

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE  
UYGULAMALARI

Tuğçe AÇIKGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Haberleşme Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ

Ocak, 2020

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE  
UYGULAMALARI

Tuğçe AÇIKGÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Haberleşme Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doçent Dr Umut Engin AYTEN, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof Dr. Osman Nuri UÇAN, Üye  
Altınbaş Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE UYGULAMALARI başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Tuğçe AÇIKGÖZ

İmza



## TEŐEKKÜR

---

Bu çalıőmamda, benden emeğini hiçbir zaman esirgemeyen, bana güvenerek beni destekleyen değerli Hocam ve Tez Danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ'ye, bugüne kadar maddi manevi desteklerini benden bir an olsun esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme teőekkür eder, sonsuz saygılarımı sunarım.

Tuğçe AÇIKGÖZ



## SİMGE LİSTESİ

## KISALTMA LİSTESİ

## ŞEKİL LİSTESİ

## TABLO LİSTESİ

## ÖZET

## ABSTRACT

### 1 Giriş

1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı .....	2
1.3 Hipotez .....	3

### 2 Akıllı Ulaşım Sistemleri 4

2.1 Akıllı Ulaşım Sistem Mimarisi .....	6
2.1.1 Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Kullanım Alanları .....	8
2.1.2 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılan Önemli Teknolojiler.....	9
2.2 Fiber Optik İletişim Sistemleri.....	11
2.2.1 Fiber Optik Yapısı ve Çalışma Prensipleri.....	12
2.2.2 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Optik Fiber Uygulamaları.....	13

### 3 RoF Sistemleri 17

3.1 Radyo Frekanslarının Optik İletimi.....	17
3.1.1 RfoF Sistemleri.....	20
3.1.2 IFoF Sistemleri .....	21
3.1.3 BBoF Sistemleri.....	22
3.2 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde RoF Mimarisi.....	23
3.2.1 Hücreli RoF Mimarisi.....	24
3.2.2 Hareketli Hücreli RoF Mimarisi.....	26

3.3 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde RoF Yapıları .....	28
<b>4 RoF İle WDM Tasarımı Ve Simülasyonu</b> .....	<b>30</b>
4.1 Alt Taşıyıcılı Çoğullama, SCM .....	30
4.2 Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama, WDM .....	31
4.3 WDM Uygulaması Ve Analizi.....	33
4.4 Verici/Alıcı Anten Tasarımı Ve Analizi .....	40
4.4.1 Verici/Alıcı Anten Tasarımı Ve Analizi .....	41
4.4.2 Helisel Anten Geometrisi .....	42
4.5 RoF Haberleşme Sistemiyle Uyumlu Dairesel Polarize Mikroşerit Anten Dizisi Tasarımı Ve Analizi .....	48
4.5.1 Dairesel Polarize Mikroşerit Anten Dizisi .....	51
4.5.2 Dairesel Polarize Mikroşerit Anten Dizisi Uygulaması Ve Performans Analizi .....	52
<b>5 RoF Tekniği İle Farklı Modülasyon Yöntemleri Karşılaştırılması.....</b>	<b>58</b>
5.1 Modülasyonun Kullanım Amacı.....	58
5.1.1 Modülasyonun Avantajları .....	58
5.2 Modülasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması .....	59
5.3 Modülasyon Çeşitleri .....	62
5.3.1 Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK).....	62
5.3.2 Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying, PSK) .....	62
5.3.3 Farksal Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Phase Shift Keying, DPSK) .....	63
5.3.4 Sürekli Fazlı Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Continuous Phase Frequency Shift Keying, CPFSK).....	63
5.3.5 Dördül Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) .....	64
5.3.6 Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM) ...	65
5.3.7 Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) .....	65

5.4 RoF İçin Modülasyon Teknikleri Uygulaması.....	66
<b>6 Sonuç ve öneriler</b>	<b>80</b>
<b>Kaynakça</b>	<b>82</b>
<b>Tezden retilmiş Yayınlar</b>	<b>85</b>





## SİMGE LİSTESİ

---

dB	Desibel, belirli bir referans güce oranı belirten logaritmik ve boyutsuz bir birim
dBi	İzotropik anten referans alınmasıyla oluşan boyutsuz birim
Gbps	Gigabits per second
km	Kilometre
mm	Milimetre
Mbps	Megabits per second
Mb	Megabit
nm	Nanometre
s	Saniye
Tb	Terabyte
THz	Terahertz

## KISALTMA LİSTESİ

---

2G	2rd Generation
3G	3rd Generation
4G	4rd Generation
AM	Amplitude Modulation
ANPR	Automatic Number Plate Recognition
ASK	Amplitude Shift Keying
AUS	Akıllı Ulaşım Sistemleri
CPFSK	Continuous Phase Frequency Shift Keying
DM	Delta Modulation
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DSRC	Dedicated-Short Range Communications
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EOM	External Optical Modulator
ETC	Electronic Toll Collection
FAMOUS	Fast Moving Users
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
GHz	Gigahertz
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System For Mobile Communication
HFR	Hybrid Fiber Radio
IF	Intermediate Frequency
IoT	Internet Of Things
IVC	Inter Vehicle Communications System
M2M	Machine to Machine
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
OCR	Optical Character Recognition
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PCM	Pulse Code Modulation
PM	Phase Modulation

PPM	Pulse Position Modulation
PRBS	A Pseudorandom Binary Sequence
PSK	Phase Shift Keying
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAU	Remote Antenna Unit
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RLC	Red Light Camera
RoF	Radio Over Fiber
RVC	Road Vehicle Communications System
SCM	Subcarrier Multiplexing
TIS	Traveler Information Systems
TSC	Traffic Signal Coordination
TSP	Transit Signal Priority
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecom - Muncations System
VHF	Very High Frequency
VMS	Variable Message Sign
WDM	Wavelengths Division Multiplex

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Akıllı ulaşım sistemleri mimarisi modeli .....	7
Şekil 2.2 Fiber optik iletişimi .....	12
Şekil 2.3 Fiber optik kablo yapısı .....	13
Şekil 2.4 İletişim teknolojileri.....	13
Şekil 2.5 Optik ara bağlantı ağı.....	15
Şekil 3.1 Merkez istasyon ve birkaç baz istasyonu arasındaki temel RoF mimarisi .....	18
Şekil 3.2 RoF sistemlerinde merkez istasyon ve baz istasyon yapılanması.....	19
Şekil 3.3 Fiber üzerinden radyo frekans iletimi .....	20
Şekil 3.4 Fiber üzerinden orta düzey frekans iletimi.....	21
Şekil 3.5 Fiber üzerinden temel band sinyali iletimi .....	22
Şekil 3.6 RoF dayalı karayolu araç iletişim sistemi teknolojisi.....	24
Şekil 3.7 RoF dayalı karayolu araç iletişimi için bir erişim ağı mimarisi.....	25
Şekil 3.8 Hareketli hücre mimarisinin uygulanacağı olası tren yolu .....	27
Şekil 3.9 Kontrol merkezindeki hareketli hücreler mimarisi.....	28
Şekil 4.1 SCM şematik diyagramı.....	30
Şekil 4.2 WDM haberleşme diyagramı .....	31
Şekil 4.3 İki sinyalin WDM Mux ile birleştirilmesi.....	35
Şekil 4.4 WDM alıcı tarafı .....	36
Şekil 4.5 Sinyallerin WDM Mux elemanı çıkışı .....	37
Şekil 4.6 1. Alıcı tarafındaki BER sonucu.....	39
Şekil 4.7 2. Alıcı tarafındaki BER sonucu.....	40
Şekil 4.8 Son kullanıcıya kadar olan RoF ve anten haberleşmesi .....	41
Şekil 4.9 Helisel anten geometrisi .....	42
Şekil 4.10 Açık sonlu QHA geometrisi .....	43
Şekil 4.11 z eksenini boyunca yerleştirilmiş tasarlanan helisel anten .....	44
Şekil 4.12 Antenin s parametre cevabı.....	45
Şekil 4.13 Phi açısına bağlı kazanç polar diyagramı .....	45
Şekil 4.14 Phi açısına bağlı yönlülük polar diyagramı .....	46
Şekil 4.15 3 boyutlu uzak alan sonucu .....	47
Şekil 4.16 Theta açısına bağlı kazanç polar diyagramı .....	47

Şekil 4.17 Theta açısına bağlı yönlülük polar diyagramı .....	48
Şekil 4.18 RoF iletim hattı .....	49
Şekil 4.19 Alıcı taraftaki BER analizi sonucu .....	50
Şekil 4.20 Yama anten yapısı.....	51
Şekil 4.21 Tasarlanan dizi anten gösterimi .....	52
Şekil 4.22 Antenin S parametre cevabı.....	53
Şekil 4.23 Theta açısına bağlı yönlülük polar diyagramı .....	53
Şekil 4.24 Theta açısına bağlı kazanç polar diyagramı .....	54
Şekil 4.25 3 boyutlu uzak alan sonucu .....	55
Şekil 4.26 Phi açısına bağlı yönlülük polar diyagramı .....	55
Şekil 4.27 Phi açısına bağlı kazanç polar diyagramı .....	56
Şekil 5.1 Frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK) .....	62
Şekil 5.2 Faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) .....	62
Şekil 5.3 Farksal faz kaydırmalı anahtarlama (DPSK) .....	63
Şekil 5.4 Dördül faz kaydırmalı anahtarlama (QPSK) .....	64
Şekil 5.5 QPSK modülasyonundaki 4 faz sinyal .....	64
Şekil 5.6 Darbe genlik modülasyonu (PAM) .....	65
Şekil 5.7 Karesel genlik modülasyonu (QAM) blok diyagramı .....	66
Şekil 5.8 PSK modülasyonlu iletişim hattı .....	68
Şekil 5.9 FSK modülasyonlu iletişim hattı.....	69
Şekil 5.10 DPSK modülasyonlu iletişim hattı.....	70
Şekil 5.11 CPFSK modülasyonlu iletişim hattı.....	71
Şekil 5.12 QPSK modülasyonlu iletişim hattı.....	72
Şekil 5.13 PAM modülasyonlu iletişim hattı .....	73
Şekil 5.14 QAM modülasyonlu iletişim hattı.....	74
Şekil 5.15 PSK modülasyonlu BER analizörü sonuçları.....	75
Şekil 5.16 FSK modülasyonlu BER analizörü sonuçları .....	75
Şekil 5.17 DPSK modülasyonlu BER analizörü sonuçları.....	76
Şekil 5.18 CPFSK modülasyonlu BER analizörü sonuçları.....	76
Şekil 5.19 QPSK modülasyonlu BER analizörü sonuçları.....	77
Şekil 5.20 PAM modülasyonlu BER analizörü sonuçları .....	77
Şekil 5.21 QAM modülasyonlu BER analizörü sonuçları .....	78

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 2.1</b> Kablosuz kısa mesafe iletişim teknolojileri .....	14
<b>Tablo 2.2</b> Kablosuz uzun mesafe iletişim teknolojileri .....	14
<b>Tablo 2.3</b> Kablolı uzun mesafe iletişim teknolojileri .....	15
<b>Tablo 4.1</b> WDM sonuçları .....	39
<b>Tablo 5.1</b> Bilgi sinyali ve taşıyıcı sinyale göre modülasyon çeşitleri.....	61
<b>Tablo 5.2</b> Uygulanan modülasyon teknikleri sonuçları .....	79
<b>Tablo 5.3</b> Uygulanan modülasyon teknikleri sonuçları .....	79

## AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE UYGULAMALARI

Tuğçe AÇIKGÖZ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ

Günümüzde iletişim ve bilgi teknolojilerinin hızlı gelişmesi ulaşım sistemleri üzerinde olumlu bir etkiye yol açmıştır. Akıllı Ulaşım Sistemleri şeklinde tanınan bu sistemlerin amacı, seyahat sürelerinin azaltılması, trafik güvenliğinin ve mobilitenin artırılması ve çevre üzerindeki negatif etkilerin azaltılmasıdır. Akıllı ulaşım sistemleri, güvenli yollar ve güvenli sürüş, sürdürülebilir karayolu taşımacılığı, veri toplama, veri transferi, işleme ve analiz bilinçli karar verme olarak tanımlanabilir. Fiber üzerinden radio (RoF) teknolojisi, mikrodalga ve optik ağların bir entegrasyonudur. Genişband erişim ağındaki maliyetlerin azaltılmasını yanı sıra, kapasite ve mobilitenin artırılması için tercih edilen bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. RoF konsepti, bir optik fiberin düşük kayıp karakteristiğinden yararlanmak için ışığı radyo frekans sinyali (RF) ile modüle ederek bilgileri optik fiber üzerinden iletmek anlamına gelmektedir. RoF yapıları, akıllı ulaşım sistemlerine entegre edilerek kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, RoF iletişiminin çalışma mekanizması, avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Akıllı ulaşım sistemlerindeki kullanım alanlarına değinilmiş, tercih edilen yapıların çalışma şekli ve yöntemi incelenmiştir. OptiSystem 7.0 ve OptiSystem 14.0 simülasyon yazılımları kullanılarak, RoF sistemleri için iletişim performansının artırılması ve geliştirilebilecek olan yapılar üzerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda elde

edilen BER (Bit Error Rate, Bit Hata Oranı) diyagramları, güç, spektrum ve kazanç grafiklerinden yararlanılarak akıllı ulaşım sistemlerine uygun yapılar incelenmiştir. Hem PSK (Phase Shift Keying-Faz Kaydırmalı Anahtarlama), FSK (Frequency Shift Keying-Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) gibi çeşitli modülasyon yöntemleri kullanılarak hem de WDM (Wavelength Division Multiplexing, Dalgaboyu Bölmeli Çoklama) yapıları karşılaştırılarak RoF yapısının verimli çalışma şekilleri belirlenmiştir. Gönderilen verinin en doğru şekilde alınması için, Antenna Magus ve CST2019 yazılımları kullanılarak iki ayrı anten çalışması yapılmıştır. Tasarlanan bu antenlerin polarizasyon, uzak alan yansımaları, geri yansımaları, yönlülük ve kazanç değerleri gibi parametreler analiz edilip karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın 2. Bölüm'ünde, akıllı ulaşım sistemleri hakkında bilgi verilmiş ve 3. Bölüm'ünde, fiber optik iletişim sistemleri ve radio over fiber yapıları incelenmiştir. 4. Bölüm'de WDM ve tek frekans iletişim hattı tasarlanmış olup bunlara entegre olarak çalışabilen antenlerin analiz sonuçları incelenmiştir. 5. Bölüm'de ise modülasyon yöntemlerinin teorik ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. 6 Bölüm'de elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı ulaşım sistemleri, optik haberleşme, fiber üzerinden radyo teknolojisi, çoğullama, modülasyon teknikleri



# ANALYSIS AND APPLICATION OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

Tuğçe Açıköz

Department of Electronics and Communications Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. N. Özlem Ünverdi

Today, the rapid development of communication and information technologies prompted a positive impact on the Transportation Systems. The purpose of this system was defined as an Intelligent Transportation Systems, reducing travel times, increasing traffic safety and mobility, and reducing negative impacts on the environment. Intelligent transport systems can be defined as safe roads and safe driving, sustainable road transport, data collection, data transfer, processing and analysis, and conscious decisions. Radio over Fiber (RoF) technology is an integration of microwave and optical networks. It has emerged as a preferred method of increasing capacity and mobility, as well as reducing costs in the broadband access network. The RoF concept is to transmit the information over the optical fiber by modulating light with a radio frequency signal (RF) via taking advantage of the low loss characteristic of an optical fiber. RoF forms started to use by integrated into intelligent transportation systems.

In this thesis, how "Radio over Fiber" communication is provided, advantages and disadvantages were emphasized. Touched on areas of intelligent transport systems, the way of work and method of the preferred system has been examined. By using OptiSystem 7.0 and OptiSystem 14.0 simulation software, examined to increase of communication performance for radio over fiber systems and examined the systems that would be improved. As a result of the studies, transportation systems that are suitable smart transportation systems were investigated by using the BER (Bit Error Rate) diagrams, power, spectrum and

the most accurate data, two different antennas were used by performed Antenna Magus and CST2019 software. Polarization, reflections, far field, directivity and gain values of these designed antennas were analyzed and compared.

In the second part of the study, information about intelligent transportation systems was given, in the third part fiber optic communication systems and radio over fiber structures were examined. In fourth part, WDM and single frequency communication line are designed and the analysis results of the antennas that can work integrated to these are examined. In the fifth part, theoretical and simulation studies of modulation methods have been carried out and the results have been evaluated.

**Keywords:** Intelligent transportation systems, optical communications, radio over fiber, multiplexing, modulation techniques



### 1.1 Literatür Özeti

1970'lerin başından itibaren Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), ulaşım güvenliğini ve mobilityyi artırmak için geliştirilmeye başlanmıştır. Modern ulaşım sisteminin gelişimi, insanların yaşam düzeylerine ve konfor alanlarına büyük ölçüde etki etmiştir. Yüzyıllar boyunca, teknolojik yenilikler bizi modern akıllı ulaşım sisteminin oluşturulmasına yöneltmiştir [1]. Akıllı ulaşım sistemleri, çevresel etkileri en aza indirerek, sürdürülebilir ulaşımı ve verimliliğini amaçlamaktadır.

AUS'ta kullanılan yöntemlerin başında durum yönetimi modellerinin ve gerçek zamanlı operasyonlar için entegre sistemlerinin geliştirilmesi üzerinde durulmaktadır. Çevrimiçi olay yönetimi stratejileri geliştirmek için kullanılacak gerçek zamanlı trafik verilerini toplamak işlemek ve yönetmek için gerekli altyapıyı oluşturmak hedeflenmektedir. Trafik sinyalleri, seyahat planlayıcıları, akıllı biletleme veya araçtan araca ve araçtan altyapıya iletişim sistemlerine gibi çeşitli teknik araçlarla mevcut altyapının en uygun düzeyde kullanımını oluşturmaya yardımcı olan bir sistemdir. AUS, karayolu ve toplu taşıma ağlarının koordineli yönetimini teşvik etmekte ve kentsel lojistik ve erişim kısıtlama planlarının uygulamasını kolaylaştırmaktadır [2].

Bu sistemler, trafiğin akışı ve kontrolünün yanı sıra, acil durum, hız limiti bilgileri ve hava durumu hakkında gerçek zamanlı olarak bilgi vermektedir. Akıllı ulaşım sistemlerinde güvenli ve hızlı veri iletimi, optik haberleşme ile mümkün olmaktadır. Optik veri transferinde iletim ortamı, optik fiberlerdir. Optik fiberlerin hammaddesinin kolay ulaşılabilirliği, band genişliğinin büyük olmasına bağlı olarak veri iletim hacminin yüksek olması, veri kayıplarının az olması, elektromagnetik girişime karşı yüksek direnç göstermesi, hacimsel olarak fazla yer

kaplamaması ev güncel sistemlerle ortak çalışabilmesi gibi sebeplerle optik fiber yapıları iletişim sistemlerinde tercih edilmektedir [3].

Fiber optik sistemlerde Gigabit'ler seviyesinde veri iletimi gerçekleşmektedir. Akıllı ulaşım sistemlerinin kontrolü ve izlenmesinde, verinin doğru ve hızlı iletilmesi büyük önem taşımaktadır. Sistemlerin ilerleyen süreçlerde oluşabilecek ihtiyaçları karşılaşmasında ve üretilecek olan çözüm yöntemlerinin bulunması için başlangıçta işlevsel olarak kurulması gerekmektedir.

Radio over fiber (RoF), ışık sinyalinin bir radyo sinyali ile modüle edildiği tekniktir ve temel olarak modüle edilmiş RF sinyallerini ileten analog bir optik bağlantı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu modüle edilmiş sinyal, kablosuz erişimi genişletmek için optik bir bağlantı üzerinden iletilir. RF sinyallerini merkezi bir konumdan uzak anten ünitelerine dağıtmak için bu sistemler kullanılmaktadır. RF sinyali baz istasyonundan merkez istasyona aşağı link ve merkez istasyondan baz istasyonuna yukarı link olarak iletilmektedir. Daha yüksek band genişliğine sahip radyo sisteminin performansını artırmak için RoF sistemi planlanmıştır. Bu sistemler; koaksiyel kabloya kıyasla daha düşük veri kayıpları, yüksek band genişliği, düşük güç tüketimi, çok operatörlü ve çok hizmetli operasyon, dinamik kaynak tahsisi ve RF parazitlenmesine karşı bağımsızlığa sahiptir. RoF mimarisi temel olarak çift yönlü çalışması, makul uzunluk ve yüksek performanslı optik bileşenlere sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Geniş band özelliğine sahip ve Tayland'da yüksek hızlı tren sistemlerinde gerçek zamanlı trafik kontrolü için kablosuz haberleşme teknolojileri ile birlikte radio dalgalarının fiber optik kablo ile iletilmesi gerçekleştirilmektedir. 25-36 sn zaman aralığında 1.6 Gbps veri hızından daha büyük hızlarda veri iletimi yapıldığı bilinmektedir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında, akıllı ulaşım sistemlerinin önemi, günlük hayatımızdaki yeri ve bu ulaşım sistemlerinde kullanılan optik yapılar incelenmiştir. Akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılan fiber optik haberleşme ve RF haberleşmesinin birleşimi olan Radio Over Fiberin (RoF) çalışma prensipleri ve yapısı irdelenerek RoF

yapısının simülasyon çalışmaları ile performans analizlerinin yapılması amaçlanmıştır.

### 1.3 Hipotez

Akıllı ulaşım sistemlerinin tercih edilmesinin amacı, yol güvenliğinin sağlanması, kara ulaşım hacminin büyütülmesi, ulaşımda araçlar ve sistemler arası maksimum uyum ve konforun geliştirilerek, sistemin yaygınlaştırılacağı bir ortamın sağlanmasıdır. Bu ulaşım sistemlerinin güvenli ve verimli bir şekilde, onlara yüklenen görevlerini sağlayabilmeleri için yüksek boyutlu kontrol verilerinin kayıpsız ve hızlı bir şekilde kontrol merkezlerine iletmesi gerekmektedir. Kayıpsız ve hızlı veri iletimi için fiber optik haberleşme sistemleri, en avantajlı yapılardır. Akıllı ulaşım sistemleriyle fiber optik sistemlerin entegrasyonu geniş band, verimlilik ve hızlı veri iletimi gibi birçok yönden avantaj sağlamıştır. RF (radio frekans) bandındaki frekanslarının optik fiberler kullanılarak iletilmesi son zamanlarda karşımıza çıkan yeni bir teknolojidir. Bilgi sinyali fiber optik yapılar ile merkez istasyondan baz istasyonlarına gönderilmekte ve buradan da son kullanıcıya antenler yardımıyla iletilmektedir. İletişimin büyük bir kısmı optik fiberler ile yapıldığı için veride hızlı ve kayıpsız olmaktadır. Günümüzde akıllı ulaşım sistemlerinde RoF yapılarının kullanılması önemli yer edinmiş ve üzerinde birçok araştırma yapılmaya devam eden bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır [5].

Bu bağlamda, akıllı ulaşım sistemlerine RoF yapılarının entegrasyonu incelenmiş olup en iyi sonuç veren sistemlere yönelinmiştir. Farklı frekans ve tekniklere sahip fiber optik haberleşme uygulamaları yapılmış ve bunlara entegre çalışabilen antenler tasarlanmıştır. Oluşturulan bu sistemlerde ve anten tasarımlarındaki asıl hedef farklı kullanıcı kitlelerinin ihtiyaçlarını farklı şekilde karşılamaktır. Mevcut ihtiyaca göre tasarlanan sistemlerden en uygunu seçilebilmektedir.

Son zamanlarda haberleşme ve bilgisayar teknolojilerinde karşılaşılan hızlı gelişmeler ulaştırma sistemlerine de etki etmeye başlamıştır. Akıllı ulaşım sistemleri olarak bahsedilen bu yapıların amacı, gelişen teknoloji ile birlikte ulaştırma ve trafiğin daha verimli ve güvenli olarak planlanarak, yönetimi ve analizi için gereken kolaylığı ve hızı sağlamaktır. Akıllı ulaşım sistemleri genel olarak insan üzerindeki düşünme veya karar verme yükünü en aza indirmeye yönelik ulaşım çözümleri olarak da betimlenebilir. En basit akıllı ulaşım sistemi uygulaması olarak trafik ışıkları örnek gösterilebilir. Trafik ışıkları sayesinde yaya ve sürücülerin hangisinin geçiş hakkı olduğu hangisinin durması gerektiği bilgisi otomatik olarak verilmektedir. Yaya ve sürücüler her seferinde düşünüp karar verme zahmetinden kurtulmuşlardır. Bu sebeple elektronik ve bilgisayar teknolojilerinin, ulaşımı düzenlemek ve yönlendirmek için kullandığı sistemler vurgulanmaktadır. Yol kapasitelerinin belirli hacimlerde olması, gün geçtikçe sayısal olarak araç ve yaya trafiğinin artması, daha güvenli, daha hızlı, daha kolay ve daha ekonomik olarak ulaşım isteğini ortaya çıkarmaktadır.

Bahsedilen bu nedenler, karayolu taşımada akıllı ulaşım sistemlerinin ne kadar gerekli olduğunu göstermektedir. Modern zamanlarda mobilite ve sürdürülebilir ulaşım kavramları insan hayatına büyük etki etmeye başlamıştır. İstenilen bu hedeflere erişmek için ulaşım sistemleriyle ileri teknolojinin birleştirilerek kullanılması gittikçe önemli hale gelmiştir. Türkiye’de kullanım oranı hızlı bir şekilde yükselen akıllı ulaşım sistemleri gelecek için büyük gelişmeler yaratarak yeni iş olanakları sağlayacak önemli bir sektördür. Ülkemizde yapılan akıllı ulaşım sistemleri uygulamaları, genellikle kavşaklardaki trafik yönetimi, trafik güvenliği ve otomatik ücret toplama üstüne kendini göstermektedir. Akıllı ulaşım sistemlerinin belki de en önemli özelliği birden fazla çalışma disiplinin kendine

entegre etmesi ve ortaya çıkan sonuçta insanların refah seviyesinin yükseltmeye çalışmasıdır. Akıllı ulaşım sistemlerinin hedefleri arasında insan, taşıt, altyapı ve merkez arasında çok boyutlu veri transferi, güvenli trafiğin oluşturulması, yolların araç ve yaya hacimlerine göre kullanımı, mobilitenin artırılması, enerji tasarrufu oluşturularak çevreye verilen olumsuz etkilerin azaltılması gibi ana başlıklar oluşturulmuştur [6].

Akıllı ulaşım sistemlerinden beklenen önemli olay, olası kazaları önleyebilmek, trafiği hareket ettirebilerek ulaştırma sektörünün toplum üzerindeki olumsuz çevresel etkilerini azaltabilecek olan bilgileri işlemek ve paylaşmaktır. Geliştirilmiş bir ulaşım sisteminin nihai faydaları tamamen birbirine bağlı olan, bilgi açısından zengin, güvenlik, mobilite ve çevresel etkileri ele alabilen geniş kapsamlı ve güçlü bir ulaştırma sistemi oluşturmaktır.

Araçlar ve yollardaki sensör ve cihazların birbirleri ile iletişim kuracağı düşünüldüğünde, Akıllı ulaşım sistemlerinin M2M (Machine-to-Machine, Makineler Arası İletişim) veya IoT (Internet of Things, Nesnelerin İnterneti) olduğu söylenebilir.

AUS'un genel olarak kullanım alanları aşağıda yer almaktadır. Elektronik Para Tahsilatı

- Elektronik Para Tahsilatı
- Rampa Ölçer
- Kırmızı Işık Kameraları
- Trafik Sinyali Koordinasyonu
- Transit Sinyali Önceliği
- Gezgin Bilgi Sistemleri

Ayrıca AUS'un geliştirilmesi üzerine başlatılan ve tamamlanması yakın çalışmaları aşağıda bulunmaktadır:

- Kooperatif Kavşak Çarpışma Önleme Sistemleri
- Entegre Araç Tabanlı Güvenlik Sistemleri
- Acil Ulaşım Operasyonları

- Mobilite Hizmetleri
- Elektronik Yük Manifestosu
- Tıkanıklığın Azaltılması İçin Operasyonel Testler

Yapılan bu çalışmalar sonunda akıllı ulaşım sistemlerinin gelecek dönemlerde sıklıkla kullanılan bir teknoloji olarak karşımıza çıkması beklenmektedir.

## 2.1 Akıllı Ulaşım Sistem Mimarisi

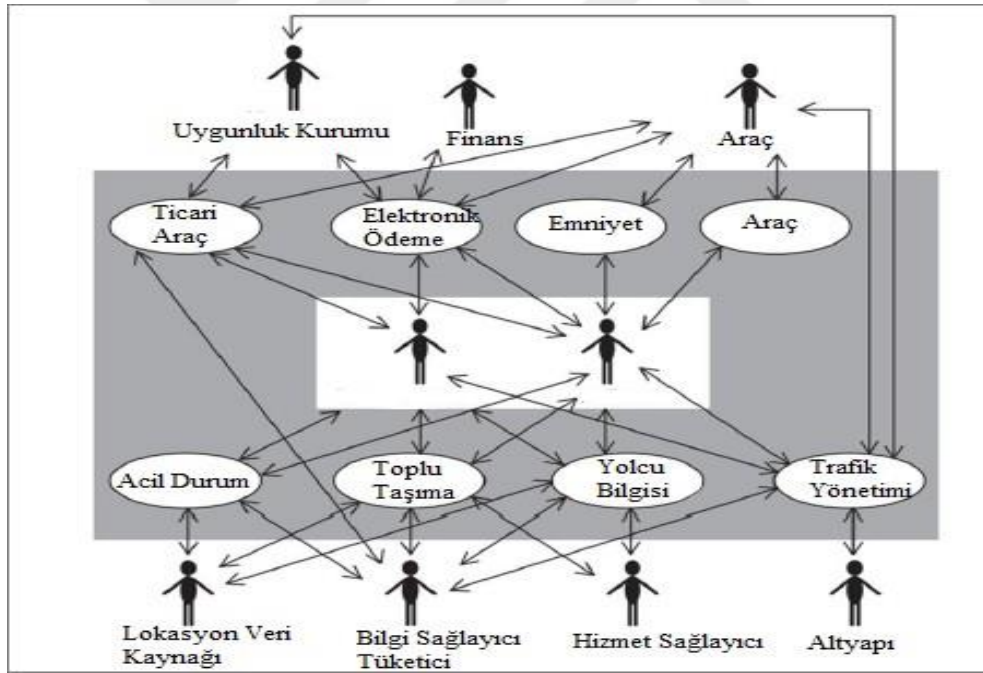
Sistemlere ait olan açıklamaların yapıldığı, sistemi oluşturan birimlerin ve birimleri oluşturan elamanların gösterildiği, hangi birimlerin sistem için geliştirilerek daha kullanışlı hale getirileceğini ifade eden yapılara sistem mimarisi adı verilir [7]. Alt sistemler, projenin keşif ve analiz aşamasında tanımlanan gerekliliklerini tam olarak karşılayacak şekilde geliştirilir ve seçilir. Her bir alt sistemin tanımı, alt sistem tarafından desteklenmesi gereken işlemlerin ve dağıtılacak teknolojilerin türlerinin açıklanması açısından verilir. Aynı zamanda, kullanıcının ihtiyaçlarını ve ihtiyaç algılarını değiştirmeyi hesaba katan ve tasarımın kullanıcı ile geliştirici arasındaki fikir birliği ile geliştirilmesini sağlayan, yinelemeli bir tasarımın ve ihtiyaç döngüsünün önemli bir bileşenidir. Sistem tasarımı yapılırken bir yandan, kullanıcı gereksinimlerinin tam olarak karşılanmasını sağlamak için yeterli ayrıntı sağlanmalıdır [3]. Öte yandan ise, çoklu tasarım yaklaşımlarını ve gelişen teknolojileri barındırabilecek kadar esnek bir yapı oluşturulmalıdır. İyi bir AUS mimarisinde önerilen çözüm için teknik çerçeveyi tanımlamaktan çok daha fazlası yapılmalıdır. Seçilen teknik alt sistemleri ve bunlar arasında gereken veri akışını desteklemek için gereken kurumsal ve organizasyonel düzenlemeler de tanımlanmalıdır. Bu, tipik olarak her bir alt sistemin çalışmasını desteklemek için gerekli, uyumlu bir tüzel kişilik olarak birlikte çalışmalarını sağlamak için gereken anlayış ve operasyonel prosedürlerin birleşimi şeklinde olmalıdır. AUS uygulamalarının getirmiş olduğu asıl yenilik, ulaştırma sistemleri ile ilgili bilginin toplanması, analiz edilmesi ve dağıtılması özellikleriyle ilişkilidir.

Akıllı ulaşım sistemleri mimarileri, hangi mobilite servislerinin uygulanması gerektiği, hangilerinin öncelikli olduğu, hangi süreçlerin ve işlevlerin uygulanması



gerektiğine dair bir referans sunar. Bu mimarileri oluştururken karşılaşılan diğer önemli husus ise, büyük ve orta büyüklükteki şehirler arasındaki kişi sayısı, nüfus hareketlilikleri, ekonomik faaliyetler, toplu taşıma araçları, karayolu altyapısı ve ulaşım bütçesi gibi farklılıklardır. Bir akıllı ulaşım sistemi mimarisi tasarlanırken tüm bu sayılan maddeler göz önüne alınarak arz ve talep ilişkisi bakımından en verimli sistemler oluşturulmalıdır.

Akıllı ulaşım sistemi mimarisi oluşturmak için, ulusal ve uluslararası düzeyde standartlaşmış verilerden yararlanılmalıdır. Genel yapılardan yola çıkılarak daha özel yapılara ve ihtiyaçları tam olarak karşılayacak sistemlere yönelmek gerekir. Bu bağlamda, akıllı ulaşım sistemi mimarisinin gelişimi, tüm dünyada artan ilgi görmüştür. Bir AUS mimarisinin geliştirilmesindeki prosedürlerin oluşturulması, mimarinin çeşitli geliştirme ekiplerinin katılımını gerektiren doğal karmaşıklığı nedeniyle gerekli ve acil olur. Şekil 2.1'de referans bir AUS mimarisi modeli gösterilmektedir.



**Şekil 2.1** Akıllı ulaşım sistemleri mimarisi modeli

Her ne kadar bilgisayar destekli bir sistem mühendisliği modeli geliştirme görevinin bir bölümünü gerçekleştirmek için yaygın olarak kabul edilmiş olsada, şu

ana kadar hiçbir ülke geliştirme ekiplerine yardımcı olmak için katı, açık ve uygulanabilir bir prosedür tanımlamamıştır.

### 2.1.1 Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Kullanım Alanları

Akıllı ulaşım sistemlerinin trafik düzenlemesinde ve akıllı yol mantığında birçok kullanım alanı bulunur. Bu kullanım alanları hakkındaki bilgi aşağıda yer almaktadır.

- Eletronik Para Tahsilatı (Electronic Toll Collection,ETC): Paralı tahsilatlarda operasyonel verimi ve kullanım kolaylığını artıran otomatik sistemler kullanarak paralı yollarda ödeme işlemini destekler. Sistemler genellikle ücretli yollardaki özel veya karma kullanım şeritlerinde bulunan elektronik okuyucular tarafından tanımlanan taşıyıcıya monte edilmiş transponderlerden oluşur.
- Rampa Ölçer (Ramp Meter, RM): Otoyoldaki rampa metre üzerindeki trafik işaretleri, otoyola giren araçların trafik akışını kontrol etmek için kırmızı ve yeşil sinyaller arasında geçiş yapar. Otoyol trafik koşullarına bağlı olarak ölçüm oranları değiştirilebilir.
- Kırmızı Işık Kamerası (Red Light Camera, RLC): Trafik sinyali kırmızıya döndükten sonra kaldırımdaki sensörlerin üzerinden geçen birmotorlu taşıt tespit edildiği zaman sensörler, ihlalin iki fotoğrafını çekerek yüksek hızlı kameralardaki bilgisayarlara bağlanırlar. Genel işleyişte, ilk fotoğraf kavşağa girdiğinde aracın önünden çekilir ve ikinci fotoğraf, araç kavşaktayken aracın arkasından çekilir. Emniyet görevlileri fotoğrafları inceleyerek aracın kayıtlı sahibine uyarı gönderir.
- Transit Sinyali Önceliği (Transit Signal Priority, TSP): Sinyalize kavşaklardaki transit araçlara özel işleyiş gerçekleştirilir. Transit sinyali önceliği sistemlerinde yaklaşmakta olan transit araçları algılamak için sensörler kullanılır ve araçların performansını arttırmak için sinyal zamanlamalarını değiştirirler. Örneğin, bazı sistemler gerektiğinde toplu

taşıma araçları için yeşil sinyallerin süresini uzatır. Bu tarz toplu taşıma araçlarına öncelik vermek trafik akışının verimliliğini artırır.

- Trafik Sinyali Koordinasyonu (Traffic Signal Coordination, TSC): Çoklu kavşakların senkronize edilmesinde kullanılır.
- Gezgin Bilgi Sistemleri (Traveler Information Systems, TIS): Gezgin bilgi uygulamaları, kullanıcıların güzergah ve seyahat tarzı hakkında bilinçli kararlar vermelerini sağlamak için internet, web siteleri, telefon hatları, televizyon ve radyo gibi çeşitli teknolojileri kullanır. Gezgin bilgi sistemleri teknolojileri, yüksek mobilite tahminine sahiptir [8].

### 2.1.2 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılan Önemli Teknolojiler

Akıllı ulaşım sistemleri telekomünikasyon, elektronik ve bilgisayar teknolojilerini ulaşım sistemiyle entegrasyonu ile oluşmaktadır. Akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılan teknolojiler, aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

1. Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System, GNSS): Yaygın olarak GNSS olarak bilinen küresel navigasyon uydu sistemi, bir kullanıcının dünya üzerindeki coğrafi konumunu tam olarak belirlemek için küçük uyduları kullanan bir uydu navigasyon sistemidir. Tüm GNSS uyduları atomik saatlere sahiptir ve her bir sistem tam olarak senkronize edilir. Açılıştaki bir GNSS alıcısı yörüngeli atomik saatlerle senkronize olur. Alıcı, her uydunun yörünge bilgisinin kodunu çözer ve yörünge verileri, alıcının her uydunun yerini hesaplamasını sağlar. Her uydu, benzersiz bir sinyal iletir, alıcı bu benzersiz sinyallerin kodunu çözer ve uzaydan alıcı antene geçiş için geçen süreyi hesaplar. Eşitlik (2.1)'de bu denklem belirtilmektedir. Yörüngeli uydudan alıcının antenine olan mesafe(menzil), süre ve hız formülleri kullanılarak hesaplanır:

$$\text{Uzaklık(mesafe)}=\text{Zaman} \times \text{Işık Hızı} \quad (2.1)$$

Bir GNSS alıcısını dengelemek için antenlerden uydulara kadar birçok aralığı ölçer.

Alıcı, uyduların konumunu hesapladığı ve aralıkları ölçtüğü için, aralığın kesiştiği noktayı hesaplayabilir. Kesişim noktası, GNSS anteninin dünya yüzeyindeki yeridir. Sonuç, geliştirilmiş doğruluğa sahip bir konumdur. GNSS, kat edilen mesafe ve güzergah belirleme, anlık trafik bilgilerinin paylaşımını mümkün kılan , konum tabanlı servisler ve rota yönlendirme sistemlerinin arasındaki temel teknolojidir [6]. Başlangıçta ABD Hava kuvvetleri tarafından Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) olarak geliştirilmiş ve yalnızca ülkenin savunma kuvvetleriyle sınırlandırılmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte zamanla diğer GNSS sistemleri de gündeme gelmiştir. Şu an itibariyle, Rusya'nın GLONASS'ı ve Avrupa Birliği'nin Galileo'su diğer iki operasyonel küresel navigasyon sistemidir.

2. Tahsis Edilmiş Kısa Mesafeli İletişim Teknolojisi (Dedicated-Short Range Communications, DSRC): Tek veya iki yönlü kablosuz iletişim kanalıdır. Otomotiv kullanımları için özel olarak tasarlanmıştır ve 5.8 GHz veya 5.9 GHz spektrumunda çalışmaktadır. DSRC araçtan altyapıya entegrasyon, araçtan araca haberleşme, uyarlamalı trafik sinyal zamanlaması, elektronik ücret toplama, trafik sıklığı, elektronik yol fiyatlandırma, bilgi sağlama olmak üzere birçok akıllı ulaşım sisteminde ana rol oynar. DSRC, radyo frekansı tanımlama (Radio Frequency Identification, RFID) teknolojisinin bir alt kümesidir.
3. Kablosuz Ağlar: Kablosuz internet erişimi için yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Araçlar ve yol kenarında bulunan ekipmanlar arasındaki hızlı iletişim için kullanılmaktadır, ancak kapsama alanları birkaç yüz metre olduğu için sürekli iletişim için bu aralık, her bir ardışık araç veya yol kenarı düğümü tarafından bir sonraki araca veya düğüme bilgi aktararak genişletilebilir.
4. Mobil İletişim: Standart üçüncü veya dördüncü nesil (3G veya 4G) mobil şebekeleri, bilgi iletmek için kullanılmaktadır. Şehirlerde ve ana caddelerde rahat erişilebilirlik önemli avantajları arasında yer alır.

Ancak uygulamalar çok yavaş olabileceğinden ek ağ kapasitesi gerekirse araçlardaki mobil ağların ve ağ operatörlerinin bu maliyetleri karşılması gerekir.

5. Radyo Dalgası Ve Kızılötesi İşaretler: Gerçek zamanlı trafik bilgilerini iletmek için otoyollarda radyo dalgası işaretlerini ve ana hatlarla arter yollarda ise kızılötesi işaretlerini kullanırlar. Arter yollar, hizmet düzeyindeki otoyolların hemen altında, orta kapasiteli karayollarıdır, kentsel merkezlerdeki alanlar arasında büyük miktarda trafik taşımaktadırlar. 5.8 GHz DSRC kablosuz teknolojilerinden yararlanırlar.
6. Yol Kenarındaki Kamera Tanıma: Bu sistemlerde, sürücülerin tıkanıklık bölgelerindeki karayollarında bulunan kameraları kullanırlar. Kameralar, araç plakalarını tanımlamak için Optik Karakter Tanıma (Optical Character Recognition, OCR) teknolojisine dayalı Otomatik Plaka Tanıma (Automatic Number Plate Recognition, ANPR) kullanır. Tıkanıklık bölgesine müdahale edebilmek için bu bilgiler dijital olarak arka ofis sunucularına aktarılır [9].

## 2.2 Fiber Optik İletişim Sistemleri

Fiber optik, cam veya plastik boru içerisinde ışık huzmesiyle birlikte kodlanmış bilgileri gönderen bir iletişim sistemidir. İlk olarak, 1950'lerde doktorların ameliyata gerek kalmadan insan vücudunun içini görmelerine yardımcı olmak için geliştirilmiştir. 1960'larda, mühendisler telefon aramalarını ışık hızında iletmek için aynı teknolojiyi kullanmanın bir yolunu bulmuşlardır. Optik fiberlerin birçok özelliği, o zamandan günümüze kadar çok büyük bir gelişme göstermesine rağmen, veri iletiminin temel ilkeleri aynı kalmıştır.

Fiber optik kablolar, tamamen optik (ışık tabanlı) teknolojisini kullanarak iki yer arasında bilgi taşır. Bir fiber optik kablo Bir fiber optik kablo, optik lifler olarak bilinen çok ince cam veya plastik tellerden oluşur, bir kablonun iki şeridi veya birkaç yüzü olabilir. Her tel, insan saçı kadar kalınlığın onda birinden daha küçüktür tüm fiber optik kablo, birkaç milyon görüşmeyi kolayca taşıyabilir.

Hızlı bir telefon görüşmesi yapıldığında, bir web sitesi kontrol edildiğinde veya bir video indirildiğinde, veri iletimi saç tellerinden ince fiber tellerin içindeki sürekli olarak iletimde bulunan ışık ışınları ile mümkün olmaktadır.

### 2.2.1 Fiber Optik Yapısı ve Çalışma Prensipli

Optik fiberler, cam veya plastikten yapılıdır. Işık, fiberin merkezi boyunca bir uçtan diğerine iletilir. Fiber optik sistemler, birçok uygulamada metalik iletkenlerden daha üstündür.

Fiber optik sistemlerin en büyük avantajı band genişliğidir. Işığın dalga boyu nedeniyle, metalik bir iletkenle, hatta bir koaksiyel iletkenle, mümkün olandan çok daha fazla bilgi içeren bir sinyalin iletilmesi mümkündür.

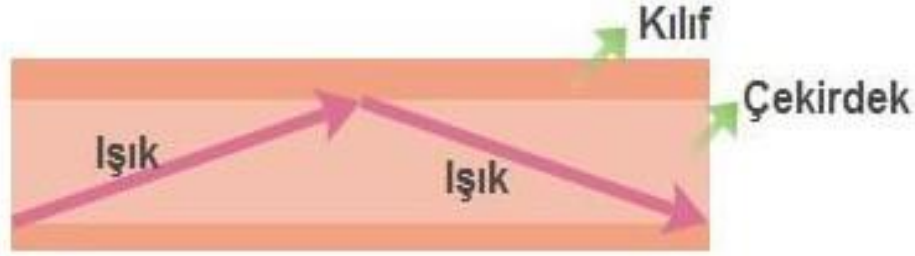
Bir optik kablo, dış yalıtımın içindeki birçok küçük fiber optik telden oluşur. Şekil 2.2'de bir elektrik sinyalinin fiber optik kablo içerisindeki iletimi gösterilmektedir. Verici taraf dijital sinyali alır ve onu ışık atalarına dönüştürür. Işık, daha sonra optik kablodan gönderilir ve alıcı tarafa ulaşır. Alıcı taraf daha sonra ışık sinyallerini tekrar dijital sinyale dönüştürmektedir. Böylelikle basit bir fiber optik iletişimi sağlanmış olur.



Şekil 2.2 Fiber optik iletişimi

Bir fiber optik kablonun kesidi incelendiğinde, çekirdek, kılıf ve birincil koruyucu tabaka ile karşılaşılır. Çekirdek, ışığın içinde kırılarak devam ettiği, iletimin yapıldığı silindirik kısımdır. Kılıf ise çekirdek içinde bulunan ışığın tam yansımaya özelliği ile kırılabilmesi için ihtiyaç duyulan silindirik örtü tabakasıdır. En üst

kısımda yer alan tabaka ise koruyucu katman rolü yapmaktadır. Işığın tam yansıma ile iletiminin sağlanması için gereken diğer bir koşul ise çekirdeğin kırılma indisinin kılıfın kırılma indisinden az bir farkla büyük olmasıdır [10].

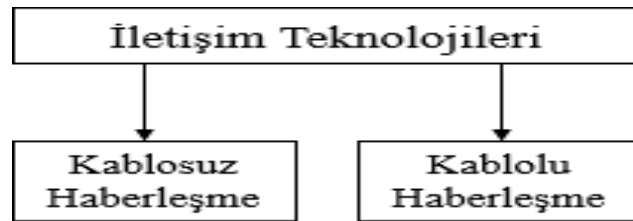


Şekil 2.3 Fiber optik kablo yapısı

Şekil 2.3’de fiber optik kablo yapısı içerisindeki ışığın yansıma yaparak iletimi gösterilmektedir.

### 2.2.2 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Optik Fiber Uygulamaları

Ulaşım problemleriyle birlikte uygulanan bir dizi bilgi ve iletişim teknolojisi bulunmaktadır. Bu teknolojilerin birlikteliği AUS’un gelişmesini sağladığı için bunlara AUS’u oluşturan teknolojiler denilmektedir. Kullanılan bu teknolojiler, fiber optik kablolar, CD-ROM, elektromagnetik pusulalar, global konumlandırma sistemleri (Global Positioning System, GPS), lazer sensörler, dijital harita veritabanları, AUS uygulamalarını sağlayan katod ışın tüpleri ve LCD gibi ileri teknolojilerdir. Şekil 2.4, Tablo 2.1, Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’de, iletişim teknolojilerinin "soy ağacı" şeklinde mevcut yapıları yer almaktadır.



Şekil 2.4 İletişim teknolojileri

İletişim teknolojileri genel olarak kablolu haberleşme ve kablosuz haberleşme olarak iki ana başlık altında incelenmektedir.

Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de gösterilen kablosuz iletişim teknolojilerinin kısa mesafe ve uzun mesafe olarak ayrılması ve buna bağlı olarak kullanılmakta olan teknolojileri kapsamaktadır.

**Tablo 2.1** Kablosuz kısa mesafe iletişim teknolojileri

Kısa Mesafe			
Analog		Dijital	
Tek Yönlü	Çift Yönlü	Tek Yönlü	Çift Yönlü
Mikrodalga	Mikrodalga	Mikrodalga	Mikrodalga
Radyo Frekansı	Radyo Frekansı	Radyo Frekansı	Radyo Frekansı
Kızılötesi	Kızılötesi	Kızılötesi	Kızılötesi

**Tablo 2.2** Kablosuz uzun mesafe iletişim teknolojileri

Tek Yönlü	Çift Yönlü	Tek Yönlü	Çift Yönlü
AM radyo		Dijital ses yayını	Paket veri radyo
FM radto	FM radyo	FM yan band	Hücrel dijital paket verileri
Baölgesel radyo ağları	Yayıllı spektrum		
Radyo çağrı hizmetleri	Hücrel haberleşme		
Karayolu danışma radyo			
TV	Kanallı radyo sistemleri	Direk uydu tv yayını	Uydu haberleşmesi

Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de gösterilen kablosuz iletişim teknolojilerinin kısa mesafe ve uzun mesafe olarak ayrılması ve buna bağlı olarak kullanılmakta olan teknolojileri kapsamaktadır.

Bir akıllı ulaşım sistemi, birlikte etkili bir şekilde çalışması gereken alt sistemlerden ve bileşenlerden oluşur. Diğer bileşenlerin performansı genel sistem performansını sınırlıyorsa, bir bileşende yüksek performans yeteneklerine sahip olmanın anlamı yoktur. Bileşen seçiminde dengeli bir yaklaşım izlenmeli ve bu da

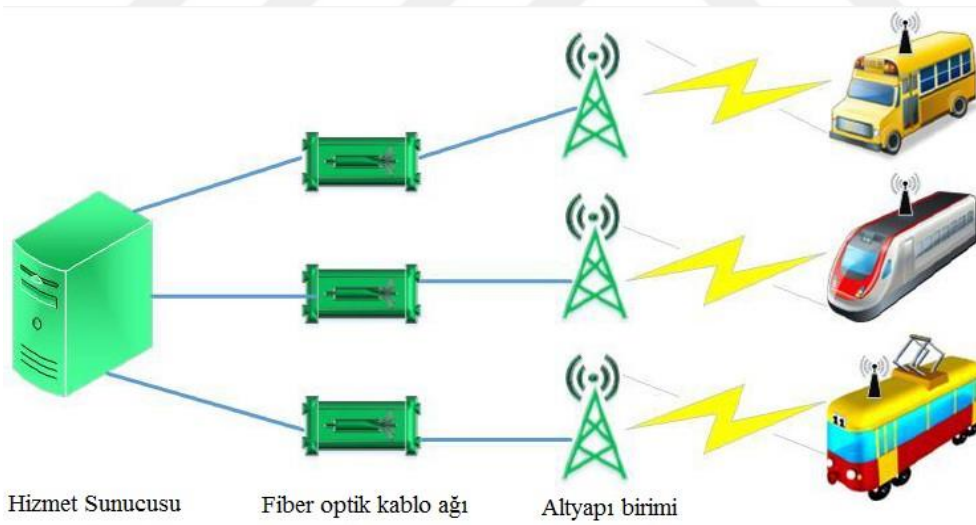


tüm sistemin genel performansını yansıtmalıdır. Tablo 2.3’de kablolu uzun mesafe iletişim teknolojileri analog ve dijital olarak gösterilmiştir.

**Tablo 2.3** Kablolu uzun mesafe iletişim teknolojileri

Uzun Mesafe			
Analog		Dijital	
Tek Yönlü	Çift Yönlü	Tek Yönlü	Çift Yönlü
Fiber Optik	Telefon Hatları		Telefon Hatları
	Koaksiyel Kablo		Fiber Optik
			İnternet ve Online Servisler
Kablo TV	Kablo TV	Kablo TV	Kablo TV

Fiber optik iletişim, akıllı ulaşım sistemlerinde kablolu haberleşmede büyük rol oynamaya başlamıştır. Kamera ve onları kontrol eden monitörler arasındaki verilerin yüksek hızda aktarımını yapmaktadırlar. Otobüs, tramvay ve metro gibi donanımlı toplu taşıma araçlarının yol kenarı birimleri ile iletişiminin sağlanarak hizmet sunucusuna verilerin çift yönlü aktarımı optik fiberler ile gerçekleşmektedir [5].



**Şekil 2.5** Optik ara bağlantı ağı

Mevcut alt sistemler ve bileşenlere ek olarak, akıllı sistemler, iletişim ağlarından veya sistemlerinden de oluşabilir. Bunlar, bakır tel veya fiber optik kullanan yerel

veya geniş alan ağı olabilir. Ayrıca, radyo frekansı veya kızılötesi iletişim ortamlarını kullanan kısa veya uzun menzilli kablosuz iletişimler de olabilir. Bunlar, veri sinyallerini işlemek için kullanılan iletişim protokollerini içerebilir. Fiber optik kablolar gibi yeni iletişim teknolojileri, önemli ölçüde maliyet tasarrufu sağlayan ulaşım altyapısı girişimlerinin bir parçası olarak uygulanabilir. Yol kenarındaki kontrol merkezinden (Variable Message Sign, VMS) gelen bilgiler, kontrol merkezi üzerindeki ekranları otoyol boyunca birbirine bağlamak için kullanılır. Kontrol merkezleri birbirine fiber optik telefon kablosundan oluşan bir iletişim ağı üzerinden bağlanır [3]. Radyo frekans sinyallerinin optik üzerinden iletilmesi, optik sensörler ve optik ara bağlantı ağları akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılmaya başlanmış yeni teknolojiler olarak karşılaşılmaktadır. Şekil 2.5'de optik ara bağlantı ağı sunulmuştur.



# 3

## RoF Sistemleri

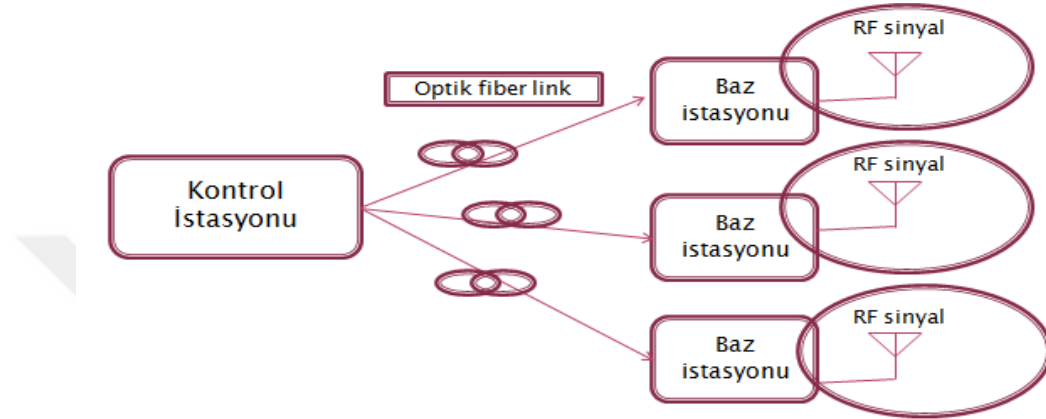
---

Radio over Fiber (RoF), Radio frekans sinyallerinin fiber optik kablo üzerinden uzak mesafelere iletilmesinde kullanılan teknolojinin genel adıdır. RF sinyalleri (VHF veya UHF), koaksiyel kablolar ile 10-100 metre mesafeye kadar taşınabilmektedir. Optik fiberlerde ise bu mesafe kilometrelere kadar çıkmaktadır. Radyo frekans sinyallerinin fiber optik kablo üzerinden taşınması genellikle analog bir işlemdir. Bu işlemde, radyo sinyalleri sayısala çevrilmez. Bir başka deyişle, işaretin frekansı, modülasyonu olduğu gibi taşınır. Çok düşük sinyal kaybı ile (<0,5 dB/Km) çok uzun mesafelere sinyal iletimine imkan yaratmaktadır. Radio over fiber sistemlerinde kullanılan optik kablolar, girişim yaratan elektrik kablolarından etkilenmezler, uygulanması ve bakımı kolaydır. Akıllı ulaşım sistemleri, madenler, demiryolu tünelleri, karayolu tünelleri, su tünelleri ve askeri gibi birçok uygulama alanları bulunur.

### 3.1 Radyo Frekanslarının Optik İletimi

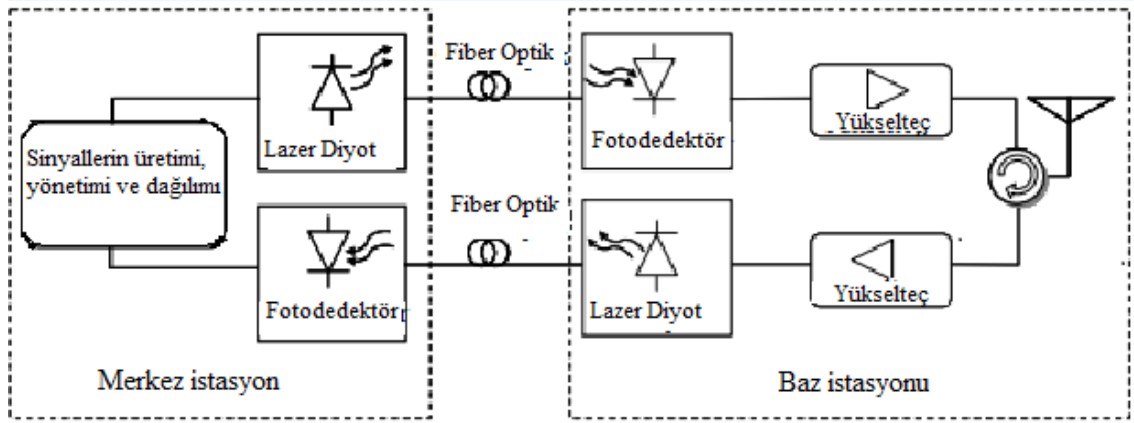
Kablosuz ve mobil iletişimin ortaya çıkışından bu yana gerçekleşen büyük evrim, ikinci nesil (2G)'den üçüncü nesil (3G) sistemlere ve şu anda dördüncü (4G) nesil teknolojilerin ötesine geçmeyi sağlamıştır. Bu gelişmeler mobil genişband ihtiyacını daha da artırmıştır [11]. Mobil ve geniş band terimleri, her zaman ve her yerde, multimedya yüksek hızlı servislere olan ihtiyacı belirtir. Genişband kablolu ve kablosuz erişim ağlarının yakınsama ve kesintisiz entegrasyon eğiliminin ardından, hem optik hem de kablosuz erişim ağlarının etkin birleşimi gelecekteki genişband ağlarının pratik kullanımı için umut verici bir çözüm gibi görünmektedir. Bu hedefi gerçekleştirmenin etkili bir yolu, Hibrit Fiber radyo

(Hybrid Fiber Radio, HFR) veya fiber üzerinden radyo (RoF) teknolojisidir. RoF teknolojisi, mevcut ve yeni mobil / kablosuz erişim programları ve optik ağların istihdamı için uygun bir arayüz altyapısı olarak da hizmet verebilir [12]. Fiber üzerinden radyo sistemlerinin arkasındaki temel fikir ve asıl avantajı, baz istasyonlarında veya uzak anten ünitelerinden istenen temel band ve RF sinyal işlemlerinin en aza indirilmesine yol açan merkezi kontrol istasyonları kavramıdır.



**Şekil 3.1** Merkez istasyon ve birkaç baz istasyonu arasındaki temel RoF mimarisi

RoF'nin mimari düzenlemesi, Şekil 3.1'de görülmektedir. Merkez istasyon, RF veya milimetrik dalga sinyallerini optik fiberler aracılığıyla birkaç baz istasyonuna yönlendirilmesi ve dağıtılmasından sorumludur. Sırasıyla, baz istasyonları sinyali tekrar elektrik sinyallerine dönüştürür ve son kullanıcılara iletir. Ters işlem, elektrik sinyalinin optik hale dönüştürülmesini ve merkez istasyona optik fiber üzerinden iletilmesini gerektirir.



**Şekil 3.2** RoF sistemlerinde merkez istasyon ve baz istasyon yapılanması

Merkez istasyon ile bir baz istasyon arasındaki genel bir bağlantı, Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Bir baz istasyonun altyapısı, temel olarak yükseltme ve anten ekipmanı ile birlikte elektriksel dönüşümü içerir. Diğer bir ifadeyle, baz istasyonu konfigürasyonu mümkün olduğunca basit tutulur. RF sinyali merkez istasyon tarafından dağıtıldığından bu düzenlemeye fiber üzerinden radyo frekansı adı da verilir. Bu konfigürasyon çok düşük maliyetli olmakla birlikte, fiber dağılımına ve faz gürültüsüne eğilimlidir [13]. Ana akım kablosuz iletişimde olduğu gibi, optik fiberin band genişliğinden tam olarak yararlanabilmek ve bağımsız çoklu hizmet iletişimine erişmek için çoğu zaman çoğullama teknikleri kullanılır. En tipik olanlar SCM (Subcarrier Multiplexing, Alt Taşıyıcı Çoğullama) ve WDM’dir (Wavelength Division Multiplex, Dalga Boyu Bölme Çoğullaması) [14, 15]. SCM’de, çeşitli taşıyıcılar (veya alt taşıyıcılar) optik taşıyıcıyı modüle ederken, WDM’de her bir milimetrik dalga taşıyıcı belirli bir optik kanala atanmıştır.

Merkezi RoF mimarisi, mikro veya pico hücresele kapsama elde etme kabiliyeti sunduğu için faydalı ve esnek. Böylece mobil iletişimin yanı sıra optik fiberin yüksek band genişliği avantajlarını sunar. Ek olarak, yüksek frekans yayılma olaylarından yararlanır ve verimli frekans yeniden kullanım ve tahsis planlarını gerçekleştirebilir. Bu durum, gelecekteki yüksek hızlı ağların mm-dalga taşıyıcı frekanslarını 60 GHz’in ötesine ulaştırmak için tasarlanmasından dolayı önemlidir.

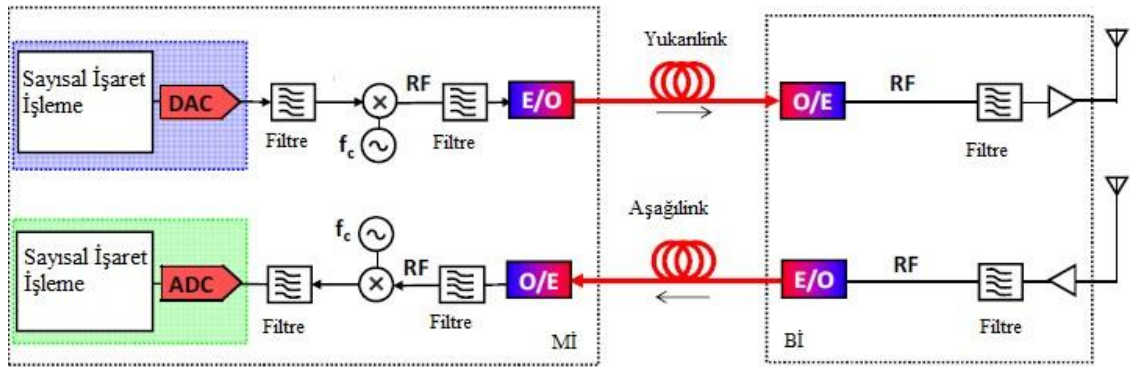
RoF ile daha iyi kapsama alanı ve artırılmış kapasite, merkezi yükseltme, radyo kaynaklarının uyarlanması ve dinamik konfigürasyonu, daha yüksek güvenilirlik ve daha düşük bakım maliyetleri, gelecekteki genişband uygulamaları için destek ve mobil genişband iletişimine ekonomik erişimi sağlar.

### 3.1.1 RFoF Sistemleri

Fiber üzerinden RF mimarisinde, yüksek frekanslı bir RF sinyalinin ışık dalgalarıyla modüle edilerek iletilmesini kapsamaktadır.

Kablosuz sinyallerin bir optik fiber ana taşıyıcı ağı üzerinden taşınması için en basit sistem, kablosuz sinyalleri, kablosuz taşıyıcı frekansta, RF dalgaları üzerinden baz istasyonunda başka bir frekans işlemine tabi tutulmadan doğrudan iletilmesidir. Bu yapılandırmada, kablosuz sinyaller bir optik taşıyıcı üzerine modüle edilir ve optik olarak modüle edilmiş kablosuz sinyaller, optik bağlantı üzerinden analog bir formatta taşınır. Şekil 3.3'de fiber üzerinden radyo frekansı iletimi verilmektedir.

Fiber üzerinden radyo frekansı iletimi, merkezi kontrol, kablosuz sinyal saydamlığı ve çok bandlı kablosuz desteğin ek faydaları ile basit baz istasyonu tasarımının avantajına sahiptir.



DAC: Dijital Analog Dönüştürücü  
 ADC: Analog Dijital Dönüştürücü  
 RF: Radyo Frekansı  
 E/O: Elektrik/Optik Dönüştürücü  
 O/E: Optik/Elektrik Dönüştürücü  
 Mİ: Merkez İstasyon  
 Bİ: Baz İstasyon  
 Fc: Taşıyıcı Frekans

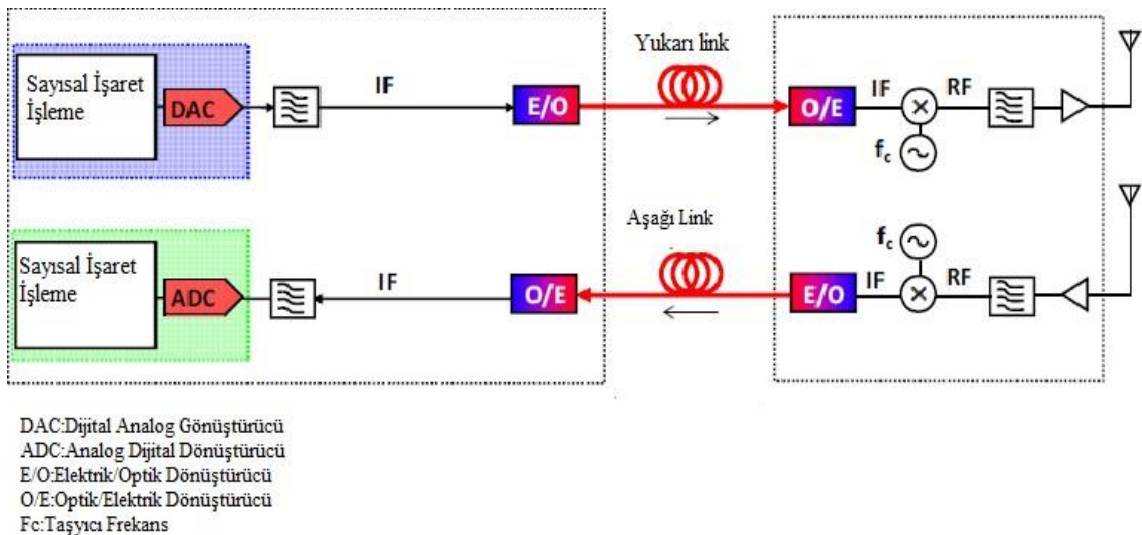
Şekil 3.3 Fiber üzerinden radyo frekans iletimi

Bununla birlikte, bu sistemlerdeki en büyük dezavantajlardan biri, kablosuz sinyaller için, kablosuz taşıyıcı frekansına uyan hızlara sahip optik cihazlara duyulan ihtiyaçtır. Optik olarak modüle edilmiş kablosuz sinyallerin, alınan RF gücünü düşüren ve fiber iletim mesafesini sınırlayan fiber kromatik dağılımında sorun yaşadığı bilinmektedir [16, 17].

### 3.1.2 IFoF Sistemleri

IFoF mimarisinde, frekansı 10 GHz'den az olan RF sinyali taşıyan bir veri, optik bağlantı üzerinden iletilmeden önce doğrudan veya harici modülasyon kullanılarak ışık dalgası ile modüle edilir. Bu nedenle, IF (Intermediate Frequency, Orta Düzey Frekans) frekansından gelen bu sinyalin, uzak anten birimlerine kablosuz olarak iletilmesinden önce RF seviyesine yükseltilmesi gerekir. Buna karşılık, fiber üzerinden IF haberleşme sistemlerinde, kablosuz sinyaller daha düşük bir ara frekansta optik platform üzerinde iletilir ve bu da yüksek hızlı elektronik donanım gereksinimlerini rahatlatır.

IF sinyallerinin optik dağılımı ayrıca azaltılmış bir fiber kromatik dispersiyon etkisine sahiptir. Bununla birlikte, bu, sabit bir yerel osilatör ve frekans çevirme amaçlı karıştırıcılar gerektirdiği için baz istasyonunda daha karmaşık bir anten tasarımına ihtiyaç duyulur.

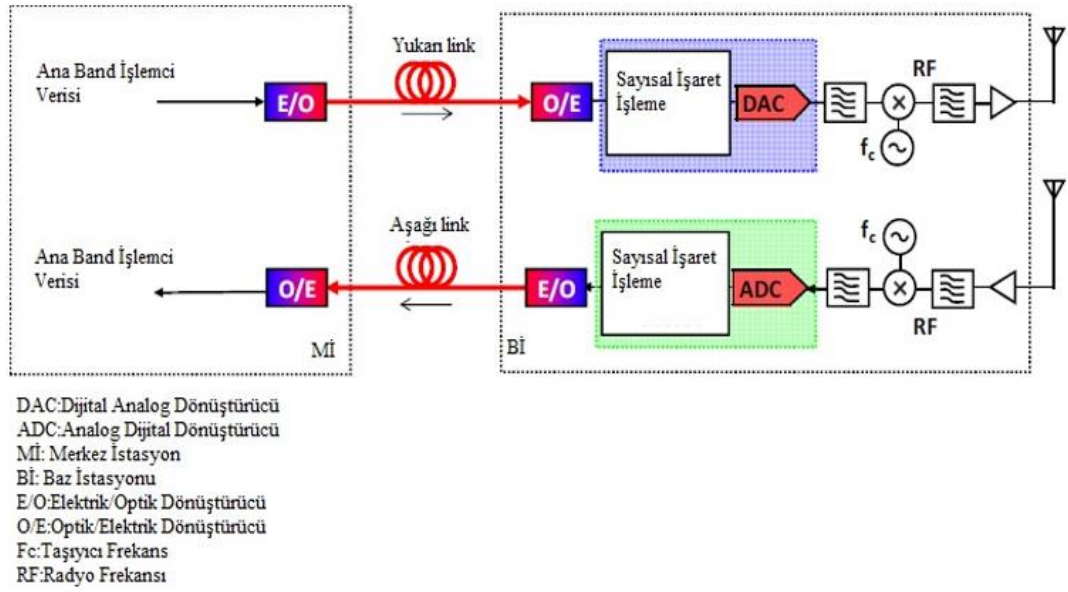


Şekil 3.4 Fiber üzerinden orta düzey frekans iletimi

### 3.1.3 BBoF Sistemleri

BBoF mimarisinde bir ana band sinyali ışık dalgası ile modüle edilir ve optik fiber üzerinden iletilir. Ardından, alıcı tarafında bu temel band sinyali tespit edilir ve dönüştürme teknikleriyle RF seviyesine dönüştürülür.

Şekil 3.5, kablosuz bir sinyalin optik olarak ana band verisi olarak taşındığı ve kablosuz sinyalin tamamen baz istasyonu anteninde islendiği, fiber üzerinden band sinyali iletimi içeren mimariyi göstermektedir.



Şekil 3.5 Fiber üzerinden temel band sinyali iletimi

Bu taşıma seması, verilerin ağırlıklı olarak dijital bir ortamda iletiildiği mevcut optik ağlarla uyumludur. Optik alandaki sadeliğe rağmen, ana band üzerinden taşıma için baz istasyonu anteni, bağlantıların şeffaflığını azaltırken, baz istasyonunda karmaşıklığı artıran kablosuz sinyalleri elektronik olarak işlemek ek donanım bulundurmamak zorundadır.

BBoF semasında, bir esas band sinyali ışık dalgası ile modüle edilir ve optik fiber üzerinden iletilir. Daha sonra, alıcıda bu ana band sinyali algılanır ve dönüştürme teknikleri ile RF seviyesine dönüştürülür. Merkez istasyonu ve uzak baz istasyonu arasında veri iletmek için fiber optik yapılar kullanılmaktadır. Optik fiber, sunduğu geniş band genişliği nedeniyle hem aşağı bağlantı hem de yukarı bağlantı işlemleri



için kullanılır. Merkezi istasyonda yer uydu hattı işletimi sırasında elektrik optik E/O dönüşümü yapılırken, uzak baz istasyonunda optik elektrik O/E dönüşümü bir fotodetektör kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde, yer uydu bağı iletimi sırasında, harici bir modülatör kullanılarak uzak baz istasyonunda E/O dönüşümü gerçekleşir ve O/E dönüşümü, merkez bantta bu sinyalin baz band verilerini almak için daha fazla işlendiği yerdedir.

Son yıllarda, nispeten basit bir baz istasyonu tasarımı korunurken, üstün dijital optik bağlantılardan yararlanan fiber kablosuz uygulama için, kablosuz sinyallerin sayısalla sarılmasına dayanan yeni bir taşıma programı önerilmiş ve gösterilmiştir [18].

### **3.2 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde RoF Mimarisi**

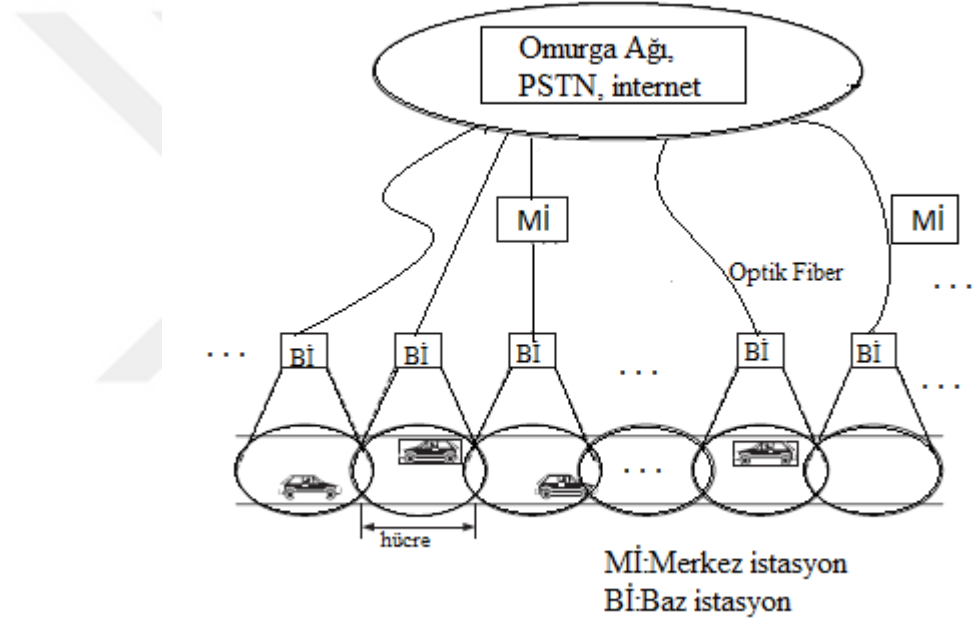
Son zamanlarda mobil iletişim teknolojilerini kullanan akıllı ulaşım sistemlerine olan talep, trafik bilgisi alışverişinde, güvenli, sorunsuz ve rahat sürüş elde edildiği için artmaya devam etmektedir. Bu sistemler, RVC (Road Vehicle Communications System, Karayolu Taşıtları İletişim Sistemleri) ve IVC (Inter Vehicle Communications System, Araç İçi İletişim Sistemleri) olarak sınıflandırılır. RVC sistemi, akıllı ulaşım sistemleri için yol boyunca dağıtılacak olan bir altyapı ağıdır. Gelecek RVC sistemleri için tasarım gereksinimleri, mobil ana bilgisayar başına yaklaşık 2-10 Mbps veri hızının gerekli olacağını göstermektedir [19]. Özellikle, sistem yalnızca sesi, verileri değil aynı zamanda yüksek mobilite koşullarında gerçek zamanlı video gibi multimedya servislerini de desteklemektedir.

Mikrodalga bandlardaki mevcut ve gelişmekte olan mobil hücresel sistemler, GSM, UMTS, LTE ve 5G gibi yüksek hızda bir kullanıcıyı temin edemediğinden, yüksek orandaki data trafiği için 36 GHz ya da 60 GHz band aralıkları düşünülmüştür [19, 20]. Daha yüksek band genişliğine sahip olmalarına rağmen, geleneksel mikrodalga bandlarına kıyasla daha yüksek boş alan yayılma kaybına bağlı olarak çok küçük bir hücre boyutuna sahip olmaktadır. Bu nedenle, bu sistem, uzun yolları ve yüksek kullanılabilirliği kapsayacak şekilde çok sayıda baz istasyonu gerektiği anlamına gelen çok küçük bir hücre ile karakterize edilir. Burada, sistemlerin

maliyetlerinin hızlı bir şekilde basit veri iletimi prosedürünü desteklemesinin planlanması gerekir.

### 3.2.1 Hüresel RoF Mimarisi

Bu mimaride bir yol aracı iletişim sistem ağı oluşturulmak istenilmiştir. RoF teknolojisine dayalı bir yol ve araç arasındaki iletişim sistemi, Şekil 3.6'da verildiği gibidir. Burada bir merkez istasyon, optik fiberler vasıtasıyla daha fazla sayıda baz istasyonu ile birbirine bağlanır ve baz istasyonları, araçlara iletişim bağlantısını desteklemek için yol boyunca yerleştirilir.

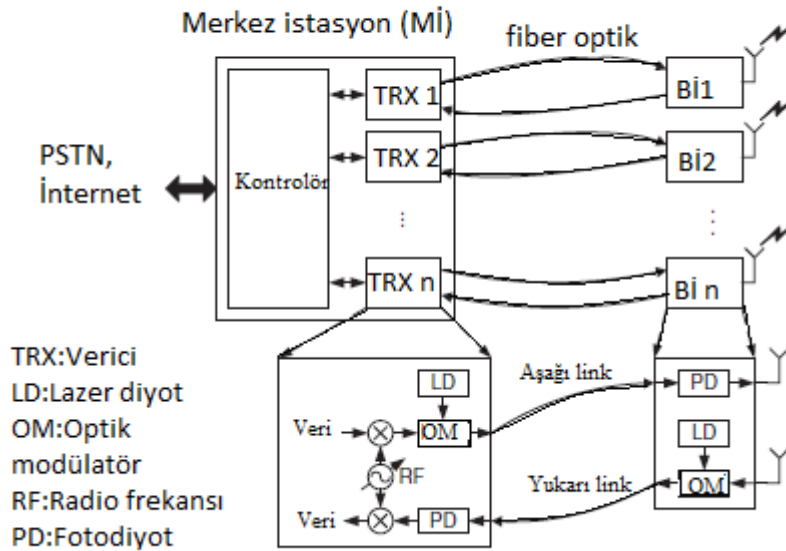


**Şekil 3.6** RoF'e dayalı karayolu araç iletişim sistemi teknolojisi

Bu mimaride, yol bir boyutlu olarak düşünülmektedir. Bir merkez istasyon, sırayla genel aktarmalı telefon şebekesi (Public Switched Telephone Network, PSTN) veya internet gibi omurga ağlarına bağlanır. Her bir baz istasyonu "hücre" olarak adlandırılan bir alanı kapsar ve iki bitişik hücre arasında küçük örtüşen bir alan olduğunu varsayılır. Uzun bir yolu kaplamak için çok sayıda baz istasyonu olması gerekir. Aşağı bağlantı iletimi için (merkez istasyondan mobil ana bilgisayara)

kullanıcı verileri, önce harici bir optik modülatör (External Optical Modulator, EOM) kullanarak optik ışık kaynağını radyo frekansı ile modüle eder.

Bu sinyal, aşağı link optik fiber üzerinden bir baz istasyonuna taşınır, burada optik sinyal kablosuz sinyale dönüştürülür ve baz istasyonundan yayılır. Yukarı bağlantı iletimi için (mobil ana bilgisayardan merkez istasyona), baz istasyonundan alınan kablosuz sinyal, ışık kaynağını modüle ederek optik sinyale dönüştürülür. Daha sonra yukarı bağlantı optik fiber üzerinden merkez istasyona taşınır, burada bir fotodiyot demodüle edilen elektrik sinyalini elde etmek için optik sinyali demodüle eder. Bu mimaride, merkez istasyonlar, baz istasyonları kadar çok sayıda alıcı-vericiye (TRX) sahiptir ve her bir TRX, aşağı bağlantı iletimi için lazer diyot (LD), yukarı bağlantı alımı için bir fotodiyot ve veri akısını sağlamak için ışık kaynağına sahiptir. RF alanındaki baz istasyonu temel olarak bir Fotodiyot, bir lazer diyot, bir optik modülatör ve amplifikatörlerden oluşur. Sistem kaynak yönetiminde esneklik için, her bir alıcı-vericinin ayarlanabilir bir RF osilatörü ile donatıldığı varsayılır.



Şekil 3.7 RoF'e dayalı karayolu araç iletişimi için bir erişim ağı mimarisi

Bu mimaride, sistem, mm-dalga bandındaki sinyalin yüksek yayılım kaybı ve yüksek kullanıcı hareketliliği nedeniyle küçük hücre boyutu ile karakterize edilmiştir. Özet olarak, sistem aşağıdaki özelliklere sahiptir:

Hızlı ve basit veri aktarımı,

Hücreler arası ortak kanal girişiminin olmaması,

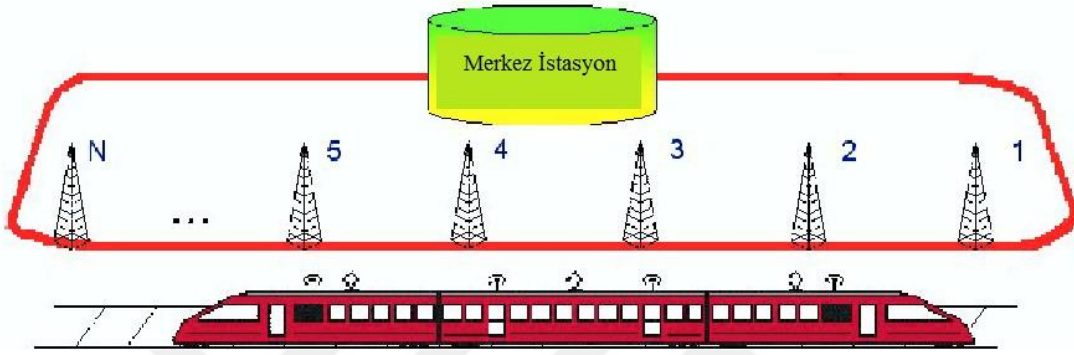
Mobil ana bilgisayarın davranışına göre dinamik band genişliği tahsisi.

### **3.2.2 Hareketli Hücresel RoF Mimarisi**

Günümüzde, yüksek band genişliğine sahip bağlantıları (5 Mb / s / kullanıcı) ve hızlı hareket eden kullanıcıları (300 km / s'lik bir trende) birleştirerek, yeterli bir yüksek kalite servis seviyesini oluşturmak oldukça zordur. Telekomünikasyon şirketlerinin bugün karşı karşıya kaldığı en büyük zorluk, tren gibi yüksek hızlarda hareket eden ulaşım sistemlerine gerekli band genişliğinin ve kalitenin sağlanamamasıdır. Şu anda kullanılan hücresel ve uydu teknolojileri band genişliklerinin sınırlı olmasından ya da fazla gecikmeye sahip olduklarında uygun bir çözüm olarak kabul edilememektedir. Bu nedenle, tren rayları boyunca özel bir hücresel kablosuz ağ yapısı tasarlanabilir. Buradaki en büyük sorun, tren yolcuları gibi hızlı hareket eden kullanıcılarla kombinasyon halinde olan çoğu hücresel ağın bir önemli dezavantajı olan, bir baz istasyondan diğerine atlarken sık sık geçiş, band genişliğini güçlü bir şekilde azaltan çok sayıda paket kaybına neden olmaktadır. Bu eksikliği gidermek için etkili bir çözüm, raylar boyunca monte edilen baz istasyonlarını beslemek için Fiber Üzerinden Radyo kullanan bir optik erişim ağı tarafından sağlanabilir ve bu, "hareketli hücre" konseptiyle birlikte kullanılabilir. Bu mimari aynı zamanda hareketli kullanıcılara genişband bağlantıları sağlamak için FAMOUS (Fast Moving Users, İlk Hareket Eden Kullanıcılar) konseptinin bir parçasıdır [21].

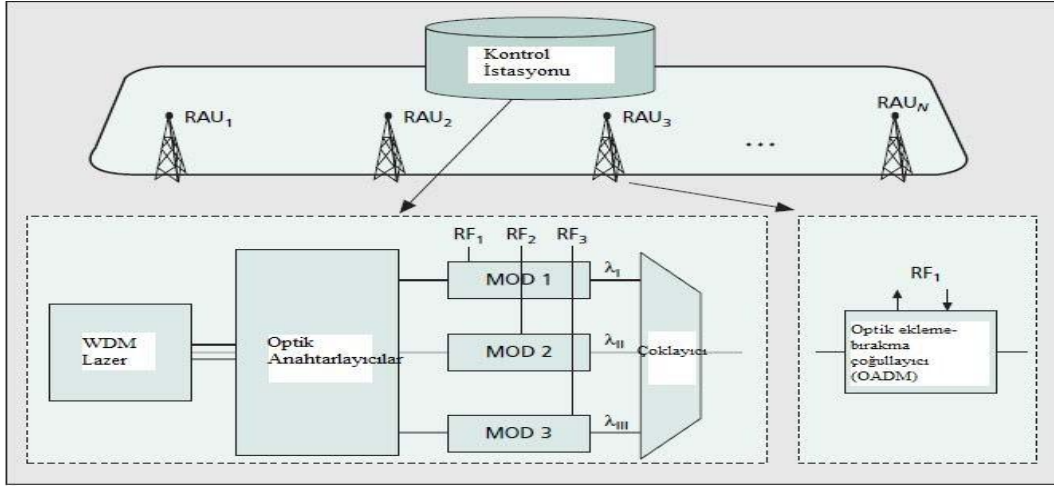
Her şeyden önce, bu hareketli hücreleri uygulamak için gerekli olan yeniden yapılandırmanın tamamen optik alanda gerçekleştiğini vurgulanmaktadır. Bir halka ağı sayesinde, aynı fiber kontrol istasyonu kapsamındaki tüm uzak anten üniteleri (Remote Antenna Units, RAU) ve dalga boyu bölmeli çoğullama

kullanılarak, her RAU özel bir dalga boyuyla ilişkilendirilebilir. Her bir RAU'ya sabit bir dalga boyu atanarak, belirli bir baz istasyonunu çıktısını başka bir uzak anten ünitesiyle verimli bir şekilde değiştirmek mümkündür. Bu bölümde, hemen hemen aynı durumu kontrol eden birkaç antene sahip olan genel durumu ele alınmıştır. Bir antenin erişebileceği tüm RAU'lar daha sonra her biri sabit bir dalga boyunda iletilen başka bir radyo sinyali ile beslenebilir. Hareketli hücre konseptini uygulamak için olası bir yol, Şekil 3.8'de belirtildiği gibidir.



Şekil 3.8 Hareketli hücre mimarisinin uygulanacağı olası tren yolu

Kontrol istasyonunda birkaç optik anahtar bulunmaktadır. Her RAU'da sabit bir optik ekleme-bırakma çoğullayıcı (Optical Add Drop Multiplexer, OADM) takılıysa, her bir RAU'da sabit bir dalga boyu sonlandırılır. Bu durum belirli bir RAU için varsa istenen frekans doğru dalga boyuna yerleştirilir. Bu, bir WDM lazer ile birlikte bazı optik anahtarların kullanılmasıyla yapılabilir. WDM lazer, istenen dalga boylarını içeren bir ışık ışını üretecektir. Tüm ışın bir optik anahtara gönderilir ve doğru dalga boyları farklı RF modülatörlerine geçirilir. Belirli bir dalga boyunu doğru RF sinyali ile modüle etmek için, bu dalga boyunun optik anahtarın doğru çıkış portunu terk etmesi gerekir. Şekil 3.9'da kontrol merkezindeki hareketli hücreler mimarisi verilmiştir. Sonuç olarak, RF modülatörlerinden çıkan modüle edilmiş dalga boyları çoğullanır ve optik fiberden sağ RAU'ya iletilir. OADM sahip RAU, bilgilerini RF1'de iletir.



**Şekil 3.9** Kontrol merkezindeki hareketli hücreler mimarisi

Tren yolcularına geniş bantlı internet erişimi sağlamak için hücresel bir yol kenarı çözümü geliştirilmiştir. Çözüm, kanallar boyunca uzak anten ünitelerinin maliyetlerini düşürmek için fiber üzerinden radyo şebekesine dayanır. Merkez istasyonu için önerilen optik anahtarlama mimarisi ile hareketli hücrelerin tamamen optik alana yerleştirilmesi ve bunun RoF ağının kontrol istasyonundaki bazı optik anahtarlarla yapılması mümkündür.

### 3.3 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde RoF Yapıları

Radio over Fiber, akıllı ulaşım sistemleri için yüksek kapasiteli geniş band erişiminde yeni bir gelişmedir. Toplam kapasite, RoF kullanarak 1 Gbps'ye kadar çıkabilir. RoF'de sunulan "Pico hücreleri", istatistiksel çoğullamada olduğu gibi, çok sayıda kullanıcı için band genişliği kullanımını artırabilir [22]. Konsept, hareketli kullanıcının hızı ve yönü ile senkronize olan uyarlanabilir bir hücresel tekniği açıklamaktır. Önerilen hareketli genişletilmiş hücre kavramı, aynı veri içeriğini birden fazla fiziksel hücreden iletmek için kullanıcı merkezli sanal bitişik hücre grupları kullanır. Hareketli Genişletilmiş Hücre, sanal çok hücreli alanı yeniden yapılandırmak için bir anahtar yapısı kullanır. Yeniden yapılandırma, kullanıcının mobilite modeline bağlı olarak gerçekleşir, böylece sanal anten grubu kullanıcılarla birlikte hareket eder. Bu hareketli genişletilmiş hücre konsepti kullanılarak, sıfır paket kaybıyla 60 GHz'de 100 Mbps'nin üzerinde bir kapasiteye ulaşabilir.

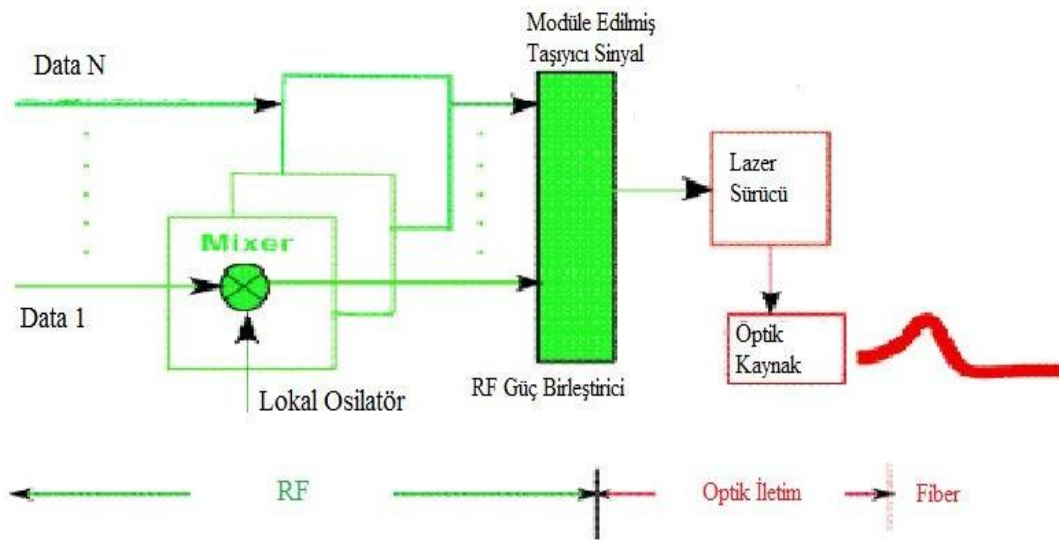
Son zamanlarda, geniş bir bölgedeki mikro hücrelerin optik fiberlerle bağlandığı ve radyo sinyallerinin baz istasyonları ve merkez istasyonları arasında bir optik fiber bağlantısı üzerinden iletildiği optik fiber mikro hücreli sistemler dikkat çekmektedir [1]. Böyle bir sistemde, her bir mikro hücreli radyo portu, muhtemelen önceden mevcut olan bir makrosel bölgesinde yer alan, merkezileştirilmiş bir radyo ve kontrol ekipmanı ile bir RF fiber optik bağlantıyla bağlanan basit ve kompakt bir optoelektronik tekrarlayıcıdan oluşur. RF uzak anten birimleri kullanılması, herhangi bir radyo portu donanımını değiştirmeye gerek duyulmadan, sistem frekans planında veya modülasyon formatındaki değişikliklerin merkezi bir yerde yapılmasını sağlar.

Uzak anten birimleri, hızlı devir, dinamik kanal tahsisi ve çeşitlilik birleştirme gibi sistem özelliklerinin sağlanmasını da kolaylaştırmaktadır. Bu sistem, yüksek band genişliği sağlamak için mikro ve pikosellerden geniş ölçüde faydalanacaktır. Birçok baz istasyonunda çok sayıda baz istasyonu monte edilebileceği için bu tür mikro hücreli sistemler frekans sınırlama problemini çözebilir. Çok düşük güç seviyesi, hali hazırda baz istasyonlarında kullanılan pahalı frekans çoklamaları veya yüksek güç amplifikatörleri ihtiyacını ortadan kaldırır. Düşük anten yüksekliği nedeniyle sınırlı koruma, diğer hücrelerden gelen kanal parazitini büyük ölçüde azaltır [4]. Radio over fiber sistemleri, günümüzde, gelişmiş hücresel kapsama alanları, iç mekan binaları ve alışveriş merkezleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. RoF kavramı ve avantajları yeni olmasa da hem optik hem de kablosuz iletişim alanındaki son gelişmeler ve daha fazla kapasite için artan talep, mevcut ve gelecek teknolojilere olan ilgiyi daha da artırmıştır [12, 23].

RoF sisteminde çift yönlü veri aktarımını elde etmek için çeşitli yöntemler uygulanabilir ve çoğullama teknikleri bunlardan bir tanesidir.

#### 4.1 Alt Taşıyıcılı Çoğullama, SCM

Alt taşıyıcı çoğullama (Sub Carrier Multiplexing, SCM) farklı iletişim sinyallerinin, tek bir optik fiber boyunca aktaracak şekilde birleştirmek için kullanılan bir yöntemdir. SCM'nin önemli bir avantajı, mikrodalga cihazlarının optik cihazlardan daha stabil olmasıdır. Bir mikrodalga osilatörünün kararlılığı ve bir mikrodalga filtrenin frekans seçiciliği, optik benzerlerinden çok daha iyidir. Ek olarak, RF osilatörlerinin düşük faz gürültüsü, RF alanındaki tutarlı tespiti optik uyumlu tespiti kolaylaştırır ve gelişmiş modülasyon formatları kolayca uygulanabilir. Analog kablolu televizyon fiber optik sistemlerde SCM teknolojisinin uygulama alanları arasında yer alır [14].



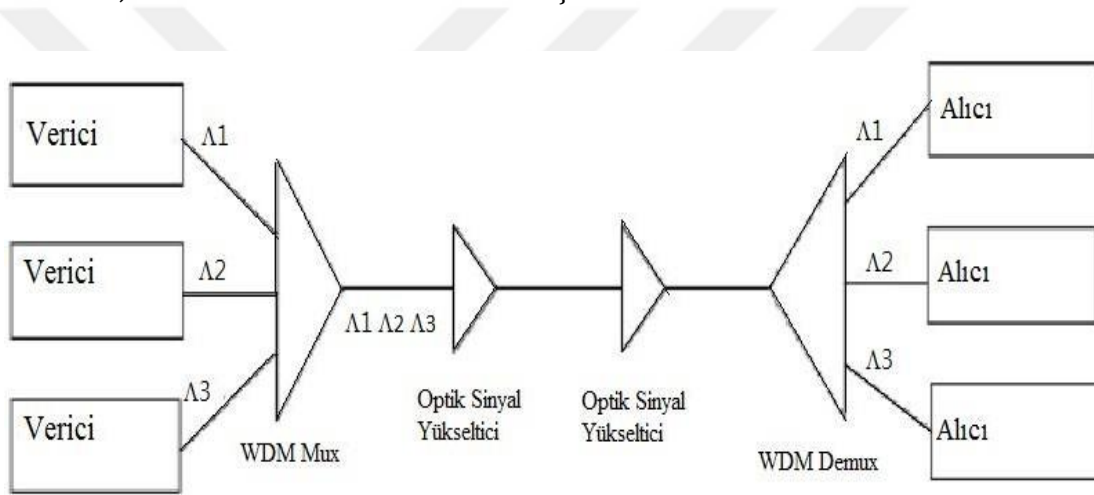
Şekil 4.1 SCM şematik diyagramı



Alıcı hassasiyetinin, sinyal dalga biçiminde bozulma ve kanallar arası karışma içermediğine dikkat edilmelidir. Sinyal dalga şekli bozulması, RF devrelerinin ve optik modülatörün, ideal olmayan transfer fonksiyonu, kromatik dağılım, kendi faz modülasyonundan kaynaklı olabilir [24].

#### 4.2 Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama, WDM

Dalga boyu bölmeli çoğullama (Wavelength Division Multiplexing, WDM), farklı fiberlerden gelen sinyalleri, farklı dalga boylarıyla tek bir fiberde birleştiren pasif cihazlardır. Sinyalleri oluşturan veriler modüle edildikten sonra benzersiz renk bandında iletilir. Şekil 4.2’de WDM metodu kullanılarak yapılan bir optik haberleşme kanalının diyagramı görülmektedir. RoF uygulamalarında WDM kullanımı, son zamanlarda önem kazanmıştır.



Şekil 4.2 WDM haberleşme diyagramı

WDM, fiber ağın band genişliğinin etkin şekilde kullanılmasına olanak sağlar. Bu sistemler tek bir fiber üzerinden 1 Tb/s'nin üzerinde kapasiteye ulaşabilir. Aynı zamanda, tek bir kanaldaki bit hızları 10 Gb/s'ye yükselebilir ve 40 Gb/s kanal oranlarında çalışan sistemler ticari olarak temin edilebilir hale gelmiştir. WDM'deki kanal aralığı 50 GHz'e, hatta 25 GHz'e düşürülebilir ve böylece yüzlerce kanal kullanımı mümkün olabilir. Bununla birlikte, kanal aralığı 100 GHz yerine 50 GHz'e düşürülürse, sistemlerin doğrusal olmayan etkilerden dolayı 40 Gb/s'de çalışacak şekilde yükseltilmesi daha da zor olacaktır [25]. WDM teknolojisi sayesinde mevcut fiber optik ağdaki band genişliği iki katına çıkarılabilir. Mevcut

kablo bağımsız iki ağ bağlantısına ayrılır. Böylece yeni kurulumlarda fiber kablo ve konnektörlerden tasarruf edilebilir.

WDM'nin tasarımı, dar spektral emisyon bandlarına sahip çeşitli optik kaynakların seçilmesi gibi bazı gereksinimleri içerir. En basit yöntem, kendi dalga boyunda yayılan bir dizi bireysel lazer seçilerek yapılabilir. Optik kaynakların seçilmesi işlemi, az sayıda dalga boyu kanalı gerektirir, ancak birçok dalga boyu taşıyan bağlantılar için hantal olabilir. WDM ağının uygulanması için birçok pasif ve aktif bileşenin bir kombinasyonuna ihtiyaç vardır. Pasif ve aktif bileşenler arasındaki fark pasif bileşenlerdir ve yetenekleri sınırlıdır, çünkü pasif bileşenlerin çalışması için harici bir kontrol gerektirmezken aktif bileşen kontrol edilebilir ve geniş bir ağ yeteneğine sahiptir. WDM, ağın basitleştirilmesine katkıda bulunur. Bu yöntemle, ayrı ayrı baz istasyonlarına farklı dalga boyları tahsis edilir. Böylece, ağ basit olacak ve sinyal yükseltmeleri daha kolay yapılabilir hale gelecektir.

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing, Kalın Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama) ve DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing, Yoğun Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama) olmak üzere iki tür WDM mimarisi söz konusudur [26, 27]. Tipik olarak, CWDM sistemleri, 1470 ile 1610 nm arasında 20 nm ile ayrılan sekiz dalga boyu sağlar. CWDM kanalını 16'ya çıkarılması için 1310 nm pencere kullanılarak dalga boyu sayısı arttırılabilir. CWDM'nin avantajlarından biri, optik malzeme maliyetinin aynı DWDM optik malzeme maliyetinin 1/3'ü kadar olmasıdır. Bu, CWDM'nin DWDM'den daha fazla tercih edilmesini sağlar. CWDM, DWDM'nin temel yeteneklerini, daha düşük maliyet ve kapasite ile eşleştirebilir. Tipik olarak, kısa mesafeli iletişim için CWDM kullanılır. Ek olarak, CWDM ekipmanı, DWDM tasarımlarına kıyasla daha kompakt ve uygun maliyetlidir.

DWDM ağ sistemleri 0,4 nm'den daha az boşluk içeren 96 dalga boyu sağlar. DWDM, dalga boylarının birbirine sıkıca sıkıştırıldığı uzun mesafeli iletim için kullanılır. Erbium katkılı fiber amplifikatörler (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), DWDM sisteminin binlerce kilometre boyunca çalışmasına yardımcı olabilir. CWDM, mesafenin binlerce kilometreye ulaştığı uzun mesafeli iletimde uygulanmaz, böylece genel sistem bileşenlerinin daha basit olması gerekir.

Bu, özellikle ilerleme mesafesindeki bazı sınırlamalar olmasına karşın, daha az maliyet uygulamasına yol açar.

### 4.3 WDM Uygulaması ve Analizi

Bu çalışmada, WDM teknolojisi kullanılarak RoF üzerinden sinyal iletiminin sağlanması amaçlanmıştır. OptiSystem 7.0 ve OptiSystem 14.0 simülasyon programı ile iki verici düzeneği hazırlanmış ve sinyal üreticinde elde edilen sinyaller, WDM tekniği kullanılarak optik fiber üzerinden alıcı devreye aktarılmıştır.

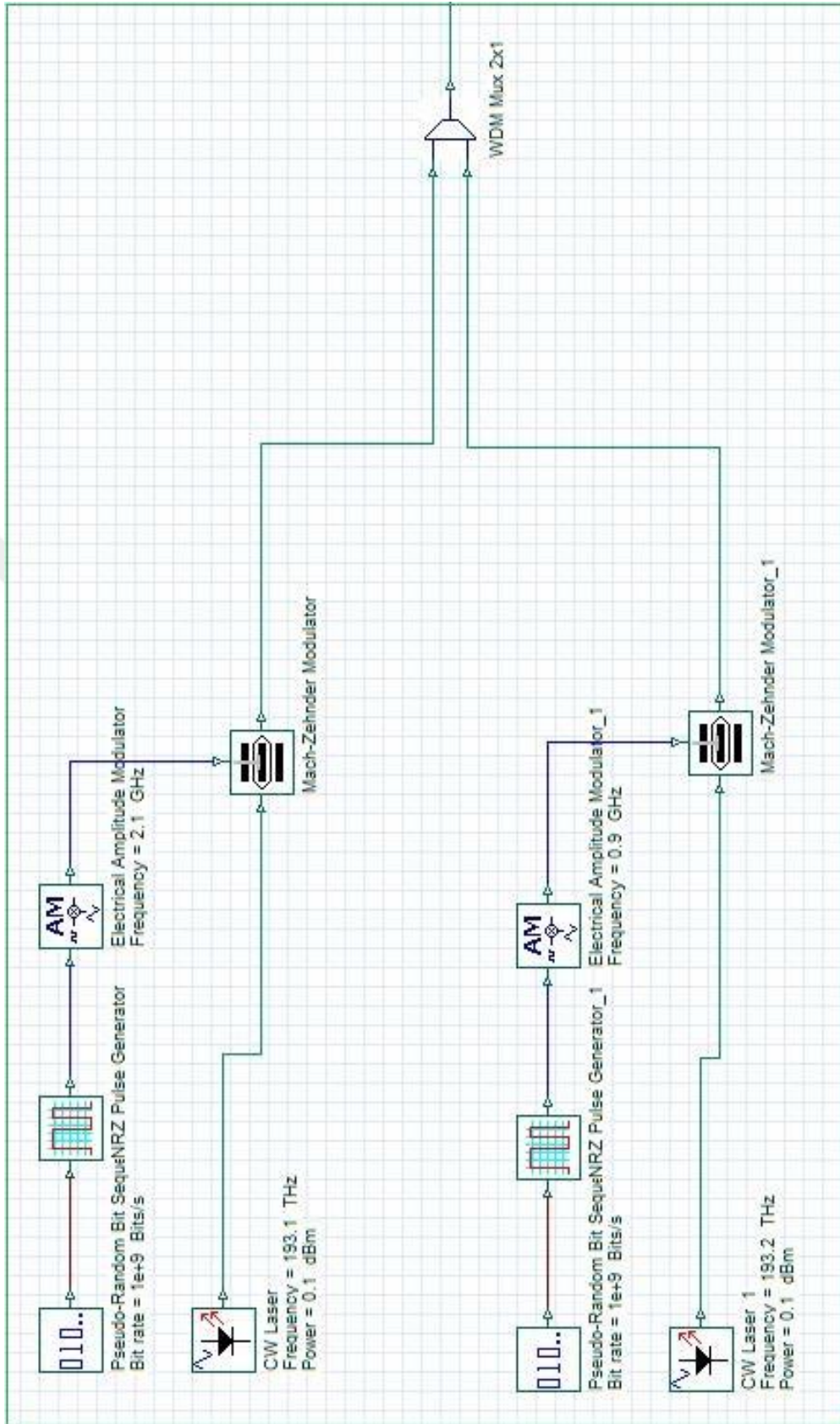
Alıcı devrede bulunan WDM Demux ile birleştirilerek tek sinyal haline getirilen optik sinyal, yeniden ayrılarak iki sinyal haline getirilmiştir. Fotodedektör ile kontrol edilen sinyaller, kuvvetlendirilerek filtreden geçirilmiştir. Sinyallerin göz diyagramları ve maksimum kalite faktörleri, BER (Bit Error Rate, Bit Hata Oranı) analizörleri ile değerlendirilmiştir. Şekil 4.3'deki düzenekte iki sinyal genlik modülasyonu ile modüle edilerek 193.1 THz ve 193.2 THz'deki iki taşıyıcı sinyal ile WDM mux devresinde birleştirilmiştir. İki sinyal göndermek için, iki sürekli dalga lazeri kullanılmıştır. Basit ve düşük hızlı bir elektrik ağı elde etmek için bir puls üretici gerekli olmuştur. Bir sözde rasgele bit üretici (pseudorandom binary sequence, PRBS), bir Gaussian darbe üreticini çalıştırmak için kullanılmış ve böylece temel band sinyali üretilmiştir. Sinyalin simüle edilmesi için, simülasyon başına veri hızı olarak kanal başına 1 Gbps ayarlanmıştır.

AM modülatör frekansları birinci kanal için 2,1 GHz ve ikinci kanal için 0.9 GHz olarak seçilmiştir. Bu RF sinyalleri lazer ile modüle edilerek optik sinyale dönüştürülmüş ve Mach-Zehnder modülatör ile birleştirilerek WDM girişine gönderilmiştir. Lazerlerin frekansı 193.1 THz ve 193.2 THz seçilmiştir. Genlik modülatörünün ana işlevi, ana band sinyalini RF sinyaline çevirmektir. Ayrılan sinyaller, Mach-Zehnder modülatörün iki koluna gönderilir. Her iki iletim tarafında, sinyallerin fiber optik kablo boyunca gönderilmesini sağlamak için, sinyaller dijitalden analog forma dönüştürülür.

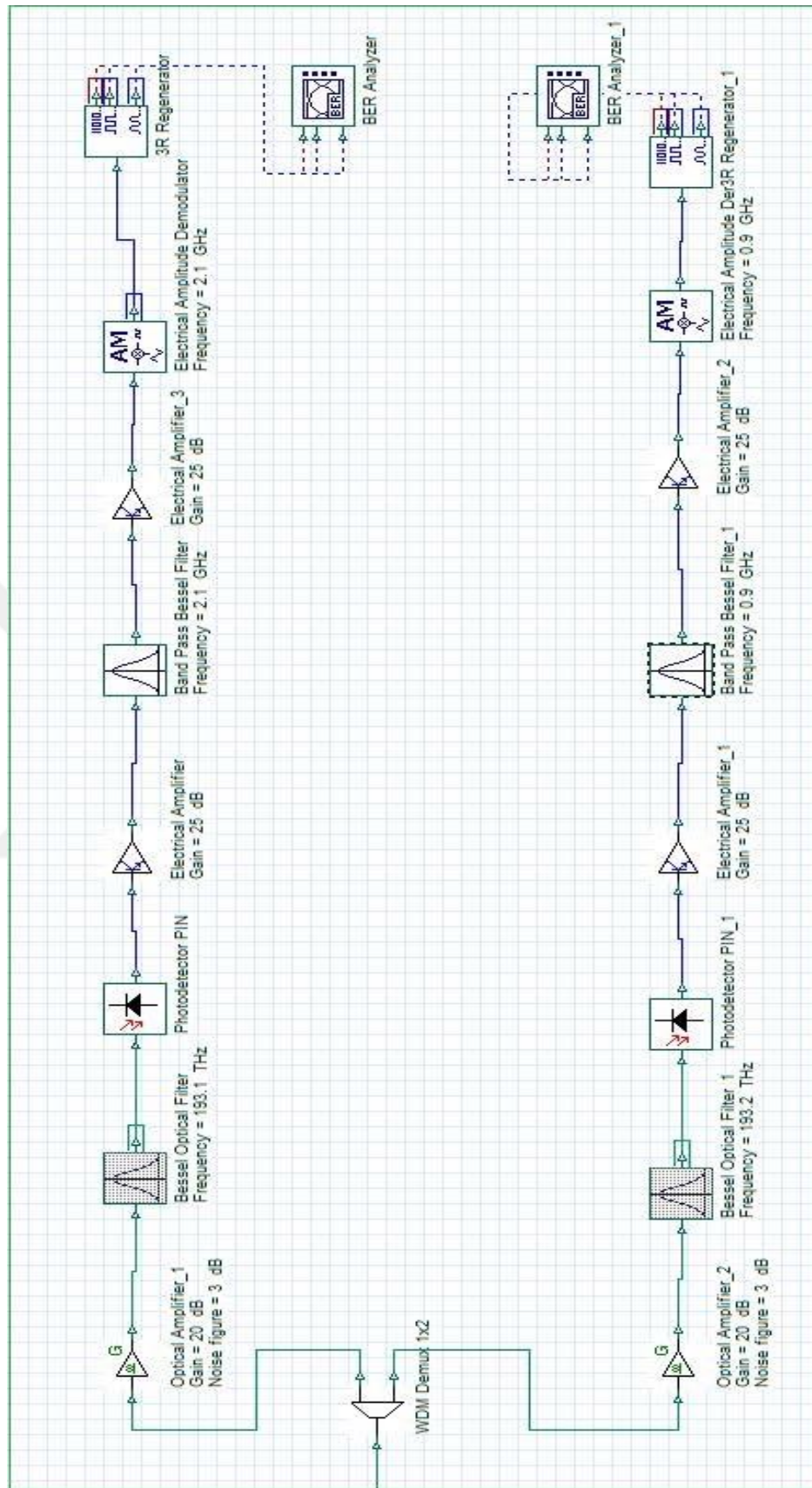
WDM, vericiden gelen tüm sinyalleri çoğaltmak için kullanılır. Optik sinyalin gücünü artırmak için güç 10 dBm olan optik kuvvetlendirici kullanılmıştır. Daha sonra, 30 km optik fiber boyunca, sinyaller iletilmiştir.

Verici tarafta ise optik fiber üzerinden gelen tek sinyal WDM Demux elamanından geçirilerek Şekil 4.4 gösterildiği gibi iki farklı sinyale ayrılmıştır. Ayrıştırılan bu sinyaller, optik yükselticiden ve Bessel optik filtreden sonra fotodedektörle kontrol edilmiş ve optik sinyal elektrik sinyaline dönüştürülmüştür.

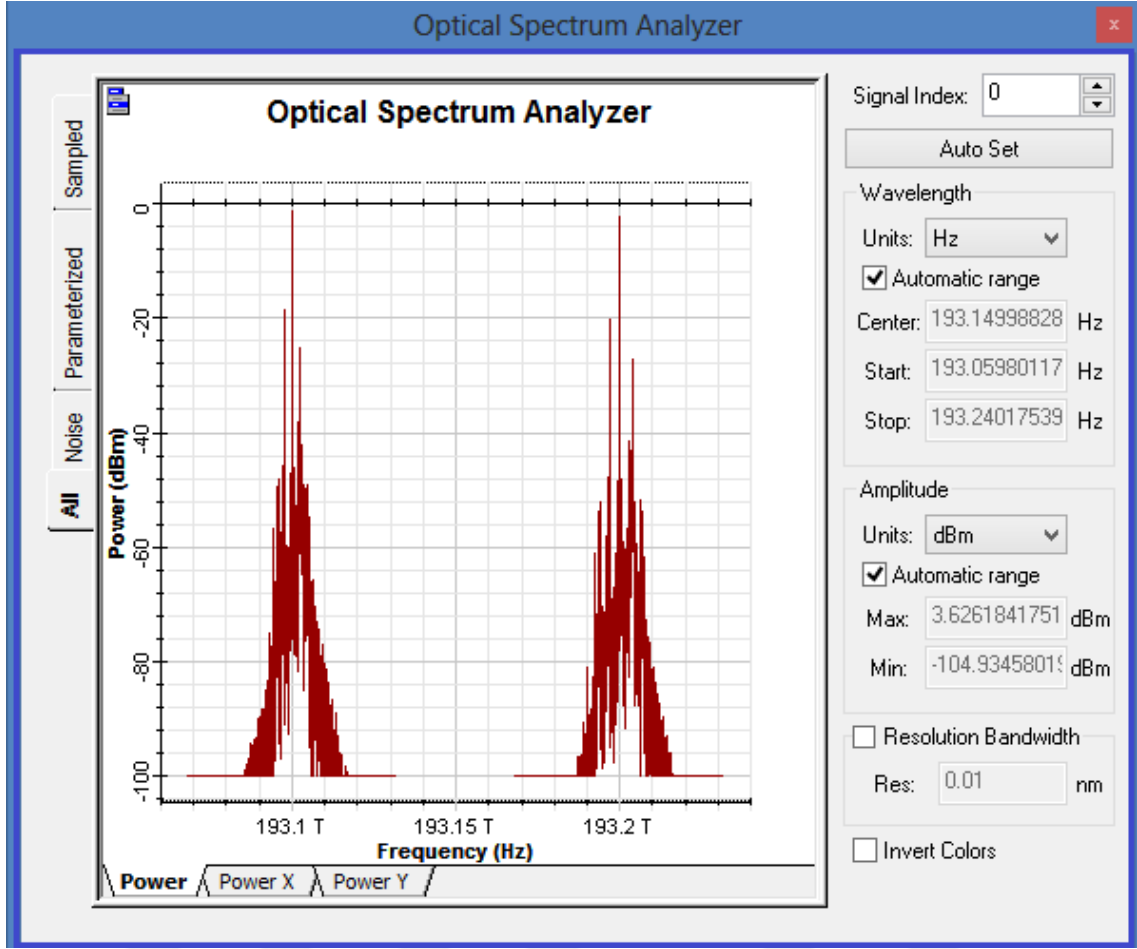
Sonraki işlemde ise elektrik sinyali band geçiren filtreye girmiştir. Burada istenilen aralıktaki sinyal elde edilmiş ve elektriksel yükselteç kullanılarak sinyal kuvvetlendirilmiştir. Daha sonra başta genlik modülatörü ile modüle edilen sinyal, demodülatörden geçirilmiş ve gönderilen sinyal alıcı tarafta bozulmaya uğramadan alınmıştır. Haberleşme sistemlerinde alınan sinyalin kalitesini ölçmek için birçok parametre bulunmaktadır. BER, Kalite faktörü, Eşik değeri ve Göz açıklığı bu parametreler arasında yer almaktadır.



Şekil 4.3 İki sinyalin WDM Mux ile birleştirilmesi



Sekil 4.4 WDM alıcı tarafı



Şekil 4.5 WDM alıcı tarafı

WDM Mux devresinin çıktısı Şekil 4.5’de verilmiştir. Gönderilen iki sinyal 193.1 THz ve 193.2 THz ile taşınmaktadır.

- **BER ( Bit Error Rate- Bit Hata Oranı)**

BER (Bit hata oranı); Gürültü, girişim, bozulma veya bit senkronizasyon hatalardan dolayı oluşan veri içerisindeki bozulan ya da yanlış algılanan bit oranını ifade eder. Bit hata oranı, birim zaman başındaki bit hata sayısıdır:

$$BER = \frac{\text{Gönderilen Hatalı Bit Sayısı}}{\text{Gönderilen Toplam Bit Sayısı}}$$

Örneğin; BER=108, 100 milyon bit gönderildiği zaman 1 bitin hatalı olmasıdır. BER ile veri iletimi için farklı sistemlerin kalitesini karşılaştırmak mümkündür. Bit hata oranı aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir.

$$BER = nc = NB \quad (4.1)$$

Burada  $nc$  , hatalı olarak alınan bitlerin sayısı ve  $Nb$  ise tanımlanan sürede alınan toplam bitlerin sayısıdır [28]. Modern haberleşme ağları için veriler, paket adı verilen daha büyük bloklar şeklinde kullanılır. Paket, ağ tipi tarafından seçilebilecek veya belirlenebilecek belirli sayıda bit içerir. Yanlış iletilen bitin oluşması tüm paketin bozulmasına neden olur. Hata oranına bağlı olarak büyük miktarda veri kaybedilir. Bu hata ilişkisi,

$$PER = N_{erp} / N_p \quad (4.2)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada  $N_{erp}$ , en az bir yanlış iletilen bitin oluşturduğu iletilmiş paketlerin sayısı ve  $N_p$  ise iletilen toplam paket sayısıdır.

- **Kalite Faktörü ( Q-Faktör)**

Q kalite faktörü, bir analog iletim sinyalinin kalitesini, sinyal/gürültü oranı (SNR) cinsinden ölçer. Bu nedenle, sinyalin fiziksel bozulmalarını dikkate alır. Gürültü, kromatik dağılım ve herhangi bir polarizasyon veya doğrusal olmayan etkiler sinyali bozabilir ve sonuçta bit hatalarına neden olabilir. Başka bir deyişle, Q faktörü değeri ne kadar yüksek olursa SNR o kadar iyi ve bu nedenle bit hatalarının olasılığı o kadar düşük olur. Q faktörü, bir dijital sinyalin kalitesini analog bakış açısıyla karakterize eder. Pratik ölçümlerde bir sinyal seviyesinin gürültü seviyesinden farkı belirlenebilir ve daha sonra hata oranı ve Q faktörü gibi parametreler tahmin edilebilir.

- **Göz Açıklığı (Eye Heigh)**

“Göz açıklığı”, bir osiloskopta iletim sistemi performansını gösteren insan gözü şeklindeki desene benzediği için bu adı almıştır. Belirli bir bitin “1” mi, yoksa “0” mı olduğunun belirlenmesi için en iyi yer, en büyük “göz açıklığı” olan örnekleme aşamasıdır. Göz açıklığı büyüdükçe, “1” ve “0” için sinyal seviyelerinin ortalama değerleri arasındaki fark artar. Bu fark ne kadar büyükse, Q kalite faktörü o kadar



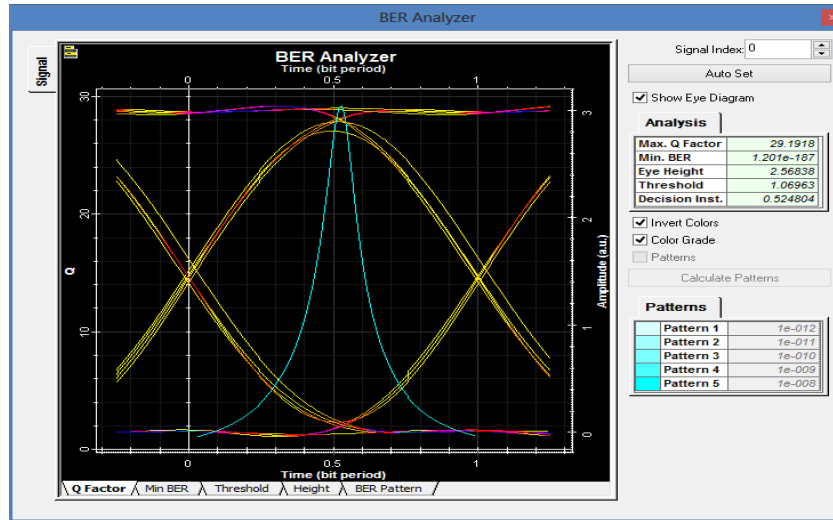
yüksek ve BER performansı o kadar iyi olur. Açık göz düzeni, minimum sinyal bozulmasına karşılık gelir. Semboller arası girişim ve gürültü nedeniyle sinyal dalga biçiminin bozulması göz modelinin [29] kapanması olarak görünür.

- Eşik Değeri (Threshold)

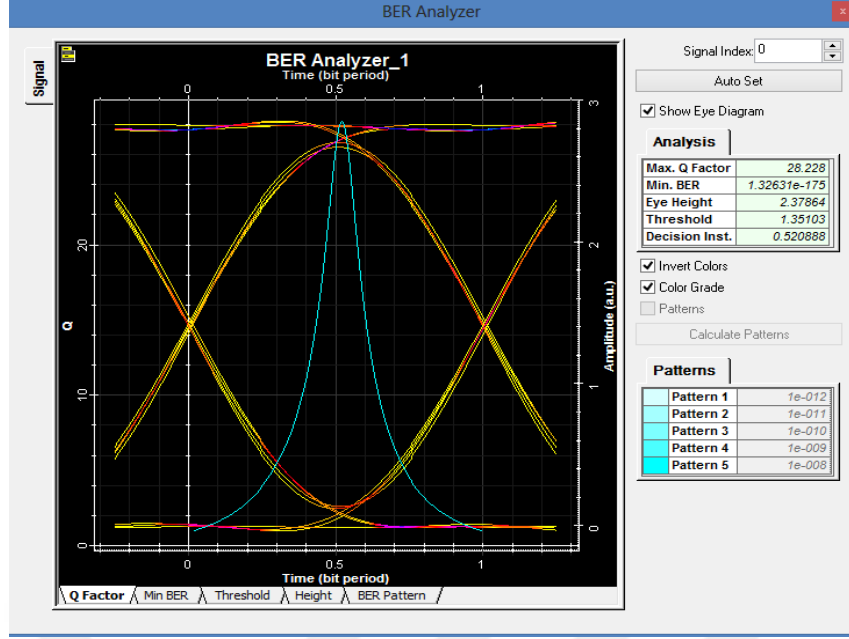
Dijital bir optik telekomünikasyon alıcısında, gönderilen sinyaller bit periyodunun ortasından örneklenir ve örneklenen seviye 1 veya 0 varlığını belirlemek için bir eşikle karşılaştırılır. Threshold, eşik değeri olarak kullanılan bir kavramdır. Bu eşik değeri ortalama olarak belirlenmektedir. Yapılan simülasyona göre Tablo 4.1'deki sonuçlar elde edilmiştir. 2.1 GHz ve 0.9 GHz genlik modülasyonu ile modüle edilen iki sinyal, 193.1 THz ve 193.2 THz lazer ile WDM mux devresinde birleştirilmiş ve daha sonra bu sinyaller demux devresi ile ayrılmıştır.

Tablo 4.1 WDM sonuçları

WDM SONUÇLARI		
Parametreler	1.Alıcı Taraf	2.Alıcı Taraf
Kalite Faktörü	29.191	28.228
BER	2.99e-033	1.32e-175
Eşik Değeri	1.069	1.350
Göz Açıklığı	2.568	2.378



Şekil 4.6 l. Alıcı tarafındaki BER Sonucu

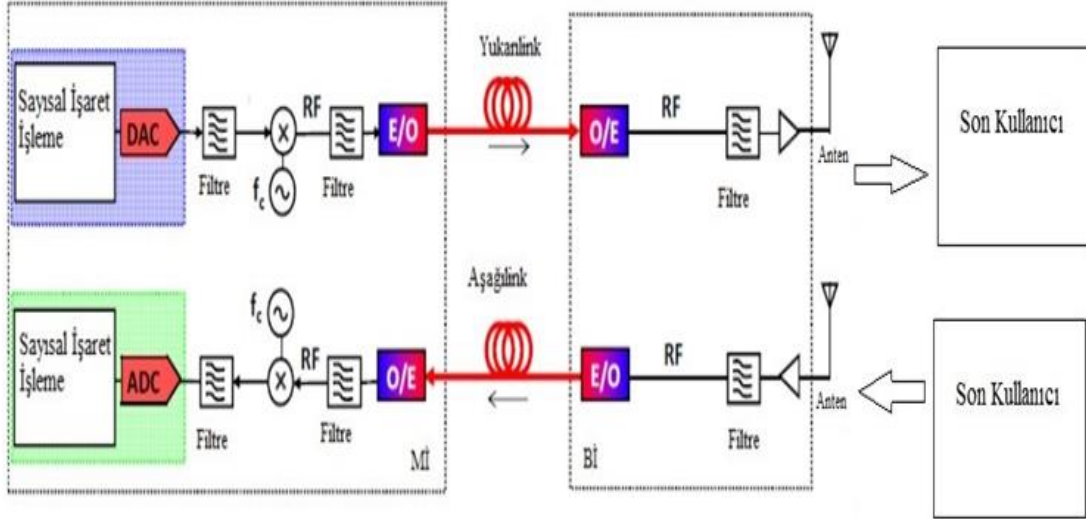


Şekil 4.7 2.Alıcı tarafındaki BER Sonucu

Çıkan Q kalite faktör sonuçlarına göre birinci alıcı taraf 29.191 kalite faktörüne sahiptir. Şekil 4.6'da bu birinci tarafa ait BER analiz sonuçları verilmiştir. Böylece, BER analizörü bu alıcının iyi kalitede bir sinyal aldığını göstermektedir. İkinci alıcı taraf ise 28.228 kalite faktörüne sahiptir ve alınan sinyal kalitesi yüksektir. Şekil 4.7'de ikinci alıcı tarafın BER analiz sonuçları verilmiştir. Göz diyagramının göz açıklığı karşılaştırıldığı zaman ise, ikinci alıcıdan alınan sinyalin birinci alıcıdaki sinyale kıyasla gürültüye karşı daha fazla bağışıklığa sahip olduğu görülmektedir.

#### 4.4 Verici/Alıcı Anten Tasarımı ve Analizi

WDM uygulamasının sonunda aldığımız sinyalin son kullanıcıya iletilmesi için verici ve alıcı anten sistemi tasarlanmıştır. Çalışılacak frekans bandındaki antenlere karar verilmesi ve antenlerin sentezi için Antenna Magus, sentezlenen antenlerin analiz ve optimizasyonu için CST 2019 simülasyon programları kullanılmıştır. Bir bilgi sinyali merkez istasyondan baz istasyonuna kadar fiber optik ile iletilir. Baz istasyonundan son kullanıcıya ise anten kullanılarak iletim yapar. Bu kurulan haberleşme sisteminin yukarı link adı verilen bölümünü oluşturur. Son kullanıcıdan alınan geri bildirim baz istasyonuna yine anten yardımı ile iletilir.



**Şekil 4.8** Son kullanıcıya kadar olan RoF ve anten haberleşmesi

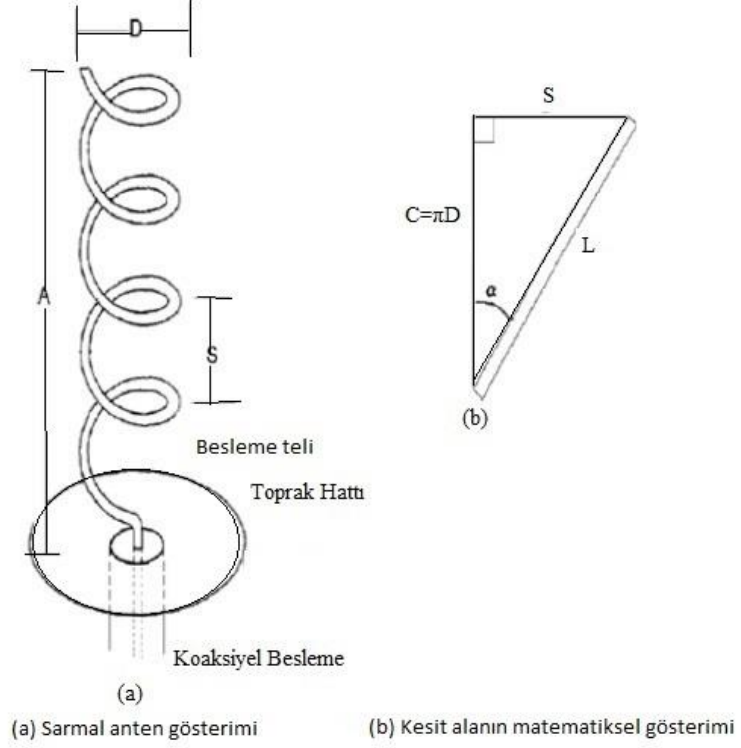
Bu bilgi baz istasyonundan merkez istasyona fiber optik kullanılarak iletilir. Bu modellemede çift yönlü bir iletişim sağlanmış olmaktadır. Şekil 4.8'de yapılan bu iletişimin blok diyagramı verilmiştir.

#### 4.4.1 Verici/Alıcı Helisel Anten Tasarımı ve Analizi

Çoklu band da yayılım yapabilen dört kapılı helisel açık sonlu (Open-ended quadrifilar, QHA) anten tasarlanmıştır. 0.9 GHz ve 2.1 GHz merkez frekansında çalışan bu anten, 2G ve 3G iletim bandlarını karşılamaktadır. Burada verici/alıcı bağlantısının direkt görüş alanında olduğu kabul edilip, gölgeleme ve çoklu yol etkileri ihmal edilmiştir. Quadrifilar helisel anten, broadcast uygulamalarda kullanılan dört tel ve beslemeden oluşan bir yapıya sahiptir.

#### 4.4.2 Helisel Anten Geometrisi

Helisel antenin geometrisine bağlı parametrelerin açıklamaları ve fiziksel gösterimi aşağıda verilmiştir.



şekil 4.9 Helisel anten geometrisi

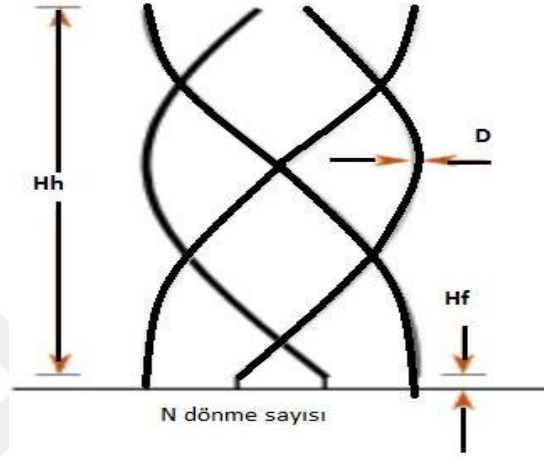
Antenin apı

- S : Dönüşler arasındaki boşluk
- N : Tur sayısı
- C : Anten heliselinin evresi= $\pi \cdot D$
- A : Yatay ya da dikey toplam eksen uzunluğu= $N \cdot S$
- $\alpha$  : Eğim açısı
- L : Dönüş basına tel uzunluğu.

S, C, a ve dönüş basına tel uzunluğu L arasındaki ilişkiler,

- S :  $L \sin a = C \tan a$
- L:  $(S^2 + C^2)^{1/2} = (S^2 + r^2 * D^2)^{1/2}$

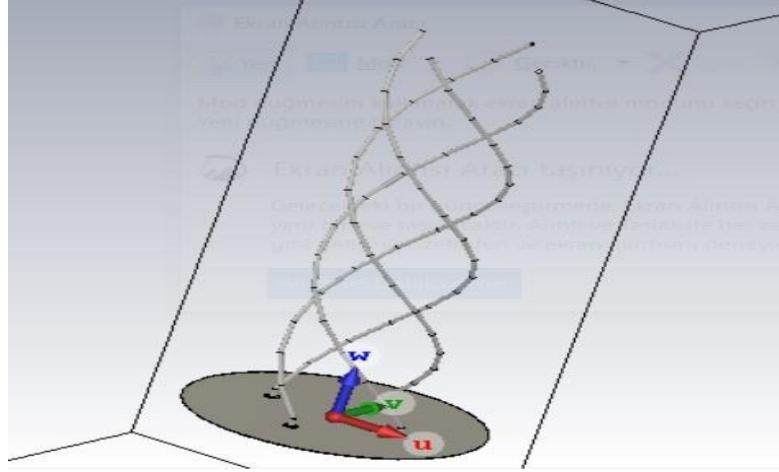
dir. Anten, koaksiyel kablo ile beslenmektedir.



Şekil 4.10 Açık sonlu QHA geometrisi

Dört kapılı helisel anten basit yapısı, küçük boyutu, dairesel polarize demeti nedeniyle izleme ve uydu sistemlerinde kullanılır. Bunun yanı sıra uydu, yer istasyonu, GPS gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılır. Bu anten çevresel olarak eşit aralıklarla (90 derece) yerleştirilmiş üstten veya alttan beslenen dört sarmal telden oluşur. Uygulamada, açık uçlu QHA'da,  $\lambda/4$  veya  $3\lambda/4$ , kısa devre QHA'da ise  $\lambda/2$  ve  $\lambda$  uzunluğu kullanılmıştır. Yukarıda verilmiş olan genel helisel anten parametrelerine ilave olarak QHA'da, Hh, helisel yüksekliği ve Hf, besleme yüksekliği olarak gösterilmektedir. Tanımlanan parametrelerin fiziksel gösterimi Şekil 4.9 belirtilmiştir. Ayrıca yukarıdaki formüllere ek olarak;

Güç [dBm] = 10 x log (Güç [mW]) olarak hesaplanmaktadır. (dBm; mili Watt olarak gücün dB olarak ifadesidir.)



**Şekil 4.11** z eksenini boyunca yerleştirilmiş tasarlanan helisel anten

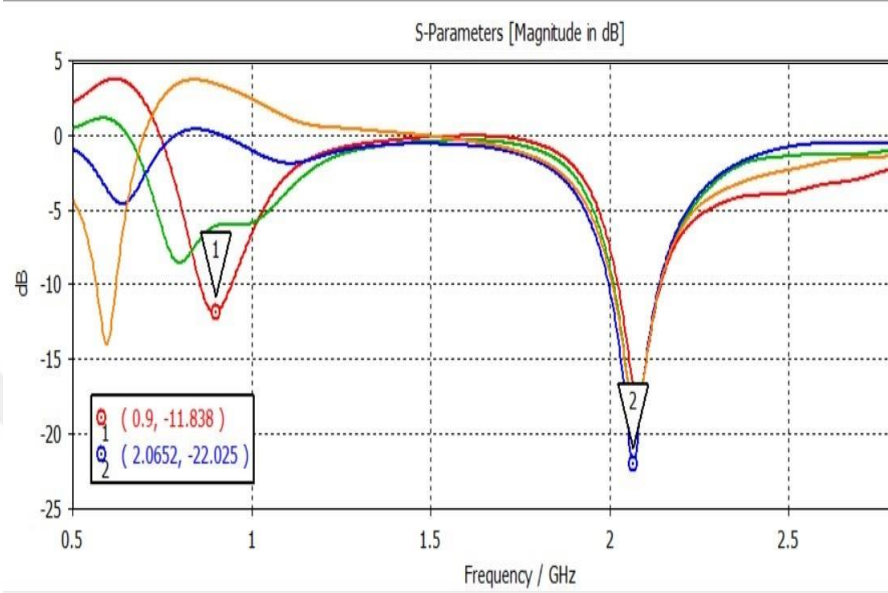
WDM ile gönderilmiş olan 2 farklı sinyalin son kullanıcı tarafından alınması ve son kullanıcının da merkez istasyonla iletişimini sağlamak için anten tasarımı yapılmıştır. 2G ve 3G bandında çalışan bu iki frekansı tek antenle yakalamak için helisel (helix) anten tercih edilmiştir. Antenin CST2019'da oluşturulmuş görseli yukarıdaki gibidir.

Tasarlanan antendeki telin çapı 0.75 mm, tur sayısı 1.08, antenin yarıçapı 9.75 mm, antenin yüksekliği 78.87 mm olarak hesaplanmıştır.

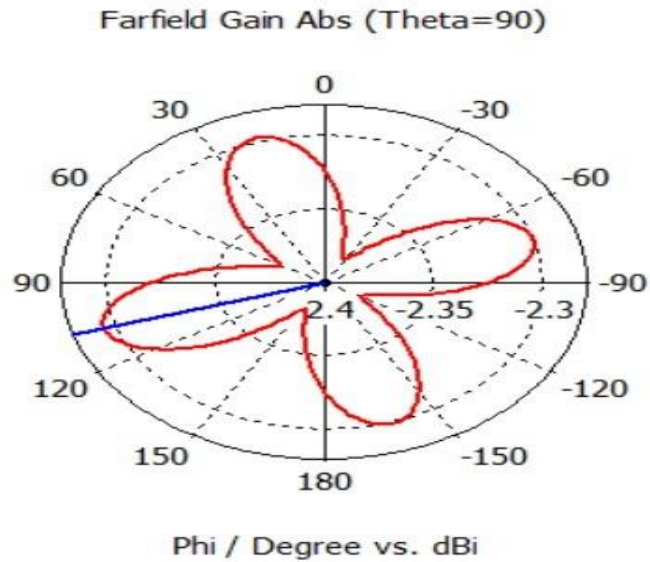
Antenin S parametreleri incelendiği zaman -10 dB'nin kritik nokta olduğu gözlemlenmiştir. 0.9 GHz için bu noktada yüzde 90'lık iletim olup yüzde 10'luk geri yansıma olmaktadır. Sonuçları incelediğimizde anten cevabının 1 GHz'e göre nispeten düşük frekanslarda farklı yerlerde rezonansa girildiği görülmektedir. 2 numaralı işaretleyiciyle gördüğümüz yerde 2.0652 GHz'de -22 dB değerini görmekteki bu, yaklaşık olarak 150 MHz'lik band genişliği sağlamaktadır. 0.9 GHz GSM bandını kapsamaktadır ve 2.1 GHz 3G haberleşmesine alternatif olarak seçilmiştir. 0.9 GHz halihazırda sinyali alabilmektedir ama verirken güçlü bir iletim yapamamaktadır. Düşük band genişliği ve düşük geçirgenliği bulunmaktadır. Ama 2.1 GHz'de oluşan herhangi bir aksaklıkta devreye girmesi için seçilmiştir.

Sabit Theta açısında (Theta=90 derece) değişen Phi değerine karşın kazancı incelediğimizde, ana lob 109 derecedeki kısımda oluşmaktadır. Helisel antenin

dezavantajı olarak neredeyse ana lob kadar genliğe sahip istenmeyen yan loblar (grating lobe) oluşmaktadır. Antenler arası mesafe  $2d > \lambda$  durumunda ortaya çıkmaktadır. Burada herbir renk anten yayılımı sırasında yakalanan frekansları göstermektedir. (Uygulama da kullanılan değerler kırmızı ve mavi ile belirtilenlerdir.)

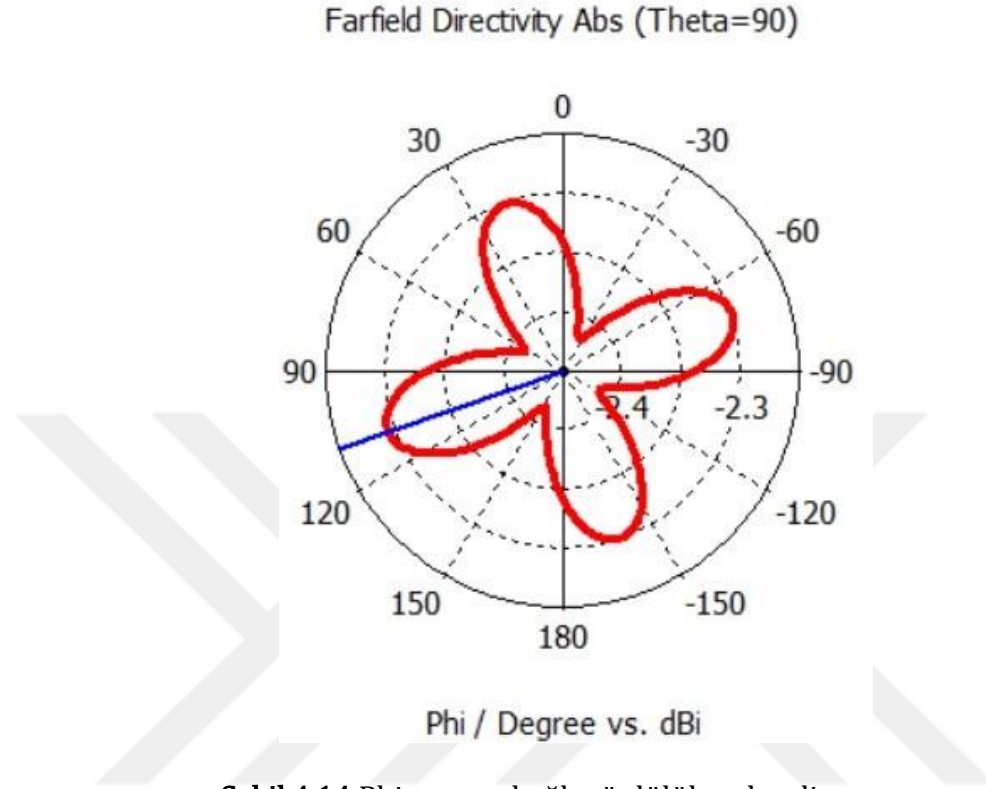


Şekil 4.12 Antenin s parametre cevabı



Şekil 4.13 Phi açısına bağlı kazanç polar diyagramı

Antenler arasında mesafe  $2d < \lambda$  olması ideal durumdur.  $\Theta=90$  derecede ki kazançta baktığımızda Ana lob yönü  $109$  derece, ana lob büyüklüğü  $-2.28$  dBi olarak gözlenmiştir.



**Şekil 4.14** Phi açısına bağlı yönlülük polar diyagramı

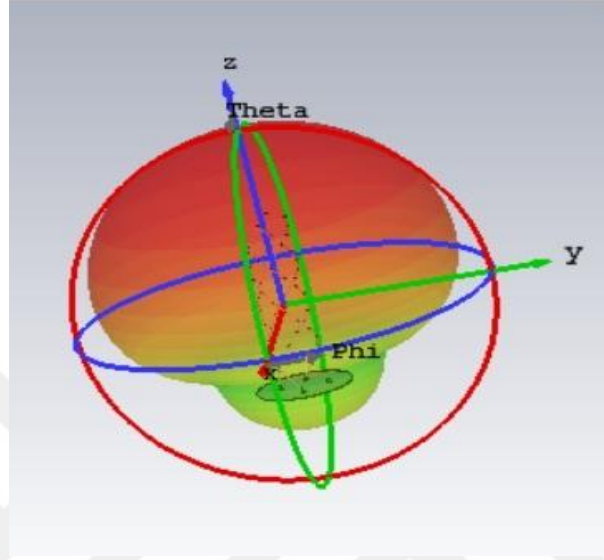
Sabit  $\Theta$  açısında ( $\Theta=90$  derece) değişen  $\Phi$  değerine karşın yönlülüğü incelediğimizde ana lob yönü  $109$  derece, ana lob büyüklüğü  $-2.29$  dBi olarak gözlemlenmiştir.

Kazanç yönlülük arasındaki korelasyon  $\check{G}=e \cdot D$  eşitliğine dayanmaktadır.

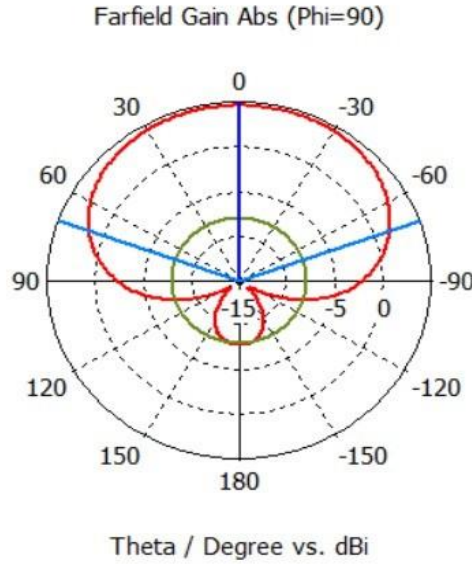
Verim ( $e$ ) yüksek olduğu için ( $1'e$  yakın) kazanç ve yönlülüğün ana lob büyüklükleri yaklaşık olarak aynı olmaktadır. Uzak alan analizi Şekil 4.15'da gösterildiği gibidir. 3 boyutlu uzak alan gösterimi iki durum için de değişmemektedir. Sabit  $\Phi$  açısında ( $\Phi=90$  derece) değişen  $\Theta$  değerine karşın kazanç diyagramı Şekil 4.16'daki gibidir. Esas hüzmeyi belirleyen bu polar diyagramdır. Yarım güç hüzmeye genişliği  $140.1$  derece, ana lob büyüklüğü  $4.59$  dBi, ana lob yönü  $0$  derece olarak gözlemlenmiştir. Sabit  $\Phi$  açısında ( $\Phi=90$



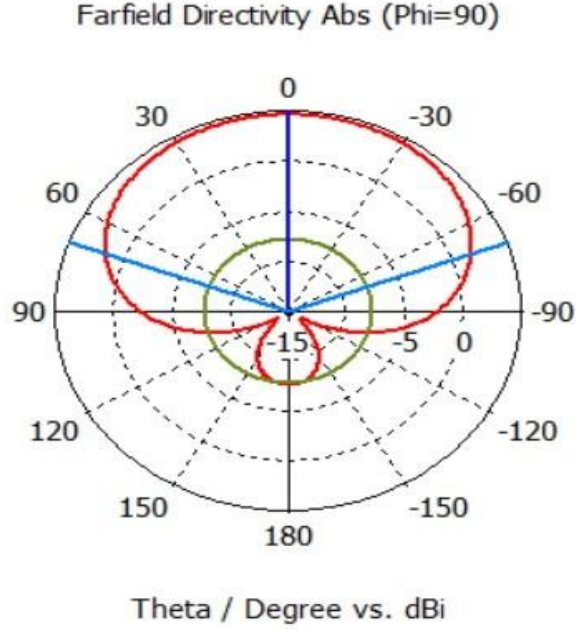
derece) değişen Theta değerine karşın yönlülük diyagramı Şekil 4'17'deki gibidir. Yarım gc hüzme genişliği 140.1 derece, ana lob büyüklüğü 4.61 dBi, ana lob yönü 0 derece olarak gözlemlenmiştir. Antenin kiriş Şekli, polarizasyon saflığı ve giriş empedansı, heliselin çapı ve eksenel uzunluğu, dönüş sayısı, yayılan elemanların çapı ve diğer özellikler ile belirlenir.



Şekil 4.15 3 boyutlu uzak alan sonucu



Şekil 4.16 Theta açısına bağlı kazanç polar diyagramı



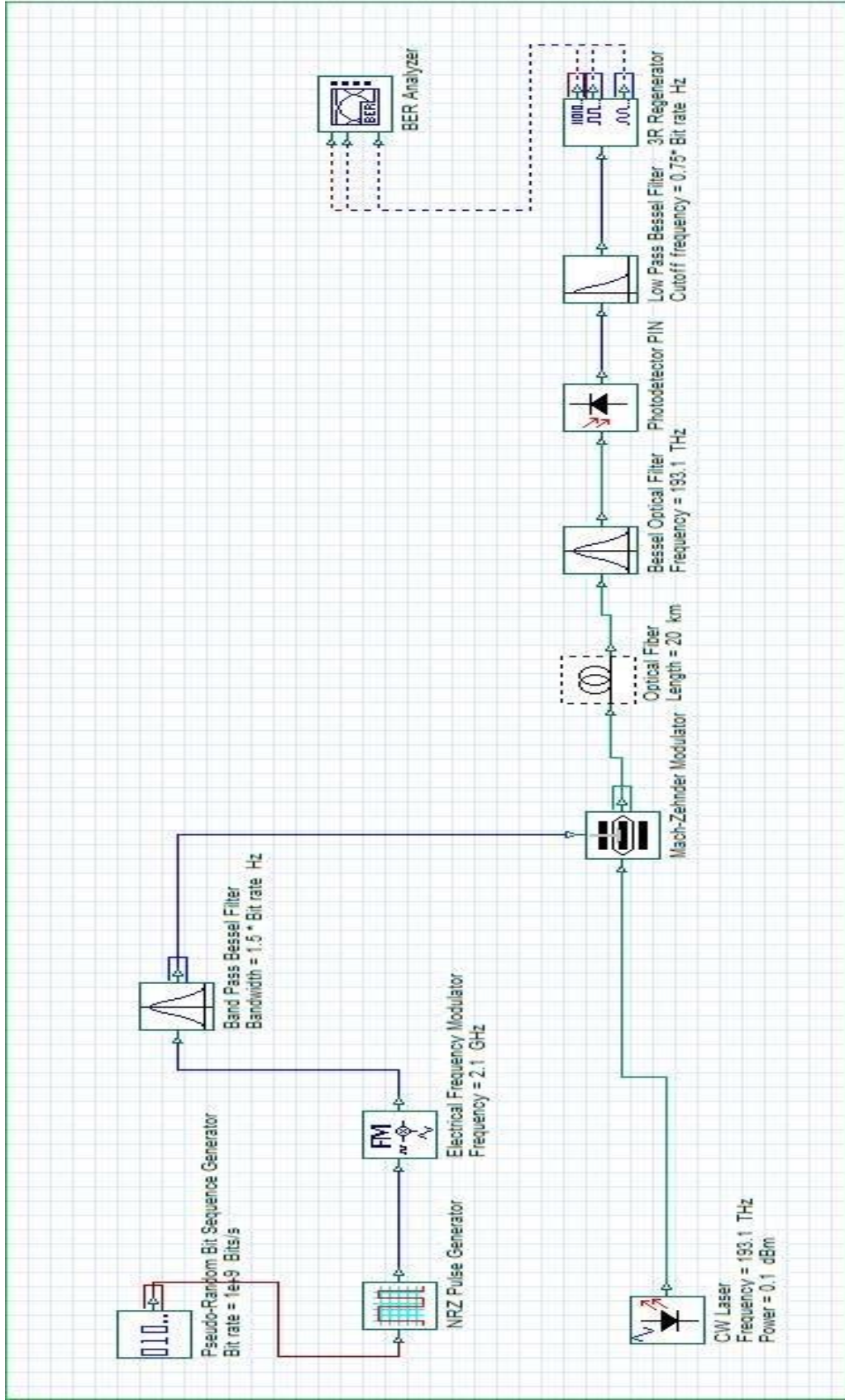
**Şekil 4.17** Theta açısına bağlı yönlülük polar diyagramı

eksenel uzunluğu, dönüş sayısı, yayılan elemanların çapı ve diğer özellikler ile belirlenir. Düşük giriş empedansı (5-15 ohm) düşük ışın genişliği (95-120 derece) spesifikasyonlar için, rezonans çeyrek dalga boyu anten için daha iyi bir seçenek olabilir. Bununla birlikte, daha yüksek empedanslar için (15-70 ohm), üç çeyrek dalga boyunun tercih edilmesi güzel sonuçlar vermektedir.

#### **4.5 RoF Haberleşme Sistemiyle Uyumlu Dairesel Polarize Mikroşerit Anten Dizisi Tasarımı ve Analizi**

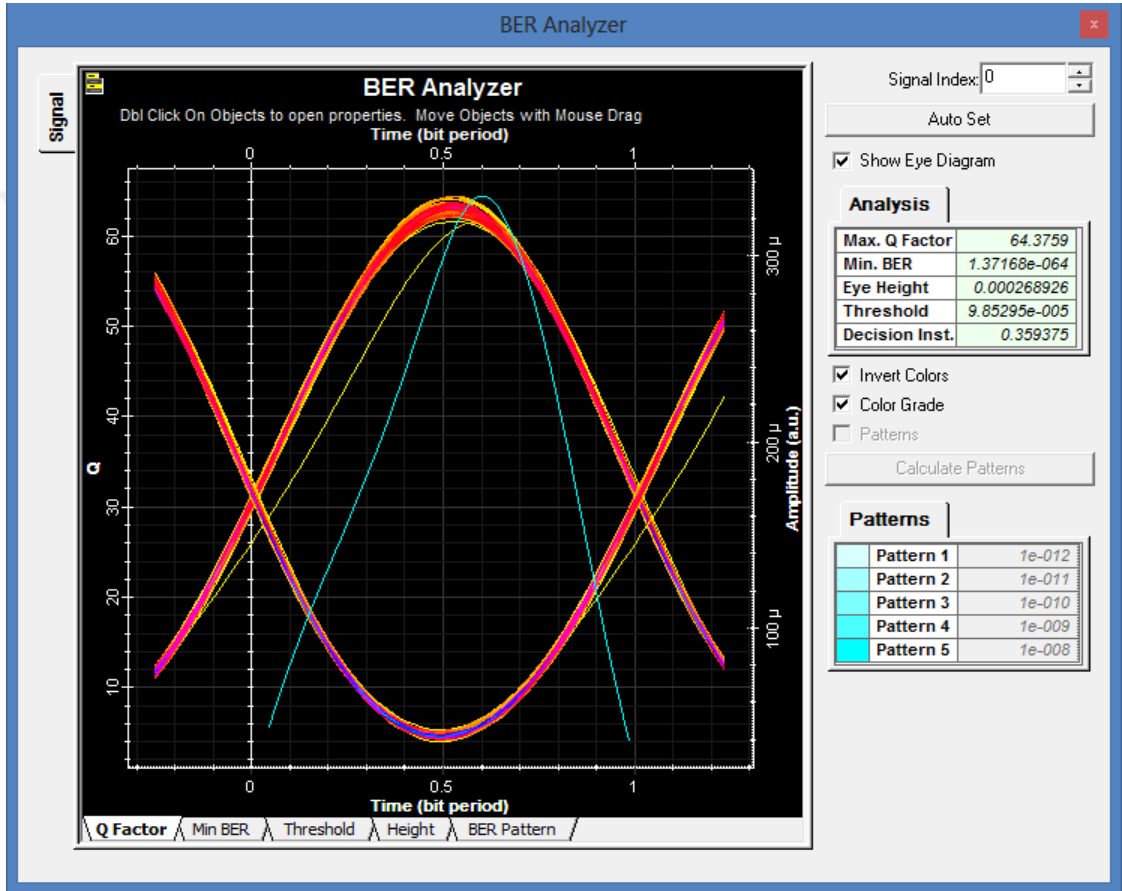
Çalışmanın bu kısmında 2.1GHz de iletim yapan bir radio over fiber haberleşme sistemi kurulması ve sonuçlarının analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda hazırlanan sistem Optisystem 7.0 da analiz edilmiş kalite faktörü, BER çıktıları incelenmiştir. Sistemde ilk olarak bit oranı 1GHz olan rasgele bitler Pseudo bit üretici ile oluşturulmuş daha sonra üretilen bu dijital veri NRZ daren üreticinden geçirilerek binary sinyal elektriksel sinyale dönüştürülmüştür.

Oluşan bu elektriksel sinyal frekansı 2.1 GHz olan FM ile modüle edilmiştir. Filtreden geçirilen sinyal frekansı 193.1 THz olan lazer ile tekrar modüle edilmiş ve uzunluğu 20km olan fiber üzerinden alıcı tarafa gönderilmiştir.



Şekil 4.18 Fiber üzerinden radyo teknolojisinde iletim hattı

Alıcı tarafta ilk önce gelen bu optik sinyal band geçiren optik filtreden daha sonra fotodetektör kullanılarak optik sinyalden elektriksel sinyale dönüş yapılmıştır. Sinyal en son olarak alçak geçiren filtreden geçirilmiş ve BER sonuçları incelenmiştir. Bu çalışmadaki asıl amaç 4G bandında çalışan bir RF frekansının verici taraftan alıcı tarafa en az hata oranı ve en yüksek verim ile iletimini sağlamaktır.



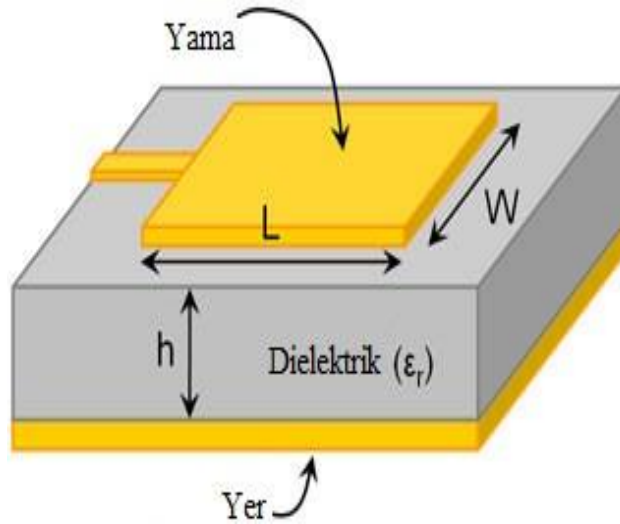
Şekil 4.19 Alıcı taraftaki BER analizi sonucu

BER analizi sonuçları incelendiği zaman kalite faktörünün oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Yani göndermiş olduğumuz sinyal kalitesinin yüksek olması bit hata olasılığının düşük olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte BER oranı ise oldukça düşük gözükmemektedir. Bunun saonucu olarak iletişim sisteminde gürültü, girişim, bozulma gibi istenmeyen etkilerin en az olduğunu göstermektedir.

#### 4.5.1 Dairesel Polarize Mikroşerit Anten Dizisi

Haberleşme frekans bandlarından S-Band (2100 MHz) da tek frekans çalışan anten gereksinimi yine Antenna Magus yazılımı ile sentezlenmiş ve dairesele polarize mikroşerit anten dizisinin CST2019 da analizi ve tasarımı yapılmıştır. Verici/alıcı arasındaki polarizasyon eşlemesi iletim kaybını azaltmak için önemlidir. Alıcı antenin her koşulda vericinin verdiği sinyali en yüksek verim ile alabilmesi amacıyla dairesele polarizasyon kullanılmıştır. Aynı zamanda dairesele polarizasyon ile çoklu yol yansımaları, hava koşulları gibi etkiler en aza indirilir. Mikroşerit antenler hafif, düşük hacimli ve maliyeti ucuz antenlerdir. Düşük kazançla sahiptirler. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için 2X2 lik dizi yapıları kullanılmıştır. İdeal sistemde kaynaktan üretilen enerjinin tamamı yayılmalıdır ancak pratikte empedans eşitsizliği, iletim hattı kayıpları ve polarizasyon kayıpları tüm gücün yayılmasını engellemekte ve geri yansıma oluşturmaktadır.

Mikroşerit antenler GSM, Wi-Fi, Bluetooth ve hücresele haberleşmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük band genişliğine sahip olduğu için diğer bandlarla girişimi minimuma indirmektedir.



Şekil 4.20 Yama Anten Yapısı

Metalik kısım antenin yansımısını sağlayan kısımdır. İletken bir metal (genelde bakır) kullanılmaktadır. Dielektrik malzeme yer ile yamanın arasında belirli bir yükseklik, elektrik iletkenliği ve elektrik geçirgenliği olan malzemedir.

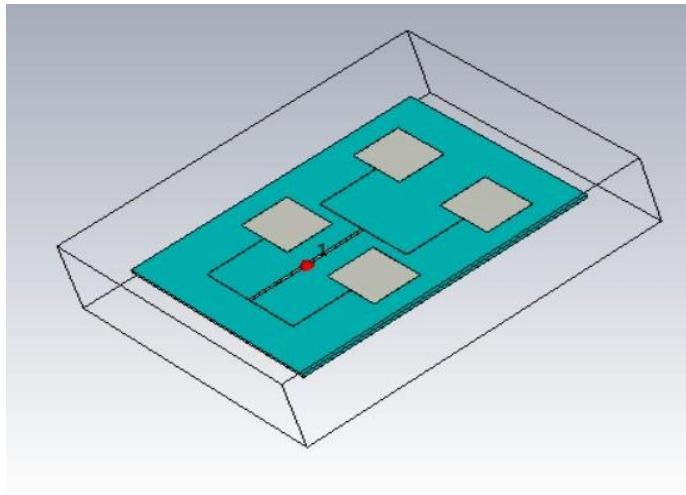
Mikroşerit antenleri uyarmak için birçok farklı besleme yöntemi kullanılmaktadır. Tek bir besleme ya da çoklu besleme ile uyarılabilirler. Şekil 4.20'de gösterilen parametrelerin açıklamaları aşağıda gösterildiği gibidir.

- $W$  : Yama genişliği
- $L$  : Yama uzunluğu
- $h$  : Malzeme yüksekliği
- $e$  : Malzemenin dielektrik katsayısı

Parametrelerin hesaplanması için mikroşerit yapıların genel formüllerinden yararlanılmıştır.

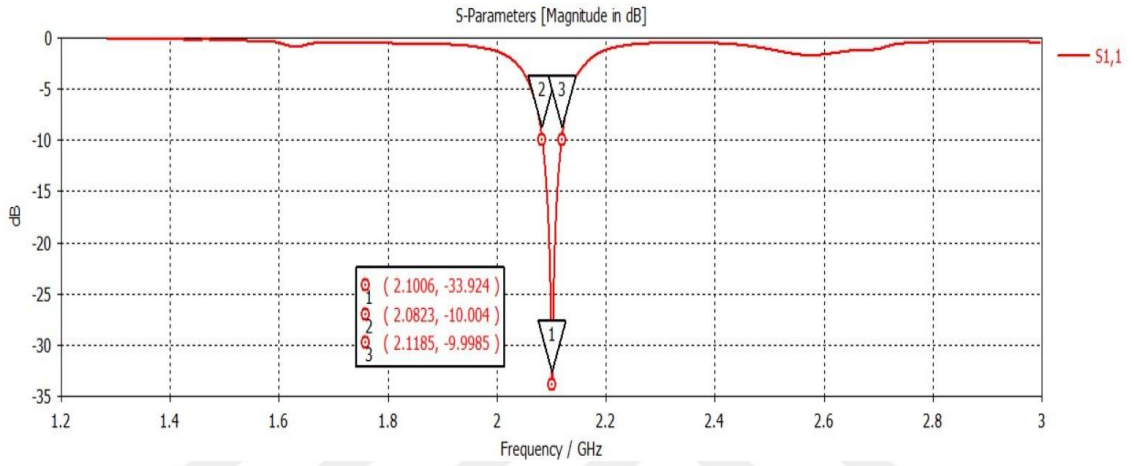
#### 4.5.2 Dairesel Polarize Mikroşerit Anten Dizisi Uygulaması ve Performans Analizi

Tasarlanmış olan antende yukarıdaki eşitlikler sonucunda, aşağıdaki değerler elde edilmiştir. Yama genişliği ( $W$ ) 60 mm, yama uzunluğu ( $L$ ) 45.88 mm olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan dizi antenin görseli aşağıdaki gibidir.



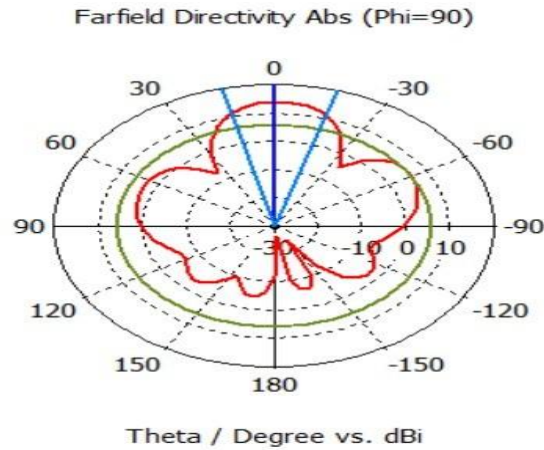
Şekil 4.21 Tasarlanan dizi anten gösterimi

Dizi anten tasarımında malzeme olarak elektrik geçirgenlik değeri 4.3, yüksekliği 1.6mm olan FR4 kullanılmıştır. Çalışma frekansı 2.1 GHz olan antenin S11 parametresi Şekil 4.22'de gösterildiği gibidir. Band genişliği ( $S_{11} < -10\text{dB}$ ) 36.2 MHz'dir. Göreceli olarak dar bandta çalışıp diğer sinyallerle karışması en aza indirilmiştir. Theta z-x eksenini arasındaki dönme, phi x-y eksenini arasındaki dönmeyi göstermektedir.



Şekil 4.22 Antenin S parametre cevabı

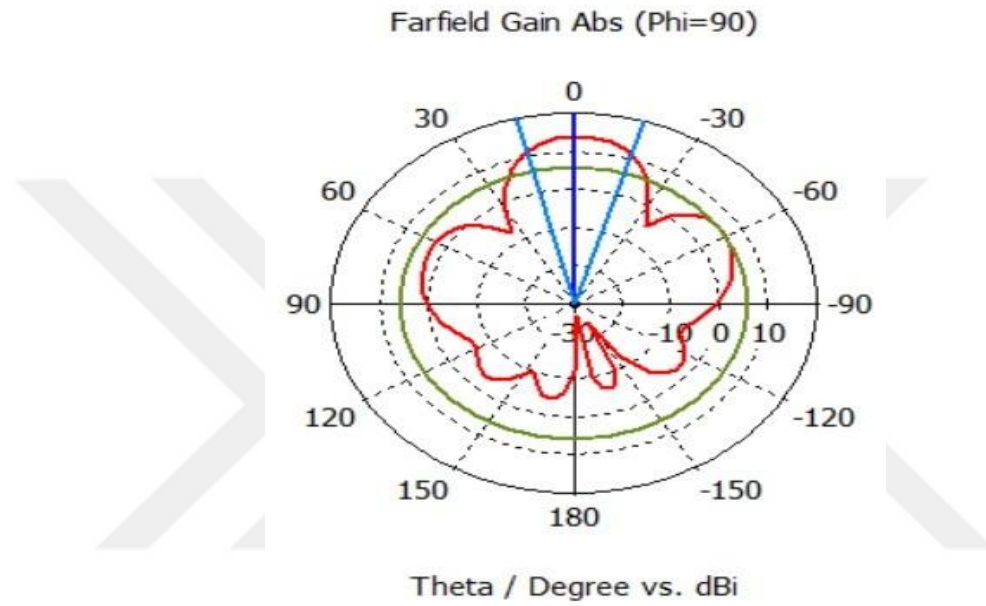
Theta ya da phi parametrelerinden bir tanesi sabit tutularak diğer parametredeki değişime bağlı sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.23 Theta açısına bağlı yönlülük polar diyagramı

Sabit Phi açısında (Phi=90 derece) değişen Theta değerine karşın yönlülük diyagramı Sekil 4.23'de gösterilmiştir. Yarım güç hüzme genişliği 33.4 derece, ana lob büyüklüğü 13.79 dBi olarak gözlemlenmiştir.

Sabit Phi açısında (Phi=90 derece) değişen Theta değerine karşın kazanç diyagramı Şekil 4.24'de gösterilmiştir. 2.1 GHz'de yapılan inceleme sonucunda sistemin yarım güç hüzme genişliği 33.4 derece, ana lob büyüklüğü 13.77 dBi olarak gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.24** Theta açısına bağlı kazanç polar diyagramı

Kazanç yönlülük arasındaki korelasyon  $G=e \cdot D$  eşitliğine dayanır.

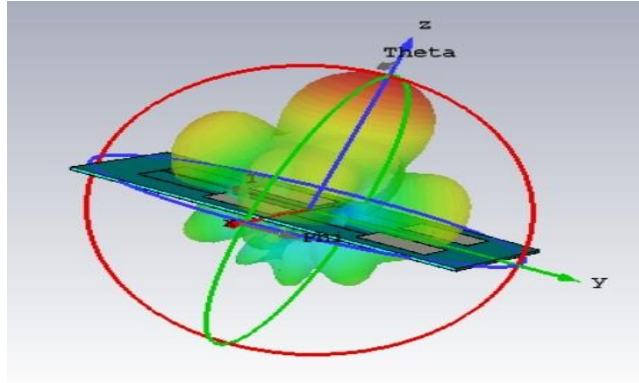
Mikroşerit antenlerde verim ( $e$ ) yüksek olduğu için ( $1'e$  yakın) kazanç ve yönlülüğün ana lob büyüklükleri yaklaşık olarak aynı olmaktadır.

Şekil 4.25'de 3 boyutlu uzak alan sonuçları üzerinden ana lob, yan lob ve arka loblar gözlemlenmiştir. Arka lobların ışması en aza indirilmiş ve ileri yönde ışma yapılması sağlanmıştır. Yan lob seviyesi -0.8 dB, ana lob yönü 90 derecedir. Sabit Theta açısında (Theta=90 derece) değişen Phi değerine karşın yönlülük diyagramı Şekil 4.26'de gösterilmiştir.

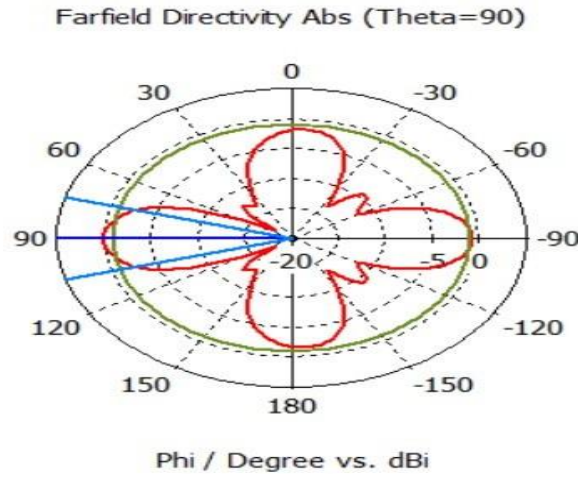


Yarım güç hüzme genişliği 33.8 derece, ana lob büyüklüğü 0.85 dBi olarak gözlemlenmiştir. Sabit Theta açısında (Theta=90 derece) değişen phi değerine karşın kazanç diyagramı Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

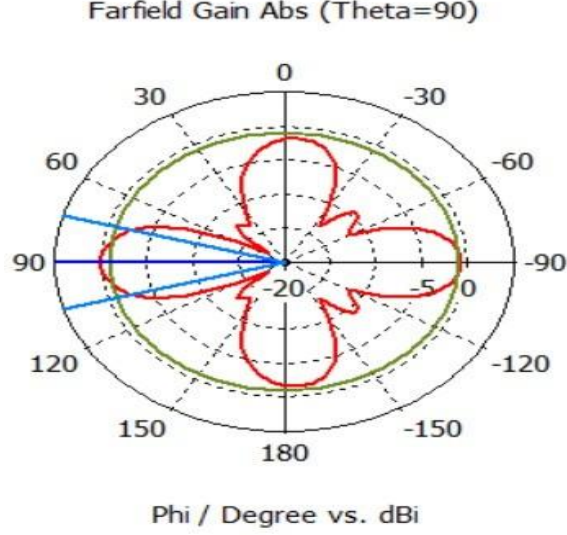
2.1 GHz'de yapılan inceleme sonucunda sistemin yarım güç hüzme genişliği 33.8 derece, ana lob büyüklüğü 0.829 dBi olarak gözlemlenmiştir. 3 boyutlu uzak alan gösterimi iki durum için de değişmemektedir.



Şekil 4.25 3 boyutlu uzak alan sonucu



Şekil 4.26 Phi açısına bağlı yönlülük polar diyagramı



**Şekil 4.27** Phi açısına bağlı kazanç polar diyagramı

2.1 GHz'de çalışan bir radio over fiber devresi tasarlanmış ve iletişim hattı sonuna alıcı/verici antenler eklenmiştir.

Buradaki asıl amaç merkez istasyondan gönderilen verinin son kullanıcı tarafından alınması ve son kullanıcı tarafından gönderilen verinin de merkez istasyonu tarafından geri alınmasıdır. Tasarlanan dizi anten tek frekansta, dar bandta ve düşük geri yansımaya ile çalışmaktadır. Dizi anten kullanılmasındaki asıl sebepler, kolay tasarıma sahip olması ve istenilen hüzmeye yönlendirilmesidir. Hüzmeyi istenilen dereceye yönlendirmede için farklı büyüklükte ve fazda beslemeler, antenler arası mesafedeki farklılıklar, tek elemanda yapılacak değişiklikler ve antenlerin konfigürasyonu etkili olmaktadır.

Çoklu band için kullanılan helisel anten 2.1 GHz ile birlikte 0.9 GHz bandında da yayılım yapmaktadır. Buradaki amaç farklı iletişim kanallarından da haberleşmeye devam edebilmektir.

Kullanılan antenlerin uzak alan sonuçları incelendiğinde iki farklı alana etki ettiği görülmüştür. Hedef kitlenin kullanım alanına ve ihtiyacı doğrultusunda göre hangi antenin kullanılacağına karar verilmektedir.

Literatürde GSM 0.9 GHz ilgili yapılan çalışmalara göz atılırsa: Malaric ve arkadaşları tarafından ortaya konulan uygulamalarda, GSM'in kullanımının artık

hayatın vazgeçilmez bir gerçekliği olduğu belirtilmiş ve telefonlarından yayılan radyasyonun seviye değerlendirmeleri yapılarak, bu değerlendirme sonucu ortaya çıkan seviyelerde bir elektromanyetik uyumluluk problemi oluşturduğu vurgulanmıştır [33]. Diğer bir çalışmada ise cep telefonlarından yayılan elektromanyetik radyasyonun telefonun farklı kullanım durumlarında (bekleme, arama, aranma, kısa mesaj, konuşma vb) gözlemlenen ölçüm değerleri incelenmiştir [34]. GSM baz istasyonlarından yayınlanan elektromanyetik radyasyonun değerlendirilmesi ve seçilen sabit bir bölgede ki spektrum yoğunluğu analiz edilmiştir [35, 36].

Ülkemizdeki operatör şirketlerinin kullandıkları frekansları incelediğimiz de 1.8 GHz, 2.1 GHz ve 2.6 GHz bantlarını LTE standardı için aktif olarak kullanıldığı görülmektedir ve gelecekte ki 5G için bu frekans bantlarını kullanabilecekler. Yapılan literatür taramaların da görüleceği üzere farklı frekansların yapıları ve avantajları incelenmiştir ancak daha önce akıllı ulaşım sistemlerine entegre olarak çalışabilen bir sistem tasarımı üzerine inceleme yapılmamıştır. Bu verilerden de yola çıkarak bu tez çalışmasında seçilmiş olan 0.9 GHz ve 2.1 GHz frekanslarına uygun olarak tasarlanan RoF habaleşme sistemi ve bunun devamında oluşturulan anten sistemlerinin uygulanabilirliği teorik olarak kanıtlanmıştır.

## RoF Tekniği İle Farklı Modülasyon Yöntemleri Karşılaştırılması

---

Bir bilgi işaretinin, yayılım ortamında gönderilebilmesi için, ortam içerisinde rahatlıkla hareket edebilen başka bir taşıyıcı işaret üzerine aktarılması olayı “modülasyon” olarak adlandırılır. Modülasyon, gönderilmek istenen sinyalin iletme daha uygun bir biçime dönüştürmek için yapılan işleme verilen isimdir. Modülasyon metotlarının amacı, bilgi işaretinin mevcuttaki bir haberleşme kanalıyla eşleştirmektir. Bu yüzden modülasyon türü, mevcut gürültü, band genişliği ve verici gücüne bağlı olarak seçilir.

### 5.1 Modülasyonun Kullanım Amacı

Modülasyon, haberleşme sistemlerinin verimliliğini artırmak amacı ile kullanıldığı için, taşıyıcı işaret seçilirken, seçilen bu işaretin iletim kanalı için ne kadar uygun olduğuna dikkat edilmelidir.

#### 5.1.1 Modülasyonun Avantajları

Yeryüzünde düşük frekanslı elektromanyetik enerjinin iletimini gerçekleştirmek pek avantajlı olmamaktadır. Genel olarak modülasyon, gönderilmek istenen sinyali, iletilecek bir düzeye yükseltme işlemi olarak açıklanır.

Bu işlem, genellikle düşük frekanslı bilgi sinyalinin yüksek frekanslı bir taşıyıcı sinyal üzerine aktarılması ile yapılır. Ses, görüntü, renk veya veri taşıyan düşük frekanslı işaret, bilgi sinyali olarak adlandırılır. Bilgi sinyaline göre bir veya daha fazla parametresi değiştirilen yüksek frekanslı işaret, taşıyıcı sinyaldir. Haberleşme sistemlerinin verimli ve etkin kullanılması için modülasyona büyük ölçüde ihtiyaç duyulur. Modülasyonun avantajları aşağıda yer almaktadır.

1. Modülasyon gürültü, bozulma ve zayıflamayı azaltır.
  - Gürültü, haberleşme ortamı üzerinden haberleşme sistemine etki ederek

gönderilen sinyali rastgele değişim ve bozulmaya uğratan, istenmeyen elektronik enerjidir.

- Bozulma, bilgi işareti oluşturarak farklı frekansların ya da fiber optik kablo içerisindeki ışık ışınlarının, farklı güzergahlar takip etmesi nedeni ile alıcı tarafa farklı zamanlarda ulaşmasının neticesinde bilgi sinyalinin aslının değişmesi olarak tanımlanır.
  - Zayıflama, bütün iletişim sistemlerinde sinyal zayıflaması bulunur. Bu zayıflama alıcı ve verici arasındaki uzaklığın karesi ile doğru orantılı olarak artar. Haberleşme sistemlerinde oluşan istenmeyen gürültü, bozulma ve zayıflamanın engellenmesi için, bilgi sinyalinin iletileceği ortamın özelliklerine göre modüle edilerek gönderilmesi gerekir.
2. Modülasyon kanal ayrımı sağlar. Yani modülasyon sayesinde aynı iletim hattında bulunan birden fazla bilgi sinyalinin gönderimi mümkündür. Aynı anda bir veya birden çok sinyalin, sinyaller birbirine karışmaksızın bir noktadan, uzaktaki diğer bir noktaya gönderilmesi, modülasyon olmadan gerçekleştirilemez.
  3. Modülasyonda yüksek frekanslı taşıyıcı sinyal kullanıldığı için, mevcuttaki dalga boyu ve buna bağlı olarak anten boyutu küçülür. Anten uzunluğunun, endüstriyel uygulamalarda kullanılacak bir boyda olması için, gönderilen bilgi sinyalinin frekansı modülasyon yöntemleri kullanılarak değiştirilir.

## 5.2 Modülasyonun Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Modülasyon yöntemleri iki ana başlık altına sınıflandırılır.

1. Taşıyıcı sinyal özelliğine göre,
  - Sürekli Dalga Modülasyonu
  - Darbe Modülasyonu
2. Bilgi sinyalinin özelliğine göre,
  - Analog Modülasyon
  - Sayısal Modülasyon

Taşıyıcı dalga sinyalinin özelliğine göre sınıflandırma yapıldığında ise iki çeşit modülasyon türü bulunmaktadır. Sürekli dalga modülasyonunda taşıyıcı olarak, belirli bir frekansta sinüsoidal bir dalga kullanılır. Sürekli dalga modülasyonu özellikle, konuşma, müzik veya resim gibi zamanın sürekli bir fonksiyonu olarak değişen analog işaretlerin iletimi için uygun olur. Sürekli dalga modülasyon türleri aşağıda verilmiştir.

- Genlik Modülasyonu (Amplitude Modulation, AM)
- Frekans Modülasyonu (Frequency Modulation, FM)
- Faz Modülasyonu (Phase Modulation, PM)
- Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (Amplitude Shift Keying, ASK)
- Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK)
- Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying, PSK)

Darbe Modülasyonu haberleşme sisteminde iki nokta arasında sayısal darbelerin iletimidir. Başlangıçtaki kaynak bilgi, sayısal ya da analog biçimde olabilir. Gönderilecek olan kaynak bilgi analog ise, iletimden önce sinyal sayısal darbelere dönüştürülerek iletilmeli ve alıcı tarafta ise tekrar analog sinyale dönüştürülmelidir. Sayısal iletim sistemlerinde, sistemdeki iki noktayı bağlamak üzere metalik tel çifti olarak, koaksiyel kablo ya da fiber optik kablo gibi fiziksel bir malzeme kullanılması gerekir. Darbeler, fiziksel malzemenin içinde yayınım yaparlar. Darbe modülasyon türleri aşağıda yer almaktadır :

- Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM)
- Darbe Pozisyon Modülasyonu (Pulse Position Modulation, PPM)
- Darbe Kod Modülasyonu (Pulse Code Modulation, PCM)

İletilmek istenilen bilgi sinyalinin özelliğine göre sınıflandırma yapıldığında ise iki çeşit modülasyon söz konusudur. Analog modülasyon sürekli bir mesaj işaretinin

modülasyonu ile elde edilen modülasyon türüdür. Analog modülasyon türleri, aşağıda verilmiştir :

- Genlik Modülasyonu (Genlik modülasyonu, AM)
- Açı Modülasyonu

Sayısal modülasyon ise ayrık bir mesaj işaretinin modülasyonu sonucu elde edilen modülasyon türüdür. Bazı sayısal modülasyon türleri aşağıda bulunmaktadır.

- Darbe Kod Modülasyonu (Pulse Code Modulation, PCM)
- Delta Modülasyonu (Delta Modulation, DM)

Modülasyon yöntemi başlarda anten yoluyla yapılan yayınlar için öngörülmuş ise de, günümüzde kablolu, kablosuz her tür iletişimde kullanılmaktadır. Düşük frekanslı işaretlerin (örneğin ses) çok uzak mesafelere gönderilmesi imkanı ortaya çıkmıştır. Düşük frekanslı sinyalin, yüksek frekanslı taşıyıcı bir sinyal üzerine bindirilerek uzak mesafelere taşınması modülasyon sayesinde mümkün olmaktadır. Modülasyon, anten kazancına, sinyalin gürültü ve girişimden etkilenmeyerek bozulma olmadan iletilmesine olanak sağlamaktadır. Bahsedilen modülasyon çeşitlerinin toplu hali Tablo 5.1'de görülmektedir. Burada bilgi işaretine göre analog ve sayısal olarak ayrılan modülasyon yöntemleri aynı zamanda taşıyıcı sinyalin özelliğine göre de gruplandırılmıştır.

**Tablo 5.1** Bilgi sinyali ve taşıyıcı sinyale göre modülasyon çeşitleri

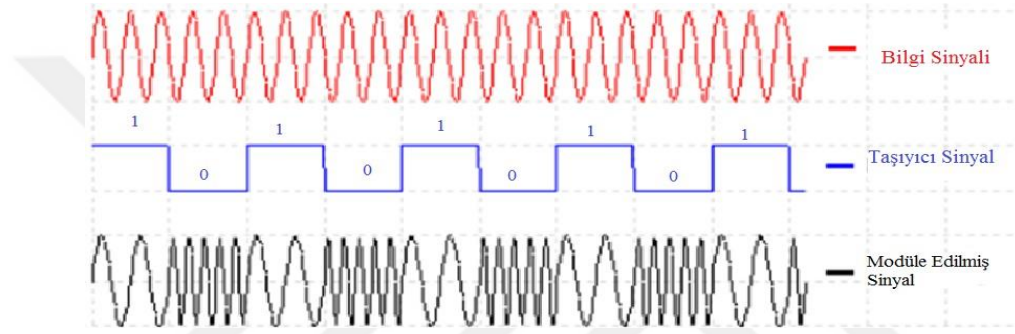
	Taşıyıcı Sinyal	
	Sürekli Dalga Modülasyonu	Darbe Modülasyonu
Analog	AM FM QAM	PAM PPM
Sayısal	ASK FSK PSK DPSK CPFSK OQPSK	PCM

### 5.3 Modülasyon Çeşitleri

Bu çalışmada kullanılmış olan modülasyon yöntemleri hakkında daha detaylı bilgi verilmek istenmiştir. Buna göre,

#### 5.3.1 Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK)

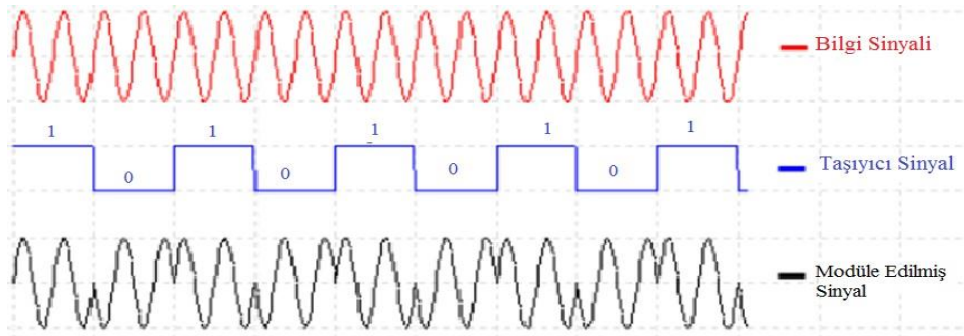
İkili mantıkla kodlanmış, 0 ve 1'ler den oluşmuş bir bilgi sinyalinin sinüsoidal bir taşıyıcının frekansı üzerine eklenerek gönderilmesi tekniğidir. Klasik frekans modülasyonuna benzer. Frekans modülasyonundan tek farkı ise bilgi işaretinin sayısal bir işaret olmasıdır. Şekil 5.1'de bilgi sinyalinin taşıyıcı sinyal ile FSK ile modüle edilip iletilmesi sembolize edilmiştir.



Şekil 5.1 Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK)

#### 5.3.2 Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying, PSK)

İkili mantıkla kodlanmış, 0 ve 1'ler den oluşmuş bir bilgi sinyalinin sinüsoidal bir taşıyıcının fazı üzerine eklenerek gönderilmesi tekniğidir. Şekil 5.2'de bu modülasyon yöntemi gösterilmektedir.



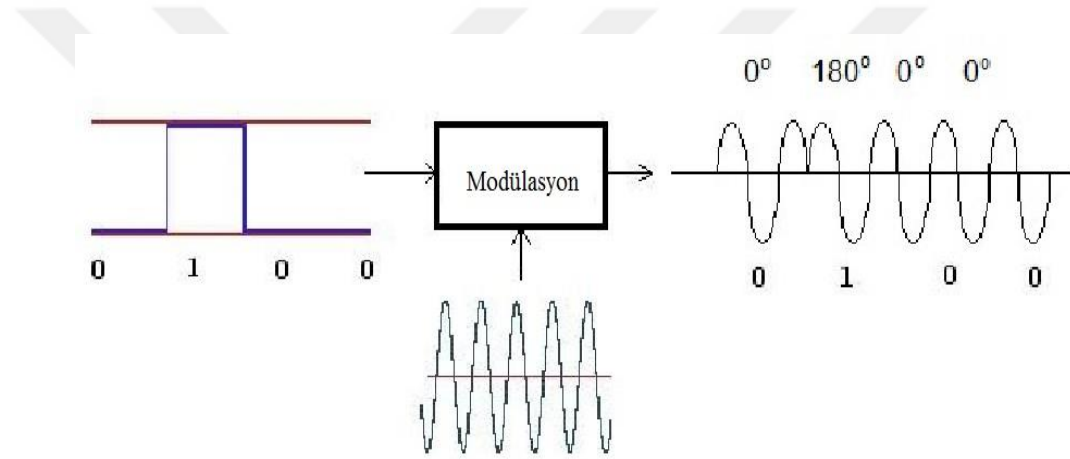
Şekil 5.2 Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK)



Klasik frekans modülasyonuna benzer ve faz modülasyonundan tek farkı ise bilgi işaretinin sayısal bir işaret olmasıdır. Bu modülasyon tekniğinde sinyalleri rahatça ayırt edilebilmek için birbirinden zıt 180 derecelik faz açıları kullanılır.

### 5.3.3 Farksal Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Phase Shift Keying, DPSK)

Sabit sinyal referansı ile çalışmak yerine, referansı kendinden alan sistemler de bulunur. Böyle bir haberleşme sisteminde modülatör, fazın kendisi yerine alınan sinyalin fazındaki değişiklikleri referans olarak belirler. Böyle bir düzen ardışık fazlar arasındaki değişiklikleri esas aldığından buna farksal faz kaydırmalı anahtarlama (DPSK) denir. Normal PSK'ya göre DPSK daha basit bir şekilde uygulanır. Şekil 5.3'de verildiği üzere modüle edilmiş sinyalde faz farkı bulunur.



Şekil 5.3 Farksal Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DPSK)

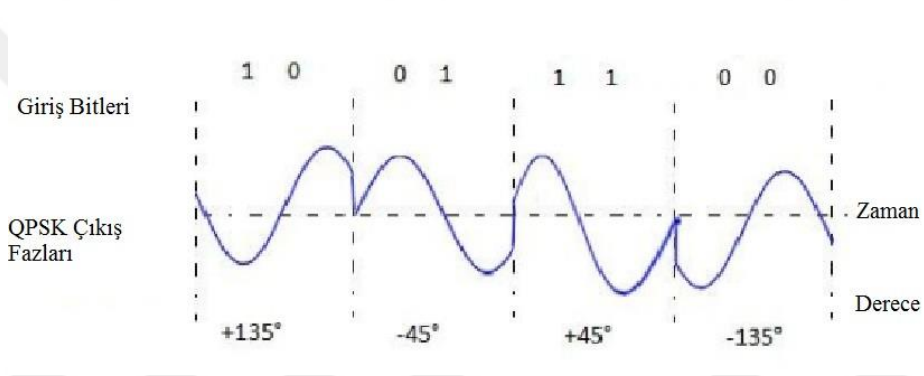
### 5.3.4 Sürekli Fazlı Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Continuous Phase Frequency Shift Keying, CPFSK)

Bütün sayısal modülasyon sistemleri, veriyi temsil etmek üzere belirli sayıda birbirinden farklı işaret kullanır. PSK'da belirli bit dizilimine denk gelen farklı işaret yapılarından yararlanır. Genellikle her faz, eşit sayıda biti kodlar. Her bit dizilimi onu temsil eden fazla temsil eder. Demodülatör cihazı modülatörün kullandığı sembol setine denk gelen bit dizilimini yorumlayarak dönüştürür. Böylece gönderilmek istenilen ilk sinyal yeniden elde edilir. Bu işlem yapılırken ise alınan sinyalin fazını bir referans sinyal ile karşılaştırır. Böyle bir sistem bağdaşık

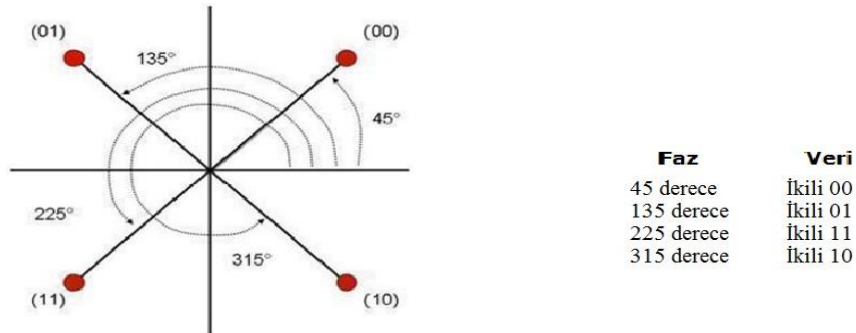
(coherent) PSK diğer bir ifadeyle sürekli fazlı frekans kaydırmalı anahtarlama (Continuous Phase Frequency Shift Keying, CPFSK) olarak tanımlanır.

### 5.3.5 Dördül Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)

PSK modülasyonu taşıyıcı sinyalin fazı değiştirilerek veri iletimi yapan bir algoritmadır. Bütün periyodlar için genlik sabit kaldığı halde faz bir defa değişebilir. PSK kısaltmasının önüne getirilen harf veya sayı faz sayısını ifade eder. Q (Quadrature) dördül anlamı taşır. Yani taşıyıcı sinyal 45,135, 225 ve 315 derece olmak üzere 4 fazda gönderir. QPSK da dört olası faz bulunduğu için her zaman diliminde sadece iki bitlik bilgi aktarılabilir. Sinyaldeki değişim (veri aktarımı) hızı, band genişliğini belirler.



Şekil 5.4 Dördül Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK)



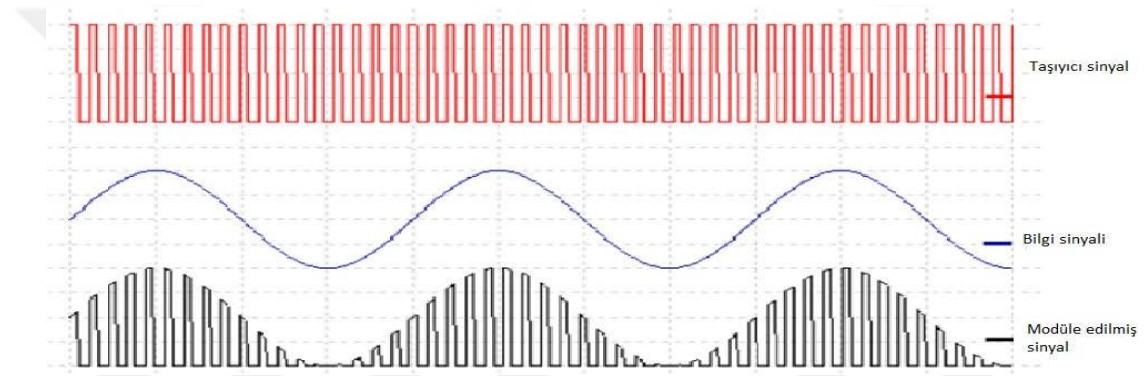
Şekil 5.5 QPSK modülasyonundaki 4 faz sinyali

2 bitlik giriş sinyali, bit ayırıcıya gönderilir. Bu iki bit seri olarak girişe aktarıldıktan sonra paralel olarak çıkışa iletilirler. Bitlerden biri I kanalına, diğeri

de Q kanalına yönlendirilir. I kanalı, kanaldaki biti referans osilatörünün fazına göre modüle eder. Bu esnada Q kanalı da kanalındaki biti referans taşıyıcıyla karesel formda veya fazının 90 döndürülmesi ile taşıyıcı sinyali modüle eder.

### 5.3.6 Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM)

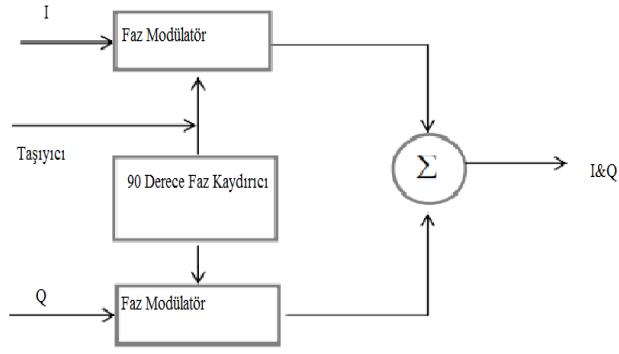
Darbe genlik modülasyonunda, analog bir sinyal, bir kare dalga sinyalin genliğine modüle edilir. Çıkış verisi, bilgi işareti ile taşıyıcı işaretin çarpımıdır. Bir PAM sinyali, bir dizi darbeden oluşan örneklenmiş sinyaldir. Her bir darbenin genliği, karşılaştığı örnekleme noktasındaki analog sinyalin genliği ile orantılıdır. Darbe modülasyon işleminin ilk sebebi, iletim ortamını diğer işaretlerle paylaşmak amacıyla bilgi işaretini bir örnekler dizisine dönüştürülür.



Şekil 5.6 Darbe Genlik Modülasyonu (PAM)

### 5.3.7 Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)

Aynı frekans bandında olup aralarında 90 derece faz farkı bulunan iki taşıyıcı işaretin modüle edilerek genlik ve faz değerlerinin çıkış olarak alınmasına imkan veren modülasyon türüdür. Sinyallerden biri "I" diğeri de "Q" olarak adlandırılır. Şekil 5.7'de QAM blok diyagramı verilmektedir. Modüle edilmiş bu iki taşıyıcı işaret gönderilmek üzere sinyal kaynağında bir araya getirilmiştir. Alıcı tarafta bu iki işaret verileri birbirinden çıkartılarak ayrılmaktadır [31].



**Şekil 5.7** Karesel Genlik Modülasyonu (QAM) blok diyagramı

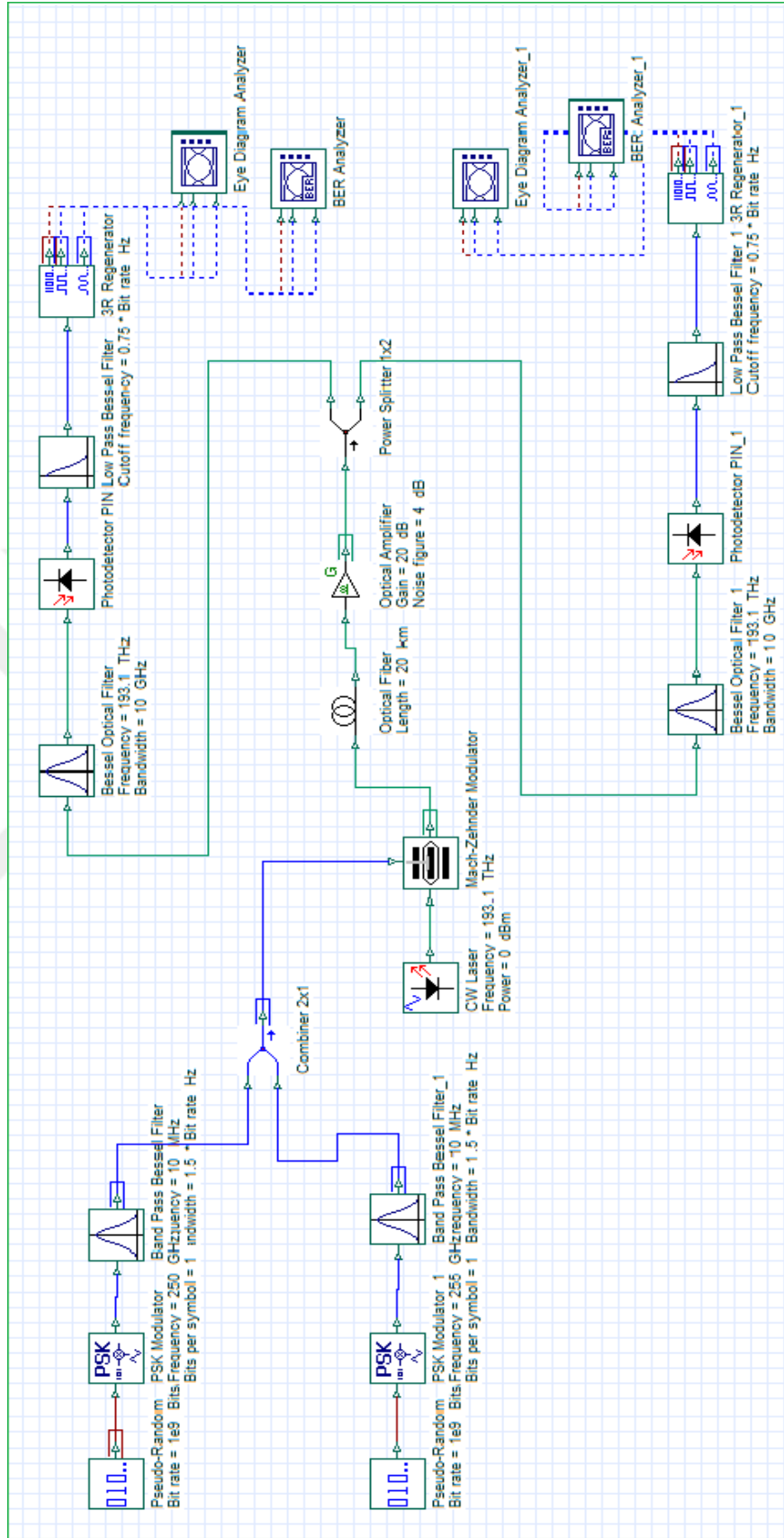
#### 5.4 RoF İçin Modülasyon Teknikleri Uygulaması

Bu bölümde OptiSystem 7.0 ve OptiSystem 14.0 simülasyon programları kullanılarak bir iletişim hattı oluşturulmuş analizler yapılmıştır.

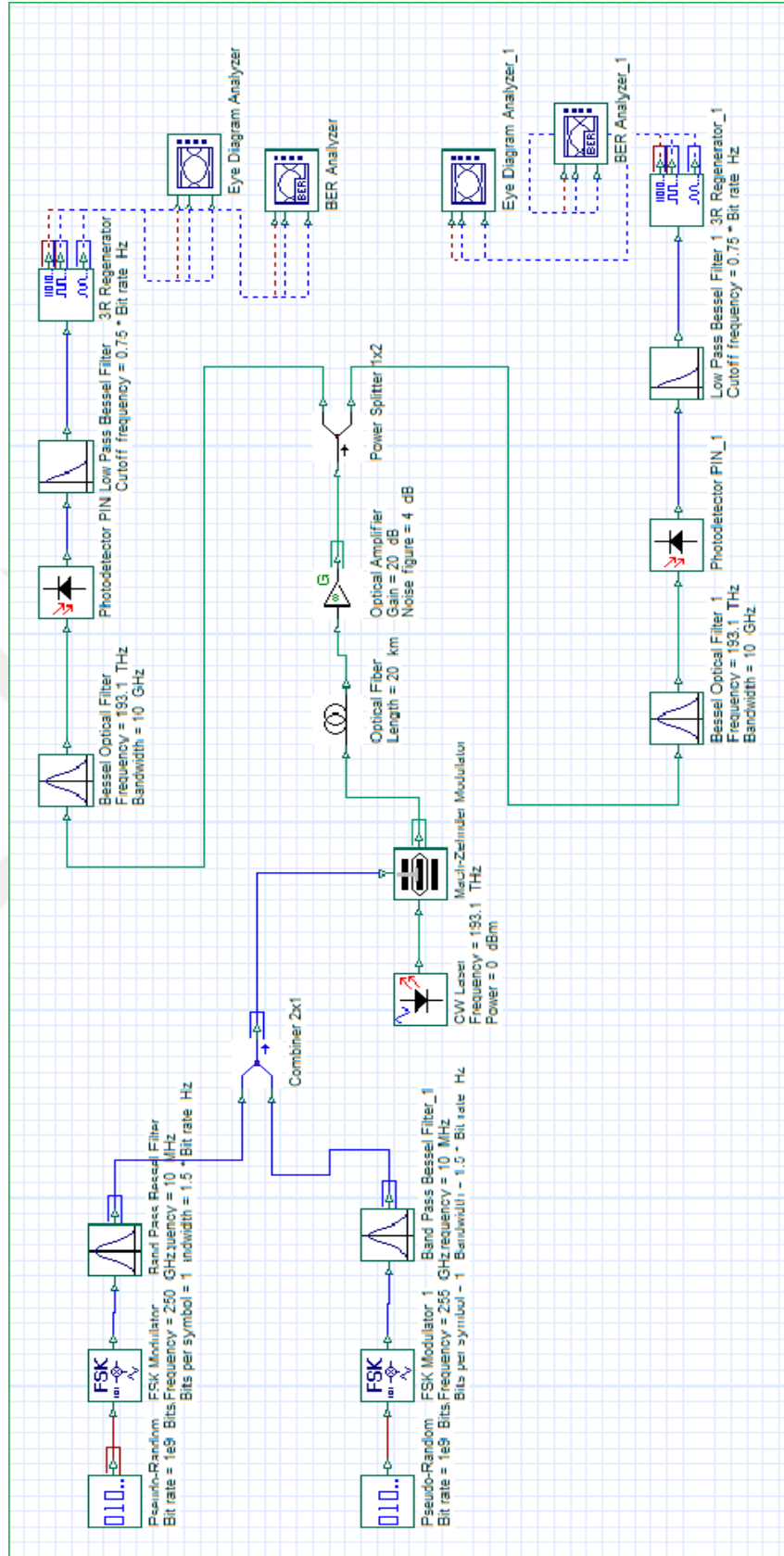
Önerilen sistemin deneysel kurulum ve simülasyon düzeni Şekil 5.8 ile 5.14 arasındaki şekillerde gösterilmiştir. Verici tarafta 1 Gbps bit hızında giriş veri sinyali bir rastgele bit dizisi (PRBS) üretici tarafından modüle edilmektedir. Bu veri, 250 GHz ve 255 GHz frekanslarına sahip taşıyıcıyı sinyali modüle etmek için kullanılmıştır. Gelen sinyal, 10 GHz frekansındaki band geçiren Bessel filtreden geçirilmiş ve daha sonra sinyal, Mach-Zehnder modülatörü kullanılarak 193.1 THz frekanslı bir optik taşıyıcıyı modüle etmek için kullanılmıştır. Yüksek frekans sinyallerinin modüle edilmesi için Mach-Zehnder modülatörü tercih edilmektedir. Modüle edilmiş sinyalin iletilmesi için 20 km'lik tek modlu bir fiber kullanılmıştır. Sinyal optik kuvvetlendirici kullanılarak büyütülmüş ve alıcı tarafa iletilmiştir. Alıcı tarafta yükseltilmiş optik sinyale, istenmeyen frekanslardan temizlemek için Bessel optik filtre uygulanmış ve daha sonra PIN foto-detektörü uygulanarak optik sinyal elektriksel sinyale dönüştürülmüştür. Bu fotodetektör, filtrelenmiş optik sinyali demodüle etmiş ve optik sinyal doğrudan bir elektrik sinyali olan bir ana band sinyaline dönüştürmüştür.

Alçak geçiren filtreler, (Kesim frekansı =  $0,75 * \text{Sembol Hızı-Hz}$ ) daha yüksek frekans bileşenlerinin filtrelenmesi için kullanılmıştır. Alçak geçiren filtrenin çıktısı, BER analizörü kullanılarak gözlemlenmiştir. Alçak geçiren filtrenin çıkışında başlangıçta gönderilen aynı verilerin alınması beklenmektedir. Radio over fiber sisteminde, bir ışık dalgasını modüle etmek için bir RF sinyali kullanılmıştır. RF sinyali genellikle, analog veya dijital veri işleme teknikleri kullanılarak RF taşıyıcısına modüle edilmiş bilgi sinyalidir. RF sinyali bir ışık dalgasına modüle edildiğinde, radio over fiber sisteminde, ışık dalgası taşıyıcı sinyal konumunda olur.

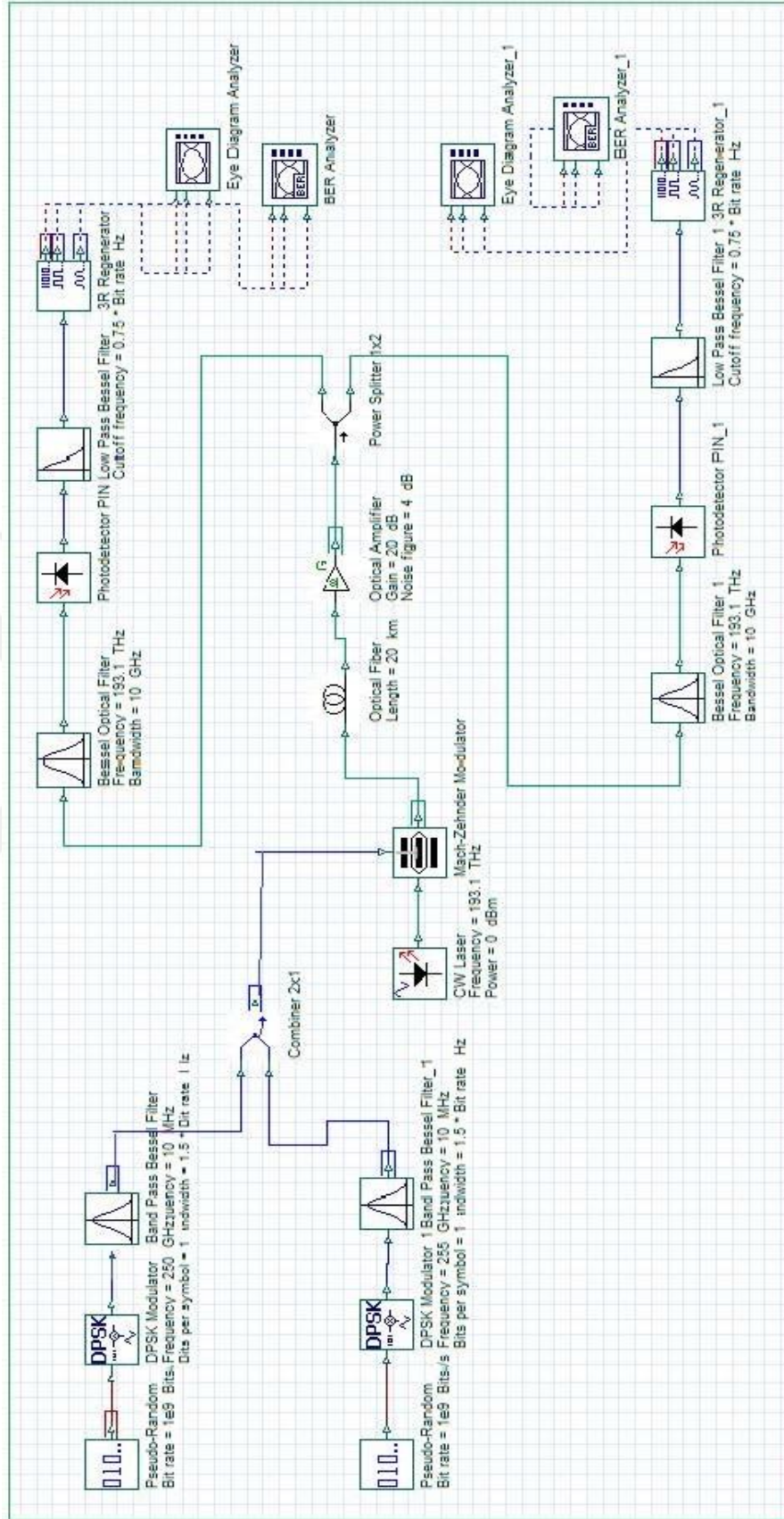
Çalışmada, farklı modülasyon teknikleri için düzenekler oluşturulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.8 PSK modülasyonlu iletişim hattı

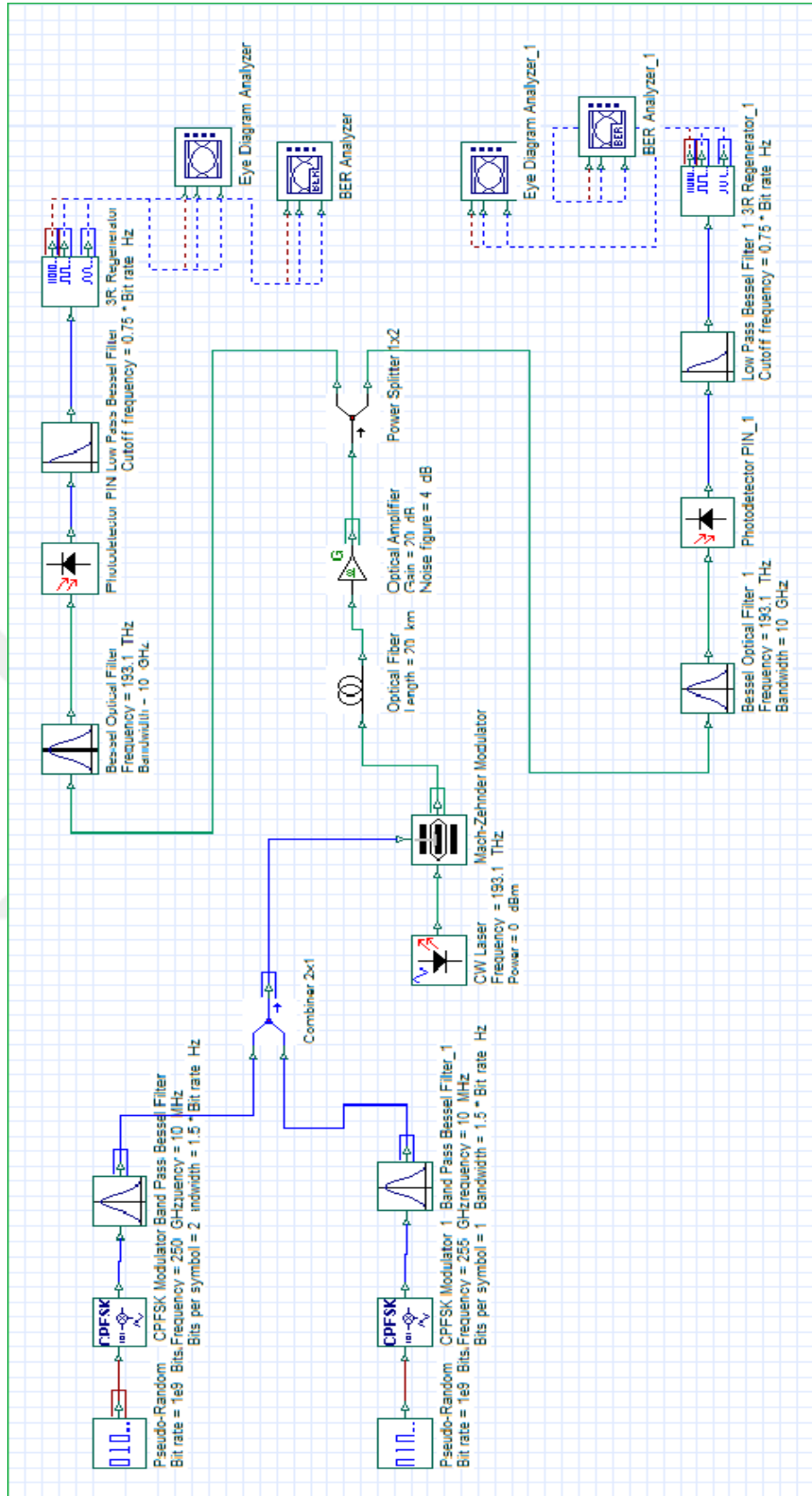


Şekil 5.9 FSK modülasyonlu iletişim hattı

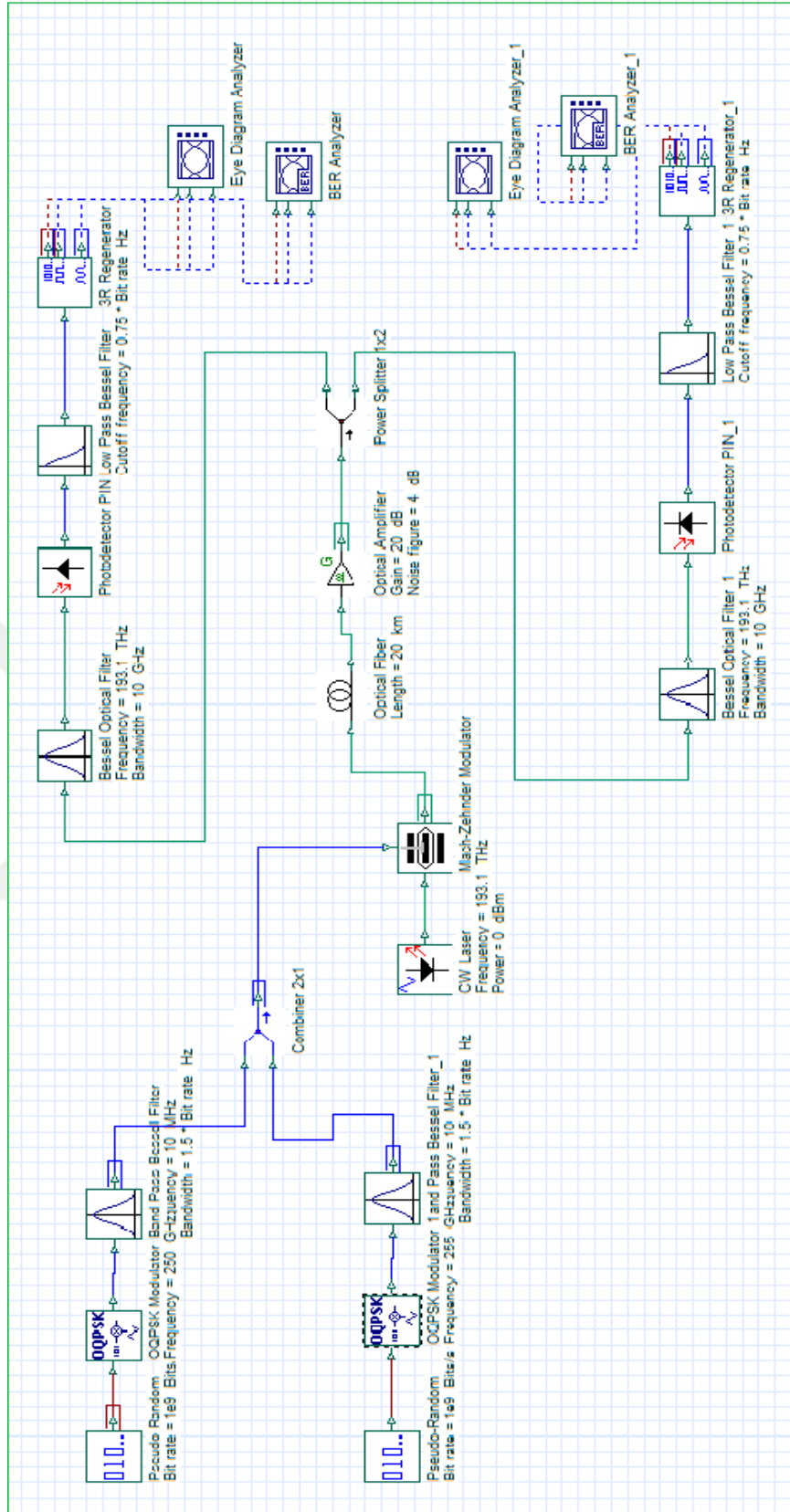


Şekil 5.10 DPSK modülasyonlu iletişim hattı

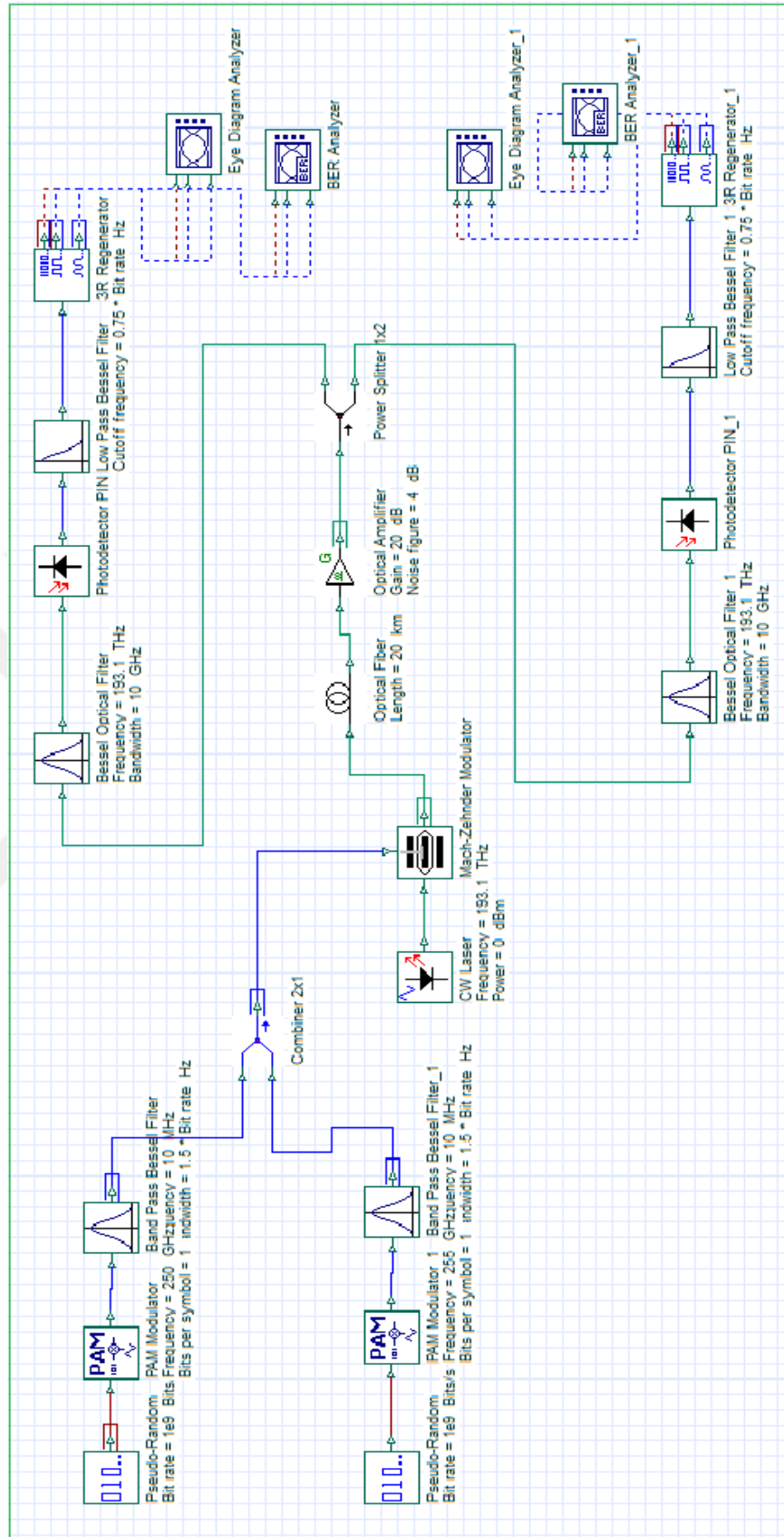




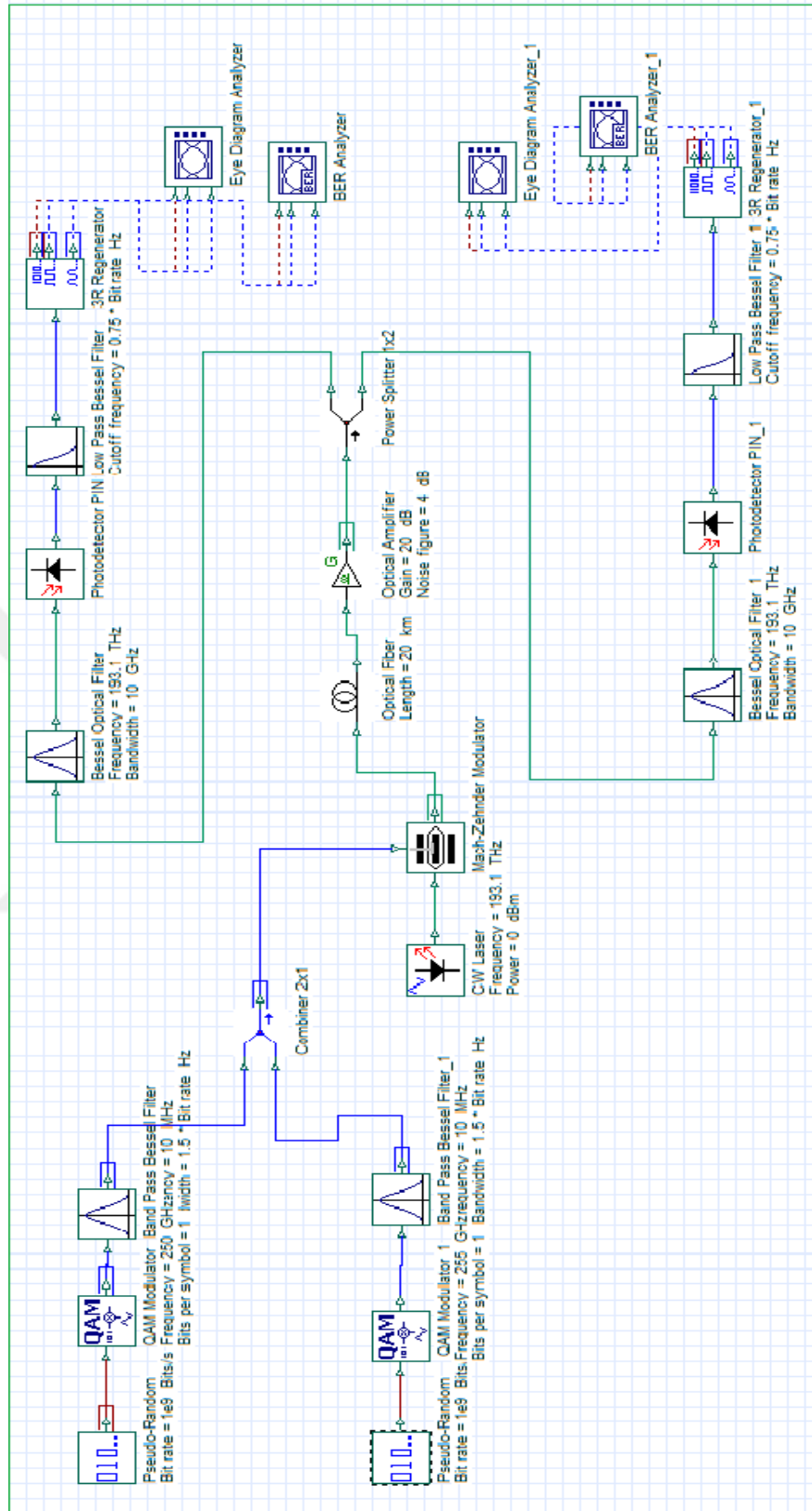
Şekil 5.11 CPFSK modülasyonlu ileişim hattı



Şekil 5.12 QPSK modülasyonlu iletişim hattı

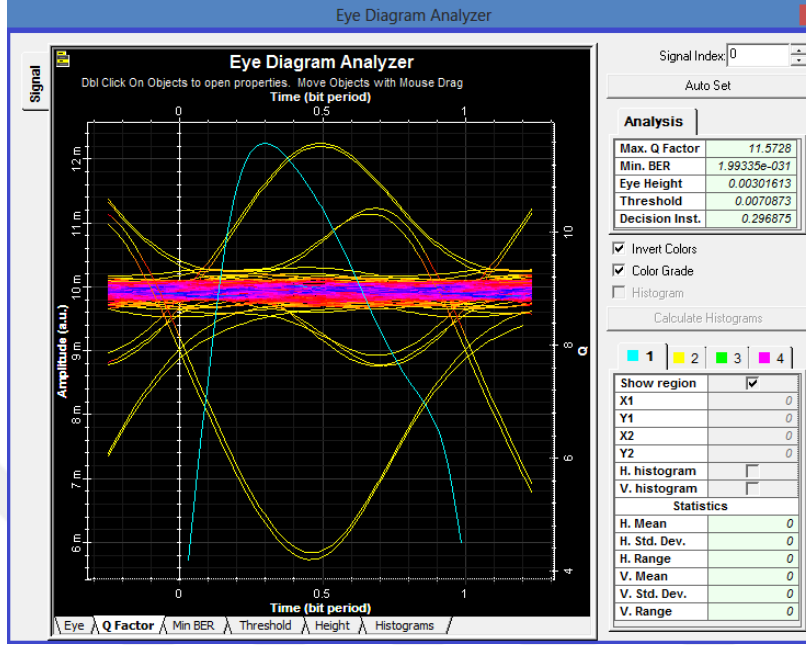


Şekil 5.13 PAM modüasyonlu iletişim hattı

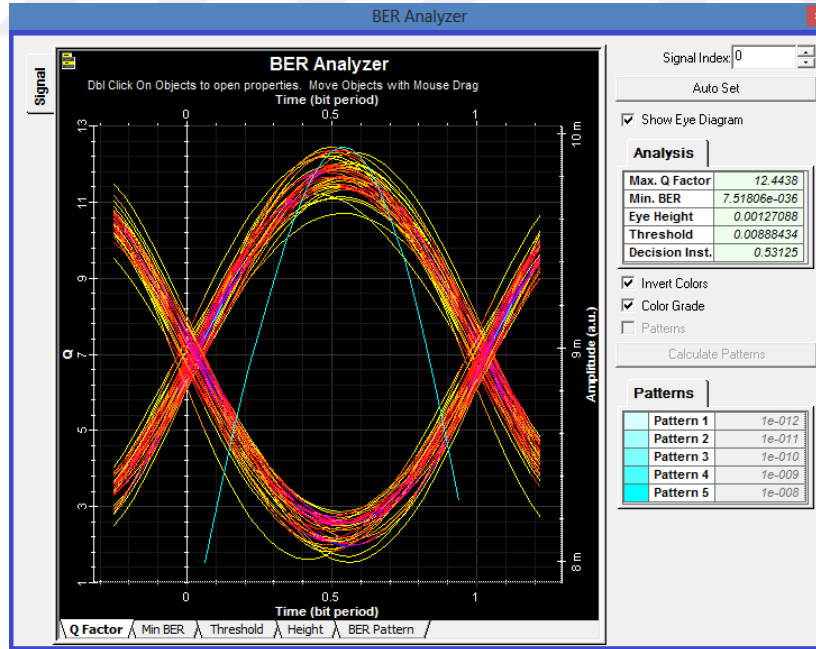


Şekil 5.14 QAM modülasyonlu iletişim hattı

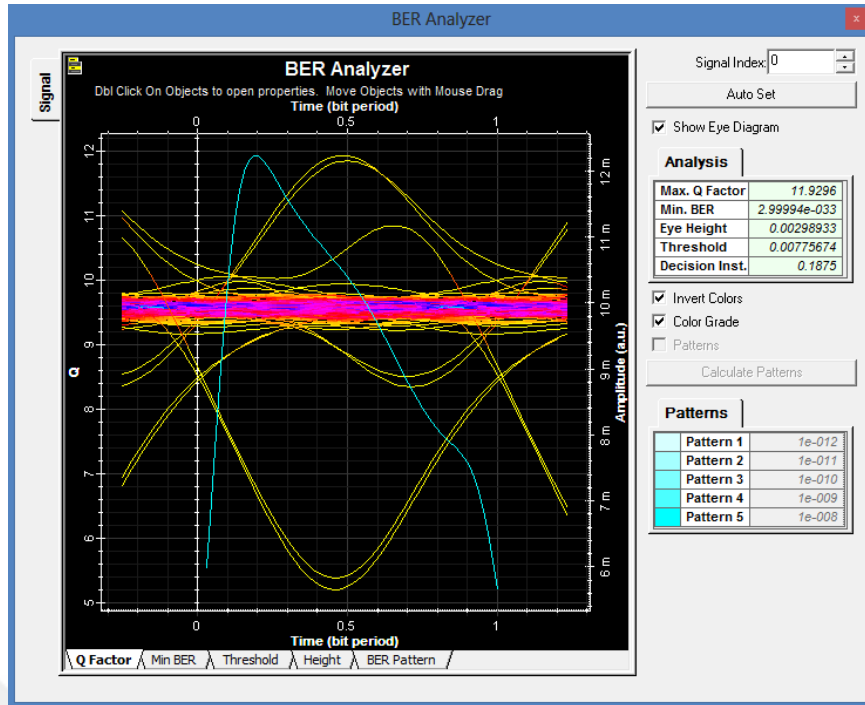
PSK, FSK, DPSK, CPFSK, QPSK, PAM ve QAM, kullanılan modülasyon yöntemleridir. Bu farklı modülasyon yöntemlerinin sonuçları bit hata oranı, kalite faktörü, göz diyagramları kullanılarak analiz edilmiştir.



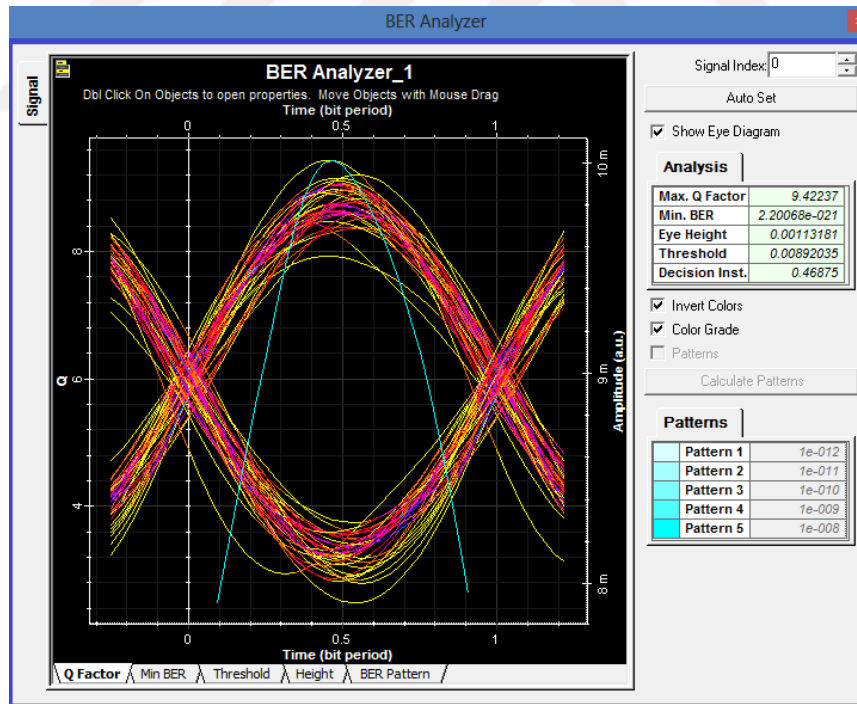
Şekil 5.15 PSK modülasyonu BER analizörü sonuçları



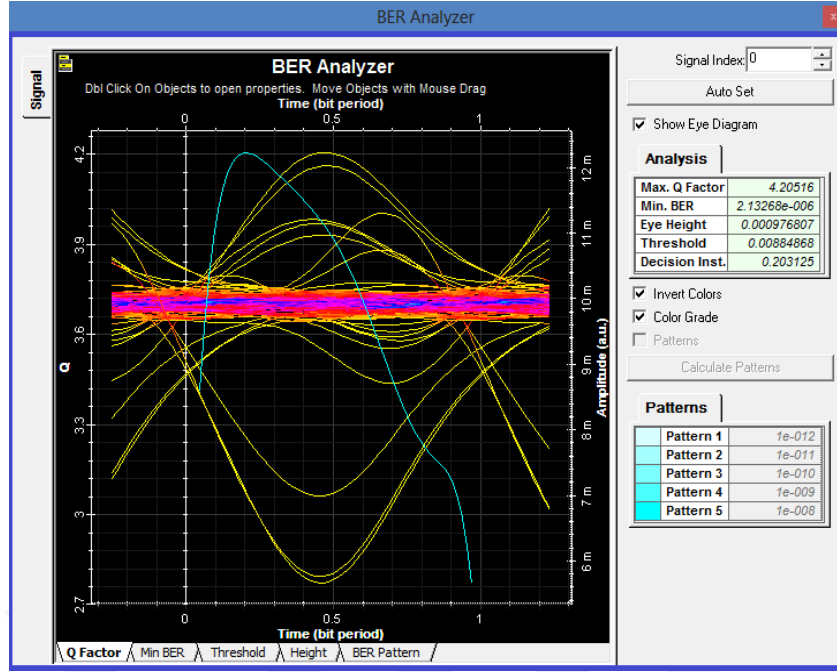
Şekil 5.16 FSK modülasyonu BER analizörü sonuçları



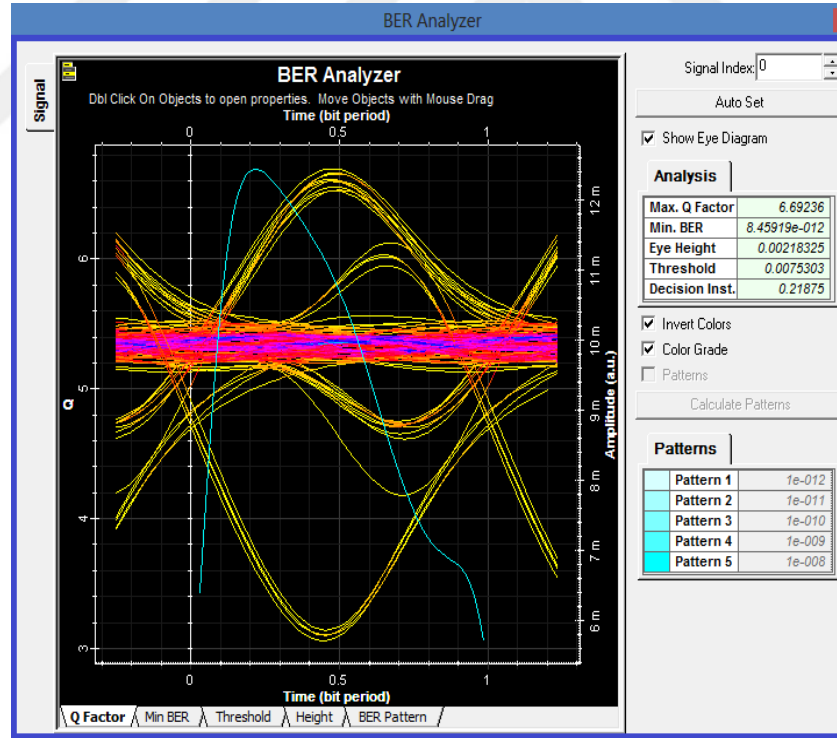
Şekil 5.17 DPSK modülasyonu BER analizörü sonuçları



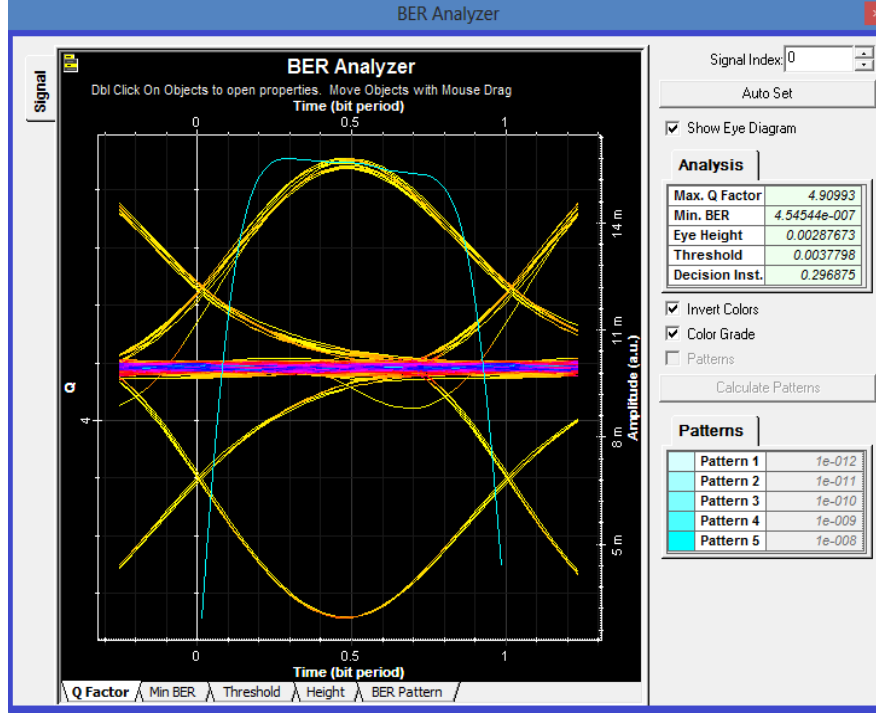
Şekil 5.18 CPFSK modülasyonu BER analizörü sonuçları



Şekil 5.19 QPSK modülasyonu BER analizörü sonuçları



Şekil 5.20 PAM modülasyonu BER analizörü sonuçları



**Şekil 5.21** QAM modülasyonu BER analizörü sonuçları

oluşturulmuş ve bu iletişim sistemlerinin performans analizleri yapılmıştır. Buna göre, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Burada, Q kalite faktörü sonuçları iletim sinyali kalitesini belirlemektedir. Uygulanan simülasyon sonucunda en yüksek kalite faktörüne sahip modülasyon çeşidi FSK’dır. BER sonuçları ise iletişim sisteminde gürültü, girişim, bozulma veya bit senkronizasyon hatalarına maruz kalan sinyalin aktarım oranıdır. Bu oranın düşük çıkması kayıpsız veri iletimi yapıldığının göstergesidir. Buna göre en düşük BER oranına sahip olan DPSK modülasyonunda en iyi veri iletimi yapılmış görülmektedir. Göz yüksekliği (eye height), voltaj ölçümüyle gözün en aşağıdan zirve noktasına kadar olan uzaklığını temsil etmektedir. Minimum izin verilen göz diyagramı yükseklik değeri ışığa duyarlılıkla ters orantılıdır. Eğer ışığa duyarlılık herhangi bir değerde sabitlenirse data iletimindeki artış da eye diyagram yüksekliğine benzer şekilde olacaktır [10].

Tüm bu simülasyon işlemleri sonucunda, radio over fiber sistemi tasarlanmış ve Q kalite faktörü, BER, göz yüksekliği, gibi çeşitli parametreler, OptiSystem



simülasyon programı kullanılarak farklı modülasyon teknikleri için karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar genel olarak radio over fiber sistemlerinin DPSK modülasyon tekniğini kullanarak daha iyi çalışabileceğini göstermektedir.

**Tablo 5.2** Uygulanan modülasyon teknikleri sonuçları

Simülasyon Sonuçları				
Parametreler	PSK	FSK	DPSK	CPFSK
Q-Factor	11.572	12.443	11.929	9.422
BER	1.99e-031	7.51e-036	2.99e-033	2.20e-021
Threshold	0.00708	0.00127	0.00776	0.00113
Eye Height	0.003	0.008	0.002	0.008

**Tablo 5.3** Uygulanan modülasyon teknikleri sonuçları

Simülasyon Sonuçları			
Parametreler	QPSK	PAM	QAM
Q-Factor	4.205	6.692	4.909
BER	2.13e-006	8.45e-012	4.54e-007
Threshold	0.00884	0.00753	0.00377
Eye Height	0.009	0.218	0.296

DPSK analiz sonuçlarında diğer modülasyon yöntemleri analiz sonuçlarına göre yüksek kalite faktörü ve düşük bit hata oranı izlenmiştir. Sonuçlar, önerilen sistemin gelecekteki geniş bantlı multimedya uygulamalarda kullanım için büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

---

Akıllı ulaşım sistemlerinin kullanım alanlarını içeren bu tez çalışmasında, sistemlerde kullanılan iletişim teknolojileri incelenmiştir.

Çalışmanın 2. Bölüm'ünde, akıllı ulaşım sistemlerinin kullanım alanları, örnek sistem mimarisi tasarımı ve bu sistemlerde kullanılan teknolojilere açıklanmıştır. Ayrıca fiber optik yapıların özellikleri ve akıllı ulaşım sistemlerinde kullanım sebepleri incelenmiştir.

3 . Bölüm'de yeni gelişmekte olan optik fiber üzerinden radyo frekans iletimi yani RoF yapıları irdelenmiştir. RoF iletiminin hangi frekanslarda yapıldığı, avantajları, dezavantajları, çeşitli mimari yapıları çok yönlü olarak ele alınmıştır. Yapılan uygulamalardan görüldüğü üzere hareketli hücreli radio over fiber mimarisi yüksek hızlı ulaşım sistemlerinde sağladığı düşük veri kaybı ve kapsama alanlarının isteğe bağlı olarak artırılmasından kaynaklı olarak daha fazla tercih edilmektedir.

4 . Bölüm'de teoride bahsedilen RoF haberleşme sistemi için OptiSystem 7.0 ve OptiSystem 14.0 yazılımları kullanılarak WDM çalışması yapılmış ve sonuçları gözlenmiştir. WDM'de iki farklı frekans seçilerek haberleşme kalitesi incelenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde ayrıca, Antenna Magus ve CST2019 yazılımları kullanılarak bu frekanslarla uyumlu çalışacak anten tasarlanmıştır. Buradaki asıl amaç, oluşturulan iletişim sisteminin son kullanıcıya kadar en az kayıpla ulaşması ve son kullanıcıdan gelen geri bildirimlerin merkez istasyonlara iletilmesidir. Yapılan çalışmada kullanılan helisel anten çoklu frekans bandına sahip olduğundan dolayı farklı iletişim kanallarının kullanılmasına imkan sağlamıştır. Dizi anten ise tek bir frekans bandında ve dar band genişliğinde çalışarak diğer çevresel sinyallerin iletişim hattına karışmasını engellemiştir. Tasarlanan bu antenlerin

performansları kıyaslandığında geniş hüzmeye helisel, dar hüzmeye dairesel polarize mikroşerit dizi antenin daha uygun olduğu izlenmiştir. Bu bölümde veri oluşumundan, aktarımına kadar olan bütün bir iletişim sistemi tüm yönleriyle araştırılmıştır.

5 . Bölüm’de RoF sistemleri için en yaygın olarak kullanılan modülasyon yöntemleri detaylı olarak ele alınmış, sonuçları karşılaştırılmış ve en uygun değerler belirlenmiştir. Verinin uzak mesafelere kayıpsız olarak iletilmesi için kullanılan RoF sistemlerin analizi yapıp değerlendirilerek yorumlanmıştır.



- [1] Chowdhury, M., & Dey, K. (2016). Intelligent transportation systems-a frontier for breaking boundaries of traditional academic engineering disciplines [education]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 8(1), 4-8.
- [2] Rogers, R. L., Fisher, D. L., & Foltz, H. D. (1997). *Development and Tests of a Low Cost Passive Millimeter Wave Sensor* (No. ARL-TR-97-3). TEXAS UNIV AT AUSTIN APPLIED RESEARCH LABS.
- [3] McQueen, B., & McQueen, J. (1999). *Intelligent transportation systems architectures*.
- [4] Lin, Y., Wang, P., & Ma, M. (2017, May). Intelligent transportation system (its): Concept, challenge and opportunity. In *2017 IEEE 3rd International Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing (Hpsc), and IEEE International Conference on Intelligent Data and Security (IDS)* (pp. 167-172). IEEE.
- [5] Dong, C. F., Ma, X., & Wang, B. H. (2010). Weighted congestion coefficient feedback in intelligent transportation systems. *Physics Letters A*, 374(11-12), 1326-1331.
- [6] Ulaştırma, D., & Bakanlığı, H. (2014). Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi (2014-2023) ve Eki Eylem Planı (2014-2016).
- [7] Tufan, H. (2014). Akıllı Ulaşım Sistemleri Uygulamaları ve Türkiye için bir AUS Mimarisi Önerisi. *Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, TC Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı*.
- [8] Maccubbin, R. P., Staples, B. L., & Mercer, M. R. (2003). *Intelligent transportation systems benefits and costs: 2003 update* (No. FHWA-OP-03-075).
- [9] An, S. H., Lee, B. H., & Shin, D. R. (2011, July). A survey of intelligent transportation systems. In *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks* (pp. 332-337). IEEE.
- [10] Güre, Ö. (2012). *Pasif Optik Ağlar ve Uygulamaları* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- [11] Leaves, P., Moessner, K., Tafazolli, R., Grandblaise, D., Bourse, D., Tonjes, R., & Breveglieri, M. (2004). Dynamic spectrum allocation in composite reconfigurable wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 42(5), 72-81.
- [12] H. Al-Raweshidy and S. Komaki, *RADIO over fiber technologies for mobile communications networks*. Artech House, 2002.
- [13] K.-I. Kitayama, "Architectural considerations of fiber-radio millimeter-wave wireless access systems," *Fiber & INTEGRATED Optics*, vol.19, no.2, pp.167-186, 2000.
- [14] Al-Raweshidy, H., & Komaki, S. (2002). *Radio over fiber technologies for mobile communications networks*. Artech House.
- [15] Bakaul, M. (2006). *Technologies for DWDM Millimetre-wave Fibre Radio Networks*. University of Melbourne, Centre for Ultra-Broadband Information Networks (CUBIN), Department of Electrical and Electronic Engineering.

- [16] Meslener, G. (1984). Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 20(10), 1208-1216.
- [17] Schmuck, H. (1995). Comparison of optical millimetre-wave system concepts with regard to chromatic dispersion. *Electronics Letters*, 31(21), 1848-1849.
- [18] Gamage, P. A., Nirmalathas, A., Lim, C., Novak, D., & Waterhouse, R. (2008, September). Experimental demonstration of digitized RF transport over optical fiber links. In *2008 International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference* (pp. 15-18). IEEE.
- [19] Abe, K., Tobana, T., Sasamori, T., & Koizumi, H. (2000, July). A study on a road-vehicle communication system for the future intelligent transport systems. In *Proceedings Seventh International Conference on Parallel and Distributed Systems: Workshops* (pp. 343-348). IEEE.
- [20] Kim, H. B., Emmelmann, M., Rathke, B., & Wolisz, A. (2005, May). A radio over fiber network architecture for road vehicle communication systems. In *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference* (Vol. 5, pp. 2920-2924). IEEE.
- [21] De Greve, F., Lannoo, B., Peters, L., Van Leeuwen, T., Van Quickenborne, F., Colle, D. & Demeester, P. (2005). Famous: A network architecture for delivering multimedia services to fast moving users. *Wireless Personal Communications*, 33(3-4), 281-304.
- [22] Lannoo, B., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2007). Radio-over-fiber-based solution to provide broadband internet access to train passengers [Topics in Optical Communications]. *IEEE Communications Magazine*, 45(2), 56-62.
- [23] Pinter, S. Z., Fernando, X. N., & Toronto, O. N. (2005). Fiber-wireless solution for broadband multimedia access. *IEEE Canadian Review-Summer*, 50, 6-9.
- [24] Smith, G. H., Novak, D., & Ahmed, Z. (1997). Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 45(8), 1410-1415.
- [25] Zhang, L., Xin, X., Liu, B., Wang, Y., Yu, J., & Yu, C. (2010). OFDM modulated WDM-ROF system based on PCF-supercontinuum. *Optics express*, 18(14), 15003-15008.
- [26] Robinson, S., Jasmine, S., & Pavithra, R. (2015). Investigation on hybrid WDM (DWDM+ CWDM) Free Space Optical communication system. *ICTACT Journal On Communication Technology*, 6(04).
- [27] Brackett, C. A. (1990). Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and applications. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 8(6), 948-964.
- [28] Ivaniga, T., & Ivaniga, P. (2014). Evaluation of the bit error rate and Q-factor in optical networks. *IOSR J Electron Commun Eng*, 9(6), 01-03.
- [29] Miller, C. M. (1994). High-speed digital transmitter characterization using eye diagram analysis. *Hewlett Packard Journal*, 45, 29-29.
- [30] Pozar, D. M. (2009). *Microwave engineering*. John Wiley & Sons.
- [31] Webb, W. T., & Hanzo, L. (1994). *Modern Quadrature Amplitude Modulation:*

*Principles and applications for fixed and wireless channels: one.* IEEE Press-John Wiley.

- [32] Principles and applications for fixed and wireless channels: one. IEEE Press-John Wiley, 1994
- [33] Malaric, K., Bartolic, J., & Malaric, R. (2004, May). Measurement of GSM phone emission. In *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No. 04CH37510)* (Vol. 1, pp. 263-266). IEEE.
- [34] BİLİM, M., & DEVELİ, Y. K. GSM 900 MHZ FREKANS BANDINDAKİ ELEKTROMANYETİK YOĞUNLUĞUN GÜNÜN FARKLI ZAMAN DİLİMLERİ İÇİN ÖLÇÜLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ MEASUREMENT AND EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC DENSITY ON GSM 900 MHZ FREQUENCY BAND FOR DIFFERENT TIME PERIODS OF A DAY.
- [35] Hamid, R., Cetintas, M., Karacadag, H., Gedik, A., Yogun, M., Celik, M., & Firlarer, A. (2003, May). Measurement of electromagnetic radiation from GSM base stations. In *2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC'03.* (Vol. 2, pp. 1211-1214). IEEE.
- [36] McHenry, M. A., Tenhula, P. A., McCloskey, D., Roberson, D. A., & Hood, C. S. (2006, August). Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal. In *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum* (pp. 1-es).

İletişim Bilgisi: tuce\_ackgz@hotmail.com

### Konferans Bildirileri

1. Applicat,on of Radio Over Fiber Modulation Techniques in Intelligent Transportation Systems, International Natural Science, Engineering and Material Technologies Conference Sep 9-10,2019-Istanbul/Turkey
2. Fiber Üzerinden Radyo Çoğullama Tekniğinin Akıllı Ulaşım Sistemlerindeki Uygulamaları, 21. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı 6 Eylül,2019-İstanbul/Türkiye

