
Maliyet	Düşük	Yüksek
Boyut	Küçük	Büyük
Enerji tüketimi	Düşük	Yüksek
Karmaşıklık	Basit	Karmaşık
Simetri	Hayır	Evet
Bağlantı yönü	İndirme (download)	İndirme (download) / Yükleme (upload)
Doppler etkisi	Hayır	Evet
Semboller arası girişim	Az	Çok

Diğer taraftan, Hibrit THz/FSO sistemlerinin, bir optik lazerin THz sinyali oluşturmak veya optik bir sinyali göndermek için kullanılabileceği hibrit elektronik-fotonik alıcı-vericiler kullanılarak 6G'de gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Hibrit bağlantı, sinyal iletimi için bol miktarda bant genişliği sunmaktadır ve olumsuz hava koşullarına karşı bağışıklığa sahiptir. THz iletimi, bir LOS bağlantısına ihtiyaç duymadığı için yukarı bağlantıda (uplink) önemli bir rol oynayabilecektir [74].

Yüksek veri hızlarını destekleyen verimli sistemlerin ihtiyaçları, yeni nesil ağların geleceğini de şekillendirmektedir. Optik fiber çok büyük bant genişliği sağlayarak uzun mesafeli iletişimi desteklemektedir. RoF, kanal bant genişliğine erişim sağlayan bir tekniktir. Böylece kablosuz ağlarda ağ trafiğini düzenlemek için kullanılır. RoF bağlantısı, hem fiber optik bağlantının hem de serbest uzay radyosunun önemli özelliklerine sahiptir. Bu fiber tabanlı kablosuz erişim, gerçek zamanlı yüksek kapasiteli multimedya hizmetlerinin taleplerini karşılamaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca, RoF teknolojisine dayalı optik sinyal üretimi, yüksek frekanslı kablosuz sistemler için pratik yaşamda birçok uygulamaya sahiptir [135].

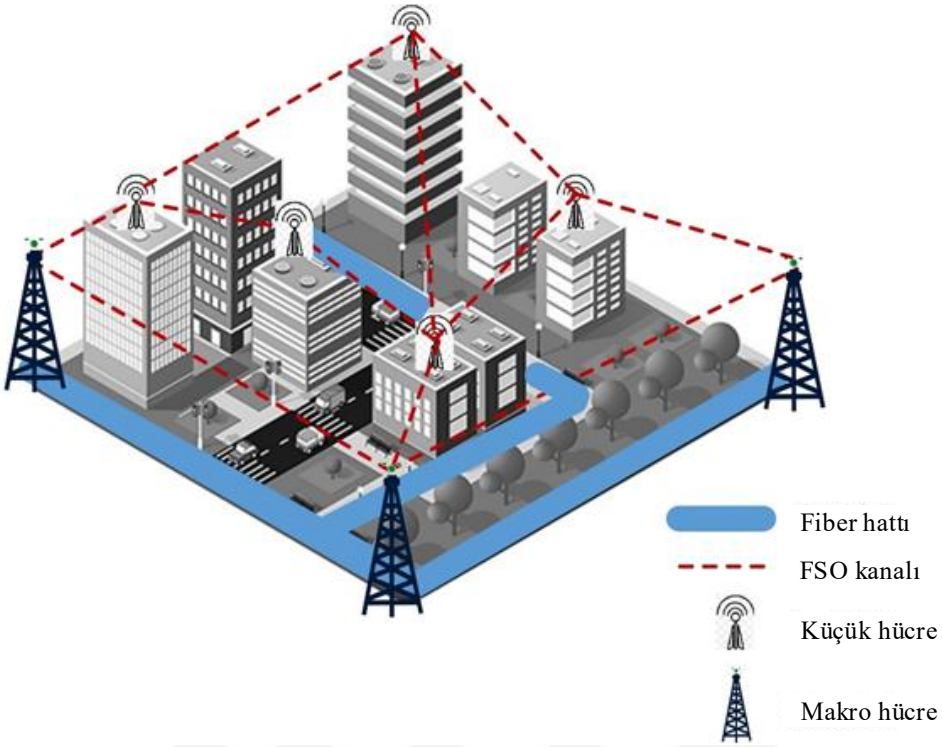
Birleşik sistemlerde, RF ve FSO bağlantıları ardışıktır, yani mobil uçlar bilgilerini röle noktası gibi bir ara sabit noktaya göndermek için RF bağlantılarını kullanır ve ara bağlantı noktası bilgileri bir FSO ana taşıyıcı bağlantısı üzerinden son varış noktasına iletir (Şekil 4.1). Bu iletişim yapılandırması, hücresel iletişim ve küçük hücre ağları da dahil olmak üzere birçok pratik uygulamayı modelleyebilir. Spektrum kıtlığı sorunu nedeniyle, spektrum paylaşım tekniği, genel ağ spektrum verimliliğini, veri hızını, gizlilik iyileştirmesini vb. geliştirmek için hibrit RF/FSO sistemleriyle birleştirilebilir [30, 160].



Şekil 4.1. Hibrit bağlantı türleri [60]

RoF teknolojisi, RF ve optik iletişim sistemlerinin avantajlarını bir araya getirmektedir. Hibrit RoF ve FSO [137, 149, 161, 162], RoF bağlantılarının kurulumunun pratik olmadığı ve maliyetli olduğu kentsel alanlarda ve alanlarda uç nokta erişim ağları için bir çözümdür.

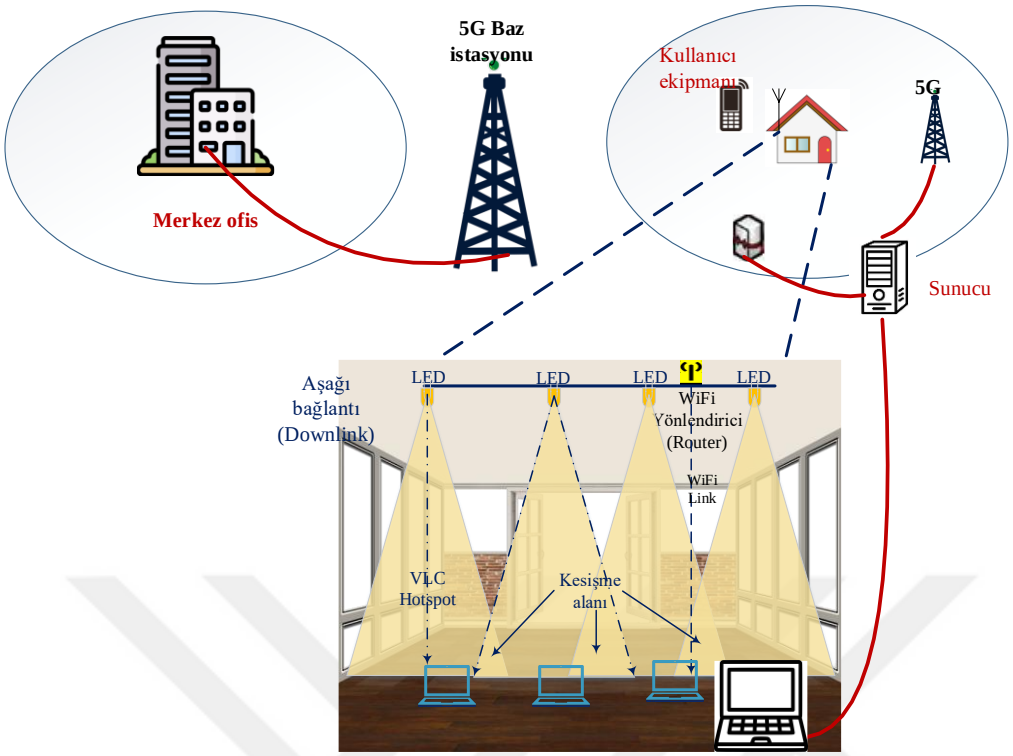
Kentsel alanlarda RoF sistemlerinin kurulumu, coğrafi kısıtlamalar ve fiziksel engeller nedeniyle bazı durumlarda zaman alıcı ve maliyetli olduğundan pratik değildir. Bu nedenle, buna olası bir çözüm, FSO kısmının mevcut tüm bant genişliği açısından fiber optik iletimle uyumlu olduğu FSO üzerinden Radyo (RoFSO) teknolojisinin kullanılması olacaktır [163, 3, 164, 165, 133]. Ayrıca RoFSO, RoF'a göre daha esnektir ve kentsel alanlarda kurulum maliyetlerini önemli ölçüde azaltır (Şekil 4.2) [137].



Şekil 4.2. Kentsel alan RoFSO-fiber hibrit yapısı

İlave olarak, kullanıcı ile merkez istasyonu birbirine bağlamak için taşıyıcı ağ olarak optik fiberin kullanıldığı hibrit RF-VLC [41,42,166, 167] ve hibrit RoF-VLC [19, 168] sistemleri de son zamanlarda üzerinde sıklıkla çalışılan sistemler olarak öne çıkmaktadır.

5G sistemleri, mevcut 4G sistemlerine kıyasla çok daha yüksek kapasite, veri hızı, spektral verimlilik ve enerji verimliliğine sahiptir. Tipik olarak 1 ila 100 mm arasında değişen dalga boyları ile 3 ila 300 GHz frekans aralığını ifade eden mm-dalga spektrumu, gigabit sınıfı iletimi sağlamak amacıyla 5G ağları için umut verici bir teknoloji haline gelmiştir. VLC, mm-dalga ile karşılaştırıldığında, geniş spektrum, Gb/s veri hızlarını destekleme yeteneği, yüksek güvenlik, yüksek uzamsal yeniden kullanım, düşük ortak kanal girişimi, iç ve dış mekan kullanıcıları arasında girişimsiz iletişim ve bunun gibi benzer avantajlara sahiptir. Yukarı bağlantı için mm-dalga 5G'nin ve aşağı bağlantı için LED'in kullanılacağı olası bir çift yönlü 5G RoF-VLC hibrit sistemi Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Mm-dalga tabanlı sistemlerden VLC tabanlı sistemlere büyük miktarda trafik aktarılabilecektir [118].



Şekil 4.3. 5G Kablosuz-VLC hibrit modeli [118]

Kablosuz ve optik haberleşme sistemlerinin hibrit yapılarını oluşturan temel haberleşme türlerinin (FSO, VLC ve RF) karşılaştırması Çizelge 4.2'de yer almaktadır.

Çizelge 4.2. FSO/VLC/RF teknolojilerinin karşılaştırması [59]

Teknoloji / Özellik	Serbest Uzay Optik (FSO) Haberleşmesi	Görünür Işık Haberleşmesi (VLC)	Radyo Frekans (RF)
Kullanılan cihaz boyutu	Küçük	Küçük	Büyük
Güç tüketimi	Düşük	Düşük	Orta
Hattın performansını etkileyen faktörler	Hizalama hataları, atmosfer etkisi, sis	Çok yolluluk (multipath)	Girişim, çok yollu sönümleme
Yol kaybı	Yüksek	Orta (NLOS için yüksek)	Yüksek
Gürültü kaynakları	Ortam ışığı, gün ışığı	Ortam ışığı, gün ışığı	Elektronik ve elektrikli cihazlar
Bant genişliği	Sınırsız	Sınırsız	Sınırlı

Çizelge 4.2.(devam) FSO/VLC/RF teknolojilerinin karşılaştırması

Duvardan geçme	Hayır	Hayır	Evet
Hız	Yüksek	Yüksek	Düşük
Sönümlenme	Hayır	Hayır	Çok yollu sönümlenme
Spektrum regülasyonu	Serbest	Serbest	Lisanslı
Güvenlik	Yüksek	Yüksek	Düşük
İletim ortamı	Görünür, Yakın-Kızılötesi ve Ultraviole Işık	Görünür Işık	Milimetre dalga (mm-wave)
Kapsama / Veri Hızı	>10 km / 40 Gb/s	30 m / 10 Gb/s (LED) 100 Gb/s (LD)	200 m / <100 Mb/s
Çevre etkisi	Yüksek	Yüksek	Düşük
Maliyet	Düşük	Düşük	Mikrodalga: Yüksek
EM girişimi	Hayır	Hayır	Yüksek
Temel kullanım amacı	Haberleşme	Haberleşme, yer bulma, aydınlatma	Haberleşme ve konum belirleme

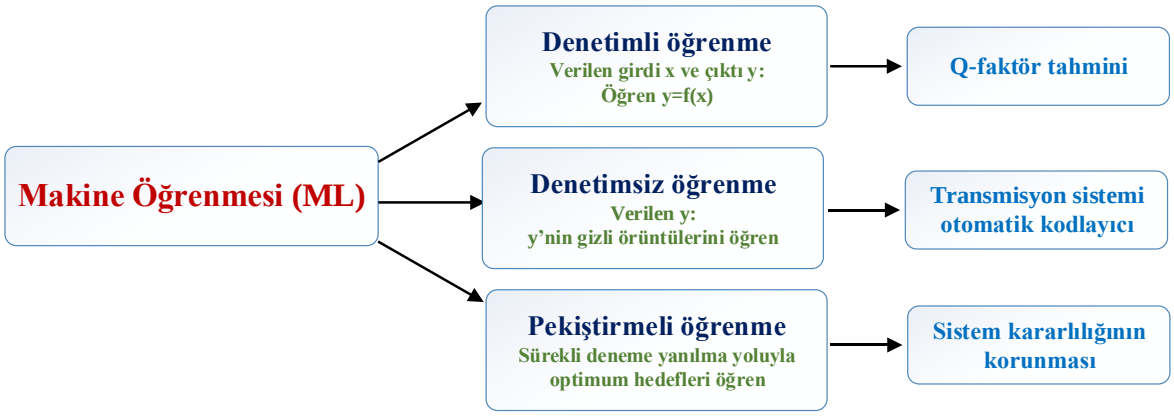
5. MAKİNE ÖĞRENMESİ ve OPTİK PERFORMANS ANALİZİ

Günümüzün haberleşme şebekeleri, ağ trafiği, alarmlar, sinyal kalitesi göstergeleri, kullanıcıların davranış verileri vb. verilerden oluşan çok büyük miktarlarda heterojen veri içeren kaynaklar haline gelmiştir. Şebekeler tarafından oluşturulan bu verilerden anlamlı bilgiler çıkarmak ve şebekenin düzgün işleyişine ilişkin kararlar almak için gelişmiş matematiksel araçlar gerekmektedir.

Bu matematiksel araçlar arasında ML, ağ-veri analizi gerçekleştirilmesi, ağın otomatik kendi kendini yapılandırması ve hata yönetiminin sağlanması gibi konularda en umut verici metodolojik yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmektedir. ML, doğru verilere erişim sağlayarak makinelerin belirli bir sorunu nasıl çözeceklerini kendi kendilerine öğrenebilecekleri fikrini ileri süren bir yapay zeka dalıdır [169].

Özellikle gelecekteki cihazların ve hizmetlerin dinamik yeniden yapılandırılabilirlik taleplerini karşılayabilecek şekilde kendi kendini devam ettiren ve uyarlanabilir ağlar oluşturmak amacıyla, ML tekniğinin haberleşme alanındaki kullanımı hızlı bir yoğunluk kazanmaktadır. Ayrıca ML, yeterli veri ve hesaplama gücünün mevcut olduğu göz önüne alındığında, geleneksel matematiksel mod tabanlı algoritmik çözümlerin yerini almak için güçlü bir potansiyele sahiptir [170].

ML, otomatik olarak oluşturulan modellerle geçmiş verilere dayanarak gelecekteki sonuçları tahmin etmek için kullanılan bir veri analizi tekniğidir. Genel olarak denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme olmak üzere üç tür makine öğrenimi modelleme yöntemi vardır (Şekil 5.1). Denetimli öğrenme için, ölçülen İletim Kalitesi (QoT) değerleri (ör. BER, OSNR veya Q faktörü) gibi açık talimatlar veya hedefler, doğru sonuçlar elde etmek için makine öğrenimi sürecine rehberlik eder. Buna karşılık, pekiştirmeli öğrenme ve denetimsiz öğrenme bir gözetmen veya önceden tanımlanmış eğitim hedefleri olmadan çalışır; pekiştirmeli öğrenme gelecekteki veriler için algoritma performansını optimize etmeyi amaçlarken, denetimsiz öğrenme verilen verilerdeki gizli kalıpları tanımlar. Pekiştirmeli öğrenme ve denetimsiz öğrenme, eğitim verilerinin öğretim değerleriyle etiketlenmesini içermediğinden, belirli hedef değerler gerektiren sınıflandırma ve regresyon görevlerinde genellikle daha az etkilidirler.



Şekil 5.1. Makine öğrenmesi kategorileri ve örnekleri [172]

Denetimli öğrenme, belirli hedeflere ulaşmak için girdi ve çıktı verileri arasındaki yakın işlevsel ilişkileri tanımlamaya odaklanır ve bu da onu optik iletim sistemlerinde QoT'yi tahmin etmek için uygun hale getirir. Ayrıca, regresyon modelleri tipik olarak verileri farklı QoT kategorilerine sınıflandırmak yerine dağıtım sırasında QoT marjını en aza indirmek için tercih edilmektedir.

Optik iletim sistemleri genellikle çeşitli parametrelere göre değerlendirildiğinden, bir sistem için iyi eğitilmiş bir model, standart makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak farklı bir sisteme uygulanamayabilir. Farklı sistem mimarileri için yeni bir model geliştirmek amacıyla yeniden eğitim için önemli miktarda veri gerekmektedir. Transfer Öğrenimi (TL) bu zorlukların üstesinden gelmek için oluşturulmuştur [171]

TL, bir konfigürasyon türü üzerinde eğitilmiş olan bir modelin, ilk modelden edinilen bilgiyi aktararak başka bir problem konusu modeli eğitmek üzere uyarlanabileceği ilkesini kullanmaktadır. TL, hedef etki alanı modelinin sınırlı sayıda eğitim örneğiyle bile yüksek düzeyde doğruluk elde etmesini sağlayarak etkinliğini kanıtlamıştır. Bu arada Aktif Öğrenme (AL), yalnızca en az sayıda etiketli örnek gerektirirken modelin performansını iyileştirmektedir. AL, modelin en bilgilendirici veri örneklerini tanımlamasına ve seçmesine olanak tanıyarak daha az sayıda etiketli eğitim örneğiyle daha yüksek doğruluk elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, tahmin modelini en etkili veri örneklerini seçerek etiketlemeye yönlendirir, böylece her yinelemede eğitim veri kümesini genişletirken etiketleme maliyetlerini azaltmaktadır [173].

ML ve Derin Öğrenme (DL) yaklaşımlarının gelecekteki FSO ağlarının tasarımına ve optimizasyonuna entegrasyonu, karmaşık sayısal modelleri ortadan kaldırarak akıllı sinyal işleme ve çalıştırmanın ortaya çıkan yeni bir boyutu olacaktır. DL uyumlu FSO sistemleri, örneğin kanal kestirimi ve tahmini, kanal modelleme, modülasyon ve kodlama şemalarını optimize etme, kümelenme (konstelasyon) şekillendirme, gizlilik ve güvenlik analizi vb. gibi konuları ele alarak akıllı iletişim mimarileri sağlamaktadır. Ayrıca, kromatik dispersiyon değerlendirmesi, optik SNR ölçümü, kod çözme, sinyal demodülasyonu ve uçtan uca sistem modelleme gibi diğer bazı uygulamalarda da makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır [96].

Büyük verinin kullanılmaya başlanması, sistemlerin performansının makine öğrenimi algoritmaları ile analiz edilmesi ihtiyacını doğurmuştur. ML, sistemlerin çevreyi algılamasını ve bağımsız bilişsel görevleri yerine getirmesini sağlayarak ağa zeka katmak için önemli bir metodoloji olduğunu göstermiştir [174].

Öte yandan, ML algoritmalarını belirli bir probleme uygulamak üzere test etmek için gereken büyük verilerin gerçek dünyada üretilmesi hem zaman alıcı hem de potansiyel olarak pahalı olduğundan, ML algoritmalarını test etmenin dolaylı bir yolu simülasyon yoluyla veri üretmektir [175].

5.1. OPM, MFI ve QoT

Mevcut optik şebekeler, vericiden alıcıya giden fiziksel kanal yolunun sabit olduğu statik bir yapıdadır. Elastik ve bilişsel ağlar gibi geleceğin optik ağlarının dinamik, spektrum ızgarasız, modülasyon formatından bağımsız ve yeniden yapılandırılabilir olması beklenmektedir. Bu özellikler genel ağ performansını, esnekliğini ve verimliliğini artırmakla birlikte, mevcut optik bağlantı noktalarının akıllı hale getirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu zekanın bir parçası da, ağ bozulma kaynağınının belirlenerek ağ güvenilirliğinin iyileştirilmesi için önlem alınması amacıyla sinyal performansının izlenmesi ve türünün belirlenmesidir [64].

Akıllı evler, akıllı binalar, akıllı şehirler, akıllı ortamlar, akıllı tarım ve e-sağlık gibi IoT tabanlı sistemler, etkili veri toplama, işleme ve izleme için hızlı, gerçek zamanlı iletişim gerektirmektedir. Son araştırmalar, optik ağlarda Optik Performans İzleme (OPM) ve baud

hızı tanımlama için makine öğrenmesinin potansiyelini vurgulamakta ve bu karmaşık sistemlerin daha verimli bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır [12, 24].

Sinyal alıcılarının Modülasyon Format Belirleme (MFI) olarak bilinen sinyal tipini tanımlama yeteneği, sinyal tipi ve bant genişliğinin ağ koşullarına göre belirlendiği uyarlanabilir, esnek ve verimli ağların oluşturulmasını sağlamaktadır. İlave olarak, ağ bağlantı noktalarında sinyal kalitesini izleme yeteneği, ağ operatörünün sinyal kalitesi, spektral verimlilik ve erişim mesafesi arasındaki ilişkiyi de takip edebilmesini sağlamaktadır. Böyle bir durumda, yüksek seviyeli modülasyon formatları iyi durumdaki optik kanallar üzerinden iletilirken, kötü durumdaki optik kanallarda düşük seviyeli modülasyon formatları kullanılmaktadır [64].

Optik performans izleme, sinyalin takip ettiği ışık yolu ömrü boyunca Q faktörü, BER, SNR, Polarizasyon Modu Dispersiyonu (PMD) ve Kromatik Dispersiyon (CD) gibi fiber optik sistemin iletim parametrelerini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu tür parametrelerin bilinmesi daha sonra örneğin, polarizasyon dengeleyici modülleri etkinleştirmek, benimsenen modülasyon formatını değiştirmek, başlatma gücünü ayarlamak, ışık yollarını yeniden yönlendirmek, vb. gibi çeşitli görevleri gerçekleştirmek için kullanılabilmektedir.

Tipik olarak, ışık yolu boyunca farklı izleme noktalarında optik performans parametrelerinin toplanması gerektiğinden çok sayıda monitör gerekli olmaktadır ve bu da sistem maliyetinin artmasına neden olur. Bu nedenle, şebeke bilgilerini makul bir maliyetle elde edebilmek için optik performans monitörlerinin uygun şebeke konumlarında verimli bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir.

Yapay Sinir Ağı (ANN), örnekler arasındaki karmaşık haritalamayı veya sembollerden ve OSNR (optik SNR), PMD, CD, Polarizasyona Bağlı Kayıp (PDL) ve baud hızı gibi fiber optik kanal parametrelerinden elde edilen özellikleri öğrenmek amacıyla kullanılabildiğinden, optik performans izleme gerçekleştirmek için çok uygun makine öğrenme araçlarıdır. ANN'nin yanı sıra, lineer regresyon tabanlı tahmin modellerine kıyasla optik performans izlemede daha iyi performans gösterdiği gösterilen Gauss süreç modelleri gibi diğer araçlar da kullanılmaktadır. Gauss Süreci gibi daha basit ML araçlarının (ANN ile karşılaştırıldığında) gürültü belirsizlikleri altında sağlam olduğunu kanıtlayabileceği ve bir

ağ denetleyicisine entegre edilmesinin kolay olabileceğini iddia eden çalışmalar da bulunmaktadır.

QoT kavramı genellikle alıcı tarafına gelen sinyalin OSNR, BER, Q faktörü vb. gibi optik sinyalin "okunabilirliği" üzerinde etkisi olan bir dizi fiziksel katman parametresini ifade etmektedir [169].

Transmisyon kalitesinin tahmini için en önemli parametre iletilen sinyalin gücü ve optik kanaldaki gürültüdür. Optik sinyal gücü ve gürültüsü, QoT'nin en önemli parametresi olan BER ile doğrudan ilişkili olan bant içi OSNR'ı belirler. Farklı optik alıcı-vericilere bağlı olarak, OSNR ve BER arasındaki ilişki farklıdır ve genellikle OSNR, optik kanal kalite değerlendirmesi için daha genel bir parametredir [172].

Gerçek zamanlı bağlantı taleplerini karşılamak için hem yüksek tahmin doğruluğu hem de düşük hesaplama süresi gerektirdiğinden, dağıtımdan önce iletim kalitesinin tahmin edilmesi, bozulmaya duyarlı optik ağların işletilmesi için çok önemlidir. Yapay zekanın, özellikle de bir bağlantı yolunun QoT'sini tahmin etmek için makine öğreniminin kullanılması, değişen ağ koşullarına uyum sağlarken hızlı ve hassas tahminlere olanak tanıdığı için umut verici bir yaklaşımdır. Bununla birlikte, makine öğrenimi tabanlı QoT modelleri için temel zorluklardan biri, yoğun zaman alan veri toplama süreci ve makine öğrenimi modelinin ön eğitimi veya yeniden eğitimidir [171, 176].

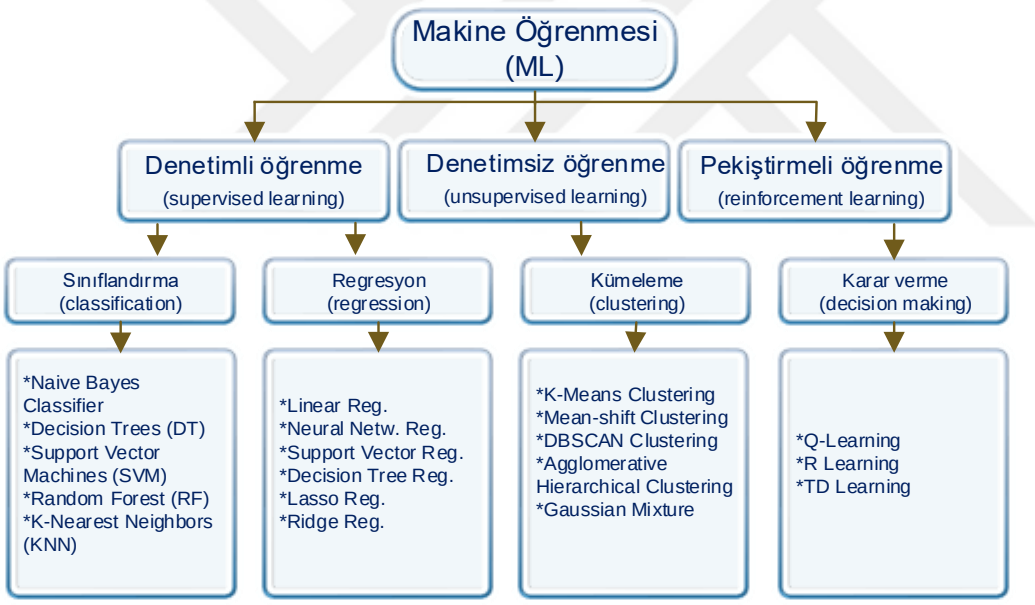
Optik performansın tahmin edilmesi ve izlenmesi, mevcut kaynakların en iyi şekilde kullanılmasını sağlamak ve esnekliği artırmak için yeni nesil fiber optik ve kablosuz dinamik ağların temel bir bileşeni olmalıdır. Kanal bozulmasının gerçek zamanlı ve sürekli olarak izlenmesi ve tahmin edilmesi dinamik optik ağlar için gereklidir. Optik iletişim için son zamanlarda ortaya çıkan makine öğrenimi teknikleri önemli bir rol oynamaktadır ve 6G ve ötesinde kablosuz ağlar için akıllı tekniklerden biri olarak devam edecektir [177, 178].

OPM, dinamik ve kendi kendine teşhis özelliklerine sahip verimli ve sağlam ağlar kurmaya dayalı olarak optik ağlardaki bozulma miktarını tahmin etmeyi amaçlayan bir tekniktir [8]. Benzer şekilde, etkili QoT tahmin araçları optik ağlar için çok önemlidir, yalnızca operatörlerin yeterli iletişim kaynaklarını yeterli marjlarla güvence altına almasını

sağlamakla kalmaz (böylece kaynak verimliliğini artırır), aynı zamanda çevik ağ izleme ve arıza tespitini de teşvik eder [179].

5.2. ML Yöntemleri

ML yöntemleri (Şekil 5.2), önceki verilere dayanarak geleceğin tahmin edilmesini, toplanan parametrelere dayalı olarak verilerin tahmin edilmesini, olasılıkların dağılımını, performansın sınıflandırılmasını, girdi verileri ile çıktı verileri arasındaki uyuşmanın karakterize edilmesini vb. içermektedir. Doğrusal Regresyon (LR), Karar Ağacı (DT), Rastgele Orman (RF), Destek Vektör Makinesi (SVM), ANN vb. gibi çeşitli makine öğrenimi teknikleri, sembollerin en iyi şekilde belirlenmesi için veri tanımlama ve kategorizasyon için kullanılmaktadır [178].



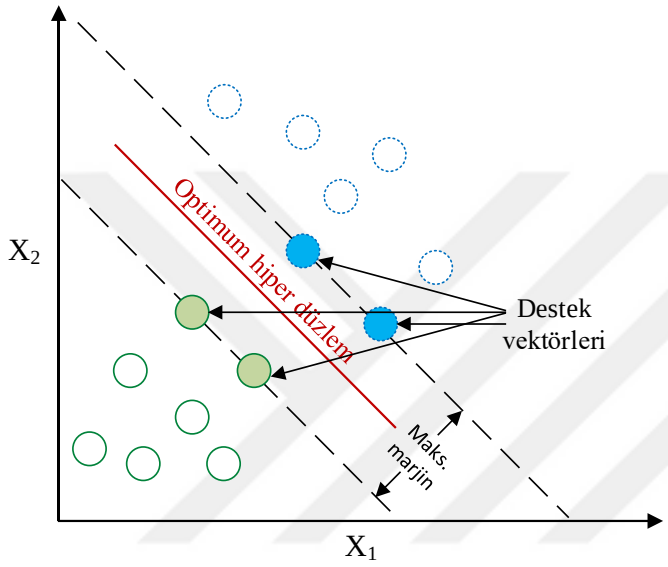
Şekil 5.2. Makine öğrenmesi algoritmaları [180]

Bu tez çalışmasında kullanılan bazı makine öğrenimi yöntemleri kısaca aşağıdaki kısmda açıklanmaktadır.

Destek vektör makinesi (Support vector machine-SVM)

SVM algoritması, düşük boyutlu girdi özelliklerinden oluşan bir alanı daha yüksek boyutlu bir çekirdek özellikleri alanına yansıtarak çalışır ve böylece problemi doğrusal bir problem

olarak ele almasını sağlar. SVM'nin birincil amacı, bu yüksek boyutlu uzayda, veri kümesindeki iki sınıf arasındaki marjı veya ayırma mesafesini en üst düzeye çıkaran optimum bir hiper düzlem bulmaktır. Bu maksimum marjlı hiper düzlemi tanımlayarak SVM sınıfları etkili bir şekilde ayırt eder ve Şekil 5.3'te gösterildiği gibi daha iyi genelleme ve sınıflandırma performansına yol açar. Bu nedenle SVM, maksimum marjlı bir sınıflandırıcı olarak nitelendirilir [64].



Şekil 5.3. SVM kullanarak veri seti sınıflandırması [172]

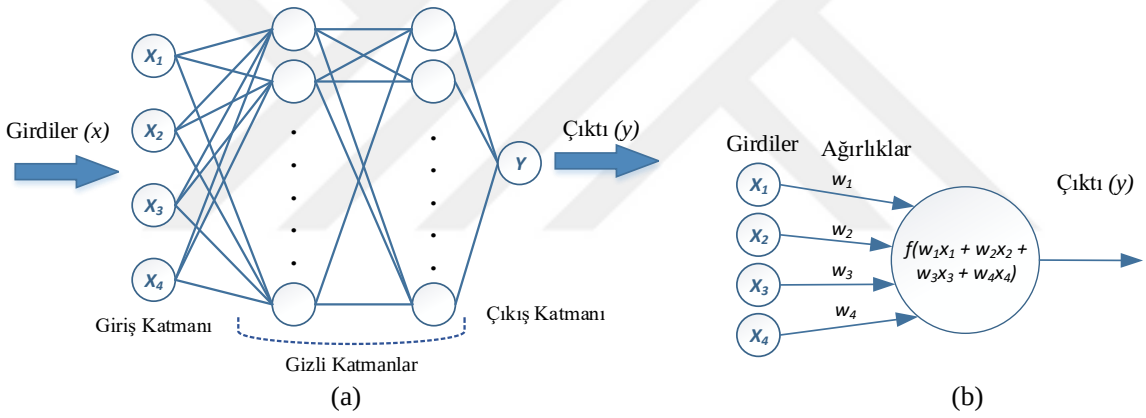
Destek Vektör Regresyonu (SVR), SVM tipi bir regresyon modelidir ve çekirdek fonksiyonlarına dayanmaktadır. Bu nedenle parametrik olmayan bir teknik olarak kabul edilir. SVR, girdi verilerindeki iki sınıfı en iyi şekilde ayıran optimum hiper düzlemi bulmayı hedeflemektedir. SVR'deki amaç, hedef değişkeni doğru bir şekilde tahmin eden en iyi uyumu bulmak ve aynı zamanda aşırı uyumu önlemek için karmaşıklığı en aza indirmektir. SVR modeli, eğitim noktalarının çoğunun bu hiper düzlemin etrafındaki bir marjın (ε) içinde olduğu regresyon işlemi için en uygun regresyon hiper düzlemini bulmaktadır [103].

SVR, doğrusal regresyonun yanı sıra doğrusal ve doğrusal olmayan sınıflandırma gibi çeşitli görevleri yerine getirebilen, yaygın olarak kullanılan bir denetimli öğrenme modelidir. Ayrıştırıcı bir model olan SVR, etiketli eğitim verilerine dayalı olarak girdi verilerini farklı kategorilere en iyi şekilde ayıran en iyi hiper düzlemi oluşturur. Doğrusal SVR'de amaç,

farklı kategorilere ait veri noktaları arasında mümkün olan en iyi ayrımı sağlayarak iki sınıf arasındaki marjı maksimize eden bir hiper düzlem belirlemektir [7, 177, 181].

Yapay sinir ağı (Artificial neural network-ANN)

İnsan beynindeki sinir hücrelerinin biyolojik yapısını model alan ANN'ler, hesaplamalı öğrenme ve karar verme süreçleri için bir çerçeve sağlar (Şekil 5.4(a)). Bir ANN'nin temel birimi nöron (*f(.) = aktivasyon fonksiyonu*) olarak bilinmektedir (Şekil 5.4(b)). Bir ANN'de nöronlar katmanlar halinde organize edilir ve her katman ağ boyunca bilgi yaymak için birbirine bağlanır. Bilgi ağ boyunca ilerlerken, çıktı katmanına ulaşana kadar çeşitli dönüşümlerden geçer. ANN algoritması, ağın çıktısının hedef değerlerle yakından uyumlu olmasını sağlamak için her nöronun parametrelerine ince ayar yapmayı amaçlar [64].



Şekil 5.4. (a) ANN temel yapısı (b) Yapay nöron yapısı

Sinir ağları, en yaygın kullanılan makine öğrenimi modellerinden biri olarak son yıllarda önemli bir popülerlik kazanmıştır. Özellikle, Derin Sinir Ağları (DNN), birden fazla gizli katman içeren ve verilerdeki karmaşık yapıları ile dikkat çeken bir modeldir.

Bir yapay sinir ağı, deneysel veriler kullanılarak eğitilebilen, birbirine bağlı bir dizi yapay nörondan oluşur. Nöron, bir ANN'nin tasarımında temel yapı taşı olarak hizmet eder ve tipik olarak, bir yapı üretmek için katmanlar halinde organize edilmiş birden fazla nöron kullanılır. Bir sonraki nöron katmanına girdi olarak hizmet eden giriş katmanı, eğitim seti örneklerinden elde edilen değerlerden oluşur. Bir sonraki katman gizli katman olarak adlandırılır ve bir ANN, her biri bir veya daha fazla nöron içeren bir veya daha fazla gizli

katmana sahip olabilir. Son olarak, çıktı katmanı işlenen bilgilere dayalı olarak tahmin edilen çıktıyı üretir [181].

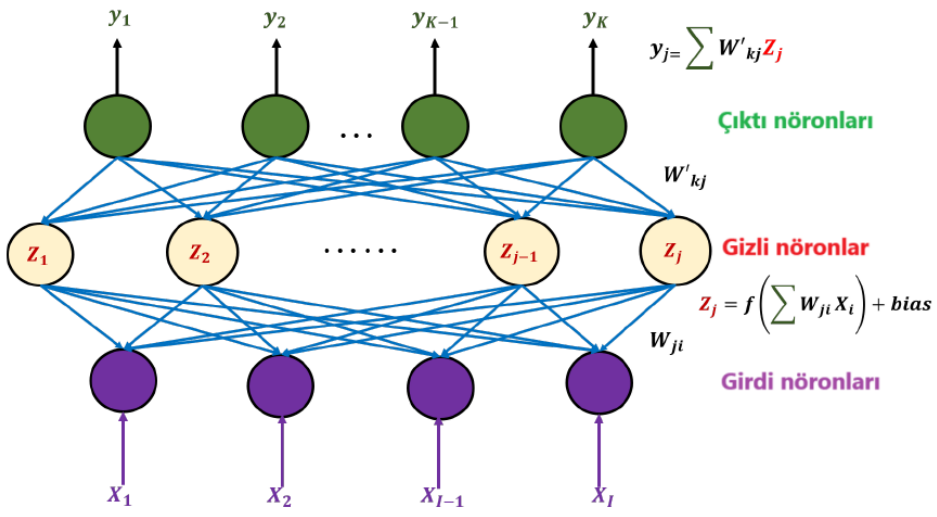
ANN, birden fazla girdi alan ve tek bir çıktı oluşturan birbirine bağlı doğrusal olmayan aktivasyon birimlerinden oluşmaktadır. Giriş $\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \ldots, x_n]$, ağırlık $\boldsymbol{w} = [w_1, w_2, \ldots w_n]$, bias θ ve aktivasyon fonksiyonu $f(.)$ tek bir nöronun çıkışını hesaplamak için gerekli parametrelerdir. Çıktı bir eşikten büyükse, nöron tetiklenir ve çıktısı O aşağıdaki gibi olur [177].

$$O = f\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i - \theta\right) \tag{5.1}$$

Eş. 5.1'de x_0=−1 ve w_0=θ olarak varsayılırsa eşitlik aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir:

$$O = f\left(\sum_{i=0}^{n} w_i x_i\right) \tag{5.2}$$

Şekil 5.5'te bir ANN modeli gösterilmektedir. Bir katmanda veya vektörde düzenlenen nöronlar, bir sonraki katmandaki nöronların tamamına veya bir kısmına bağlanabilir. Bu katmanların çıkışı bir sonraki katmanın girişi olarak kullanılır. Nörona giren ağırlıklı veri sinyali, ağdaki bilgi aktarımını taklit etmek için sinir hücresinin elektriksel uyarımını simüle eder.



Şekil 5.5. ANN fonksiyon yapısı [182]

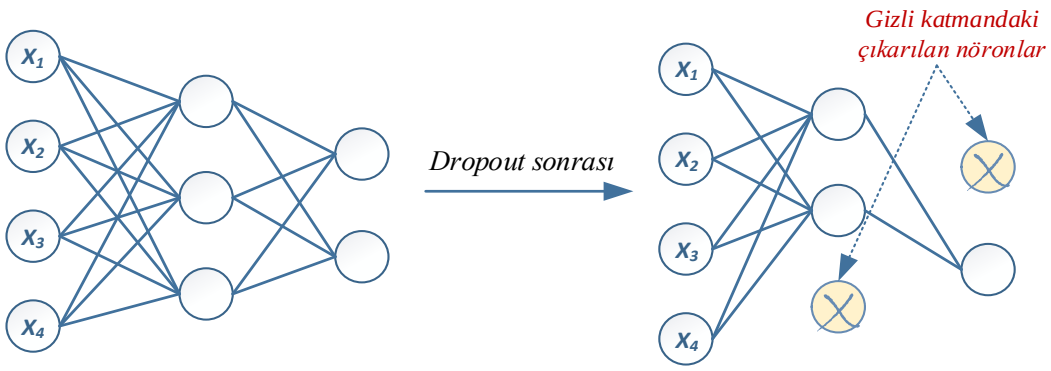
Şekil 5.5'te, girdi değerleri (X_i) bağlantı ağırlıkları ($W_{j,i}$) ile çarpılmaktadır. Bağlantılarda bulunan ağırlık değerleri ayarlanarak ANN'nin öğrenme sistemi simüle edilmektedir. Sonrasında girdi-çıktı ilişkisi gizli katmanlarda bulunan aktivasyon fonksiyonlarının (örn.: *sigmoid, tanh* ve *Relu*) etkisi ile birlikte daha karmaşık bir yapı olarak modellenmektedir.

Sonuçta elde edilen aktivasyon fonksiyonu ve çıktı foknsiyonu sırasıyla aşağıdaki şekildedir.

$$Z_j = f\left(\sum W_{ji}X_i\right) + bias \tag{5.3}$$

$$y_i = \sum W'_{kj}Z_j \tag{5.4}$$

Aşırı uyumu önlemek için eğitime dropout'lar (bırakma) eklenebilir. Bu, bir dizi eğitim verisi işlenirken gizli katmandan bir dizi nöronun rastgele çıkarılmasını içerir ve sinir ağının eğitim verilerine aşırı uyum sağlamasını önler. Daha sonra, bu değiştirilmiş ağ, ilave nöronları ortadan kaldırmak için kullanılır ve ağ içindeki parametrelerin bir dizi güncellemesini kolaylaştırır (Şekil 5.6) [20].



Şekil 5.6. ANN dropout işlemi

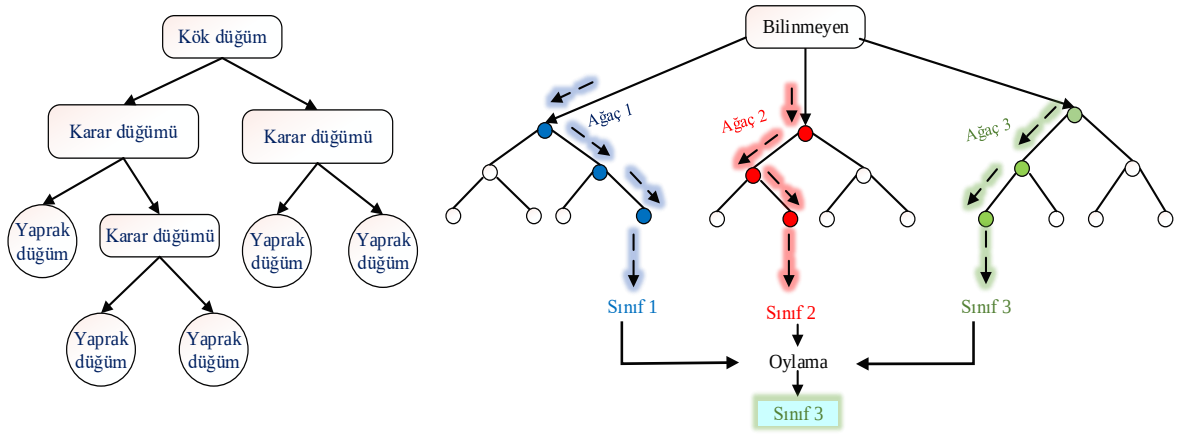
Dropout, aşırı uyumu azaltmaya yardımcı olmak için tasarlanmış bir düzenleme tekniğidir. Bir model, sınırlı veriye sahip olduğunda veya son derece karmaşık olduğunda, eğitim verilerini ezberleme eğiliminde olabilir, bu da eğitim sırasında karşılaştığı veriler üzerinde mükemmel performansa, ancak görülmeyen yeni veriler üzerinde düşük performansa yol açabilir. Bu olgu aşırı uyum olarak bilinir ve dropout bu sorunu hafifletmeyi amaçlamaktadır.

Karar ağacı ve rasgele orman (DT ve RF)

DT, girdi ve yanıt değişkenleri arasında doğrudan ilişkiler sağlayan bir karar analizi yöntemidir ve adını, veri seti özelliklerinin farklı yönlerinin analiz edilmesiyle verilen kararların grafiksel olarak bir ağaç gibi çizilmesinden alır. [7]. DT, sınıflandırma görevlerinin yanı sıra regresyona da uygulanabilen, yaygın olarak kullanılan bir denetimli öğrenme yöntemidir. Veri kümesini ağaç şeklinde bir konfigürasyonda düzenleyerek net ve kolay açıklanabilir bir model sağlar. Böyle bir yapılandırmada, kök düğüm tüm veri kümesini sembolize eder, dallar özniteliklerin değerlerinden türetilen karar kurallarını yansıtır ve yaprak düğümleri nihai çıktıları veya tahminleri gösterir (Şekil 5.7(a)) [183].

Bir DT regresyon modeli, toplam veri setini eşdeğer örnekleri içerecek şekilde daha küçük alt kümelere bölerek ve ayrıştırarak bir ağaç yapısı oluşturan bir kök düğümden oluşturulmaktadır. Karar Ağaçları her soru için hata fonksiyonunu yeniden hesaplar ve bilgi kazanımını en üst düzeye çıkarmak için en küçük hataya sahip durumu veya soruyu seçer [103].

DT gibi, RF yöntemi de regresyon ve sınıflandırma görevleri için ML'de yaygın olarak uygulanmaktadır. Topluluk öğrenimini kullanan RF, tahminler üretmek için bir dizi karar ağacını bir araya getirir. (Şekil 5.7b)). Bir RF'de her karar ağacı, rastgele seçilen öznitelikler ve bir eğitim verisi alt kümesi kullanılarak bağımsız olarak oluşturulmaktadır. Rastgele orman, tüm ayrı ağaçlardan gelen tahminleri (karar ağacı dizisi: $DT = \{dt_1\ dt_2 \cdots dt_n\}$) birleştirerek ve regresyon görevleri için bileşen ağaçlardan gelen tahminlerin ortalamasını alarak veya sınıflandırma görevleri için çoğunluk oylamasıyla nihai çıktıyı belirlemektedir [177, 183].



Şekil 5.7. (a) Karar ağacı ve (b) Rasgele orman şematik diyagramları

Doğrusal ve çoklu doğrusal regresyon

Doğrusal Regresyon (LR) iki değişken arasındaki ilişkiyi modelleyen ve inceleyen bir algoritma iken, Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) birden fazla bağımsız değişken ile bir bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi doğrusal bir denklemle analiz etmektedir.

MLR, bir bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi doğrusal bir denklem kullanarak modellemektedir. n istatistiksel birimin veri kümesi için doğrusal regresyon modeli, regresörlerin p-vektörü (x_i) ile bağımlı değişken ($\hat{y}$) arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu varsayar. Bu ilişki, doğrusal ilişkiye gürültü ekleyen bir bozucu rasgele hata değişkeni (e) ile modellenmektedir:

$$\hat{y} = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + \cdots B_p x_p + e \tag{5.5}$$

Eş. 5.5'te B_0 , bağımsız $x_1, x_2, \ldots, x_p$ değişkenlerinin tamamı 0'a eşit olduğunda y'nin değerini, $B_1, B_2, \ldots, B_p$ değerleri ise tahmin edilen regresyon katsayılarını göstermektedir [12].

6. TASARIMI YAPILAN SİSTEMLER VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu bölümde tez çalışması kapsamında değerlendirilen hibrit kablosuz haberleşme sistemleri hakkında çalışma prensipleri ve detayları hakkında bilgiler verilmiş, hibrit sistemlerinin simülasyon ortamında benzetimleri yapılmış ve ayrıca ML yöntemleri kullanılarak yapılan modellemeleri ile tahmin performansları analiz edilmiştir.

Alt bölümlerde sırasıyla, OOK-RoFSO, QAM/PSK-RoFSO, RoFSO-VLC, FSO-VLC ve RF/FSO-VLC hibrit kablosuz haberleşme sistemlerinin optik tasarımı, elde edilen sonuçları ve farklı ML yöntemleri kullanılarak ve tahmin modelleri oluşturularak performans iyileştirme, farklı sistemler arası anahtarlama ve performans izeleme gibi işlemler yapılmaktadır.

Bahsedilen hibrit sistemlerin optik tasarımları Optisystem optik simülasyon programının farklı versiyonları kullanılarak, ML yöntemleri ile modellenmesi ve yapay zeka işlemleri ise Matlab ve Python programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

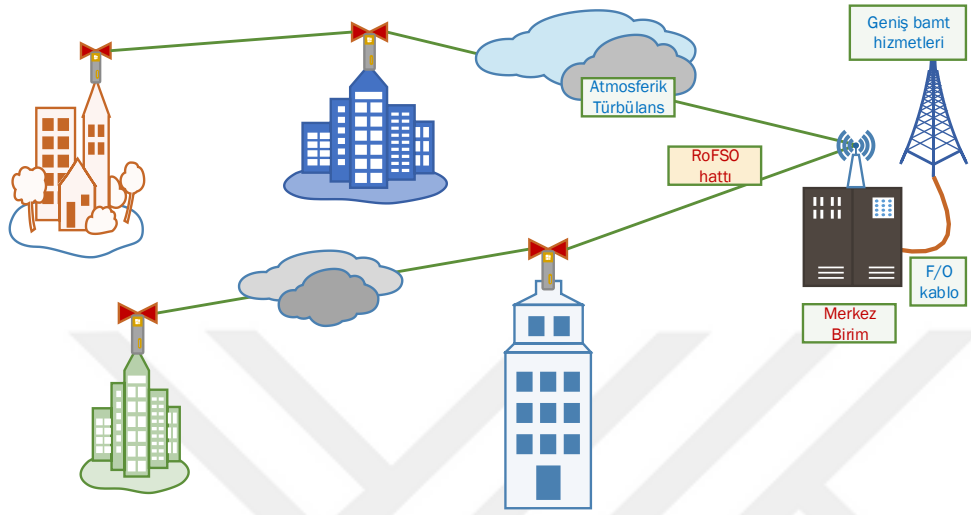
6.1. RoFSO Hibrit Haberleşme

FSO teknolojisi, radyo frekansı girişimine karşı bağışıklık, yüksek veri hızı, düşük güç, yüksek güvenlik, düşük maliyet ve yüksek bant genişliği gibi birçok avantaj sağlar. Işık, verici ve alıcı kısım arasında atmosferden geçerken sis, yağmur, pus, kar ve duman gibi hava koşullarından oldukça etkilenir. Sis, iletim sinyalinde bozulmaya neden olan ana zayıflama kaynağı olarak kabul edilir [163].

FSO haberleşmesi, fiber optik mevcut olmadığında potansiyel olarak potansiyel bir alternatif haline gelmektedir. Fiber optik iletişime benzer avantajlarının yanı sıra kolay, lisanssız ve ekonomik kurulum gibi özelliklere de sahiptir. Kablosuz FSO bağlantıları, fiber dağıtımının fiziksel kısıtlamalarından bağımsız olarak RF sinyallerini serbest uzay üzerinden iletebilmektedir. Bu nedenle yakın zamanda RoFSO adı verilen bir sistem önerilmiştir [133].

Şekil 6.1'de görülen RoFSO iletişim sistemi, RF sinyallerinin bir lazer kaynağı veya ışık yayan diyotlar gibi bir optik dalga ile modüle edilerek bir FSO kanalı üzerinden iletilmesi

işlemini gerçekleştirmektedir. RoFSO teknolojisi, mevcut kablosuz ağdaki RF spektrumunun tıkanıklığından kaynaklanan birçok soruna çözüm sağlayabilecek özelliklere sahiptir [163].



Şekil 6.1. RoFSO transmisyon sistemi

Milimetre dalga bandının (20-40 GHz), 4G'ye kıyasla 10 000 kullanıcıyı destekleyebilecek 10 Gb/s'nin üzerinde veri hızları, optimize edilmiş gecikme süresi (mikrosaniye mertebesinde) ve farklı ağların uyumlu kullanımı gibi 5G ağlarının temel özelliklerini sağlaması önerilmektedir. Mm-dalga üretimini kullanan FSO bağlantısı üzerinden radyo, düşük maliyeti ve gelişmiş iletim performansı nedeniyle çok umut vericidir. Milimetrik dalgaları FSO ile birleştiren RoFSO sistemi, gelişmiş veri hızları ve güvenli yapısı nedeniyle iyi performans sağlarken kolayca uygulanabilmektedir [3, 159].

RoFSO ve MIMO FSO sistemleri, bireysel teknolojinin sınırlamalarını ortadan kaldırarak ultra yüksek hızlı 5G/B5G talebini desteklemektedir. FSO; kablosuz video iletimi, veri merkezleri karasal iletimi, mobil hücresel ağlar, Yerel Alan Ağı (LAN) bağlantısı, son mesafe çözümleri, uzaktan algılama, uzay haberleşmesi, radyo astronomi, vb. gibi hem dış hem de iç mekân hizmetlerinde geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır [96].

5G'nin öngördüğü artan kapasite ve veri hızları, şu anda 3G ve 4G sistemlerinde kullanılanların ötesinde daha geniş spektrum ve verimli teknolojiler gerektirmektedir. Bu nedenle, radyo frekanslarının optik bir sinyal üzerine gömülmesi ve bir radyo-optik sistem

(RoF veya RoFSO) oluşturulması, bant genişliği sorununun yanı sıra kalabalık ve frekans tahsisi endişelerine de umut verici bir çözüm sunmaktadır [184].

Ayrıca, RoFSO sistemleri, merkezi baz istasyonu, el değiştirme (handover), kodlama-kod çözme, modülasyon-demodülasyon, frekans yukarı ve aşağı dönüştürme ve çoklama-çoklama çözme gibi sinyal işleme aşamalarındaki pahalı donanımın çoğunu paylaştığı için maliyet açısından da etkindir [185].

RoF, diğer elektrik sinyal ortamlarına kıyasla daha düşük iletim kayıpları ve elektromanyetik girişimle radyo sinyalinin bir fiber optik bağlantı üzerinden yayılmasına olanak tanıyan yerleşik bir teknolojidir. RoF teknolojisi, RF ve optik iletişim sistemlerinin avantajlarını birleştirmektedir [137, 168].

RoF yerleşik bir teknoloji olmasına rağmen, kablo altyapısı gereksinimi, benzer uygulamalar için cazip bir alternatif olarak RoFSO ile sonuçlanmıştır. RoFSO bağlantıları, fiber kullanımının pahalı veya imkansız olabileceği kentsel, alt kentsel ve yetersiz hizmet alan bölgelerde fiber yedekleme veya geniş bantın genişletilmesi için kullanılabilmektedir. İletilen sinyaller yağmur, pus, sis, dolu vb. hava koşullarının neden olduğu dalgalanmalara karşı hassastır. RoFSO sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliği, farklı çevresel koşulların ve atmosferik türbülansın neden olduğu zayıflama veya yayılma kaybının bir sonucu olarak bozulabilmektedir [178].

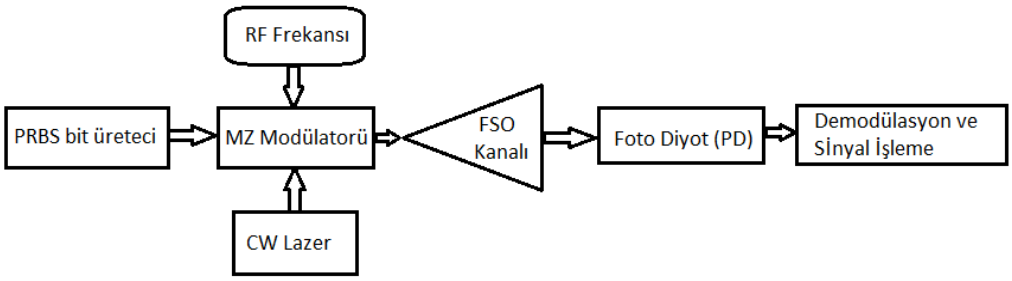
RoF sistemlerinin aksine, dış mekan FSO sistemlerinin genel performansı hava koşullarına ve iletim yolunun özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Yani, optik kablosuz sistemler doğal olarak atmosferik zayıflama ve sintilasyon etkilerine eğilimli olmaktadır. Türbülans kaynaklı sönümleme olarak da bilinen sintilasyon, havanın kırılma indisinde termal olarak indüklenen değişikliklerin bir sonucu olarak alınan sinyallerde ışınım dalgalanmalarına neden olmaktadır [186].

Özellikle felaket kurtarma ve diğer acil durum iletişim senaryoları için, geleneksel RF sistemi, iletişimin hızlı ve ucuz bir şekilde kurtarılması ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu nedenle, açık havada konuşlandırılan RoFSO şeması, doğası gereği yüksek güvenlik, dağıtım kolaylığı, yüksek bant genişliği ve sağlamlık nedeniyle aktif olarak tartışılmaktadır [187].

6.1.1 OOK-RoFSO performans analizi

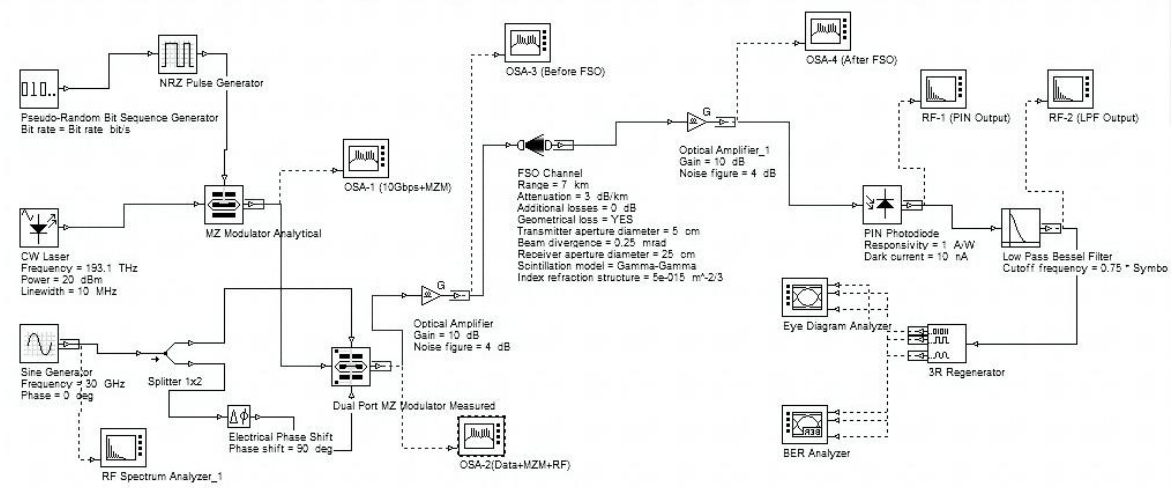
Atmosferik türbülans, sıcaklık ve basınç gibi atmosferdeki değişimlerden kaynaklanan ve atmosferin kırılma indisinde ve iletim ortamında değişikliklere neden olan, rastgele bir olaydır. Sinyal enerjisinin yeniden dağıtılması nedeniyle bu durum alınan sinyalin gücünde ve fazında dalgalanmalara yol açmaktadır. İki faktörün homojen olmayan bu yapısı, yayılan ışına yapıcı veya yıkıcı bir şekilde müdahale eden türbülanslı bir hücre yaratmaktadır [9].

Bu çalışmada tasarımı yapılan Şekil 6.2'deki RoFSO hibrit sistemi analizi çalışmasında Optisystem yazılımı kullanılarak oluşturulan ve Şekil 6.3'te görülen simülasyon devresi ile farklı parametrelere göre performans incelemesi yapılmıştır.



Şekil 6.2. Benzetimi yapılan RoFSO devre şeması

BER analizi, kısa bir bit dizisinin iletimi ile birlikte Gauss algoritmasına dayalı olarak bit hata oranını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Q faktörü ise, bir iletişim kanalının performansını belirlemek için alternatif bir göstergedir. Q faktörü özellikle BER ile ilişkilidir. Q faktörünün değeri ne kadar büyükse, sinyalin kalitesi o kadar iyi olmaktadır.



Şekil 6.3. Optisystem RoFSO simülasyon devresi

Şekil 6.3'teki simülasyon devresinde OOK ile modüle edilen 10 Gb/s veri MZM kullanılarak Sürekli Dalga (CW) lazer kaynak sinyali ile modüle edilir. Sonrasında elde edilen sinyal tekrar MZM kullanılarak 60 GHz RF sinyali ile modüle edilerek ve optik yükselteçler kullanılarak FSO kanalı üzerinden iletilmektedir. Alıcı tarafındaki fotodiyot gelen optik sinyali elektriksel sinyale dönüştürmekte ve performans analizi amacıyla göz diyagramı ve BER analizörüne iletilmektedir.

Tasarımı gerçekleştirilen sistemde sisli ve yağışlı atmosfer koşullarını temsil eden 6 farklı zayıflama değeri (1-12 dB/km) için performans analizi gerçekleştirilmektedir. Sistem 7 farklı FSO bağlantı mesafesine (1-7 km) ve 5 farklı CW lazer güç değerlerine (0-20 dBm arası) sahip kanaldan oluşmaktadır (Çizelge 6.1). Sistemde sabit değer olan 10 Gbps veri hızı ve 60 GHz taşıyıcı frekans için Q-faktör ve BER performansı analiz edilmektedir.

Çizelge 6.1. Tasarımı gerçekleştirilen RoFSO sistem özellikleri

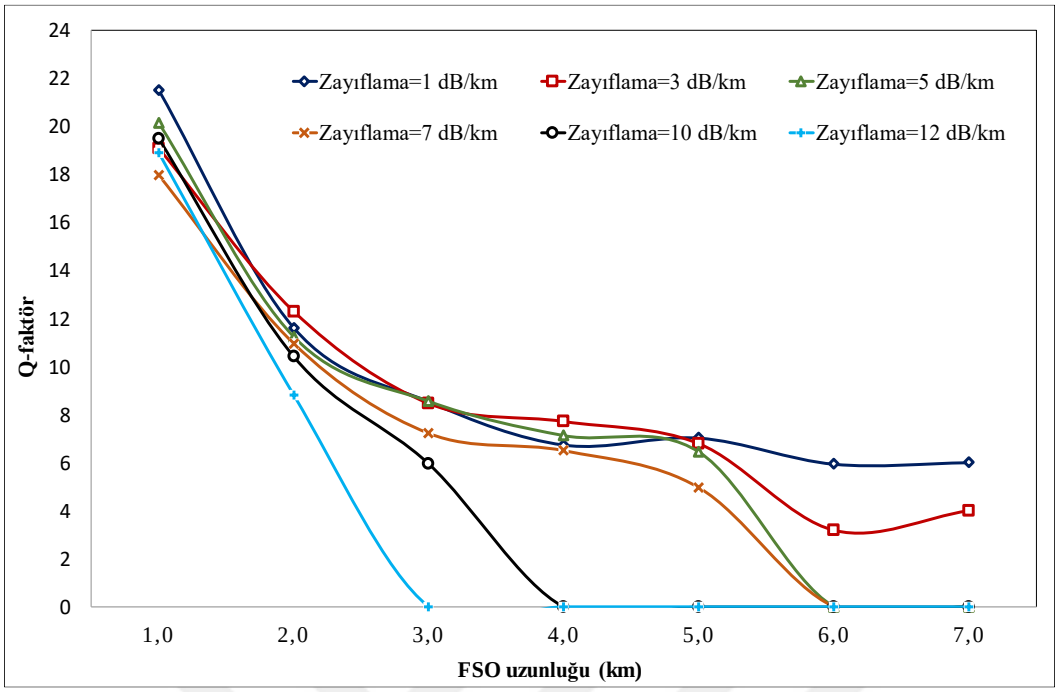
Sistem Parametresi	Değeri
İletim hızı	10 Gb/s
Dalga boyu	1550 nm
FSO Link uzunluğu	1-7 km
CW lazer gücü	0-20 dBm

Çizelge 6.1.(devam) Tasarımı gerçekleştirilen RoFSO sistem özellikleri

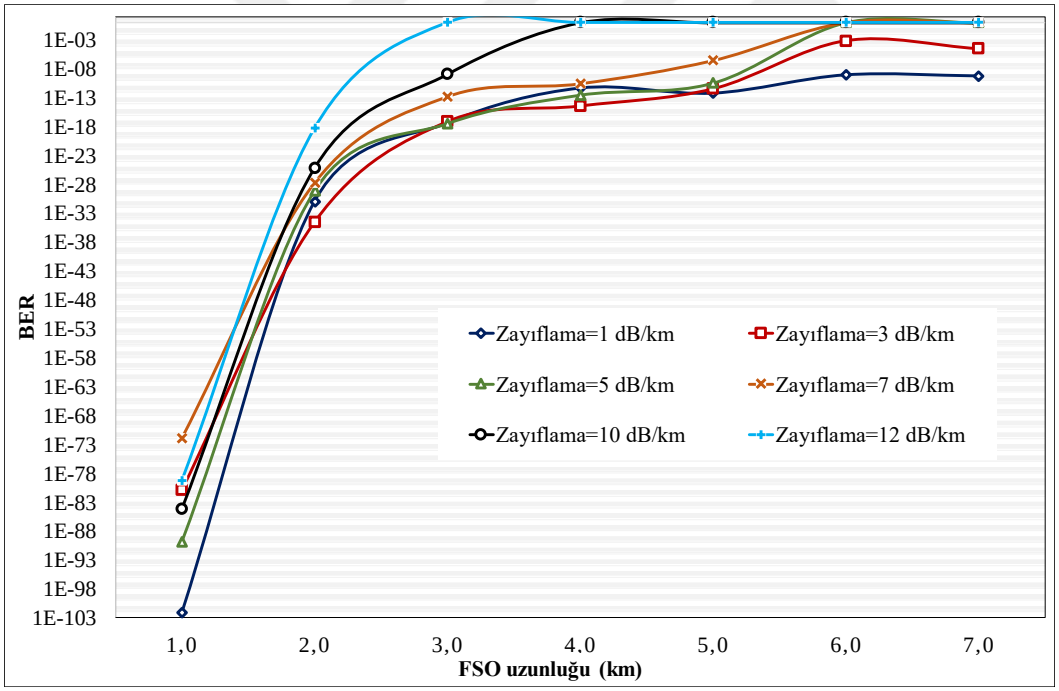
RF Frekansı	60 GHz
Gönderici açıklık çapı	5 cm
Alıcı açıklık çapı	25 cm
Işın ıraksaması (diverjans)	0,25 mrad
Atmosfer zayıflaması	1-12 dB/km
Atmosfer türbülans modeli	Gamma-gamma

Şekil 6.4'te CW lazer gücü sabit 5dBm değerinde iken, farklı FSO link uzunlukları ve zayıflama değerleri için elde edilen (a) Q faktörü ve (b) BER grafiklerine göre; Q-faktör değerlerinin 12, 10, 7-5 dB/km zayıflama değerlerinde sırasıyla 3, 4 ve 6 km'de 20'den 0'a düştüğü, 1 ve 3 dB/km zayıflamada ise 7 km ve ilerisi için 4-6 aralığında kaldığı görülmektedir. BER değerleri ise, Q-faktör ile ters orantılı olacak şekilde, mesafe ve zayıflamanın artışıyla birlikte yaklaşık 10^{-103} - 10^{-73} aralığından 10^{-8} - 10^{-2} aralığına yükselmektedir.

Şekil 6.5'teki göz diyagramlarında ise; 1 dB/km FSO kanal zayıflaması ve 7 km FSO link mesafesi için (Şekil 6.5(a)) göz açıklığının daha görülebilir ve düzgün olduğu, dolayısıyla sinyalin hata oranının düşük olduğu, diğer taraftan Şekil 6.5(b)'de 12 dB/km FSO kanal zayıflaması ve 7 km FSO link mesafesinde atmosferik türbülans kaynaklı zayıflamanın sinyaldeki bozucu etkisi göz diyagramında oluşan bozulma ve karmaşık yapı ile birlikte net bir şekilde görülebilmektedir.

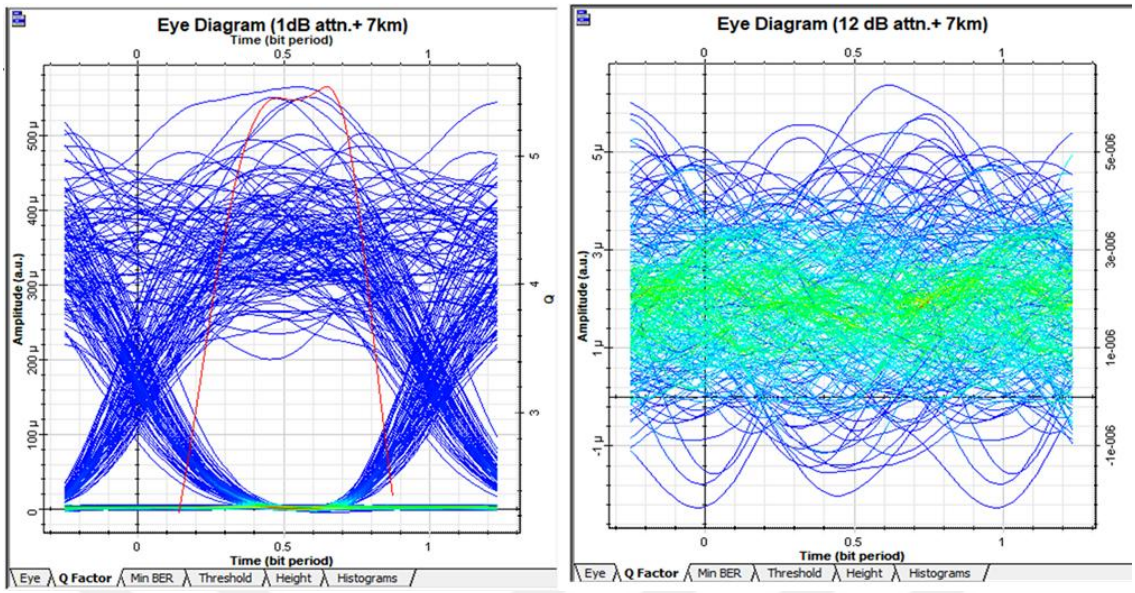


(a)



(b)

Şekil 6.4. Farklı FSO uzunluğu ve zayıflama değerleri için a) Q-faktör ve b) BER değerleri

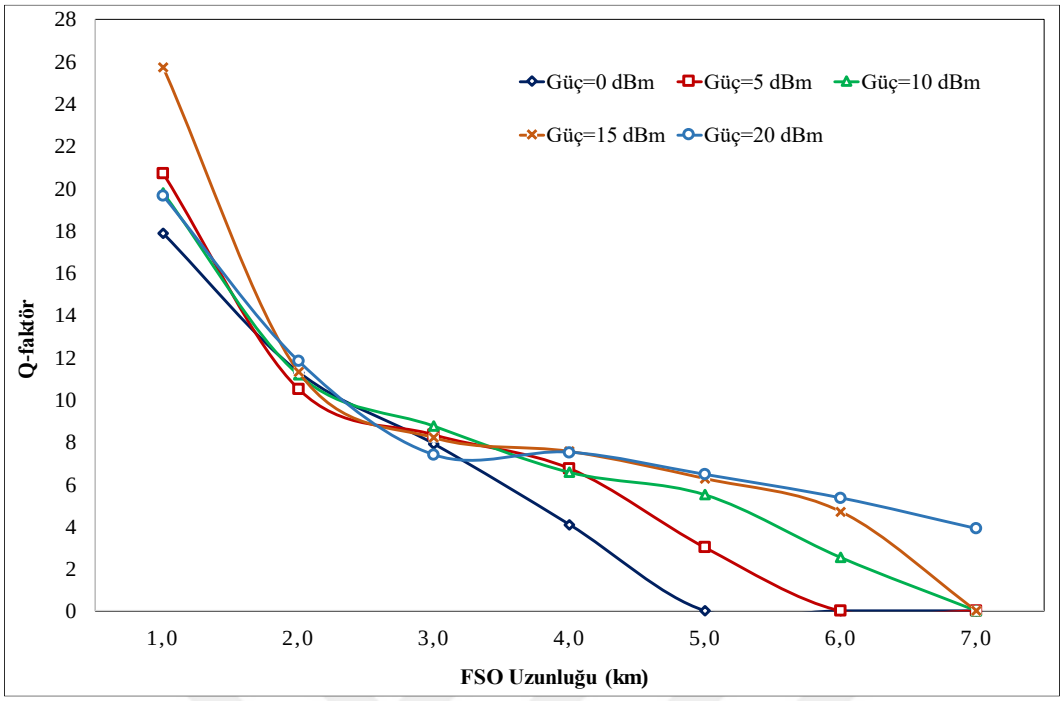


(a) (b)

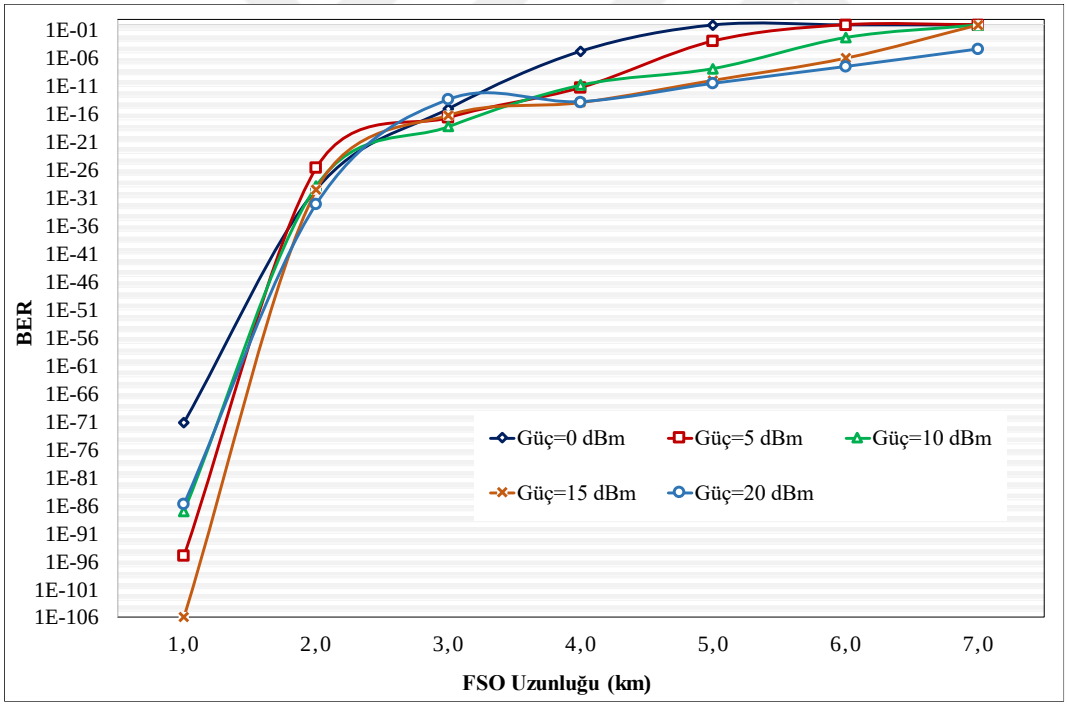
Şekil 6.5. Farklı FSO zayıflama ve hat uzunluğu değerlerinde göz diyagramları

Şekil 6.6'da FSO link zayıflama değeri sabit 5dB/km iken, farklı FSO link uzunlukları ve CW lazer gücü değerleri için maksimum (a) Q faktörü ve (b) BER grafiklerine göre; Q-faktör değerlerinin 0, 5 ve 10 dBm Lazer gücü değerlerinde sırasıyla 5, 6 ve 7 km de 18-21 aralığından 0'a düştüğü, 15 ve 20 dBm güçte ise 7 km ve ilerisi için 5 civarında kaldığı görülmektedir. BER değerleri ise, Q-faktör ile ters orantılı olacak şekilde, mesafenin artması ve gücün azalması ile birlikte yaklaşık 10^{-106} - 10^{-71} aralığından 10^{-6} - 10^{-1} aralığına yükselmektedir.

Şekil 6.7'deki göz diyagramlarında ise; 0 dBm lazer gücü ve 7 km FSO link mesafesi için (Şekil 6.7(a)) lazer gücünün azalması nedeniyle sinyaldeki bozulmanın göz diyagramında oluşan bozulma ve karmaşık yapı oluşturduğu, 20 dBm lazer gücü ve 7 km FSO link mesafesi için ise (Şekil 6.7(b)) lazer gücündeki artış ile birlikte göz açıklığının daha görülebilir ve düzgün olduğu, dolayısıyla sinyalin hata oranının düşük olduğu görülebilmektedir.

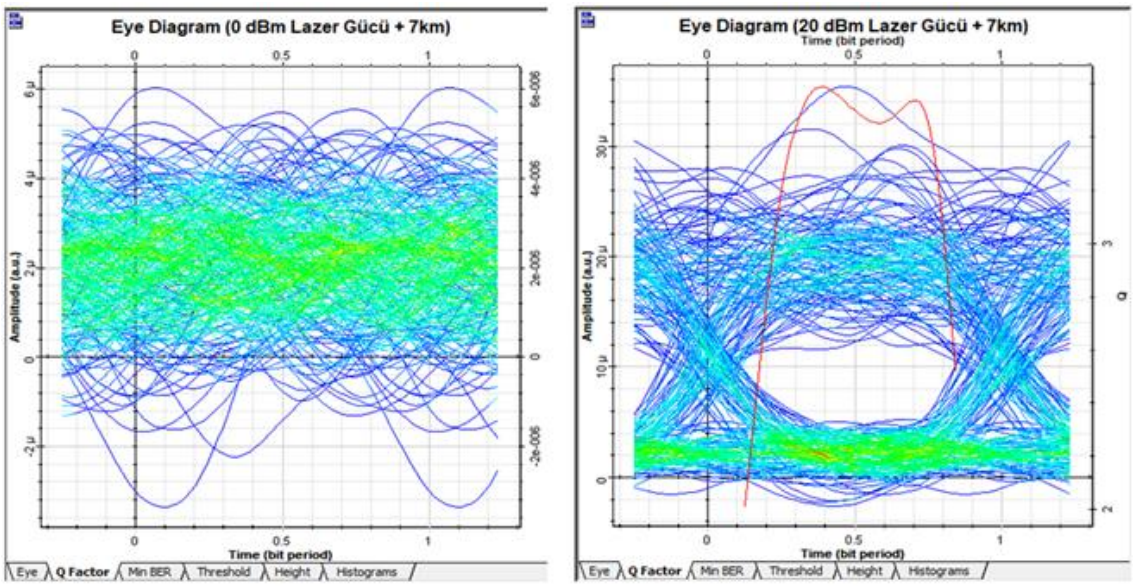


(a)



(b)

Şekil 6.6. Farklı FSO uzunluğu ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör ve b) BER değerleri



(a) (b)

Şekil 6.7. Farklı lazer gücü ve hat uzunluğu değerlerinde göz diyagramları

6.1.2 QAM/PSK-RoFSO performans analizi

FSO haberleşme (FSOC) teknolojisi, çok yüksek veri hızlarına (Gb/s seviyesi) izin veren geniş bir optik bant genişliğine (THz seviyesi) sahip, sinyal kesintilerine ve yüksek güç yoğunluğuna karşı gelişmiş güvenlik sağlayan, minimum sapma ile oldukça yönlü bir ışın kullanmaktadır. Lisans gerektirmeyen bir teknoloji olarak, daha düşük güç tüketimi ve daha az sistem kütlesi gerektirmektedir. Ayrıca, FSOC performansını iyileştirmek için etkili bir yaklaşım, bant genişliği verimliliğini en üst düzeye çıkarırken kanal bozulmasına ve gürültüye karşı yüksek direnç sağlayan optimum bir modülasyon yöntemi seçmektir [2, 174].

Öncelikle iki temel husus çoğu kablosuz haberleşme sisteminin performansını belirlemektedir: güç ve bant genişliği verimliliği. Güç verimliliği, sistemin kanal dağıtımını bozmadan minimum güç kullanarak mesaj iletme kabiliyetini ifade ederken, bant genişliği verimliliği bir modülasyon tekniğinin bir içeriği kısıtlı bir frekans bandına yerleştirme kabiliyetini temsil etmektedir. Kablosuz iletişimde kullanılan temel sayısal modülasyon yöntemleri arasında Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK), Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK), Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK) ve QAM bulunmaktadır [2].

Bu kısımda, optik haberleşme sistemlerinde kullanılan temel modülasyon yöntemleri olan QAM, PSK ve OOK ele alınmış ve Optisystem optik simülasyon yazılımı kullanılarak bir RoFSO sisteminin tasarımı ve performansı incelenmiştir. QAM-RoFSO ve PSK-RoFSO haberleşme sistemlerinde Q-faktörü, BER değerleri, göz ve konstelasyon (kümelenme) diyagramları farklı performans parametreleri (4-QAM, 16-QAM, QPSK, 16-PSK, farklı atmosferik koşullar için FSO zayıflaması, CW lazer gücü, FSO bağlantı mesafesi) ile karşılaştırılarak sistem performansı değerlendirilmiştir.

Ayrıca, optik simülasyon ile elde edilen veriler Python™ programı üzerinde kullanılarak farklı ML yöntemleri (DT, RF, SVR, MLR ve ANN) ile tahmin modelleri oluşturulmuş ve bu modellerin performansı incelenmiştir.

Literatürdeki RoFSO ve farklı modülasyon türleri için performans analizi amacıyla ML yöntemleri kullanımıyla ilgili çalışmalara bakıldığında, farklı QAM modülasyon seviyeleri ve ML yöntemleri (ANN, KNN ve DT) yöntemleri kullanılan benzer bazı örnekler [178, 188, 189] yer almakla birlikte, RoFSO sisteminin QAM ve PSK modülasyon türleri için perfromans karşılaştırması ve ML yöntemleri ile tahmin modeli çalışması bilindiği kadarıyla bulunmamaktadır.

FSO kanal modeli

FSO için Gamma-gamma sönümlemeli kanal modeli, zayıf ve güçlü atmosferik türbülans ortamlarını temsil edebilen bir model olduğundan, farklı modülasyon teknikleri için sistemin simülasyonunu sağlamaktadır.

Gamma-gamma kanal modelinin PDF'si aşağıdaki şekildedir [190]:

$$p(I_n) = \frac{2(\alpha_n\beta_n)^{\frac{\alpha_n+\beta_n}{2}}}{\Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} I_n^{\frac{\alpha_n+\beta_n}{2}-1} K_{\alpha_n-\beta_n}\left(2\sqrt{\alpha_n\beta_n I_n}\right), \quad I > 0 \tag{6.1}$$

Formülde I ışıma şiddetini (yoğunluğunu), $\Gamma(.)$ ve $K_v(.)$ ise sırasıyla gamma fonksiyonunu ve ikinci türden v dereceli Bessel fonksiyonunu ifade etmektedir. Sırasıyla küçük ve büyük ölçekli etkin türbülans sayılarını ifade eden α_n ve β_n aşağıdaki şekildedir:

$$\alpha_n = \left[exp\left(\frac{0.49\delta_n^2}{\left(1 + 0.18d_n^2 + 0.56\delta_n^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (6.2)$$

$$\beta_n = \left[exp\left(\frac{0.51\delta_n^2 \left(1 + 0.69\delta_n^{\frac{12}{5}}\right)^{-5/6}}{\left(1 + 0.9d_n^2 + 0.62d_n^2\delta_n^{\frac{12}{5}}\right)^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (6.3)$$

Formülde $d_n = \sqrt{kD^2/4L}$ ve $k = 2\pi/\lambda$ (λ=dalgaboyu) dalga numarasını, L bağlantı mesafesini ve D ise alıcının açıklık çapını ifade etmektedir.

δ_n^2 parametresi $\delta_n^2 = 0.5C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}$ formülü ile elde edilmektedir. δ_n^2 (Rytov varyansı), atmosferik türbülans tarafından oluşturulan sintilasyon yoğunluğunu belirlemektedir. C_n^2 alıcının ve vericinin yüksekliğine ve diğer atmosferik koşullara bağlı olan bir kırılma indisi yapısal parametresidir [190].

Yukarıdaki Eş. 6.2 ve Eş. 6.3'te yer alan ve sintilasyon yoğunluğunu ve dolayısıyla da kanal sintilasyon modelinin PDF'sini belirleyen kırılma indisi yapısal parametresi C_n^2, bağlantı mesafesi L ve alıcının açıklık çapı D, simülasyon modelinde FSO kanal parametresi olarak kullanılmaktadır.

QAM ve PSK modülasyon

Modülasyon yöntemi, birkaç bitlik bilginin bir taşıyıcı dalga üzerine kodlanmasını sağlayarak iletim verimliliğini artırmaktadır. Optik modülasyon, optik dalganın kontrol edilebildiği veya mesajın taşıyıcı optik dalga üzerine kodlanabildiği ve bilginin uzun mesafelere iletilebildiği bir süreçtir [191, 192].

FSO teknolojisi, büyük bant genişliği ve düşük bir güçle iletim sağlaması nedeniyle yeni nesil iletişim sistemlerinde artan yüksek veri hızı ihtiyacını karşılamak için uygun maliyetli bir çözümdür. Bununla birlikte, FSO iletişimi arka plan gürültüsü, yanlış hizalama

(işaretleme-pointing) hataları, atmosferik türbülans ve olumsuz hava koşulları gibi çeşitli zorluklara karşı hassastır. Bu faktörler arasında atmosferik türbülans, sistem performansını düşürmede özellikle önemli bir rol oynamaktadır.

Türbülans önleme için literatürde kullanılan yöntemler arasında; açıklık ortalaması alma, modülasyon teknikleri, hibrit bağlantılar, çeşitleme (diversity) ve birleştirme gibi yöntemler önerilmektedir. Modülasyon tekniklerinden en basit olanı OOK'dir. Ancak OOK, türbülans kaynaklı sönümlenme nedeniyle alıcıda uyarlanabilir eşik tespiti gerektirmektedir.

Daha kapsamlı olan diğer etkili modülasyon yöntemleri Darbe Genlik Modülasyonu (PAM), Darbe Aralık Modülasyonu (PIM), Darbe Konum Modülasyonu (PPM) vb. gibi darbe modülasyonudur. Ayrıca, alt taşıyıcı yoğunluk modülasyonu (SIM) adaptif eşikleme gerektirmeyen basit ama etkili bir tekniktir. Bu yöntemde FSK, PSK ve QAM kullanılarak modüle edilen sinyaller optik sinyallere dönüştürülür ve FSO kanalı boyunca iletilerek genel sistem performansı ve güvenilirliği artırılır [190].

Modülasyon teknikleri, mobil iletişim sistemlerinin performansını değerlendirmek için çok önemlidir. Yeni nesil iletişim ağlarında, bu yöntemler daha yüksek spektral verimlilik sunmalı ve daha fazla sayıda bağlı cihazı barındırmalıdır. 4G LTE teknolojisinde, birincil modülasyon tekniği olarak QAM kullanılmaktadır [2].

Kümelenme (konstelasyon) diyagramı Şekil 6.8(a) ve (c)'de görülen QAM, analog ve sayısal her iki modülasyon tekniği de kullanmaktadır. QAM, ASK sayısal modülasyon şemasını kullanarak iki sayısal bit akışı veya iki taşıyıcı dalganın genliklerini değiştiren (modülasyon) analog modülasyon şemasını kullanarak iki analog mesaj sinyali gönderir. Sinüzoidlerdeki iki taşıyıcı sinyal olan dördün (quadrature) taşıyıcılarında veya dördün bileşenlerinde, birbiri boyunca 90° faz farkı bulunmaktadır. Hem PSK'nın hem de ASK'nın kombinasyonu elde edilen dalga biçimidir, bu nedenle modüle edilmiş dalgalar toplanır veya (analog durumda) PM ve genlik modülasyonunun toplamıdır. QAM, sayısal iletişim sistemleri için yaygın olarak uygulanan bir modülasyon tekniğidir. QAM ile kesin olarak uzun bir spektral kapasite elde edilebilmektedir [124].

QAM, uydu sistemleri, dijital kablolu televizyon yayıncılığı, noktadan noktaya kablosuz iletişim ve mobil hücresel ağlar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

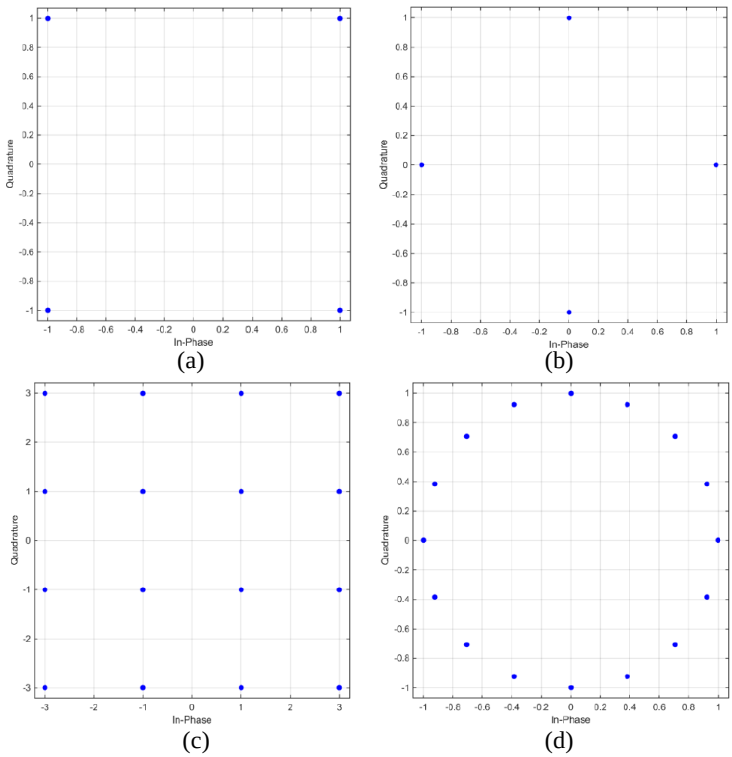
Bu teknik, taşıyıcı dalganın hem fazına hem de genliğine bilgi yerleştirerek M-PSK ve M-ASK modülasyon yöntemlerini etkili bir şekilde birleştirir. Sonuç olarak, M-QAM diğer modülasyon tekniklerine kıyasla daha yüksek spektral verimlilik sunar [2].

M-ary QAM için matematiksel ifade aşağıdaki şekildedir [2]:

$$S(t) = A_I \cos 2\pi f_c t - A_Q \sin 2\pi f_c t\,, \qquad 0 \le t < T \tag{6.4}$$

A_I ve A_Q sırasıyla faz içi (in-phase) sinyal genliği ve karesel (quadrature) sinyal genliğidir. f_c taşıyıcı frekansını ve T ise sembol aralığını ifade etmektedir.

PSK, genliğini sabit tutarken taşıyıcı dalganın fazını değiştiren başka bir modülasyon türüdür. PSK, 4-PSK (yaygın olarak QPSK olarak bilinir) ve 8-PSK, 16-PSK ve 64-PSK gibi daha yüksek dereceli yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli seviyelerde çalışabilir. QPSK'da, her biri π/4 radyan (45°) ile ayrılmış dört farklı faz kombinasyonu vardır. Buna karşılık, 16-PSK her biri π/16 radyan (11,25°) ile ayrılmış 16 faz kombinasyonundan oluşur (Şekil 6.8(b) ve (d)). Genel olarak, PSK seviyesi arttıkça, komşu semboller arasındaki faz farkı azalır, bu da sistemi gürültü ve bozulmaya karşı daha hassas hale getirir [191].



Şekil 6.8. Kümelenme diyagramları a) 4-QAM b) QPSK c) 16-QAM d) 16-PSK [191]

PSK sınırlı sayıda faz kullanır ve her faz eşit sayıda bit kodlar. Bu yaklaşım, optik iletişimde daha verimli bir bilgi iletimi sağlar. Taşıyıcı dalganın fazını değiştirerek, farklı sayısal sinyaller temsil edilir [192].

PSK modülasyonu uygulanırken, taşıyıcının faz bilgisi, iletilecek sayısal bilgiye uygun olarak taşıyıcının fazı kaydırılarak veya durdurularak değiştirilir. PSK üstün performans sunarken FSK ve ASK'ya göre daha karmaşık bir sinyal algılama işlemine sahiptir. PSK, belirli bir SNR için daha düşük hata olasılığına sahiptir ve daha düşük bant genişliği verimliliğine sahip olmasına rağmen ASK'den daha fazla güç tasarrufu sağlar [2].

M-ary PSK için matematiksel ifade aşağıdaki şekildedir:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} cos(w_0 t + \phi_i t)\,, \quad 0 \le t < T\,, \qquad i = 1,2,\ldots..,M \tag{6.5}$$

$$\phi_i(t) = \frac{2\pi i}{M} \qquad (M = mod\ddot{u}lasyon\ seviyesi)$$

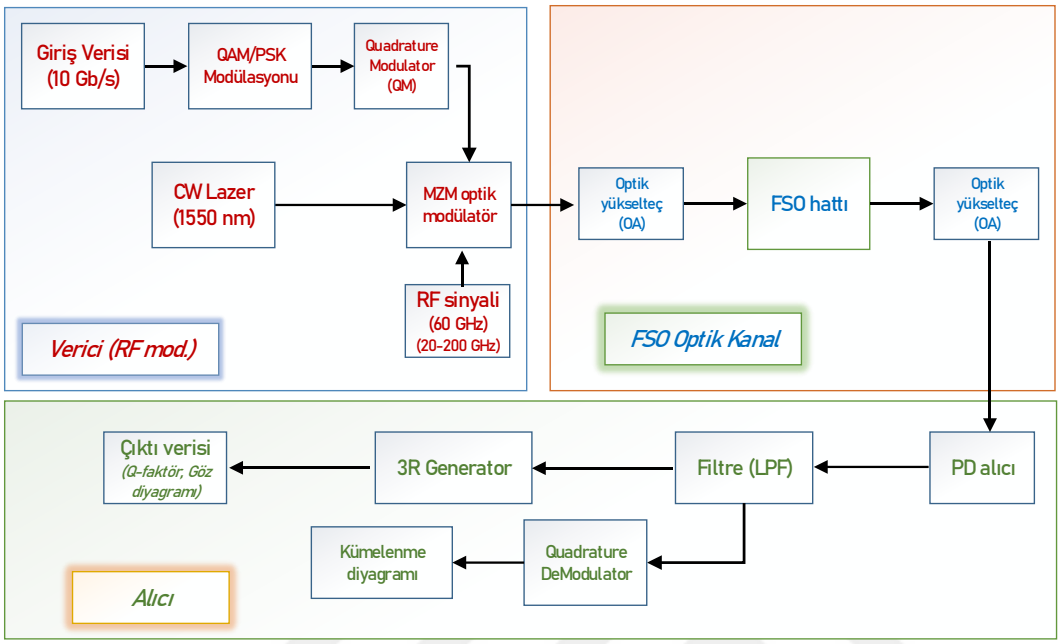
Aynı ortalama sinyal gücünde karşılaştırılırsa QAM'ın bant genişliği verimliliği PSK'dan daha fazladır ve QAM daha verimlidir. Ancak QAM'in bazı dezavantajları da vardır. QAM'de kümelenme boyutu arttıkça, durumlar birbirine yaklaşacak ve bu da gürültü bağışıklığını azaltacaktır. PSK ve FSK modülasyonu için gerekli olmamakla birlite, ASK'da doğrusal yükselteçler kullanılması gerekmektedir. QAM'de ise hem ASK hem de PSK'nın birleşimi olduğu için doğrusallığın korunması gerekmektedir [2].

PSK ve QAM gibi modülasyon teknikleri kablosuz iletişim için gelişmiş bant genişliği verimliliği sunmaktadır. Her tekniğin, özellikle kablosuz kanallar üzerindeki BER performansı açısından kendine özgü avantajları bulunmaktadır [191].

Optik simülasyon sonuçları

RoFSO hibrit haberleşme sisteminin (Şekil 6.9) benzetimi Optisystem benzetim programı kullanılarak yapılmaktadır. Benzetim devresinde FSO kanalının farklı mesafeleri (range), atmosfer türbülans şartlarını temsil eden farklı zayıflama (attenuation) değerleri, sürekli

dalga lazeri (CW laser) için sinyal gücü (power) değerleri ile RF sinyalinin farklı frekansları kullanılarak perfromans analizi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 6.9. RoFSO devre şeması

Sistemin bir performans parametresi olarak kullanılan kalite faktörü (Q-faktörü, Q), bir iletişim kanalının performans değerlendirmesi için bir göstergedir. Q-Faktörü özellikle BER ile ilişkilidir ve Q-faktörünün değeri büyüdükçe sinyalin kalitesi artar. İkili/sayısal optik haberleşme için, optik SNR değerini temsil eden Q-faktörü, sistem performans analizini kolaylaştırır [9].

Q faktörü, iki sinyal seviyesinin (1 ve 0 bit) farklı ortalama değerlerinin, iki sinyal seviyesindeki gürültünün standart sapmasının toplamına bölünmesiyle belirlenmektedir.

$$Q = \frac{V_H - V_L}{\sigma_H - \sigma_L} \tag{6.6}$$

burada V_H ve V_L alınan ortalama gerilim değerleri, σ_H ve σ_L sırasıyla "yüksek" ve "düşük" seviyeli sinyaller için standart sapmalardır.

$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \tag{6.7}$$

erfc: Tamamlayıcı hata fonksiyonu'dur.

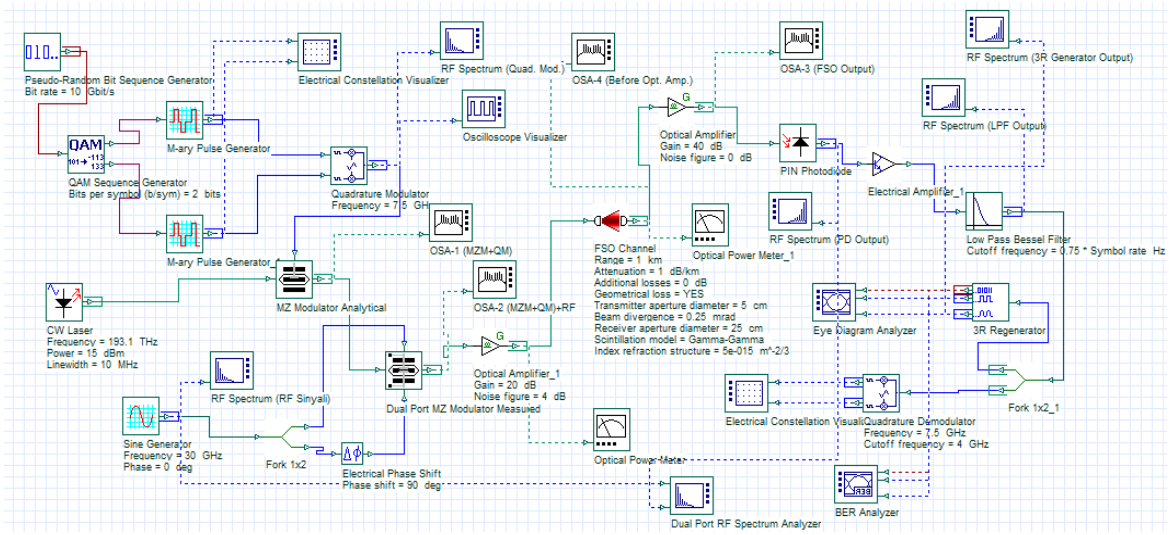
Tasarımı gerçekleştirilen sistemde özellikle yağışlı hava koşullarını temsil eden 3 farklı zayıflama değeri (1, 5, 10 dB/km) için performans analizi gerçekleştirilmektedir. Önerilen sistem farklı FSO bağlantı mesafelerine (1-6 km), farklı RF değerlerine (20-200 GHz) ve CW lazer güç değerlerine (0-45 dBm) sahip kanaldan oluşmaktadır. Önerilen sistemde QAM ve PSK için farklı dereceli modülasyon tipleri kullanılarak Q-faktör ve BER performansı analiz edilmektedir.

Tasarlanan RoFSO sisteminin temel özellikleri aşağıdaki Çizelge 6.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.2. RoFSO sistem parametreleri

Sistem Parametresi	Değeri
Veri hızı	10 Gb/s
Dalga boyu	1550 nm
FSO mesafesi	1-6 km
CW lazer gücü	0-45 dBm
RF Frekansı	60 GHz (20-200 GHz)
Modulasyon tipleri	QAM (4, 16) – PSK (4, 16)
Gönderici açıklık çapı	5 cm
Alıcı açıklık çapı	25 cm
Işın sapması (divergence)	0,25 mrad
Zayıflama (atmosferik)	1-5-10 dB/km

QAM ve PSK için simüle edilmiş Optisystem devre modeli Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. QAM/PSK-RoFSO simülasyon devresi

Sözde rastgele bit dizisi (PRBS) 10 Gb/s veri hızı ile QAM/PSK üreteci tarafından modüle edilir ve darbe üreteci (M-ary) tarafından bir elektrik darbesi üretilir. Darbe üretecinin işlevi, ikili sinyali modülatöre göndermeden önce elektrik sinyaline dönüştürmektir. Bu sinyal Karesel Modülatör (QM) (Şekil 6.11(b)) tarafından birleştirilir ve lazer tarafından modellenen kaynak sinyali ile modüle edilmek üzere Mach-Zehnder modülatöre aktarılır.

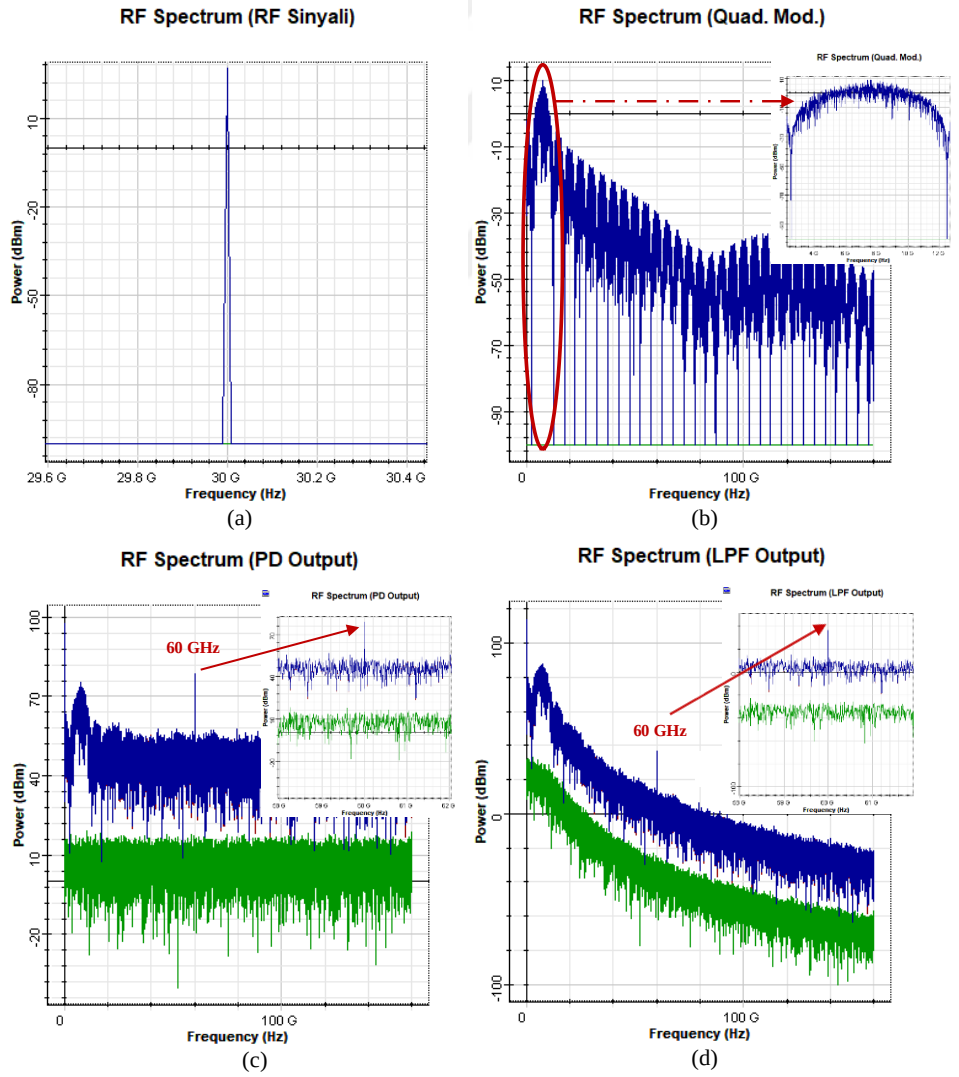
Mach-Zehnder Modülatörü (MZM), QM çıkışına göre lazer kaynağının yoğunluğunu ayarlayarak bir optik dalganın genliğini düzenlemek için kullanılır. Temel işlevi bir elektrik sinyalini optik sinyale dönüştürerek optik kanal üzerinden iletimi sağlamaktır. Sonuç olarak, çıkış, elektrik giriş sinyalinden türetilen değişken yoğunluklu bir optik sinyaldir. Ek olarak, 30 GHz RF sinyali (Şekil 6.11(a)), optik sinyalin bir dual MZM kullanılarak modüle edilmesiyle bir araya getirilmiştir.

FSO kanalı, alıcı tarafındaki PIN fotodetektör tarafından elektriksel alana geri dönüştürülen modüle edilmiş optik sinyali iletmek için kullanılır (Şekil 6.11(c)). Sinyal daha sonra Bessel Alçak Geçiş Filtresi-LPF tarafından filtrelenir (Şekil 6.11(d)). Son olarak sinyal, farklı hava koşullarını temsil eden zayıflama değerleri ve lazer çıkış gücü parametreleri dikkate alınarak BER, Q-faktörü ve göz diyagramı açısından performans analizi gerçekleştirmek için BER analizörüne ve göz diyagramı analizörüne uygulanır.

MZM'nin çıkış optik spektrumu RoF sinyali ile bu sinyalin tek ve çift yan bantlarına sahiptir. Fotodedektör tarafında, optik taşıyıcı ve bu yan bantlar, RoF sinyalini ve doğrusal olmayan

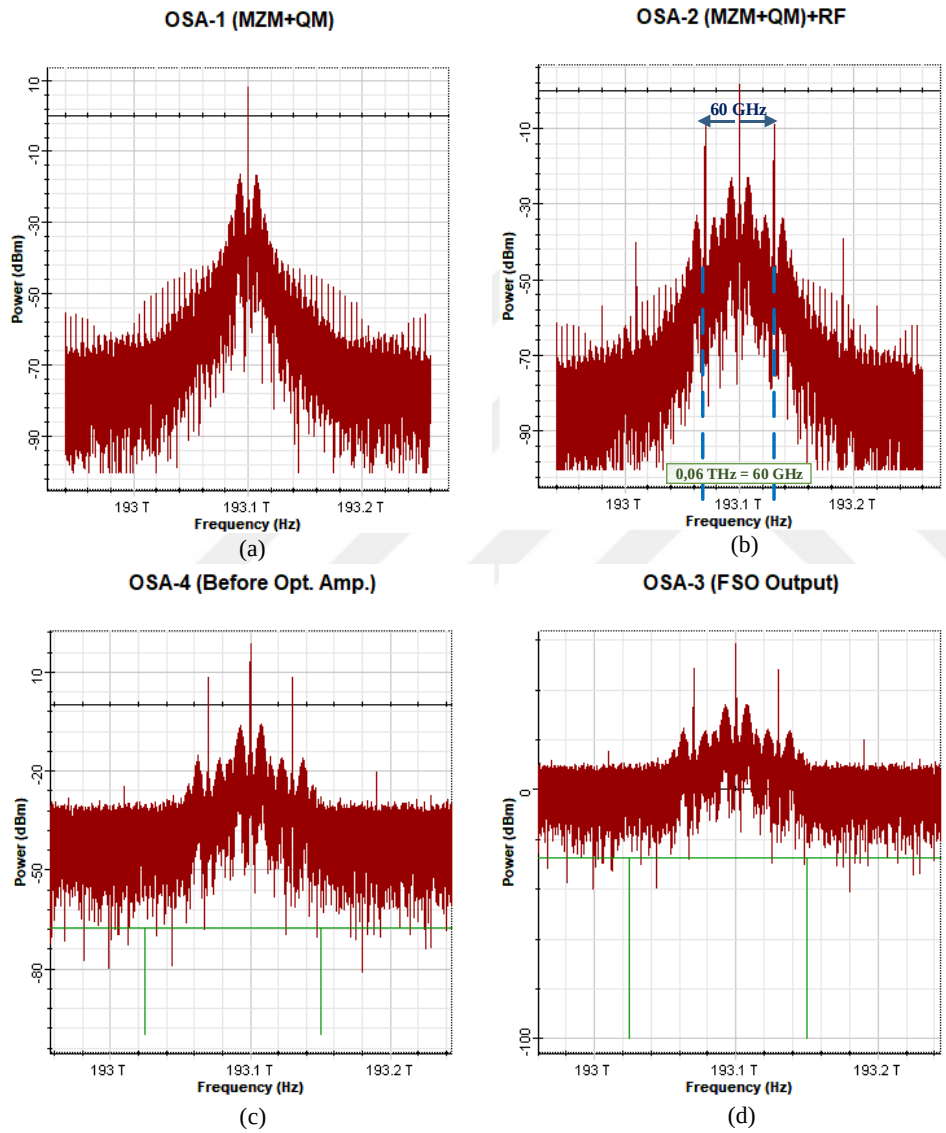
bileşenleri üretmek amacıyla birbirleriyle çarpıştırılır ve 60 GHz bir RF sinyali elde edilmiş olur. Şekil 6.10'daki QAM-RoFSO devresi üzerinde de belirtildiği şekilde RF spektrum analizörü ve optik spektrum analizörü çıktı sinyallerine ait grafikleri sırasıyla Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de görülmektedir.

Şekil 6.11(a)'da MZM'nin çıkış optik spektrumunun modülasyonu için üretilen 30 GHz RF sinyali görülmektedir. Dual port MZM ile optik sinyal 60 GHz RF sinyali ile modüle edilmektedir. Şekil 6.11(b)'de ise yukarıda bahsedildiği gibi QAM/PSK ile modüle edilen ve elektriksel sinyale dönüştürülen verinin QM ($f=7.5$ *GHz*) tarafından birleştirildikten sonraki spektrumu görülmektedir. Şekil 6.11(c) ve (d)'de ise sırasıyla alıcı tarafında PD ve LPF tarafından elde edilen ve 60 GHz RF sinyalini gösteren spektrumları yer almaktadır.



Şekil 6.11. RF spektrumu çıktıları a) RF sinyali b) QM çıktı sinyali c) Fotodedektör çıktı sinyali d) LPF çıktı sinyali

Şekil 6.12(a) ve (b)'de sırasıyla, çıkış optik spektrumunun QM çıkış veri sinyali ile modüle edildiği MZM'nin 193.1 THz optik çıkışı ve bu çıkış sinyalinin 60 GHz RF sinyali ile modüle edildikten sonraki çıkış spektrumu gösterilmektedir. Şekil 6.12(c) ve (d)'de sırasıyla FSO kanalının çıkışında elde edilen optik sinyalin optik yükseltici uygulanmadan önceki ve sonraki görüntüleri gösterilmektedir.



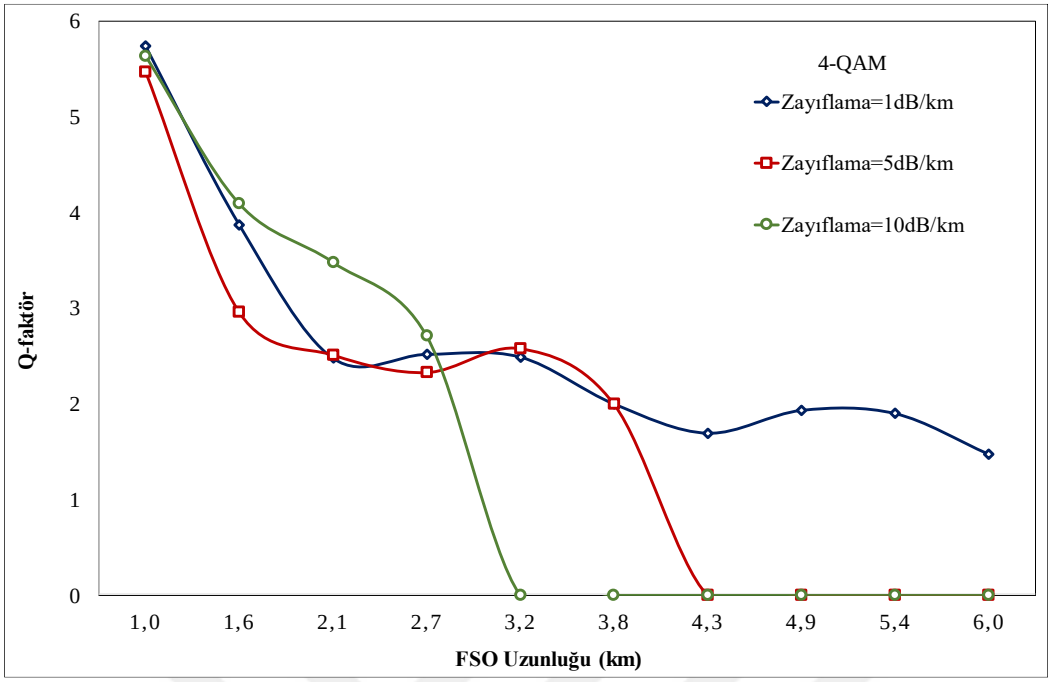
Şekil 6.12. Optik spektrum analizör çıktıları a) MZM+QM çıktı sinyali b) MZM+QM+RF sinyali modülasyonu c) Optik yükselteç öncesi d) FSO çıkışı (optik yükselteç sonrası)

QAM-RoFSO simülasyon sonuçları

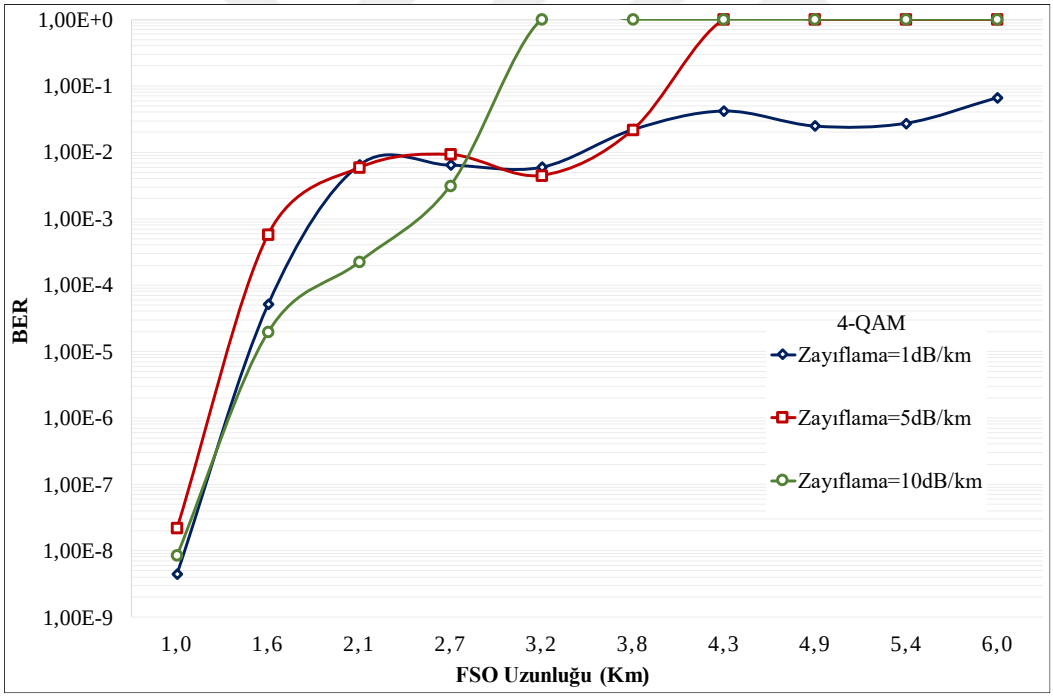
RoFSO devresinin simülasyonu ile elde edilen farklı FSO bağlantı mesafelerinde, 4-QAM ve 16-QAM modülasyon şemaları için Q-faktör ve BER grafikleri Şekil 6.13'te, göz diyagramı ve kümelenme grafikleri ise Şekil 6.14'te görülmektedir. Şekil 6.15'te ise farklı CW lazer güçleri ve RF frekans değerleri için 4-QAM ve 16-QAM modülasyon tepkileri görülmektedir.

Her iki modülasyon seviyesi için de FSO link mesafesi ve FSO hattındaki atmosferik türbülanstan kaynaklı zayıflama arttıkça Q-faktör değeri düşmektedir. Buna ters orantılı şekilde BER artmakta ve dolayısıyla sinyal zayıflamaktadır.

Bununla birlikte, Şekil 6.13'teki farklı FSO link uzunlukları için 4-QAM (a-b) ve 16-QAM (c-d) modülasyon tiplerinin tepkisi incelendiğinde; 4-QAM için bütün zayıflama değerlerinde sinyalin daha uzun mesafelere iletilebildiği görülmektedlir. 4-QAM için Q-faktör değerlerinin ortalama 5,61'den 0'a düşme zayıflama değerleri ve mesafeleri 10dB/km için 3,2 km, 5dB/km için 4,3 km ve 1dB/km için ise 6 km üzeri olarak elde edilirken bu değerlerin 1,8'den 0'a mesafeleri 16-QAM için 3,2 km@10dB/km, 3,8 km@5dB/km ve 6 km@1dB/km olarak elde edilmektedir. BER değerleri ise, Q-faktör ile ters orantılı olacak şekilde, mesafe ve zayıflamanın artışıyla birlikte artış göstermektedir.

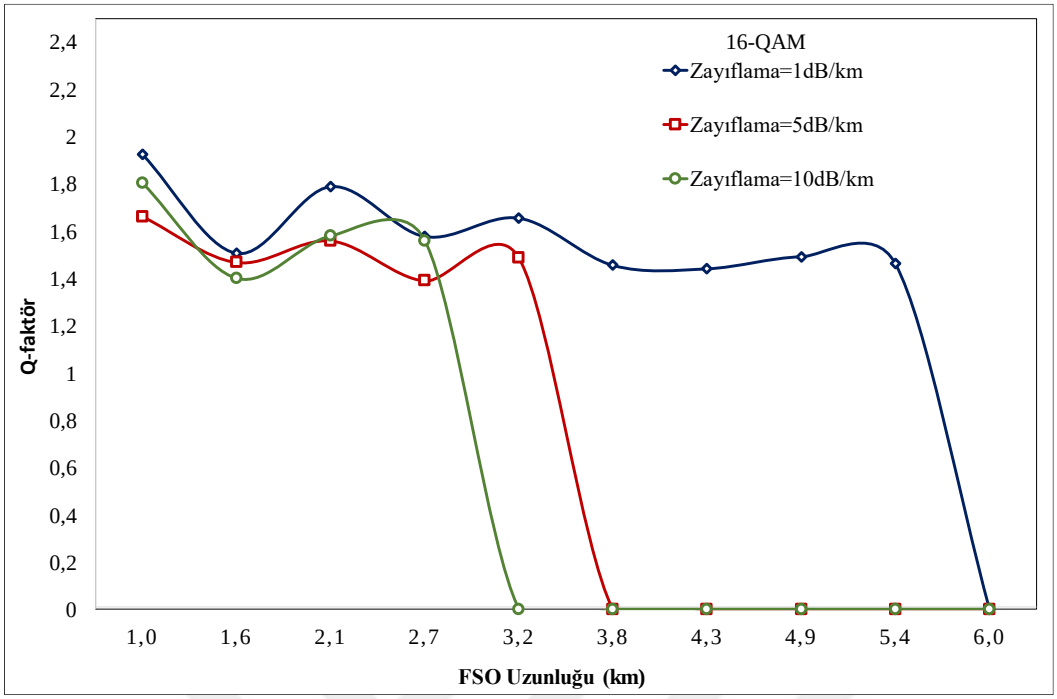


(a)

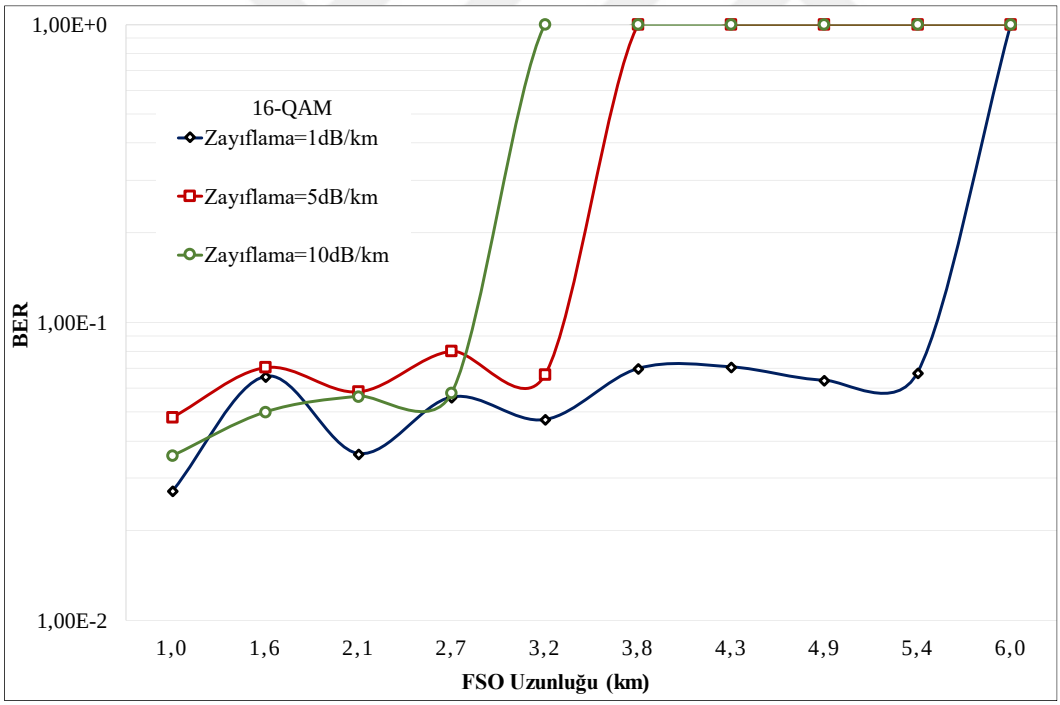


(b)

Şekil 6.13. 4-QAM a) Q-faktör b) BER ile 16-QAM c) Q-faktör d) BER grafikleri



(c)

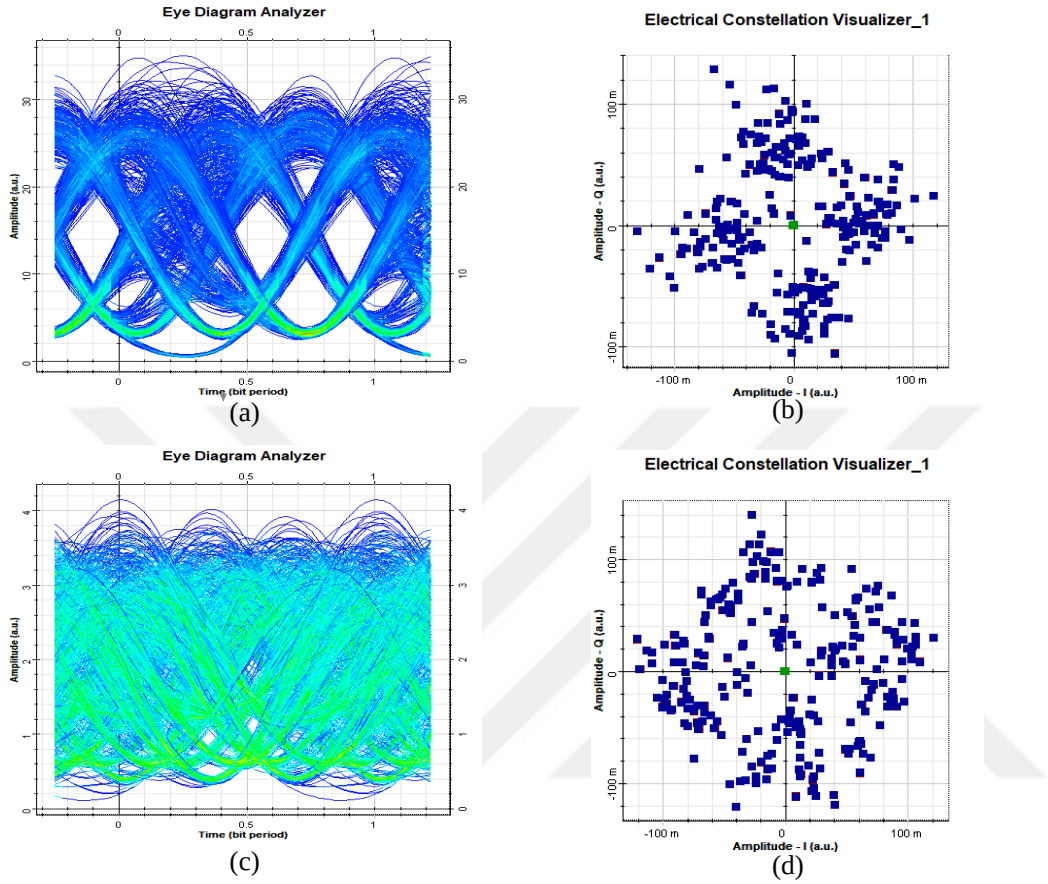


(d)

Şekil 6.13.(devam) 4-QAM a) Q-faktör b) BER ile 16-QAM c) Q-faktör d) BER grafikleri

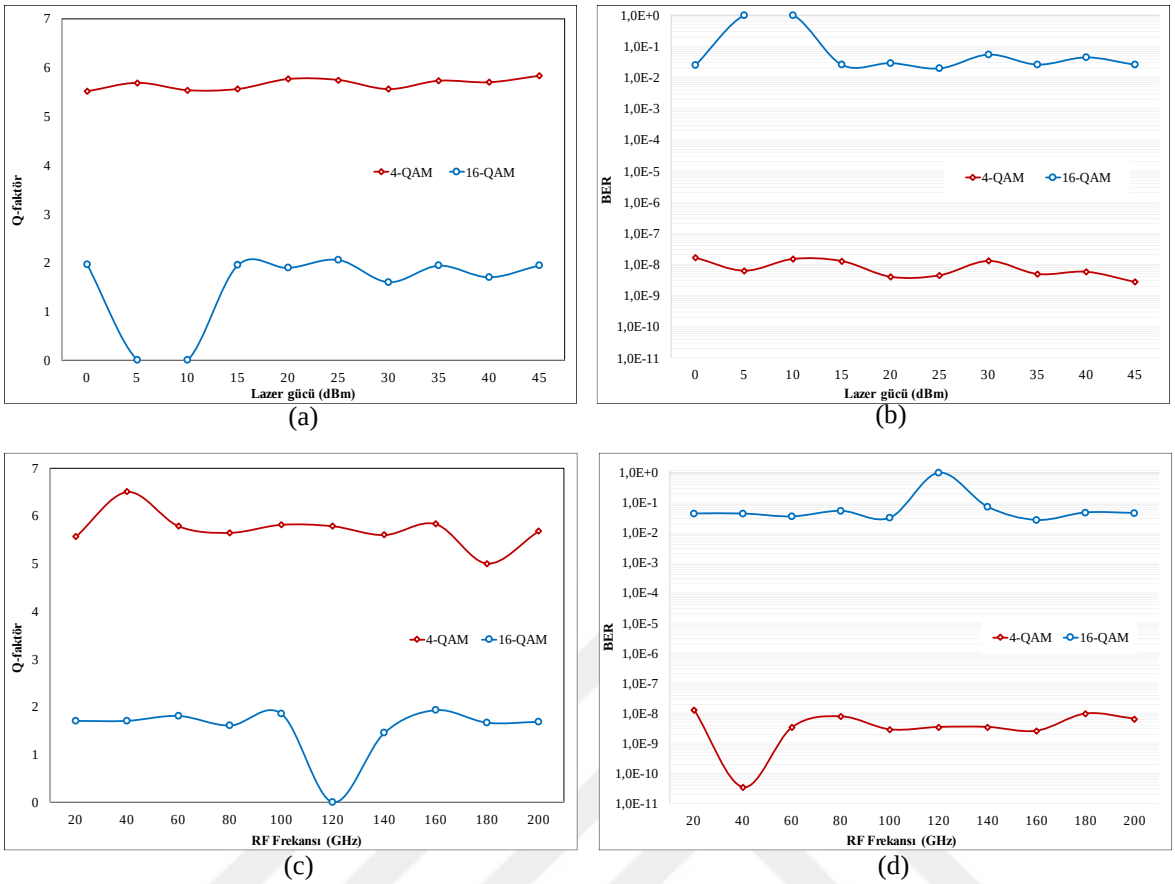
Şekil 6.14'teki göz diyagramlarında; 4-QAM modülasyonu için göz açıklığının daha belirgin ve düzgün olduğu (Şekil 6.14(a)), 16-QAM modülasyonu için ise göz açıklığının kapalı olduğu ve sinyallerin daha karmaşık oluştuğu (Şekil 6.14(c)) gözlemlenebilmektedir. Aynı şekilde sırasıyla 4 ve 16-QAM'e ait Şekil 6.14(b) ve (d)'deki kümelenme şekillerinde de 4-

QAM kümelenme şeklinin daha düzenli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, aynı şartlar altında 4-QAM daha verimli bir iletim sağlamaktadır.



Şekil 6.14. 4-QAM (a ve b) ile 16-QAM (c ve d) göz diyagramı ve kümelenme grafikleri

Şekil 6.15'de farklı CW lazer gücü ve RF frekans değerleri için 4-QAM ve 16-QAM modülasyon tiplerinin tepkisi incelendiğinde; Şekil 6.15(a)'da görüldüğü gibi 4-QAM modülasyon tipinin sinyal gücü değişimine daha düz sayılabilecek bir tepki verdiği görülmektedir. Aynı zamanda 16-QAM'e (Şekil 6.15(c)) göre Q-faktör değerleri açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. 4-QAM için Q-faktör değerleri 5-6 arası iken 16-QAM için çoğu frekans değerinde 1-2 arasında gerçekleşmiştir. Şekil 6.15(b) ve (d)'de yer alan BER değerleri ise, Q-faktör ile ters orantılı olacak şekilde değişiklik göstermektedir.



Şekil 6.15. Farklı CW lazer güçleri ve RF frekans değerleri için QAM modülasyon tepkileri

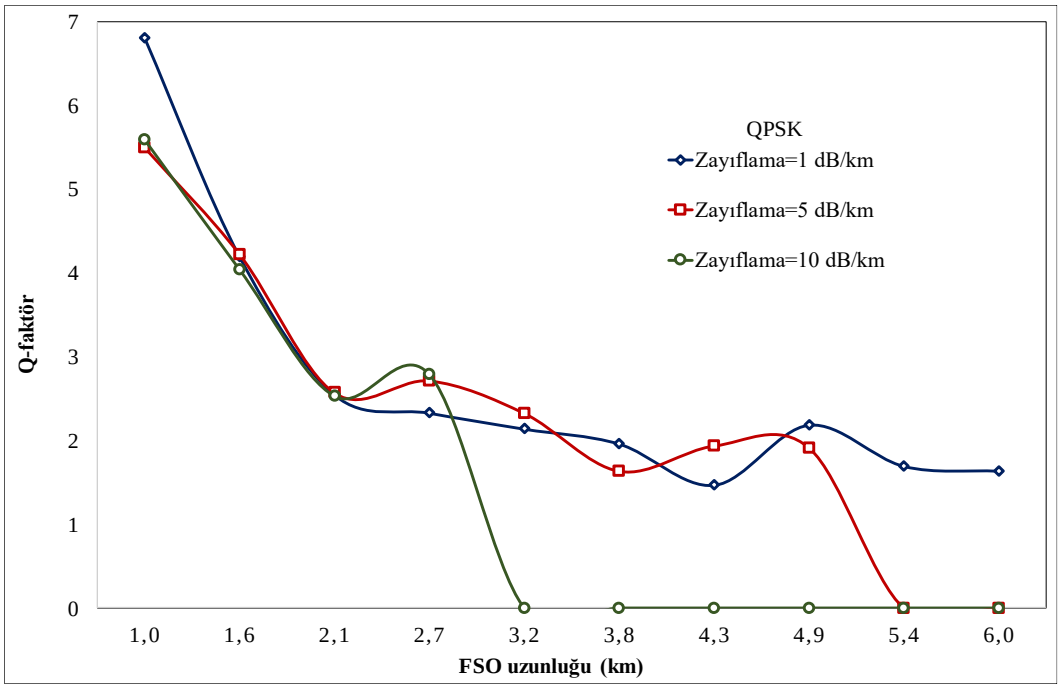
RF frekans değerlerindeki değişimde de aynı şekilde 4-QAM daha yüksek Q-faktör değerlerine sahip olmakla birlikte her iki modülasyon seviyesi için de 120 GHz ve sonrasında daha değişken değerler oluşmuştur.

PSK-RoFSO simülasyon sonuçları

RoFSO devresinin simülasyonu ile elde edilen farklı FSO bağlantı mesafelerinde, QPSK ve 16-PSK modülasyon şemaları için Q-faktör ve BER grafikleri Şekil 6.16'da, göz diyagramı ve kümelenme grafikleri ise Şekil 6.17'de görülmektedir.

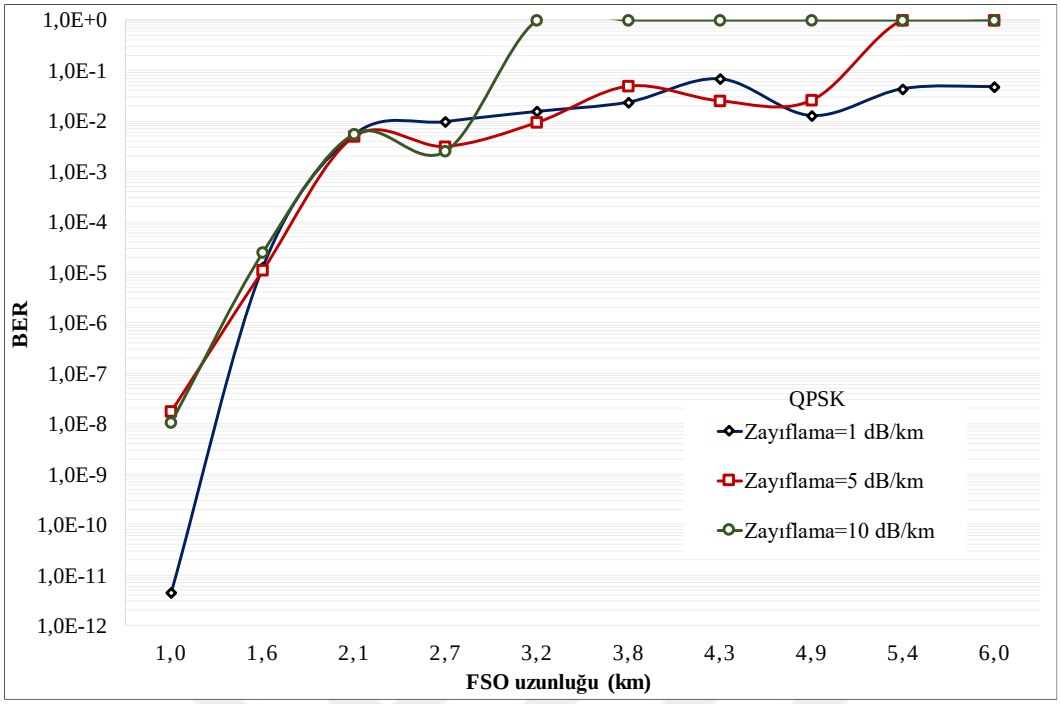
PSK modülasyon seviyelerinde de QAM'de olduğu gibi FSO bağlantı mesafesi ve FSO hattındaki sinyal zayıflaması arttıkça Q-faktör değeri azalmakta ve bunun tersi olacak şekilde BER değeri artmaktadır.

Bununla birlikte, Şekil 6.16'daki farklı FSO link uzunlukları için QPSK (a-b) ve 16-PSK (c-d) modülasyon tiplerinin Q-fatör ve BER tepkisi incelendiğinde; QPSK için bütün zayıflama değerlerinde sinyalin daha uzun mesafelere iletilebildiği görülmektedlir. QPSK için Q-faktör değerlerinin ortalama 5,97'den 0'a düşme zayıflama değerleri ve mesafeleri 10dB/km için 3,2 km, 5dB/km için 5,4 km ve 1dB/km için ise 6km ve üzeri olarak elde edilirken bu değerlerin 2,01'den 0'a mesafeleri 16-PSK için 2,7 km@10dB/km, 4,9 km@5dB/km ve 6 km ve üzeri@1dB/km olarak elde edilmektedir. BER değerleri ise, Q-faktör ile ters orantılı olacak şekilde, mesafe ve zayıflamanın artışıyla birlikte artış göstermektedir.

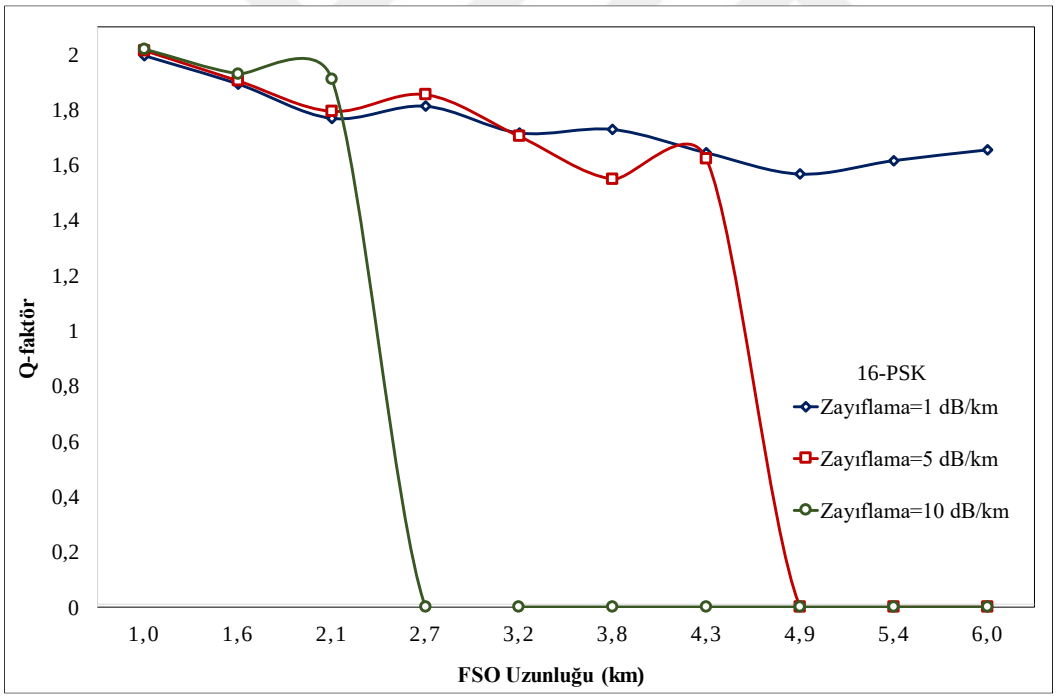


(a)

Şekil 6.16. QPSK a) Q-faktör b) BER ile 16-PSK c) Q-faktör d) BER grafikleri

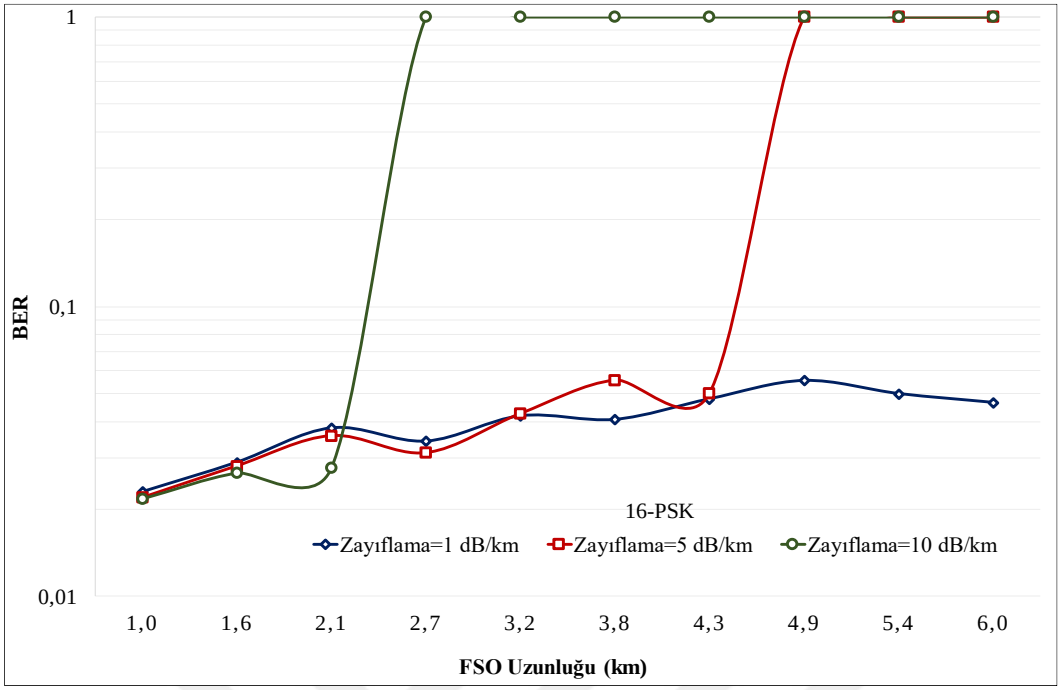


(b)



(c)

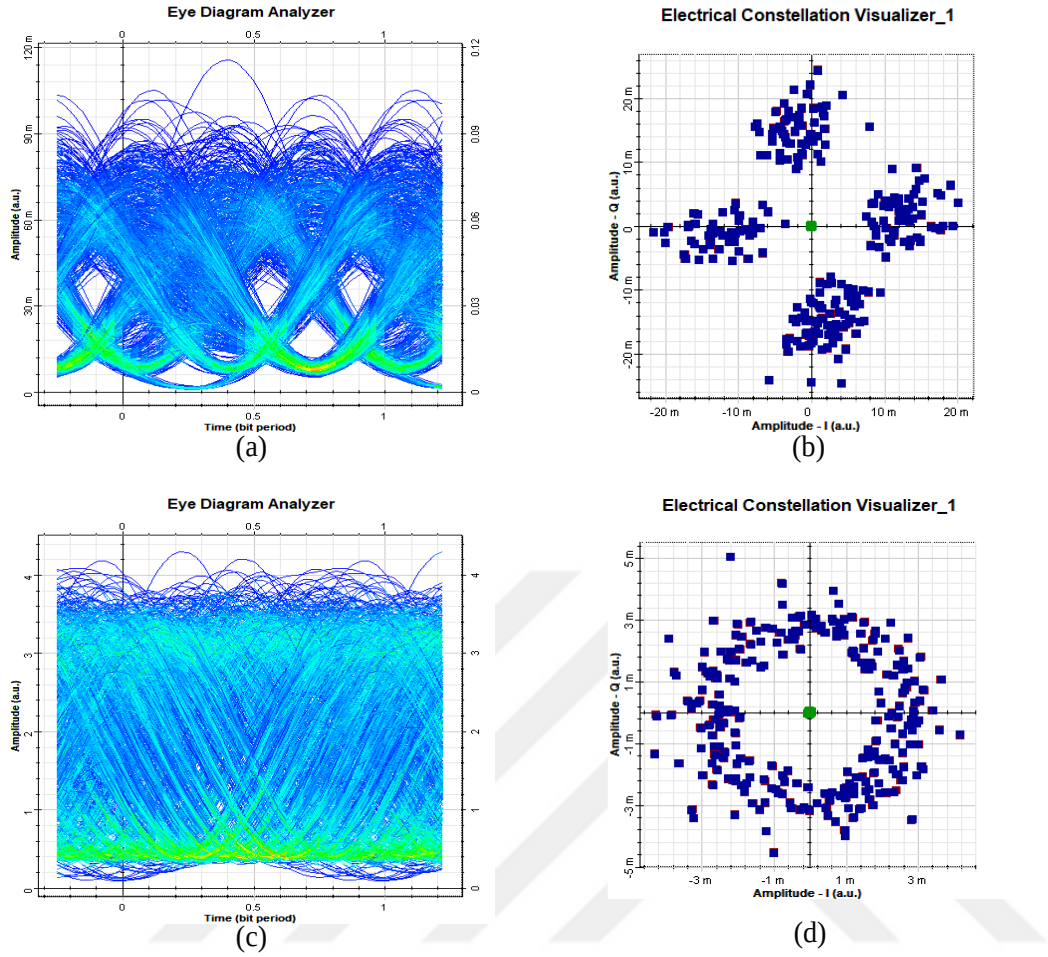
Şekil 6.16.(devam) QPSK a) Q-faktör b) BER ile 16-PSK c) Q-faktör d) BER grafikleri



(d)

Şekil 6.16.(devam) QPSK a) Q-faktör b) BER ile 16-PSK c) Q-faktör d) BER grafikleri

Şekil 6.17'deki göz diyagramlarında; QPSK modülasyonu için göz açıklığının daha belirgin ve düzgün olduğu (Şekil 17(a)), 16-PSK modülasyonu için ise göz açıklığının kapalı olduğu ve sinyallerin daha karmaşık oluştuğu (Şekil 17(c)) gözlemlenebilmektedir. Aynı şekilde sırasıyla QPSK ve 16-PSK'e ait Şekil 17(b) ve (d)'deki kümelenme şekillerinde de QPSK kümelenme şeklinin daha düzenli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, aynı şartlar altında QPSK daha verimli bir iletim sağlamaktadır.



Şekil 6.17. QPSK (a ve b) ile 16-PSK (c ve d) Q göz diyagramı ve kümelenme grafikleri

QAM ve PSK Karşılaştırması

Optik simülasyon sonuçlarına göre QAM ve PSK modülasyonların farklı seviyeleri için elde edilen Q-faktör performans değerleri Çizelge 6.3 ve 6.4'te karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 6.3'te yer alan değerlerin yorumlanmasıyla 4-QAM ve QPSK için daha verimli sonuçlar elde edildiği görülmektedir. 4-QAM ve QPSK için Q-faktörü değerleri, 16-QAM ve 16-PSK modülasyonları için Q-faktörü değerlerinden daha yüksektir (QPSK 6 km FSO@1 dB/km zayıflama hariç). Bu nedenle, her iki modülasyon şeması için de modülasyon seviyesinin artırılması verimliliği düşürmüştür.

Çizelge 6.3. Farklı modülasyon türleri için Q-faktör değerleri

Modülasyon / Q-faktör	Zayıflama=1dB/km			Zayıflama=5dB/km			Zayıflama=10dB/km		
	FSO link mesafesi (km)			FSO link mesafesi (km)			FSO link mesafesi (km)		
	1	3,8	6	1	3,8	6	1	3,8	6
4-QAM	5,74	2,00	1,47	5,47	1,99	0	5,64	0	0
16-QAM	1,92	1,45	0	1,66	0	0	1,80	0	0
QPSK	6,81	1,96	1,64	5,50	1,64	0	5,59	0	0
16-PSK	2,00	1,74	1,65	2,02	0	0	2,01	0	0

Diğer taraftan, Çizelge 6.4'te verilen ve 3 farklı zayıflama değeri ile 10 farklı FSO link mesafesi için elde edilen ortalama Q-faktör değerlerine göre ise, PSK modülasyon metotlarının da QAM modülasyonlara göre ortalama olarak daha verimli sonuçlar oluşturduğu görülmektedir.

Çizelge 6.4. Farklı modülasyon türleri için Q-faktör ortalamaları

Modülasyon / Q-faktör	3 farklı zayıflama değeri= {1, 5, 10} dB/km
	10 farklı FSO link mesafesi (1-6 arası) km
	Q-faktör ortalaması
4-QAM	1,91
16-QAM	0,89
QPSK	2,16
16-PSK	1,14

ML modelleri ve tahmin sonuçları

Gelişen 5G ağının ve 5G uygulamalarının artan taleplerini karşılamak için, temel altyapılar olarak hizmet veren optik ağlar daha dinamik ve otomatik hale gelecek şekilde sürekli olarak ilerlemektedir. Gelecekteki otonom ağlar, QoT'nin doğru tahmin edilmesini gerektiren minimum bağlantı kısıtlamalarına sahip olacaktır.

Yeni kurulan optik kanalların mevcut olanlar üzerindeki etkisini değerlendirmenin yanı sıra, kurulmamış optik yolların iletim kalitesini doğru bir şekilde anlamak, düşük marjlı optik ağların verimli çalışması için çok önemlidir. ML teknolojileri, otonom optik bağlantıların QoT'sini tahmin etmek için tatmin edici çözümler sunmaktadır [193].

Çalışmanın bu kısmında, Optisystem ile elde edilen farklı parametrelere bağlı performans sonuçları için oluşturulan veri seti kullanılarak Python programlama ortamında scikit-learn paketi ile veri regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Benzetim ile oluşturulan girdi-çıktı tablosu şeklindeki veri seti kullanılarak farklı ML yöntemleri (MLR, DT, RF, SVR, ANN) ile oluşturulan tahmin modelleri eğitilmekte ve geliştirilmektedir. Eğitilen ML modelleri, sistemin performans göstergesi olan kalite faktörü (Q-factor) için en yüksek oranda tahmin yeteneği ile sistemin en iyi performansı için gerekli girdilerinin önceden tespit edilmesi ve verimli bir haberleşme ortamı oluşturulması amacıyla kullanılabilecektir.

Simülasyon programı tarafından oluşturulan veri setini içeren tablo programa yüklenmiş ve üzerinde bazı temel regresyon algoritmaları uygulanmıştır. Seçilen 4 öznitelik, CW lazer gücü, FSO kanal zayıflaması ve FSO bağlantısı uzunluğudur. Bu değişkenlere bağlı olarak 125 farklı örnek için (veri kümesi boyutu 500'dür) veri elde edilmiştir (Şekil 6.18). Q faktörü bağımlı değişken olarak incelenmiştir. Veri seti, minimum 0 ve maksimum 6,74 olmak üzere 125 Q faktörü değeri içermektedir.

```
display(pd.DataFrame(veri))
```

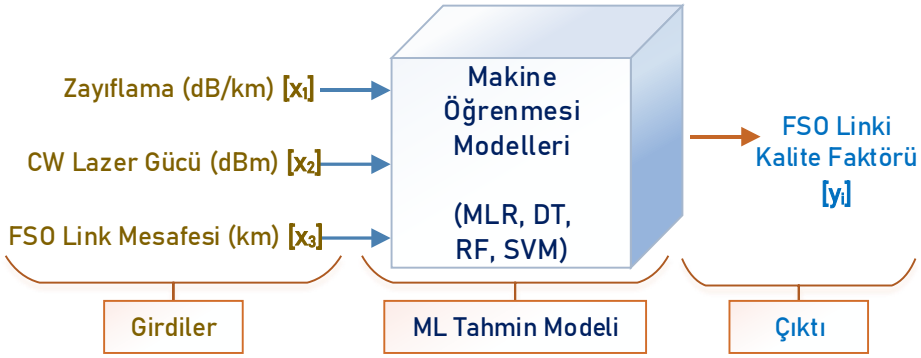
	Attn.(Atm.Zayıflama)	Power(Sin.Gücü)	Range(FSO Mesafesi)	Qfac(Kalite Faktörü)
0	1	10	2	1.97403
1	1	15	5	1.73024
2	1	10	5	1.94416
3	1	10	1	5.65896
4	4	0	3	0.00000
...	...	...	...	...
120	2	20	1	5.68717
121	3	15	3	0.00000
122	5	0	1	5.46631
123	5	15	4	0.00000
124	3	5	4	0.00000

125 rows × 4 columns

Şekil 6.18. Python girdi/çıktı veri seti tablosu

Regresyon, değişkenler arasındaki ilişkileri geliştirmek için kullanılan istatistiksel yöntemlerden oluşmaktadır. Temel olarak, diğer faktörleri sabit tutarken bağımsız bir değişkendeki değişikliklere karşılık olarak bağımlı değişkendeki değişiklikleri daha iyi anlamaya yardımcı olmaktadır. Tahmin ve öngörüde yaygın olarak uygulanan regresyon analizi, makine öğrenimi uygulamaları ile önemli ölçüde örtüşmektedir [177].

Regresyon algoritmaları, simülasyon verileri aracılığıyla çeşitli parametrelere dayalı olarak optik bağlantıların Q faktörünü tahmin etmek için kullanılmaktadır. Q faktörü, gürültüden uzaklığını ölçerek sinyal kalitesini göstermektedir. Tahmin modeli, Şekil 6.19'da gösterildiği gibi $X = [x_1, x_2, x_3]$ ile temsil edilen 3 bağımsız değişkeni dikkate alır. X, her bir satırın $\hat{y}_i$ ile gösterilen sürekli Q değişkenini tahmin etmek için kullanılan belirli bir örneğe karşılık geldiği giriş özelliklerini temsil etmektedir.



Şekil 6.19. ML tahmin modeli yapısı

Tahmin modellerinin performans parametreleri olarak MSE ve R^2 skorları literatürde en sık karşılaştırılan göstergelerdir. R^2 metriği, otokorelasyon sabiti R'nin karesidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)}{(y_i - \bar{y})} \tag{6.8}$$

Bu metrik 0 ile 1 arasında değerler alır. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça modelin tahmin kapasitesinin arttığı, 0'a yaklaştıkça ise modelin tahmin doğruluğunun düşük olduğu anlamına gelir [24].

MSE ise ortalama karesel hatayı, yani tahmin edilen değerler ile gerçek değer arasındaki ortalama karesel farkı ölçer. MSE (ortalama karesel hata) değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [194]:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{6.9}$$

Eş. 6.8 ve Eş. 6.9'daki ifadeler aşağıdaki şekildedir:

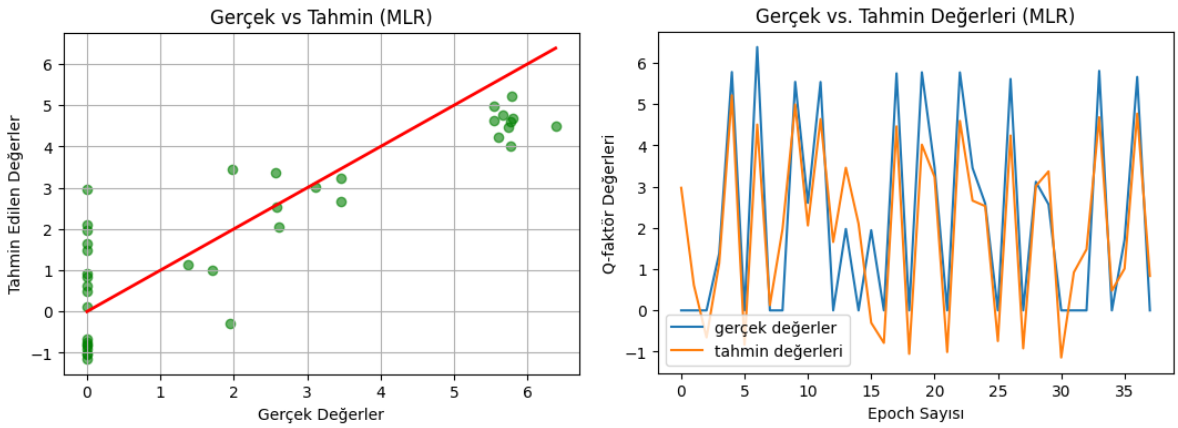
n = regresör girişindeki örneklem büyüklüğü,

y_i = örnekteki i. gerçek değeri,

$\hat{y}_i$ = i. gerçek değere karşılık gelen tahmini değer,

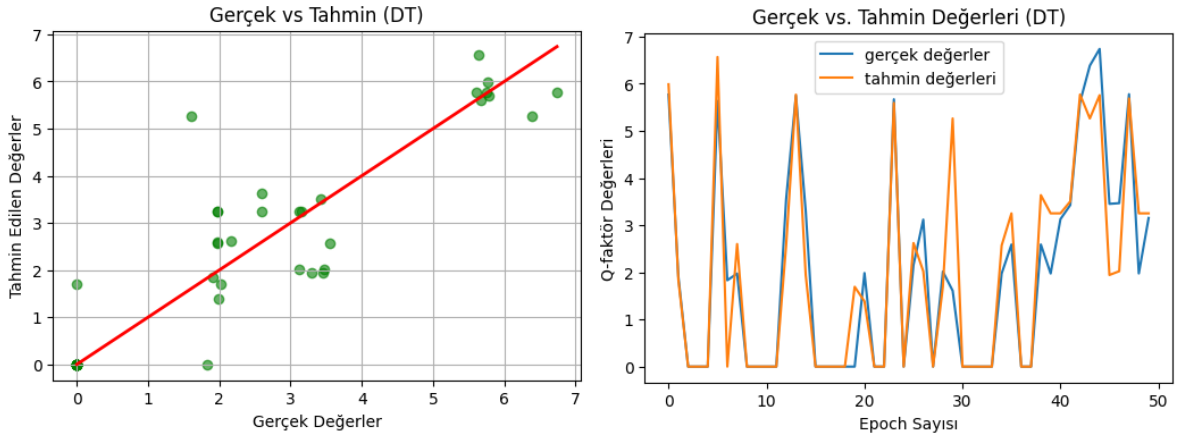
$\bar{y}$ = örneklem ortalaması

Toplam veri kümesinin %70'i MLR modelini eğitmek için, kalan %30'u ise modeli test etmek için kullanılmaktadır. MLR modeli oluşturularak elde edilen tahmin performansı (R^2 skoru) 0,749'dur. Bu modele ait tahmin performans grafiği Şekil 6.20'de görülmektedir.



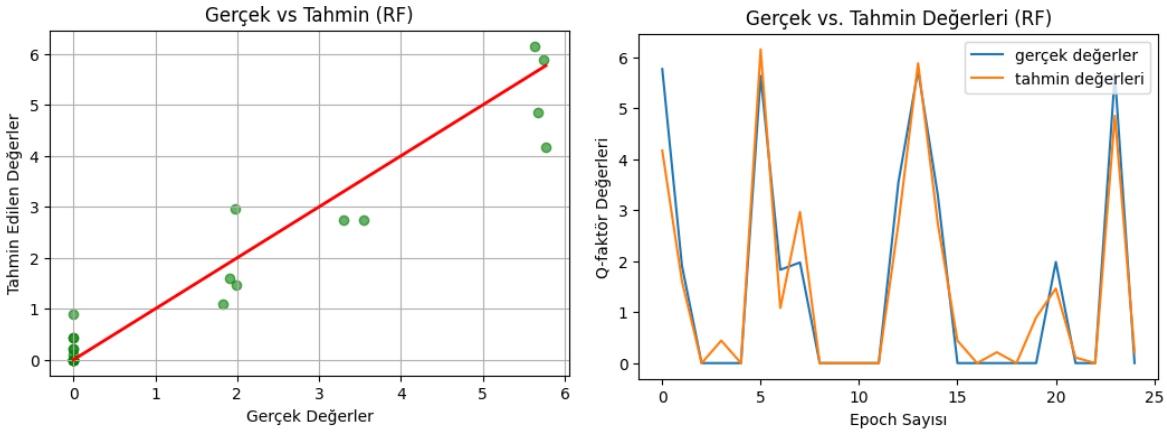
Şekil 6.20. MLR modelinin tahmin performansı

DT modelinde ise toplam veri kümesinin %60'ı tahmin modelini eğitmek için, kalan %40'ı ise modeli test etmek için kullanılmaktadır. DT modeli oluşturularak elde edilen tahmin performansı (R^2 skoru) 0,835'tir. Bu modele ait tahmin performans grafiği Şekil 6.21'de görülmektedir.



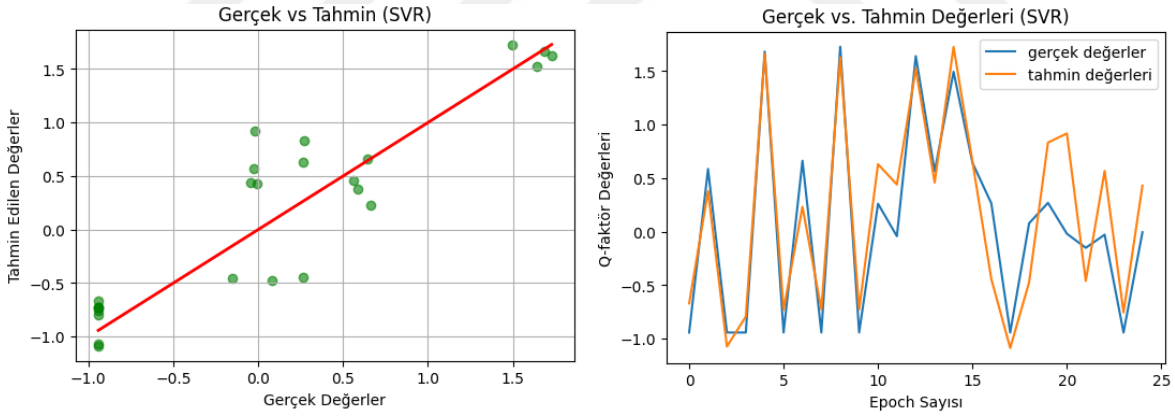
Şekil 6.21. DT modelinin tahmin performansı

Toplam veri setinin %80'i modelin eğitimi için, kalan %20'si ise modeli test etmek için kullanılarak oluşturulan RF modeli ile elde edilen tahmin performansı (R^2 skoru) 0,932'dir. Bu modele ait tahmin performans grafiği Şekil 6.22'de görülmektedir.



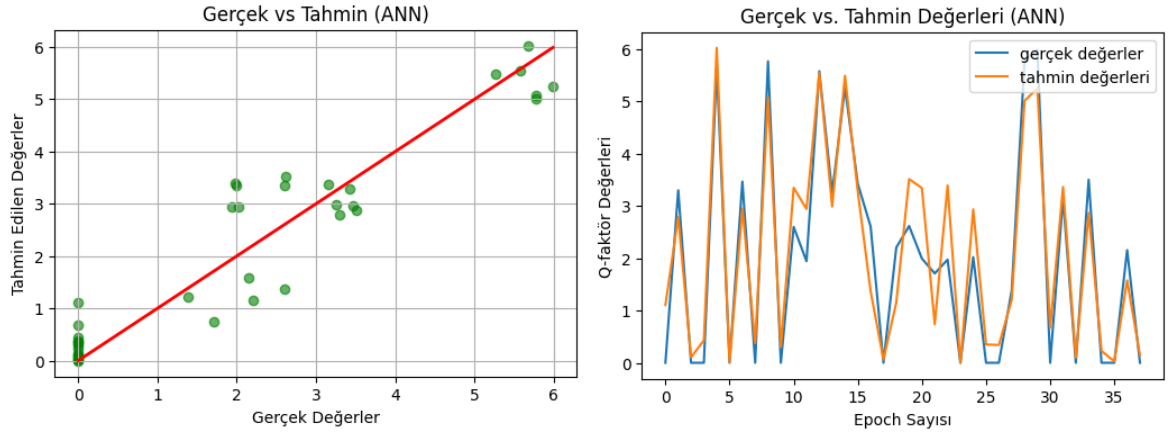
Şekil 6.22. RF modelinin tahmin performansı

RF'de olduğu gibi veri setinin %80'i modelin eğitimi için, kalan %20'si ise modeli test etmek için kullanılarak oluşturulan SVR modeli oluşturularak elde edilen tahmin performansı (R^2 skoru) 0,813'tür. Bu modele ait tahmin performans grafiği Şekil 6.23'te görülmektedir. Şekil 6.23'teki SVR modeline ait Q-faktör değerleri (-1 ile 2 aralığında) ölçeklendirilmiş olarak görülmektedir.



Şekil 6.23. SVR modelinin tahmin performansı

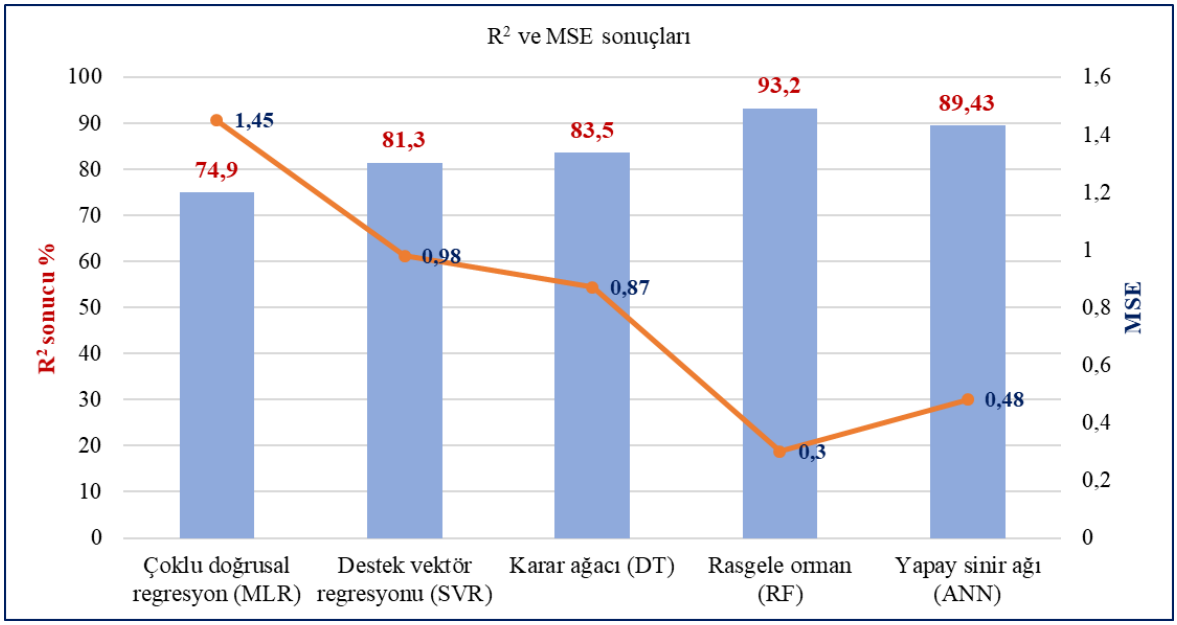
Toplam veri setinin %70'i ANN modelini eğitmek için, kalan %30'u ise 0,01 öğrenme oranı ve 0,2 bırakma (dropout) oranı ile modeli test etmek için kullanılmıştır. 1 giriş kamanı, 3 gizli katman (32x32x16) ve 1 çıkış katmanından oluşan ANN modeli oluşturularak elde edilen tahmin performansı (R^2 skoru) 0,894'tür. Bu modele ait tahmin performans grafiği Şekil 6.24'te görülmektedir.



Şekil 6.24. ANN modelinin tahmin performansı

ML tahmin sonuçlarının karşılaştırması

Şekil 6.25'te sistemin performansının tahmin edilebilmesi amacıyla oluşturulan ML modellerinin R^2 ve MSE performansları karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar genel olarak birbirine yakın olmakla birlikte en verimli sonuçlar sırasıyla yapay sinir ağı (ANN) ve rasgele orman (RF) modelleri ile sağlanmıştır.



Şekil 6.25. ML modellerinin tahmin performanslarının karşılaştırması

Şekil 6.25'teki tahmin sonuçlarına ilişkin performans grafiğinde görüldüğü üzere, veri setinin girdi ve çıktı arasında doğrusal özellik göstermemesi nedeniyle en düşük skor

doğrusal ilişki regresyon analizi kullanan MLR ile elde edilmektedir. Girdi verileri ile çıktı arasındaki ilişkinin tahmini için en tutarlı modelin oluşturulmasını sağlayan model ise RF ile elde edilmiştir.

6.2. RoFSO-VLC Hibrit Haberleşme

Bu kısımda, Optisystem simülasyon programı kullanılarak RoFSO-VLC hibrit sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Performans değerlendirmesi için çeşitli parametreler (Lazer gücü, FSO zayıflaması, FSO bağlantı mesafesi, VLC bağlantı mesafesi ve farklı atmosferik koşullar için VLC frekans değerleri) kullanılarak Q-faktörü, BER ve Göz diyagramı verileri belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada Python™ ve Matlab® programları kullanılarak SVR, MLR, RF, gauss ilerleme regresyonu, DT ve ANN gibi farklı makine öğrenme algoritması (MLA) modelleri kullanılarak hibrit sistemin kalite faktörü (Q-faktörü) tahmin edilmiştir. Simülasyon programı ile elde edilen veriler bu MLA modellerinin eğitim ve test aşamalarında kullanılmakta ve en iyi tahmin performansı elde edilmeye çalışılmaktadır.

Bu kısımdaki çalışma, RF sinyallerinin FSO hattı üzerinde modüle edilerek iç mekan bağlantısı olarak VLC sistemi üzerinden son kullanıcıya daha verimli bir şekilde iletilmesi için hibrit bir yapı oluşturmayı ve aynı zamanda bu sistemin tahmin modelini ML yöntemleri kullanarak elde etmeyi ve sistem performansının tahmini için ML modelleri oluşturmaya yönelik bir yöntem önermeyi amaçlamaktadır.

RoFSO ve farklı ML yöntemlerinin kullanıldığı benzer çalışmalar olan [178, 188, 189]'da QAM ve OFDM kullanan RoFSO sisteminin performans analizi (SNR ve BER tahmini) ANN, KNN (K-Nearest Neighbors) ve DT yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Diğer bir benzer çalışmada [187], bir sinir ağı (NN) modeli, bir dış mekan RoFSO bağlantısının ve VLC/RF kullanan bir iç mekan bağlantısının kanal tahmini ve güç telafisi için kullanılmıştır.

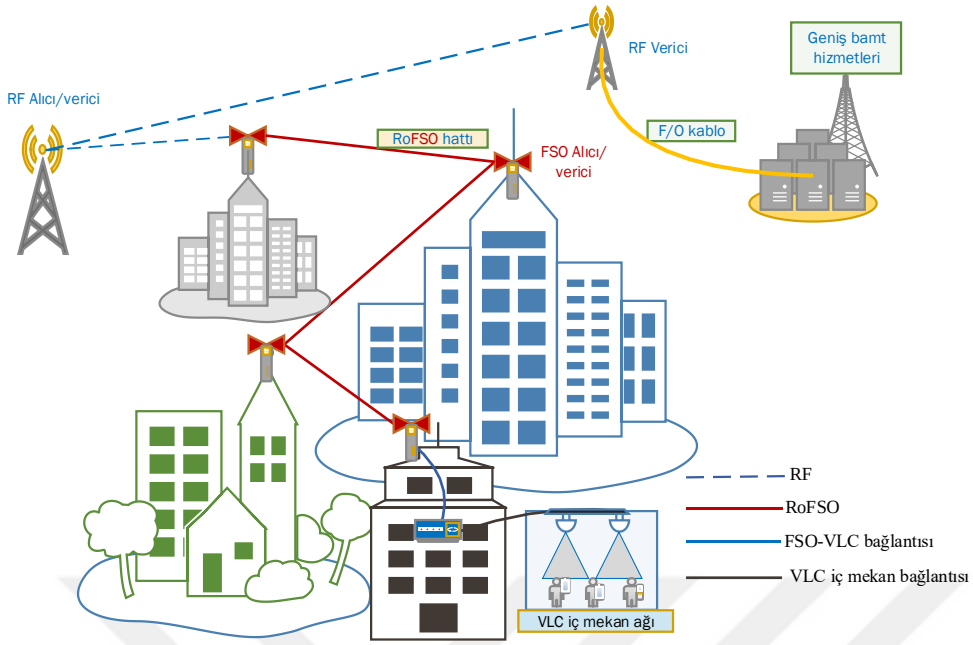
Yukarıda belirtilen çalışmalar ilave olarak, FSO sisteminin analizi için oluşturulan tahmin modellerinde ML yöntemlerinin kullanımı üzerine yapılan çalışmalardan; [174]'de ANN, RF ve SVM (R^2=0,92) modelleri ile SNR tahmini, [175]'te LR (Doğrusal regresyon), Bayesian Ridge ve SVM (R^2=0,80) yöntemleri ile Q-faktörü tahmini, [24]'de SVM (ideal durum R^2=0,98 - en kötü durum R^2=0,86) modeli ile OSNR, görüş mesafesi ve işaretleme hatası tahmini yöntemleri, [103]'de SVM, MLR, DT ve RF (R^2=0,95) yöntemleri ile Q-

faktörü tahmini, [195]'te çoklu ML yöntemleri ile SNR ve BER tahmini ile [194]'te SVM ve CNN (evrişimli NN) kullanarak yükseltilmiş anlık emisyon (ASE) gürültüsü, türbülans ve işaretleme hataları gibi sistem bozukluklarının tahmini gibi farklı işlemler gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda da belirtildiği üzere, FSO sistemlerinin ML yöntemleri ile tahmin modellemesi üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte, hibrit RoFSO-VLC sistemi ve ML yöntemlerinin kullanımı literatür için yeni bir çalışma alanıdır ve bilindiği kadarıyla literatürde hibrit RoFSO-VLC sisteminin performans analizi için ML tahmin modellerini kullanan bir çalışma bulunmamaktadır.

Optisystem ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen veri seti kullanılarak iki farklı program (Python ve Matlab) üzerinde ML yöntemleri ile yapay zeka modelleri geliştirilmiştir. Hibrit RoFSO-VLC sistemi ve ML yöntemlerinin kullanımı literatür için yeni bir çalışma alanıdır. Eğitilen ML modelleri sistemin performans göstergelerini (Q-faktörü, BER, Göz Diyagramı) %90 ve üzeri tahmin kabiliyeti ile tahmin ederek sistemin en iyi performansı için gerekli girdileri önceden belirlemek ve verimli bir iletişim ortamı oluşturmak için kullanılabilir.

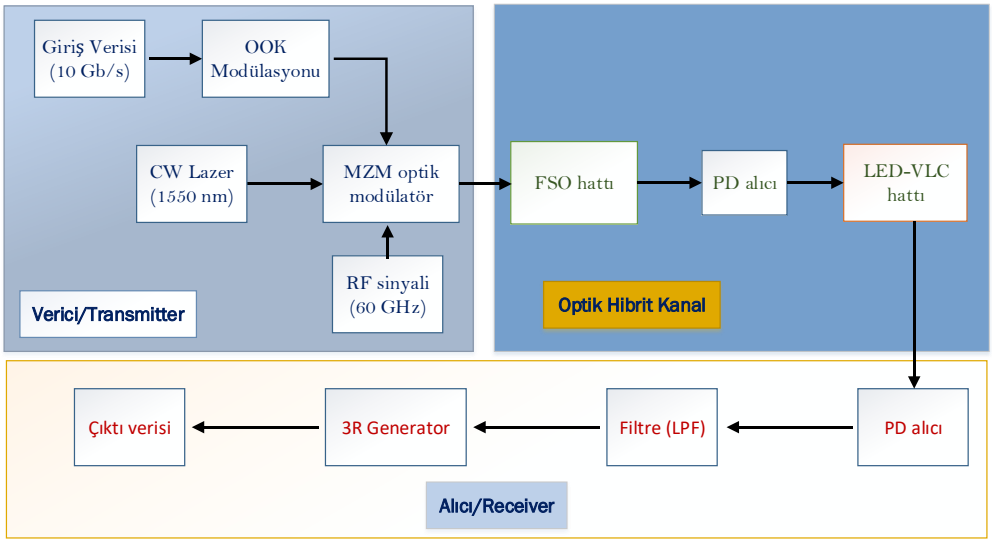
Bu çalışmada dış mekan bağlantısı olarak RoFSO ve devamında iç mekan iletimi için ise VLC bağlantısı kullanan RoFSO-VLC hibrit şebeke yapısı analiz edilmektedir. Simülasyonu yapılan devre yapısı Şekil 6.26'da gösterildiği gibidir.



Şekil 6.26. RoFSO-VLC hibrit ağ yapısı

Optik simülasyon sonuçları

Bu bölümde, RoFSO-VLC hibrit sistemi Optisystem optik simülasyon programı kullanılarak simüle edilmiştir. Tasarlanan sistemde VLC kanalının farklı dalga boyları (RGB--660-514-450nm) ve yağışlı atmosfer koşullarını temsil eden farklı zayıflama değerleri (1-20 dB/km) ve FSO mesafesi, lazer gücü, VLC link mesafeleri gibi parametrelerin farklı değerleri için performans analizi yapılmıştır. Simüle edilen devre yapısı Şekil 6.27'de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.27. RoFSO-VLC simülasyon devre şeması

Sistem 7 farklı FSO bağlantı mesafesi (1-7 km), 15 farklı VLC kanal mesafesi (2-30 m) ve 5 farklı CW lazer gücü değerinden (0-20 dBm) oluşmaktadır. Q-faktörü ve BER performansları 10 Gb/s sabit veri hızı ve 60 GHz taşıyıcı frekansı için analiz edilmiştir. Önerilen RoFSO-VLC sisteminin temel özellikleri Çizelge 6.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. RoFSO-VLC sistem özellikleri

Sistem Parametresi	Değeri
Veri hızı	10 Gbps
Dalga boyu	1550 nm
FSO mesafesi	1-7 km
VLC dalga boyları (VLC Frekansları)	660-514-450 nm (454-583-666THz)
VLC mesafesi	2-30m
Elektron yaşam süresi	10^{-12} s
RC sabiti	10^{-12} s
CW lzer gücü	0-20 dBm
RF Frekansı	60 GHz
Gönderici açıklık çapı	5 cm
Alıcı açıklık çapı	25 cm
Işın sapması (divergence)	0,25 mrad
Zayıflama (atmosferik)	1-20 dB/km
Atmosferik türbülans modeli	Gamma-gamma

Gönderici tarafında 10 Gbps veri hızına sahip sözde rastgele bit dizisi (PRBS) ve NRZ elektrik darbesini üretmektedir. Darbe üretecinin işlevi, ikili sinyali modülatöre göndermeden önce elektrik sinyaline dönüştürmektir. MZM verilen giriş dalga kılavuzlarını ayrı kollara bölerek ve bunları yeniden birleştirerek dalgalar arasındaki faz farkını genlik modülasyonuna dönüştürmektedir. Optik modülatör (MZM), esas olarak elektrik sinyalini optik kanaldan iletilmek üzere optik sinyale dönüştürmekten sorumludur.

MZM, CW (sürekli dalga) lazer kaynağı ve elektrik darbesi tarafından modellenen sinyali modüle eder. Elde edilen çıktı, gelen elektrik sinyali tarafından değiştirilen bir yoğunluğa sahip optik bir sinyaldir. Verici tarafında, 60 GHz frekanslı RF sinyali, optik sinyalle aynı

şekilde Dual MZM tarafından modüle edilir. Optik olarak modüle edilen sinyal, optik yükselticiden geçtikten sonra FSO kanalına iletilir. Zayıflama değerleri hafiften şiddetli hava koşullarına kadar değişmektedir.

Alıcıda, fotodedektörden (PD) önce, alınan sinyali yükseltmek ve arka plan gürültüsünün sınırlamasını kaldırmak için 10 dB kazançlı bir optik yükselteç (OA) kullanılmaktadır. PIN fotodedektör optik sinyali tekrar elektrik alanına dönüştürür. Alınan sinyal daha sonra sinyali filtrelemek için bir Bessel LPF'den (alçak geçiş filtresi) geçirilir. Son olarak, sinyal farklı hava koşullarını temsil eden zayıflama değerleri ile lazer çıkış gücü parametreleri ve OA kazancı dikkate alınarak Q faktörü ve BER performans analizi için BER analizörüne uygulanmaktadır.

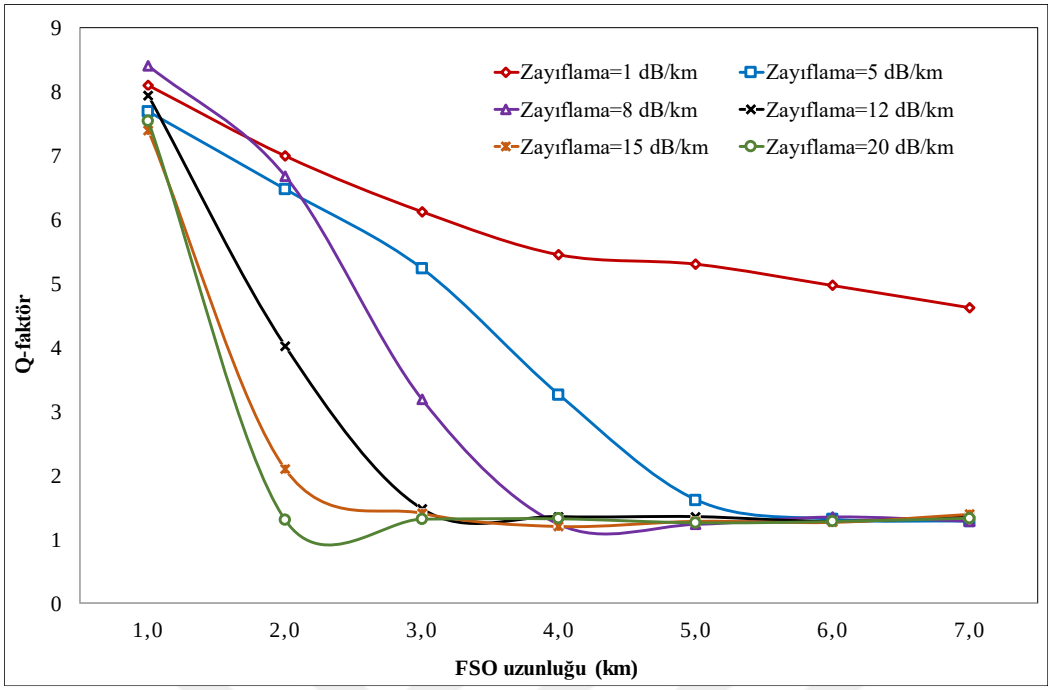
Simülasyon sonuçları

Bu kısımda RoFSO-VLC hibrit sisteminin simülasyonu ile elde edilen çıktılara ait grafikler yer almaktadır. Grafiklerde, FSO uzunluğu ve VLC mesafeleri için sistemin atmosfer etkisinden kaynaklı zayıflama değerleri, lazer gücü, VLC LED frekanslarının Q-faktörü ve BER gibi parametrelerle karşılaştırılması verilmektedir.

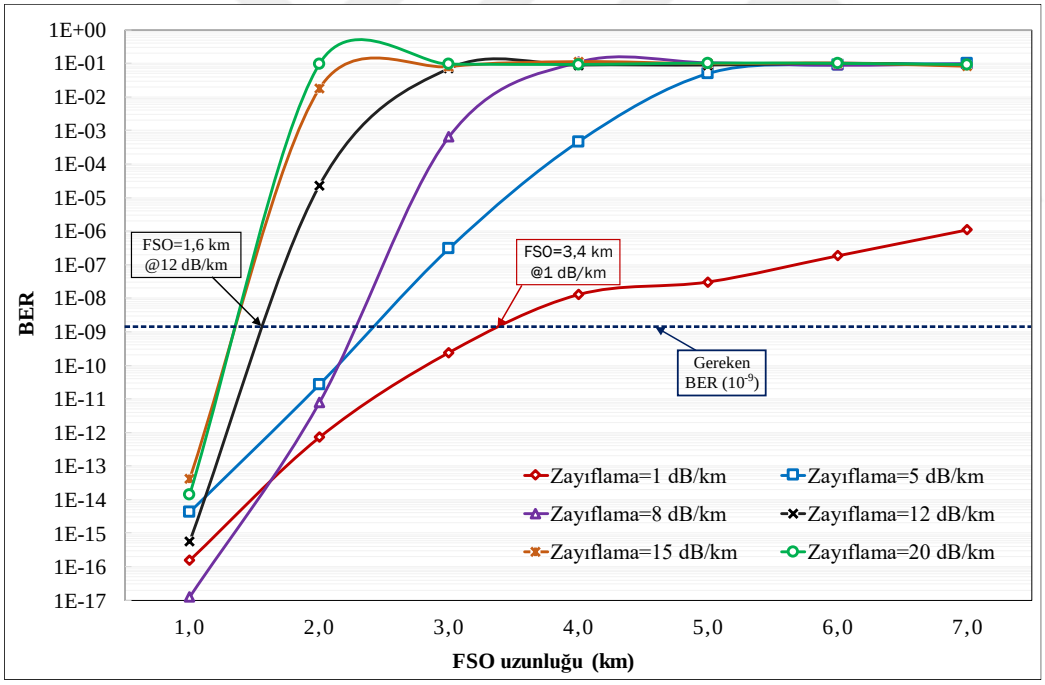
BER gereksinimleri modülasyon formatına, uygulamaya, sistem tasarımına ve diğer sistem parametrelerine ve gereksinimlerine bağlı olmakla birlikte, telekomünikasyon standart uygulamaları için gerekli minimum BER [9]'da belirtildiği gibi 10^{-9} olarak kabul edilebilir.

Şekil 6.28(a) ve (b), CW lazer gücü sabit 0 dBm, LED frekansı 666 THz ve VLC bağlantısı 30 m için farklı FSO bağlantı uzunlukları ve zayıflama değerleri için Q-faktörü ve BER grafiklerini göstermektedir. 5, 8, 12, 15 ve 20 dB/km zayıflama değerleri için Q-faktörü ortalama değerinin 7 km FSO mesafesinde 7,84'ten 1,33'e düştüğü ve 7 km için ve 1 dB/km ve üzeri zayıflama seviyeleri için 4 ila 5 aralığında kaldığı görülebilir.

Şekil 6.28 (b) gerekli veya kabul edilebilir BER seviyesini (10^{-9}) göstermektedir ve şekilden de görülebileceği gibi sistem üzerindeki zayıflama etkisi arttıkça kabul edilebilir BER sınırları içerisinde ulaşılabilecek FSO bağlantı mesafesi azalmaktadır. Sinyal 1 dB/km zayıflama seviyesi ile 3,4 km iletilebilirken, 12 dB/km zayıflama için 1,6 km yol kat edilebilmektedir.



(a)



(b)

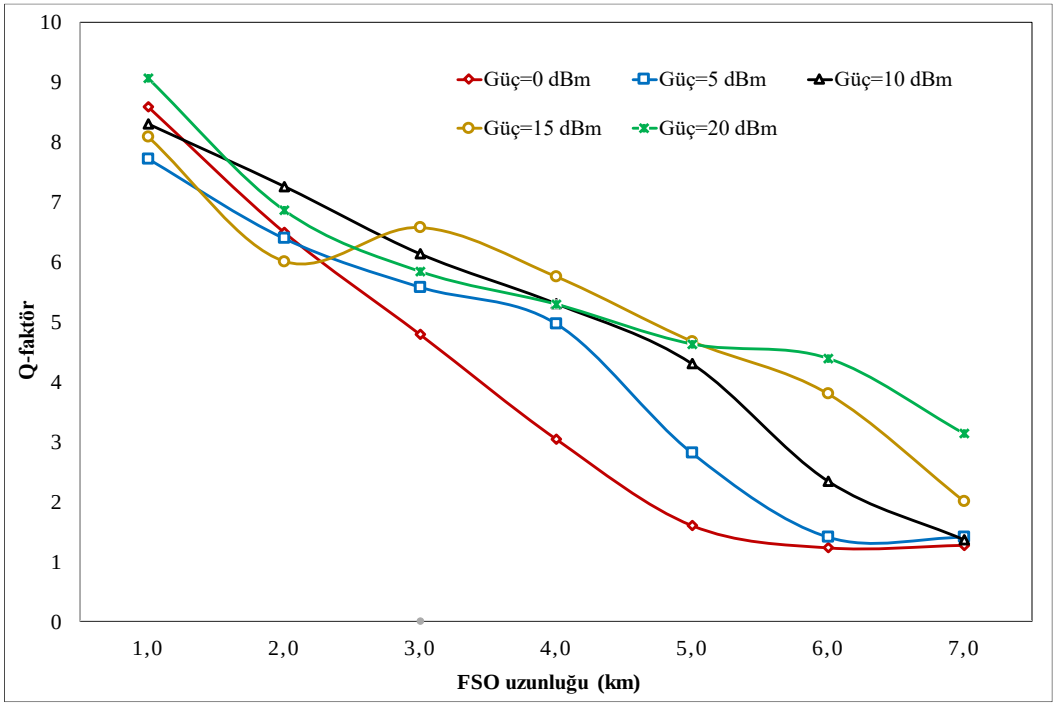
Şekil 6.28. Farklı FSO mesafe ve zayıflama değerleri için a) Q-faktör b) BER grafikleri

Şekil 6.29 (a) ve (b), 5dB/km sabit FSO zayıflama değeri, 666THz LED frekansı ve 30 m VLC bağlantı değeri için farklı FSO uzunlukları ve CW lazer gücü değerleri için Q faktörü ve BER grafiklerini göstermektedir.

Q faktörü değerlerinin 0, 5 ve 10 dBm lazer gücü değerleri için 7 km'de 1,27 ile 1,36

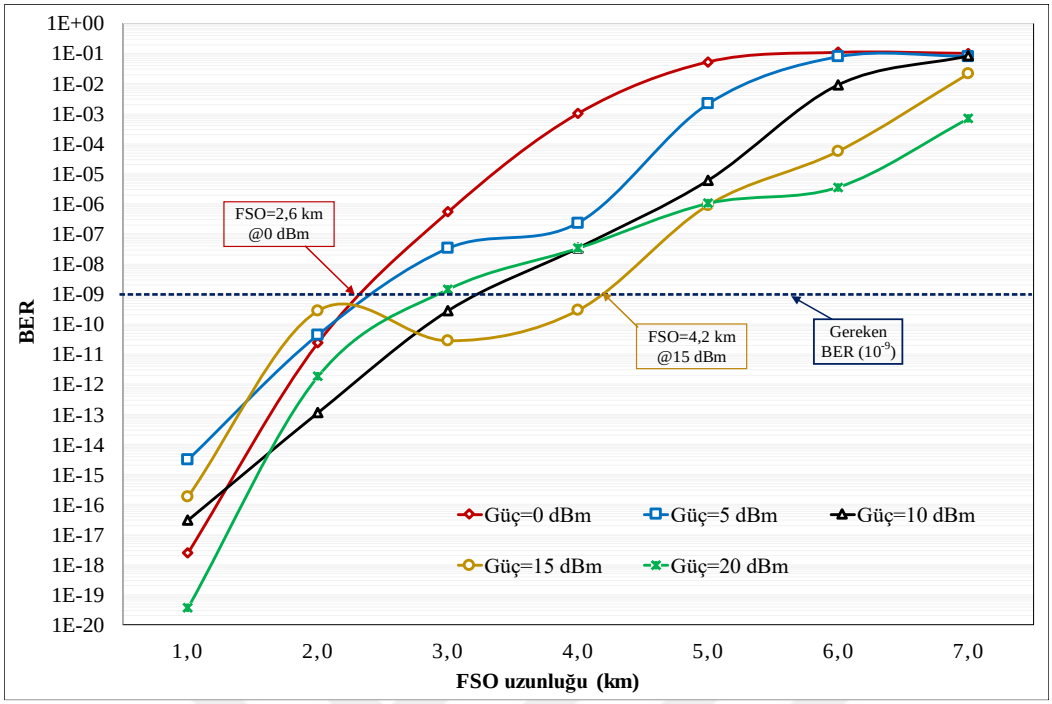
aralığına düştüğü, 7 km mesafe ve 15 ile 20 dBm güç değerleri için ise 2 ile 3,13 aralığında değerler aldığı görülmektedir. CW lazer gücündeki artış tüm FSO mesafeleri için doğrusal olmasa da, özellikle artan FSO mesafeleri için sistemin genel iletim kalitesinin arttığı gözlemlenmektedir.

Şekil 6.29 (b) gerekli veya kabul edilebilir BER seviyesini (10^{-9}) göstermektedir ve lazer gücü arttıkça kabul edilebilir BER limitleri dahilinde ulaşılabilen FSO bağlantı mesafesinin de arttığı şekilde görülebilmektedir.



(a)

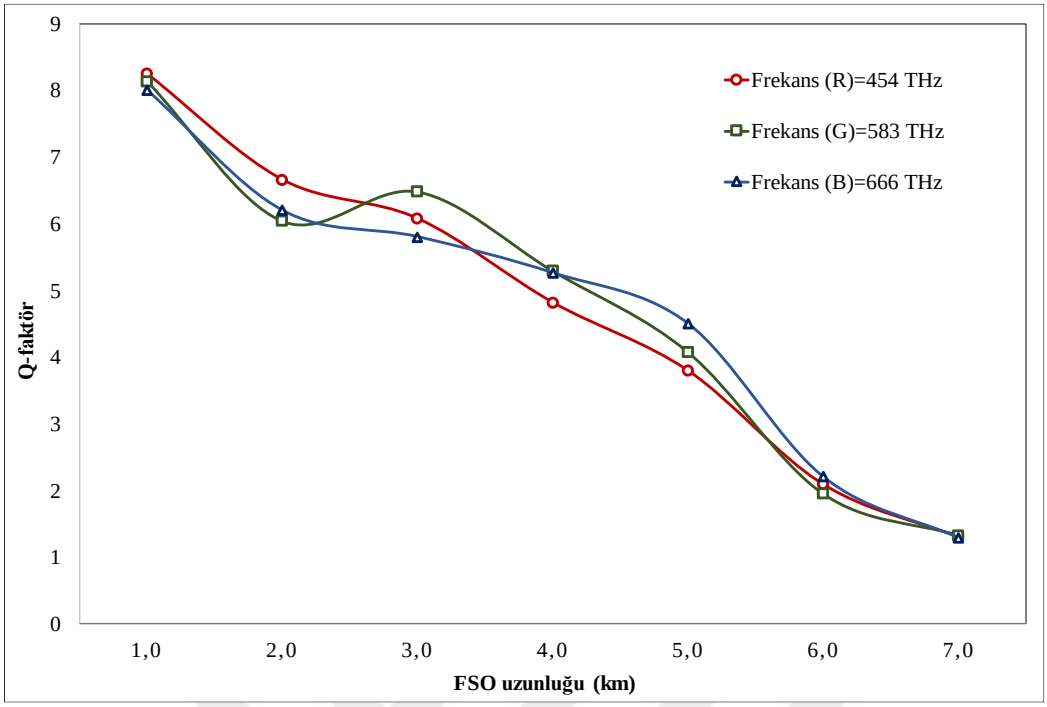
Şekil 6.29. Farklı FSO mesafe ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör b) BER grafikleri



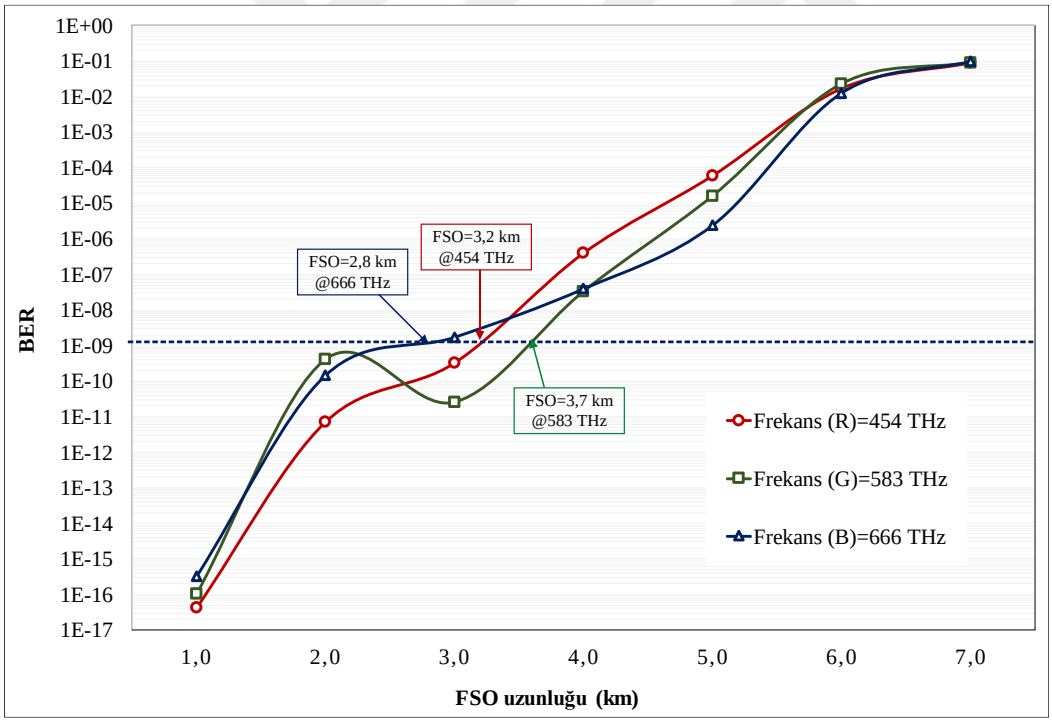
(b)

Şekil 6.29.(devam) Farklı FSO mesafe ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör b) BER grafikleri

Şekil 6.30 (a) ve (b)'deki farklı LED frekansları ve FSO bağlantı mesafeleri için Q-faktörü ve BER grafiklerine göre, FSO bağlantı zayıflama değeri sabit 5dB/km, lazer gücü 10 dBm ve VLC bağlantısı 30 m olduğunda; Q-faktörü ve BER değerleri FSO uzunluğundaki değişimle doğrusal olarak değişmektedir, ancak LED frekansı etkisi farklı mesafeler için değişmektedir. Kalite faktörü değerlerine bakıldığında, aynı bağlantı mesafesi (7 km) için LED frekanslarının Q faktörü değerlerinin $Q_{583THz} > Q_{454THz} > Q_{666THz}$ olduğu görülmektedir. Şekil 6.30(b) gerekli veya kabul edilebilir BER seviyesini göstermektedir.



(a)

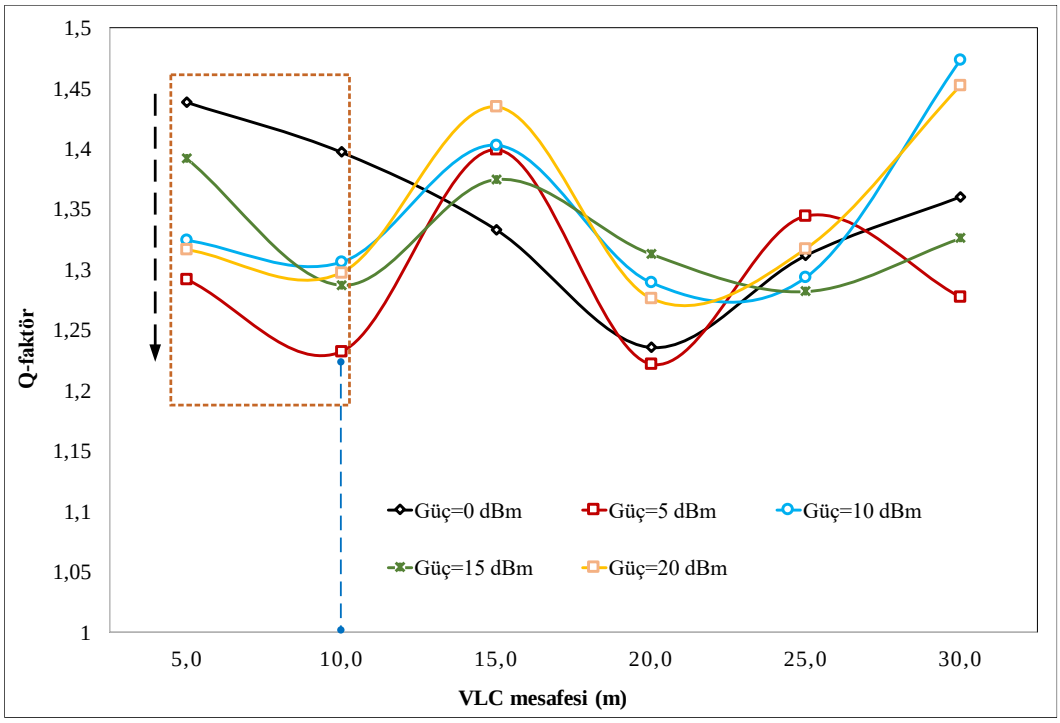


(b)

Şekil 6.30. Farklı FSO mesafe ve LED frekans değerleri için a) Q-faktör b) BER grafikleri

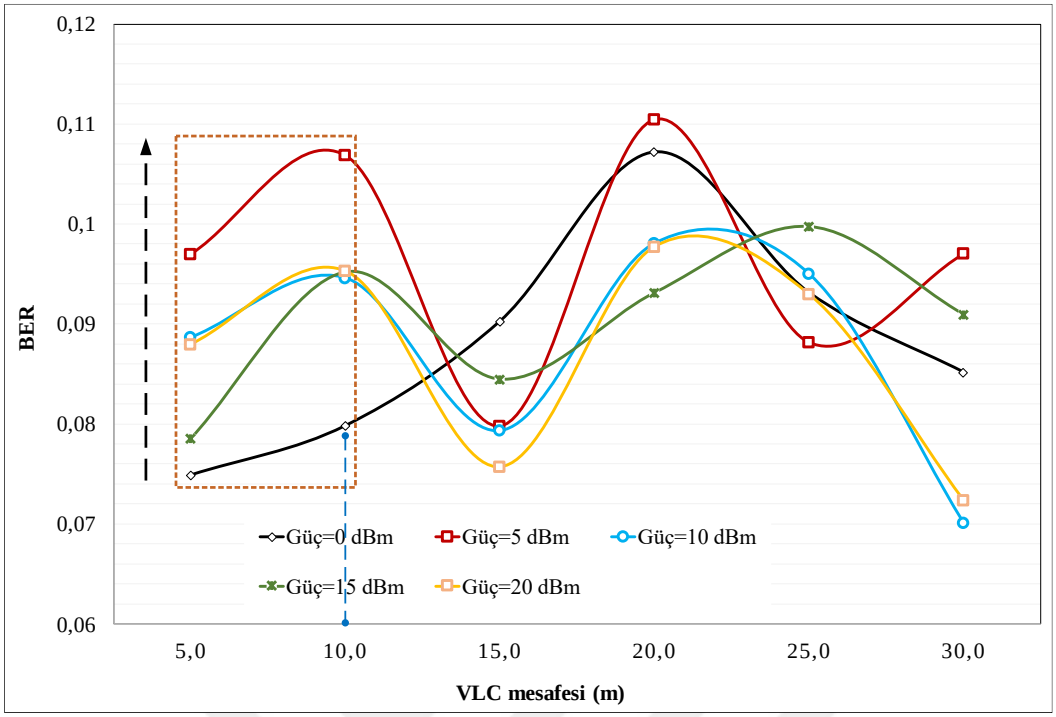
Şekil 6.31 (a) ve (b), 15 dB/km sabit FSO bağlantı zayıflaması, 666 THz LED frekansı ve 7 km FSO bağlantısı ile farklı VLC bağlantı mesafeleri ve CW lazer gücü değerleri için Q-faktörü ve BER grafiklerini göstermektedir. Grafiklere göre VLC mesafesinin değişmesi ile Q-faktörü ve BER değerlerinin oldukça farklı değerler aldığı görülmektedir.

Elde edilen verilere göre VLC uzunluğu için maksimum mesafe olarak kabul edilebilecek ilk 10 m'ye kadar mesafe artışıyla birlikte Q-faktörün düştüğü, 10 m'nin üzerindeki mesafelerde yapılan simülasyonlarda ise bu değerleri çok farklı ve kararsız doğrusalsızlık olarak elde edildiği görülmektedir. Diğer yandan kalite faktörü değerlerine bakıldığında CW lazer gücündeki 20 dBm'lik bir artışın Q faktöründe 1,27 ile 1,33 aralığında bir artış sağladığı görülmektedir. BER değerleri ise, Q-faktör ile ters orantılı olacak şekilde, mesafenin artışı ve gücün azalması ile birlikte artış göstermektedir.



(a)

Şekil 6.31. Farklı VLC mesafe ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör b) BER grafikleri



(b)

Şekil 6.31.(devam) Farklı VLC mesafe ve lazer gücü değerleri için a) Q-faktör b) BER grafikleri

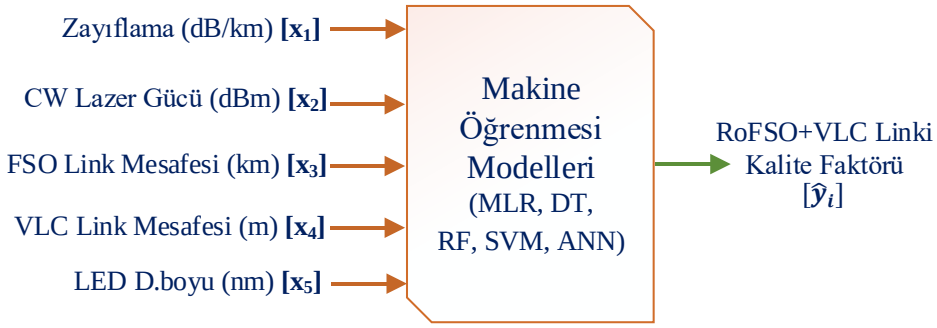
ML modelleri ve tahmin sonuçları

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, RoFSO hibrit iletişimi, son kilometre iletişimini sağlamak ve yüksek veri hızını garanti etmek için umut verici bir çözüm olmaktadır. Ancak FSO bağlantılarının performansı olumsuz hava koşulları nedeniyle önemli ölçüde düşebilmektedir. Son zamanlarda ağ performansını optimize etmek için güçlü tahminler sağlayan makine öğrenme algoritmaları (MLA'lar) ortaya çıkmıştır. Optik iletişim için makine öğrenimi teknikleri önemli bir rol oynamaktadır ve altıncı nesil (6G) ve ötesindeki kablosuz ağların akıllı tekniklerden biri olarak devam edecektir [103].

Bu kısımda, RoFSO-VLC hibrit sisteminin girdi verileri ve optik simülasyon programı ile elde edilen çıktı verileri kullanılarak makine öğrenmesi yöntemleri ile tahmin sistemi oluşturulması çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmada Python ve Matlab proramları kullanılmıştır.

Q faktörünü tahmin etmek için kullanılan tahmin modeli, Şekil 6.32'de gösterildiği gibi $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ ile temsil edilen 5 bağımsız değişkeni (özniteliği) dikkate almaktadır. X,

her satırın $\hat{y}_i$ ile gösterilen Q sürekli değişkenini tahmin etmek için uygulanacak bir örnek olduğu giriş öznitelikleri olarak tanımlanır.



Şekil 6.32. Tasarlanan ML algoritmasının girdi/çıktı yapısı

Bu çalışma, Python ve Matlab programlarında en sık kullanılan ML yöntemlerini aynı veri ve aynı modelleme için karşılaştırmaktadır. Literatürde Matlab ve Python ile yapılmış bazı ayrı çalışmalar olsa da, bildiğimiz kadarıyla bu iki farklı programın aynı veri kullanılarak ve aynı model üzerinde birlikte kullanıldığı ve karşılaştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır.

Tahmin modelleri oluşturulurken 243 farklı örnekten oluşan veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti toplam 1458 (243x6) veri içermektedir. Veri setinin %70'i (170 veri örneği) eğitim için, kalan %30'u (73 veri örneği) ise test için kullanılmıştır.

Python ML modelleri ve tahmin sonuçları

İlk olarak Optisystem simülasyon programı ile üretilen veri setini içeren excel dosyası Pandas modülü ile Python'a yüklenerek üzerinde bazı temel regresyon algoritmaları uygulanmıştır. Seçilen özellikler, CW lazer gücü, FSO kanal zayıflaması, FSO link mesafesi, LED frekansı ve VLC link mesafesi'dir. Bu değişkenlere bağlı 243 farklı örnek için veri (Şekil 6.33) elde edilmiştir. Bağımlı değişken olarak Q faktörü incelenmiştir.

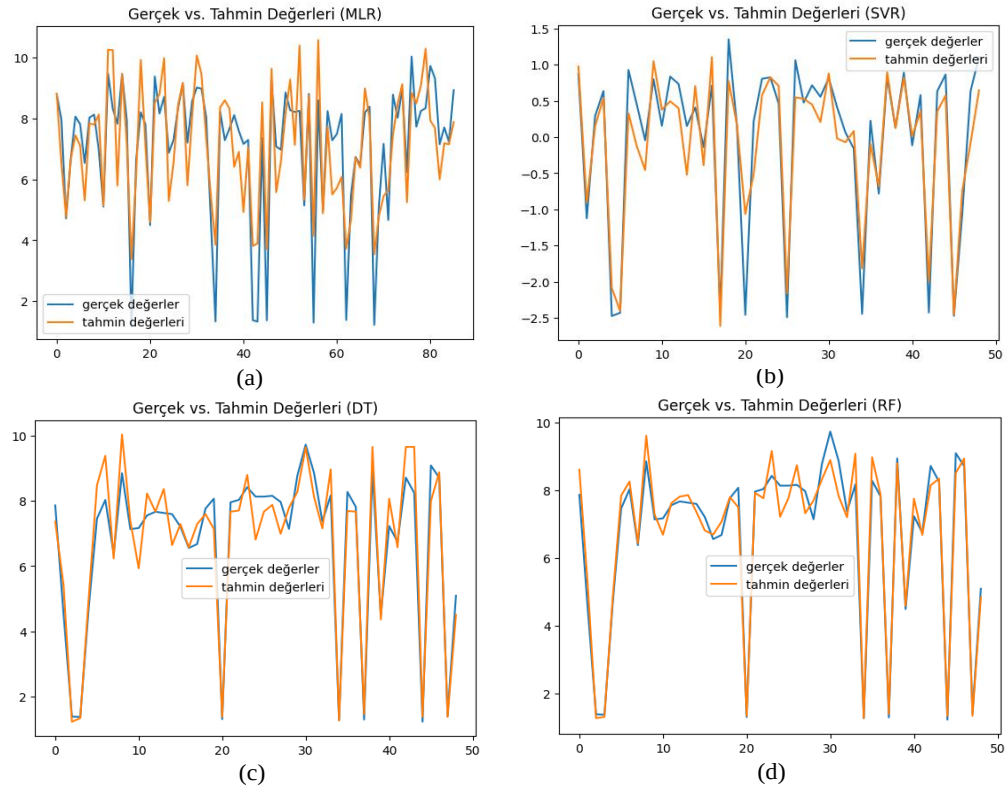
```
display(pd.DataFrame(veri))
```

	Dalga boyu (nm)	Zayıflama (dB/km)	FSO mesafe (km)	VLC mesafe (m)	Güç (dBm)	Q-faktör
0	660	1	5	5	15	6.53010
1	514	10	5	5	10	1.29730
2	514	1	5	5	10	7.28927
3	514	5	3	5	15	7.70899
4	514	10	3	10	15	4.66798
...	...	...	...	...	...	...
238	660	10	5	5	10	1.25842
239	450	5	5	5	10	4.89950
240	514	5	1	10	10	8.98434
241	514	1	1	10	15	9.15846
242	450	10	5	5	20	1.45177

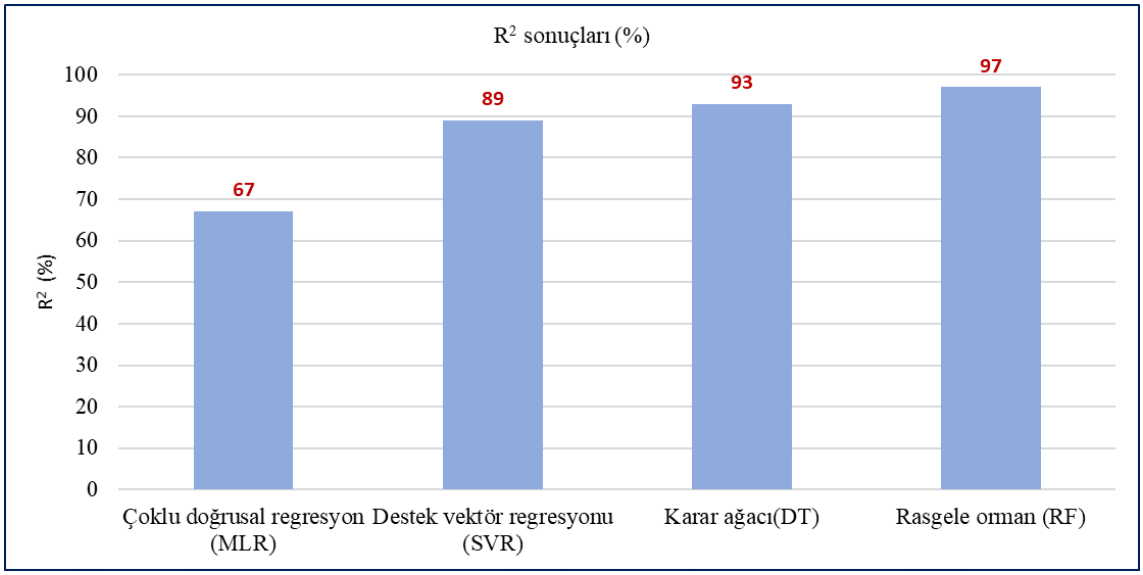
243 rows × 6 columns

Şekil 6.33. Python girdi/çıktı veri tablosu görüntüsü

Şekil 6.33'teki tabloda yer alan veriler Python programı üzerinden farklı regresyon analizleri yapılarak modellenmiş, bu analizler ve modellemeler sonucunda Şekil 6.34 (a) ila (d)'de verilen tahmin sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 6.34. Python modeli tahmin sonuçları a) MLR R^2=0,674 b) SVR R^2=0,885 c) DT R^2=0,927 d) RF R^2=0,967 e) Tahmin performansları



(e)

Şekil 6.34.(devam) Python modeli tahmin sonuçları a) MLR R^2=0,674 b) SVR R^2=0,885 c) DT R^2=0,927 d) RF R^2=0,967 e) Tahmin performansları

Şekil 6.34'te verilen tahmin modellerinin sonuçlarına göre en iyi tahmim skoru %96,7 olarak RF modeli ile elde edilmiştir. Diğer ML modellerinin tahmin performansları ise sırasıyla; DT modeli için %92,7, SVR modeli için %88,5 ve MLR modeli için %67,4 olarak elde edilmiştir. Şekil 6.34 (b)'deki SVR modeli Q-faktör değerleri (-2,5 ile 1,5 aralığında) ölçeklendirilmiş olarak görülmektedir.

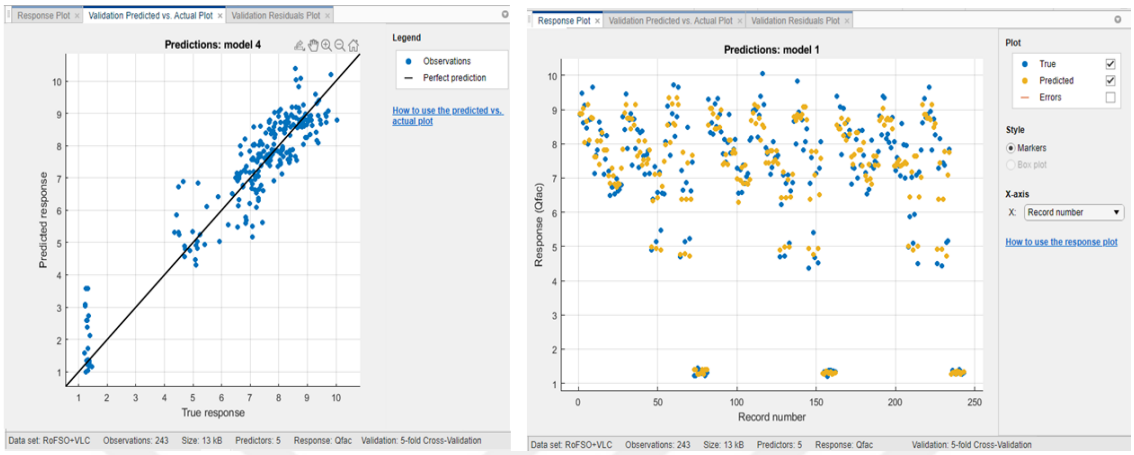
Matlab ML modelleri ve tahmin sonuçları

Bu kısımda ise, Optisystem simülasyonu ile elde edilen veri seti Matlab programı kullanılarak test edilmiştir. Matlab programı ile oluşturulan ML modellerinin tahmin sonuçları ve genel performans çıktıları Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da yer almaktadır.

Şekil 6.35'te verilen ve Matlab ile oluşturulan tahmin modellerinin sonuçlarına göre en iyi tahmim skoru (R^2) 0,93 olarak DT modeli ile elde edilmiştir (Şekil 6.35(a)). Diğer ML modellerinin tahmin performansları ise sırasıyla; GPR (gaussian process regression) modeli için 0,90, ANN modeli için 0,89 ve SVR modeli için 0,53 olarak elde edilmiştir.

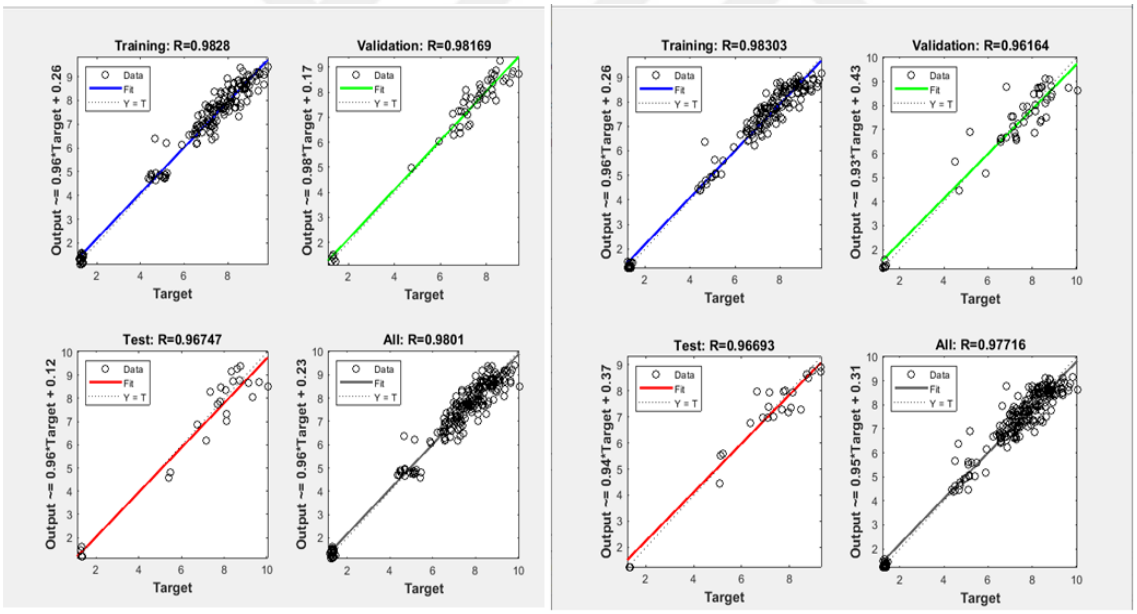
Şekil 6.36'da Matlab ile oluşturulan ve farklı gizli katman sayılarına sahip ANN tahmin modellerinin sonuçlarına göre tek gizli katmana sahip ANN modelinin tahmin sonucu (R^2)

0,98, iki gizli katmana sahip ANN modelinin sonucu ise 0,97 olduğu görülmektedir. Şekil 6.37 ise tüm matlab modelleri için elde edilen tahmin performans sonuçlarının grafiğidir.



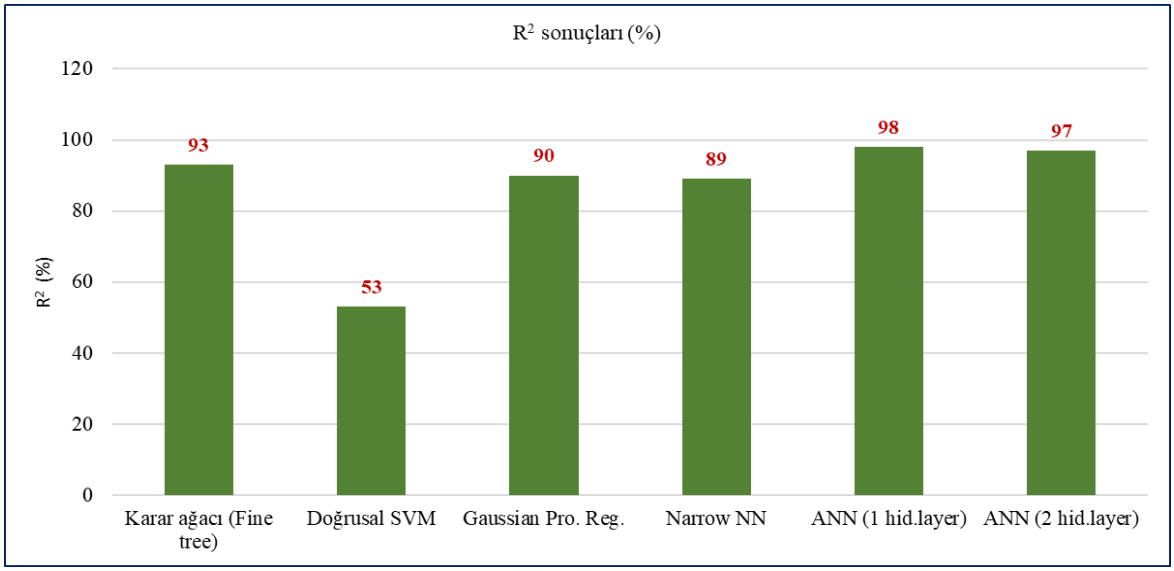
(a) (b)

Şekil 6.35. Matlab modeli tahmin sonuçları a) DT tahminleri b) ANN tahminleri



(a) (b)

Şekil 6.36. Matlab modeli ANN sonuçları a) 1 gizli katmanlı b) 2 gizli katmanlı



Şekil 6.37. Matlab modelleri tahmin performansları

Çizelge 6.6, sistemin genel performansını tahmin etmek amacıyla Python ve Matlab ile oluşturulan ML modellerinin performans sonuçlarını özetlemektedir.

Çizelge 6.6. ML modellerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Veri (243x6)	Python				Matlab				Matlab (ANN)	
Tahmin skoru (R^2)	DT	SVM	RF	MLR	Fine Tree	Doğrusal SVM	Gaussian Process Reg.	Dar NN Reg.	1 Gizli katman	2 Gizli katman
%	93	89	97	67	93	53	90	89	98	97

Tahmin sonuçlarının özetlendiği Çizelge 6.6'da görüldüğü üzere, veri setinin girdi ve çıktı arasında doğrusal özellik göstermemesi nedeniyle en düşük tahmin sonucu doğrusal ilişki regresyon analizi kullanan MLR ve Doğrusal SVM ile elde edilmektedir. Girdi verileri ile çıktı arasındaki ilişkinin tahmini için en tutarlı modelin oluşturulmasını sağlayan model ise ANN ile elde edilmiştir.

6.3. FSO-VLC Hibrit Haberleşme

5G ve ötesinin taleplerini karşılamak için FiWi, FSO ve VLC gibi teknolojiler ağın fiziksel katmanına yönelik çözümler olarak entegre edilmektedir [8]. Özellikle FSO ve VLC teknolojileri olmak üzere OWC sahip olduğu avantajlar nedeniyle, uzay-hava-yer-okyanus

(SAGO) entegre iletişim çerçevesi içinde hibrit optik kablosuz ağlar için ideal adaylar haline gelmektedir [196]. Optik-optik kablosuz hibrit mimariler, sürekli bağlantı elde etmek ve yüksek hızlı kablosuz verim için kullanıcıların hizmet kalitesi (QoS) gereksinimlerini karşılamak için güçlü bir çözüm sunmaktadır [9].

OWC, görünür ışık aralığı da dahil olmak üzere kızılötesinden ultraviyoleye kadar tüm optik spektrumdan yararlanmaktadır. VLC, iç mekan RF iletişimine yönelik önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır ve ağır veri hizmetlerine yönelik giderek artan talepleri karşılayabilecek kapasitededir. Kalabalık radyo spektrumuyla başa çıkmak için devasa ve lisanssız bir bant genişliği sunmanın yanı sıra VLC teknolojisi, kullanım kolaylığı, radyasyon içermemesi ve elektromanyetik girişim olmaması gibi çeşitli başka avantajlara da sahiptir. Öte yandan LOS teknolojisi olan FSO iletişim sistemi, yüksek bant genişliği son nokta iletim tekniği olarak büyük ilgi görmektedir. FSO, daha az başlangıç konuşlandırması gerektirdiğinden ve kablolu bağlantı kurulumunun zor olduğu yerlere kurulabileceğinden optik fiberlere makul bir alternatiftir [49].

Hava koşulları, FSO'da yüksek sinyal kalitesini veya Q faktörünü korumak için çok önemlidir; daha iyi görünürlük, sinyal kalitesinin artmasını sağlamaktadır. ITU-T standardına göre, daha yüksek dalga boyları daha büyük maksimum menzillere izin vermektedir. Dalga boyunun yanı sıra, FSO sisteminin giriş bit hızı da Q faktörünün belirlenmesinde önemli bir rol oynar: daha düşük bit hızları daha yüksek Q faktörleri sağlar ve daha uzun mesafeleri destekler. VLC iç mekan simülasyonları için 400 nm ve 700 nm dalga boyları Q faktörü üzerinde minimum etkiye sahipken, sonuçlar ITU-T standardına uygun olarak VLC için maksimum menzilin 11 metre olduğunu göstermektedir [12].

Bu kısımda, 10 Gb/s OOK modülasyonlu hibrit FSO-VLC haberleşme sisteminin uçtan uca performansı, FSO Gama-Gama atmosferik türbülans modeli, lazer gücü, link mesafeleri ve atmosferik zayıflama gibi giriş parametreleri BER, kalite faktörü (Q-faktor) ve SNR değerleri ile değerlendirilmektedir. Sistemin online performans izlemesi ve iyileştirmesi için ML yöntemleri ANN, SVM, DT, RF ve optik simülasyon verileri kullanılmaktadır. Simülasyon sistemi üzerinden elde edilen ağ çıktıları, farklı ML metodların karşılaştırıldığı bir yapay zeka modülü üzerinden değerlendirilerek sistemin test edilmesi ve performans iyileştirmesi amacıyla tahmin yöntemleri kullanılmaktadır. Yapay zeka modülünde aktif öğrenme yöntemi de kullanılmaktadır. Ayrıca, FSO-VLC hibrit sisteminin kesinti olasılığı

için SNR değerlerinin PDF ve CDF matematiksel ifadelerinden faydalanılarak Matlab programı ile Monte-Carlo simülasyonu yapılarak incelenmektedir.

Bu çalışmada, optik simülasyon programı ile makine öğrenmesi yöntemlerinin birlikte çalışabilmesi için optik simülasyon programında (Optisystem) yer alan devre elemanlarının giriş parametreleri (lazer gücü, FSO menzili, VLC mesafesi, FSO atmosferik zayıflama) Matlab üzerinden tanımlanan aralıklarda birleştirilerek simüle edilmiş ve simülasyondan elde edilen giriş/çıkış verilerinin makine öğrenmesi ile oluşturulan yapay zeka programlarını otomatik olarak eğitmesi sağlanmıştır.

Eğitilmiş ML programları farklı giriş değerleri için elde edilen performans göstergelerini (Q-faktörü, SNR, BER) yüksek oranda doğru tahmin etmekte ve oluşabilecek farklı giriş parametrelerinde optik simülasyon programının istenen çıktıya yakınsaması için optimizasyon sağlayarak performans iyileştirme amacıyla kullanılabilmektedir.

Önerilen sistem ve kanal modelleri

Tasarımı yapılan hibrit sistemde, VLC sistemi ışık kaynağı olarak LED ve ışık yoğunluğunu algılayan alıcı olarak fotodiyot (PD) kullandığından, OOK modülasyonu ile IM/DD kullanılmaktadır.

Yoğunluk modülasyonlu OOK, FSO sistemleri için yaygın olarak kullanılan geleneksel bir modülasyon yöntemidir. Her sembol aralığında bir ışık darbesinin varlığı veya yokluğu, OOK sinyalleşmesinde modüle edilmiş verileri temsil etmektedir. OOK kullanım kolaylığı nedeniyle oldukça yaygın olmasına rağmen, performansı büyük ölçüde hava koşullarına bağlıdır ve optimum çalışma için uyarlanabilir bir eşik gerektirmektedir.

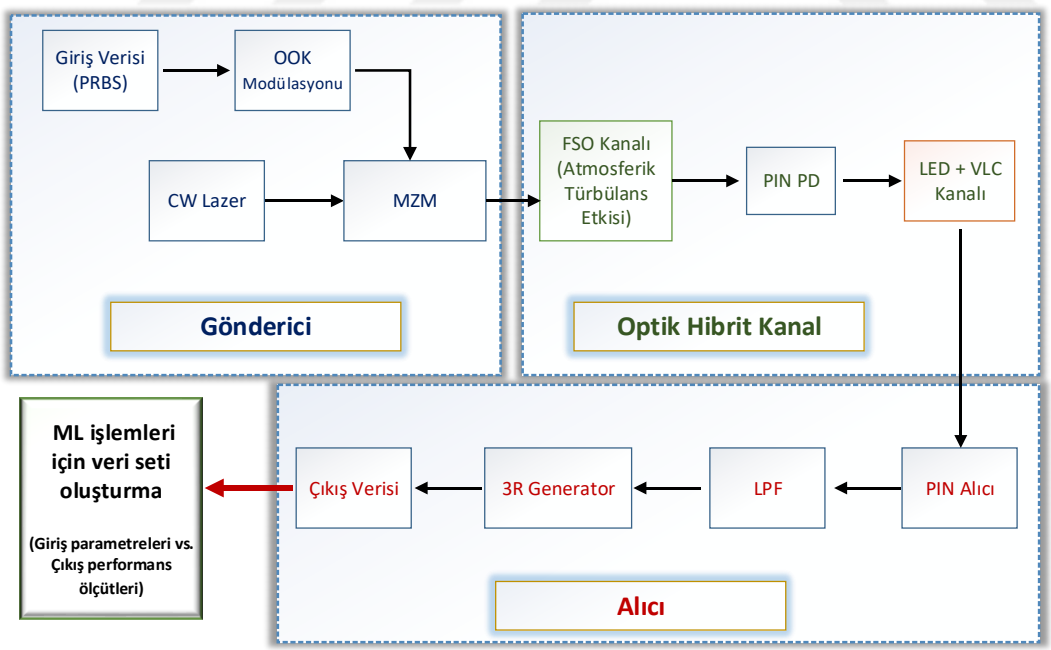
Ayrıca, QAM, çok seviyeli PSK, çok seviyeli PAM ve çok seviyeli polarizasyon kaydırmalı anahtarlama (PolSK), ikili modülasyondan daha yüksek spektral verimlilik elde etmek için kullanılabilir. Ancak bu teknikler de sistem karmaşıklığını artırmaktadır [197].

Diğer taraftan, 16-QAM gibi spektral olarak verimli modülasyon şemaları, hem fiber doğrusal olmayan bozulmalara hem de optik SNR (OSNR) bozulmasına karşı daha düşük toleransları nedeniyle daha katı QoT talepleri getirmektedir [171]. Buna karşılık, türbülanslı

FSO ağlarındaki BER, m-ary QAM sistemlerinde tutarlı algılama gibi daha yüksek dereceli modülasyon teknikleri kullanılarak önemli ölçüde artırılmıştır. Modülasyon yöntemi seçimine ek olarak, hava türbülansının FSO sistemleri üzerindeki etkisi çeşitlilik tekniklerinin kullanılmasıyla etkili bir şekilde azaltılabilmektedir [6].

Son nokta erişim ağındaki bant genişliği problemini çözmek için Şekil 6.38'de şematik diyagramı gösterilen ve Çizelge 6.7'de parametreleri özetlenen FSO-VLC hibrit sistemi önerilmektedir.

Şekil 6.38'deki şemada; gönderici tarafında 10 Gbps veri OOK ile modüle edilmektedir. CW lazer ve MZM ile optik modülasyonu yapılan OOK sinyali, zayıflama değerleri farklı hava koşullarına göre değişen bir FSO kanalına iletilmektedir. VLC ile iletilmeden önce bir fotodedektör (PD) ile algılanarak tekrar elektriksel alana dönüştürülen optik veri sinyali alıcı tarafına LED kullanılarak iletilmektedir. VLC bağlantısında, 550 nm tepe dalga boyunda çalıştırılan tek bir LED, Tx olarak kabul edilmiştir. LED ile dedektör (PIN receiver) arasındaki mesafe (LOS Kanalı) 1-2 m olarak değişmektedir.



Şekil 6.38. FSO-VLC hibrit sistemi diyagramı

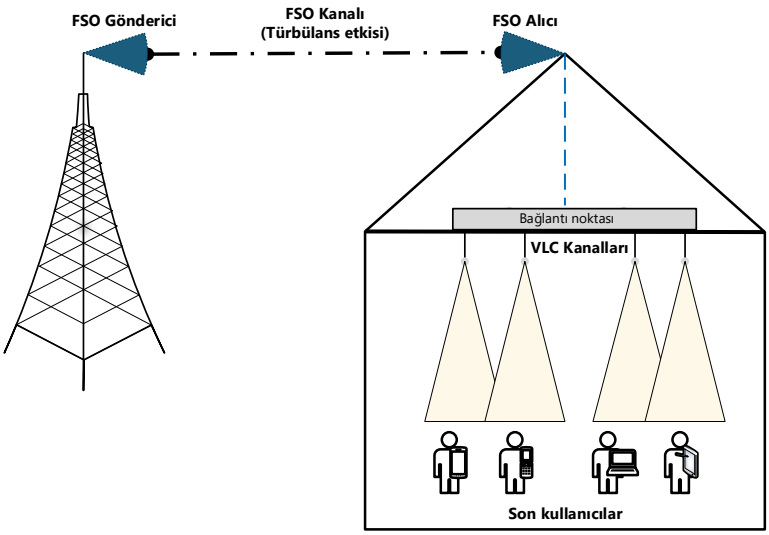
Alınan sinyal daha sonra sinyal filtreleme için bir Bessel alçak geçiren filtreye (LPF) uygulanır. Son olarak, alınan sinyal, farklı hava koşullarını temsil eden zayıflama değerleri,

lazer çıkış gücü parametreleri ve mesafeler dikkate alınarak Q faktörü, SNR ve BER performans analizi için izlenir. FSO-VLC hibrit sistem modeli aşağıdaki Çizelge 6.7'de yer alan parametrelere göre farklı iterasyonlar için simüle edilmiştir. Simülasyon giriş verileri 200 farklı örnek ve 4 öznitelikden (200x4 giriş) oluşmaktadır.

Çizelge 6.7. FSO-VLC sistemi simülasyon parametreleri

Sistem parametresi	Değeri
Veri hızı	10 Gb/s
CW lazer dalga boyu	1550 nm
CW lazer gücü	-5 to 20 dBm
Modülasyon	OOK
FSO kanal mesafesi	1 to 5 km
FSO dalga boyu	1550 nm
Gönderici açıklık çapı (fso)	2,5 cm
Alıcı açıklık çapı (fso)	10 cm
Işın sapması (divergence) (fso)	0,25 mrad
Zayıflama (atmosferik)	2 - 10 dB/km
FSO kanal modeli	Gamma-gamma
VLC dalga boyu	550 nm
VLC kanal mesafesi	1 to 2 m
Elektron yaşam süresi (vlc)	10^{-12} s
RC sabiti (vlc)	10^{-12} s
Quantum verimliliği (vlc)	% 65

Kanal modeli Şekil 6.39'da gösterilen FSO-VLC sistemi, bir iletim rölesi aracılığıyla FSO ana taşıyıcı bağlantısına bağlı son kullanıcılara hizmet veren bir VLC erişim noktasından oluşmaktadır.



Şekil 6.39. FSO-VLC hibrit kanal modeli

FSO iletişim performansı, yol kaybı, işaretleme hataları ve atmosferik türbülans gibi çeşitli dış faktörlerden etkilenir. VLC'de, ortam büyük ölçüde yansıyan sinyallerden önemli ölçüde daha fazla enerjiye sahip olan LOS bağlantısına dayanır. Kaynak ve hedef arasında bir veya daha fazla rölenin kullanılması, hem FSO hem de VLC iletişim sistemlerinin performans ve menzil sınırlamalarını çözmek için kullanılabilmektedir [13].

FSO kanal modeli

FSO kanalının durağan ve hafızasız olduğu ve yavaş sönümlenme sergilediği varsayıldığında, alınan sinyal temel kanal modeli ile tanımlanabilir [198]:

$$y_k = \eta h x_k + noise \tag{6.10}$$

Formülde; η fotodedektörün (PD) hassasiyetini (V/W cinsinden) temsil ederken, h atmosferik türbülansın neden olduğu zayıflamayı hesaba katan ve o andaki kanal yoğunluğunu yansıtan kanal durumunu ifade etmektedir. Bu değer, atmosferik sıcaklık ve basınçtaki rastgele değişimlerden kaynaklanan bozulmalardan etkilenmektedir.

Optik dalgalar atmosferik türbülans boyunca yayıldığında, FSO iletişim sistemi çeşitli zorluklar nedeniyle kesintiye uğrayabilmektedir. Atmosferin kırılma indisi sıcaklık ve basınçtaki dalgalanmalarla keyfi olarak değiştiğinden, optik sinyal yoğunluğu da sintilasyon

olarak bilinen bu süreç sırasında değişmektedir [18].

Türbülansın FSO sinyalleri üzerindeki etkisini analiz etmek ve karakterize etmek için log-normal, gamma-gamma, negatif üstel ve k-dağılımlı modeller gibi çeşitli matematiksel türbülans modelleri kullanılmaktadır. Türbülans, türbülanslı girdapların neden olduğu sintilasyonun derecesine bağlı olarak hafif, orta veya şiddetli olarak sınıflandırılabilir. Negatif üstel model öncelikle yüksek türbülans senaryolarına uygulanabilirken, deneysel verilerden türetilen log-normal model en çok hafif türbülans koşullarında etkilidir. Uygulamada, gama-gama modeli orta ila yüksek türbülans durumlarında güçlü performans göstermektedir [6].

Önerilen FSO iletim sisteminde kullanılan Gamma-Gamma dağılım modeli, optik sinyal üzerindeki hem küçük ölçekli hem de büyük ölçekli türbülans etkisini dikkate almaktadır ve bir Gamma dağılımını takip ettiği düşünülmektedir. Bu modeldeki α ve β parametreleri, atmosferik türbülansın yoğunluğuna bağlı olarak zayıf, orta ve güçlü türbülans koşulları için farklı değerler almaktadır. α türbülansın küçük ölçekli değişimlerini temsil ederken, β türbülansın büyük ölçekli değişimlerini temsil etmektedir. Rytov varyansı (σ^2), bu parametrelerin atmosferik türbülansın şiddetine göre nasıl değiştiğini anlamak için kullanılmaktadır. Rytov varyansı Gamma-Gamma parametrelerini belirlemek için kullanılmakta ve atmosferik türbülansın derecesini ölçmektedir.

PDF ve CDF, optik kanalların karakteristiğini modellemek ve istatistiksel özelliklerini tanımlamak için kullanılan önemli performans analiz araçlarıdır. Kanalda alınan sinyalin gücü, irradiance veya SNR gibi değişkenlerin dağılımını temsil etmek için kullanılan PDF, rastgele bir değişkenin belirli bir değerde olma olasılığının yoğunluğunu göstermektedir. Örneğin, Gamma-Gamma dağılımı, FSO sistemlerinde atmosferik türbülansı modellemek için yaygın olarak kullanılan bir PDF'dir. CDF ise, rastgele bir değişkenin belirli bir değerden küçük veya eşit olma olasılığını gösterir ve PDF'nin integralidir. FSO kanallarında CDF, bir sinyalin belirli bir eşik değerin altında kalma olasılığını hesaplamak için kullanılır. Bu, genellikle kesinti olasılığı (outage probability) gibi performans ölçümlerini hesaplamak için kullanılmaktadır.

Bu nedenle, orta ila güçlü türbülans koşulları altında atmosferik türbülans tarafından saçılıma uğrayan optik sinyalin PDF'si şu şekilde ifade edilebilir [18]:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta I}\right) \tag{6.11}$$

I alınan sinyal gücü (ışınım-irradiance), $K_n(.)$ ve $\Gamma(.)$ sırasıyla ikinci tür ve n. dereceden bir Bessel fonksiyonu ve Gamma fonksiyonudur. α ve β sırasıyla küçük ve büyük aralıklı etkin türbülans sayılarıdır:

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_x^2}{\left(1+1.11\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}}\right) - 1\right]^{-1}, \qquad \beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_x^2}{\left(1+1.11\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{5}{6}}}\right) - 1\right]^{-1} \tag{6.12}$$

Rytov varyansı σ^2 türbülans rejimini belirlemek için kullanılmaktadır:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \tag{6.13}$$

k = Optik dalga numarası ($2\pi/\lambda$) , L = Yayılım mesafesi'dir.

σ_R^2 << 1 olduğunda, türbülans etkisi zayıfken, diğer durumlarda türbülans etkisi artmaktadır.

Diğer taraftan, atmosferik sıcaklık ve basınçtaki değişikliklere bağlı olarak atmosferik türbülansın gücünü ölçmek için kullanılan kırılma indisi yapısal parametresi C_n^2, kırılma indisinde ve iletim ortamında değişikliklere yol açmaktadır:

$$C_n^2 = (86x10^{-16} x \frac{P}{T^2})^2 C_T^2 \tag{6.14}$$

P = Atmosfer basıncı (mbar)

T = Mutlak sıcaklık (K)

C_T^2 = Sıcaklık yapısal sabiti (evrensel sıcaklık yasasının 2/3 gücü)

FSO kanalının anlık SNR değeri (γ_{FSO}) için PDF gösterimi (Gamma-Gamma dağılımı) Eş. 6.15'teki gibidir [15]:

$$f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} \gamma^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\mu_2^{\frac{\alpha+\beta}{4}}} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta\sqrt{\frac{\gamma}{\mu_2}}}\right) \quad (6.15)$$

μ_2 FSO hattı üzerinde ölçülen elektriksel SNR değeridir.

Ayrıca, anlık SNR değeri (γ_{FSO}) için CDF ifadesi de Eş. 6.16'daki gibidir.

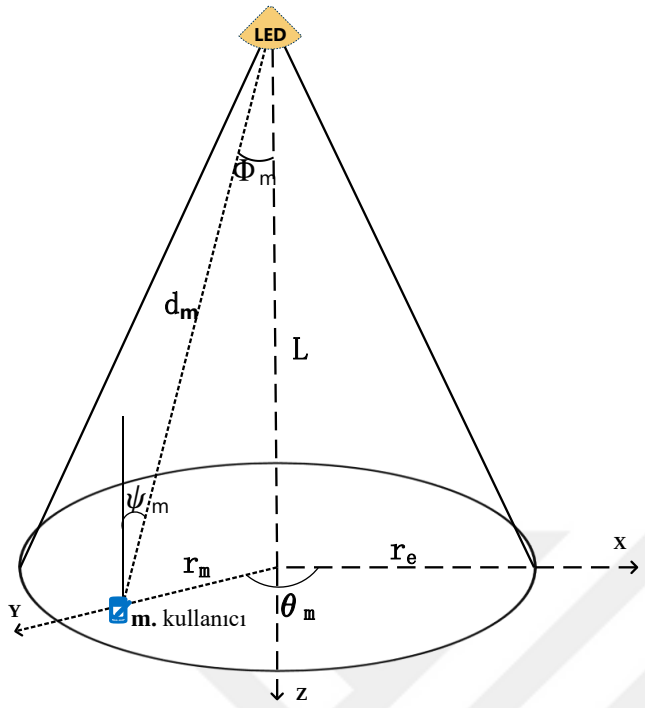
$$F_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1}\left(\alpha\beta\sqrt{\frac{\gamma}{\mu_2}} \,\middle|\, \begin{matrix} 1 \\ \alpha, \beta, 0 \end{matrix}\right) \quad (6.16)$$

$G_{p,q}^{m,n}(.)$ = Meijer G fonksiyonu.

VLC kanal modeli

Şekil 6.4'te gösterilen iç mekan VLC kanal modelinde, LED verici *L* yüksekliğine yerleştirilmiştir. Ψ_m geliş açısı (incidence angle), Φ_m ışınım açısı (angle of irradiance), r_e LED hücre kapsama alanının maksimum yarıçapı, θ_m fotodiyotun görüş alanıdır (FOV).

Her kullanıcıdaki PD'nin dikey olarak yukarı doğru yönlendirildiği ve FOV'unun Ψ_{fov} ile temsil edildiği varsayılmaktadır LED'den *m.* kullanıcıya olan öklid mesafesi LOS bağlantısında d_m ile temsil edilmektedir. m'inci kullanıcı için ışınım açısı φ_m ile gösterilirken, geliş açısı ψ_m ile gösterilmektedir.



Şekil 6.40. VLC için kanal modeli

m. kullanıcı için öklid mesafesi d_m, $d_m = (r_m^2 + L^2)^{1/2}$ ve $\cos(\psi_m) = \cos(\Phi_m) = \mathrm{L}/\,d_m$ 'dir [13].

VLC kanalı için PDF genellikle Lambertian yayılım modeline dayandırılmaktadır. Lambertian yayılımı, ışığın bir yüzeyden yansıdığı veya saçıldığı durumları modellemek için kullanılmaktadır. Bu model, yayılan ışığın eşit olarak dağıldığını ve LED'den yayılan ışığın gücünün ışının yayıldığı yönle ilişkili olduğunu varsayar.

Bu durumda, LED hücresinin kapladığı alanın maksimum çapı r_e ile ilişkili olarak LED'in yarı aydınlıktaki yarı açısı $\Phi_{1/2}$, $r_e = L\,(\sin\Phi_{1/2})/(\cos\Phi_{1/2})$ olur. Buna göre, Lambertian emisyon derecesi (m_l) aşağıdaki Eş. 6.17'deki gibi tanımlanır [15]:

$$m_l = \frac{\ln 2}{\ln(\cos\Phi_{1/2})} \tag{6.17}$$

Bu, her kullanıcının N tane LED'den iletilen sinyaller arasından yalnızca en güçlü sinyali algılamasını sağlar.

m. kullanıcı ile LED arasındaki LOS hattının kanal kazancı aşağıdaki gibidir:

$$I_m = \frac{A(m_l+1)\Re}{2\pi d_m^2} cos^{m_l}(\Phi_m) T g(\psi_m) \cos(\psi_m)) \tag{6.18}$$

A fotodedektörün fiziksel yüzey alanı, $\Re$ fotodetektör duyarlılığı, T optik filtre kazancı, $g(\psi_m)$ aşağıda tanımlandığı gibi optik yoğunlaştırıcıdır:

$$g(\psi_m) = \begin{cases} n^2/\sin(\Psi), & 0 \le \psi_m \le \Psi \\ 0 \quad , & \psi_m > \Psi \end{cases} \tag{6.19}$$

n fotodetektördeki lensin kırılma indisi ve Ψ fotodetektör alıcısının FOV'udur.

$d_m = (r_m^2 + L^2)^{1/2}$ ve $\cos(\psi_m) = \cos(\Phi_m) = \mathrm{L}/\sqrt{r_m^2 + L^2}$ ilişkilerinden yararlanılarak, $\Im = \frac{A(m_l+1)\Re}{2\pi} T g(\psi_m) L^{m_l+1}$ formülünün elde edilmesi ile kanal kazancı aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir:

$$I_m = \frac{\Im}{(r_m^2 + L^2)^{\frac{m_l+3}{2}}} \tag{6.20}$$

Kullanıcının dairesel alan üzerinde rastgele bir konumda olduğu düşünüldüğünde, radyal mesafe $0 \le r \le r_e$ aralığında PDF $f_{r_m}(r) = 2r/r_e^2$ ile tanımlanabilir.

Buradan elde edilecek kanal kazancının (I_m) PDF'si ise aşağıdaki şekilde olur:

$$f_{I_m}(I) = \frac{2}{r_e^2(m_l+3)} \Im^{\frac{2}{m_l+3}} I^{-\frac{m_l+5}{m_l+3}} \tag{6.21}$$

m kullanıcısı için VLC kanalının anlık SNR'sinin PDF'si aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$f_{\gamma VLC_m}(\gamma) = \frac{\mu_{VLC}^{\frac{1}{m_l+3}} \Im^{\frac{2}{m_l+3}}}{r_e^2(m_l+3)} \gamma^{-\frac{m_l+4}{m_l+3}} \tag{6.22}$$

m kullanıcısı için VLC kanalının anlık SNR'sinin CDF'si aşağıdaki gibidir:

$$F_{\gamma VLC_m}(\gamma) = 1 + \frac{L^2}{r_e^2} - \frac{\Im^{\frac{2}{m_l+3}}}{r_e^2} \left(\frac{\gamma}{\mu_{VLC}}\right)^{-\frac{1}{m_l+3}} \tag{6.23}$$

FSO-VLC hibrit kanal modeli ve kesinti olasılığı

FSO-VLC hibrit sistemlerinde Kesinti Olasılığı (OP), sistemin belirli bir SNR eşiğinin altında kalma olasılığını temsil eder ve sistem performansını değerlendirmek için önemli bir ölçüt olarak kullanılır. FSO-VLC bağlantısı için kesinti olasılığı fonksiyonunu yazarken hem FSO hem de VLC kanallarının özelliklerinin birlikte dikkate alınması gerekmektedir.

FSO kanalı için OP tipik olarak atmosferik zayıflama ve kanal gürültüsüne dayalı olarak hesaplanmaktadır. FSO bağlantısının kesinti olasılığı önceden belirlenmiş bir eşik değeri (γ_{th}) için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_{out}^{FSO} = P(\gamma_{FSO} < \gamma_{th}) \tag{6.24}$$

Benzer şekilde belirlenen eşik değerine göre VLC kanalının kesinti olasılığı değeri aşağıdaki gibidir:

$$P_{out}^{VLC} = P(\gamma_{VLC} < \gamma_{th}) \tag{6.25}$$

FSO-VLC hibrit kanal için kesinti olasılığı hesaplamasında iki kanalın minimum SNR değerleri dikkate alınabilir [15]:

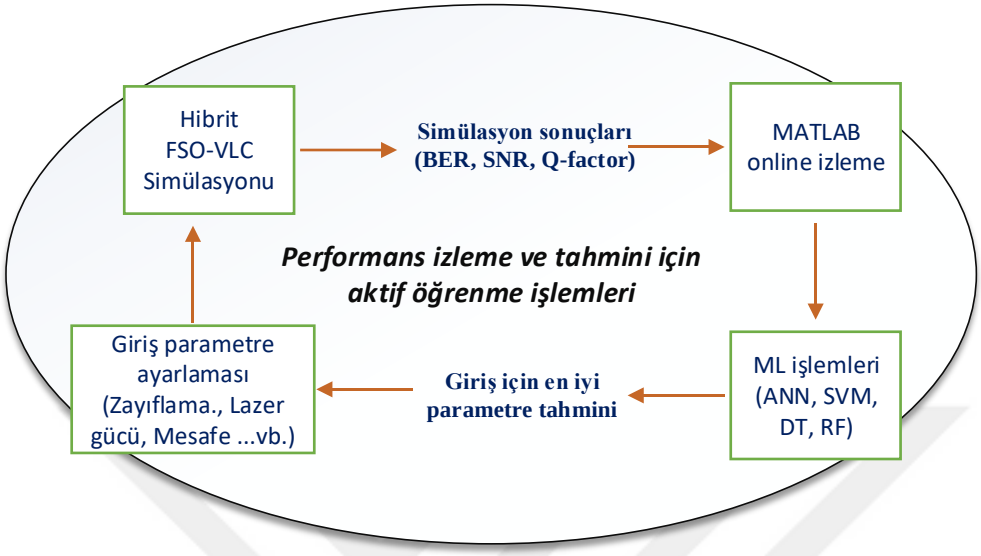
$$P_{out} = Pr[\min(\gamma_{FSO}, \gamma_{VLC}) < \gamma_{th}] = F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_{VLC}}(\gamma_{th}) - F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th}) F_{\gamma_{VLC}}(\gamma_{th}) \tag{6.26}$$

$F_{\gamma_{FSO}}(.)$ ve $F_{\gamma_{VLC}}(.)$ sırasıyla FSO ve VLC kanalları için CDF değerleridir.

Kullanılan yöntem ve sonuçlar

Bu çalışmada, FSO-VLC hibrit sisteminin farklı çevresel koşulların etkisi altında performans parametrelerini izlemek ve optimize etmek için farklı ML yöntemleri kullanılarak bir yapay zeka modeli oluşturulmuştur. Eğitilen modelin benzer problemlere uygulanabilirliğini sağlamak için model AL (aktif öğrenme- active learning) yaklaşımı kullanılarak eğitilmiştir. Bu modelin temel amacı, iletim tarafında gönderilen orijinal verinin

minimum kayıp veya bozulma olacak şekilde elde edilmesi ve bunun sürekliliğinin sağlanmasıdır (Şekil 6.41).

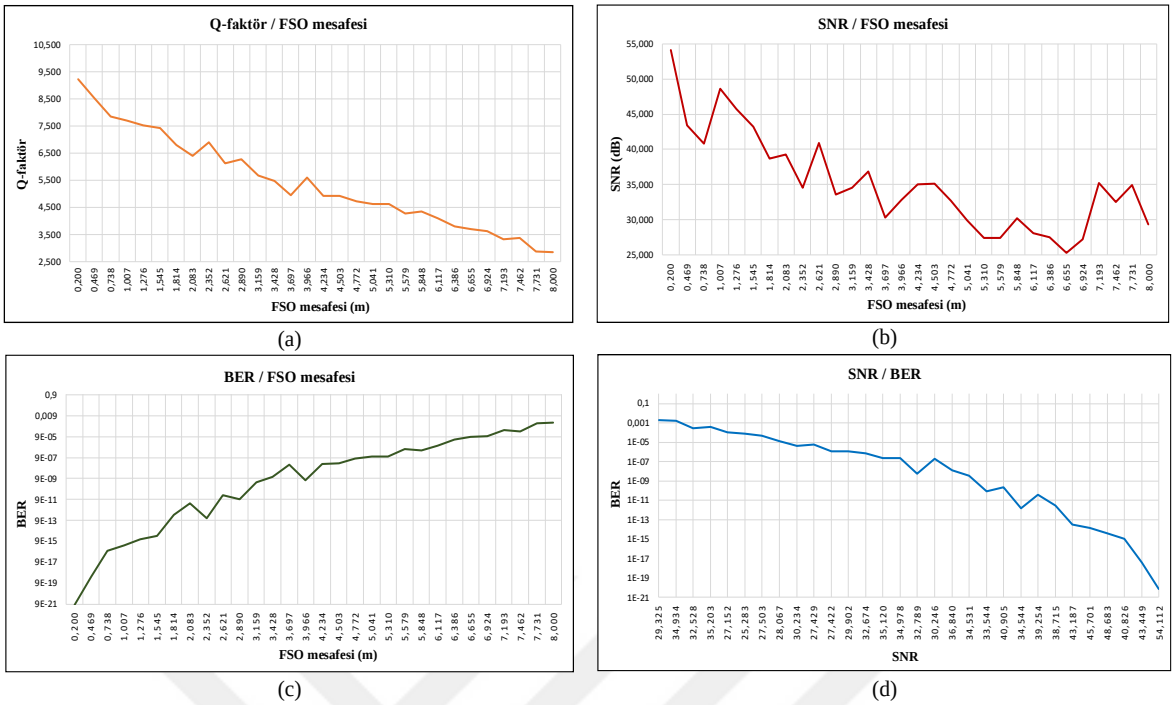


Şekil 6.41. Performans izleme ve tahmin döngüsü

Optik simülasyon sonuçları

FSO-VLC hibrit sisteminin uçtan uca performans izlemesi ve yapay zeka metodları ile tahmini amacıyla yapılan çalışmada, Matlab ile oluşturulan ve sistemdeki elemanlar için gerekli parametrelerin de belirlenebildiği kod üzerinden Optisystem simülasyonu otomatik olarak çalıştırılmakta ve elde edilen performans ölçümleri (BER, Q-faktör, SNR) aktif olarak yapay zeka modülüne giriş verisi sağlamaktadır (Şekil 6.42).

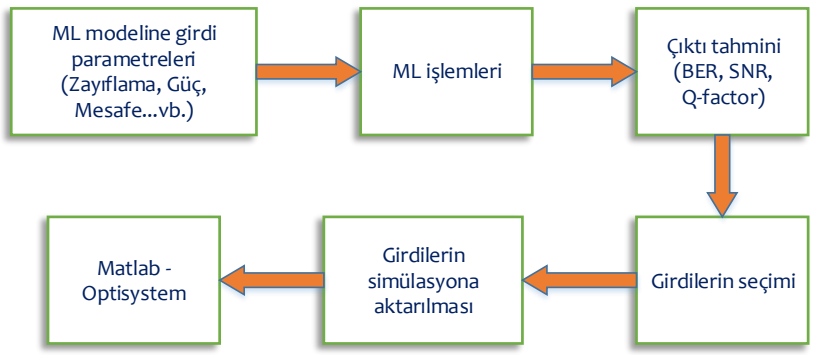
Şekil 6.42'de optik simülasyon programından elde edilen ve FSO bağlantısını uzunluğuna (0,2-8 km) bağlı olarak değişen (a) Q-faktör, (b) SNR ve (c) BER değerlerinin karşılaştırıldığı sonuçlar görülmektedir. Beklendiği şekilde link mesafesindeki artışın, sinyaldeki güç zayıflaması ve atmosferik etkilerin bozulmalara neden olmasıyla birlikte SNR (*54,11'den 25,28 dB'ye*) ve Q-faktör (*9,23'den 2,84'e*) azalırken, BER değeri artış (*7,09x10^{-21} 'den 1,93x10^{-3} 'e*) göstermektedir. Ayırıca (d) SNR-BER grafiğinde de SNR artışı BER değerinde azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 6.42. Optik simülasyon sonuçları (a) Q-faktör/FSO mesafesi (b) SNR/FSO mesafesi (c) BER/FSO mesafesi (d) BER/SNR

ML modeli eğitim sonuçları

Model çalışması temel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama eğitim sürecidir. Bu süreçte optik benzetim ortamı kullanılarak elde edilen ağ verileri modele girer ve çıktı olarak ele alınan performans kriterlerinin orijinal verilere en yakın olacak şekilde elde edilmesini sağlayacak şekilde eğitilir. Bu sürecin ardından model, tekrar simülasyon ağı üzerinden verileri alarak süreklilik sağlamak için kendisini aktif olarak eğitmeye devam eder ve eğitim aşamasında belirlenmiş olan ağırlıklar ve diğer kaydedilen veriler de güncellenmiş olur (Şekil 6.43).



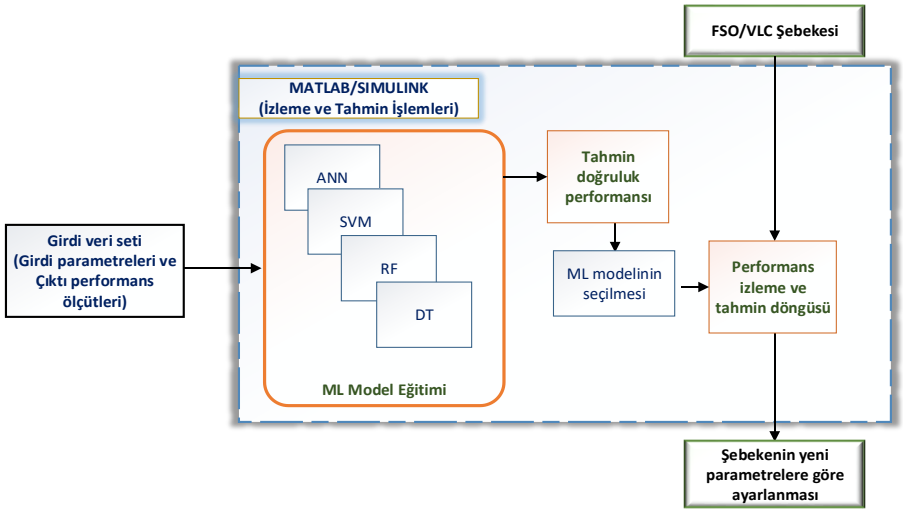
Şekil 6.43. Matlab ML işlemleri

Bunun için Matlab yazılımını kullanarak, 10 Gb/s veri seti OOK ile modüle edilerek ve farklı güçteki FSO türbülans kanalları ve VLC kanalı üzerinden aktarılmaktadır. Matlab üzerinde oluşturulan program girdi olarak kullanılacak parametreleri optik simülasyon programına aktarmaktadır. Daha sonra elde edilen çıktılarda ayrıca kaydedilmektedir (Çizelge 6.8.). Bu sayede girdi-çıktı arasında yapılacak olan ML eğitimi, test ve optimizasyon işlemleri için veri kolaylıkla kullanılabilmektedir.

Çizelge 6.8. Matlab üzerinden optik simülasyon işlemi

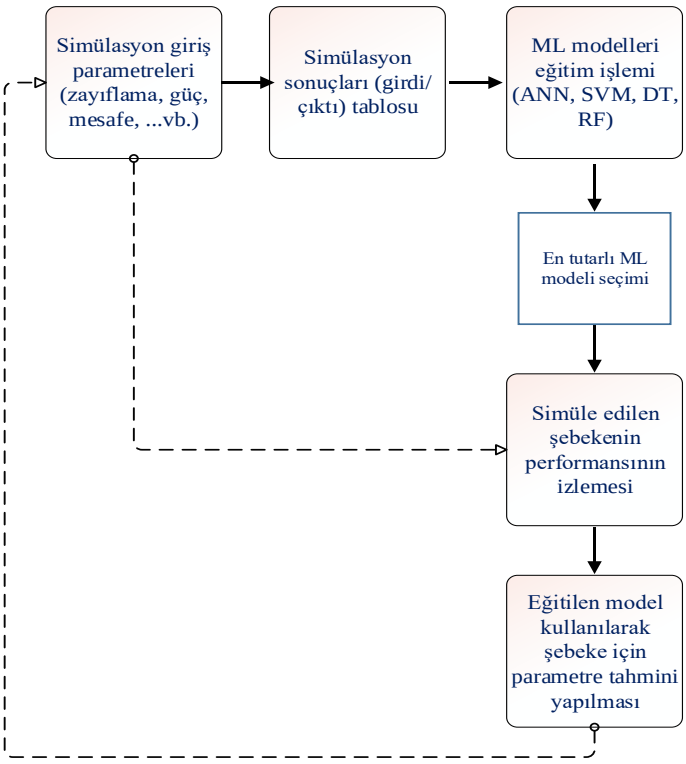
Girdiler: Lazer gücü (dBm) [‘*Power*’], FSO mesafesi (km) [‘*Range*’], FSO zayıflaması (dB/km) [‘*Attenuation*’], VLC mesafesi [*‘Distance’*] (m). Çıktılar: Q-factor [*‘Max. Q Factor’*], SNR [‘*Max. SNR*’], BER [‘*Min. BER*’].
1: Run *Optisystem*: Matlab üzerinden optik simülasyon çalışması. 2: Initialization: Uygulanacak değerlere göre giriş parametrelerinin ayarlanması. 3: Load each set of *Inputs set* as system parameters. 4: While *set_number< Inputs_set* continue. 5: Save the results for each *Inputs_set* to output tables. 6: Result1: *Inputs / Max. Q Factor* table ordered as descending Q-factors. 7: Result2: *Inputs / Max. SNR* table ordered as descending SNRs. 8: Result3: *Inputs / Min. BER* table with ordered as descending BERs. 9: Result4: Q-factor, SNR and BER *average* values (as *threshold*) and ordered tables. 10: Output Results 11: Call ML algorithm scripts as *SVM_Regr, ANN, DT_model, RF_model*. (Inputs/Output tables will be inputs for ML scripts.)

Pasif öğrenme sürecinde; etiketlenmemiş olan giriş verileri benzetim ortamında ağ üzerinden test edilerek çıkış verileri elde edilmekte ve bu veriler ile birlikte yapay zeka modeli eğitilmektedir. İkinci aşamada ise aktif öğrenme modeli kullanılarak; etiketlenmemiş olan giriş verileri eğitilmiş olan yapay zeka modeli kullanılarak çıkış verilerinin tahmin edilmesi sonucuna göre etiketlenmekte ve tekrar benzetim programı üzerinden elde edilen çıktılarla birlikte yapay zeka modelinin sürekliliği sağlanmaktadır (Şekil 6.44).



Şekil 6.44. ML öğrenme ve iyileştirme işlemleri

Etiketlenen ölçüt değeri, ML modelini eğitecek ve yönlendirecek şekilde çalışmaktadır, böylece gelecekteki veriler için ölçüt değeri ile kanal gücü, FSO atmosferik zayıflama değeri, FSO mesafesi ve VLC mesafesi gibi giriş parametreleri arasındaki işlevsel bağımlılık ilişkisini bulmaktadır. Böylece süreç, belirli bir ölçütte (ör. Q faktörü, SNR, vb.) en iyi performansı gösteren modelin belirlenmesini ve parametrelerin buna göre ayarlanmasını içermektedir (Şekil 6.45).



Şekil 6.45. Aktif öğrenme ve performans izleme süreci

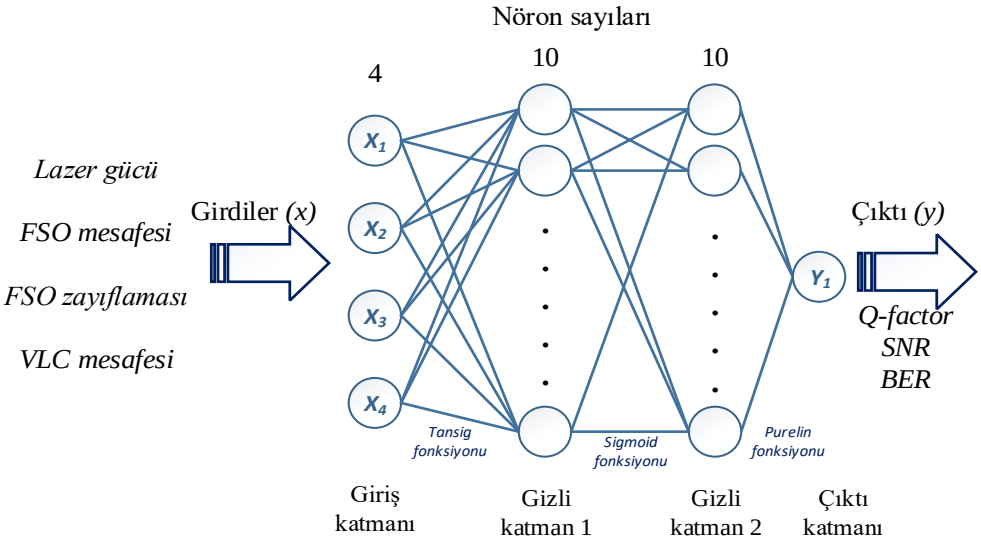
ML modelleri için eğitim ve performans testi Çizelge 6.9'daki algoritmada belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.9. ML öğrenme ve test işlemleri

Girdiler: Input/output table (saved from simulation process) Çıktılar: trainedANNModel, trainedSVMModel, trainedRFModel, trainedDTModel.
1: Load Saved optical simulation results. 2: Initialization: Load the input and output data (*Inputs / Max. Q Factor* table ordered as descending Q-factors). 3: Create the fitting network (e.g. ANN Model): *hiddenLayerSize=[10 10]; net = feedforwardnet(hiddenLayerSize, trainFcn), activation functions, …* 4: Seperate the inputs/output for *training*, *test* and *validation*. 5: Active-Learning loop: *for i = 1:max_epochs (1000) do [Forward propagation - apply dropout hidden layers] and [calculate the error for estimation] and [backpropagation (gradient descent)] and [update weights and biases] , (learning_rate = 0.001; dropout_probability = 0.2.)* 6: Get uncertainty estimates with Monte Carlo (MC) Dropout (*dropout_rate = 0.2; num_samples = 200*) (dropout rate and MC simulation number). 7: *for i = 1:num_iterations do [~, uncertainty_scores]*. (*uncertainty_rate = 0.05*) 8: Sort the indices in descending order by uncertainty scores. 9: Add the most uncertain samples to the training set. 10: Plot the *'Predicted vs Actual'*. 11: Result2: *Inputs / Max. SNR* table, with ordered as descending SNRs. 12: Result3: *Inputs / Min. BER* table, with ordered as descending BERs. 13: Result4: Q-factor, SNR and BER *average* values (as *threshold*) and ordered tables. 14: Save Output Results 15: Save (*'trainedMLmodel.mat'*);

SVM modelinde verilerin %70'i eğitim için kullanılmıştır. SVM modeli üzerinde 10 iterasyondan oluşan aktif bir öğrenme döngüsü bulunmaktadır. Bu iterasyonların her birinde belirsizlik ölçüleri hesaplanarak (belirsizlik örneklemesi) ve sıralanmaktadır. Bu sıralamaya göre en belirsiz veri ile model yeniden eğitilir ve belirsizlik ortadan kaldırılır.

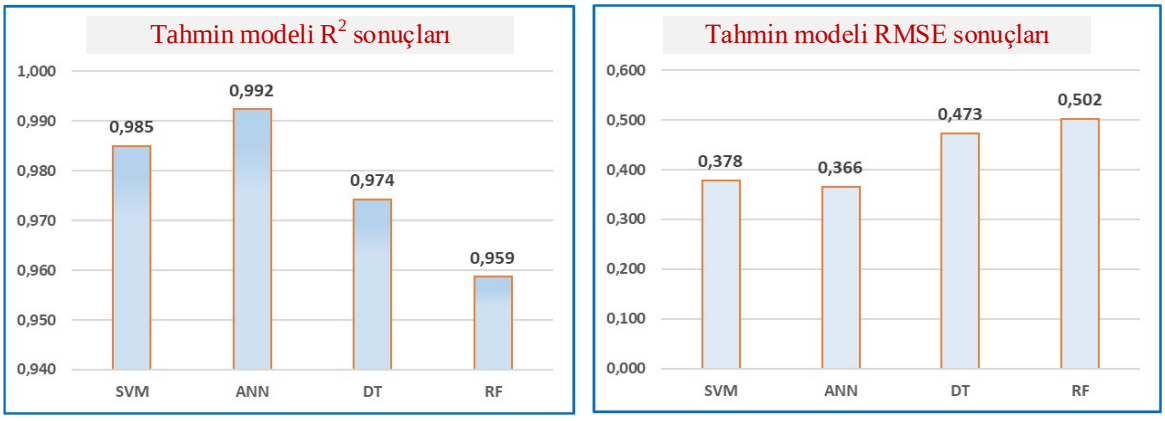
ANN modeli Levenberg-Marquardt backpropagation modeli ile test edilmiştir. Gizli katman sayısı her biri 10 nörondan oluşan 2 katmandır (Şekil 6.46). Giriş verilerinin %70'i eğitim, %15'i test ve %15'i doğrulama için kullanılmaktadır. ANN modelinde aktif öğrenme ve belirsizlik örneklemesi ve Monte-Carlo dropout uygulanmıştır. Performans ölçütleri olarak R^2 ve RMSE değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.46. Eğitilen ANN modeli

DT ve RF modellerinde verilerin %80'i eğitim için, %20'si ise modeli test etmek için kullanılmıştır. Performans farklı ağaç sayılarına göre değerlendirilebilir. Modellemede 100 ağaç için performans elde edilmiştir.

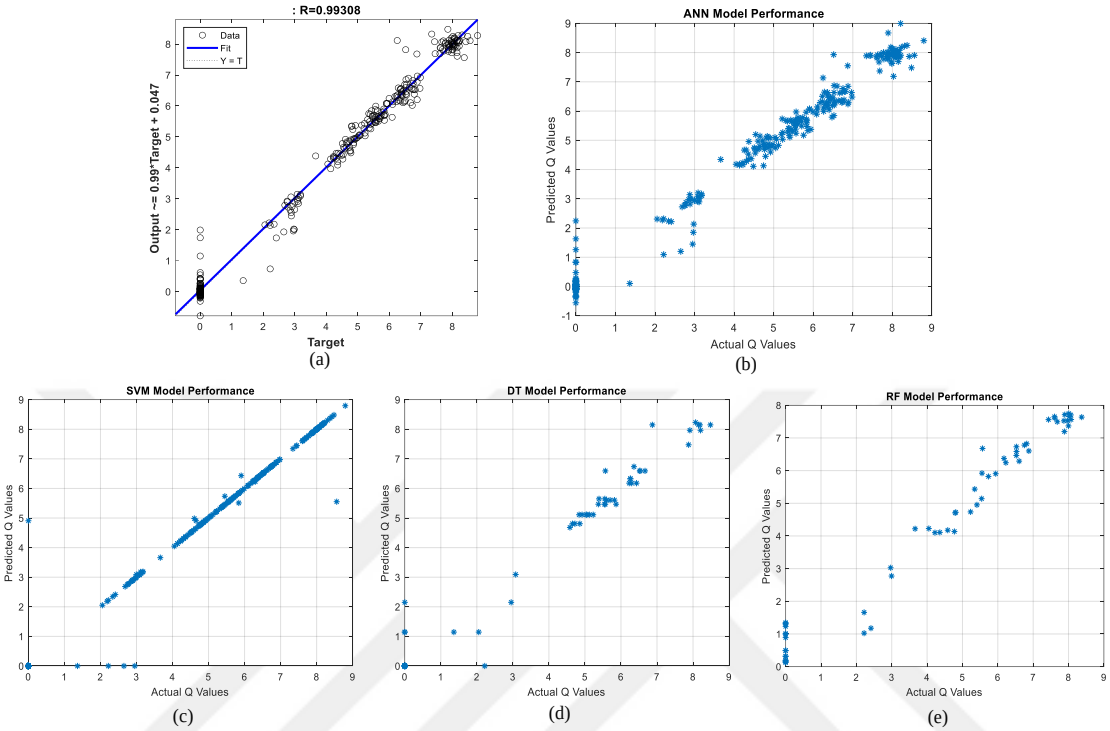
Simülasyon aşamasında kullanılan sistem parametreleri ve elde edilen performans izleme ölçümleri ile seçilen ML algoritmasının en ideal veriye erişecek şekilde eğitilmesi sağlanmaktadır. Şekil 6.47'de modellerin tahmin performansları gösterilmektedir.



Şekil 6.47. ML modelleri R^2 ve *RMSE* sonuçları

Şekil 6.47'deki grafikte görüldüğü gibi, R^2 (coefficient of determination) ve RMSE (Root mean square error) performans sonuçları sırasıyla, ANN için *0.992* ve *0.366*; SVM için *0.985* ve *0.378*; DT için *0.974* ve *0.473*; RF için ise *0.959* ve *0.552* olarak elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre ANN ve SVM modelleri en iyi tahmin performansını göstermiştir. Şekil 6.48 ise tahmin tutarlılığına göre elde edilen performans sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 6.48. a) ANN modeli *R* sonucu b) ANN c) SVM d) DT e) RF modelleri için gerçek ve tahmin değerleri

Kesinti olasılığı analizi ve sonuçları

SNR eşik değerleri için elde edilen PDF, CDF ve kesinti olasalığı (OP-Outage probablity) eşitliklerinden (17) faydalanarak Matlab ortamında Monte-Carlo simülasyonu kullanılarak benzetim yapılmıştır (Çizelge 6.10). FSO-VLC hibrit devresi için elde edilen SNR değerleri kullanılarak Monte-Carlo simülasyonu ile farklı SNR eşik değerleri için aşağıdaki OP sonuçları elde edilmiştir. Gamma-Gamma parametreleri; zayıf dereceli türbülans ($\sigma_R^2 < 1$), orta dereceli türbülans ($1 \leq \sigma_R^2 \leq 3$) ve güçlü türbülans ($\sigma_R^2 > 3$) olarak değerlendirilmiş ve $\alpha \approx 4{,}61,\ \beta \approx 4{,}55$ olarak kullanılmıştır.

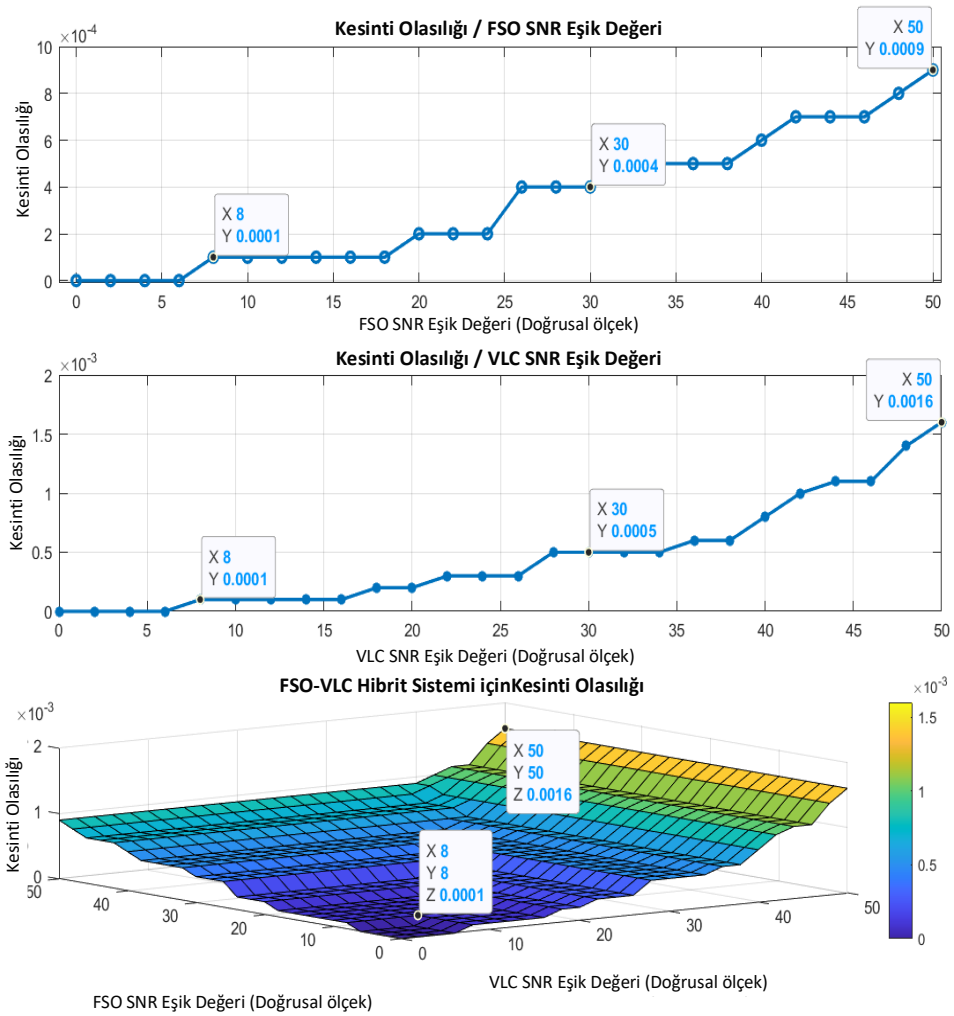
Çizelge 6.10. Kesinti olasılığı tahmin işlemleri

Girdiler: Threshold values.
Çıktılar: Outage probability level for FSO-VLC system.
1: Initialization: Determine the parameters (SNR Threshold for outage (SNR_{th}), Monte-Carlo *num_samples*, Gamma-gamma dist. α and β values, SNR_{mean})

Çizelge 6.10.(devam) Kesinti olasılığı tahmin işlemleri

2: Monte-carlo simulation for *i = 1:N_sim calculate FSO_SNR$_{th}$ and VLC_ SNR$_{th}$.*
3: Evaluate each value if *SNR$_i$ < SNR$_{th}$*
4: Minimum SNR$_{th}$ for hybrid system *SNR$_{th}$ _total = min(FSO_ SNR$_{th}$, VLC_ SNR$_{th}$).*
5: if *SNR_total < SNR$_{th}$* , then *outage_count = outage_count + 1;*
6: else evaluate the *SNR$_{th}$*
7: Results=Outage probablity for SNR threshold values
8: Output Result graphs

Şekil 6.49'daki kesinti olasılığı (OP) sonuçlarına göre FSO ve VLC için SNR eşik değerleri *0 - 50 dB* aralığında incelenmiştir. Kesinti olasılığı FSO için *0 - 0,9x10^{-3}* aralığında ve VLC için *0 - 1,6x10^{-3}* aralığında değişmekle birlikte, FSO-VLC sıralı (cascaded) hibrit sistemi için OP *0 - 1,6x10^{-3}* olarak gerçekleşmektedir. Dolayısıyla sıralı hibrit sistemi için OP, yüksek OP'ye sahip VLC ile aynı olmaktadır.



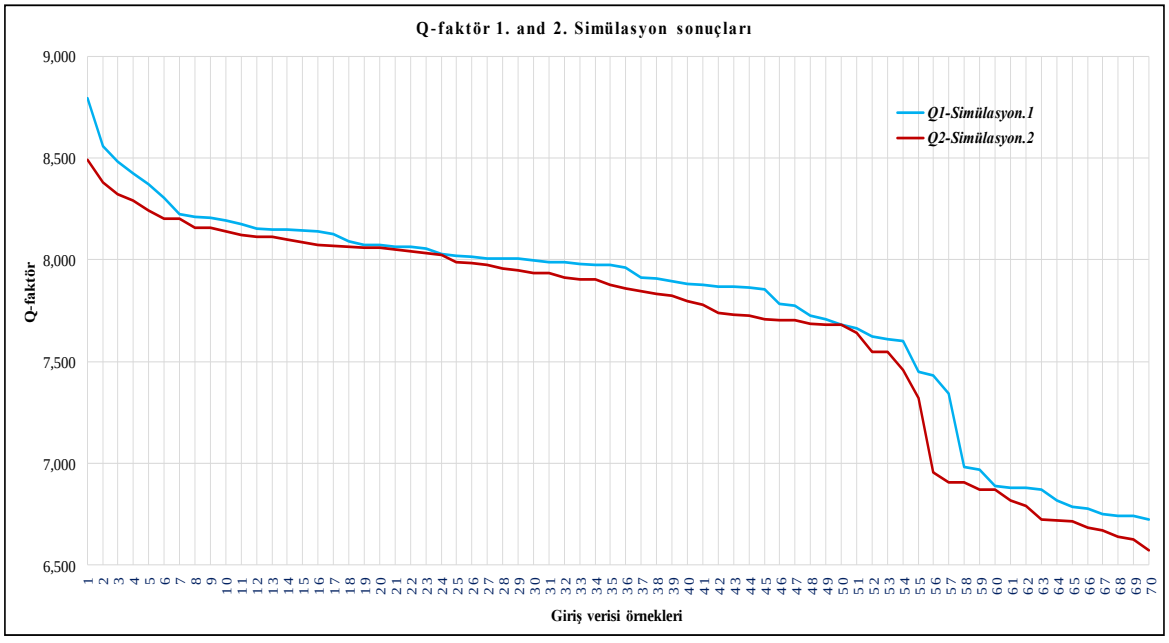
Şekil 6.49. FSO-VLC hibrit sistemi için kesinti olasılığı sonuçları

ML modelinin test işlemi

Eğitilen ML modellerinin uçtan uca performansını ve tutarlılığını değerlendirmek için Q faktörü ve SNR değerleri için eşik değerler belirlenmiş (S_{ave}, Q_{ave}) ve eğitilen modelin yeniden eğitilmesi ve sonuçta elde edilen tahmin performansı test edilmiştir.

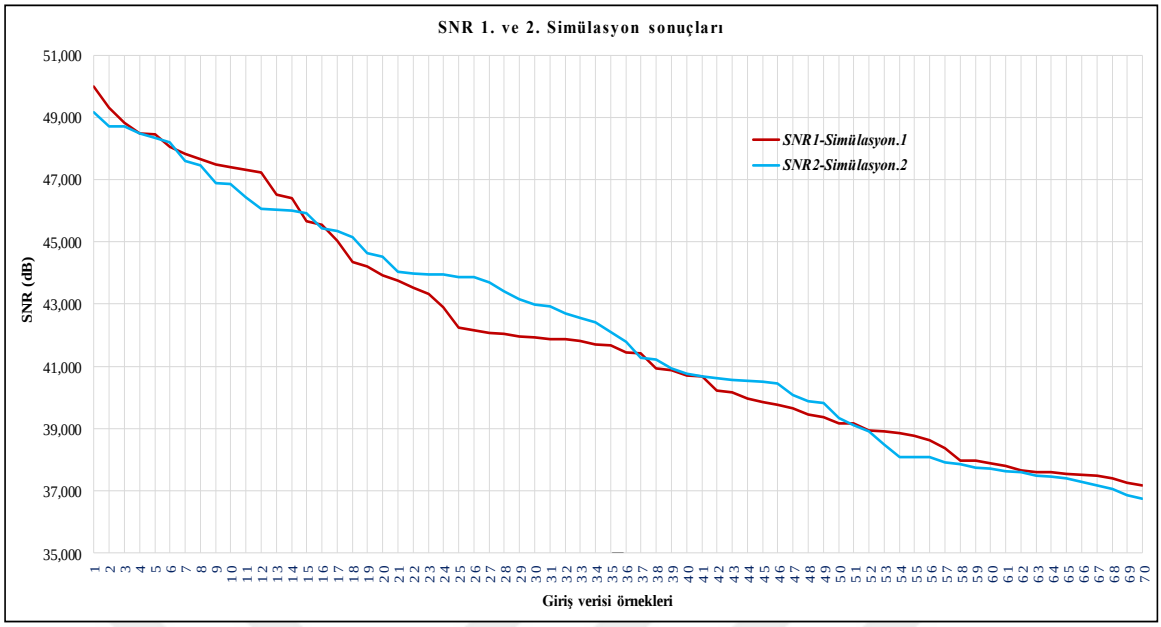
Şekil 6.50 (a) ve (b)'de sırasıyla Q-faktörü ve SNR için giriş veri setinden seçilen veri örnekleri için elde edilen ve büyükten küçüğe doğru sıralanmış olan çıkış değerlerinin ortalaması alınmış ve ortalamanın üzerindeki giriş/çıkış verileri ML modeli ile yeniden tahmin edilmiştir. Q-faktörü için başlangıç ve son tahmin değerleri birbirine yakın olmakla birlikte son tahmindeki değerler daha düşüktür (*Ortalama: -0,088*). SNR için ise son tahmindeki değerlerin arttığı görülmektedir (*Ortalama: 0,142 dB*).

Şekil 6.50(c) Matlab modeli kullanılarak elde edilen genel ortalama değerleri göstermektedir. Bu değerlerde, iki tahmin için kullanılan veri sayısı (*Simulation_1* ve *Simulation_2*) farklı olduğundan, ikinci tahmin veri değerlerinde sadece ortalamanın üzerindeki değerler kullanılmış, ikinci tahminde ortalama Q-faktörü ve SNR değerleri her ikisinde de, sırasıyla %38 ve %27 oranında artmıştır.



(a)

Şekil 6.50. Seçilen ortalama üstü değerler için yeni tahmin sonuçları a) Q-faktör b) SNR c) ML modelinin tahminleri için ortalama değerler



(b)

	Q_ave	SNR_ave
Simulation_1	4.3028	28.904
Simulation_2	5.9289	36.712

(c)

Şekil 6.50.(devam) Seçilen ortalama üstü değerler için yeni tahmin sonuçları a) Q-faktör b) SNR c) ML modelinin tahminleri için ortalama değerler

Çıktı iyileştirmesi (optimizasyonu) için ML modeli

Bu kısımda, ML modeli kullanılarak, SNR veya Q faktörünün bir performans eşik değerine göre (S_{th}, Q_{th}) sistemden daha verimli ve istenen düzeyde çıktı elde etmek için giriş parametrelerinin hangi aralıkta olması gerektiğini belirleyen ve model üzerinde test gerçekleştiren bir tasarım gerçekleştirilmiştir (Çizelge 6.11). Bu yaklaşımda belirli girdiler ve hedef çıktı sabit tutularak diğer girdi değişkeni için en uygun değer belirlenmektedir.

Çizelge 6.11. ML en iyi girdi tahmin modeli işlemleri

Girdiler: *input_data* (with empty column for input parameter to be optimized (e.g. *signal power*)).
Çıktılar: $Q_{th} = Q_{init.}+2$ *or* $Q_{init.}+5$ (Desired output value for Q-factor='Initial Q' +2 and +5).

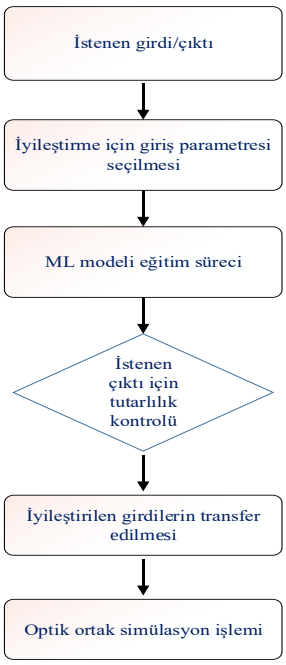
1: Initialization: Momentum constant *momentum = 0.9; learningRate = 0.01; maxIter = 300.*
2: Optimization for all input rows ***for*** *rows = 1:size(inputData, 1).*
3: Predict the output with ML: *predictedOutput = predict(MLModel, currentInput).*

Çizelge 6.11.(devam) ML en iyi girdi tahmin modeli işlemleri

4: Calculate the error: *error = (predictedOutput- targetOutput)*^{2}.
5: Check the error value if *error < threshold (1e-10)*
6: Calculate the gradient: *gradient = 2 * (predictedOutput - targetOutput).*
7: Update with momentum: *velocity = momentum * velocity - learningRate * gradient and optimizedValue = currentInput(1) + velocity;*
8: Save the optimized input and rows: *currentInput(1) = optimizedValue and predictedOutputs(row) = predictedOutput.*
9: Results=Optimized input/output data.
10: Output Result

Çizelge 6.11'deki algoritmada gösterildiği gibi, optimizasyon için momentum tabanlı gradyan iniş yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, momentumun gradyan inişinde karşılaşılan salınımları azaltmaya ve daha hızlı bir yakınsama elde etmeye yardımcı olduğu standart gradyan iniş algoritmasının geliştirilmiş bir versiyonudur. Momentum ile gradyan inişi sadece mevcut eğimi değil, aynı zamanda geçmiş adımların yönelimini de güncellemektedir. Bu şekilde, düz bir çizgiye yakınsarken salınımları azaltabilir ve daha hızlı sonuçlara yol açabilir.

Bu verilerin simülasyon ortamına aktarılmasının yanı sıra, performans ölçütlerinin eşik veya ortalama değerin üzerinde belirlenebilmesi için sistemde kullanılması gereken girdi aralığı (örneğin *CW lazer gücü*) da en iyi performans için ters modelleme kullanılarak belirlenebilmektedir (Şekil 6.51).



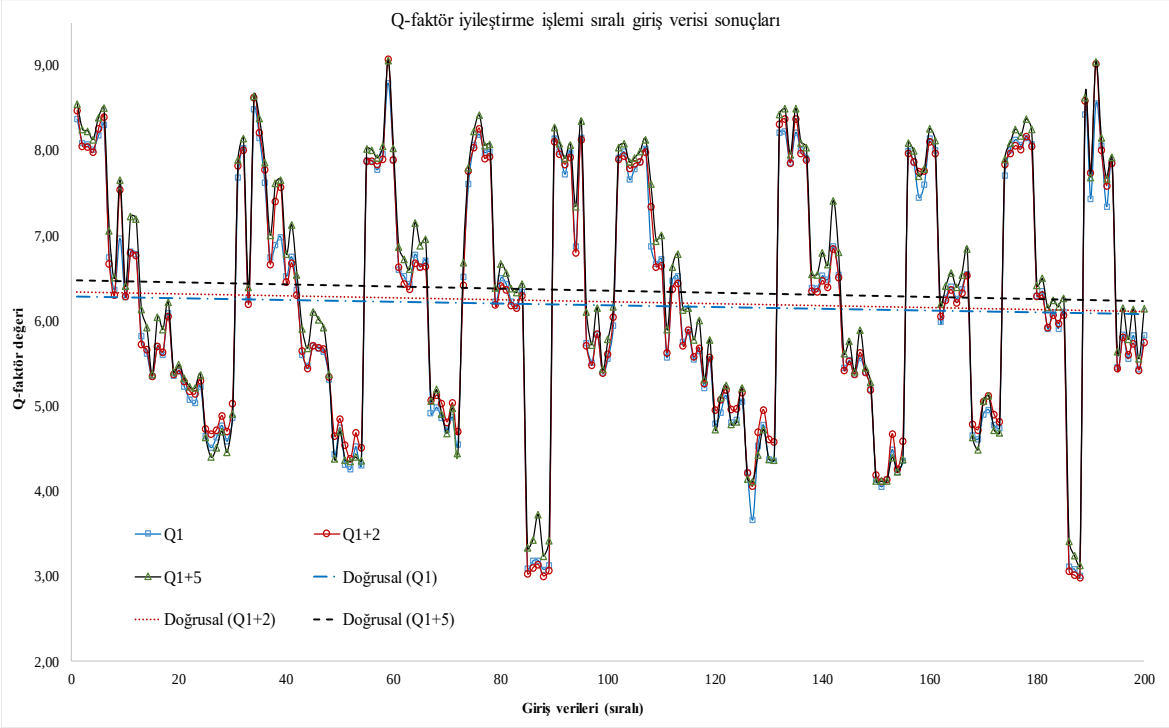
Şekil 6.51. Girdi parametresi tahmini için ML işlemleri

Şekil 6.52 (a) ve (b)'de optik simülasyon sonucunda elde edilen Q-faktör verileri kullanılarak FSO-VLC hibrit sistemin uçtan uca performansının iyileştirilmesi için gerçekleştirilen giriş/çıkış optimizasyonunda 3 ile 8,79 arasında değişen 200 farklı Q-faktörü değerinin (*Q1 değerleri*) tamamında 2 ve 5 değerlerinde artış sağlamak amacıyla iki farklı optimizasyon karşılaştırılmıştır.

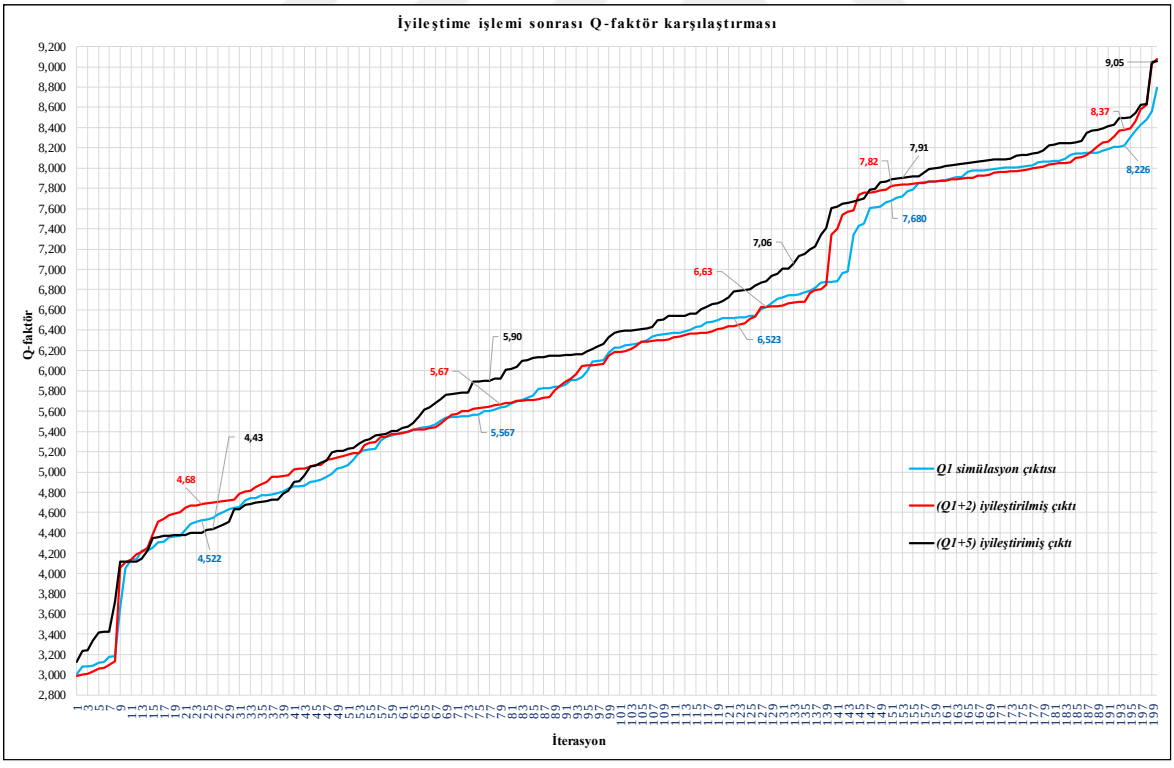
Şekil 6.52 (a)'da giriş veri örnekleri sabit olmak üzere, herbir giriş veri örneği için simülasyondan elde edilen (*Q1*) değer ile (*Q1+2*) optimizasyonu ve (*Q1+5*) optimizasyonu sonucunda elde edilen Q-faktör değerleri görülmektedir. Her noktada giriş verisi örneği aynı olacak şekilde gösterilen Şekil 6.52(a)'da genel olarak Q-faktör artışları gözlenebilmektedir. Aynı zamanda grafikte yer alan, Q1, Q1+2 ve Q1+5 için eğilim çizgileri de gerçekleşen Q-faktör artışlarını göstermektedir.

Şekil 6.52 (b)'de ise optimizasyon işlemi sonucunda iyileştirilmiş olan Q-faktör değerlerinin giriş verisi değerlerinin sıralamasından bağımsız olarak küçüten büyüğe sıralanması ile elde edilen grafik görülmektedir. Bu grafikte elde edilen yeni değerlerin (*Q1+2*) optimizasyonu için 2,99 ila 9,08 aralığında, (*Q1+5*) optimizasyonu için ise 3,13 ila 9,06 aralığında olduğu ve ortalama artış değerlerinin mevcut Q-faktörü değerlerine göre oransal olarak sırasıyla %0,72 ve %2,79 olduğu daha açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 6.52 (c) ise Q-faktörü iyileştirmesi için gereken tahmini ortalama güç artışını küçüten büyüğe sıralanmış şekilde göstermektedir. İlk optik simülasyonda (*Q1 için*) güç veri aralığı -5 ila 20 dBm iken, optimizasyon için tahmini değerler (Q1+2)'de -1,35 ila 35,31 dBm ve (Q1+5)'te 5,43 ila 32,67 dBm'dir. Ortalama güç artışı değerleri sırasıyla 11,67 dBm ve 13,41 dBm olarak tahmin edilmektedir. Bu değerler, sistemin diğer giriş parametrelerinin (FSO aralığı, FSO zayıflaması ve VLC mesafesi) ilk simülasyonda olduğu gibi sabit tutulduğu varsayılarak elde edilmiştir. Diğer giriş parametrelerinin optimize edilmesi de Q faktörü ve sinyal gücündeki değişim oranını etkileyebilir.

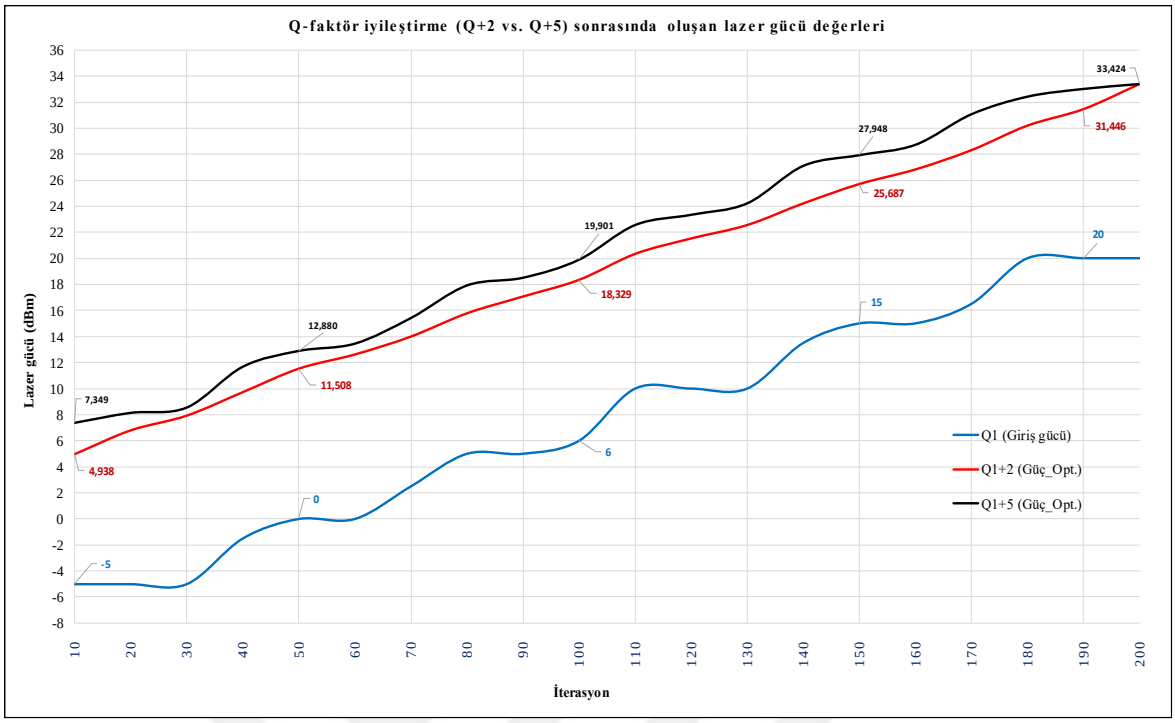


(a)



(b)

Şekil 6.52. Q-faktör optimizasyon sonuçları a) Giriş verisi sırasına göre b) Q-faktör sıralamasına göre ile c) Tahmin edilen giriş güçleri ve ilk güç değerleri



(c)

Şekil 6.52.(devam) Q-faktör optimizasyon sonuçları a) Giriş verisi sırasına göre b) Q-faktör sıralamasına göre ile c) Tahmin edilen giriş güçleri ve ilk güç değerleri

Şekil 6.52'de görülen grafiklerdeki değerler için ortalama hesaplamaları Çizelge 6.12'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.12. Q-faktör iyileştirme (optimizasyon) sonuçları karşılaştırması

İyileştirme	Min. Q	Maks. Q	Q- ort. artış oranı (%)	Min. güç (dBm)	Maks. güç (dBm)	Güç ort. artışı
Q-faktör (başlangıç Q)	3.00	8.79	-	-5	20	-
Q+2 optimizasyonu	2.99	9.08	0.72	-1.34	35.31	11.67
Q+5 optimizasyonu	3.13	9.06	2.79	5.43	32.67	13.41

Q-faktör değerinin 2 ve 5 oranında arttırılması için yapılan iyileştirme çalışması ile birlikte 1, 2,5, 3 ve 4 oranında arttırılması için yapılan iyileştirme çalışmaları ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.13'te görülmektedir. Q-faktör değerlerinde elde edilen iyileştirmenin artışına göre sıralanan Çizelge 6.13'teki denemeler elde edilen verilere göre Q-faktörde iyileştirme oranı artışı ile birlikte sinyal için gereken güçte de artış oluşmaktadır. Güç artışının maksimum ve minimum limitleri ve ortalaması olarak sistemin normal çalışma koşullarının üzerinde kalan güç değerleri de oluşabilmektedir.

Çizelge 6.13. Optimizasyon için yapılan farklı deneme sonuçları

	MEVCUT	2,05	8,79	5,86		-5,00	20,00	
Opt. Deneme	Veri	Min.Q	Maks.Q	Q-Ort.farkı	Q artışı-%	Min.Güç (dBm)	Maks.Güç (dBm)	Güç Ort.Farkı
Q+1	220	1,35	8,90	-0,01	-0,19%	8,69	35,85	10,75
Q+1	200	2,99	8,90	0,01	0,19%	-8,41	32,92	7,84
Q+2	220	1,36	9,08	0,02	0,29%	-6,46	36,31	11,83
Q+5	220	1,20	8,76	0,03	0,44%	0,82	28,95	6,55
Q+2	200	2,99	9,08	0,04	0,72%	-1,34	35,31	11,54
Q+5	220	1,03	8,83	0,05	0,81%	1,87	33,01	9,90
Q+5	200	3,10	8,76	0,07	1,13%	1,41	28,78	8,01
Q+5	220	0,70	9,06	0,10	1,70%	3,49	35,46	13,17
Q+2.5	220	1,47	9,45	0,12	2,08%	-2,92	44,41	19,58
Q+2	220	1,77	9,44	0,12	2,11%	-7,53	45,91	19,64
Q+2.5	200	2,99	9,45	0,16	2,54%	4,13	44,08	14,33
Q+5	200	3,13	9,06	0,17	2,79%	3,49	32,67	11,85
Q+4	220	1,63	9,53	0,24	4,16%	33,62	34,68	26,86
Q+4	200	2,87	9,53	0,31	4,95%	33,62	34,64	26,58

6.4. RF/FSO-VLC Hibrit Haberleşme

Bu kısımda son nokta erişim ağında yaşanan bant genişliği sorununa çözüm amacıyla, 10 Gb/s OOK modülasyonlu verinin dış mekan bağlantısı RF/FSO kanalları üzerinden iletilerek iç mekan bağlantısı VLC kanalına ve oradan da son kullanıcılara ulaştırılmasını amaçlayan hibrit RF/FSO-VLC hattının uçtan uca optik performans ve anahtarlama performansı

değerlendirmesi yapılmıştır.

RF/FSO-VLC hibrit haberleşme sisteminin uçtan uca performans değerlendirmesi amacıyla ilk olarak RF kanalı için Nakagami-m sönümleme modeli, FSO kanalı için işaretleme hatası ve Gama-Gama atmosferik türbülans modeli ve VLC için ise Lambertian yayılım modeli kullanılarak kesinti olasılığı hesaplanması; SNR değerlerinin PDF ve CDF matematiksel ifadelerinden faydalanılarak Matlab programı ile Monte-Carlo simülasyonu ile yapılmaktadır. Sonrasında, lazer gücü, link mesafeleri, atmosferik zayıflama etkisi, görüş alanı açısı (FOV) ve RF frekansı gibi giriş parametreleri kullanılarak optik simülasyon yapılmakta ve BER, Q-faktör ve SNR çıktı değerleri ile değerlendirilmektedir.

Sistemin anlık performans izlemesi ve gerekli durumlarda hibrit sistem hatları arasında sert anahtarlama yapabilmesi için optik simülasyon verileri ile eğitilen ML yöntemleri (ANN, SVM, DT, RF) kullanılmaktadır. Simülasyon sistemi üzerinden elde edilen çıktılar, farklı ML metodları ile oluşturulan tahmin modelleri içeren bir yapay zeka modülü üzerinden değerlendirilmekte ve sistemin gerekli kullanım kalitesini sağlaması amacıyla anahtarlama işlemi yapması bu tahmin yöntemleri üzerinden sağlanmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak, FSO-VLC ve RF-VLC hatları için kanal modelleri kullanılarak kesinti olasılığı nümerik analizi monte-carlo simülasyonu ile Matlab ortamında yapılmaktadır.

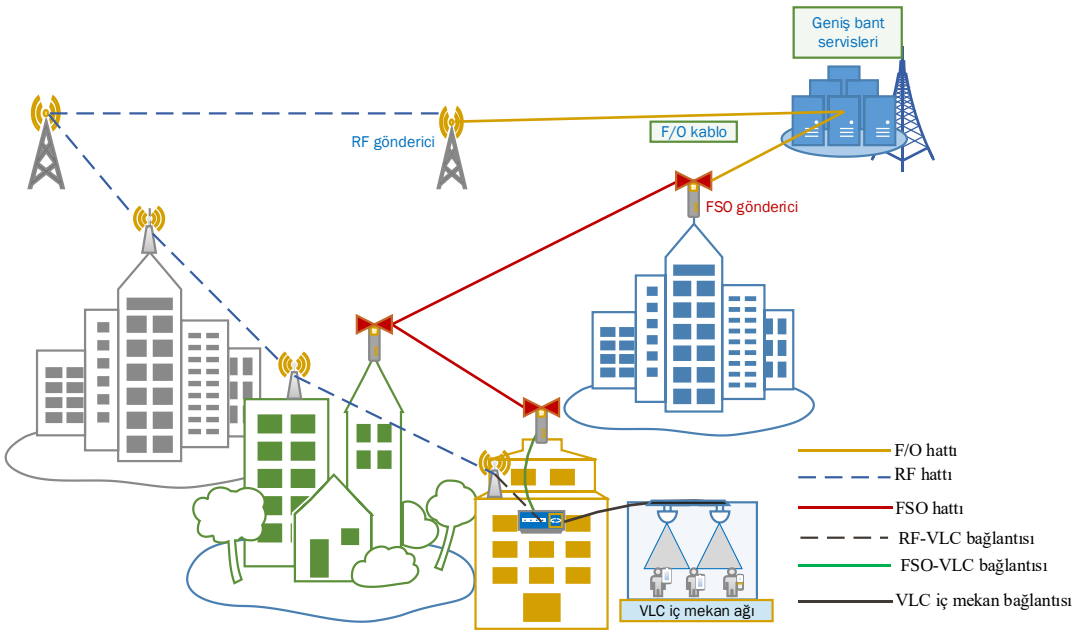
İkinci aşamada, FSO-VLC ve RF-VLC linkleri için optik simülasyon programı Optisystem 22 kullanılarak tasarımı gerçekleştirilen hibrit sistem yapısı, Matlab üzerinden tanımlanan aralıklarda veri girişi kombinasyonu (RF frekansı, lazer gücü, FSO mesafesi, FSO atmosfer zayıflaması, VLC görüş alanı açısı, VLC mesafesi) ile simüle edilerek, istenen BER değerine karşılık gelen minimum Q-faktör değeri eşik değer olarak belirlenmektedir. Bu aşamada, belirlenen Q-faktörü değerlerine göre, öncelikle FSO-VLC bağlantısı üzerinden iletilen veri, FSO-VLC nin belirlenen eşik değerin altına düşmesi halinde RF-VLC hattından iletilmeye devam etmektedir. Bu şekilde çalışmayı sağlayan bir sert anahtarama algoritması oluşturumaktadır.

Son aşamada ise, optik benzetimi yapılan devreden elde edilen girdi/çıktı verileri kullanılarak, ML modellemesi tasarlanmakta ve simülasyondan alınan girdi/çıktı verileri ile

otomatik olarak ML ile oluşturulan yapay zeka programlarının eğitilmesi sağlanmaktadır. ML modelinin verilen giriş verilerine göre elde edeceği çıkış ile eşik değeri kontrol etmesi ve gerekli durumlarda sert anahtarlama işlemini başarıyla yapması sağlanmaktadır.

RF/FSO hibrit sistemi için ML kullanılarak oluşturulan sert anahtarlama [31-33] ve yumuşak anahtarlama [35] çalışmaları ve RF-VLC hibrit sistemlerinde anahtarlama şeması ve ML kullanımı [26] ile ilgili örnekler bulunmakla birlikte, RF/FSO-VLC [15, 47] ve RF-FSO-VLC [16] hibrit sistemi ile mevcut çalışmalarda yalnızca nümerik analiz ile elde edilen anahtarlama şeması çalışmaları ele alınmıştır. İncelenen literatür kapsamında, bu çalışmadaki gibi bir sert anahtarlama tabanlı hibrit RF/FSO-VLC sisteminin Makine Öğrenimi yöntemleri kullanılarak performans analizi literatürde mevcut değildir.

Genel yapısı Şekil 6.53'te görülen önerilen hibrit sistemde RF/FSO-VLC hibrit yapısı FSO-VLC ve RF-VLC olacak şekilde iki durum seçeneği ile çalışmaktadır. Öncelikli olarak FSO-VLC hibrit sistemi aktif olarak kullanılmakta ve SNR, BER ve Outage Probablity (OP) takip edilerek sistemin çalışır durumda kalması sağlanmaktadır. İkinci seçenekte ise RF-VLC sisteminin performans analizi sonucuna göre sistemin RF-VLC hattını kullanarak çalışmasıdır. Aynı anda tek bir bağlantının kullanılması vericide daha düşük güç tüketimine neden olmakta ve alıcıda birleştirme veya çoklama işleminin kullanılmasına gerek kalmamaktadır.



Şekil 6.53. RF/FSO-VLC hibrit şebeke mimarisi

RF kanal modeli

Yol kaybı modeli ve uzamsal kanal modelini içeren RF haberleşme kanal modeli, genellikle birleşik kanal darbe yanıtları ve açısal dağılım istatistiklerinden oluşmaktadır [6]. RF hattı, Rician ve Rayleigh dağılımına göre daha yoğun bir saçılma gösterdiği öngörülerek Nakagami-m modeli ile modellenmiştir.

RF hattının anlık SNR değerine (γ_{RF}) göre olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF), $f_{\gamma_{RF}}(\gamma)$[47]:

$$f_{\gamma_{RF}}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\Gamma(m)\bar{\gamma}_{RF}^m} exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_{RF}}\right) \tag{6.27}$$

$\bar{\gamma}_{\mathrm{RF}}$ ortalama elektriksel SNR, m şekillendirme parametresi olmak üzere $m \geq 0.5$'dir. RF hattının kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) $F_{\gamma_{RF}}(\gamma)$ ise:

$$F_{\gamma_{RF}}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)}\gamma\left(m, \frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \tag{6.28}$$

şeklindedir.

Burada, $\Gamma(.)$ ve $\gamma(.,.)$ sırasıyla gama fonksiyonu ve en düşük tamamlanmamış gama fonksiyonunu ifade etmektedir.

FSO kanal modeli

FSO sistemlerinin çalışmasını önemli ölçüde etkileyen faktörler arasında kar, yağmur, sis vb. gibi birçok dış etki ile hava sıcaklığı ve basıncındaki değişikliklerden kaynaklanan atmosferik türbülans yer almaktadır. Yayılan ışık fotonları yağmur veya sis sonucu, havadaki parçacıklarla etkileşime girerek saçılıma ve emilime uğradığından alınan optik güç zayıflamaktadır [32].

FSO kanalı için Gamma-gamma modelinin PDF, α, β, Rytov varyansı σ^2 ve kırılma indisi yapısal parametresi C_n^2 için sırasıyla Eş. 6.11, Eş. 6.12, Eş. 6.13 ve Eş. 6.14, anlık SNR

değeri (γ_{FSO}) için PDF ve CDF ifadeleri için ise sırasıyla Eş. 6.15 ve Eş. 6.16 geçerli olmak üzere, FSO kanalı için işaretleme hatasını (pointing error) da içerecek şekilde Gamma-gamma sönümleme kanal modeli oluşturulması durumunda hattın SNR değeri için elde edilen PDF ifadesi aşağıdaki gibidir [37]:

$$f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = \frac{\zeta^2 / \gamma_{FSO}}{r\,\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0}\left[\alpha\beta\left(\frac{\gamma_{FSO}}{\bar{\gamma}_{FSO}}\right)^{1/r}\middle| \begin{matrix}\zeta^2+1\\ \zeta^2,\alpha,\beta\end{matrix}\right] \tag{6.29}$$

Formülde $\bar{\gamma}_{FSO}$ FSO hattının ortlama SNR değeri, α ve β sırasıyla küçük ve büyük aralıklı etkin türbülans sayıları, ζ ise işaretleme hatası (pointing error) parametresi (ζ için yüksek değerler daha düşük işaretleme hatalarını belirtmektedir) ve r ise algılama yöntemini belirtmek için kullanılmaktadır (*r=1 heterodyne yöntemi, r=2 yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (IM/DD)*). Ayrıca, *Γ(.)* ve *G(.)* sırasıyla, Gama fonksiyonu ve Meijer's G fonksiyonudur.

FSO kanalındaki SNR için Gamma-gamma dağılımının CDF'si aşağıdaki gibidir:

$$F_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = \int_{-\infty}^{\gamma} f_{\gamma_{FSO}}(t)dt \tag{6.30}$$

$$F_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = \int_{0}^{\gamma} \frac{\zeta^2}{rt\,\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0}\left[\alpha\beta\left(\frac{t}{\bar{\gamma}_{FSO}}\right)^{1/r}\middle| \begin{matrix}\zeta^2+1\\ \zeta^2,\alpha,\beta\end{matrix}\right] dt \tag{6.31}$$

$$F_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = AG_{r+1,3r+1}^{3r,1}\left[\frac{B\gamma}{\gamma_{FSO}}\middle| \begin{matrix}1,k_1\\ k_2,0\end{matrix}\right] \tag{6.32}$$

Formüllerde;

$A = \frac{\zeta^2 r^{\alpha+\beta-2}}{(2\pi)^{r-1}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}$ $B = \frac{(\alpha\beta)^r}{(r)^{2r}}$ $k_1 = \frac{\zeta^2+1}{r}, \ldots\ldots\ldots\ldots, \frac{\zeta^2+r}{r}$

$k_2 = \frac{\zeta^2}{r}, \ldots, \frac{\zeta^2+r-1}{r}, \frac{\alpha}{r}, \ldots, \frac{\alpha+r-1}{r}, \ldots, \frac{\beta}{r}, \ldots, \frac{\beta+r-1}{r}$

Algılama yöntemi IM/DD olarak belirlenirse (*r=2*) CDF ifadesi ve diğer katsayılar aşağıdaki şekilde elde edilmektedir:

$$F_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = AG_{3,7}^{6,1}\left[\frac{B\gamma}{\gamma_{FSO}}\middle|\begin{matrix}1, k_1\\ k_2, 0\end{matrix}\right] \tag{6.33}$$

Formüllerde;

$A = \frac{\zeta^2 2^{\alpha+\beta-2}}{2\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}$ $B = \frac{(\alpha\beta)^2}{(2)^4}$ $k_1 = \frac{\zeta^2+1}{2}, \ldots\ldots\ldots\ldots, \frac{\zeta^2+2}{2}$

$k_2 = \frac{\zeta^2}{2}, \ldots, \frac{\zeta^2+1}{2}, \frac{\alpha}{2}, \ldots, \frac{\alpha+1}{2}, \ldots, \frac{\beta}{2}, \ldots, \frac{\beta+1}{2}$

VLC kanal modeli

VLC, verileri kodlamak için LED ışık kaynağının yoğunluğunu modüle ederek çalışmaktadır. Bu modülasyon insan gözü tarafından algılanamayan yüksek bir frekansta gerçekleşmektedir. Alıcı uçta, bir fotodiyot bu modüle edilmiş ışığı algılar, ışık yoğunluğundaki dalgalanmaları bir elektrik akımına dönüştürür ve bu akım daha sonra tekrar ikili bir veri akışına dönüştürülür. Bu nedenle, çalışma prensibi optik fiberler aracılığıyla veri iletimine benzer; en önemli fark VLC'nin veri iletimi için boş alan kullanmasıdır [43]. VLC için kanal modeli Şekil 6.40'ta yer alan model ile aynı olmak üzere, *t.* kullannıcı için VLC kanal kazancı değişken değiştirme yöntemiyle aşağıdaki şekilde elde edilir [13]:

$$f_{h_t}(h) = \frac{2}{r_e^2(m_l+3)}\left(\omega(m_l+1)L^{\,m_l+1}\right)^{2/m_l+3} h^{-(2/m_l+3)-1} \tag{6.34}$$

$$h_t = \frac{\omega(m_l+1)L^{\,m_l+1}}{(r_t^2+L^2)^{\frac{m_l+3}{2}}} \tag{6.35}$$

Anlık SNR değeri için PDF ifadesi:

$$\gamma_{VLC} = \bar{\gamma}_{VLC} h_t^2 \tag{6.36}$$

$$f_{\gamma_{VLC}}(\gamma) = \frac{\bar{\gamma}_{VLC}^{\frac{1}{m_l+3}}}{r_e^2(m_l+3)} (\omega(m_l+1)L^{\,m_l+1})^{2/m_l+3} \gamma^{-\frac{m_l+4}{m_l+3}} \quad (6.37)$$

$\gamma \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ ve $\lambda_{min} = \frac{\bar{\gamma}_{VLC}\,(\omega(m_l+1)L^{\,m_l+1})^2}{(r_e^2+L^2)^{m_l+3}}$ ve $\lambda_{max} = \frac{\bar{\gamma}_{VLC}\,(\omega(m_l+1)L^{\,m_l+1})^2}{(L^2)^{m_l+3}}$

$\bar{\gamma}_{VLC} = \frac{\rho P^2}{N_0 B}$ P iletilen optik güç, N_0 güç spektral yoğunluğu, B temel bant modülayon bant genişliğidir.

Anlık SNR değeri için CDF ifadesi ise aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$F_{\gamma_{VLC}}(\gamma) = \left(1 + \frac{L^2}{r_e^2}\right) - \frac{1}{r_e^2} (\omega(m_l+1)L^{\,m_l+1})^{2/m_l+3} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{VLC}}\right) \quad (6.38)$$

Tasarlanan kanalların kesinti olasılığı analizi

Kesinti olasılığı, bir ağ güvenilirliği ölçütü olarak, bir kablosuz bağlantının kalitesinin kabul edilebilir bir seviyenin altına düşme olasılığını göstermektedir. Bu, bir iletişim sisteminin normal işleyişinde geçici bir bağlantı veya hizmet kaybıyla sonuçlanan kesinti anlamına gelmektedir. [199].

Anlık BER'in belirli bir değeri aşma olasılığı veya eşdeğer olarak çıkış SNR'ın belirli bir eşiğin altına düşme olasılığı olarak da tanımlanan kesinti olasılığı, kablosuz sistemlerin yarı statik sönümleme kanalları üzerindeki performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir bilgi teorisi kriteridir [28].

RF-VLC sistemi için uçtan uca SNR değerinin CDF'si (γ_{R-V}) aşağıdaki gibidir:

$$F_{\gamma_{R-V}}(\gamma) = F_{\gamma_{RF}}(\gamma) + F_{\gamma_{VLC}}(\gamma) - F_{\gamma_{RF}}(\gamma)\, F_{\gamma_{VLC}}(\gamma) \quad (6.39)$$

RF-VLC hattı için kesinti olasılığı ise aşağıdaki gibi elde edilir:

$$P_{out} = Pr[min(\gamma_{R-V}) < \gamma_{th}] = F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_{VLC}}(\gamma_{th}) - F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th})F_{\gamma_{VLC}}(\gamma_{th}) \quad (6.40)$$

$F_{\gamma_{R-V}}(\gamma)$: RF-VLC için uçtan uca SNR'ın CDF'si

$F_{\gamma_{RF}}(\gamma)$: RF için uçtan uca SNR'ın CDF'si

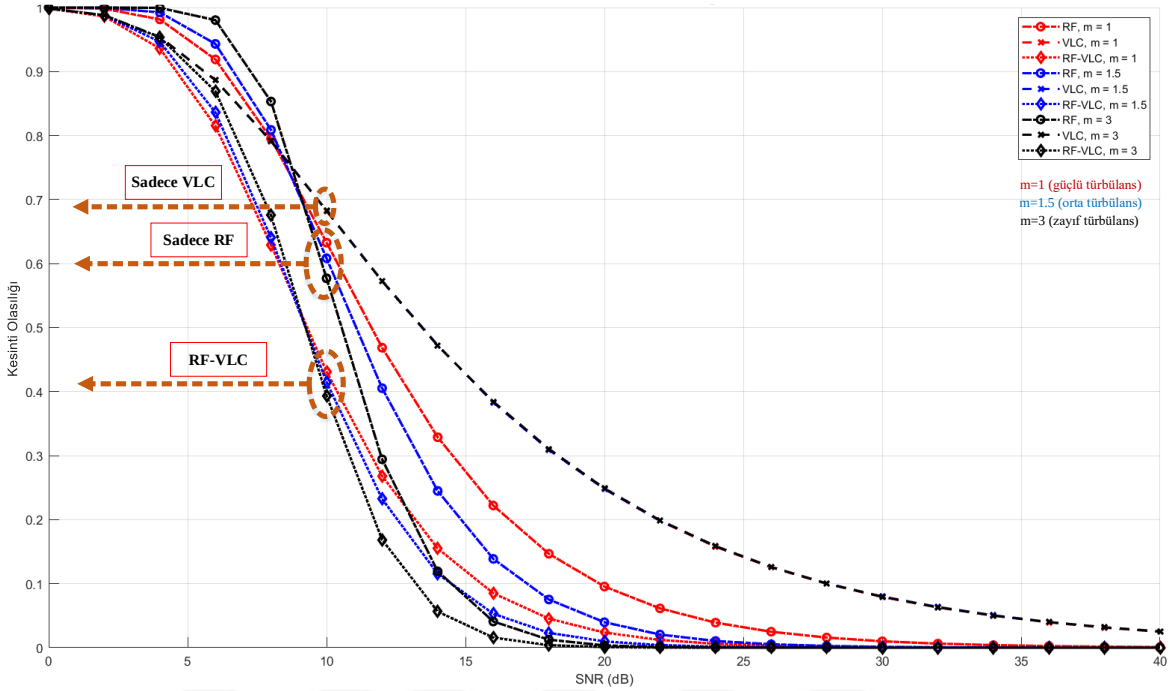
$F_{\gamma_{VLC}}(\gamma)$: VLC için uçtan uca SNR'ın CDF'si

Tasarımı yapılan FSO-VLC ve RF-VLC hatlarının SNR eşik değerleri için elde edilen PDF, CDF ve kesinti olasılığı eşitliklerinden (Eş.6.40 ve Eş.6.42) faydalanarak Matlab ortamında Monte-Carlo simülasyonu kullanılarak hesaplama yapılmaktadır (Çizelge 6.14).

Çizelge 6.14. Kesinti olasılığı hesaplaması için işlemler

Girdi: Threshold values (*num_samples, SNR_threshold, m_values,…*).
Çıktı: Outage probablity level for *FSO-VLC* and *RF-VLC* systems.
1: Initialization: Determine the parameters (*$SNR_{th,}$* Monte-Carlo *num_samples*, Gamma-gamma dist. α and β values, FSO *pointing error*, VLC *channel parameters*, RF *channel parameters, …*)
2: Monte-carlo simulation for *i = 1:N_sim calculate RF_SNR, FSO_SNR and VLC_SNR.*
3: Evaluate each value if *SNR_i < SNR_{th}* for all systems.
4: Minimum SNR for hybrid system *SNR_total = min(RF_SNR, FSO_SNR, VLC_SNR).*
5: if *SNR_total < SNR_{th}* , then *outage_count = outage_count + 1;*
6: else evaluate the SNR
7: Results=Outage probablity for SNR threshold values
8: Output Result graphs

Yukarıda verilen kesinti olasılığı eşitlikleri ve Çizelge 6.14'teki işlem adımları kullanılarak el dedilen nümerik sonuçlar grafiklerde gösterilmektedir. Şekil 6.54'te Nakagami sönümleme parametresi olan *m*'in aldığı farklı değerler için kesinti olasılığı sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.54. Nakagami-m katsayıları için RF, VLC ve RF-VLC kesinti olasılıkları

Şekil 6.54'te görüldüğü gibi VLC ve RF kanalarının yalnızca birinin kulllanılması durumunda elde edilen kesinti olasığılı sırasıyla 0,69 ve 0,61 olmaktadır. Aynı grafiğe göre RF-VLC hibrit yapısı kullanıldığında elde ediel olasılık 0,41'e düşmektedir. Dolasyısıyla hibrit RF-VLC sistem yapısı kesinti olasılığı değerinde VLC'ye göre yaklaşık %41 ve RF'e göre ise yaklaşık %33 oranında iyileşme sağlamıştır.

FSO kanalı için kesinti olasılığı, tipik olarak atmosferik zayıflama ve kanal gürültüsüne bağlı olarak hesaplanmaktadır. FSO linkinin kesinti olasılığı önceden belirlenen bir threshold değeri (γ_{th}) için şu şekilde ifade edilebilir:

FSO-VLC sistemi için uçtan uca SNR değerinin CDF'si (γ_{F-V}) aşağıdaki gibidir:

$$F_{\gamma_{F-V}}(\gamma) = F_{\gamma_{FSO}}(\gamma) + F_{\gamma_{VLC}}(\gamma) - F_{\gamma_{FSO}}(\gamma)\, F_{\gamma_{VLC}}(\gamma) \tag{6.41}$$

FSO-VLC hattı için kesinti olasılığı ise aşağıdaki gibi elde edilir:

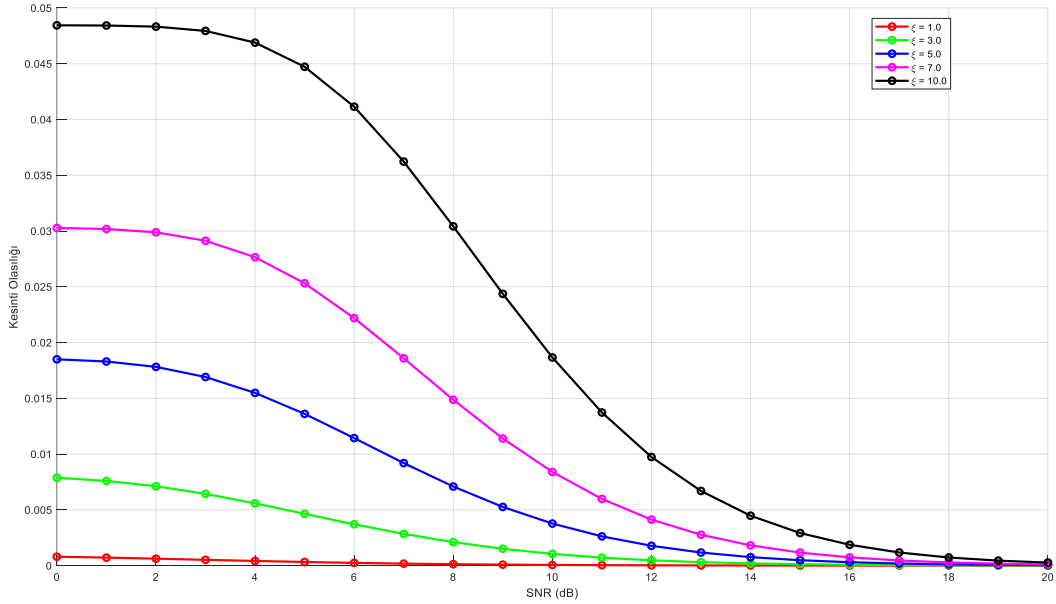
$$P_{out} = Pr[min(\gamma_{F-V}) < \gamma_{th}] = F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_{VLC}}(\gamma_{th}) - F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th}) F_{\gamma_{VLC}}(\gamma_{th}) \tag{6.42}$$

$F_{\gamma_{F-V}}(\gamma)$: FSO-VLC için uçtan uca SNR'ın CDF'si

$F_{\gamma_{FSO}}(\gamma)$: FSO için uçtan uca SNR'ın CDF'si

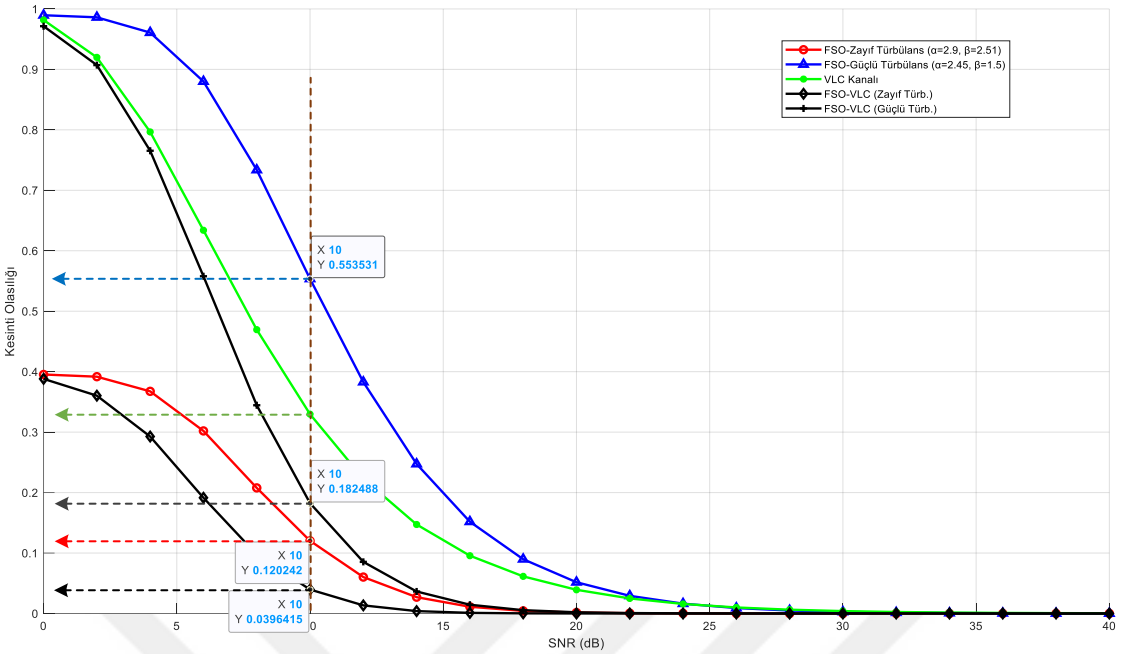
$F_{\gamma_{VLC}}(\gamma)$: VLC için uçtan uca SNR'ın CDF'si

Şekil 6.55'te farklı işaretleme (pointing) hataları için tekli FSO hattının kesinti olasılığı analizi görülmektedir. İşaretleme hatası katsayısı (ξ) değerleri 1 ila 10 arasında değişirken (SNR=8 dB için) kesinti olasılığının 0 ila 0,03 arasında değiştiği ve hızlı bir artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.55. Farklı işaretleme hatası değerleri için FSO kesinti olasılığı

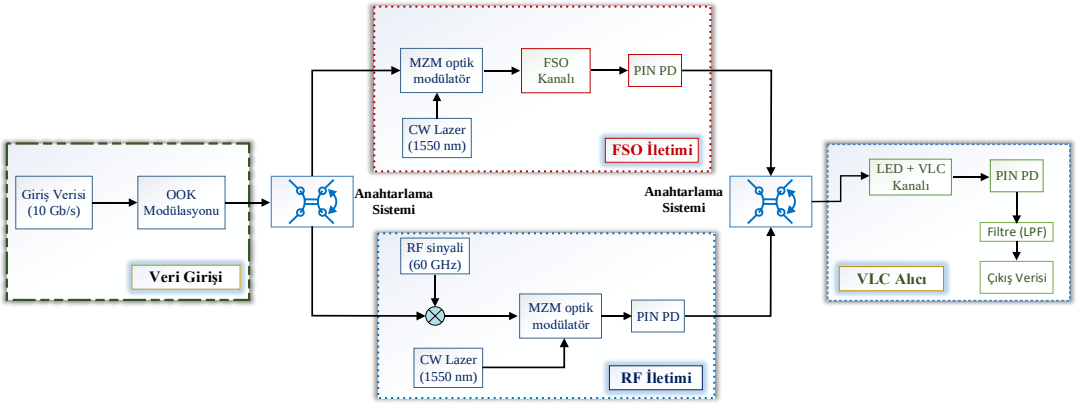
Şekil 6.56'da görülen ve yukarıdaki hesaplamalara göre elde edilen kesinti olasılığı (OP) sonuçlarına göre FSO bağlantısının zayıf türbülans OP değeri (SNR=10 dB için) 0,12; güçlü türbülans için ise 0,56 olarak hesaplanmaktadır. Diğer taraftan, FSO-VLC hibrit kanalı için OP değeri zayıf türbülans etkisi altında 0,039; güçlü türbülans etkisi altında ise 0,18 olarak elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre, hibrit FSO-VLC sistem yapısı zayıf ve güçlü türbülans ortamlarının her ikisi için de kesinti olasılığı değerinde yaklaşık olarak %68 oranında bir iyileşme sağlamıştır.



Şekil 6.56. Farklı türbülans değerleri için FSO, VLC ve FSO-VLC kesinti olasılığı

Optik simülasyon ve performans analizi

Bu kısımda, tasarımı yapılan RF/FSO-VLC hibrit sisteminin (Şekil 6.57) optik simülasyonu Optisystem 22 programı ile yapılarak farklı kombinasyonlar için performans sonuçları elde edilmiştir. Simüle edilen devrede performans analizi için, FSO ve VLC bağlantı mesafeleri, FSO atmosferik zayıflama etkisi, VLC görüş alanı (FOV) açısı, RF frekansı, lazer gücü gibi parametreler kullanılmıştır.



Şekil 6.57. RF/FSO-VLC hibrit sistem şeması

Şekil 6.57'deki şemada; gönderici tarafında 1 ve 10 Gbps veri OOK ile modüle edilerek

iletilmektedir. Modüle edilmiş optik sinyal, sert anahtarlama algoritmasına göre karar veren bir sistem tarafından FSO veya RF hattına yönlendirilmektedir.

Alıcı tarafında fotodedektör (PD) ile tekrar elektriksel alana dönüştürülen optik sinyali, LED'e uygulanmadan önce algılamak ve demodüle etmek için alıcı tarafında bir PD kullanılmıştır. VLC bağlantısında, 550 nm tepe dalga boyunda çalıştırılan tek bir LED, Tx olarak kabul edilmiştir. Alınan sinyal daha sonra sinyal filtreleme için Bessel Alçak Geçiren Filtreye (LPF) uygulanmaktadır. Son olarak alınan sinyal, farklı hava koşullarını temsil eden zayıflama değerleri, lazer çıkış gücü parametreleri ve mesafeler dikkate alınarak Q faktörü, SNR ve BER performans analizi yapılması için monitoring işlemi yapılmaktadır.

Bu çalışmada önerilen hibrit sistemde, VLC sisteminde ışık kaynağı olarak LED ve alıcı olarak ışık yoğunluğunu algılayan fotodiyot kullandığından, OOK modülasyonu ile IM/DD kullanılmaktadır.

Tasarlanan RF/FSO-VLC sisteminin temel özellikleri aşağıdaki Çizelge 6.15'te özetlenmiştir:

Çizelge 6.15. RF/FSO-VLC hibrit sistemi simülasyon parametreleri

Sistem parametresi	Değeri
Veri hızı	1-10 Gb/s
CW lazer dalga boyu	1550 nm
CW lazer gücü	0 to 20 dBm
Modülasyon	OOK
FSO parametresi	**Değeri**
FSO kanal mesafesi	1 to 10 km
FSO dalga boyu	1550 nm
Gönderici açıklık çapı	2.5-5 cm
Alıcı açıklık çapı	25 cm
Beam divergence	0.25 mrad
Türbülans etkisi	2 to 10 dB/km
Ref. Str. İndeksi (C_n^2)	5e-15 $m^{-2/3}$
FSO kanal modeli	Gamma-gamma
Rf parametresi	**Değeri**
RF frekansı	45 to 65 GHz
RF Nakagami (m)	1-1.5-3

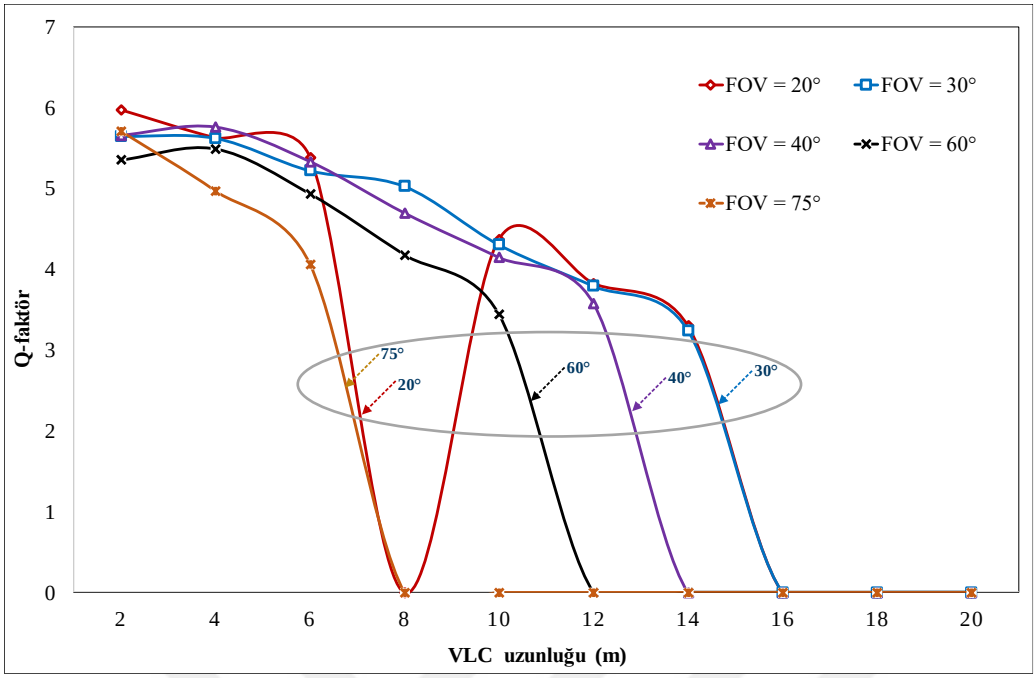
Çizelge 6.15.(devam) RF/FSO-VLC hibrit sistemi simülasyon parametreleri

VLC parametresi	Değeri
VLC dalga boyu	550 nm
VLC kanal mesafesi	2 to 20 m
VLC kanalı FOV (geliş açısı)	20° to 75°
PD alanı	2 cm^2
Elektron yaşam süresi	10^{-12} s
RC sabiti	10^{-12} s
Quantum verimliliği	% 65

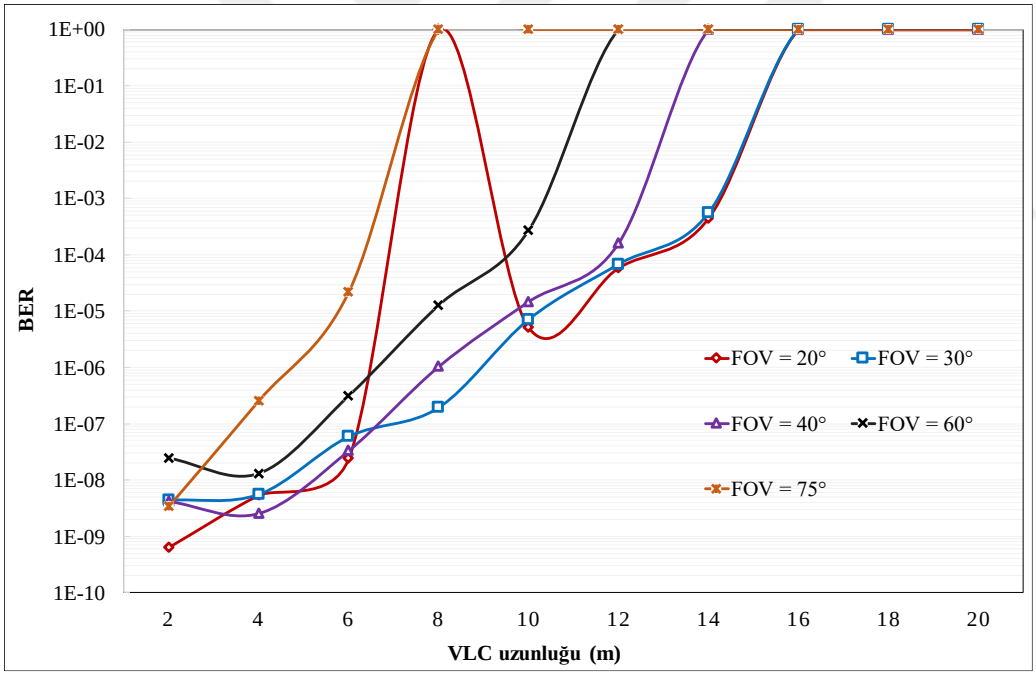
RF-VLC optik simülasyon sonuçları

Optik simülasyon programı kullanılarak RF-VLC hibrit hattının 10 Gb/s veri hızı kullanılarak simüle edilmesi sonucunda elde edilen örnek performans grafikleri Şekil 6.58 ve Şekil 6.59'da görülmektedir.

Şekil 6.58'de optik simülasyon programından elde edilen ve VLC bağlantısı uzunluğuna (2 - 20 m) bağlı olarak değişen, farklı görüş alanı (FOV) açılarına göre (a) Q-faktör ve (b) BER değerlerinin karşılaştırıldığı sonuçlar görülmektedir. Beklendiği şekilde link mesafesinin artmasıyla birlikte, sinyaldeki güç zayıflamasına bağlı olarak Q-faktörü bütün FOV açılarında azalmaktadır. Diğer taraftan açıların değişmesi ile birlikte Q-faktör değişimleri doğrusal olmamakla birlikte sırasıyla 60, 40 ve 30 derece için Q-faktör değerleri 12, 14 ve 16 m VLC mesafesinde sıfıra düşmektedir. Şekil 6.58(b)'deki BER değerleri ise Q-faktörle ters orantılı olacak şekilde değişiklik göstermiştir.



(a)

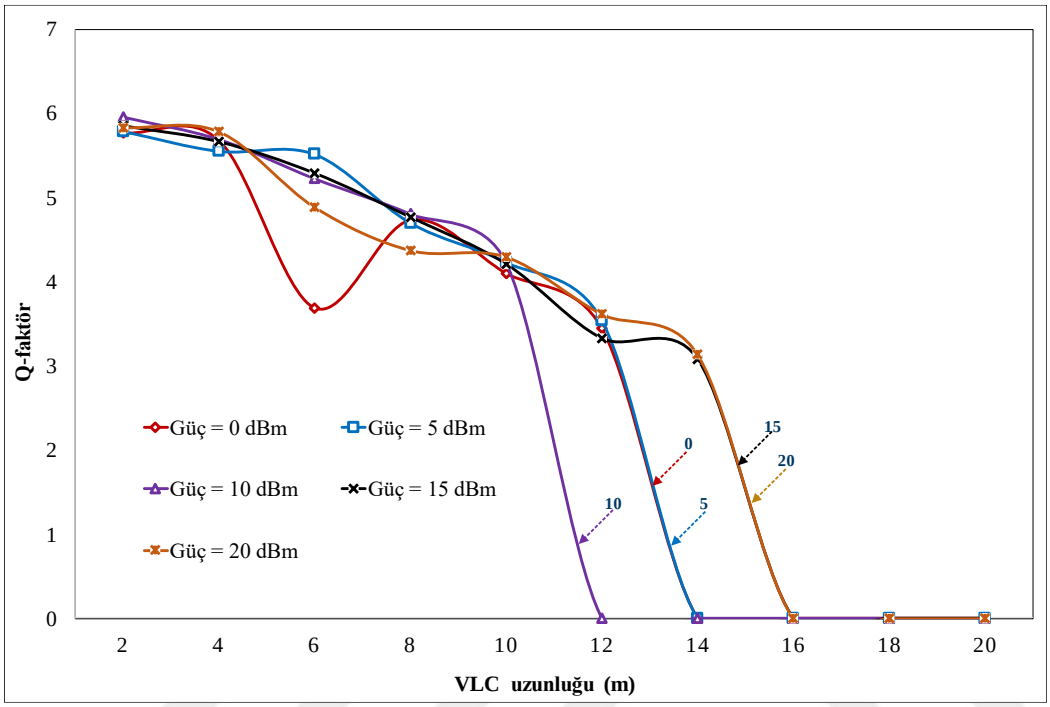


(b)

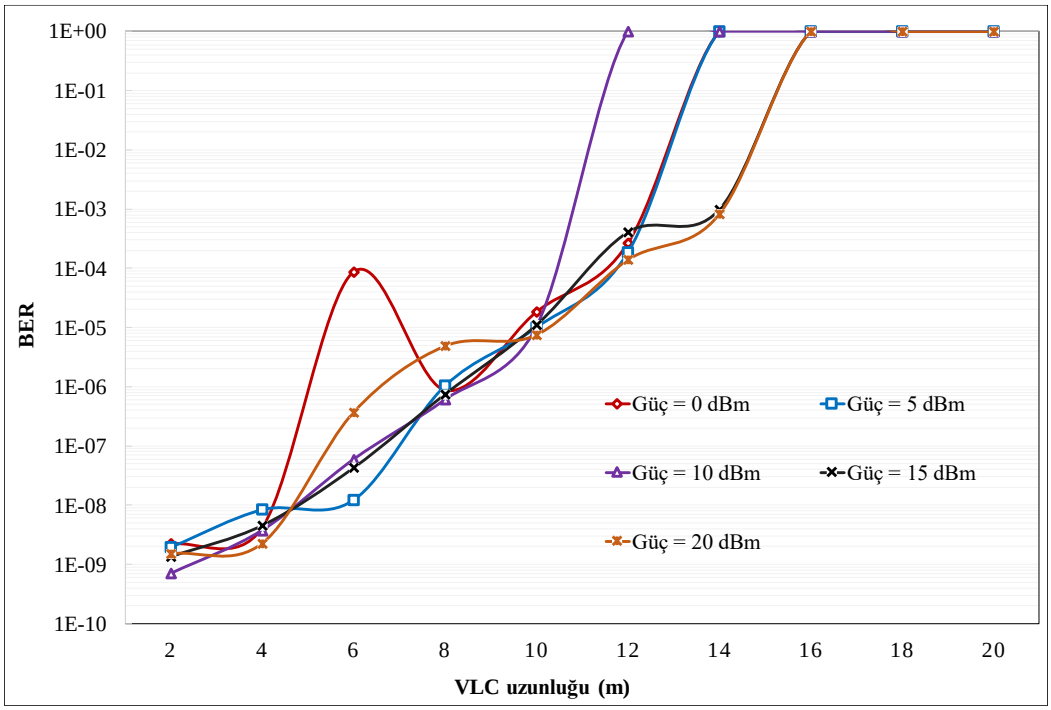
Şekil 6.58. Farklı VLC-FOV değerleri için sonuçlar (a) Q-faktör/VLC uzunluğu (b) BER/ VLC uzunluğu

Şekil 6.59'da ise optik simülasyon programından elde edilen ve VLC bağlantısı uzunluğuna (2 -20 m) bağlı olarak değişen, farklı CW lazer güç değerine göre (a) Q-faktör ve (b) BER değerlerinin karşılaştırıldığı sonuçlar görülmektedir. Link mesafesinin artmasıyla birlikte, Q-faktörü bütün güç değerlerinde azalmaktadır. Diğer taraftan lazer gücü değişimi ile birlikte Q-faktör değişimleri tamamen doğrusal olmamakla birlikte sırasıyla 10, 0, 5, 15 ve

20 dBm değerleri için Q-faktör değerleri 12, 14 ve 16 m VLC mesafesinde sıfıra düşmektedir. Şekil 6.59 (b)'deki BER değerleri, Q-faktörle ters orantılı olarak değişiklik göstermiştir.



(a)



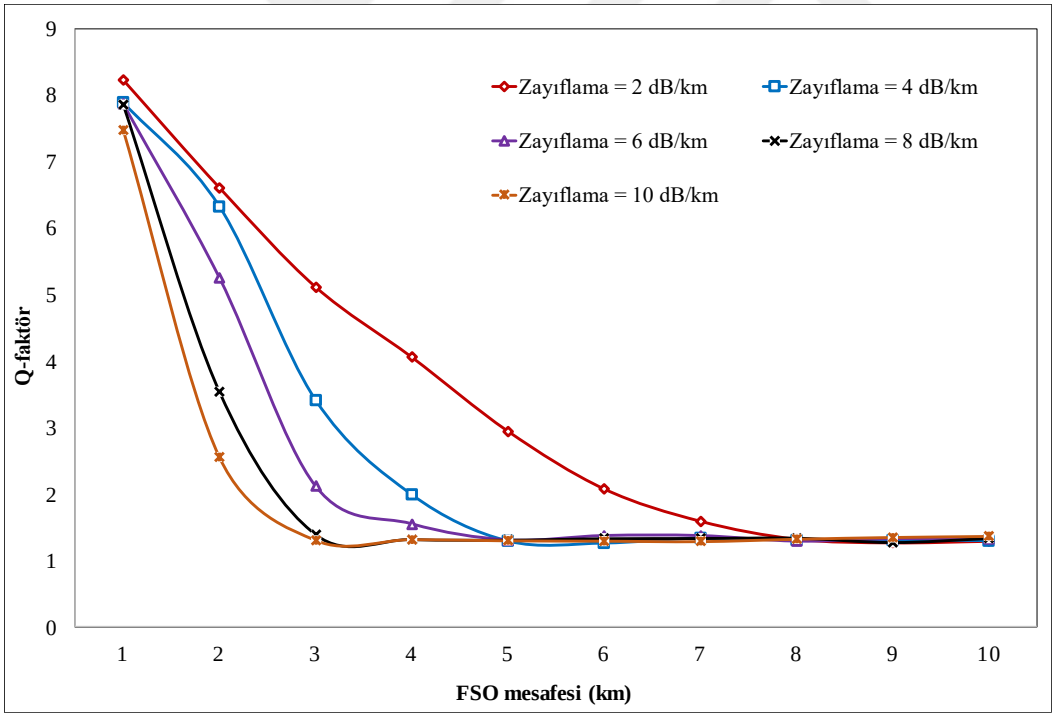
(b)

Şekil 6.59. Farklı lazer gücü değerleri için sonuçlar (a) Q-faktör/VLC uzunluğu (b) BER/ VLC uzunluğu

FSO-VLC optik simülasyon sonuçları

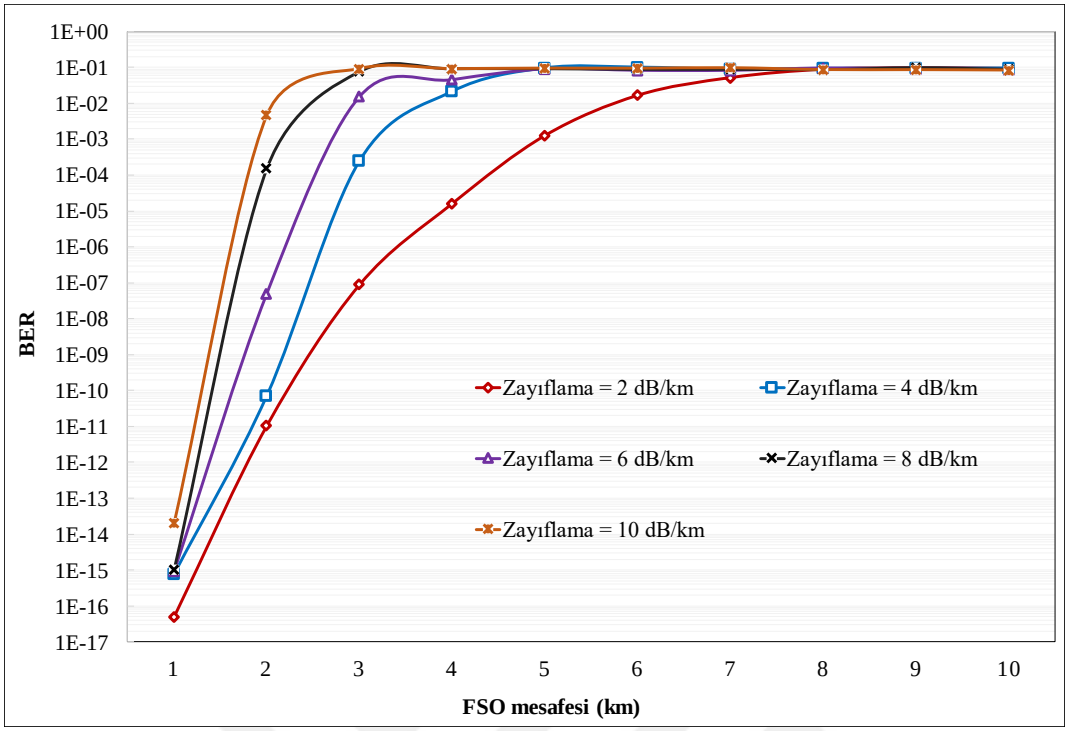
Optik simülasyon programı kullanılarak FSO-VLC hibrit hattının 10 Gb/s veri hızı kullanılarak simüle edilmesi sonucunda elde edilen örnek performans grafikleri Şekil 6.60 ve Şekil 6.61'de görülmektedir.

Şekil 6.60 (a) ve (b) farklı FSO bağlantı uzunlukları ve zayıflama değerleri için Q-faktörü ve BER grafiklerini göstermektedir. Şekil 6.60 (a)'daki grafikte FSO hattını etkileyen atmosferik türbülansın artmasıyla birlikte, sinyalin kalitesinin de düştüğü görülmektedir. Örneğin Q faktör değeri 3 iken, atmosferik zayıflamasının 2 dB/km olması durumunda sinyal 5 km iletilebilirken, zayıflama değer 10 dB/km olduğunda sinyal 1,8 km iletilebilmektedir. Şekil 6.60 (b)'deki grafikte ise sinyal zayıflamasının artışı ile birlikte BER değerlerinin de arttığı görülmektedir.



(a)

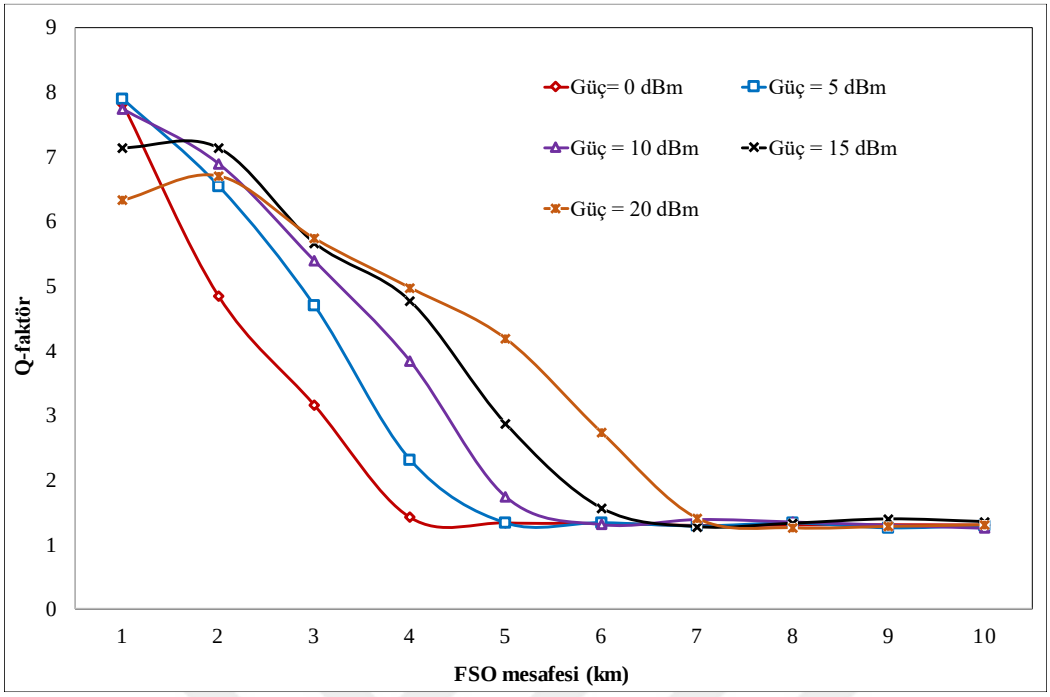
Şekil 6.60. Farklı FSO zayıflama değerleri için a) Q-faktör/FSO mesafesi b) BER/FSO mesafesi grafikleri



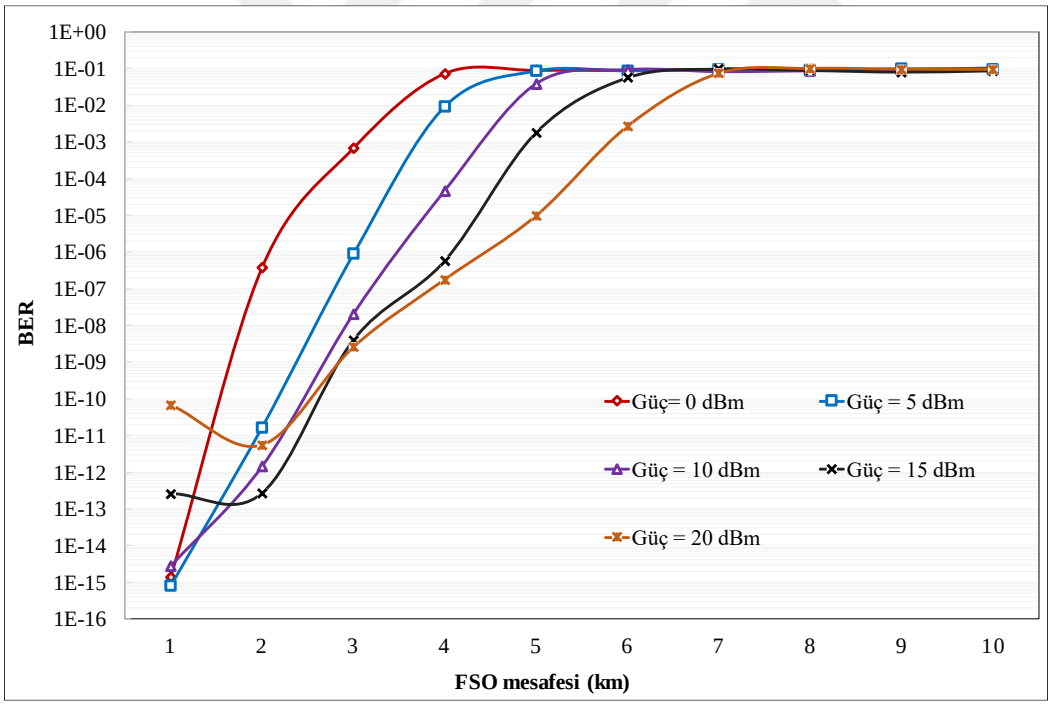
(b)

Şekil 6.60.(devam) Farklı FSO zayıflama değerleri için a) Q-faktör/FSO mesafesi b) BER/FSO mesafesi grafikleri

Şekil 6.61 (a) ve (b) farklı FSO bağlantı uzunlukları ve lazer gücü değerleri için Q-faktörü ve BER grafiklerini göstermektedir. Şekil 6.61 (a)'daki grafikte sinyal iletim gücünün artmasıyla birlikte, sinyalin kalitesinin de arttığı görülmektedir. Örneğin Q faktör değeri 3 iken, sinyal gücünün 0 dBm olması durumunda sinyal 3 km iletilebilirken, sinyal güç değeri 10 dBm olduğunda sinyal 4,4 km iletilebilmektedir. Şekil 6.61 (b)'deki grafikte ise sinyal gücünün artışı ile birlikte BER değerlerinin azaldığı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.61. Farklı lazer gücü değerleri için sonuçlar (a) Q-faktör/ FSO mesafesi (b) BER/ FSO mesafesi

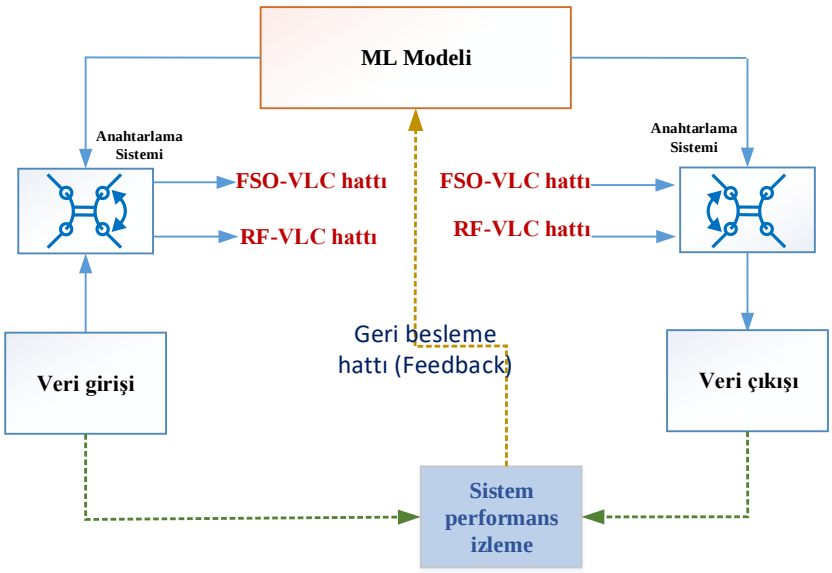
ML temelli anahtarlama algoritması

FSO bağlantılar atmosfer koşullarından etkilendiğinden dolayı, yedekleme kanalı olarak RF kullanılması amacıyla hibrit FSO/RF hatları oluşturulmaktadır. Bu sistemlerin optimum

koşullarda çalışmasını sağlamak amacıyla iletim kanallarını etkileyen faktörlerin analiz edilmesi önemlidir. FSO/RF hibrit sistemleri sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama olmak üzere iki tür anahtarlama (hibrit hatlar arasında geçiş) sistemi kullanmaktadır [31, 35].

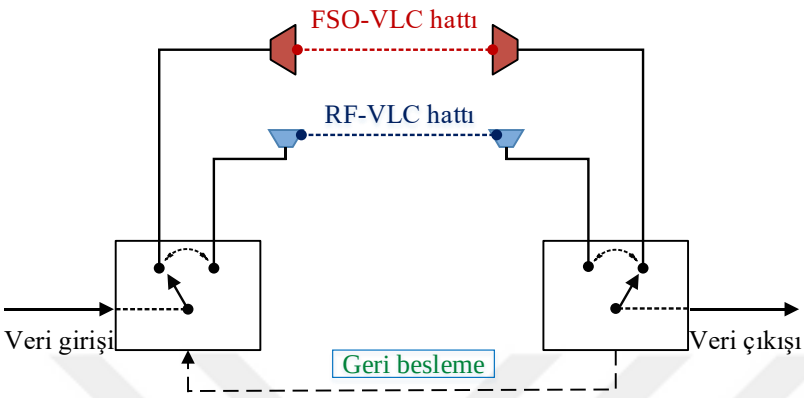
Sert anahtarlamada, belirli bir zamanda bağlantılardan yalnızca biri aktiftir. Öte yandan, yumuşak anahtarlama yaklaşımında, her iki bağlantı da kullanılabilirliklerine bağlı olarak aktif olabilir ve böylece veri iletimi her iki bağlantı üzerinden koordine edilir. Sert anahtarlama kullanan mevcut hibrit sistemlerde, kanal durumu bilgisinin geri bildirimine dayalı olarak hibrit kanallar arasında geçiş yapmak için bir algoritma kullanılmaktadır. Hibrit ağlar, esnek yüksek bant genişlikli iletişimler oluşturmak için FSO bağlantılarının yüksek kapasitesini RF bağlantılarının yüksek kullanılabilirliği ile birleştirmeyi amaçlamaktadır [28, 32].

Bu çalışmada önerilen sistemin kullandığı performans izleme sistemi Şekil 6.62'de görülmektedir. Şekilde ML modeli kalite faktörü tahmini için kullanılmaktadır. Yapılan Q-faktör tahmini, FSO-VLC veya RF-VLC bağlantısı arasında veri iletimi için seçim yapmak üzere anahtarlama sistemi sağlamaktadır. Q-faktör tahmini ile birlikte, ML modeli kullanılarak veri iletim bağlantılarının sınıflandırılması yapılarak anahtarlama sistemi kontrol edilmektedir.



Şekil 6.62. RF/FSO VLC performans izleme sistemi

Veri iletimi için doğru kanalın seçimi, verici ve alıcıdaki koordineli geri besleme ile belirlenmektedir. Hibrit FSO/RF sistemlerinin sert anahtarlama şeması aşağıdaki Şekil 6.63'te gösterilmektedir.



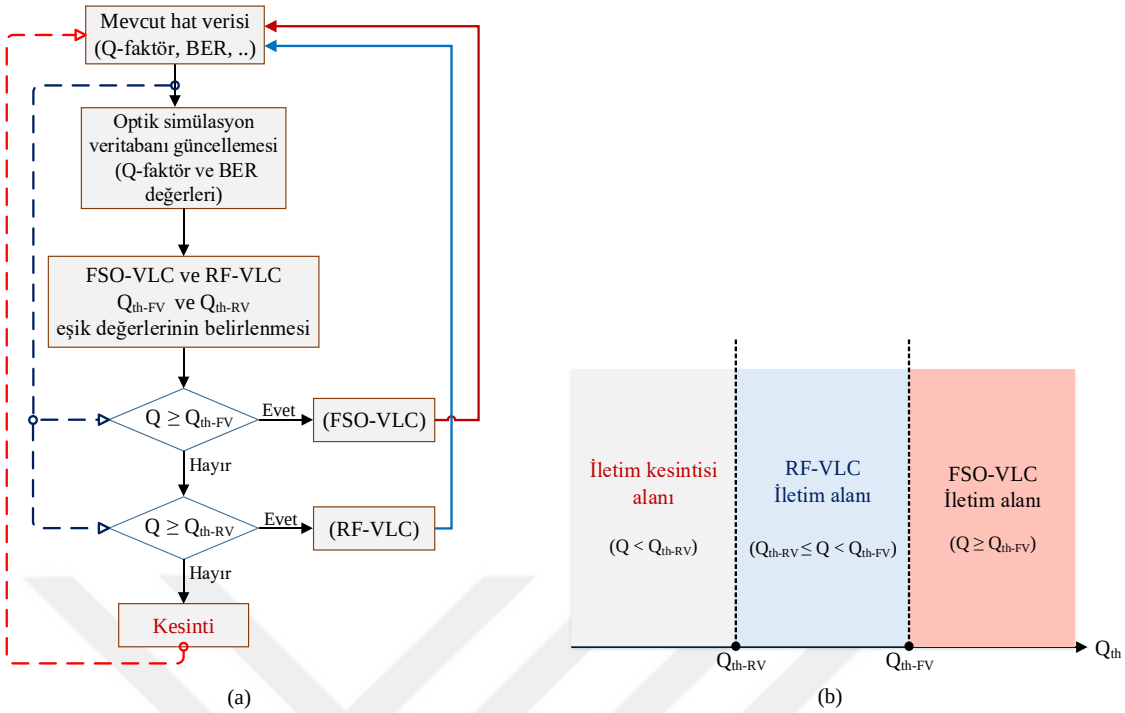
Şekil 6.63. Hibrit sistem sert anahtarlama şeması [29]

FSO-VLC ve RF-VLC arasında sert anahtarlama, verici ve alıcının veri iletimi için bir hibrit kanalı seçmesiyle çalışmaktadır. Birincil FSO-VLC bağlantısının önceden tanımlanmış kalite faktörü (Q-faktör) ile veri iletimi sağlayamadığı bir durum ortaya çıkarsa, RF-VLC bağlantısı daha sonra yüksek güvenilirliği korumak için kullanılmaktadır [32].

Bu çalışmada, ML'ye dayalı yeni bir anahtarlama stratejisi tasarımlanmıştır. Bu teknik, Şekil 6.64(a)'da gösterildiği gibi hibrit RF-VLC ve FSO-VLC sistemlerinin farklı sistem koşulların değerlendirerek mevcutta kullanılan hattın gerekli durumlarda değiştirilmesi için oluşturulan ML modelini kullanmaktadır.

Şekil 6.64(a)'da görüldüğü üzere, sistem mevcut hat verisini alarak veri tabanını günceller ve bu veriyi aynı zamanda eşik değer olarak belirlenen Q-faktör değeri ile karşılaştırır. Bu işlem sonucunca FSO-VLC hattı için belirlenmiş olan eşik değerin altında kalan Q-faktör değeri sonrasında RF-VLC için belirlenen eşik değer ile karşılaştırılır. Bu şekilde sistemin belirli eşik değerlere eşit veya farklı olması durumuna göre anahtarlama işlemi gerçekleştirilir. Sistemin kalite faktörü en düşük eşik değerin de altına kalması durumunda ise sistem kesinti oluştuğu bilgisi vermektedir.

Tanımlanan bu işlemin çalışma alanları Şekil 6.64(b)'de de görülmektedir.



Şekil 6.64. Hibrit sistem anahtarlaması a) Akış şeması ve b) Eşik değerlere göre anahtarlama geçişleri

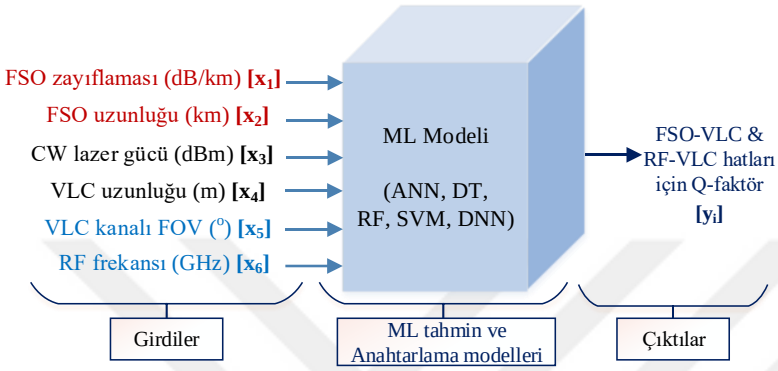
ML modellerinin eğitimi ve tahmin performansları

Yukarıda bahsedilen model çalışmasında ilk olarak Optisystem ve Matlab üzerinden optik simülasyon programı çalıştırılarak elde edilen RF-VLC ve FSO-VLC ağ verileri farklı ML modelinin eğitimi için kullanılmaktadır. Yani tahmin ve anahtarlama uygulaması için önerilen ML modeli algoritmasında, RF-VLC ve FSO-VLC için iki farklı ML modeli eğitilerek tahmin ve anahtarlama işlemini yapması sağlanmaktadır.

Bunun için Matlab yazılımı üzerinden, 10 Gb/s veri seti OOK ile modüle edilerek ve farklı güçteki FSO türbülans kanalları ve VLC kanalı üzerinden aktarılmaktadır. Matlab üzerinde oluşturulan program girdi olarak kullanılacak parametreleri tablo haline getirerek satırlar halinde optik simülasyon programına aktarmaktadır. Daha sonra elde edilen çıktılarda ayrıca tablo olarak kaydedilmektedir. Bu sayede girdi-çıktı arasında yapılacak olan ML eğitim, test ve tahmin işlemleri için veri rahatlıkla kullanılabilmektedir.

ML modeli aşağıdaki Şekil 6.65'te görüldüğü üzere giriş verisi olarak; her iki sistem için de ortak giriş verileri olarak CW lazer gücü (X_3) ve VLC link uzunluğunu (X_4), ayrıca bunlara ek olarak RF-VLC sistemi için FOV değeri (X_5) ve RF frekans (X_6) değerlerini (*375 veri*

örneği), FSO-VLC sistemi için ise (X_3) ve (X_4)'e ilave olarak FSO mesafesi (X_2) ile farklı hava koşullarını temsil etmek için kullanılan FSO atmosferik zayıflama (X_1) değerlerini (*375 veri örneği*) kullarak her iki sistem için de Q-faktör tahmini yapmaktadır. X, her bir satırın $\hat{y}_i$ ile gösterilen sürekli Q değişkenini tahmin etmek için kullanılan belirli bir örneğe karşılık geldiği girdi özelliklerini temsil etmektedir.

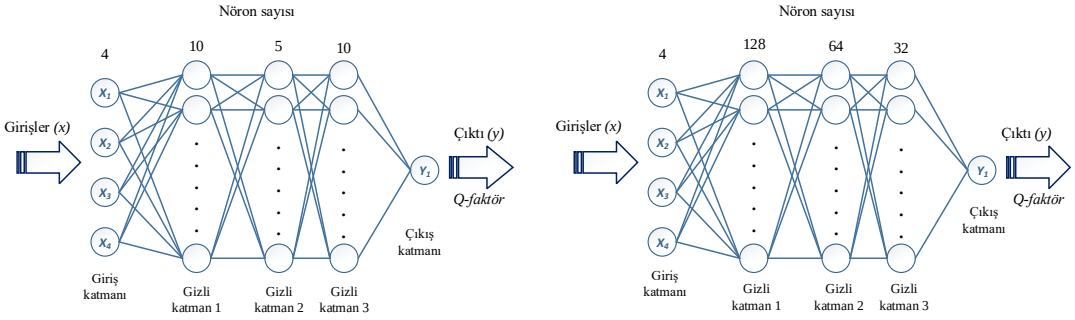


Şekil 6.65. ML tahmin ve anahtarlama modeli yapısı

ML modeli, X_1, X_2, X_3 ve X_4 girişlerini kullanarak FSO-VLC sistemi için Q-faktör tahmini, X_3, X_4, X_5 ve X_6 girişlerini kullanarak ise RF-VLC sistemi için Q-faktör tahmini yapmaktadır.

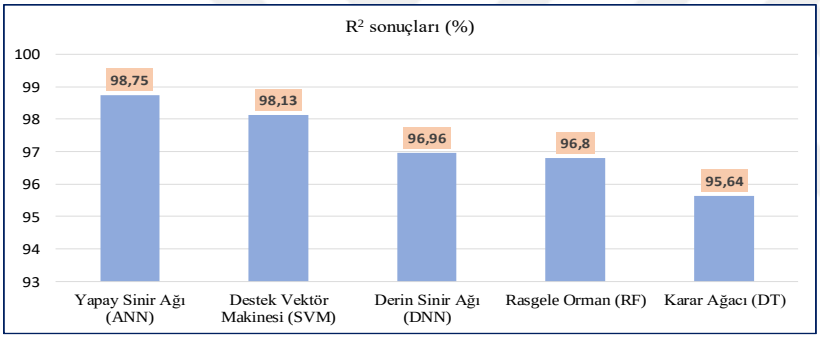
Ayrıca ML modeli iki farklı giriş seti için yapmış olduğu Q-faktör tahminin değerleri ile sistemde kayıtlı olan eşik değeri aralıklarına (Şekil 6.64(b)) göre FSO-VLC ve RF-VLC sistemleri arasında sert anahtarlama işlemi de yapmaktadır.

Tüm ML modellerinde, verilerin %80'i eğitim için, %20'si ise test verisi olarak kullanılmaktadır. ANN modelinde, Levenberg-Marquardt backpropagation modeli ile deneme yapılmaktadır. Gizli katman sayısı her biri sırasıyla 10, 5 ve 10 nörondan oluşan 3 katman şeklindedir (Şekil 6.66(a)). DNN modeli ise, 4 elemanlı giriş ve 1 çıkış katmanı olmak üzere (4x128x64x32x1) model yapısındadır (Şekil 6.66(b)). %30 oranında dropout ve ayrıca batch mormalizasyon içermektedir.

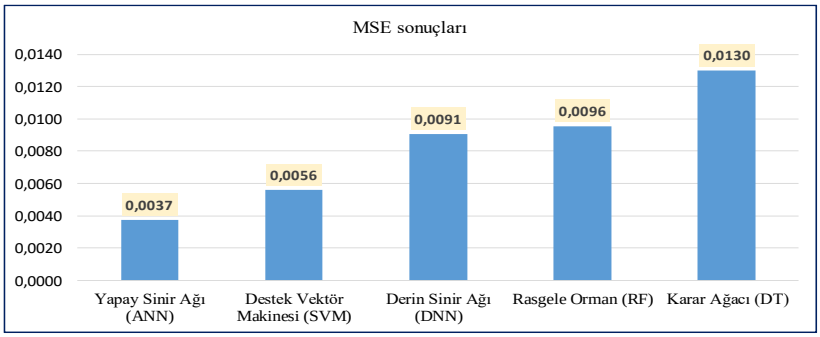


Şekil 6.66. Eğitilen a) ANN ve b) DNN modelleri

Yukarıda bahsedilen şekilde yapılan ve toplam (750 veri örneği) kullanılarak Matlab üzerinden gerçekleştirilen modellemelere göre elde edilen tahmin performansı sonuçları aşağıdaki Şekil 6.67'de gösterilmektedir.



(a)



(b)

```
>> All_MODELS_Performances

  Model        MSE        MAE        R2
  _____    _________    _______    _______

  {'ANN'}    0.0037448    0.045803    0.98746
  {'DNN'}    0.0090743    0.070461    0.96962
  {'SVM'}    0.0055964    0.049494    0.98127
  {'DT' }     0.013023    0.083775     0.9564
  {'RF' }    0.0095567    0.072518    0.96801
```

(c)

Şekil 6.67. ML modelleri için hibrit sistem tahmin performansları a) R^2 b) MSE c) Matlab görüntüsü

Şekil 6.67'deki 5 farklı ML yöntemi için oluşan tahmin R^2 (square of the autocorrelation constant) ve hata MSE (minimum karesel hata) oranlarına göre en iyi tahmin (%98,75) (R^2=0,987) ve en düşük hata (MSE=0,0037) oranları ANN ile elde edilmiş, bununla birlikte ortalama tahmin tutarlılığı %97,26 (R^2=0,972) ve ortalama MSE hatası oranı ise 0,0082 olarak elde edilmiştir.

Diğer taraftan, Matlab üzerinden elde edilen verilerler eğitilen ML modelinin farklı girdi koşulları için yaptığı anahtarlama işlemi sonuçlarına göre performans analizi yapılmaktadır.

Yukarıda açıklanan ve Şekil 6.64'te görülen anahtarlama sistemi, FSO-VLC ve RF-VLC hatlarının Q-faktör eşik değerlerinden faydalanarak ve ML modelleri üzerinden aşağıdaki algoritmaya göre yapılmaktadır (Çizelge 6.16).

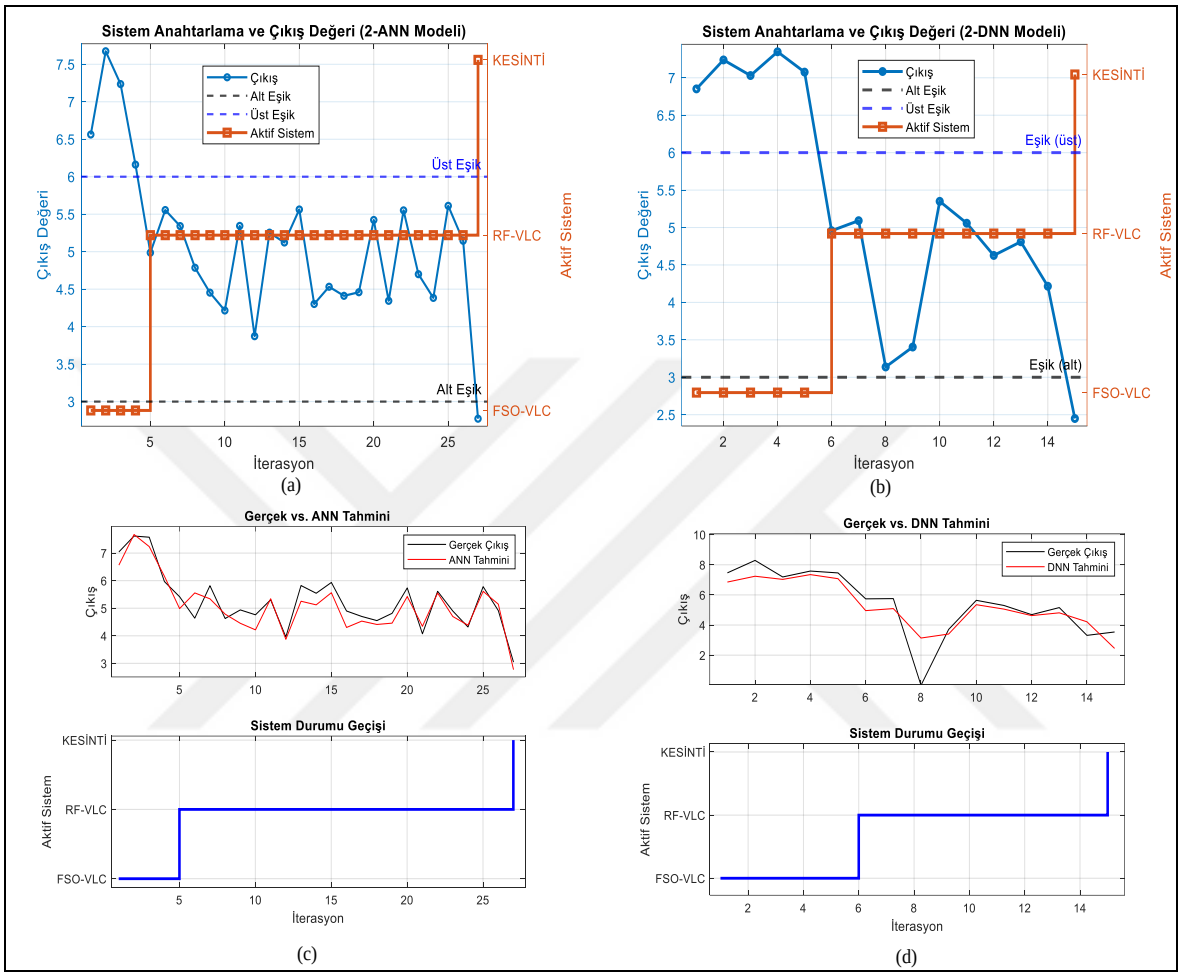
Çizelge 6.16. Sert anahtarlama süreci işlemleri

Girdi: Active line values (*Q-factor (Q)*)
Çıktı: Switching between FSO-VLC and RF-VLC or outage
1: Initialization: Update the optical simulation database
2: Get optical outputs and determine threshold values ($Q_{th\text{-}RV}$, $Q_{th\text{-}FV}$)
3: if Q ≥ $Q_{th\text{-}FV}$
Active line: FSO-VLC
Return 3
4: else if Q ≥ $Q_{th\text{-}RV}$
Active line: RF-VLC
Return 3
5: else Outage
Return 3

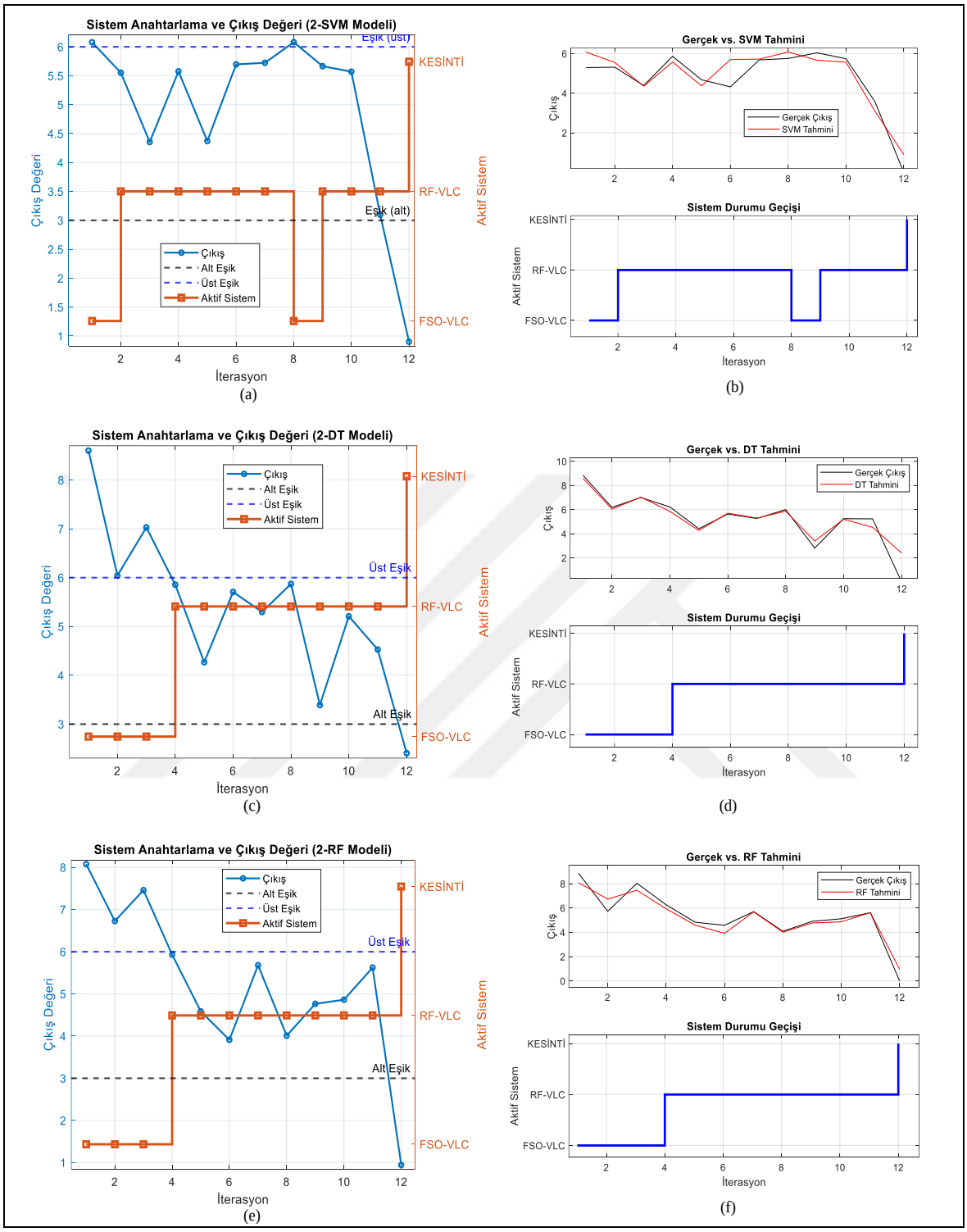
Ayrıca yukarıda bahsedildiği gibi model üzerinden yapılan tahminlere göre anahtarlama işlemi de ML modeli ile gerçekleştirilmektedir. ANN ve DNN modeli ile Şekil 6.64(b)'de yer alan akış diyagramına ve aşağıdaki Çizelge 6.16'daki algoritmada yer alan işlem adımlarına göre yapılan anahtarlama işlemi için geçiş grafiği Şekil 6.68'de; SVM, DT ve RF modelleri için grafikler ise Şekil 6.69'da görülmektedir. Aynı şekilde, ML modellerin tahmin ve anahtarlama geçişi işlem adımlarını gösteren Matlab ekran görüntüleri ANN ve DNN için Şekil 6.70'te, SVM, DT ve RF için ise 6.71'de yer almaktadır.

Şekil 6.68 ve Şekil 6.69'da belirlenen düşük ve yüksek Q-faktör eşik değerlerine (Q_{th}) göre anahtarlama sisteminin geçiş algoritmasına uygun şekilde FSO-VLC ve RF-VLC arasında geçiş sağladığı ve belirlenen eşik değerlerin altında kalan değer aralıklarında da sistemin

kesintiye uğradığı görülmektedir. Şekil 6.70 ve Şekil 6.71'de ise uygulanan algoritma ile ML tahmin modellerinden elde edilen çıktılar ve yapılan işlemler adımlar halinde görülmektedir.



Şekil 6.68. ML modelleri anahtarlama geçişi ve tahmin grafikleri a) ve c) ANN b) ve d) DNN



Şekil 6.69. ML modelleri anahtarlama geçişi ve tahmin grafikleri a) ve b) SVM c) ve d) DT e) ve f) RF

```
>> ANN_Switching

=== İterasyonlar Başladı (2 ANN Modeli) ===

Alt Eşik Değer: 3.0000
Üst Eşik Değer: 6.0000
Iter     Gerçek      Tahmin      Sistem
----     --------    --------    -------
1    7.0424  6.5631  1
2    7.6186  7.6738  1
3    7.5763  7.2359  1
4    5.9674  6.1614  1
Geçiş: FSO-VLC → RF-VLC
5    5.4171  4.9865  2
6    4.6393  5.5555  2
7    5.8171  5.3414  2
8    4.6264  4.7857  2
9    4.9382  4.4535  2
10   4.7611  4.2154  2
11   5.3061  5.3439  2
12   3.9574  3.8725  2
13   5.8230  5.2538  2
14   5.5433  5.1225  2
15   5.9344  5.5629  2
16   4.8993  4.3021  2
17   4.7014  4.5323  2
18   4.5514  4.4112  2
19   4.8151  4.4589  2
20   5.7364  5.4229  2
21   4.0719  4.3447  2
22   5.6138  5.5511  2
23   4.8981  4.6997  2
24   4.3192  4.3837  2
25   5.7818  5.6117  2
26   4.9126  5.1458  2
Çıkış çok düşük! Sistem kapatıldı.
27   3.0448  2.7718  3
```

```
>> DNN_Switching

=== İterasyonlar Başladı (2 DNN Modeli) ===

Alt Eşik Değer: 3.0000
Üst Eşik Değer: 6.0000
Iter     Gerçek      Tahmin      Sistem
----     --------    --------    -------
1    7.4626  6.8515  1
2    8.2887  7.2383  1
3    7.1903  7.0299  1
4    7.5825  7.3471  1
5    7.4590  7.0756  1
Geçiş: FSO-VLC → RF-VLC
6    5.7377  4.9571  2
7    5.7535  5.0914  2
8    0.0000  3.1376  2
9    3.7095  3.4036  2
10   5.6402  5.3500  2
11   5.2984  5.0573  2
12   4.6892  4.6272  2
13   5.1583  4.8097  2
14   3.3144  4.2157  2
Çıkış çok düşük! Sistem kapatıldı.
15   3.5393  2.4490  3
```

Şekil 6.70. ML modellerinin tahmin ve anahtarlama geçişi işlem adımları (ANN ve DNN)

```
>> SVM_Switching

=== İterasyonlar Başladı (2 SVM Modeli) ===

Alt Eşik Değer: 3.0000
Üst Eşik Değer: 6.0000
Iter     Gerçek      Tahmin      Sistem
----     --------    --------    -------
1    5.2939  6.0783  1
Geçiş: FSO-VLC → RF-VLC
2    5.3122  5.5516  2
3    4.3875  4.3541  2
4    5.8638  5.5758  2
5    4.6795  4.3712  2
6    4.3196  5.6962  2
7    5.6826  5.7238  2
Geçiş: RF-VLC → FSO-VLC
8    5.7545  6.0803  1
Geçiş: FSO-VLC → RF-VLC
9    6.0388  5.6657  2
10   5.7455  5.5700  2
11   3.5807  3.0986  2
Çıkış çok düşük! Sistem kapatıldı.
12   0.0000  0.9016  3
```

```
>> DT_Switching

=== İterasyonlar Başladı (2 DT Modeli) ===

Alt Eşik Değer: 3.0000
Üst Eşik Değer: 6.0000
Iter     Gerçek      Tahmin      Sistem
----     --------    --------    -------
1    8.8493  8.6026  1
2    6.1817  6.0431  1
3    7.0034  7.0298  1
Geçiş: FSO-VLC → RF-VLC
4    6.2243  5.8566  2
5    4.4143  4.2674  2
6    5.6329  5.7077  2
7    5.2631  5.2968  2
8    6.0005  5.8716  2
9    2.8126  3.3925  2
10   5.2482  5.2087  2
11   5.2325  4.5283  2
Çıkış çok düşük! Sistem kapatıldı.
12   0.0000  2.4043  3
```

```
RF_Switching

=== İterasyonlar Başladı (2 RFModeli) ===

Alt Eşik Değer: 3.0000
Üst Eşik Değer: 6.0000
Iter     Gerçek      Tahmin      Sistem
----     --------    --------    -------
1    8.8493  8.0759  1
2    5.7286  6.7267  1
3    8.0305  7.4593  1
Geçiş: FSO-VLC → RF-VLC
4    6.2609  5.9312  2
5    4.8261  4.5856  2
6    4.5722  3.9108  2
7    5.7041  5.6801  2
8    4.0781  4.0094  2
9    4.8981  4.7642  2
10   5.1108  4.8621  2
11   5.6138  5.6228  2
Çıkış çok düşük! Sistem kapatıldı.
12   0.0000  0.9446  3
```

Şekil 6.71. ML modellerinin tahmin ve anahtarlama geçişi işlem adımları (SVM, DT ve RF)

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yeni nesil 5G ve 5G ötesi mobil haberleşme sistemleri için öngörülen gereksinimler ile bu sistemlerin sorunsuz bir şekilde çalışması için gerekli kablosuz optik alt yapı bileşenleri hakkında araştırma yapılarak aynı zamanda, bu altyapı bileşenlerinin daha verimli bir iletim için oluşturduğu hibrit sistemler ve bu sistemlerin performans analizi çalışmaları yapılmış ve aynı zamanda optik kablosuz haberleşme sistemlerinde yapay zeka yöntemlerine ait farklı modellerinin Matlab ve Python programları kullanılarak sistemlerin modellenmesi, performans izlemesi, analizi ve optimizasyonu çalışmaları aşamasında kullanımı ile ilgili literatürde çalışması bulunmayan veya az sayıda bulunan konularda farklı ve yeni modellemeler önerilmiştir. Bu tasarımların simülasyonundan elde edilen verilerden oluşan giriş parametreleri ile birlikte ML modellerinin eğitilmesi ve tutarlı tahminler elde edilmesi sağlanmıştır.

Kablosuz hibrit sistem modelleri olarak; RoFSO, RoFSO-VLC, FSO-VLC, RF/FSO-VLC gibi farklı hibrit kablosuz sistemlerin analiz çalışmaları yapılmıştır. Hibrit sistem yaklaşımında, optik sistemlerin farklı parametreleri için Optisystem yazılımı kullanılarak farklı tasarımlar geliştirilmiş ve optik performansları incelenmiştir. Yapılan optik sistem performans analizlerinde sistemin verimini olumsuz etkileyen FSO atmosferik zayıflama etkisi, kablosuz hatların bağlantı mesafeleri, modülasyon dereceleri gibi parametrelerin artışı ile birlikte bütün sistemlerde performans göstergelerinin düştüğü görülmüştür. Hibrit sistem yapılarının optik simülasyonlarında zayıflama ve farklı sistem dinamiklerinin etkisi daha fazla görüldüğünden, her sistemin performans göstergeleri kendi parametrelerine göre değerlendirilmiştir.

RoFSO hibrit sisteminin QAM ve PSK modülasyonlarının farklı dereceleri için yapılan karşılaştırmasında, her iki modülasyon yöntemi için de modülasyon seviyesinin artması verimi düşürmüş, aynı zamanda PSK modülasyon yöntemleri QAM yöntemlerine göre daha verimli olmuştur (Bkz. Çizelge 6.3 ve 6.4). Ayrıca bu hibrit sistemin farklı ML yöntemleriyle tahmin modelleri oluşturulmuş ve performansları karşılaştırılmıştır. Python kullanılarak beş farklı ML algoritması ile yapılan tahmin çalışması sonucunda %74,9 ile %93,2 arasında değişen tahmin doğruluklarına sahip modeller geliştirilmiştir. Ortalama

tahmin performansı %84,5 olarak bulunurken, RF modeli %93,2 ile en tutarlı tahmin doğruluğuna ulaşmıştır.

RoFSO-VLC hibrit sistem modellemesinde, optik performans değerlendirmesi ile birlikte Python ve Matlab programlarında farklı ML modellerinin de karşılaştırması yapılmıştır (Bkz. Çizelge 6.6). Farklı programlar üzerinden oluşturulan makine öğrenmesi regresyon modelleri ile yapılan tahminlerin sonuçları incelendiğinde en tutarlı tahmin oranlarının ANN modelleri ile elde edildiği, karar ağacı ve rastgele orman modellerinin de %90'ın üzerinde bir tahmin skoru sağladığı görülmektedir. 10 farklı ML algoritması ve modeli ile yapılan tahmin çalışmalarının %60'ında %90 ve üzerinde tahmin yapabilen modeller elde edilmiş, en iyi tahmin performansı ise ANN modeli (%98) tarafından sağlanmıştır. FSO sistemlerinin ML yöntemleri ile tahmin modellemesi üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte, hibrit RoFSO-VLC sistemi ve ML yöntemlerinin kullanımı literatür için yeni bir çalışma alanıdır ve bilindiği kadarıyla literatürde hibrit RoFSO-VLC sisteminin performans analizi için ML tahmin modellerini kullanan bir çalışma bulunmamaktadır.

FSO-VLC hibrit sistem tasarımı Matlab ve Optisystem programlarının birlikte kullanımı temelinde yapılmış olup, sistemin çıktısı olarak elde edilen veriyle birlikte Matlab ortamında ML yöntemlerinin eğitildiği yeni bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model, sistemin aktif olarak takip edilmesi ve istenilen çıktı değerine göre girdi parametresinin optimize edilmesini sağlamaktadır.

Oluşturulan ML modelleriyle elde edilen performansların iyileştirilmiş şekilde yüksek olduğu (ANN %99,2 (R^2=0,992); SVM %98,5 (R^2=0,985); DT %97,4 (R^2=0,974); RF %95,9 (R^2=0,959)) görülmektedir. Dolayısıyla, ML modelleri kullanılarak yapılan simülasyon tahminleri, optik simülasyon ortamındaki gerçek verilerle oldukça tutarlıdır. Aynı zamanda FSO-VLC hibrit sistemi için yapılan ML model tasarımı ile test verileri kullanılarak yapılan tahminde Q-faktörü değerinde %38 ve SNR değerinde ise %27 performans artışı ve sistemin genel kalitesinde %2,79'luk bir optimizasyon sağlanmıştır (Bkz. Çizelge 6.12). Bu açıdan ML modellerinin aktif olarak eğitilmesi ve ML modelleri ile farklı veri girişleri için sistemin çıkış tepkisinin analiz edilmesi ile iletim kalitesinin artırılması ve verimli bir sistem oluşturulması mümkün olacaktır. Aynı şekilde, istenen çıkış değerine en yakın giriş değerlerinin tahmin ve optimize edilmesi, sistemin herhangi bir kesinti veya kalitesiz bir iletim ortamı yaşamasını engelleyecektir. Önerilen makine

öğrenmesi tabanlı yapay zeka modeli, sistemin yapısını ve değişkenlerini tanımlayabilmekte ve daha verimli bir sistem yapısı oluşturmada etkili olmaktadır.

Diğer taraftan, tez kapsamında önerilen ve belirli sayıdaki veri örneği ile modellenerek aktif öğrenme ve takip işlemi yapılarak sonuç elde edilen ML modeli, optisystem-matlab birlikte çalışma yapısı ile optik sistem girdi/çıktı ilişkisini aktif şekilde takip ederek dinamik bir iyileştirme yapısı için de uygulanabilmektedir. Bu sayede veri seti boyutu yüksek ve sürekli güncellenen bir yapıya sahip olacaktır.

Optisystem ile oluşturulan RF/FSO-VLC hibrit sisteminin parametrelerinin belirlenmesi, sistemin uçtan uca performans takibinin yapılması ve eğitilen ML modelleri yardımıyla sert anahtarlama işlemi yapılarak sistemler arası geçişin sağlanması Matlab programı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında bulunan hibrit sistemler için literatürde çalışması yapılmamış bulunan alanlar değerlendirilmiştir.

Sistemin RF-VLC ve FSO-VLC olarak uçtan uca performansının analizi için kanal sönümlenmesi, lazer gücü, link mesafeleri, işaretleme hatası ve atmosferik zayıflama gibi giriş parametreleri kullanılarak BER, Q-faktör ve SNR değerleri analiz edilmiştir. Sistemin performans izlemesi ve hibrit sistemler arası sert anahtarlama işlemi için makine öğrenmesi yöntemleri (ANN, DNN, SVM, DT, RF) ile oluşturulan modeller ve simülasyon verileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; kesinti olasılığı analizinde, RF-VLC ve FSO-VLC linklerinin tekli RF, FSO ve VLC linklerine göre daha verimli olduğu, FSO-VLC hibrit hattının performansının ise RF-VLC'ye göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 6.54 ve 6.56). Diğer taraftan, optik sistem performans analizi ile sert anahtarlama işlemini de sağlayan ML modelleri %95,64 ile %98,75 arasındaki oranlarda tahmin ve anahtarlama performansı göstermiştir.

Sonuç olarak, OWC sisteminin bant genişliğinin (~670 THz) RF spektrumundan (~60 GHz) 10 000 kat daha büyük olmasından dolayı OWC teknolojileri olarak özellikle FSO ve VLC sistemlerinin RF ile entegre olarak gelecek nesil optik haberleşme altyapısı için önemli bir bileşen olacaktır. Aynı zamanda, farklı radyo-optik yapıların hibrit olarak kullanılmasının 5G ve sonrasındaki yeni nesil haberleşme sistemlerinin heterojen ve dinamik yapısına uygun olacağı öngörülmektedir.

Optik şebekeler, gelecek nesil haberleşme sistemlerinin dinamik ve heterojen yapısına uygun olarak, son kullanıcıların farklı taleplerini karşılamak amacıyla, farklı modülasyon formatları ve bit oranları ile çeşitli sinyalleri iletme yeteneğine sahip olacaktır. Hibrit THz/ FSO sistemlerinin, hibrit elektronik-fotonik alıcı-vericiler kullanılarak 6G'de gerçekleştirilmesi beklenmektedir.

5G ve sonrası optik haberleşme sistemlerinde farklı altyapıların hibrit/birleşik bir şekilde kullanımı öngörülmekle birlikte bu entegrasyonu oluşturan sistemlerin karmaşık performans izleme ve iyileştirme yöntemleri yerine en uygun ve hızlı olacak şekilde farklı yapay zekâ yöntemleri veya diğer benzer yöntemler kullanılarak izlenmesinin ve iyileştirilmesinin gelecek nesil optik haberleşme altyapılarının tasarımında önemli bir yer tutacağı anlaşılmaktadır.

Dolayısıyla, haberleşme şebekelerinde elde edilen, ağ trafiği, alarmlar, sinyal kalitesi göstergeleri, kullanıcıların davranış verileri vb. verilerden oluşan çok büyük miktarlardaki heterojen verinin anlamlı bilgiler çıkarmak ve şebeke tarafından oluşturulan verilerden şebekenin düzgün işleyişine ilişkin kararlar almak için gelişmiş, pratik ve düşük maliyetli çözümler üretilmesi gerekmektedir.

Özellikle gelecekteki cihazların ve hizmetlerin dinamik yeniden yapılandırılabilirlik taleplerini karşılayabilecek kendi kendini devam ettiren ve uyarlanabilir ağlar oluşturmak amacıyla, yapay zekâ yöntemlerinin (makine öğrenmesi, derin öğrenme, yapay sinir ağları gibi) haberleşme alanında kullanılması hızlı bir yoğunluk kazanmaktadır

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, hibrit bir şema kullanıldığında sistemin genel performansında önemli bir artışı elde edilebileceği görülmektedir. Dolayısıyla IoT, 5G ve 6G gibi gelişmekte olan teknolojilerle entegre çalışma, kullanıcı hareketliliğinin artması ve ağ kapasitesinin optimum seviyede kullanılması gibi konular açısından önemli bir araştırma alanı olan hibrit sistemlerin, verimli bir akıllı iletişim ortamının teşvik edilmesinde önemli bir iletişim stratejisi olabileceği görülmektedir.

Diğer taraftan, hibrit sistem yapılarında hem FSO hem de VLC bağlantı kısıtlamalarını dikkate alarak FSO-VLC hibrit ağları geliştirmek için performans izleme, analiz ve optimizasyon aşamalarında etkili tekniklerin ele alınması gerektiği açıktır.

KAYNAKLAR

1. Abuella, H., Elamassie, M., Uysal, M., Xu, Z., Serpedin, E., Qaraqe, K.A., and Ekin, S. (2021). Hybrid RF/VLC Systems: A Comprehensive Survey on Network Topologies, Performance Analyses, Applications, and Future Directions. *IEEE Access*, 9, 160402-160436.

2. Kishore, G. S., and Rallapalli, H. (2019). *Performance Assessment of M-ary ASK, FSK, PSK, QAM and FQAM in AWGN Channel*. 2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, India, 0273-0277.

3. Shakthi Murugan, K. H., Sudharsanam, V., Padmavathi, B., Simon, J., Jacintha, V., and Sumathi, K. (2020). *BER analysis of 40 Gbps Ro-FSO Communication System for 5 G applications under Fog Weather Conditions*. 2020 IEEE 7th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), Prayagraj, India, 1-6.

4. Yücel M., Açıkgöz M. (2023). Optical Communication Infrastructure in New Generation Mobile Networks. *Fiber and Integrated Optics*, 42(2), 53-92.

5. ITU. (2015). IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030, M Series, Report ITU-R M.2370-0. Online available, URL: *https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf*, Son Erişim Tarihi: 11.05.2025.

6. Deepika, G., Anushkannan, Nk, Palanivel, M., Dhondiya, S.A., Sundar, S., and Ramesh, S. (2023). *Performance Analysis of Photonics in Wireless Applications*. 2023 7th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 1-5.

7. Zhang, L., Li, X., Tang, Y., Xin, J. and Huang, S. (2022). A survey on QoT prediction using machine learning in optical networks. *Optical Fiber Technology*, 68(1), 102804.

8. de Souza Lopes, C. H., Andrade, T. P. V., Pereira, L. A. M., Bogoni, A., Conforti, E., and Sodré, A. C. (2023). Implementation of a Hybrid FiWi System Using FSO, VLC and mm-Waves Toward 6G Applications. *IEEE Photonics Technology Letters* 35(24), 1403-1406.

9. Ab Aziz, S. H., Nor, N. A. B. M., and Abidin, M. S. B. Z. (2022). Performance Analysis of a Hybrid Free Space Optics/ Visible Light Communication Systems. *Asian Journal of Electrical and Electronic Engineering (AJoEEE)*, 2(2), 21–27.

10. Pesek, P., Zvánovec, S., Chvojka, P., Ghassemlooy Z., and Haigh. P. A. (2019). Demonstration of a Hybrid FSO/VLC Link for the Last Mile and Last Meter Networks. *IEEE Photonics Journal*, 11(1), 1-7.

11. Devi, P. P., Vincent, and Simatupang, J. W. (2021). *Machine Learning-based Modulation Format Identification and Optical Performance Monitoring Techniques Implementation*. 2021 Advanced Communication Technologies and Signal Processing (ACTS), Rourkela, India, 1-6.

12. Putra, A. D. S., Samijayani, O. N., Astharini, D., and Syahriar, A. (2022). *Simulation of Visible Light Communication and Free Space Optic For IoT Using Optisystem*. 2022 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Bandung, Indonesia, 1-5.

13. Deka, R., and Anees, S. (2020). *Performance Analysis of DF Based Cascaded VLC-FSO-VLC System*. 2020 3rd International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), Marrakech, Morocco, 1-6.

14. Rani, G. R., Kaur, G., Gautam, S., Lakshmanan, M., and Kumar, S. (2023). *Performance Analysis of Dual-HopaMixed RF/FSO Systemaover Nakagami-m/Fisher Snedecor Fading Channels*. 2023 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Communication (AISC), Greater Noida, India, 108-112.

15. Petkovic, M., Cvetkovic A., and Narandzic, M. (2018). *Outage Probability Analysis of RF/FSO-VLC Communication Relaying System*. 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Budapest, Hungary, 1-5.

16. Vishal, S., Dipti, P. (2023). *Security Analysis of A Mixed RF-FSO-VLC Triple Hop Cooperative Network*. 2023 9th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), Uttar Pradesh, India, 145-149.

17. Mondal, S., Bhowal, A., Kashyap, S., Singh Kshetrimayum, R. and Patra, M. (2023). *Outage probability analysis of hard-switching based mixed FSO/IRS-aided RF communication*. 2023 National Conference on Communications (NCC), Guwahati, India, 1-6.

18. Xu, Z., Xu, G., and Zheng, Z. (2021). BER and Channel Capacity Performance of an FSO Communication System over Atmospheric Turbulence with Different Types of Noise. *Sensors*, 21(10), 3454.

19. Tang, Q., Li, K., and Liu, X. (2020). *Performance Analysis on Full-duplex Hybrid ROF-VLC System Based on SIPM-OFDM*. 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE), Xi'An, China, 66-70.

20. Wu, X., Huang, Z., and Ji, Y. (2020). Deep neural network method for channel estimation in visible light communication. *Optics Communications*, 462, 125272.

21. Alnajjar, S. H., Khalil Abrahem, W. (2022). *Light Fidelity system performance in data transmission through the effect of Free-Space Optical Communication*. 2022 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), Palapye, Botswana, 01-05.

22. Alnajjar, S. H., Abrahem, W. K. (2022). *Performance of Data transmission utilizing Light Fidelity System through a Hybrid System under different Weather Conditions*. 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, 1546-1551.

23. Shikha, Z. A., Deb Nath, S. K., Sikder, N., Sohn, I-B., Choi, H-K., and Ahsan, M. S. (2021). *Demonstration of a 4 Gb/s Wavelength Division Multiplexing Based Li-Fi Network*. 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT), Khulna, Bangladesh, 1-4.

24. Esmail, M. A. (2021). Optical Wireless Performance Monitoring Using Asynchronous Amplitude Histograms. *IEEE Photonics Journal*, 13(3), 1-9.

25. Alvarez, L. B., Montejo-Sánchez, S., Rodríguez-López, L., and Azurdia-Meza, C., Saavedra, G. (2023). A Review of Hybrid VLC/RF Networks: Features, Applications, and Future Directions., *Sensors*, 23(17):7545.

26. Alenezi, A. M. and Hamdi, K. A. (2020). *Reinforcement Learning Approach for Hybrid WiFi-VLC Networks*. 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, 1-5.

27. Rani, R., Tiwari, A., Singh, A., Singh, A., and Lakshmanan, M. (2023). *Outage Performance of Hybrid FSO/RF-FSO Communication System with single threshold*. 2023 2nd International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking Technologies (ViTECoN), Vellore, India, 1-5.

28. Kazemi, H., Uysal, M., and Touati, F. (2014). *Outage analysis of hybrid FSO/RF systems based on finite-state Markov chain modeling*. 2014 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications (IWOW), Funchal, Portugal, 11-15.

29. Usman, M., Yang, H.-C. and Alouini, M.-S. (2014). Practical Switching-Based Hybrid FSO/RF Transmission and Its Performance Analysis. *IEEE Photonics Journal*, 6(5), 1-13.

30. Hu, Z., Chen, C., Zhang, Z., and Zhang, H. (2020). Secure Cooperative Transmission for Mixed RF/FSO Spectrum Sharing Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 68(5), 3010-3023.

31. Lapčak, M., Ovseník, L., Oravec J., and Zdravecký, N. (2022). *Design of hard switching for FSO/RF hybrid system based on prediction of RSSI parameter and environmental conditions*. 2022 32nd International Conference Radioelektronika, Kosice, Slovakia, 1-6.

32. Lapčák, M., Ovseník, L., Zdravecký, N., Oravec, J., and Andrejčík, S. (2023). *Deep data analysis methods applied to hard switching in hybrid FSO/RF systems*. 2023 33rd International Conference Radioelektronika, Pardubice, Czech Republic, 1-6.

33. Kiran, K.V., Perinbaraj, S., Pradhan, J., Mallick, P.K., Turuk, A.K., and Das, S.K. (2020). Machine learning aided switching scheme for hybrid FSO/RF transmission. *Intelligent Decision Technologies*, 14(4), 529-536.

34. Shao, J., Liu, Y., Du, X., and Xie, T. (2024). Adaptive Modulation Scheme for Soft-Switching Hybrid FSO/RF Links Based on Machine Learning. *Photonics*, 11(404).

35. Haluška, R., Ovseník, Ľ., and Šuľaj, P. (2020). *Example of Using Algorithms for Switching Hybrid FSO/RF Systems*. 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), Opatija, Croatia, 491-495.

36. Anees, S., and Bhatnagar, M. R. (2015). Performance of an amplify-and-forward dual-hop asymmetric RF–FSO communication system. *Journal of Optical Communications and Networking*, 7(2), 124-135.

37. Torabi, M., and Mohammadi, N. (2019). *Capacity Analysis of an AF Relaying Asymmetric RF-FSO System in a Cognitive Radio Network*. 2019 2nd West Asian Colloquium on Optical Wireless Communications (WACOWC), Tehran, Iran, 162-166.

38. Bakırcı, E. B., Ahrazoğlu, E. S., Altunbaş, İ. and Erdoğan, E. (2024). *Outage Probability Analysis of Triple-Hybrid RF/FSO/THz Communication System*. 2024 32nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mersin, Türkiye, 1-4.

39. Fouda, M. M., Hashima, S., Sakib, S., Fadlullah, Z. M., Hatano, K., and Shen, X. (2022). Optimal Channel Selection in Hybrid RF/VLC Networks: A Multi-Armed Bandit Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(6), 6853-6858.

40. Hammouda, M., Akın, S., Vegni, A. M., Haas H., and Peissig, J. (2018). Link Selection in Hybrid RF/VLC Systems Under Statistical Queueing Constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(4), 2738-2754.

41. Shao, S. (2018). *Design, Analysis and Optimization of Visible Light Communications Based Indoor Access Systems for Mobile and Internet of Things Applications*. Doctoral Thesis, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ.

42. Abdalla, I. (2021). *Coexistence of Directional and Non-Directional Technologies in 6G Wireless Dense Networks*. Doctoral Thesis, Boston University.

43. Miranda, R. F., Barriquello, C. H., Rguera, V. A., Denardin, G. W., Thomas, D. E., Loose, F., and Amaral, L. S. (2023). A Review of Cognitive Hybrid Radio Frequency/Visible Light Communication Systems for Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 23, 7815.

44. Perera, T. D., Rajaram, A., Chedup, S., Jayakody, D. N., and Chen, B. (2018). Hybrid RF/visible light communication in downlink wireless system. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7, 272-276.

45. Bag, B., Das, A., Ansari, I. S., Prokes, A., Bose, C., and Chandra, A. (2018). Performance Analysis of Hybrid FSO Systems Using FSO/RF-FSO Link Adaptation. *IEEE Photonics Journal*, 10(3), 1-17.

46. Bag, B., Das, A., Bose C., and Chandra, A. (2019). *Hybrid FSO/RF-FSO Systems over Generalized Málaga Distributed Channels with Pointing Errors*. 2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), A Coruna, Spain, 1-5.

47. Deka, R., Verma, A., and Anees, S. (2019). *Performance Analysis of Decode-and-Forward based Hybrid RF/FSO-VLC system*. 2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Goa, India, 1-5.

48. Wang, H., Zhang, Z., Zhu, B., Dang, J., and Wu, L. (2023). Optical Intelligent Reflecting Surface for Cascaded FSO-VLC Communication System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 72(10), 13740-13745.

49. Gupta, A., Sharma, N., Garg, P., and Alouini, M.-S. (2017). Cascaded FSO-VLC Communication System. *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(6), 810-813

50. Lee, I. E., Chung, G. C., Pang, W., Anas, S. S., and Cheong, M. Y. (2020). Design of a hybrid free space optical and visible light communication system for indoor wireless data broadcasting. *Journal of Physics: Conference Series*, 1432 (2020) 012065.

51. El-Garhy, S., Khalaf, A. A. M., Aly, M. H., and Abaza, M. (2022). Intelligent transportation: a hybrid FSO/VLC-assisted relay system. *Opto-Electronics Review,* 30 (2022) e144260.

52. Saxena, V. N., Gupta, J., Dwivedi, V. K. (2023). Secured End-to-End FSO-VLC-Based IoT Network With Randomly Positioned VLC: Known and Unknown CSI. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(2), 1347-1357.

53. Gunasekar, A., Kumar, L. B., Krishnan, P., Natarajan, R., and Jayakody, D. N. K. (2023). All-Optical UAV-Based Triple-Hop FSO-FSO-VLC Cooperative System for High-Speed Broadband Internet Access in High-Speed Trains. *IEEE Access*, 11, 124228-124239.

54. Bozanis, D., Evenidis, N. G., Papanikolaou, V. K., Dowhuszko, A. A., Tegos, S. A., and Diamantoulaki, P. D. (2024). Proactive Resource Allocation for Aggregated VLC/RF Networks With Outdated CSI. *IEEE Wireless Communications Letters*, 13(4), 944-948.

55. Kumar, A., Sharan, N., Ghorai, S. (2023). *Experimental Demonstration of Hybrid PLC-VLC System*. 2023 IEEE International Conference on Contemporary Computing and Communications (InC4), Bangalore, India, 1-5.

56. Alenezi, A. M., Hamdi, K. A. (2024). Federated Reinforcement Learning With Knowledge Transfer for Network Selection in Hybrid WiFi-VLC Networks. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 5(6), 2921-2932.

57. Yao, S., Hsu, C-W, Kong, L., Zhou, Q., Shen, S., Zhang, R., Su, S-J., Alfadhli, Y., and Chang, G-K. (2021). Data Efficient Estimation for Quality of Transmission Through Active Learning in Fiber-Wireless Integrated Network. *Journal of Lightwave Technology*, 39(18), 5691-5698.

58. Rahman, M. T., Parthiban, R., Bakaul, M. (2023). A novel hybrid radio over fiber VLC system combining 5G mmWave and coarse wavelength division multiplex grid. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 32(3), 1451-1461.

59. Mohsan, S. A. H., Asghar Khan, M., Amjad, H. (2023). Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges. *Optical Switching and Networking*, 47, 100697.

60. Chowdhury, M. Z., Hasan, M. K., Shahjalal, M., Hossan, M. T., and Jang, Y. M. (2020). Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(2), 930-966.

61. Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., Kusume, K., Marsch, P., Matenia, M., Queseth, O, Schellmann, M., Schotten, H., Taoka, H., Tullberg, H., Uusitalo, M.A, Timus, B., and Fallgren, M. (2014). Scenarios of 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project. *IEEE Communication Magazine*, 52(5), 26–35.

62. Kanesan, T. (2013). *The Experimental Design of Radio-over-Fibre System for 4G Long Term Evolution*. Doctor of Philosophy Thesis, University of Northumbria at Newcastle, 2-6, 24-47.

63. Karthik, V., Sandyarani, B., and Radhakrishna, K. (2021). A Survey on Future Generation Wireless Communications-6G: Requirements, Technologies, Challenges and Applications. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 10(5), 3067-3076.

64. Saif, W. S., Esmail, M. A., Ragheb, A. M., Alshawi, T. A., and Alshebeili, S. A. (2020). Machine Learning Techniques for Optical Performance Monitoring and Modulation Format Identification: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2839-2882.

65. Huang, T., Yang, W., Wu, J., Ma, J., Zhang, X., and Zhang, D. (2019). A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies. *IEEE Access*, 7, 175758-175768.

66. David, K., and Berndt, H. (2018). 6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G?. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 13(3), 72-80.

67. Albreem, M. A. M. (2015). *5G wireless communication systems: Vision and challenges*. 2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT), Kuching, Malaysia, 493-497.

68. Gupta, A., and Jha, R. K. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *IEEE Access*, 3, 1206-1232.

69. Vaigandla, K. K., and Venu, N. (2021). A Survey on Future Generation Wireless Communications-5G: Multiple Access Techniques, Physical Layer Security, Beamforming Approach. *Journal of Information and Computational Science*, 11(9), 449-474.

70. Gawas, A. U. (2015). An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication (IJRITCC)*, 3(5), 3130-3133.

71. Osseiran, A., Monserrat, J. F., and Marsc, P. (2016). *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge Univ. Press, ISBN: 9781107130098.

72. Parikh, J., and Basu, A. (2011). LTE advanced: The 4G mobile broadband technology. *International Journal of Computer Applications*, 13(5), 17-21.

73. Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., and Zorzi, M. (2020). Toward 6G networks: Use cases and Technologies. *IEEE Commununications Magazine*, 58(3), 55-61.

74. Dang, S., Amin, O., Shihada, B., and Alouini, M.-S. (2020). What should 6G be?. *Nature Electronics*, 3(1), 20-29.

75. Romero, J. P., Sallent, O., Ferrús, R., and Agustí, R. (2015). *Artificial Intelligence-based 5G network capacity planning and operation*. 2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Brussels, Belgium, 246-250.

76. Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M., and Chandramouli, D. (2019). 5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15. *IEEE Access*, 7, 127639-127651.

77. Gohil, A., Modi, H., and Patel, S. K. (2013). *5G technology of mobile communication: A survey*. 2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), Vallabh Vidyanagar, India, 288-292.

78. Jo, M., Maksymyuk, T., Batista, R.L., Maciel, T.F., Almedia, A.L.F., and Klymash, M. (2014). A survey of converging solutions for heterogeneous mobile networks. *IEEE Wireless Communications*, 21(6), 54-62.

79. Dahlman, E., Parkvall, S., Peisa, J., and Tullberg, H. (2019). *5G Evolution and Beyond.* 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Cannes, France, 1-5.

80. Alavi, S. E., Soltanian, M. R. K., Amiri, I. S., Khalily, M., Supa'at, A. S. M., and Ahmad, H. (2016). Towards 5G: A Photonic Based Millimeter Wave Signal Generation for Applying in 5G Access Fronthaul. *Scientific Reports 6*, 19891.

81. Calvanese Strinati, E., Barbarossa, S., Gonzalez-Jimenez, J.L., Ktenas, D., Cassaiau, N., Maret, L., and Dehos, C. (2019). 6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3), 42-50.

82. Liu, X. (2022). Enabling Optical Network Technologies for 5G and Beyond. *Journal of Lightwave Technology*, 40(2), 358-367.

83. Popovski, P. (2019). *Future Internet of Things (IoT) connectivity*. IEEE Future Networks Tutorials at 6G summit, Levi, Finland.

84. You, X., Wang, C.-X., Huang, J., Gao, X., Zhang, Z., Wang, M.M., Huang, Y., Zhang, C., Jiang, Y., Wang, J., Zhu, M., Sheng, B., Wang, D., Pan, Z., Zhu, P., Yang, Y., Liu, Z., Ding, Z., Tao, X., Li, S., Chen, Z., Ma, X., Chih-Lin, I., Han, S., Li, K., Pan, C., Zheng, Z., Hanzo, L., Shen, X., Guo, Y.J., Ding, Z., Haas, H., Tong, W., Zhu, P., Yang, G., Wang, J., Larsson, E.G., Ngo, H.Q., Hong, W., Wang, H., Hou, D., Chen, J., Chen, Z., Hao, Z.-C., Li, G., Tafazolli, R., Gao, Y., Poor, H.V., Fettweis, G.P., and Liang, Y-C. (2021). Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Science China Information Sciences 64*, 110301.

85. Han, R., Bai, L., Wen, Y., Liu, J., Choi, J., and Zhang, W. (2021). UAV-Aided Backscatter Communications: Performance Analysis and Trajectory Optimization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(10), 3129-3143.

86. Yang, P., Xiao, Y., Xiao, M., and Li, S. (2019). 6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques. *IEEE Network*, 33(4), 70-75.

87. White Paper, 5G Evolution and 6G, NTT DOCOMO, INC., January 2020. URL: https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_20200124.pdf. Son Erişim Tarihi: 11.05.2025.

88. Letaief, K. B., Chen, W., Shi, Y., Zhang, J., and Zhang, Y.-J. A. (2019). The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, 57(8), 84-90.

89. Yang, H., Alphones, A., Xiong, Z., Niyato, D., Zhao, J., and Wu, K. (2020). Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks. *IEEE Network*, 34(6), 272-280.

90. Chow, C. W., Yeh, C. H., and Liu, Y. (2020). *Optical Wireless Communications (OWC) - Technologies and Applications*. 2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Taipei, Taiwan, 1-3.

91. Jenila, C., Jeyachitra, R.K. (2021). Green indoor optical wireless communication systems: Pathway towards pervasive deployment. *Digital Communications and Networks*, 7(3), 410–444.

92. Farag, M. (2017). *Secure visible light communication systems based on the position of the user*. Doctoral thesis, Northumbria University, Newcastle.

93. Li, J. W., You, S. L., Shiu, R. K., Yen, C. Y., and Peng, P. C. (2021). *A Deep Neural Network Equalizer for FSO Transmission System*. 2021 30th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Taipei, Taiwan, 277-278.

94. Singla, A., Rana, K. (2019). Comparison of FSO and OWC Channel for Various Line Coding Techniques. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 9(2), 60-63.

95. Mapunda, G. A., Ramogomana, R., Marata, L., Basutli, B., Khan, A.S., and Chuma, J. M. (2020). Indoor Visible Light Communication: A Tutorial and Survey. *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020(2), 1-46.

96. Jahid, A., Alsharif, M. H., and Hall, T. J. (2022). A contemporary survey on free space optical communication: Potentials, technical challenges, recent advances and research direction. *Journal of Network and Computer Applications*, 200, 103311.

97. Guiomar, F. P., Fernandes, M. A., Nascimento, J. L., Rodrigues, V., and Monteiro, P. P. (2022). Coherent Free-Space Optical Communications: Opportunities and Challenges. *Journal of Lightwave Technology*, 40(10), 3173-3186.

98. Singh, Y., Bharti, M., Kumar, J. (2014). Performance Analysis of Optical Wireless Communication Channel Link at Various Bit Rates. *International Journal of Computer Science & Engineering Technology*, 5(1), 26.

99. Song, T., Nirmalathas, A., Lim, C. (2022). Demonstration of Spatial Modulation Using a Novel Active Transmitter Detection Scheme with Signal Space Diversity in Optical Wireless Communications. *Sensors*, 22: 9014.

100. Shahid, T., Khalid, F., Qamar, F., Shahzad, A., Shahzadi, R., Ali, M., and Qamar N. (2020). *Performance Analysis of WDM Based FSO Communication with Advance Modulation Formats*. 2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC), Bahawalpur, Pakistan, 1-6.

101. Kadhim, S. A., Ali, A. H., Hussain, K. M. A. (2017). Simulation and Comparative Analysis of (SISO over MIMO) FSO Communication Channel. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 6(4), 5743-5751.

102. Saleh, A. S. (2023). Analysis Performance of FSO System Using RZ and NRZ Technique at Various Data Rate and Link Distance. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 11(9), 15-20.

103. Algedir, A.T., Elganimi, Y. (2020). *Machine Learning Models for Predicting the Quality Factor of FSO Systems with Multiple Transceivers*. 2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM), Izmir, Turkey, 308-311.

104. Manea, V., Petre, M., Puşcoci, S., and Stoichescu, D. A. (2016). *The approach of wavelength dense multiplexing using free space optical systems*. 2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 1-6.

105. Mishra, P., Sonali, A. Dixit and V. K. Jain. (2019). *Machine Learning Techniques for Channel Estimation in Free Space Optical Communication Systems*. 2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Goa, India, 1-6.

106. Manea, V., Puscoci, S., and Stoichescu, D. A. (2018). *Considerations on interference between FSO systems*. 2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Iasi, Romania, 1-4.

107. Jiao, J., Sun, X., Fang, L., and Lyu, J. (2021). An overview of wireless communication technology using deep learning. *China Communications*, 18(12), 1-36.

108. Khan, L. U. (2017). Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3(2), 78-88.

109. Ali, M. F., Jayakody, D. N. K., and Li, Y. (2022). Recent Trends in Underwater Visible Light Communication (UVLC) Systems. *IEEE Access*, 10, 22169-22225.

110. Baig, S., Asif, H.M., Umer, T., Mumtaz, S., Shafiq, M., and Choi, J-G. (2018). High Data Rate Discrete Wavelet Transform-Based PLC-VLC Design for 5G Communication Systems. *IEEE Access*, 6, 52490-52499.

111. Aftab, F., Gujjar, A.A., Hafeez, A. (2014). Light fidelity (li-fi): Future of next generation wireless and mobile communication technology. *Asian Journal of Academic Research*, 1(1), 231–239.

112. Ghassemlooy, Z., Popoola, W., and Rajbhandari, S. (2019). *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. (2nd Edition). Boca Raton, FL: CRC Press, 446.

113. Pavan, T. V. S., Jeyachitra, R. K. (2018). *Integration of Visible Light Communication and Fiber Communication System*. 2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 1-6.

114. Chi, N., Zhou, Y., Wei, Y., and Hu, F. (2020). Visible Light Communication in 6G: Advances, Challenges, and Prospects. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(4), 93-102.

115. Haas, H. (2018). LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. *Reviews in Physics*, 3, 26-31.

116. Strinati, E.C., Mueck, M., Clemente, A., Kim, J., Noh, G., Chung, H., Kim, I., Choi, T., Kim, Y., Chung, H.K., Destino, G., Pärssinen, A., Chunerre, N., Vautherin, B., Deleu, T., Gineste, M., Korvala, A. (2018). 5GCHAMPION – Disruptive 5G Technologies for Roll-Out in 2018. *ETRI Journal*, 40(1), 10-25.

117. Vishwaraj and L. Ali. (2019, 20-22 February). *Hybrid MIMO-OFDM System for 5G Network Using VLC-A Review*. 2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Coimbatore, India, 1-5.

118. Rahman, M. T., Bakibillah, A. S. M., Parthiban, R., and Bakaul, M. (2020). Review of advanced techniques for multi-gigabit visible light communication. *IET Optoelectronics*, 14, 359-373.

119. Geng Z., Khan F. N., Guan X., Dong Y. (2022). Advances in Visible Light Communication Technologies and Applications. *Photonics*, 9(12), 893.

120. Yang, L., Li, J. and Zhang, J. (2017). *Hybrid visible light communications (VLC) and PLC system*. 2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), Singapore, 1-2.

121. Shenoda, H. M. H., Abd-Elazez, N. A. R., Abd-El-Qader, H. M., and Hossam, A. (2021). *Performance analysis of Integrating Wireless Sensor Network with Li-Fi Wireless Communication Technology using OptiSystem Simulation Tool*. 2021 9th International Japan-Africa Conference on Electronics, Communications, and Computations (JAC-ECC), Alexandria, Egypt, 99-104.

122. Ghassemlooy, Z., Arnon, S., Uysal, M., Xu, Z., and Cheng, J. (2015). Emerging Optical Wireless Communications-Advances and Challenges. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(9), 1738-1749.

123. Fall, M., Yan G., and Zhong, Z. (2016). *An integrated single mode fiber communication and visible light communication system based on OFDM with Hadamard transform*. 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), Hangzhou, China, 1-3.

124. Verma, C., Selwal, C. (2018). *4QAM OFDM Visible Light Communication using Laser*. 2018 7th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), Noida, India, 618-622.

125. Tsonev, T., Chun, H., Rajbhandari, S., McKendry, J.J.D., Videv, S., Gu, E., Haji, M., Watson, S., Kelly, A.E., Faulkner, G., Dawson, M.D., Haas, H., and O'Brien, D. (2014). A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride μLED. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(7), 637-640.

126. Verma, C., Selwal, C. (2018). *Visible light communication system (VLC) Using Diversity Technique with 4 QAM OFDM FSO Link*. 2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), Palladam, India, 631-635.

127. Ali, F. M., Al-Hilo, E., Tarbul, M. G. (2018). Performance Analysis of Radio over Optical Fiber System with OFDM Using Multiplexing Techniques. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(45), 10831-10844.

128. Na, Z., Wang, Y., Xiong, M., Liu X., and Xia, J. (2018). Modeling and Throughput Analysis of an ADO-OFDM Based Relay-Assisted VLC System for 5G Networks. *IEEE Access*, 6, 17586-17594.

129. Zadobrischi, E. (2022). Analysis and Experiment of Wireless Optical Communications in Applications Dedicated to Mobile Devices with Applicability in the Field of Road and Pedestrian Safety. *Sensors*, 22(3), 1023.

130. Salvi, S., Vasantha, G. (2022). An Optical Camera Communication Using Novel Hybrid Frequency Shift and Pulse Width Modulation Technique for Li-Fi. *Computation*, 10, 110.

131. Xu, T., Song, S., Yang, Y., Xiao, S., Liu, Y., and Guo, L. (2021). *Intelligent Relay Selection with Predicted Link States for Relay-Assisted Free Space Optical Network*. 2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), Xi'an, China, 225-229.

132. Noor, S. (2019). *Digital Processing for an Analogue Subcarrier Multiplexed Mobile Fronthaul*. Doctor of Philosophy (PhD) thesis, University of Kent.

133. Gao, Z., Eisen, M., and Ribeiro, A. (2019). *Optimal WDM Power Allocation via Deep Learning for Radio on Free Space Optics Systems*. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Waikoloa, HI, USA, 1-6.

134. Hongbo, L. (2020). *Elastic RF-Optical Networking: A Photonic-aided Radio Access Networking Architecture for mmW Communication Systems*. Doctor of Philosophy (PhD) thesis, University of California.

135. Khalil, H., Qamar, F., Shahzadi, R., Shahzad, A., Ali, M., Qamar, N., and Al-Otaibi, S. (2021). Performance Analysis of Modulation Formats for Next Generation RoF Systems. *IEEE Access*, 9, 139393-139402.

136. Singh, B., Singh, D. (2016). A review on advantages and applications of radio over fiber systems. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 6(3), 1042-1044.

137. Hamidnejad, E., Gholami, A., Zvanovec, S., and Ghassemlooy, Z. (2020). *Investigation of a WDM M-QAM RoF-RoFSO System*. 2020 3rd West Asian Symposium on Optical and Millimeter-wave Wireless Communication (WASOWC), Tehran, Iran, 1-5.

138. Pereira, L. A. M., Lima, E. S., and A. Cerqueira S. (2021). *A Multi-band 5G-NR Fiber-wireless System for Next-generation Networks*. 2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Fortaleza, Brazil, 1-3.

139. Abed, N. H., Al-Dujaili, M.J., and Abbas, S.A. (2022). Proposed an efficient multilevel dynamic bandwidth allocation (M-DBA) scheme for FiWi networks. *Optical and Quantum Electronic*s, 54(10), 615.

140. Gong, J. (2022). Quality of Service Improvement in IoT Over Fiber-Wireless Networks Using an Efficient Routing Method Based on a Cuckoo Search Algorithm. *Wireless Personal Communications,* 126(3), 2321–2346.

141. Kao, H. Y., Ishimura, S., Tanaka, K., Nishimura, K., and Inohara, R. (2021). End-to-End Demonstration of Fiber-Wireless Fronthaul Networks Using a Hybrid Multi-IF-Over-Fiber and Radio-Over-Fiber System. *IEEE Photonics Journal*, 13(4), 1-6.

142. Popko, B., Beach, L. J., and Ingold, K. A. (2022). *A Radio-Over-Fiber System for Wireless Packet Radio Network Backhaul.* Southeast Con2022, Mobile, AL, USA, 31-34.

143. Al-Zubaidi, F. M. A., López Cardona, J. D., Montero, D. S., and Vázquez, C. (2021). Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT. *Journal of Lightwave Technology*, 39(13), 4262-4269.

144. Hori, S., Kase, Y., Oshima, N., and Kunihiro, K. (2021). *Radio-over-Fiber Systems with 1-bit Digital Modulation for 5G/6G Indoor Wireless Communication*. 2021 IEEE VTS 17th Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), Osaka, Japan, 1-5.

145. Souza, L. C. d., Lima, E. S., and Junior, A. C. S. (2022). Implementation of a Full Optically-Powered 5G NR Fiber-Wireless System. *IEEE Photonics Journal*, 14(1), 1-8.

146. Zhang, H., Zhang, L., Wang, S., Lu, Z., Yang, Z., Liu, S., Qiao, M., He, Y., Pang, X., Zhang, X., and Yu, X. (2021). Tbit/s Multi-Dimensional Multiplexing THz-Over-Fiber for 6G Wireless Communication. *Journal of Lightwave Technology*, 39(18), 5783-5790.

147. Tavakkolnia, I., Chen, C., Tan, Y., and Haas, H. (2022). Terabit Optical Wireless-Fiber Communication with Kramer-Kronig Receiver-Part I. *IEEE Communications Letters*, 26(9), 1964-1968.

148. Tavakkolnia, I., Chen, C., Tan, Y., and Haas, H. (2022). Terabit Optical Wireless-Fiber Communication with Kramer-Kronig Receiver-Part II. *IEEE Communications Letters*, 26(9), 1969-1973.

149. Nguyen, D. N., Bohata, J., Vallejo, L., Zvanovec, S., Ortega, B., and Ghassemlooy, Z. (2020). *On N-PAM and M-QAM implementation within the hybrid RoF-FSO-PON system*. 2020 3rd West Asian Symposium on Optical and Millimeter-wave Wireless Communication (WASOWC), Tehran, Iran, 1-5.

150. Ray, P. P. (2021). A perspective on 6G: Requirement, technology, enablers, challenges and future road map. *Journal of Systems Architecture*, 118(1), 102180.

151. Chen, Z., Ma, X., Zhang, B., Zhang, Y., Niu, Z., Kuang, N., Chen, W., Li, L., and Li, S. (2019). A survey on terahertz communications. *China Communications*, 16(2), 1-35.

152. Lu, H.-H., Li, C.-Y., Tsai, W.-S., Chang, P.-S., Chen, Y.-T., Liu, C.-X., Ko, T., and Lin, Y.-Y. (2022). Simultaneous Transmission of 5G MMW and Sub-THz Signals Through a Fiber-FSO-5G NR Converged System. *Journal of Lightwave Technology*, 40(8), 2348-2356.

153. Lin, Y. Y., Chang, P. S., Chen, Y. T., Li, C. Y., and Lu, H. H. (2022). *A Fiber-FSO-5G Wireless Convergent System for Simultaneous Transmission of 5G MMW and 5G NR Sub-THz Signals*. 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 1-2.

154. Agrawal, S. K., Sharma, K. (2016). *5G millimeter wave (mmWave) communications*. 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 3630-3634.

155. Pirrone, D., Ferraro, A., Zografopoulos, D.C., Fuscaldo, W., Szriftgiser, P., Ducournau, G., and Beccherelli, R. (2022). Metasurface-Based Filters for High Data Rate THz Wireless Communication: Experimental Validation of a 14 Gbps OOK and 104 Gbps QAM-16 Wireless Link in the 300 GHz Band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(10), 8688-8697.

156. Moon, S.-R., Kim, E-S., Sung, M., Rha, H.Y., Lee, E.S., Lee, I.M., Park, K.H., Lee, J.K., and Cho, S.H. (2022). 6G Indoor Network Enabled by Photonics-and Electronics-Based sub-THz Technology. *Journal of Lightwave Technology*, 40(2), 499-510.

157. Ding, Y., Shi, X., Gao, S., Wu, H., and Zhang, R. (2017). *Analysis of tracking- pointing error and platform vibration effect in inter-satellite terahertz communication system*. Proc. Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, China, 430- 434.

158. Mumtaz, S., Jornet, J.M., Aulin, J., Gerstacker, W.H., Dong, X., and Ai, B. (2017). Terahertz communication for vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7), 5617–5625.

159. Sood, A., Kaushik, R. (2020). *BER Analysis of 60 GHz Millimeter Wave over Free Space Optical Communication System*. 2020 6th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), Noida, India, 29-33.

160. Kazemi, H. (2014). *Multi-Hop Hybrid FSO/RF Communication Systems*. Master Thesis, Dept. Electrical and Electronics Eng., Özyeğin Universitesi, İstanbul, Türkiye.

161. Komanec, M., Bohata, J., Dousek, D., Ghassemlooy, Z., and Zvanovec, S. (2020). *Experimental validation of a 64-QAM LTE radio-over-fiber and free-space optics link at the 2000 nm band*. 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Porto, Portugal, 1-5.

162. Nguyen, D., Bohata, J., Komanec, M., Zvanovec, S., Ortega, B., and Ghassemlooy, Z. (2019). *Optical Hybrid Fiber/Free-Space and 25 GHz Wireless Transmission using LTE M-QAM Signals*. 2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Lisbon, Portugal, 1-6.

163. Adnan, S. A., Ali, M. A. A., Mazin, S. Al-Saeedi. (2018). Characteristics of RF signal in Free Space Optics (RoFSO) considering Rain Effect. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(7), 1644-1648.

164. Dat, P. T., Fujita, H., Matsumete, M., Van Dien, N., Hung, N.T., Kanne, A., and Yamamoto, N. (2019). *Hybrid FSO/MMW system for high-speed and reliable mobile fronthaul system*. 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019), Dublin, Ireland, 1-4.

165. Perez, J., Chicharro, F. I., Ortega, B., and Mora, J. (2017). *On the evaluation of an optical OFDM radio over FSO system with IM-DD for high-speed indoor communications*. 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Girona, Spain, 1-4.

166. Al Hammadi, A., Sofotasios, P. C., Muhaidat, S., Al-Qutayri M., and Elgala, H. (2021). Non-Orthogonal Multiple Access for Hybrid VLC-RF Networks with Imperfect Channel State Information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(1), 398-411.

167. Dhulipalla, P., Kang, M., Kim, T., Tan, N., Govindasamy, S., and Rahaim, M.B. (2019). *An Integrated Visible-Light and Radio Frequency Communications System*. 2019 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS), Beijing, China, 1-6.

168. Rahman, M. T., Parthiban, R., and Bakaul, M. (2020). *Integration and Evaluation of Hybrid RoF-VLC Network*. 2020 IEEE 8th International Conference on Photonics (ICP), Kota Bharu, Malaysia, 84-85.

169. Musumeci, F., Rottondi, C., Nag, A., Macaluso, I., Zibar, D., Ruffini, M., and Tornatore, M. (2019). An Overview on Application of Machine Learning Techniques in Optical Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(2), 1383-1408.

170. Nawaz, S. J., Sharma, S. K., Wyne, S., Patwary, M. N., and Asaduzzaman, M. (2019). Quantum Machine Learning for 6G Communication Networks: State-of-the-Art and Vision for the Future. *IEEE Access*, 7, 46317-46350.

171. Yu, J., Mo, W., Huang, Y.-K., Ip, E., Kilper, D. C. (2019). Model transfer of QoT prediction in optical networks based on artificial neural networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(10), C48-C57.

172. Zhu, S. (2020). *Machine Learning Enhanced Quality of Transmission Estimation in Disaggregated Optical Systems*. PhD Thesis, The University of Arizona.

173. Tariq, H., Usmani, F., Khan, I., Masoos, M.U., Ahmad, A., and Curri, V. (2023). *Iterative Transfer Learning Approach for QoT Prediction of Lightpath in Optical Networks*. 2023 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 1-4.

174. Aveta, F., Algedir A., and Refai, H. (2021). *Quality of Transmission Estimation for Multi-User Free Space Optical Communication Using Supervised Machine Learning*. 2021 IEEE Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAAW), Cleveland, OH, USA, 1-5.

175. Rahman, K. F., Afrin F., and Taip, F. S. b. (2018). *Optical Network Performance Analysis through Prediction of Q Factor on Simulated and Validated Dataset*. 2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET), Kota Kinabalu, Malaysia, 1-4.

176. Mata, J., de Miguel, I., Durán, R.J., Aguado, J.C., Merayo, N., Ruiz, L., Fernández, P., Lorenze, R.M., Abril, E.J., and Tomkos, I. (2018). *Supervised Machine Learning Techniques for Quality of Transmission Assessment in Optical Networks*. 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 1-4.

177. Amirabadi, M. A. (2019). A survey on machine learning for optical communication [machine learning view]. *Computer Science, Engineering*, 10.48550/arXiv.1909.05148.

178. Kaur, S., Kaur, J., Sharma, A. (2023). Predicting the performance of radio over free space optics system using machine learning techniques. *Optik*, 281(2), 170798.

179. Gao, H., Zhang, L., Zhang, B., Chen X., Li. Z. (2023). *On the Generalization of Machine-Learning-aided QoT Estimation in Optical Networks*. 2023 32nd Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Newark, NJ, USA, 1-4.

180. Priya, K. S. (2021). Linear Regression Algorithm in Machine Learning through MATLAB. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 9(12), 989-995.

181. Morais, R. M., and Pedro, J. (2018). *Evaluating Machine Learning Models for QoT Estimation*. 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 1-4.

182. Xie, Y., Wang, Y., Kandeepan, S., Wang, K. (2022). Machine Learning Applications for Short Reach Optical Communication. *Photonics 2022*, 9, 30.

183. Puspitasari, A. A., An, T. T., Alsharif, M. H., Lee, B. M. (2023). Emerging Technologies for 6G Communication Networks: Machine Learning Approaches. *Sensors*, 23, 7709.

184. Saleh, M.A., Abass, A.K. and Ali, M.H. (2022). Enhancing performance of WDM-RoFSO communication system utilizing dual channel technique for 5G applications. *Optical and Quantum Electronics*, 54, 497.

185. Balasaraswathi, M., Singh, M., Malhotra, J., Dhasarathan, V. (2020). A high-speed radio-over-free-space optics link using wavelength division multiplexing-mode division multiplexing-multibeam technique. *Computers & Electrical Engineering*, 87, 106779.

186. Nistazakis, H. E., Stassinakis, A. N., Sandalidis H. G., and Tombras, G. S. (2015). QAM and PSK OFDM RoFSO Over M-Turbulence Induced Fading Channels. *IEEE Photonics Journal*, 7(1), 1-11.

187. Song, S., Liu, X., Liu, Y., Wu, J., Wu T., and Guo, L. (2022). *Implementation of Machine Learning-based Emergency Communication Using RoFSO-VLC/RF Convergence link*. 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, CA, USA, 1-3.

188. Kaur, S., Lubana, A. (2024). Performance investigation of Ro-FSO link under clear and fog conditions employing machine learning. *Journal of Optics*, 0974-6900, 1-10.

189. Kaur, S. and Singh, S. K., and Sharma, A. (2023). Machine learning based performance estimation of terrestrial Ro-FSO Link. *Physica Scripta*, 98(7), 076001.

190. Rathi, D., Gajjar A., and Joshi, H. (2022). *BER Performance Comparison of Gamma-Gamma FSO link for Different Modulations and Diversity Techniques*. 2022 IEEE 9th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), Prayagraj, India, 1-5.

191. Suhartomo, S A. and Vincent, V. (2020). *Comparison of BER Performance for M-ary QAM and PSK on DWT-based OFDM System with PTS Technique Through AWGN Channel*. 2020 IEEE International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing (ICSECC), Indonesia, 5-10.

192. Apu, R. S., Ahmed, M. S., Raian M. H., and Matin, M. A. (202). *Performance Evaluation of Different Types of modulation in Optical Communication*. 2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET), Belagavi, India, 1-4.

193. Paudyal, P., Shen, S., Yan, S., and Simeonidou, D. (2021). Toward Deployments of ML Applications in Optical Networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 33(11), 537-540.

194. Esmail, M., Saif, W., Ragheb, A., and Alshebeili, S. (2021). Free space optic channel monitoring using machine learning. *Optics Express*, 29(7), 10967-10981.

195. Narasimha, V., and Gurugopinath, S. (2021). *Detection of On-Off Keying Signals in Free Space Optics: A Supervised Learning Approach*. 2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET), Belagavi, India, 1-6.

196. Huang, Z., Wang, Z., Huang, M., Li, W., Lini T., He, P., and Ji, Y. (2017). Hybrid optical wireless network for future SAGO-integrated communication based on FSO/VLC heterogeneous interconnection. *IEEE Photonics Journal*, 9(2), 1–10.

197. Gorli, R., Ashok, P., Kamatchi, M., Mirza, M., Kalanandhini, G., and Anandaram, H. (2024). *Towards Optic Enlightenment: Future Free Space Optics Architecture & Dynamic Modeling*. 2024 2nd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT), Bengaluru, India, 785-791.

198. Darwesh, L., Kopeika, N. S. (2020). Deep Learning for Improving Performance of OOK Modulation Over FSO Turbulent Channels. *IEEE Access*, 8, 155275-155284.

199. Obeed, M., Chaaban, A., Salhab, A.M., Zummo, S.A., Alouini, M.S. (2020). Physical Layer Security in Cooperative NOMA Hybrid VLC/RF Systems. *arXiv 2020*, arXiv:2008.10839.



Gazili olmak ayrıcalıktır