

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK AĞLARDA FTTX UYGULAMALARI

Muhsin ATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ

Ağustos, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK AĞLARDA FTTX UYGULAMALARI

Muhsin ATAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 09.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik 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

Doç. Dr. Serkan KURT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mesut ÇEVİK, Üye
Altınbaş Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Optik Ağlarda FTTX Uygulamaları 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.

Muhsin ATAŞ

İmza



*Hacı Babam'a,
değerli Babalar'a,
canım anneme ve babama,
sevgili eşime ve çocuklarıma.*

TEŞEKKÜR

Optik Ağlarda FTTX Uygulamaları konusunda hazırlamış olduğum yüksek lisans tez çalışmasında değerli vaktini esirgemeyen, bilgi birikimi ve bilimsel yaklaşımı ile her zaman bana destek olan, başaracağıma inanan ve beni inandıran Tez Danışmanım ve Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ'ye en kadim duygularla teşekkürlerimi sunuyorum.

Beni yetiştiren, bugünlere gelmeme vesile olan, maddi ve manevi desteklerini her daim hissettiğim canım anneme, babama ve kardeşlerime minnettarım.

Bu tezin hazırlanma sürecinde gösterdiği sabır ve verdiği her türlü destek için sevgili eşim Nazime ATAŞ'a, gelecekte iyi bir örnek olma gayretiyle bu tezi bitirmemde en büyük motivasyon kaynaklarım olan canım oğullarım Mert Cesim'e ve Melih'e teşekkür ederim.

Muhsin ATAŞ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
2 OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ	3
2.1 Optik Haberleşme Sistemlerinin Türleri	6
2.1.1 PDH	6
2.1.2 SONET/SDH	9
2.1.3 WDM	10
2.2 Optik Sistem Elemanları	13
2.2.1 Fiber Optik Kablolar	13
2.2.2 Optik Fiber Bağlantı Elemanları	13
2.2.3 Optik Modülatörler ve Demodülatörler	17
2.2.4 Lazerler	20
2.2.5 Optik Bölücüler	21
2.2.6 Optik Kuvvetlendiriciler	23
2.2.7 Optik Zayıflatıcılar	24
2.2.8 Optik Filtreler	25
2.2.9 Optik Sensörler	27
2.2.10 Optik Kuplörler	28
2.2.11 Optik Sirkülatörler ve İzolatörler	29

2.2.12	Optik Rezonatörler.....	30
3	OPTİK AĞLAR	32
3.1	Noktadan Noktaya Optik Ağlar	33
3.2	Aktif Optik Ağlar	34
3.3	Pasif Optik Ağlar	35
3.3.1	T-PON / A-PON / B-PON	37
3.3.2	E-PON.....	37
3.3.3	G-PON	38
3.3.4	XG-E-PON.....	40
3.3.5	XG-PON	40
4	FTTX TEKNİKLERİ	42
4.1	FTTX Türleri.....	42
4.1.1	FTTC (Fiber To the Curb, Kaldırıma Kadar Fiber).....	42
4.1.2	FTTB (Fiber To the Building, Binaya Kadar Fiber).....	44
4.1.3	FTTH (Fiber To the Home, Eve Kadar Fiber).....	45
4.2	FTTX Tekniğinin Avantajları ve Dezavantajları	46
5	OPTİK SİSTEM ELEMANLARININ KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ	48
5.1	Dalga Boylarının Karşılaştırılması.....	49
5.2	Bit Hızlarının Karşılaştırılması	58
5.3	Darbe Üreticilerin Karşılaştırılması	63
5.4	Modülatörlerin Karşılaştırılması	70
5.5	Lazerlerin Karşılaştırılması.....	76
5.6	Fotodedektörlerin Karşılaştırılması.....	80
5.7	Filtrelerin Karşılaştırılması	85
5.8	Kuvvetlendiricilerin Karşılaştırılması.....	91
6	OPTİK AĞ UYGULAMALARI	97
6.1	FTTH Uygulaması	97
6.2	P2P Uygulaması.....	104
7	SONUÇ	118
	KAYNAKÇA	121
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	124

SİMGELİSTESİ

λ	dalga boyu
dB	Desibel
f	frekans
$Gbps$	Gigabits per second
KHz	Kilohertz
$Kbps$	Kilobits per second
km	kilometre
μs	mikrosaniye
mm	milimetre
mW	miliwatt
nm	nanometre
THz	Terahertz

KISALTMA LİSTESİ

AM	Amplitude Modulation
ANSI	American National Standards Institute
AON	Active Optical Network
APD	Avalanche Photodiode
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BPF	Band Pass Filter
BER	Bit Error Rate
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
CWL	Continuous Wave Laser
DMLM	Directly Modulated Laser Measured
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EM	Electroabsorption Modulator
E-PON	Ethernet Passive Optic Network
FBT	Fused Biconical Taper
FC	Ferrule Connector
FM	Frequency Modulation
FTA	Fiber Toplama Anahtarı
FTTB	Fiber to the Building
FTTC	Fiber to the Curb
FTTF	Fiber to the Factory
FTTH	Fiber to the Home
FTTO	Fiber to the Office
FTTX	Fiber to the X
G-PON	Gigabit Passive Optic Network
HPF	High Pass Filter
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU-T	International Telecommunication Union- Telecommunication Standardization Sector

KTA	Kenar Toplama Anahtarı
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LC	Lucent Connector
LED	Light Emitting Diode
LPF	Low Pass Filter
LRA	Laser Rate Equations
MDU	Multi Dwelling Unit
MPLS	Multi Protokol Label Switching
MPO/MTP	Multi-fiber Push On/Pull Off
MTRJ	Mechanical Transfer Registered Jack
MZM	Mach-Zehnder Modulator
NRZ	Non Return to Zero
OSA	Optical Spectrum Analyser
OV	Oscilloscope Visualizer
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PIN	Positive-Intrinsic-Negative
PLC	Planar Lightwave Circuit
PLL	Phase Lock Loop
PON	Passive Optical Network
P2MP	Point to Multi Point
P2P	Point to Point
RFSA	RF Spectrum Analyser
RZ	Return to Zero
SC	Standard Connector
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SONET	Synchronous Optical Network
ST	Straight Type
STS	Synchronous Transport Signal
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
WDM	Wavelength Division Multiplexing
YDFA	Ytterbium Doped Fiber Amplifier

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Optik haberleşme sistemleri blok şeması.	4
Şekil 2.2	Sırasıyla T1 (J1) ve E1 arayüzleri.	7
Şekil 2.3	PDH kanal ve hız kapasiteleri.	7
Şekil 2.4	E1'den E5'e PDH çoğullama yapısı.	8
Şekil 2.5	PDH ekleme ve çıkarma.	8
Şekil 2.6	SONET STS-1 çerçeve yapısı.	9
Şekil 2.7	WDM yapısı.	11
Şekil 2.8	WDM türleri ve dalga boyu desenleri.	11
Şekil 2.9	CWDM ve DWDM dalga boyları.	12
Şekil 2.10	Konnektör türlerine ait görseller.	14
Şekil 2.11	Fiber optik kabloların füzyon ile birleştirilmesi.	16
Şekil 2.12	(a) Mach-Zehnder modülatörü konfigürasyon, (b) elektroabsorbsiyona dayalı yarı iletken modülatör.	19
Şekil 2.13	Koherent ve inkoherent lazer ışınları.	20
Şekil 2.14	Optik bölücü türleri.	22
Şekil 2.15	PLC bölücülerde ışığın çoklanması.	22
Şekil 2.16	Katkılanmış fiber optik kuvvetlendirici modeli.	23
Şekil 2.17	Filtre türlerinin transfer fonksiyonlarının frekansa göre değişimleri. ..	25
Şekil 2.18	Bir optik fiber sensörünün genel yapısı.	27
Şekil 2.19	2x2 optik fiber kuplörün blok şeması.	28
Şekil 2.20	Optik izolasyon ve sirkülasyon: (a) optik izolatörün fonksiyonel şeması (b) üç portlu optik sirkülatör (c) dört portlu optik sirkülatör.	29
Şekil 2.21	Rezonatör çeşitleri: (a) düzlem ayna rezonatör (b) ring rezonatör (c) küresel ayna rezonatör (d) optik fiber rezonatör.	30
Şekil 3.1	P2P ağ yapısı.	33
Şekil 3.2	AON yapısı.	34
Şekil 3.3	PON yapısı.	36
Şekil 3.4	E-PON katman yapısı (solda) ve E-PON çerçeve yapısı (sağda).	38
Şekil 3.5	G-PON mimarisi.	39
Şekil 4.1	FTTX türleri.	43

Şekil 5.1 Fiber optik veri iletiminde kullanılan dalga boyları ve zayıflama değerleri.	48
Şekil 5.2 Dalga boyu analizine ait referans düzenek.	50
Şekil 5.3 850 nm, 1310 nm, 1550 nm ve 1750 nm için MZM (sağ sütun) ve fiber optik kablo (sol sütun) çıkışlarına ait OSA sonuçları.	51
Şekil 5.4 850 nm, 1310 nm, 1550 ve 1750 nm için BER analizörü sonuçları.	53
Şekil 5.5 850 nm, 1310 nm, 1550 ve 1750 nm için maksimum kalite faktörü grafiği.	53
Şekil 5.6 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için çok modlu fiber optik kablo ile tasarlanan düzenek.	54
Şekil 5.7 10 km'lik çok modlu fiber optik kablo için OSA sonuçları.	55
Şekil 5.8 3 km'lik çok modlu fiber optik kablo için OSA sonuçları.	56
Şekil 5.9 1 km'lik çok modlu fiber optik kablo için OSA sonuçları.	56
Şekil 5.10 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için 10 km (üstte), 3 km (ortada) ve 1 km (altta) çok modlu fiber optik kablo BER analizörü sonuçları.	57
Şekil 5.11 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için çok modlu fiber optik kabloya ait maksimum kalite faktörü grafiği.	58
Şekil 5.12 Farklı bit hızlarını uygulama arayüzü.	59
Şekil 5.13 Farklı bit hızlarının uygulanması için tasarlanan referans düzenek.	60
Şekil 5.14 1 Gbps bit hızı için MZM, PIN ve filtre çıkışlarının frekans ve zaman domeni analizleri.	61
Şekil 5.15 Hız değerlerine göre maksimum kalite faktörünün değişim grafiği.	62
Şekil 5.16 Hız değerlerine göre BER analizörü sonuçları.	62
Şekil 5.17 Karşılaştırması yapılacak RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticileri.	64
Şekil 5.18 RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerine ait OV (sol sütun) ve RFSA (sağ sütun) sonuçları.	65
Şekil 5.19 Darbe üreticilerini karşılaştırmak için tasarlanan referans düzenek.	66
Şekil 5.20 Darbe üreticisi çıkışındaki sinyaller (sol sütun) ile alçak geçiren Bessel filtre çıkışındaki sinyallerin (sağ sütun) zaman domeni analizleri.	67
Şekil 5.21 Darbe üreticisi çıkışındaki sinyaller (sol sütun) ile alçak geçiren Bessel filtre çıkışındaki sinyallerin (sağ sütun) frekans domeni analizleri.	68
Şekil 5.22 RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerine ait BER analizörü sonuçları.	69

Şekil 5.23 RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerine ait maksimum kalite faktörü grafiği.....	70
Şekil 5.24 Modülatörlerin karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.....	71
Şekil 5.25 Modülatör çıkışlarına (sol sütun) ve fiber optik kablo çıkışlarına ait OSA sonuçları.	72
Şekil 5.26 Modülatör çıkışlarına (sol sütun) ve fiber optik kablo çıkışlarına ait OV sonuçları.	73
Şekil 5.27 NRZ darbe üreticisinin MZM, AM, EM ve FM'ye ait BER analizörü sonuçları.	74
Şekil 5.28 RZ, NRZ, Gaussian ve sine darbe üreticilerin MZM, AM, EM ve FM'ye ait maksimum kalite faktörü grafiği.	75
Şekil 5.29 Lazerlerin karşılaştırıldığı referans düzenek.	77
Şekil 5.30 Lazer çıkış sinyallerine ait OSA ve OTDV sonuçları.	78
Şekil 5.31 Lazer sinyallerinin alıcı kısmına ait BER analizörü sonuçları.	79
Şekil 5.32 Lazer sinyallerin alıcı kısmında elde edilen maksimum kalite faktörlerine ait grafik.	79
Şekil 5.33 Fotodedektör karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.....	81
Şekil 5.34 NRZ çıkışına, APD ve PIN çıkışlarına ve filtre çıkışlarına ait RFSA sonuçları.	82
Şekil 5.35 NRZ çıkışına, APD ve PIN çıkışlarına ve filtre çıkışlarına ait OV sonuçları.	83
Şekil 5.36 APD ve PIN fotodiyotuna ait BER analizörü sonuçları.	84
Şekil 5.37 APD ve PIN fotodiyotuna ait maksimum kalite faktörü grafiği.	84
Şekil 5.38 1 Gbps hız için APD ve PIN fotodiyotlarına ait kazanç katsayısı ile maksimum kalite faktörü grafiği.	85
Şekil 5.39 Filtrelerin karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.	86
Şekil 5.40 Filtre çıkışlarına ait RFSA (solda) ve OV (sağda) sonuçları.....	87
Şekil 5.41 Filtrelere ait BER analizörü sonuçları.	88
Şekil 5.42 Filtre derecelerine göre maksimum kalite faktörü grafiği.	89
Şekil 5.43 Kesim frekansına göre maksimum kalite faktörü grafiği.	90
Şekil 5.44 Kuvvetlendiricilerin karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.	92
Şekil 5.45 Kuvvetlendiricilere ait BER analizörü sonuçları.....	93

Şekil 5.46 Kuvvetlendiricili ve kuvvetlendiricisiz olarak elde edilen maksimum kalite faktörü grafiği.	93
Şekil 5.47 Raman kuvvetlendiricinin mesafeye göre performans analizi için tasarlanan referans düzenek.	94
Şekil 5.48 Raman kuvvetlendiricinin 1550 nm için maksimum kalite faktörünün mesafeye göre değişim grafiği.	95
Şekil 5.49 Raman kuvvetlendiricinin mesafelere göre elde edilen BER analizörü sonuçları.	96
Şekil 6.1 Tasarlanan referans FTTH modeli.	98
Şekil 6.2 Tasarlanan referans FTTH düzeneğinde bulunan verici (OLT) ve alıcı (ONT) detayı.	99
Şekil 6.3 Tasarlanan referans FTTH düzeneğinde bulunan A, B, C ve D binalarının detayları.	100
Şekil 6.4 A (solda) ve B (sağda) binalarına ait BER analizörü sonuçları.	101
Şekil 6.5 A (üstte) ve B (altta) binalarındaki kullanıcılara ait zayıflama değerleri.	101
Şekil 6.6 OLT çıkışındaki güç kaybı.	102
Şekil 6.7 C (üstte) ve D (altta) binalarındaki kullanıcılara ait zayıflama değerleri.	102
Şekil 6.8 C (solda) ve D (sağda) binalarına ait BER analizörü sonuçları.	103
Şekil 6.9 İstanbul, İzmir ve Ankara illerinde bulunan noktalar için tasarlanan referans model.	105
Şekil 6.10 İstanbul ile İzmir illeri için tasarlanan verici, iletim ve alıcı blokları.	106
Şekil 6.11 İzmir ile Ankara illeri için tasarlanan verici, iletim ve alıcı blokları.	106
Şekil 6.12 Ankara ile İstanbul illeri için tasarlanan verici, iletim ve alıcı blokları.	106
Şekil 6.13 Tasarlanan verici blok detayı.	107
Şekil 6.14 Tasarlanan alıcı blok detayı.	107
Şekil 6.15 Tasarlanan 600 km'lik iletim ortamı blok detayı.	108
Şekil 6.16 600 km'lik İzmir ile Ankara düzeneğine ait OSA sonuçları.	109
Şekil 6.17 600 km'lik İzmir ile Ankara düzeneğine ait BER analizörü sonucu.	110
Şekil 6.18 Tasarlanan 500 km'lik iletim ortamına ait verici, iletim ve alıcı blokları.	110

Şekil 6.19 500 km'lik İstanbul ile İzmir düzeneğine ait OSA sonuçları.	111
Şekil 6.20 500 km'lik İstanbul ile İzmir düzeneğine ait BER analizörü sonucu.	112
Şekil 6.21 450 km'lik Ankara ile İstanbul düzeneğine ait OSA sonuçları.	112
Şekil 6.22 450 km'lik Ankara ile İstanbul düzeneğine ait BER analizörü sonucu.	113
Şekil 6.23 İzmir ile Ankara arasında tasarlanan WDM modeline ait blok yapısı.	114
Şekil 6.24 WDM vericiye ait blok detayı.	115
Şekil 6.25 Tasarlanan 150 km'lik Raman kuvvetlendirici detayı.	115
Şekil 6.26 Multiplexer ve Raman kuvvetlendirici çıkışlarındaki OSA'lara ait sonuçlar.	116
Şekil 6.27 Tasarlanan alıcı bloğa ait detay.	117
Şekil 6.28 10 Gbps hızında 1550 nm, 1565 nm ve 1580 nm dalga boylarının 600 km'lik mesafe için elde edilen BER analizörü sonuçları	117

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 SONET/SDH hat hızları tablosu.....	10
Tablo 2.2 Konnektör tipleri.....	15
Tablo 6.1 A, B, C ve D binalarındaki kullanıcıların mesafe, bölünme sayısı ve maksimum kalite faktörü değerleri tablosu.....	103



Optik Ağlarda FTTX Uygulamaları

Muhsin ATAŞ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ

Küreselleşen ve sanallaşan dünyada hem insanlar arasındaki iletişim hem insanlar ile sistemler arasındaki iletişim ve hem de sistemler arasındaki iletişim vazgeçilemez bir ihtiyaç haline gelmiştir. Klasik anlamda haberleşme veri, ses ve video trafiği anlamına gelmekteyken günümüzde canlı yayınlar, çevrimiçi oyunlar, blok zincir teknolojileri, yapay zekâ uygulamaları, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) ve akıllı ev otomasyonlarıyla yoğun internet kullanımına dönüşmektedir. Bu nedenle her geçen gün son kullanıcılar tarafından talep edilen ve ihtiyaç duyulan veri iletim hızları artmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanabilmesi için optik haberleşme sistemlerinin de sürekli geliştirilmesi, kapasitelerinin artırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, 2. Bölüm’de optik haberleşme sisteminin verici, iletim ortamı ve alıcı kısımları açıklanmıştır ve sistemi oluşturan elemanlar hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmanın 3. ve 4. Bölüm’lerinde optik ağ türleri açıklanmış ve FTTX (Fiber to the X) teknikleri tartışılmıştır. OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak tasarlanan karşılaştırma düzenekleri ile bu düzeneklere ait analizler ve sonuçlar 5. Bölüm’de değerlendirilmiştir. 6. Bölüm’de ise 5. Bölüm’de karar verilen en iyi performanslı sistem elemanlarıyla FTTH (Fiber to the Home, Eve

Kadar Fiber) ve P2P (Point to Point, Noktadan Noktaya) model tasarımları analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İletişim teknolojileri, optik haberleşme, optik ağlar, optik sistem elemanları, FTTX.



FTTX Applications in Optical Networks

Muhsin ATAŞ

Department of Electronics and Telecommunication Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi N. Özlem ÜNVERDİ

In the globalized and virtual world, communication between people, as well as communication between people and systems, and communication between systems, has become an essential necessity. Communication, traditionally referring to data, voice and video traffic, has now transformed into intensive internet usage with live broadcasts, online gaming, blockchain technologies, artificial intelligence applications, the Internet of Things (IoT), and smart home automations. Therefore, the data transmission speeds requested and needed by end users increase day by day. Optical communication systems need to be continuously improved and their capacities increased in order to meet this requirement.

In this study, in Chapter 2, the transmitter, transmission medium and receiver parts of the optical communication system have been explained and information about the circuit elements that constitute the system has been provided. In the 3rd and 4th sections of the work, optical network types are explained and FTTX (Fiber to the X) technologies are discussed. The comparison of the designed circuits with using OptiSystem 7.0 simulation program and the analyses and results related to these circuits have been evaluated in Chapter 5. In the 6th section, the circuit designs for FTTH (Fiber to the Home) and P2P (Point to Point) have been analyzed by using the best performing components decided in the 5th section.

Keywords: Communication technologies, optical communication, optical networks, optical system components, FTTX.



YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1.1 Literatür Özeti

Coğrafi sınırların giderek önemsiz hale geldiği bir dünyada, insanlar arasındaki iletişim artık sadece yerelde değil, küresel boyutta gerçekleşmektedir. Optik haberleşme sistemleri, bu küreselleşen dünyada insanların ve sistemlerin birbirleriyle iletişim kurmasını sağlayan temel bir araç haline gelmiştir.

Antik zamanlarda Çin’de havai fişeklerle bilgi iletimi, ilk optik haberleşme olarak gösterilebilir. Tarih boyunca birçok uygarlık, mercek, ayna ve ateş gibi araçlarla ışığı kullanan sistemleri baz alarak optik haberleşmeyi kullanmıştır. 1792’de Claude Chappe tarafından mekanik olarak mesajlar uzak mesafelere kodlanarak ve ara röle istasyonları kullanılarak optik üzerinden iletilmesi ve 1794’te Paris ve Lille şehirleri arasında yaklaşık olarak 200 km mesafeye kodlanmış mesaj iletilmesiyle ilk “optik telgraf” hizmete girmiştir [1-4].

20. yüzyılda telefon ağlarının gelişimiyle iletişim sistemlerinin tasarımında elektrik uzun bir süre baş rolü oynamıştır. Bakır kablo ve koaksiyel kablonun uzun mesafelerdeki kapasite kısıtları ve zayıflamalar nedeniyle mikrodalga iletişim sistemlerinin geliştirilmesine ve daha yüksek frekansta veri iletimine olanak tanımıştır, ancak mikrodalgalarda da yine mesafe ve kapasite kısıtları söz konusu olması nedeniyle arayışlar devam etmiştir. Elektronun bakır tellerde kılavuz edildiği gibi fotonların da uygun bir ortamda yönlendirilebileceği fikri iletişim için iyi bir seçenek olarak önerilmiştir. 1960’lı yıllarda lazerlerin icadı, 1970’li yıllarda fiber kayıplarının 20 dB/km altına düşürülmesi ile optik iletişim için lazer ışığının kullanılması üzerine odaklanılmıştır. Bu gelişmeler, iletişim teknolojisinin evrimini şekillendirmiştir ve günümüzdeki optik fiber iletişim sistemlerine doğru ilerlemiştir. Optik fiberler, düşük kayıplı iletişim için kritik bir rol oynayarak internetin yaygınlaşmasıyla birlikte dalga boyu bölünmeli çoklu erişim (Wavelength Division Multiplexing, WDM) gibi teknolojilerle daha da gelişmiştir. [1, 5].

Türkiye’de yapılan ilk kablo çekim işlemi 1985 yılında gerçekleştirilmiştir. Ankara Gölbaşı uydu merkezi ile Ulus’ta bulunan merkez ofis arasında yeraltında çekilen

fiber optik kablo uzunluğu 42 km ve veri iletim hızı 1310 nm dalga boyunda 140 Mbps olarak kayıtlara geçmiştir. Türkiye’deki ilk fiber optik havai kablo tesisi ise Aydın ile Denizli illeri arasında 1987 yılında gerçekleştirilmiştir [6].

Günümüzde halen fiber optik çalışmaları ve geliştirmeleri devam etmektedir. Optik fiberlerin iletişim sistemlerinde kullanım biçimleri de hızlılık, verimlilik, daha çok kullanıcıya hitap etme yönünden büyük önem taşımaktadır. İlk uygulamalarda merkezler arasında çekilen fiber kablolar gün geçtikçe ve ihtiyaç arttıkça son kullanıcılara doğru yakınsamaktadır. Bir diğeryandan sistemlerin sahada yayılması enerjiye olan ihtiyacı ve bağımlılığı da beraberinde getirmesinden dolayı pasif ağılara olan gereksinim de ortaya çıkmıştır. Bu yönüyle dünyada daha çok evlere kadar fiber olarak bilinen pasif optik ağların kullanılması, fiber optik iletişimde farklı bir boyut kazandırmıştır [7].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, optik haberleşme sistemini oluşturan elemanlar hakkında bilgi verilmiştir. OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile hazırlanan karşılaştırma düzenekleriyle vericiden başlanarak alıcıya doğru dalga boyları, bit hızları, darbe üreticileri, lazerler, modülatörler, fiber optik kablolar, fiber optik kablo mesafeleri, fotodedektörler, filtreler ve kuvvetlendiriciler karşılaştırılarak en iyi performanslı sistemlerin tasarlanması hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Optik haberleşme sistemlerinde vericiden alıcıya doğru sistem elemanlarına ait karşılaştırmalar yapılarak, kritik parametrelerin optimize edilmesiyle iyi sonuç alınan elemanların tercih edilmesi sonucunda en iyi performanslı sistemin tasarlanabileceğı düşünülmektedir.

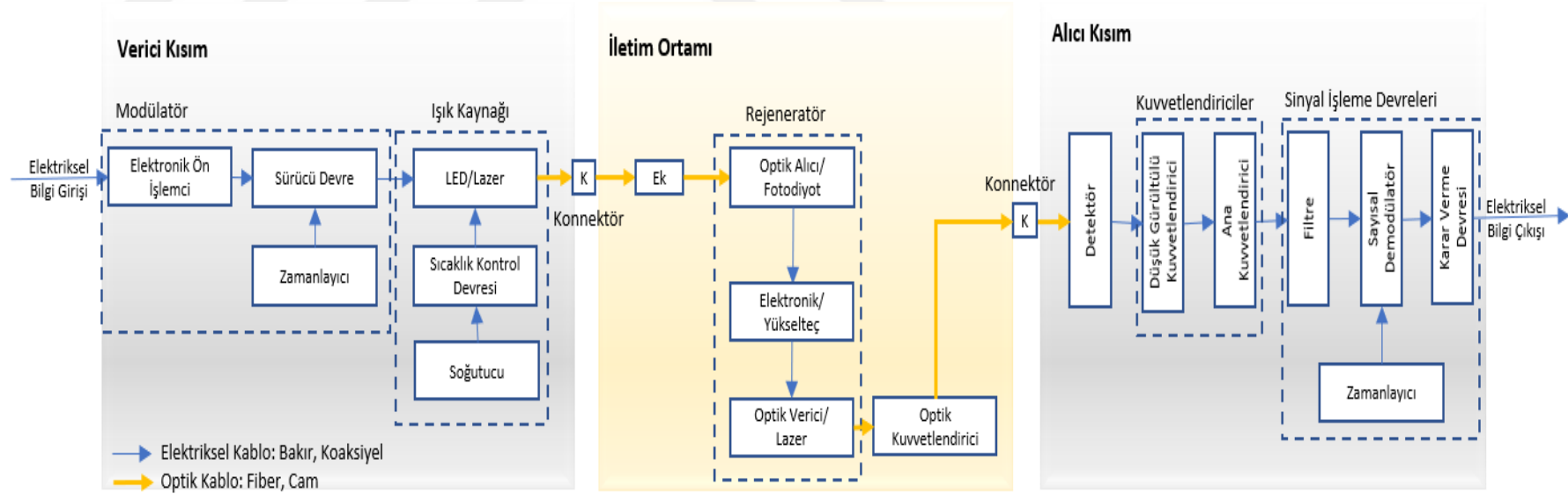
2 OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Optik haberleşme, ışık sinyalleri aracılığıyla bilgi iletimi sağlayan bir iletişim teknolojisidir. Işık veya fotonlar aracılığıyla veri iletimini sağlayan iletişim sistemlerine ise optik haberleşme sistemleri denilir. Bu sistemler genellikle yüksek hızda veri iletimi, düşük kayıp, düşük gecikme, geniş band genişliği ve güvenilirlik gibi avantajlarıyla günümüz iletişim altyapısının önemli bir parçası durumunda bulunur. İnternet bağlantıları, telekomünikasyon, veri merkezleri ve uzun mesafeli iletişim gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Optik haberleşme sistemlerinin verici kısım, iletim ortamı ve alıcı kısım olmak üzere üç ana bileşeni Şekil 2.1’de bulunmaktadır. Verici (transmitter), optik haberleşme sistemlerinde bilgiyi ışık sinyallerine dönüştüren birimdir. Optik vericiler, elektrik sinyallerini modüle edilmiş optik sinyallere dönüştürür. Elektrik sinyali, optik sinyale dönüştürülürken modülasyon işlemi ile bilgi taşınabilir formatta optik sinyallere eklenir ve bu sinyaller daha sonra genellikle fiber optik kablolar olan iletim ortamına gönderilir.

Şekil 2.1’de optik vericilerin ana bileşenlerinin, ışık kaynakları ve modülatörler olduğu gösterilmektedir. Optik vericiler, ışık yayan diyotlar (LED) ve yarı iletken lazerler gibi yarı iletken optik kaynakları kullanılır, çünkü bunlar yüksek verimlilik, iyi güvenilirlik, doğru dalga boyu aralığı, fiber çekirdeğe uyumlu küçük yayıcı alan gibi çeşitli avantajlar sağlar [4].

İletim ortamı (transmission medium), optik haberleşme sistemlerinde kullanılan temel taşıyıcıdır. Genellikle fiber optik kablolardan ve sinyal güçlendiricilerden (rejeneratörlerden) oluşan iletim ortamı, verilerin ışık hızında, düşük kayıpla ve yüksek hızda iletilmesini sağlayan kısımdır.



Şekil 2.1 Optik haberleşme sistemleri blok şeması.

Fiber optik kablolar, genellikle ince cam veya plastik liflerden oluşmaktadır. Her bir fiber, iç kısmında çekirdek adı verilen optik bir malzeme ve bu çekirdeği çevreleyen bir yansıtıcı tabakadan oluşmaktadır. Çekirdek, ışığın taşınması için kullanılırken, yansıtıcı tabaka ışığın içerideki çekirdek boyunca yansımaları sağlayarak kayıpları minimize eder.

Fiber optik kablolar, elektrik kablolarına göre daha büyük veri taşıma kapasitesine sahiptir ve elektromagnetik girişimlerden etkilenmezler. Bu kablolar; internet, telefon ağları, veri merkezleri ve iletişim sistemleri gibi birçok alanda kullanılır. Yüksek hızlı, güvenilir ve geniş band genişliği sunma avantajları nedeniyle fiber optik kablolar modern iletişim altyapısının kritik bir parçasını oluşturur.

Işık, fiber içinde ilerlerken tam iç yansıma prensibini kullanır ve bu sayede sinyaller düşük kayıpla büyük mesafelere iletilebilse bile bazı sistemler için sinyali tekrar güçlendirmek gerekir. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere rejeneratör kısmı optik sinyali alıp, kuvvetlendirip tekrar iletir.

Alıcı (reciever), optik haberleşme sistemlerinin bir diğer önemli bileşenidir. Optik sinyallerin alınması, işlenmesi ve orijinal veri formatına dönüştürülmesi, iletişim sürecinin doğru ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi alıcı tarafından yapılır. Alıcılar dedektör, kuvvetlendirici ve sinyal işleme devresi gibi temel parçalardan oluşur. Bu parçalar, optik sinyallerin alınmasını ve orijinal veri formatına dönüştürülmesini yapar. Ana bileşenlerden biri olan dedektörler; gelen optik sinyalleri algılar ve elektrik sinyallerine dönüştürerek verinin alınmasını sağlar. Ön amplifikatörler (kuvvetlendiriciler) alınan zayıf elektrik sinyallerini güçlendirmek için kullanılmaları, sinyallerin daha etkili bir şekilde işlenebilir olmasına yarar. Sinyal işleme devreleri, alınan sinyalleri işleyerek orijinal veriyi elde etmek için kullanılır. Bu devreler, sinyal işleme, demodülasyon ve verinin doğru şekilde işlenmesini sağlar [8].

2.1 Optik Haberleşme Sistemlerinin Türleri

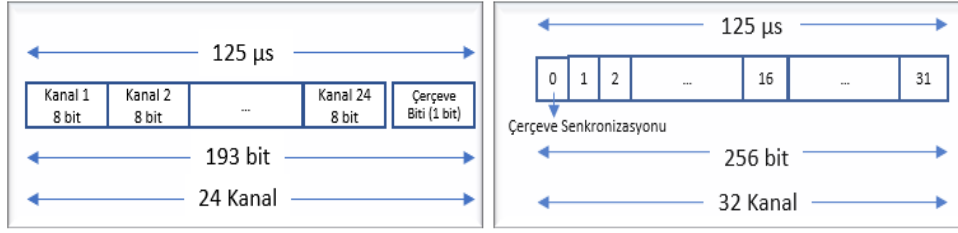
Optik haberleşme sistemlerinden önce var olan analog haberleşme sistemleri, iletişimde belirli sınırlamaları beraberinde getirmekteydi. Öncelikle, analog iletişimde sinyal gücü, uzaklık arttıkça azalma eğilimi göstermesi, iletişimin uzun mesafelerde zayıflamasına ve kalitesinin düşmesine neden olmaktaydı. Ayrıca, analog iletişim sistemlerinde, sinyal gücünde meydana gelen bozulmalar ve parazitler ile başa çıkılması zor olmasından dolayı iletişim kalitesinin düşmesine sebep olmaktaydı.

Optik haberleşme sistemleri, yukarıda bahsedilen sorunları aşmak ve iletişimi daha etkin hale getirmek için geliştirilerek ışık hızında iletişim imkânı sunar. Optik fiberler, verileri ışık sinyalleri olarak ileterek daha yüksek hızlarda ve daha uzun mesafelerde iletişim sağlar. Ayrıca, fiber optik kablolar elektromagnetik parazitlerden etkilenmezler ve daha az sinyal kaybı yaşanır. Bu nedenle, veri trafiğinin artması ve iletişim altyapısının daha güvenilir, hızlı ve geniş bir kapasiteye ihtiyaç duymasıyla optik haberleşme sistemlerine olan talep giderek artmaktadır.

2.1.1 PDH

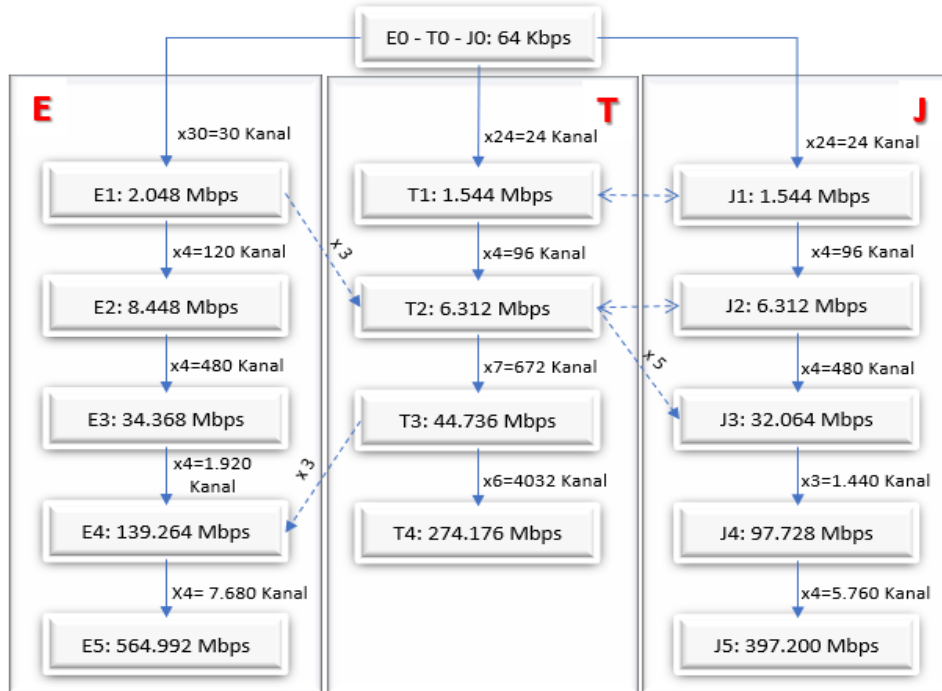
PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy, Eşzamanlı Dijital Hiyerarşi), telekomünikasyon sistemlerinde kullanılan bir iletişim hiyerarşisidir. Plesiochronous terimi, Yunanca "yakın" ve "zaman" kelimelerinden oluşan "plēsios" kelimesinden türetilmiştir ve sistemin tamamına yakınının senkronize olmasını çağrıştırmaktadır. PDH'nin standartları, ITU-T (International Telecommunication Union- Telecommunication Standardization Sector) tarafından 1972'de G.702 standardı ile tanımlanmış olup Kuzey Amerika, Avrupa ve Japonya için geliştirilmiştir [3].

PDH sisteminde kullanılan ve dijital veri iletiminin temel yapıları olan E1 (European 1), T1 (Trunk Level 1) ve J1 (Japanese 1) yapıları farklı coğrafi bölgelerde ve farklı iletişim altyapılarında kullanılır. E1, Avrupa ve Asya'da yaygın olarak kullanılan bir standarttır ve 32 kanallı, 2.048 Mbps hızında veri iletimine izin verir. T1, Kuzey Amerika'da yaygın olarak kullanılan bir standart olup 24 kanallı, 1.544 Mbps hızında veri iletimi sağlar. J1 ise Japonya'da yaygın olarak kullanılan bir standart olup T1 ile benzerlik gösterir [9].



Şekil 2.2 Sırasıyla T1 (J1) ve E1 arayüzleri.

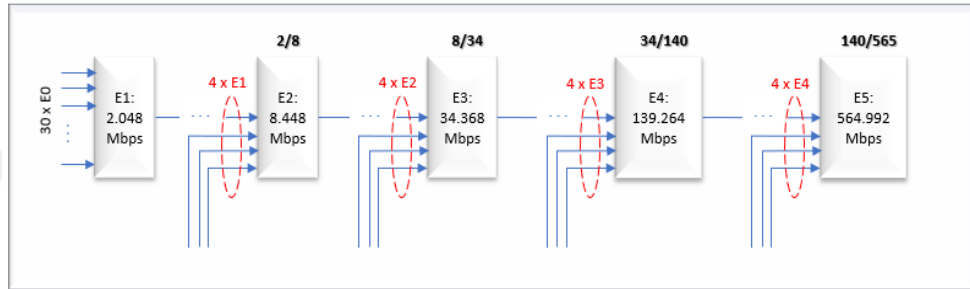
Şekil 2.2’de yer alan yapılar, günümüzde daha modern ve etkin olan SDH (Synchronous Digital Hierarchy, Senkron Dijital Hiyerarşi) ve SONET (Synchronous Optical Network, Senkron Optik Ağ) gibi sistemlere yerini zamanla bırakmıştır. Bununla birlikte, PDH’nin temel fikirleri ve yapıları, iletişim sistemlerinin gelişmesinde temel bir rol oynamıştır [4].



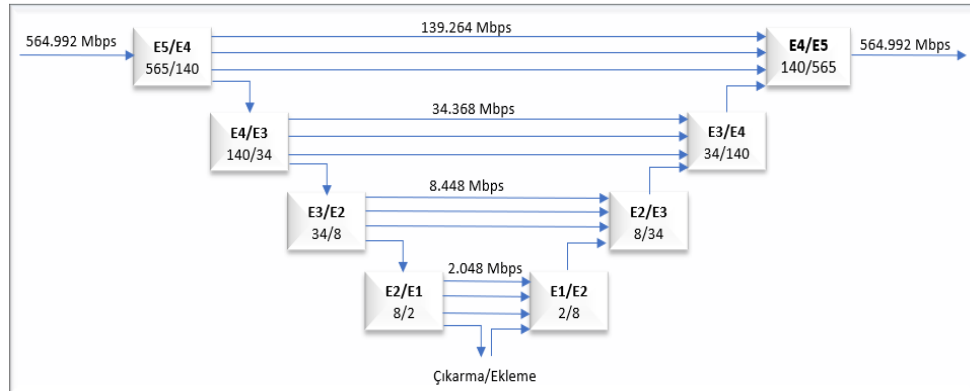
Şekil 2.3 PDH kanal ve hız kapasiteleri.

İnsan sesinin frekans aralığı ortalama 4 KHz olarak kabul edilir. Nyquist Teoremi gereği frekans alanındaki genliği doğru elde etmek için en yüksek frekansın minimum 2 katı kadar örneklenmesi gerekir ve bu da insan sesi için saniyede 8.000 örneklem anlamına gelir. Örneklemelerin 8 bit ile kodlanması sonucunda 64 Kbps iletim hızı oluşur ve E0, T0, J0 denilen temel iletim yapılarını ifade eder. Şekil 2.3’te PDH hız ve kapasiteleri hiyerarşileri oluşturulmuştur [10, 11].

PDH sistemi asenkron çoğullama yöntemi kullandığı için, yüksek hızlı işaretlere çoğullanırken, düşük hızlı işaretlerin yerleri düzgün ve sabit değildir. Bu nedenle, düşük hızlı işaretlerin PDH işaretlerine doğrudan eklenmesi veya çıkarılması mümkün olmaz. Örneğin, 2Mb/s işaretleri 140Mb/s işaretlerine doğrudan eklenemez veya çıkarılamaz. Düşük hızlı işaretlerin yüksek hızlı işaretlere eklenmesi veya çıkarılması işlemini yapabilmek için seviye seviye çoğullama yöntemi kullanılır. Şekil 2.4'te, E1'den başlayarak E5'e kadar seviye seviye çoğullama gösterilmektedir.



Şekil 2.4 E1'den E5'e PDH çoğullama yapısı.



Şekil 2.5 PDH ekleme ve çıkarma.

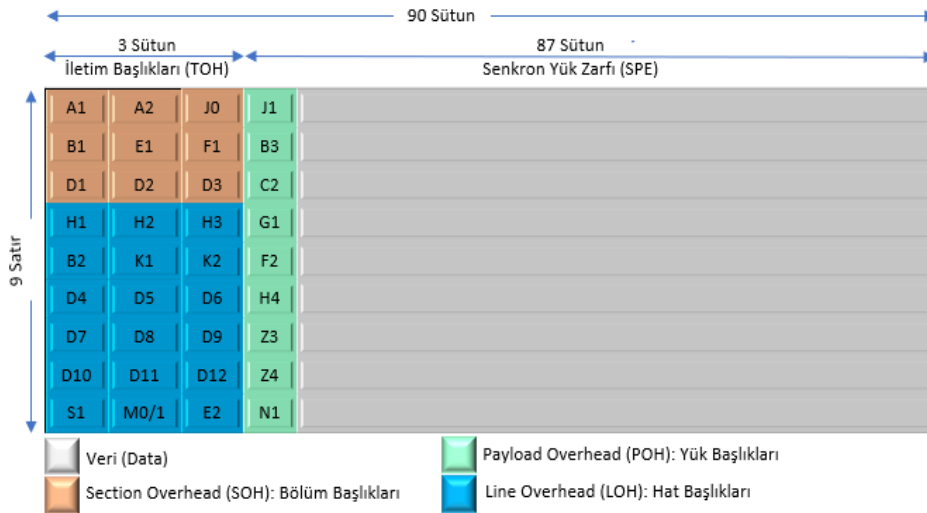
Şekil 2.5'te düşük hızlı işaretlerin ekleme/çıkarma işlemi çok sayıda çoğullama ve ayrıştırma yapılmasını gerektirdiği görülmektedir. Ekleme/çıkarma işlemleri sırasında işaret bozulmalarının artması ve iletim performansının düşmesi, PDH sisteminin iletim hızının daha fazla arttırılamamasına sebep olmaktadır. Bu yöntem sadece alanı, maliyeti, güç tüketimini ve donanım karmaşıklığını arttırmakla kalmayıp, donanım güvenilirliğini de azaltır.

2.1.2 SONET/SDH

SONET, Amerika Birleşik Devletleri'nde ANSI (American National Standards Institute, Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü) tarafından belirlenen standartlar üzerine kurulmuştur. Bu standartlar, ANSI T1.105 ve ANSI T1.106 gibi belgelendirilmiş protokolleri içerir. SDH standartları ise ITU-T tarafından belirlenmiştir. Özellikle G.707, G.783 ve G.803 gibi standartlar, SDH'nin tanımladığı protokolleri ve özellikleri içermektedir [12].

Kuzey Amerika'da, 1980'lere gelindiğinde, daha hızlı iletim yapabilen, uygun şekilde planlanmış ağ yönetim biçimine duyulan ihtiyaç nedeni ile SONET üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Çalışmalar kapsamında, PDH sinyalini kesmeden düşük hızlı kanallara doğrudan erişilebilen ve dijital verileri güvenli bir şekilde iletecek bir standardın geliştirilmesi amaçlanmıştır.

SONET sistemi genel bir standarda izin verecek şekilde değiştirilerek, 90 baytlık 9 alt çerçeveden oluşan bir çerçeve yapı oluşturulmuştur. Şekil 2.6'daki gibi her biri 90 bayt iletebilen 9 satırdan oluşan bu yapı STS-1 (Synchronous Transport Signal - Level 1) olarak SONET'in temelini oluşturmaktadır. Toplamda 810 bayt iletim işlemi, sol üst köşedeki bayttan başlayarak sağa alta doğru yapılır ve her SONET çerçevesi 125 µs'de bir tekrarlanır [2].



Şekil 2.6 SONET STS-1 çerçeve yapısı.

Başlangıçta SONET sadece Kuzey Amerika'da kullanılan PDH oranlarını, yani 1.5 Mbps olan T1 ve 45 Mbps olan T3 yapılarını temel alarak çalışmalara odaklanmıştır. Ancak, 2 Mbps hızındaki E1 ve 34 Mbps hızındaki E3 gibi daha

uluslararası oranları kullanan sistemlerle iletim yapamaması, ITU-T'nin yeni bir senkronize ağ standardı geliştirme ihtiyacını doğurmuştur. 1988 yılında SDH adı verilen geniş alanlı veri iletişim standardı ITU-T tarafından tanımlanmış ve mevcut uluslararası PDH oranları ile çalışılabilecek bir standart olarak geliştirilmiştir. Temel STM-1 SDH çerçevesi, SONET STS-1 çerçevesinin üç katı büyüklüğünde olan 270 sütun ve 9 satırdan oluşmaktadır. Şekil 2.6'da SONET ve SDH hızlarına ait hiyerarşi bulunmaktadır. SONET; STS-1'den STS-3'e geçtikten sonra 4'er kat artarak STS-12, STS-48, STS-192 ve STS-768 olarak, SDH yapısı ise STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 ve STM-256 olarak Tablo 2.1'de gösterildiği gibi sıralanmaktadır [12].

Tablo 2.1 SONET/SDH hat hızları tablosu.

SONET	SDH	Hat Hızı (Mbps)
STS-1	-	51,84
STS-3	STM-1	155,52
STS-12	STM-4	622,08
STS-48	STM-16	2.488,32
STS-192	STM-64	9.953,28
STS-768	STM-256	39.813,12

SONET ve SDH çerçeveleri, tüm sayısal ve analog telefon yelpazesinde kullanılan ATM (Asynchronous Transfer Mode, Eşzamansız İletim Modu), IP (Internet Protocol, İnternet Protokolü) gibi evrensel taşıma kapsülleri olmuştur. Zaman geçtikçe veri iletişimi ihtiyacında meydana gelen artışlar, fiber optik kablo üzerinde eş zamanlı iletilen veri kapasitelerinin dolması ve yeni ilave kablo döşeme gereksinimi SONET/SDH iletişiminde WDM teknolojisinin kullanımına geçilmesine sebep olmuştur [4].

2.1.3 WDM

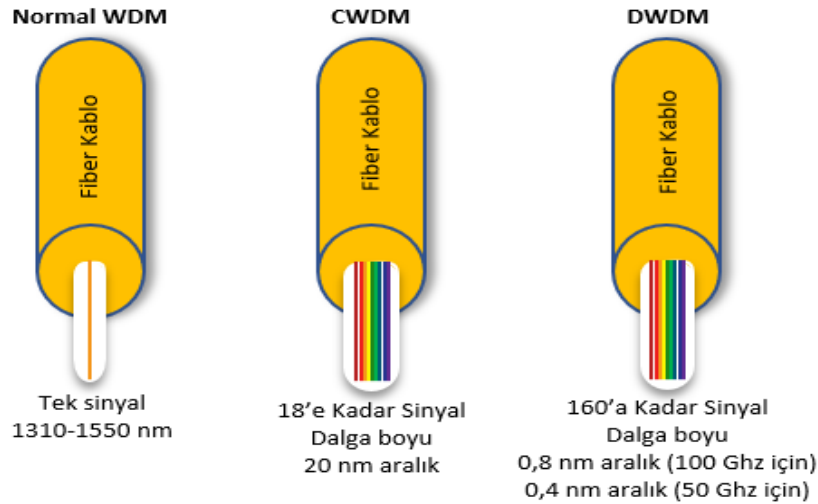
WDM, optik fiber ağlarında kullanılan bir teknolojidir. Bu teknoloji, tek bir fiber üzerinden birden fazla ışık sinyalinin taşıyarak veri iletim hızını arttırmaktadır. Böylece fiber optik kablolardan, iletim sistemlerinden ve enerji tüketiminden ciddi

tasarruflar sağlanmaktadır. WDM teknolojisi, laboratuvar şartlarında ilk olarak 1980'lerin ilk yarısında kullanılmaya başlanmıştır. WDM'nin standartları, ITU-T'nin G.694.x serisi standartları arasında yer alır. Bu standartlar, farklı dalga boylarını kullanarak veri iletimini optimize etmeyi amaçlar [2].

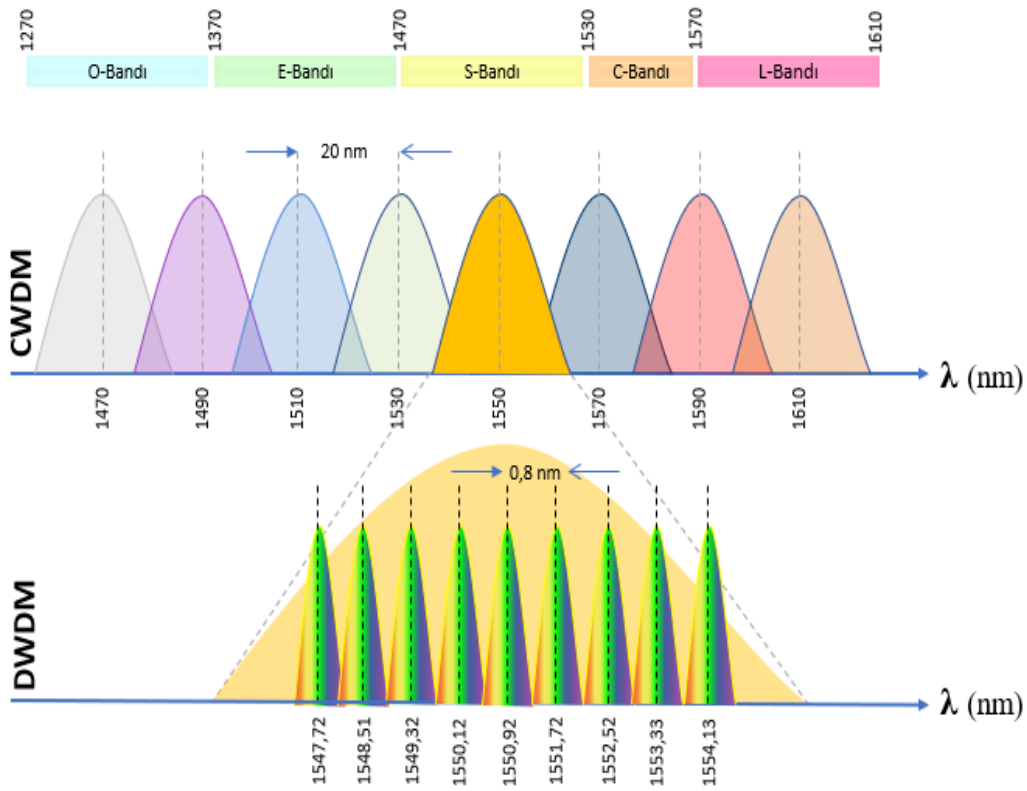


Şekil 2.7 WDM yapısı.

Şekil 2.7’de yer alan n adet farklı dalga boyunun ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n$) multiplexer (çoklayıcı) ile birleştirilerek tek ışık halinde iletilmesi ve alıcı tarafta yer alan demultiplexer (ayrıştırıcı) ile ayrıştırılarak tekrar iletilen dalga boylarındaki sinyalin elde edilmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.8 WDM türleri ve dalga boyu desenleri.



Şekil 2.9 CWDM ve DWDM dalga boyları.

WDM teknolojisinde WDM (normal), CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing, Basit Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama) ve DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing, Yoğun Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama) olmak üzere üç farklı dalga boyu deseni kullanılır. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da WDM türleri, dalga boyu desenleri ile CWDM ve DWDM dalga boyları verilmiştir. Normal WDM’de 1310 ve 1550 nm gibi dalga boyları tek bir ışık sinyali üzerinde kullanılır. CWDM 20 nm dalga boyu aralığı kullanılarak 18 kanala kadar tek fiber üzerinden iletilir. CWDM genellikle işletme ağlarında ve telekom erişim ağlarında noktadan noktaya topolojilerde kullanılır. DWDM ise, 100 GHz için 0,8 nm; 50 GHz için 0,4 nm dalga boyu aralıklarıyla 160 kanala kadar destek sağlar. ITU-T’ye ait G.694.1 standardı, çalışma dalga boyları olarak S, C ve L bandlarına karşılık gelen 1470 nm ile 1610 nm arasında kullanılmasını gerektirir [13].

2.2 Optik Sistem Elemanları

2.2.1 Fiber Optik Kablolar

Fiber optik kablolar, ince cam veya plastik ortamlar olup içinde sinyalleri ışık biçiminde uzun mesafeler boyunca iletirler. Fiber optik kablolar, bakır kablolarla göre daha yüksek band genişliğine sahiptirler. Düşük kayıp ve düşük zayıflama değerleri olan fiberler, elektromagnetik alanlardan etkilenmezler. Küçük boyutlu ve hafif olmaları, kaçak bağlantılara karşı yüksek güvenilirlikleri gibi üstünlükleri nedeniyle birçok alanda kullanılırlar [6].

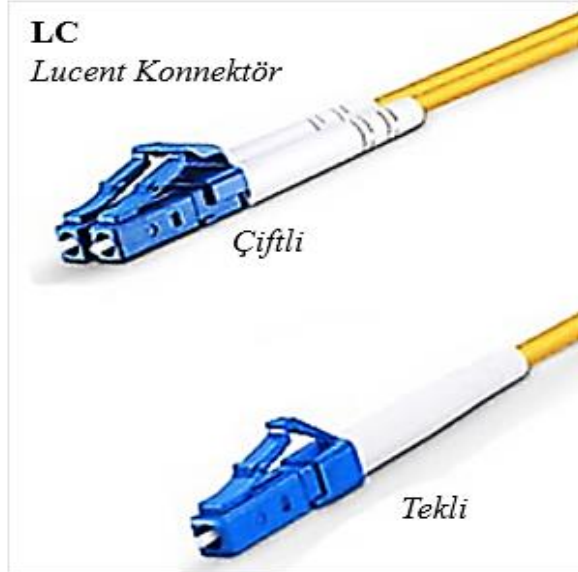
Fiber optik kabloların merkezinde ışığın taşındığı kısım fiber elyafıdır. Fiber elyaf 3 kısımdan oluşmaktadır: Çekirdek (core), kılıf (cladding) ve zırh (coating). Işık çekirdekte iletilir. Çekirdeğin etrafını sararak ışığın cam fiber boyunca dışarı çıkmadan ilerlemesini sağlayan kısım kılıftır. Zırh ise, fiber elyafı fiziksel darbelerden koruyan kısımdır ve saf silikadan yapılır. Fiber elyaf boyunca ışığın ilerlemesi, Snell Yasası'na göre olur. Bu fizik yasasına göre, ışık çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçemez ve çekirdek boyunca yansımalar yaparak ilerlemesini devam ettirir.

Fiber optik kablolar 1, 2, 4, 6, 8, 12, 24, 48, 72, 96, 144 kapasiteli fiber elyafında üretilmektedir. Işığı iletmesine göre de tek modlu (single mode) ve çok modlu (multi mode) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek modlu fiber optik kablolar uzak mesafeler için kullanılırken, çok modlu fiber optik kablolar yakın mesafelerde iletim sağlayabilmektedir [14, 15].

2.2.2 Optik Fiber Bağlantı Elemanları

Fiber optik kablo bağlantı elemanları, birçok alanda ve uygulamada kullanılır. Konnektörlerin kullanımı fiber optik kablo tesisini ve bakımını büyük ölçüde basitleştirir. Fiber optik kabloların birleştirilmesi için kullanılan bağlantı elemanları arasında konnektörler, splice denilen eklemeler ve diğer donanımlar yer alır.

Şekil 2.10'da verilen fiber optik konnektör tipleri arasında ST (Straight Type, Düz Tip), FC (Ferrule Connector, Ferrule Konnektör), LC (Lucent Connector, Lucent Konnektör), SC (Standard Connector, Standart Konnektör), MPO/MTP (Multi-fiber Push On/Pull Off, Çoklu Fiber İtme/Çekme), MTRJ (Mechanical Transfer Registered Jack, Mekanik Transfer Kayıtlı Jak) bulunur [2].



Şekil 2.10 Konnektör türlerine ait görseller.

ST (düz tip) konnektörler, fiber optik konnektörler arasında en yaygın kullanılanlardandır. AT&T tarafından 1980'lerin ortalarında tanıtılan ST konnektörlerin hem çok modlu hem de tek modlu versiyonları mevcuttur. FC konnektörler, elyaf bağlayıcı ve seramik halka kullanan ilk fiber optik konnektördür. FC konnektörünün, fiberi hizalamak için seramikten yapılan halkası ile kolay bağlantı yapmak ve bağlantıyı kesmek için bir tutma tırnağı mekanizması vardır. FC konnektörleri, tek yönlü veya çift yönlü veri iletimi için kullanılabilir. LC konnektörler, Lucent Teknik Noro Gee tarafından geliştirilmiştir. Bağlantı ucu küçük kare şekilli olan LC konnektörü alan sıkıntısı olan, yoğun bağlantı yapılan yerlerde tercih edilir. SC konnektörler, fiber patch panellerde ve arabirim dönüştürücülerde yoğun olarak kullanılan bir konnektör tipidir.

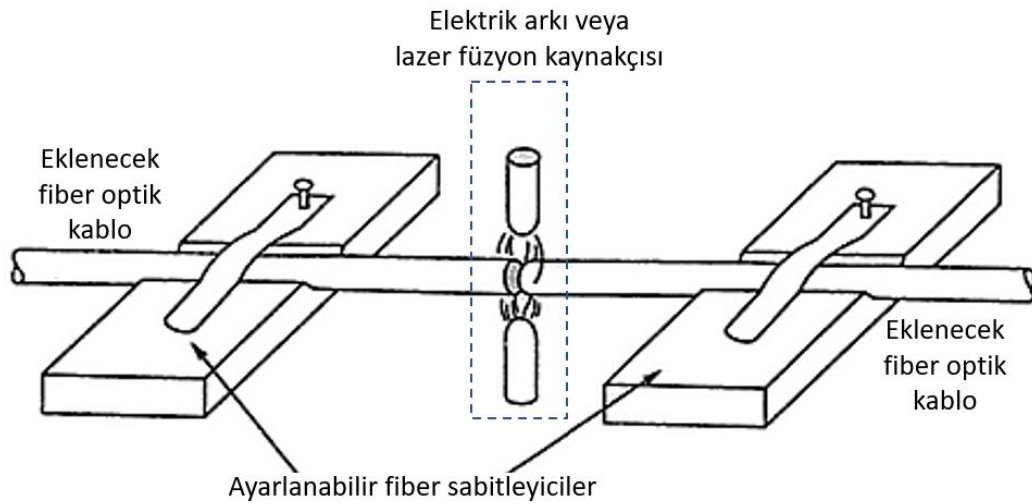
Tablo 2.2 Yaygın kullanılan konnektör tiplerinin özellikleri.

Konnektör Tipi	Şekil	Standart	Kullanım Alanı
ST	Yuvarlak, metalik, süngü, seramik halka çapı: 2,5 mm	IEC 61754-2	Telekomünikasyon, veri işleme ağları, kablolu televizyon ağları
FC	Yuvarlak, metalik, vida, seramik halka çapı: 2,5 mm	IEC 61754-13	Telekomünikasyon, veri işleme ağları, kablolu televizyon ağları
LC	Küçük Kare, plastik, mandal, seramik halka çapı: 1,25 mm	IEC 61754-20	Yüksek yoğunluklu kurulumlar
SC	Kare, plastik, mandallı itme/çekme, seramik halka çapı: 2,5 mm	IEC 61754-4	Veri iletişimi, telekomünikasyon, pasif optik ağ

Yaygın kullanımı olan konnektörlere ait şekil, standart ve kullanım alanı bilgileri Tablo 2.2’de verilmiştir. Her bir konnektör tipi, farklı özelliklere, güçlü ve zayıf yönlerine, performans parametrelerine ve farklı kullanım alanlarına sahip olmakla

birlikte, ortak özellikleri de bulunmaktadır. Örneğin, ST ve FC konnektörleri, telekomünikasyon, veri işleme ağları ve kablolu televizyon ağları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırken, LC konnektörleri yüksek yoğunluklu kurulumlar için alan sıkıntılarından dolayı idealdir. SC konnektörleri, veri iletişimi, telekomünikasyon ve pasif optik ağ gibi uygulamalar için tercih edilir. ST ve FC konnektörleri, yuvarlak şekilleri ve süngü/turnak tasarımları ile birbirlerine benzerken, LC konnektörü küçük kare şekli ve mandal tasarımı ile diğer konnektörlerden ayrılır. SC konnektörü ise kare şekli ile LC konnektöre benzer ve mandallı itme/çekme tasarımı ile farklılık gösterir. Yüksük çapları ise ST, FC ve SC konnektörlerinde 2,5 mm iken, LC konnektöründe 1,25 mm'dir.

Diğer konnektör türlerine bakıldığında, MPO/MTP fiber konnektörleri 12 ile 24 fiberi bir dikdörtgen yüksükte birleştiren çoklu fiber optik konnektördür. Genellikle 40G ve 100G optik paralel bağlantılarda kullanılan bu tip konnektörler pek görülmez. MTRJ konnektörleri, boyutları küçüktür ve konnektörü devreye sokmak ve devre dışı bırakmak için mekanik bir kaydırma mekanizması kullanılır. MTRJ'ler yüksek yoğunluklu uygulamalar için tasarlanmıştır ve genellikle veri merkezlerinde ve telekomünikasyon ağlarında kullanılır [2].



Şekil 2.11 Fiber optik kabloların füzyon ile birleştirilmesi [2].

Diğer bir bağlantı elemanı, fiber optik kabloların birleştirilmesi için kullanılan splice denilen eklerdir. Splice, iki veya daha fazla fiber optik kabloyu birleştiren bir bağlantı türüdür. Splice işlemi, fiber optik kablolardaki hasarların onarılması, fiber optik kablolardaki kayıpların azaltılması ve fiber optik kablolardaki uzunlukların

arttırılması için kullanılır. Splice işlemi, mekanik veya füzyon yöntemiyle gerçekleştirilir. Mekanik splice işlemi, iki veya daha fazla fiber optik kablo uçlarının birleştirilmesi için kullanılan bir ekleme tekniğidir. İki veya daha fazla optik fiber, birbirine hizalanır ve birleştirme sıvısı kullanarak uç uca getirilir. Füzyon splice işlemi ise, fiber optik kablolardaki kayıpların azaltılması için kullanılan, iki veya daha fazla optik fiberin birleştiren bir bağlantıdır. Bu işlem Şekil 2.11'deki gibi iki optik fiberin uçlarının elektrik arkı veya lazer füzyon kanakçısı ile eritilerek birleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Füzyon splice işlemi, mekanik splice işlemine göre daha pahalıdır fakat kayıp ve zayıflama değerleri daha düşüktür [2].

Optik fiber bağlantı elemanları arasında, splice bağlantı noktalarının korunması için içine konulduğu ek kasetleri ve ek kutuları, fiber optik kablo uçlarının düzgün ve işletilebilir olmasını sağlamak için yapılan fiber sonlandırma kutuları, farklı kabloların birbirlerine karıştırılmadan düzenli durması ve işletmesinin esnek olması için dağıtım çatıları, kablo geçişleri için optik bağlantı kabloları (fiber patch cords) ve ek yapılırken kullanılan fiber optik pigtail kabloları yer alır.

2.2.3 Optik Modülatörler ve Demodülatörler

Modülasyon, bir taşıyıcı sinyal ile bilgi sinyalinin birleştirilmesi işlemi olup, iletişim teknolojilerinde yaygın olarak kullanılır. Demodülasyon ise, modülasyon işleminin tersi olarak tanımlanır ve bu süreç, birleşik bir sinyalden orijinal bilgi sinyalini geri elde etmek şeklinde tanımlanır. Demodülasyon işlemi genellikle bir alıcı cihazda gerçekleştirilir. Bu süreçte, modüle edilmiş sinyal alıcı tarafından alınır ve demodülasyon işlemi ile bu sinyalden orijinal bilgi sinyali çıkartılır. Bu işlem, bilgi sinyalinin taşıyıcı sinyalden ayrıştırılması anlamına gelir.

Optik modülatörler, optik fiber sistemlerinde faz, genlik, frekans ve polarizasyon modülasyonu gibi değişik işlevleri yerine getiren elamanlardır. Kaynak ışık, elektriksel kontrol sinyali tarafından modülatörün maddesinin optik özelliklerinin değiştirilmesi ile modüle edilir. Kontrol sinyali elektrooptik, akustooptik ve magnetooptik mekanizmaları aracılığıyla maddenin özellikleri ile ilişkilendirilir.

Optik modülatörler, kullanılan bilgi sinyalinin tipine göre analog modülatörler ya da sayısal modülatörler olarak iki grupta incelenir. Analog modülasyonda, optik kaynaktan yayılan ışık değişimi sürekli iken sayısal modülasyonda, ışık

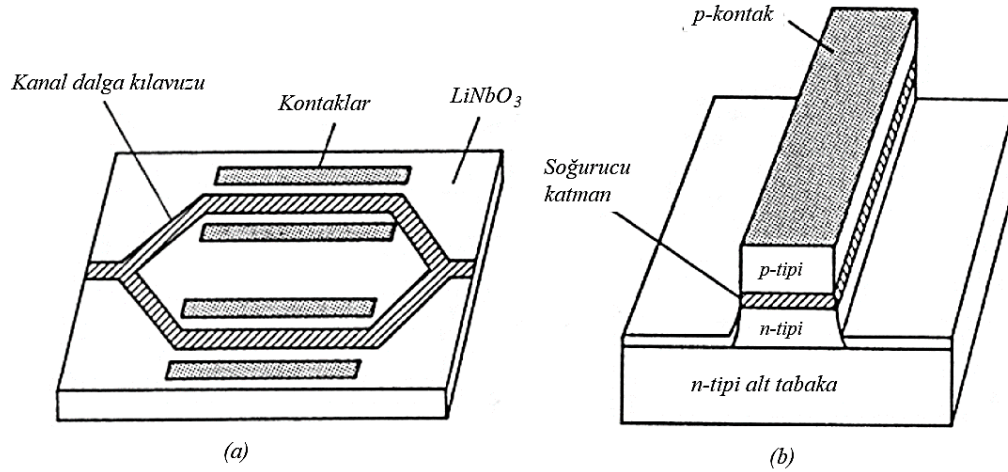
yoğunluğunda ayırık değişimler söz konusudur. Sayısal modülasyonlu sistemler, analog modülasyonlu sistemlere göre daha düşük işaret-gürültü oranına sahiptir. Modülasyonda kullanılan analog büyüklükler yoğunluk, optik faz, polarizasyon ve renk gibi büyüklüklerdir. Sayısal modülasyonda ise, frekans modülasyonu, açma-kapama yoğunluk modülasyonu, Doppler kayması, darbe genişliği ya da gecikme zamanı modülasyonu ve hibrit sistemler teknikleri kullanılır. Işık huzmesi, optik yoğunluk, faz, polarizasyon, dalga boyu ve spektral dağılım olmak üzere ışığın beş temel özelliği kullanılarak modüle edilir. İlk iki özellik olan yoğunluk ve faz özelliklerinden faydalanan modülasyonların kullanım alanları diğerlerine göre daha fazladır.

Optik işaretler, direkt modülasyon ve harici modülasyon olmak üzere iki farklı yöntem ile modüle edilirler. Direkt modülasyonda, lazere uygulanan elektriksel işaretin akımının modüle edilmesiyle lazer, açık / kapalı durumuna geçirilir. Ancak birçok ışık kaynağı için modülasyon, sadece ışığın genliğini değil, faz ve frekansını da modüle eder. Cıvıltı faktörü (chirp factor) olarak adlandırılan frekansın da modüle edilmesi istenen bir durum değildir. Direkt modülasyon oldukça basit ve maliyeti düşük bir yöntemdir ve cıvıltı faktörünün yüksek olması nedeniyle harici modülasyon kadar verimli değildir.

Harici modülasyonda, giriş sinyali sürekli dalga (Continuous Wave, CW) işaretli lazer ile sağlanır ve lazer sürekli olarak açık durumdadır. Optik işaret, harici bir optoelektronik modem sayesinde modüle edilir. Harici modülasyon, direkt modülasyon tekniğine göre daha kompleks yapılı ve yüksek maliyetlidir. Harici modülasyonda, band genişliğinin dar ve gürültü işaretinin minimum seviyede modüle edilmiş olması, bir başka deyişle cıvıltı faktörünün düşük olması nedeniyle modüle edilmiş işaretin kalitesi yüksektir.

Optik modülatörler, AM (Amplitude Modulator, genlik modülatörü), PM (Phase Modulator, faz modülatörü), elektrooptik faz modülasyonu, FM (Frequency Modulator, frekans modülatörü), EM (Electroabsorption Modulator, elektroabsorpsiyon modülatör) ve Mach-Zehnder modülatörü olarak sınıflandırılmaktadır. Genlik modülasyonu, iletişim teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan bir modülasyon tekniğidir. Bu teknikte, taşıyıcı sinüs sinyalinin genliği, bilgi sinyaline uygun olacak şekilde değiştirilir. Radyo yayıncılığında faz

modülasyonu tercih edilen bir tekniktir. Bu teknikte, taşıyıcı sinüs sinyalinin fazı, bilgi sinyaline bağlı olarak değişir. Elektro-optik modülatörler, genellikle lityum niobat (LiNbO_3) veya lityum tantalat (LiTaO_3) gibi maddelerden yapılır. Bu maddelerden geçen elektromagnetik dalga, maddenin iki tarafına yerleştirilen elektrot aracılığıyla biçimlendirilir. İletişim sistemlerinde kullanılan bir modülasyon tekniği olan frekans modülasyonunda taşıyıcı sinüs sinyalinin frekansı, bilgi sinyaline bağlı olarak değişmektedir. EM, kodlanmış bit dizilerini ışık darbelerine dönüştürür. Lazer ışığının yoğunluğu, bir elektrik voltajı aracılığıyla kontrol edilir. Mach-Zehnder modülatör, girişteki optik işareti iki eşit kola ayırır ve modülatör çıkışında, işareti, faz kayması ile tekrar elde eder. Şekil 2.12’de Mach-Zehnder ve elektroabsorbsiyon modülatörlerine ait şematikler verilmiştir [1,4].



Şekil 2.12 (a) Mach-Zehnder modülatörü konfigürasyon, (b) elektroabsorbsiyona dayalı yarı iletken modülatör [1].

Demodülasyon işlemi, modülasyon türüne bağlı olarak değişiklik gösterir. Örneğin, genlik modülasyonunda, demodülasyon işlemi genellikle bir zarf dedektörü kullanılarak gerçekleştirilir. Faz modülasyonunda ise, demodülasyon işlemi genellikle bir faz kilidi döngüsü (PLL, Phase Lock Loop) veya Foster-Seeley diskriminatörü gibi bir devre kullanılarak gerçekleştirilir. Bu farklılıklar, modülasyon ve demodülasyon tekniklerinin çeşitliliğini ve karmaşıklığını gösterir [16].

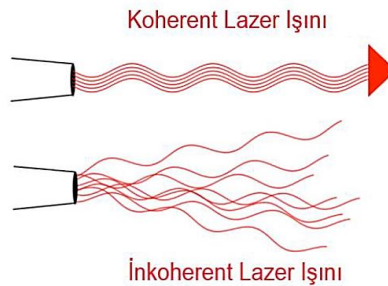
2.2.4 Lazerler

Lazer, bir optik düzenek olarak tanımlanabilir ve bu düzenek, ışığın uyarılmış radyasyon ile yükseltilmesini sağlar. "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ifadesinin baş harflerinden oluşan "lazer" terimi, "ışığın uyarılmış ışına ile yükseltilmesi" anlamına gelir. İlk lazerin üretimi, 1960 yılında Theodore Maiman tarafından gerçekleştirilmiştir ve bu üretim, Charles Townes ve Arthur L. Schawlow'un teorileri temel alınarak yapılmıştır [17].

Lazerlerin özelliği, fotonları uyumlu bir huzme şeklinde oluşturabilmesidir. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi lazer ışığının uyumlu (coherent) olması, lazeri diğer ışık kaynaklarından ayıran ana özelliktir. Bu özellik, ışık huzmesinin çok ufak bir bölgeye odaklanabilmesini ve tek renk ışık üretilebilmesini sağlar. Ayrıca, lazerlerin ultra kısa darbe denilen femtosaniye darbeler üretebilme yeteneği de bulunmaktadır [18].

Lazerin ana çalışma prensibini oluşturan uyarılmış ışına konsepti, ilk olarak 1917 yılında Albert Einstein tarafından öne sürülmüştür. Günümüzde, lazer ışını çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu alanlar arasında endüstriyel süreçler, mühendislik, tıp, bilimsel araştırmalar, meteoroloji, fiber optik iletişim, holografi ve savunma donanımları bulunmaktadır.

Bazı lazerler sürekli, bazıları ise belirli aralıklarla enerji verir. Lazer ışığının genel özelliklerine dayanılarak kullanım alanları seçilir. Lazer ışınlarının ortak özellikleri arasında uyarılmış emisyon (ışına) ile elde edilmesi, aynı fazda ve enerjide, çok sayıda fotonun üst üste bindiği uyumlu (kohorent) ve şiddetli bir ışık olması, çok yüksek enerji yoğunluklarına sahip olması ve çok yüksek bir daraltma oranına sahip olması bulunmaktadır [2, 3].



Şekil 2.13 Koherent ve inkoherent lazer ışınları [3].

Optik haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan yarı iletken lazerler, genellikle üç veya dört jonksiyonlu yapılarıyla bilinir ve bu yapılar, indiyum, alüminyum, galyum ve arsenitten oluşur. Optik haberleşme sistemlerinde kullanılan bir diğer lazer türü olan sürekli işaretli lazerler, 193.1 THz frekansında çalışmaktadır ve gücü 0 dBm olan 8 kanallı bir yapıya sahiptir. Sualtı kablosuz optik haberleşme (SKOH) sistemlerinde kullanılan lazer kaynakları arasında kısmi eş-fazlı lazer dizi demeti bulunur. Bu lazerler, gerçek zamanlı yüksek veri gönderme kabiliyetine sahip olup, göndericide kısmi eş-fazlı bir kaynak dizisi kullanılarak alıcı düzleminde daha geniş bir kapsama alanı elde eder ve bu durum kullanıcılar için hareket serbestliği getirir.

Lazerlerin seçimi, kullanım alanlarına ve gereksinimlerine göre değişkenlik gösterir. Örneğin, veri iletim hızının yüksekliği, kaybının azlığı, band genişliğinin büyük olması ve var olan sistemlerle uyumlu çalışabilmesi gibi nedenler seçimlerde etkili olmaktadır.

2.2.5 Optik Bölücüler

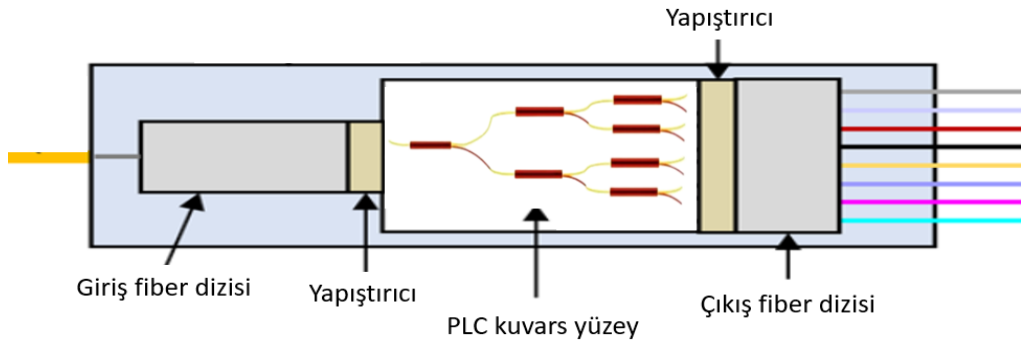
Optik haberleşme sistemlerinde, fiber optik bölücülerin (splitter) önemli bir rolü bulunmaktadır. Gelen bir optik sinyalin birkaç çıkış sinyaline bölünmesi işlemi, bu cihazlar tarafından gerçekleştirilir. Bu işlem, optik sinyallerin birden fazla yola etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Giriş sinyali, belirtilen bölünme oranına bağlı olarak çıkış portları arasında bölünür. Bölünme işlemi, herhangi bir harici güce ihtiyaç duymadan gerçekleştirilmesi nedeniyle optik bölücüler pasif bileşenler olarak kabul edilir. Fiber optik bölücülerin bu özelliği, optik haberleşme sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini arttırmaktadır. Ayrıca, optik bölücüler, optik sinyallerin birden fazla yola dağıtılmasını sağlayarak ağın genel kapasitesini ve erişilebilirliğini artırır. Bu durum, pasif optik haberleşme sistemlerinde optik bölücüler en temel aktör haline getirmektedir.

Optik bölücülerde, $1 \times N$ ayırıcı konfigürasyonları giriş ve çıkış kanallarının sayısını ifade eder. N giriş sinyalinin kaç çıkış sinyaline bölündüğünü gösterir. Örneğin; 1×2 konfigürasyonunda bir giriş ve iki çıkış bulunurken, 1×4 konfigürasyonunda bir giriş ve dört çıkış bulunur. 1×8 , 1×16 , 1×32 , 1×64 gibi bölünme oranları da mevcuttur. Ayrıca Şekil 2.14'te kutusuz, kutulu, panel tipi ve kabin tipi örneklerine ait görseller verilmiştir.



Şekil 2.14 Optik bölücü türleri.

Optik haberleşme sistemlerinde kullanılan optik bölücü türleri, FBT (Fused Biconical Taper, sigortalı bikonik konik) bölücüler, PLC (Planar Lightwave Circuit, düzlemsel ışık dalgası devresi) bölücüler ve ışın bölücülerdir. FBT bölücüler, en eski fiber optik ayırıcı türlerinden biridir. Optik sinyalleri bölmek için ‘kaynaşmış bikonik sivrilme’ olarak bilinen bir işlem kullanılır. PLC bölücüler, optik sinyalleri bölmek için dalga kılavuzu teknolojisini kullanan daha modern bir ayırıcı türüdür. Şekil 2.15’te PLC bölücülerin bölünme yöntemi gösterilmiştir.



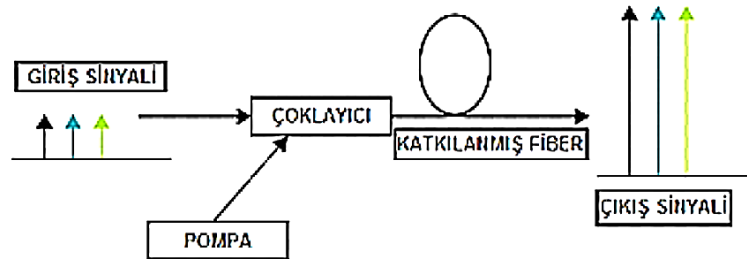
Şekil 2.15 PLC bölücülerde ışığın çoklanması.

FBT ayırıcılara kıyasla daha geniş bir çalışma dalga boyu aralığı sunarlar ve kompakt boyutları ve güvenilirlikleri nedeniyle büyük ölçekli uygulamalar için daha uygundur. Işın bölücüler, diğer türlerden farklı olarak ışığı belirli bir açıda kırarak çalışır. Tipik olarak interferometri ve kuantum optiği gibi uygulamalarda kullanılırlar [19].

2.2.6 Optik Kuvvetlendiriciler

Optik iletişim sistemlerinde, iletişim hattı üzerindeki optik sinyallerin zayıflamasını gidermek amacıyla optik amplifikatörlerden faydalanılmaktadır. Bu amplifikatörler yüksek kazanç, düşük gürültü seviyesi, geniş band genişliği ve büyük çıkış gücü gibi özellikleri sayesinde, zayıflama sorununun üstesinden gelmede kritik bir rol üstlenirler. Optik amplifikatörler, genel olarak yarı iletken optik kuvvetlendiriciler (Semiconductor Optical Amplifier, SOA), katkılı fiber kuvvetlendiriciler ve Raman kuvvetlendiriciler olmak üzere üç temel kategoriye ayrılır.

SOA'ların kullanımı, optik entegre devrelerde optik sinyal işleme uygulamalarında yaygındır. Optik sinyallerin doğrudan yükseltilmesi, SOA'lar tarafından gerçekleştirilir. Sinyalin elektrik sinyaline dönüştürülerek önceden yükseltilmesi gerektiğinde, optik-elektrik-optik dönüşüm arasındaki yayılma gecikmesinin önemli ölçüde artacağı durumlarda kritik öneme sahiptir. Kararlı çalışmamalarından dolayı optik iletişim sistemlerinde çok tercih edilmezler.



Şekil 2.16 Katkılanmış fiber optik kuvvetlendirici modeli [20].

Şekil 2.16'da modellenmesi verilen katkılı fiber kuvvetlendiriciler arasında EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier, Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici), YDFA (Ytterbium Doped Fiber Amplifier, İterbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici), PDFa (Praseodymium Doped Fiber Amplifier, Praseodim Katkılı Fiber Optik Kuvvetlendirici), HDFa (Holmium Doped Fiber Amplifier, Holmiyum Katkılı Fiber Optik Kuvvetlendirici) ve TDFA (Thulium Doped Fiber Amplifier, Tulyum

Katkılı Fiber Optik Kuvvetlendirici) yer almaktadır. Yaygın olarak EDFA ve YDFA tercih edilmektedir. EDFA'ların kullanımı, optik iletişim sistemlerinde geneldir ve EDFA'lar WDM sistemlerinde kritik bir rol oynar. Erbiyum katkılı fiberlerde 980 nm veya 1480 nm lazer ışığı 'pompa' olarak kullanılır ve bu, iyonların uyarılmış durumlara geçmesini sağlar. Gelen bir sinyal, bu uyarılmış elektronlarla etkileşime girer ve sinyal, elektronların foton olarak depoladığı enerjiyi serbest bırakarak temel duruma geçmelerini tetiklemektedir. YDFA'ların kullanımı, özel frekanslarda güç amplifikasyonu ve uzay lazer iletişimi gibi uygulamalarda yaygındır. YDFA'lar, yüksek ışın kalitesi, düşük üretim/bakım maliyeti ile sıcaklık ve nem gibi çevre şartlarından minimum etkilenme gibi özellikler sayesinde pek çok alanda tercih edilir. Aktif ortam olarak iterbiyum katkılı 20/400 µm aktif fiber kullanılmaktadır. Raman kuvvetlendiriciler, optik iletişim sistemlerinde, iletim mesafesini sınırlayan en önemli faktör olan fiber kayıplarını dengelemek için kullanılır. Yüksek kazanç, düşük gürültü, yüksek band genişliği ve yüksek çıkış gücü karakteristikleri nedeniyle optik kuvvetlendirici kullanımı tercih edilir [20, 21].

2.2.7 Optik Zayıflatıcılar

Optik haberleşme sistemlerinde her zaman sinyalin güçlendirilmesi beklenmez ve güçlü gelen sinyalin zayıflatılmasının gerektiği durumlar da söz konusu olur. Optik zayıflatıcılar (attenuators), fiber optik iletişim sistemlerinde, bir optik sinyalin güç miktarını azaltma işlevini yerine getiren yaygın bir cihaz olarak tanımlanır. Zayıflatma işlemi, optik alıcı tarafından alınan optik gücün nispeten büyük olduğu durumlarda aygıtın zararlara karşı korunması ve ölçümlerde aşırı bozulmaların önlenmesi için yapılır. Optik zayıflatıcılar, genellikle 1310 nm ya da 1550 nm olan özelleştirilmiş bir dalga boyunda belirli adımlarda 60 dB'e (10^6 çarpanı içeren) kadar bir optik sinyal seviyesini düşürmeye izin verir. Zayıflatıcıların kapasitesi sadece 0,5 dB'lik hassasiyette ölçüm yapabilen küçük alan ölçümleri için ölçeklendirilmiş olan basit bir teyp kaseti büyüklüğünden 0,001 dB'lik zayıflamaya sahip laboratuvar aygıtlarına kadar olabilmektedir.

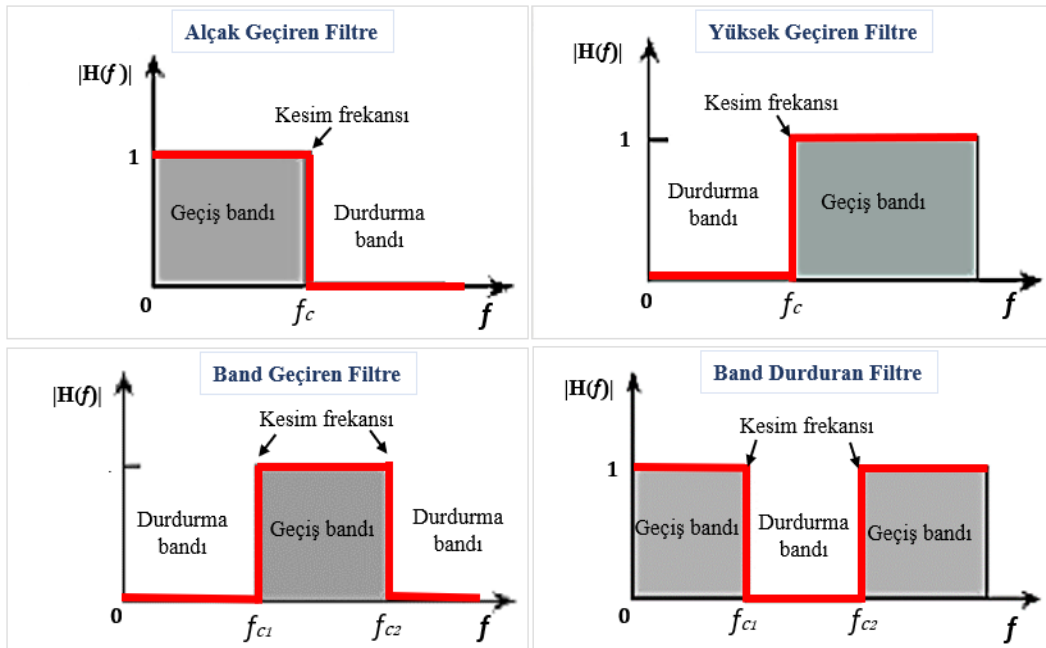
Optik zayıflatıcılarda çeşitli teknolojiler kullanılır. Hava izolasyon teknolojisiyle, optik fiberden ayrılan ve fiber optik ile fiber optik arasına bir hava boşluğu eklenmesi durumunda, ışığın saçılması ve dolayısıyla ışığın zayıflaması meydana

gelir. Yer değiştirme teknolojisiyle, iki optik fiberin çekirdeklerinin az miktarda ötelenmesi ve yerinden çıkarılması işlemi ile ışığın zayıflaması sağlanır. Zayıflatma fiber teknolojisiyle, metal iyonlarının ışık üzerindeki absorbsiyon etkisi dikkate alınarak, metal iyonları ile katkılı zayıflama fiberiyle ışık zayıflatılır. Absorbsiyonlu cam yöntemi, optik zayıflatıcıların üretiminde kullanılan bir yöntem olup optik olarak parlatılmış nötr absorbsiyonlu cam levha ile ışığın zayıflatılması gerçekleştirilir [2, 3].

2.2.8 Optik Filtreler

Optik filtreler, iletilen bir sinyaldeki istenmeyen frekansları sistemden çıkarabilme (geçirme) ve istenen frekansları seçebilme (durdurma) yeteneği sayesinde optik haberleşme sistemlerinde kullanılan önemli bileşenlerden biridir. Filtreler bu yetenekleri sayesinde, sistemlerin performansını ve verimliliğini etkiler.

Optik filtreler, belirli bir frekans aralığındaki ışığı geçirirken, bu aralığın dışındaki ışığı engeller. Bu özellik dar olmayan band genişliğine sahip sistemlerde, belirli bir frekans aralığındaki sinyallerin seçilmesine ve bu aralığın dışındaki sinyallerin zayıflatılmasına olanak sağlar. Özellikle yüksek hızlı veri iletimi gerektiren uygulamalarda, sinyal gürültüsünün azaltılması, sinyal kalitesinin iyileştirilmesi, daha net ve daha güvenilir veri iletiminin sağlanması için optik filtreler kullanılır [22].



Şekil 2.17 Filtre türlerinin transfer fonksiyonlarının frekansa göre değişimleri.

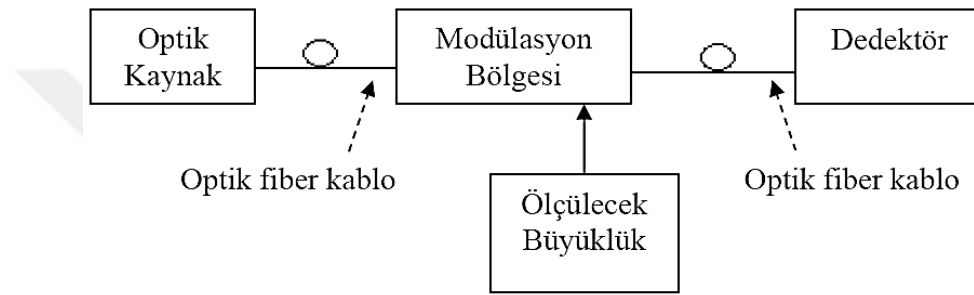
Optik filtreler, WDM gibi teknolojilerde yaygın olarak kullanılır. Bu teknoloji, aynı fiber üzerinde birden çok sinyalin farklı dalga boylarında iletilmesine olanak sağlar. Optik filtreler, bu sinyalleri ayırmak için de kullanılır. Böylece birden fazla sinyalin aynı anda iletilmesi, alınması ve veri iletim kapasitesinin artırılması optik filtreler sayesinde gerçekleştirilir.

Sistemlerin elektromagnetik alanlardan etkilenmesinin azaltılması için de optik filtrelerden faydalanılır. Özellikle riskli bölgelerde yüksek hızlı kablosuz haberleşme için ideal bir çözüm olarak karşımıza çıkar. Elektromagnetik alanlardan etkilenme, sinyal gürültüsünü arttırabilir ve veri iletim kalitesini düşürebilir. Bu nedenle, optik filtrelerin kullanılması, bu tür etkileri azaltarak sistem güvenliğini artırır. Sistem ihtiyaçları ve tasarım özelliklerine göre optik filtre çeşitleri değişir ve Şekil 2.17’de filtre türleri ve transfer fonksiyonlarının frekansa göre değişimleri bulunur. Alçak geçiren filtre (Low Pass Filter, LPF), seçilen bir kesme frekansından daha düşük bir frekansa sahip sinyalleri ileten ve kesme frekansından daha yüksek frekanslı sinyalleri zayıflatan bir filtredir. Filtrenin tam frekans tepkisi, filtre tasarımına bağlıdır. Bu filtreler, genellikle yüksek frekanslı gürültünün azaltılması için kullanılır. Yüksek geçiren filtre (High Pass Filter, HPF), belirli bir kesme frekansından daha yüksek bir frekansa sahip sinyalleri ileten ve kesme frekansından daha düşük frekanslı sinyalleri zayıflatan bir filtredir. Her bir frekans için zayıflama miktarı filtre tasarımına bağlıdır. Bu filtreler, genellikle düşük frekanslı gürültüyü azaltmak için kullanılır. Band geçiren filtre (Band Pass Filter, BPF), frekansları belirli bir aralıkta ileten ve o aralığın dışındaki frekansları zayıflatan bir filtredir. Band geçiren filtreler kablosuz verici ve alıcılarda yaygın olarak kullanılır. Bu filtreler, belirli bir frekans bandındaki sinyalleri seçerken, bu bandın dışındaki sinyalleri zayıflatır. Tam geçiren filtreler, genellikle sıvı veya gazların geçişine izin veren özellikte olan filtrelerdir. Ancak, optik iletişim bağlamında, tam geçiren filtre genellikle tüm frekansları veya geniş bir frekans bandını geçiren bir filtreyi ifade eder. Band durduran filtre (Band Stop Filter, BSF), çoğu frekansı değiştirmeden geçiren ancak belirli bir aralıktaki frekansları çok düşük seviyelere düşüren bir filtredir. Band geçiren filtrenin tam tersidir. Çentik filtresi, dar bir durdurma bandına yüksek maksimum kalite faktörüne sahip bir band durdurma filtresidir. Bu filtreler, belirli bir frekans bandındaki sinyalleri zayıflatırken, bu bandın dışındaki sinyalleri geçirir [23].

Optik haberleşmede sistemin ihtiyaçlarına göre değişmekle birlikte; Gaussian, Bessel, Chebyshev ve Butterworth gibi optik filtrelerden yararlanılır. En yaygın olarak Gaussian ve Bessel alçak geçiren filtreler kullanılır [3].

2.2.9 Optik Sensörler

Optik sensörler, ışık enerjisi kullanarak nesnelerin varlığını algılayabilen elektronik cihazlardır. Bu sensörler, hareket algılama, renk tespiti, mesafe ölçümü, pozisyon belirleme ve optik iletişim gibi birçok farklı uygulamada kullanılabilir. Şekil 2.18’de, optik fiber sensörünün kaynak, modülasyon bölgesi ve dedektörden oluşan genel yapısı verilmiştir.



Şekil 2.18 Bir optik fiber sensörünün genel yapısı [24].

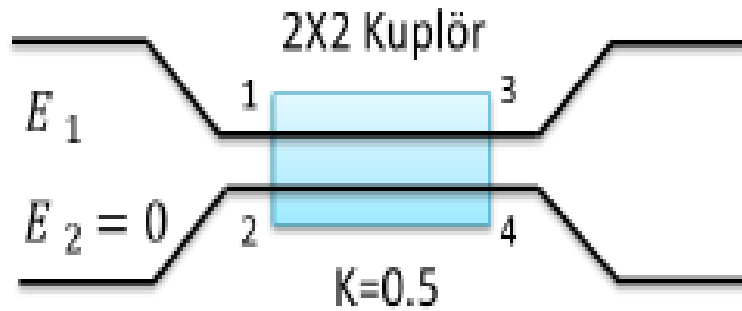
Optik sensörlerin çalışma prensibi, ışık yayan bir kaynaktan çıkan ışığın hedef nesneye doğru yönlendirilmesi ve nesnenin yüzeyinden yansyarak sensöre geri dönmesi üzerine kuruludur. Sensör, yansıyan ışığı alır ve bu ışığın özelliklerini ölçerek nesnenin varlığını veya hareketini tespit eder. İki aşamadan oluşan fiber optik sensörlerin ilk aşamasında, fiber boyunca gönderilen ışığın özelliklerinde değişmeye neden olan parametreler, ışığın herhangi bir özelliğini modüle eder. Modülasyon işlemi fiberin içinde veya fibere iliştirilmiş dıştan bir lens düzeneği ile gerçekleştirilir. İkinci aşamada ise, bu değişiklikler alıcıda elektriksel sinyali modifiye etmekte kullanılır [24].

Optik sensörler, günümüz teknolojisinde önemli bir yer tutar ve farklı alanlarda kullanılarak, birçok farklı ihtiyaca çözüm sunar. Optik sensörler; diğer sensörlere göre daha hızlı tepki verirler ve doğruluk oranları yüksektir. Sıcaklık, nem ve titreşim gibi çevresel faktörlerden daha az etkilenirler. Otomotiv endüstrisi, tıbbi cihazlar, endüstriyel otomasyon, güvenlik sistemleri ve hatta akıllı telefonlar gibi birçok farklı uygulama alanları bulunur. Algılama yöntemlerine göre farklı şekillerde sınıflandırılırlar. Reflektörlü sensörler, reflektör yüzeyden yansıtılan

ışığı algılayan sensörlerdir. Endüstriyel otomasyon, güvenlik sistemleri gibi alanlarda kullanılırlar. Mesafe sensörleri, lazer veya ultrasonik ışınlar kullanarak nesnenin mesafesini ölçerler. Otomotiv endüstrisi, tıbbi cihazlar gibi alanlarda kullanılırlar. Renk sensörleri, RGB ışık sensörlerinden veya spektrometrelerden yararlanılarak nesnenin rengini algırlar. Endüstriyel otomasyon, gıda endüstrisi gibi alanlarda kullanılırlar. Hareket sensörleri, PIR sensörlerinden veya lazer tarama sensörlerinden faydalanarak nesnenin hareketini algılar. Güvenlik sistemleri ve akıllı evler gibi alanlarda kullanılırlar.

2.2.10 Optik Kuplörler

Optik dalga kılavuzlarının birbirine olan mesafesi, çalışma dalga boyuna kıyasla önemli ölçüde küçük olduğunda, bu kılavuzlar birbirlerini elektromagnetik olarak etkileme potansiyeline sahiptir. Bir kılavuzda ilerleyen modun alan genişlemesi, diğer kılavuzdaki modun etki alanına ulaştığında, bu durum kuplaja yol açar. Bu kuplaj, farklı kılavuzlardaki modlar arasında gerçekleşebileceği gibi, aynı kılavuz içindeki modlar arasında da meydana gelmesi optik dalga kılavuzlarının elektromagnetik dalga yayılımını incelemek ve birbirine paralel ve paralel olmayan optik fiberlerin karşılıklı kuplaj mekanizmasını göz önünde bulundurarak mod analizi yapmak için önem arz eder. Şekil 2.19’da verilen blok şemada 2 girişi ve 2 çıkışı olan optik fiber kuplör yapısı bulunmaktadır.



Şekil 2.19 2x2 optik fiber kuplörün blok şeması [23].

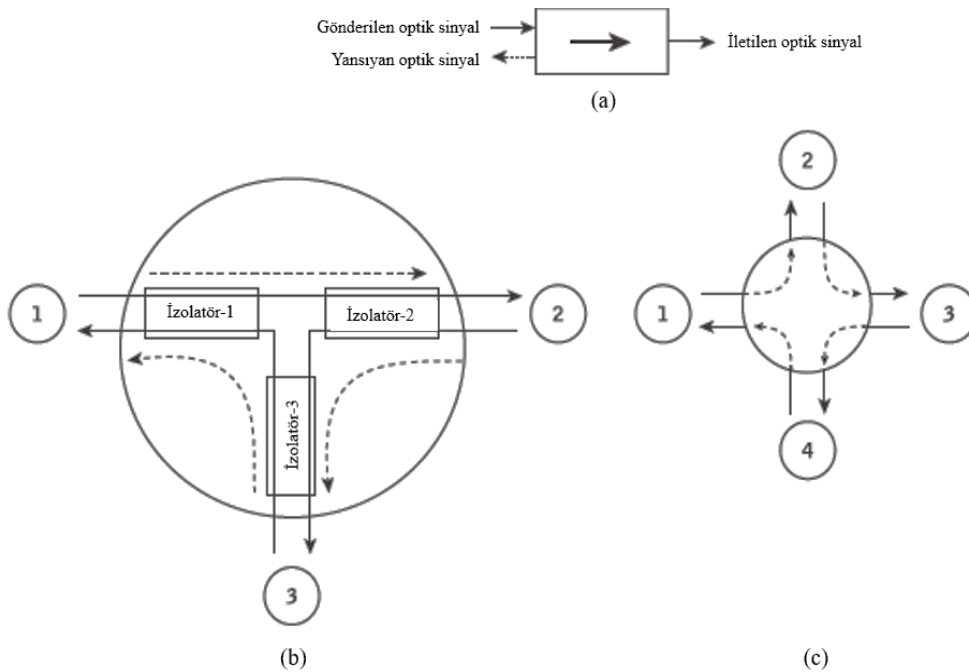
Elektromagnetik problemlerle ilgili olarak, kuple mod kavramı 1950’li yıllarda önemli bir gelişme olarak kabul edilmiştir. Kuple Mod Teorisi’nin optik dalga kılavuzlarına uygulanması, 1970 yılında R. Vanclooster ve P. Phariseau’nun literatüre katkılarıyla başlamıştır. Kuple Mod Teorisi, birbirine kuple olan

elemanlardan oluşan sistemlerin analizinde etkin bir araç olarak kullanılmakta ve genellikle tutarlı sonuçlar vermektedir. Kuple Mod Teorisi, bir kılavuzdaki modun propagasyon sabitinin, diğer kılavuzdaki modun etkisiyle nasıl değişeceğini belirler. Bu teori, optik dalga kılavuzları gibi birbirine kuple olan sistemlerin analizinde kullanılır. Kuple Mod Teorisi, optik dalga kılavuzlarının elektromagnetik dalga propagasyonunun incelenmesi ve birbirine paralel ve paralel olmayan optik fiberlerin karşılıklı kuplaj mekanizmasını göz önünde tutarak mod analizinin yapılması için önemlidir [23-25].

2.2.11 Optik Sirkulatörler ve İzolatörler

Optik sirkulatörler, 1990'lı yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmış ve günümüzde gelişmiş optik haberleşme sistemlerinde önemli unsurlardan biri haline gelmiştir. Optik sirkulatörler, bir optik fiberde zıt yönlerde hareket eden optik sinyalleri ayırmak için kullanılır. Işık sinyalini minimum kayıpla yönlendirmek için optik sirkulatör kullanmak verimli ve ekonomik bir çözümdür.

Optik izolatörler ise optik sinyalin tamamını istenilen yönde iletilmesini sağlayan pasif cihazlardır. Şekil 2.20'de izolatörlerin, yansıyan sinyallerin geri dönmesini önlemesi özelliğinden dolayı sirkulatörlerle birlikte kullanılmı gösterilmiştir.



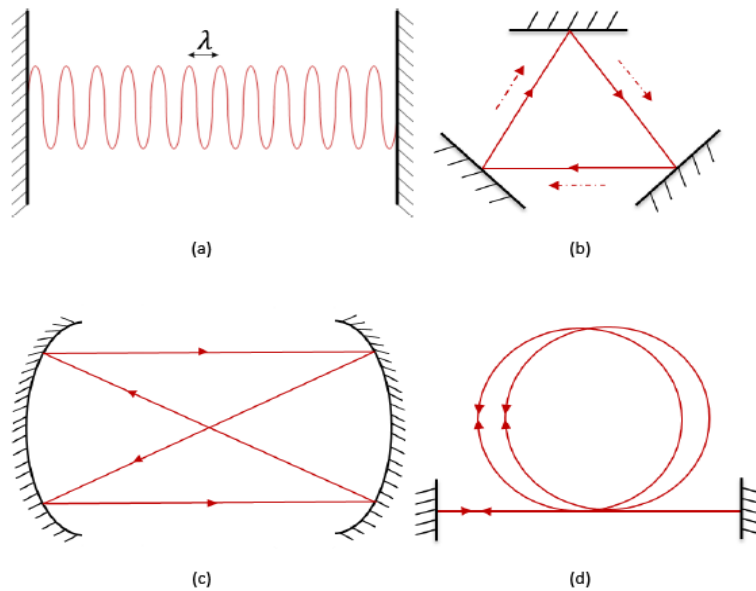
Şekil 2.20 Optik izolasyon ve sirkülasyon: (a) optik izolatörün fonksiyonel şeması (b) üç portlu optik sirkulatör (c) dört portlu optik sirkulatör [5].

Optik sirkülatörlerin işlevi, telekomünikasyon, tıp ve görüntüleme endüstrileri gibi farklı alanlara yaygın olarak uygulanır. Özellikle WDM sistemlerinde Bragg ızgaralarıyla birlikte optik sirkülatörler, belirli dalga boylarının yansıtılmasına ve farklı yollara gönderilmesine izin verir.

Optik sirkülatörlerin özellikleri arasında, ışığı bir optik fiberden diğerine geçirmek için yapılmış olmaları ve ışığın yayılma yönüne bağlı olarak ışığı yönlendiren karşılıklı olmayan bir cihaz olmaları bulunur. Ayrıca tipik olarak optik izolatörde optik sirkülatöre göre daha fazla ışık enerjisi kaybı vardır. Çünkü optik izolatörler, ters yönde gelen ışığı engellerken, optik sirkülatörler bu ışığı başka bir yere yönlendirirler [5, 23].

2.2.12 Optik Rezonatörler

Optik rezonatörler, belirli bir rezonans frekansında ışığı hapseden ve saklayan cihazlardır. Bu özellik, bir optik yama sisteminde geri besleme işlemi olarak kullanılır. Işık, rezonatör içinde dolaşır ve tekrarlanarak yansır, bu da ışığın belirli bir frekansta yoğunlaşmasını sağlar. Basit bir optik rezonatör, genellikle iki paralel düzlem ayna arasında çok küçük bir kayıpla yansıyan ışığı içermesi, optik rezonatörün bir elektronik rezonans düzeneğinin optik bir ikizi gibi çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.21 Rezonatör çeşitleri: (a) düzlem ayna rezonatör (b) ring rezonatör (c) küresel ayna rezonatör (d) optik fiber rezonatör

Optik rezonatörler, belirli bir konfigürasyon tarafından belirlenen rezonans frekanslarında ışığı hapseder ve saklar. Bu özellik, optik haberleşme sistemlerinde ve diğer optoelektronik uygulamalarda önemlidir. Şekil 2.21’de rezonatör çeşitlerinden düzlem ayna rezonatör, ring rezonatör, küresel ayna rezonatör ve optik fiber rezonatör görselleri verilmiştir. Sonuç olarak, optik izolatörler ve optik rezonatörler, ışığı yönlendiren, belirli bir frekansta sınırlayan ve saklayan, geri yansıyan sinyalleri engelleyen cihazlardır. Optik rezonatörler, ışığın belirli bir dalga boyunda yoğunlaşmasını sağlar, bu da optik sistemlerin daha verimli ve etkili çalışmasına olanak tanır [23].



3

OPTİK AĞLAR

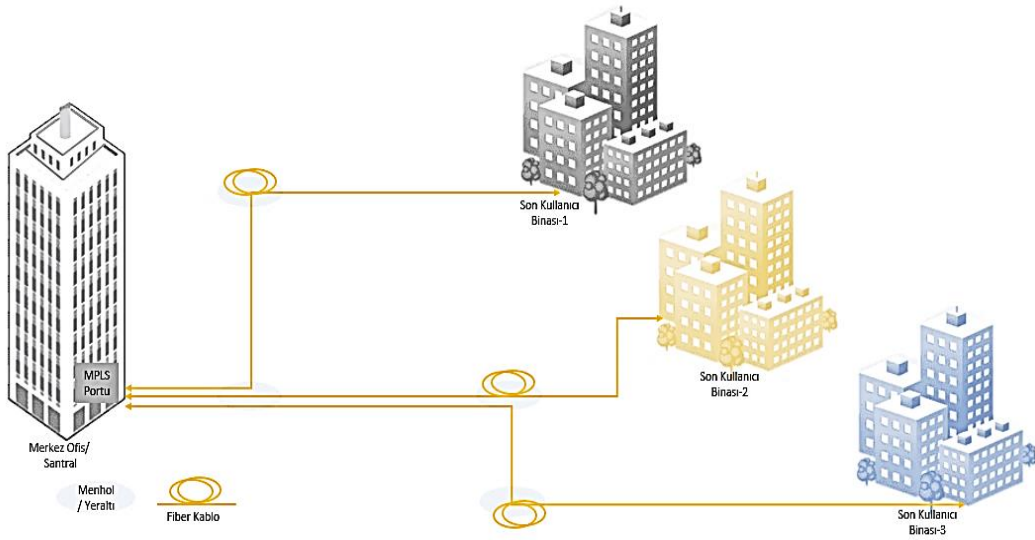
Işık sinyallerinin, elektrik sinyallerinden daha hızlı iletilmesi, iletişim teknolojilerinde önemli bir gelişme olmuştur. Bu keşif, ışığın iletimi üzerine yapılan araştırmaları arttırmış ve ışığın iletilmesi için en uygun ortamın belirlenmesi konusu önem kazanmıştır. İlk denemelerde ışık sinyali, yakınsak mercekler kullanılarak iletmeye çalışılmış, ancak bu yöntem hava koşullarından olumsuz etkilendiği için sadece havanın durgun olduğu zamanlarda birkaç yüz metre iletim sağlanabilmiştir.

1950'lerde, ışığın iletimi için metal tellerden yapılmış dairesel dalga kılavuzları ve yansıtma boruları denenmiş, ancak bu yöntemler de yetersiz kalmıştır. Ancak 1960'lı yıllarda lazerin kullanılmasıyla birlikte, veri iletimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu teknoloji, ilk başta maliyeti çok yüksek olduğu için yaygın olarak kullanılmamış, ancak günümüzde son kullanıcıya kadar ulaşmıştır. Daha büyük ve çeşitli bilgilerin daha yüksek hızlarda iletilmesi için çalışmalar devam etmektedir [26, 27].

Optik ağ teknolojisi çeşitleri incelendiğinde, noktadan noktaya (Point to Point, P2P) optik ağlar, aktif elemanlı optik ağlar (Active Optical Networks, AON) ve pasif elemanlı optik ağlar (PON) olarak gruplandırılır. AON ve PON noktadan çoklu noktaya (Point to Multi Point, P2MP) optik ağ olarak da ifade edilir. Optik ağlarda aktif ürünler, telekomünikasyon ve kablolu televizyon marketlerinde kullanılan kaynak lazerler, pump lazerler, dış modülatörler, dedektörler, alıcılar ve birleştirilmiş lazer modülleri olarak sıralanır. Pasif olarak nitelendirilen ürünler ise izolatörler, WDM kuplörler, ızgaralar, sirkülatörler, optik anahtarlar, ayarlanabilir filtreler ve bazı mikro-elektronik ve mekanik sistemlerdir. Aktif üniteler, optik işareti üretmek için kullanılırken, pasif üniteler ise üretilmiş bu işaretin ayırıştırılması, yansıtılması ve birleştirilmesi gibi amaçlar için kullanılır [4, 27].

3.1 Noktadan Noktaya Optik Ağlar

Noktadan noktaya (P2P) optik bağlantılarda, iletimin gerçekleştirilmesi ve kullanıcıların diğer kullanıcı trafiğinden etkilenmeden güvenli bir şekilde hizmet alabilmesi için merkezi ofisten her kullanıcıya özel bir optik hat çekilir. İleriye dönük sistem genişletmelerine olanak sağlayan P2P ağlar, son kullanıcılara yüksek kapasitede ve güvenilirlikte veri iletimi sunar. Ancak noktadan noktaya bağlantının sağlanabilmesi için çok sayıda fiber hat gerekir ve her kullanıcının merkezi ofisteki hat girişinde ayrı bir sonlandırıcı ihtiyacı duyulur. Bu durum, merkez binalardaki cihaz sayısını artmasına, fazla miktarda fiber kullanılmasına ve stok problemlerini beraberinde getirmesine sebep olur. Her ne kadar noktadan noktaya bağlantılı ağlarda en yüksek kapasite sağlanabilse de kurulum ve bakım maliyetlerinin yüksek olması en önemli dezavantajdır [27, 28].



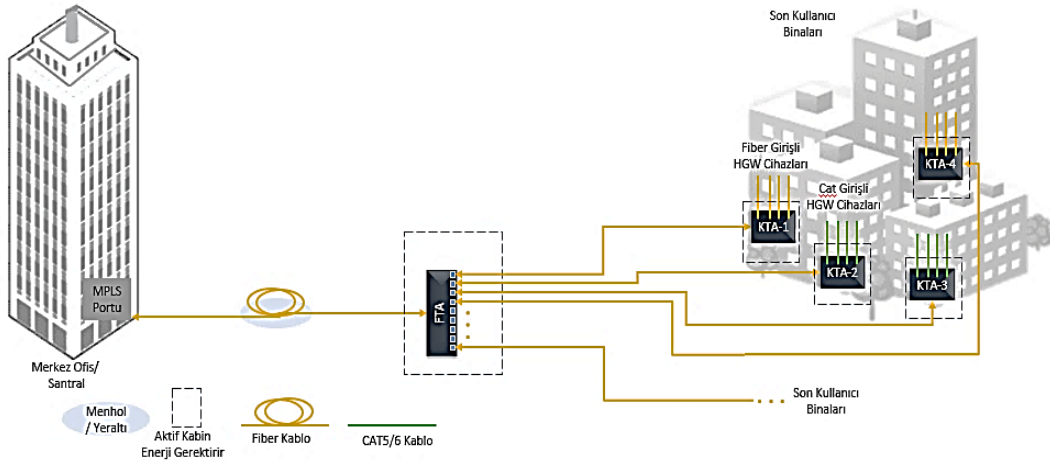
Şekil 3.1 P2P ağ yapısı.

Şekil 3.1’de P2P ağ yapısı bulunmaktadır. Merkez ofisten (santralden) çıkan fiberler, kablo veya elyaf (tel) bazında müşterilere ayrı ayrı götürülerek hizmet birbirinden bağımsız hatlar üzerinden verilir [29].

3.2 Aktif Optik Ağlar

Aktif optik ağlar (AON), noktadan çoklu noktaya (P2MP) optik ağ örneğidir. Merkezi ekipmandan çıkan optik fiberin, bütün trafiği aktif bir ekipmana kadar taşındığı ve bu aktif ekipmanda çoğullanarak yeni bir aktif ekipmana, binaya veya daireye bağlandığı modeldir. İhtiyaca göre aktif elemanlar arka arkaya kullanılarak birkaç defa çoğaltılabilir. AON mimarisi, elektronik olarak aktif bir elemana sahip olup, gelen verilerin kullanıcılarla merkezi birim arasında ayrıştırılarak gönderilmesini ve alınmasını sağladığından enerji ihtiyacı ve bakım maliyeti söz konusu olmaktadır [30].

AON mimarisi, ethernet ağ yapısına benzemesi nedeniyle aktif ethernet sistemi olarak da bilinir. Aktif ethernet sisteminde data trafiği, ethernet tabanlıdır. Standart olarak IEEE 802.3ah referans alınmıştır. Yönetim sistemi hariç toplam anahtarını, kenar anahtarını ve kullanıcı anahtarını içeren üç temel sistemden oluşur.



Şekil 3.2 AON yapısı

Toplam anahtarı (core switch), AON mimarisindeki merkezi anahtarlayıcıdır ve tüm kullanıcıların verilerini yönetir. Toplam anahtarı, birden çok ağ erişim (kenar) anahtarından gelen veri trafiğini çekirdeğe yönlendirilen yüksek band genişlikli cihazlardır. Toplam anahtarı Şekil 3.2’de FTA (Fiber Toplama Anahtarı) olarak gösterilmiştir. FTA’ların üst cihazı merkez ofislerde bulunan MPLS (Multi Protokol Label Switching, çoklu protokol etiket anahtarlama) portlarıdır.

Kenar anahtarı (edge switch), ağı kenarında yer alır ve kullanıcının evindeki veya iş yerindeki cihazlardan topladığı verileri toplam anahtarına iletmek için kullanılır. Kenar anahtarı cihazları Şekil 3.2’de KTA (Kenar Toplama Anahtarı) olarak gösterilmiştir. KTA’lar; fiber optik kablo ile FTA’lara, fiber veya cat (category) kablo ile HGW (Home Gateway) cihazlarına bağlanmaktadır. HGW; kullanıcı anahtarı olarak kullanılan daire içindeki modemlere denilmektedir.

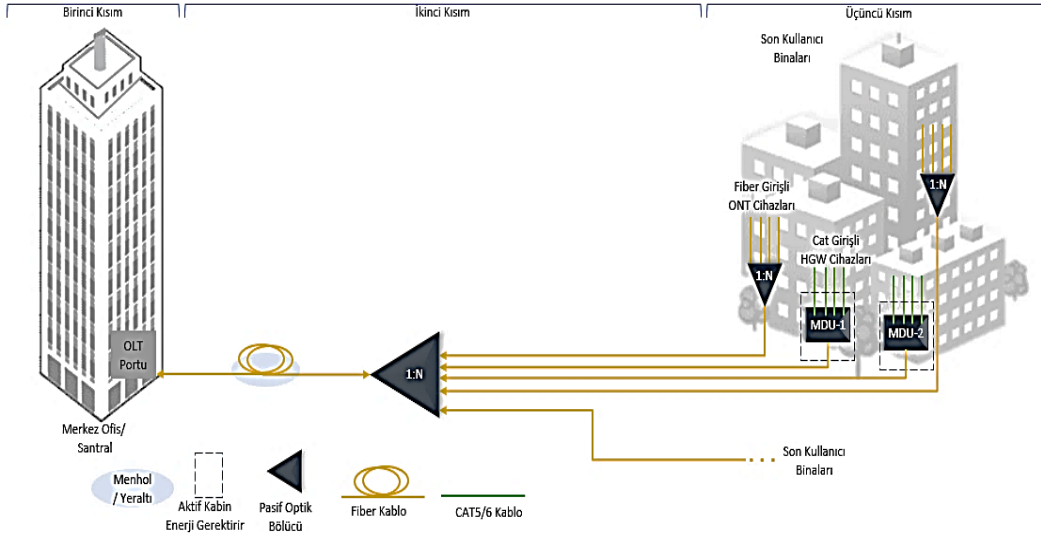
Kullanıcı anahtarı (user switch) ise, yerel ağ (Local Area Network, LAN) içindeki son kullanıcı cihazlarını bağlamak için kullanılan bir anahtardır. Kullanıcı anahtarı, erişim anahtarı veya hizmet düğümü olarak da bilinmektedir. Dizüstü bilgisayarlar, masaüstü bilgisayarlar, güvenlik kameraları ve daha fazlası gibi istemci cihazlarını ağa bağlanmaktadır. Şekil 3.2’de kullanıcı anahtarı HGW olarak belirtilmiş olup KTA’lara cat kablo ile bağlanmaktadır.

Ayrıca, günümüzde yaygın olarak kullanılan SDH’ye dayalı AON’larda; 155 Mbps veya 622 Mbps erişim hızında, iletim mesafesi tekrarlayıcı olmadan 70 km’ye kadar ulaşır. AON teknolojisi çok gelişmiştir ancak dağıtım maliyeti yüksektir.

3.3 Pasif Optik Ağlar

Son yıllarda hızla gelişen optik haberleşme teknolojileri, yüksek hızlı internet erişimi, video ve ses gibi geniş band hizmetlerin sağlanmasında önemli bir rol oynamıştır. Fiber optik kabloların yaygınlaşması tek fiber kablonun birden fazla kullanıcıya hizmet vermesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Aktif optik ağların sahada enerjiye bağımlı olması ve yüksek maliyetli olması nedeniyle teknoloji zaman içinde pasif altyapılara yönelmiştir.

Pasif optik ağlar (PON), noktadan çoklu noktaya (P2MP) optik ağ örneğidir. Merkezi ekipmandan çıkan optik fiberin, bütün trafiği sahada pasif ekipmanlarla çoğullanarak işletmelere, binalara veya dairelere bağlanıldığı modeldir. İhtiyaca göre, pasif elemanlar arka arkaya kullanılarak birkaç defa çoğaltılabilir. PON mimarisi, sahada elektronik olarak aktif bir elemana sahip olmayıp, gelen verilerin kullanıcılarla merkezi birim arasında ayrıştırılarak gönderilirken ve alınmasını sağlayan enerji ihtiyacı söz konusu değildir [30].



Şekil 3.3 PON yapısı.

Optik haberleşme teknolojilerin en önemli unsurlarından biri haline gelen PON yapısı üç bölüm olarak değerlendirilmektedir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi birinci kısım OLT (Optical Line Termination, optik hat terminali) cihazının yer aldığı, fiber optik kabloların çıkıp sahaya yayıldığı merkez ofislerdir. Birinci bölümdeki OLT aktif cihaz olup enerji ihtiyacı bulunur. İkinci kısım, merkez ofisten çıkıp kullanıcılara dağılan fiber optik kabloların ve enerjiye ihtiyaç duymayan optik bölücülerin konumlandırıldığı saha kısmıdır. Optik bölücüler, birden çok kullanıcıya tek fiber elyafı üzerinden gelen veriyi bölerek alıcı tarafına; kullanıcılardan gelen verileri de toplayarak merkez ofisteki verici görevi yapan OLT tarafına iletir. Üçüncü kısım, kullanıcı evi veya binası olarak tanımlayabileceğimiz, bina altlarına kurulan MDU (Multi Dwelling Unit, çoklu konut birimi) cihazının, bina içi fiber optik kabloların ve ONT (Optical Network Termination, optik ağ terminali) cihazının yer aldığı kısımdır. Üçüncü bölümdeki ONT ve MDU aktif cihaz olup enerji ihtiyaçları bulunur.

PON teknolojisi, yüksek veri trafiği için kaliteli ve esnek çözümler sunması, saha tarafında enerji ihtiyacının bulunmaması ve tek bir fiber üzerinden birden fazla kullanıcıya erişilebilmesi nedenlerinden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir. PON'un T-PON (Telephony PON), A-PON (ATM PON), B-PON (Broadband PON), E-PON (Ethernet PON), G-PON (Gigabit PON), XG-E-PON (X Gigabit-capable Ethernet PON), XG-PON (X Gigabit PON) gibi türleri vardır [31-34].

3.3.1 T-PON / A-PON / B-PON

Telefon kullanıcılarının sayısındaki artış, haberleşme ağlarının genişlemesine ve artan kapasite taleplerine yanıt verilememesine neden olmuştur. Bu sorunu çözmek için, aynı hattı kullanarak daha fazla kullanıcıya ulaşmayı sağlayan yöntemler geliştirilmiştir. Pasif ağ teknolojilerinin ilk uygulamalarında, tek bir fiber üzerinden yaklaşık 128 ISDN (144 Kb/s) bağlantısına eşdeğer bir kapasite sağlayan Telefon PON (T-PON) tasarlanmıştır. Bu, PON teknolojisinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir.

1995 yılında, geniş band erişim ağları için birleşik bir özellik oluşturma gayesiyle Full Service Access Network (FSAN) birliği oluşturulmuştur. ATM tabanlı PON için 1997’de, FSAN önerisine dayanarak, ITU-T, simetrik 155 Mbps yukarı akış ve aşağı akış bit hızlarına sahip A-PON mimarisini belirten G.983.1 tavsiyesini kabul etmiştir. Bu özellik, 2001’de, asimetrik 155 Mbps yukarı akış ve 622 Mbps aşağı akış iletimlerine izin vermek, ayrıca simetrik 622 Mbps iletim yapmak için değiştirilerek Geniş Band PON (B-PON) adını almıştır.

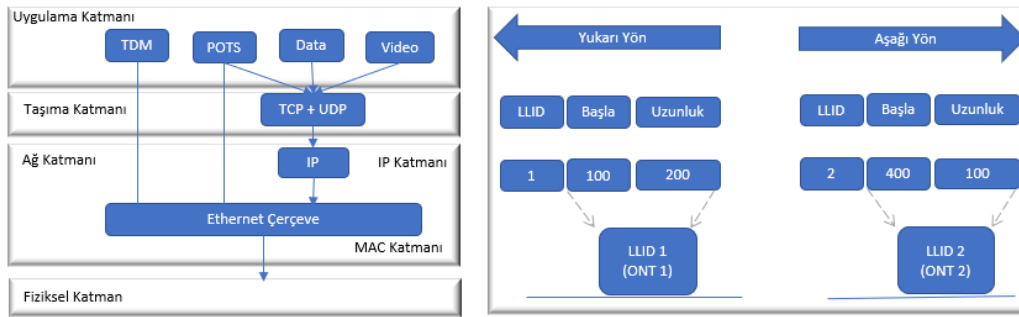
3.3.2 E-PON

IEEE tarafından, 802.3 ethernet standardına dayalı olarak E-PON 802.3ah, 20 km’ye kadar olan bir pasif ağ tanımlanmıştır. Önceki PON teknolojileri, ATM standartlarını temel alırken, E-PON sabit ATM hücrelerinin yerine, değişken uzunlukta olabilen ethernet paketlerini kullanır. E-PON, diğer ethernet standartlarıyla tamamen uyumlu olması nedeniyle her iki uçta ethernet tabanlı ağa bağlanırken herhangi bir dönüştürmeye veya kapsül oluşturmaya ihtiyaç duyulmaz. Aynı ethernet çerçevesi, 1518 bayta kadar yük taşıma kapasitesiyle kullanılır. Ethernet, yerel alan ağlarında (Local Area Network, LAN) ve metropol alan ağlarında (Metropolitan Area Network, MAN) kullanılan birincil ağ teknolojisi olduğundan, protokol dönüştürmeye gerek olmaz. Farklı olarak E-PON, diğer ethernet sürümlerinde kullanılan CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection, Taşıyıcı Algılama Çoklu Erişim/Çarpışma Tespiti) erişim yöntemi yerine TDMA (Time Division Multiple Access, Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) yöntemini kullanır.

E-PON’un hat veri hızı hem aşağı yönde hem de yukarı yönde 1,25 Gbps olacak şekilde simetriktir. 8B/10B hat kodlaması sonucunda, gerçekte kullanılabilir bit hızı

1 Gbps'ye yükselir. E-PON, aşağı yönlü iletim için 1480 nm ile 1500 nm dalga boyu bandı tanımlıdır ve video sinyali için de ayrı bir dalga boyu bandı olan 1550 nm seçilir. Yukarı yönlü dalga boyu bandları için E-PON, 1260-1360 nm dalga boyları tercih edilir.

Burada, 802.3av olarak adlandırılan yukarı yönde ve aşağı yönde 10 Gbps olan bir ethernet sürümü de mevcuttur. Hibrit yapılarda 10 Gbps ve 1 Gbps hızları birlikte tasarlanır. Fiber üzerinde farklı optik dalga boylarında, 1575 nm ile 1580 nm aşağı yönde 10 Gbps ve 1260 nm ile 1280 nm yukarı yönde 1 Gbps kullanılabilir ve bu nedenle bazen Gigabit Ethernet PON veya GE-PON olarak da adlandırılır.



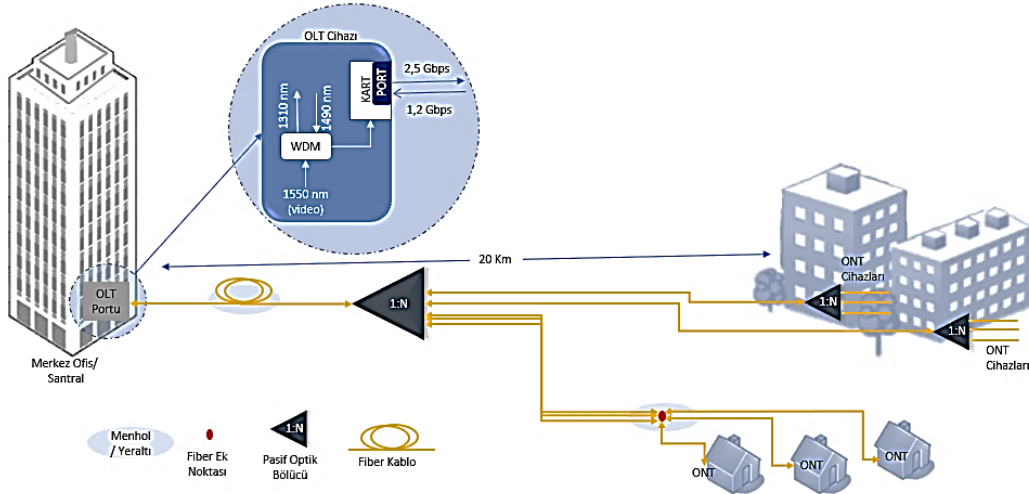
Şekil 3.4 E-PON katman yapısı (solda) ve E-PON çerçeve yapısı (sağda) [31].

Şekil 3.4'te E-PON'a ait katman ve çerçeve yapıları yer almaktadır. E-PON ethernet çerçevesini kullanır. Çerçevenin giriş alanında LLID (Logical Link Identifier) bulunur ve LLID, OLT tarafından her bir ONT için atanan benzersiz bir tanımlayıcıdır. Aşağı yönde, ONT'ler LLID eşleştirmesi yaparak trafiğin kabul edilip edilmemesine karar verir. Yani eşleşen LLID çerçeveleri kabul edilir, eşleşmeyen LLID'leri atılır. Yukarı yönde ise her ONT ile OLT arasındaki mesafeyi dikkate alarak TDMA yaklaşımı kullanılıp belirli bir zaman dilimi atanır.

3.3.3 G-PON

B-PON teknolojisinden sonra geliştirilen G-PON, E-PON ve B-PON'un özelliklerini bünyesinde barındıran, IP tabanlı ve çok yüksek band genişliklerinin söz konusu olduğu uygulamalarda kullanılan bir standarttır. ITU-T tarafından G.984 standart serisi ile G-PON'un genel özellikleri G.984.1'de, fiziksel katman özellikleri G.984.2'de, iletim katmanı özellikleri G.984.3'te ve ONT yönetim ve kontrol özellikleri G.984.4'te tanımlanmıştır.

G-PON, A-PON ve B-PON'a kıyasla daha gelişmiş bir yeteneğe sahiptir ve eski teknolojilerle geriye dönük uyumludur. G-PON Kapsülleme Yöntemi (GPON Encapsulation Method, GEM) kullanarak sadece Ethernet'i değil, aynı zamanda ATM ve TDM trafiklerini de taşıyabilmesi, G-PON'un çeşitli hizmetler ve uygulamalar için esnek bir çözüm olmasını sağlar. GEM'in ITU-T'nin G.7041 genel çerçeveleme prosedürü önerisine dayanması, G-PON'un mevcut ağ altyapılarına ve standartlarına uyumlu hale getirir ve G-PON'un mevcut SDH ağlarıyla entegrasyonunu kolaylaştırarak geniş band hizmetlerinin dağıtımını hızlandırır. GEM'in, her türlü veriyi kapsülleyebilme yeteneği G-PON'un veri taşıma yeteneklerini artırır. GEM'in, bağlantı odaklı iletişim sağlaması, veri iletiminin güvenilir ve düzenli olmasına ve hizmet kalitesi gereksinimlerinin karşılanmasına yardımcı olur.



Şekil 3.5 G-PON mimarisi [34].

Şekil 3.5'te merkezi ofisten çıkan tek fiber elyafı, optik bölücü vasıtasıyla bölünerek 20 km içerisindeki son kullanıcılara dağıtılır. 1:N olarak gösterilen optik bölme oranı 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64 ve 1:128'e kadar farklı değerlerde olabilir.

Optik iletişim sistemlerinde kullanılan dalga boyları, genellikle fiberin en düşük kayıp bölgelerine denk gelen 1310 nm ve 1550 nm civarı bölgelerdir ve "düşük kayıp pencere" olarak isimlendirilir. G-PON'da aşağı yönlü iletim için 1480-1500 nm, yukarı yönlü iletim için 1260-1360 nm dalga boyu aralığından yararlanılır. Ayrıca aşağı yönlü RF video dağıtımını için 1550-1560 nm dalga boyu aralığı

belirlenmiştir. G-PON teknolojisinde kullanıcıya doğru 1490 nm dalga boyunda 2,5 Gbps hızında ve OLT'ye doğru 1310 nm dalga boyunda 1,2 Gbps hızında veri erişimi yapılır.

3.3.4 XG-E-PON

10G E-PON olarak da adlandırılan XG-E-PON için 2 farklı bit hızı bulunmaktadır. İlki; simetrik 10 Gbps aşağı ve yukarı yönde akış hızlarını sağlar. İkincisi; yukarı yönde akış için 2.5 Gbps ve aşağı yönde akış için 10 Gbps veri hızları mevcuttur. 64B/66B hat kodlama tekniğiyle, aşağı akışta 1575-1580 nm ve yukarı akışta 1260-1280 nm dalga boyları kullanılır.

XG-E-PON, birçok özelliğini mevcut E-PON'dan devralır lakin fiziksel katmanda bazı değişiklikler bulunmaktadır. Bit hızı olarak XG-E-PON, iki fiziksel katman modunu destekler. İlk mod, 10 Gbps ile simetrik iletimdir. İkinci mod, aşağı akış için 10 Gbps ve yukarı akış için 1 Gbps ile asimetrik iletimdir. Dalga boyu olarak XG-E-PON, yukarı akış trafiği için 1260–1280 nm dalga boyu bandı ve aşağı akış trafiği için 1575-1580 nm dalga boyu bandı kullanılır. XG-E-PON'da uygulanan hat kodlama, 8B/10B'nin geliştirilmiş bir versiyonu olan 64B/66B'dir. Hata Düzeltme Kodlama (Forward Error Correction, FEC), dağıtılmış E-PON'da isteğe bağlı iken RS (255, 223) kullanımıyla XG-E-PON için zorunlu bir gereklilik haline gelmiştir. Bölünme oranları açısından, XG-E-PON bölünme oranları, en az 10 km mesafede 1:16 ve en az 20 km mesafede 1:32'dir. E-PON'da kullanılan TDM tekniğiyle dağıtılmış E-PON ve XG-E-PON bir arada var edilir. Fakat yarı iletken optik yükselteçler (SOA) kullanarak önceden yükseltme sağlamak için çok hızlı bir OLT'ye gereksinim duyulur [31].

3.3.5 XG-PON

XG-GPON, G-PON'a benzer özelliklere sahiptir ve veri bağlantı katmanı çerçeveleme ile yönetim süreci değişmemiştir. Ancak fiziksel katmanda bazı değişikliklerle bölünme oranı, güç bütçesi ve erişilebilirlik gibi önemli performans iyileştirmeleri sağlanmıştır. XG-GPON iki sınıfa ayrılmaktadır. İlk sınıf olan XG-GPON1, 10 Gbps aşağı akış ve 2.5 Gbps yukarı akış ile asimetrik iletim, ikinci sınıf olan XG-GPON2 ise 10 Gbps simetrik iletim yapılıdır. XG-GPON1 fiziksel katmanı hakkındaki detaylar ITU-T G.987.2'de tanımlanmış olup, XG-GPON2 fiziksel katman standardı henüz sonuçlandırılmamıştır. Bit hızı olarak G-PON, 2.4 Gbps

aşğı akış ve 1.2 Gbps yukarı akış hızlarına sahipken, XG-PON daha yüksek hızlar sunulur. XG-PON1, 10 Gbps aşğı akış ve 2.5 Gbps yukarı akış hızlarına sahipken, XG-PON2 simetrik bir iletim sağlar ve hem aşğı akış hem de yukarı akış için 10 Gbps hızına ulaşılır. Dalga boyu açısından G-PON ve XG-PON'da farklı dalga boylarından yararlanılır. G-PON'da 1290-1330 nm yukarı akış ve 1480-1500 nm aşğı akış dalga boyları tercih edilirken, XG-PON'da 1260-1280 nm yukarı akış ve 1575-1580 nm aşğı akış dalga boyları kullanılır. Hata düzeltme kodu (FEC), G-PON'da opsiyonel iken XG-PON'da SR (255,239) ve RS (255, 223) olmak üzere iki farklı FEC'ten faydalanılır.

Bu karşılaştırmalar, G-PON'un daha düşük hızlarda çalıştığını ve daha geniş bir dalga boyu aralığından yararlandığını gösterirken, XG-PON'un daha yüksek hızlarda çalıştığını ve daha dar bir dalga boyu aralığından faydalandığını göstermektedir. Ayrıca XG-PON'un hata düzeltme kodları, G-PON'dan daha gelişmiştir. Bu farklılıklar, XG-PON'un daha yüksek veri hızları ve daha etkin hata düzeltme yetenekleri sunarak G-PON'dan daha üstün olduğunu kanıtlar. Ancak, hangi teknolojinin kullanılacağına karar verilirken, uygulama gereksinimlerinin ve maliyet faktörlerinin dikkate alınması önemlidir [31].

4 FTTX TEKNİKLERİ

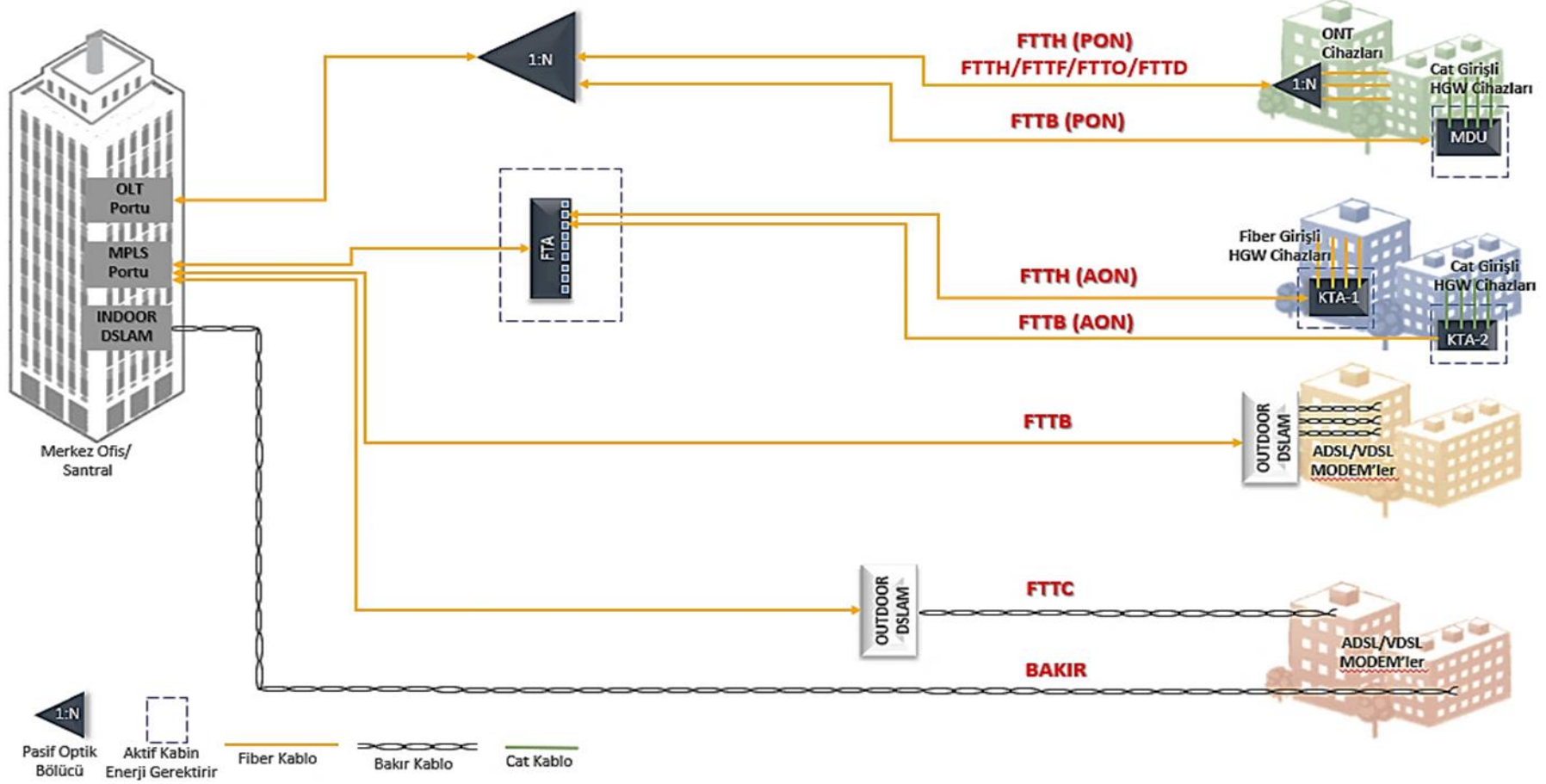
Günümüzde ulaşılan internet hızları ve ihtiyaç duyulan kapasiteler nedeniyle son kullanıcıya yakınsama kaçınılmaz olmuştur. Mesafe arttıkça elektriksel sinyallerin bakır ortamlardaki zayıflamaları, sahada daha fazla fiber kullanılarak verilerin ışıık formunda iletilmesi mecburiyetini doğurmuştur. Zaman içindeki gelişmeler kullanıcıların daha fazla veriyi daha hızlı bir şekilde indirmesine ve yüklemesine FTTX (Fiber to the X) teknikleri sayesinde olabileceğini göstermiştir. FTTX teknikleri, internet bağlantısının hızını, güvenilirliğini ve kapasitesini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahip olduğu için son derece önemlidir.

4.1 FTTX Türleri

FTTX, genellikle “X’e kadar fiber” olarak çevrilen bir terimdir ve “X” ile fiberin ulaştığı son nokta temsil edilir. Bu nokta bir ev, bina, iş yeri, fabrika, kabin, düğüm veya kaldırım olabilir. FTTX, merkez santralden çıkan fiber optik kabloların belli mesafelerde son kullanıcıya yakınmasıyla bir dizi alt kategorilere ayrılmaktadır. Bunlar FTTC (Fiber to the Curb, Kaldırıma Kadar Fiber), FTTB (Fiber to the Building, Binaya Kadar Fiber), FTTH (Fiber to the Home, Eve Kadar Fiber), FTTF (Fiber to the Factory, Fabrikaya Kadar Fiber), FTTO (Fiber to the Office, Ofise Kadar Fiber), FTTD (Fiber to the Desk, Masaya Kadar Fiber) olarak tanımlanmaktadır [35].

4.1.1 FTTC (Fiber To the Curb, Kaldırıma Kadar Fiber)

FTTC, fiber optik kabloların evlere ve iş yerlerine daha yakın getirildiği bir telekomünikasyon erişim tekniğidir. FTTC kurulumları genellikle mahalle kaldırımına veya hizmet kutusuna kadar fiber bağlantılardan oluşur ve son kullanıcılara bağlantı mevcut bakır veya koaksiyel kablolar kullanılarak yapılır. Bu, geniş kapsamlı fiber kurulumlarının ihtiyacını ortadan kaldırır ve yüksek hızlı geniş band hizmetlerinin daha hızlı uygulanmasına olanak sağlar.



Şekil 4.1 FTTX türleri.

Şekil 4.1’de merkez ofiste bulunan internet sinyali üreten cihazlar olan Indoor (bina içi) DSLAM’lardan (Digital Subscriber Line Access Multiplexer, Digital Abone Hattı Erişim Çoklayıcısı) çıkan sinyaller bakır kablolar üzerinden son kullanıcılara iletilirken, zamanla artan hız talepleri karşılanamaz duruma gelmiştir. Dolayısıyla son kullanıcılara yakınsayabilmek için sahada outdoor (bina dışı) DSLAM kurulması ihtiyacı doğmuştur. Merkez ofisten outdoor kabinlere (DSLAM’lara) fiber ile, outdoor kabinlerden son kullanıcıya kadar da bakır kablo ile erişim sağlanan FTTX türü FTTC olarak tanımlanır. Tamamı bakır altyapı üzerinden hizmet verildiğinde 1-2 km’ye kadar en fazla 1-4 Mbps hızlar verilebilirken, FTTC uygulamalarıyla bakır mesafesi 300 m’ye kadar düşürülerek 8-16 Mbps’ye kadar hızlar verilebilir hale gelmiştir. Günümüz altyapısında yaygın olarak FTTC üzerinden hizmet alan son kullanıcıların sayısı önce FTTB sonra da FTTH’in yaygınlaşmasıyla azalma eğilimine girmiştir.

4.1.2 FTTB (Fiber To the Building, Binaya Kadar Fiber)

FTTB, fiber optik kabloların bir binaya veya mülke kadar getirildiği FTTX türüdür. FTTB uygulamaları kabinli, aktif veya pasif optik ağları gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir. Genellikle çoklu kullanıcıya sahip binalarda kullanılır ve her kullanıcıya yüksek hızlı internet (High Speed Internet, HSI) erişimi sağlar.

Yüksek hız ihtiyaçlarının karşılanamadığı durumlarda kurulmuş olan FTTC kabinlerin yetersiz kaldığı durumlarda, son kullanıcının taleplerini karşılayabilmek adına daha küçük kapasiteli outdoor kabinler bina altlarına kurulmaya başlanmıştır. Böylece son kullanıcıya yakınsanarak o binaya (bazen yandaki komşu binalar da dahil edilerek) 100 Mbps’e varan hızları verilebilir hale getirilmiştir. Kabinli FTTB uygulamalarda merkez ofisten çıkan fiber optik kablo kabine gelip oradan bakır kablo üzerinden son kullanıcıya ulaştığı için sinyalde zayıflama meydana gelmekte ve sağlıklı bir şekilde 100 Mbps hızı verilememekteydi. Bu nedenle aktif ve pasif optik ağ uygulamalarıyla son kullanıcıya 100 Mbps hızları verilebilir hale getirilmiştir. Şekil 4.1’de aktif optik ağlar ile FTTB (AON) uygulamasında merkez ofiste çıkan fiber optik kablo FTA (Fiber Toplama Anahtarı) cihazına gelip buradan yine fiber optik kablo ile KTA (Kenar Toplama Anahtarı) cihazına geldiği görülmektedir. KTA cihazında çıkan cat kablo ile evde bulunan HGW (Home Gateway) üzerinden son kullanıcılara 100 Mbps’e kadar hızlar sorunsuz verilir.

Şekil 4.1’de yer alan pasif optik ağ ile FTTB (PON) uygulaması incelenecek olursa, merkez ofisten çıkan fiber optik kablo sahada bulunan 1:N optik bölücü (splitter) ile çoğullanıp bina altlarında yer alan MDU (Multi Dwelling Unit) cihazlarında sonlandırılır. MDU cihazından çıkan cat kablo ile dairede bulunan HGW üzerinden son kullanıcılara 100 Mbps’e kadar hızlar kesintisiz verilebilir.

Cat kablonun 100 metreye kadar fiber gibi çok az zayıflatması özelliği sayesinde son kullanıcıya 100 Mbps verilebilmesine rağmen, daha yüksek hızlar için yetersiz kalır. Günümüzde bireysel kullanıcılar için sunulan 200 Mbps, 500 Mbps, 1 Gbps gibi yüksek hızlar FTTB uygulamaların hem KTA hem de MDU cihazları üzerinden verilememektedir.

4.1.3 FTTH (Fiber To the Home, Eve Kadar Fiber)

FTTH, fiber optik kabloların bir internet servis sağlayıcısının ağından son kullanıcının evine kadar uzandığı bir FTTX türüdür. Aktif ve pasif optik ağlarla sağlanan FTTH bağlantısı, FTTB uygulamalarla verilemeyen yüksek hızlı internete ihtiyaç duyan ev kullanıcıları için idealdir.

Şekil 4.1’de aktif ağ uygulaması ile yapılan FTTH (AON) uygulamasında görüleceği üzere, merkez ofisten çıkan fiber optik kablo FTA cihazına gelip buradan fiber optik kablo ile KTA cihazına geldiği ve buradan da yine fiber optik kablo ile son kullanıcı evinde bulunan fiber girişli HGW cihazında sonlanır. FTA, KTA cihazlarının enerjiye ihtiyaç duyuyor olması, cihazların çalışması için iki elyaf fibere ihtiyaç duyması ve sistem kapasitelerinin nispeten düşük kalması gibi sebeplerden dolayı FTTH (AON) uygulamaları günümüzde çok tercih edilmezler.

FTTH (PON) uygulamasına bakılacak olursa, Şekil 4.1’de görüleceği üzere merkez ofisten çıkan fiber optik kablo, önce sahada ardından bina altlarında bulunan 1:N optik bölücü (splitter) ile çoğullanıp yine fiber optik kablo ile dairede bulunan ONT (Optical Line Termination) cihazında nihayetlenir. ONT cihazından çıkan cat kablo ile HGW cihazı üzerinden son kullanıcılara 100 Mbps altı ve üstü hızlar sorunsuz verilir. Merkez ofisten çıkan fiber optik kablo içinde tek elyafın esnek bir şekilde optik bölücülerle çoklanması ve sahada enerjiye ihtiyaç duymaması FTTH (PON) uygulamalarını günümüz altyapıları içinde yaygın olarak tercih edilmesine sebep olur.

FTTH altyapılarının özel uygulamaları arasında FTTF, FTTO, FTTD gibi türler yer alır. Kısaca açıklanacak olursa:

FTTF (Fiber To the Factory, Fabrikaya Kadar Fiber), fiber optik kabloların bir fabrikaya kadar uzandığı bir durumu ifade eder. Bu, genellikle fabrikaların yüksek hızlı internet bağlantısına ihtiyaç duyduğu durumlarda kullanılır. FTTF, fabrikaların verimliliğini ve üretkenliğini arttırmak için genellikle otomasyon ve diğer ileri teknolojilerle birlikte kullanılır.

FTTO (Fiber To the Office, Ofise Kadar Fiber), fiber optik kabloların bir ofise kadar uzandığı bir durumu ifade eder. Bu, genellikle ofislerin yüksek hızlı internet bağlantısına ihtiyaç duyduğu durumlarda kullanılır. FTTO, ofislerin verimliliğini ve üretkenliğini arttırmak için genellikle bulut tabanlı hizmetler ve diğer ileri teknolojilerle birlikte kullanılır.

FTTD (Fiber To the Desk, Masaya Kadar Fiber), fiber optik kabloların bir masaya kadar uzandığı bir durumu ifade eder. Bu, genellikle bir ofis ortamında, fiber bağlantısının ana bilgisayar odasından bir kullanıcının masasına veya yakınındaki bir fiber medya dönüştürücüye kadar uzandığı durumlarda kullanılır. FTTD, kullanıcılara yüksek hızlı internet erişimi sağlar ve genellikle veri yoğun uygulamalar için idealdir.

4.2 FTTX Tekniğinin Avantajları ve Dezavantajları

FTTX tekniği, fiber optik kablo kullanımının bir dizi avantajını sunar. Fiber optik kablolar, geniş band aralığına sahip olmaları, düşük kayıp ve zayıflama değerleri, elektromagnetik bağışıklık özelliği, küçük boyutlu ve hafif olmaları gibi özelliklerinden dolayı, bakır kablolarla göre daha ekonomiktir. Fiber optik kablo imalatlarında daha az yeraltı kapasitesine ihtiyaç duyulması hem maliyet tasarrufu sağlar hem de yeraltı altyapısının karmaşıklığı azaltılır. Geniş bantlı servislerin uzak mesafelere iletilebilmesi, FTTX tekniğinin geniş bir coğrafi alana hizmet verebilme yeteneğine işarettir. Bu nedenle FTTX, özellikle kırsal veya uzak bölgelerde yaşayan kullanıcılar için oldukça önemli bir erişim tekniğidir.

FTTX tekniğinin işletmesi ve bakımı bakır şebekeye nazaran daha kolay olması, altyapıyı yöneten ve bakımını yapan şirketler için zaman ve kaynak tasarrufu sağlar. FTTX tekniğinin esnek ve özelleştirilebilir olması nedeniyle, belirli bir uygulama

veya hizmet için özel gereksinimlere göre de tasarlanabilir. Tesis işlemi hızlı ve kolay bir şekilde gerçekleştirilebilir, bu da hizmetin hızlı bir şekilde son kullanıcıya ulaştırılır. Daha az işgücü gerektirmesi, işgücü maliyetlerini düşürür ve verimliliği yükseltir.

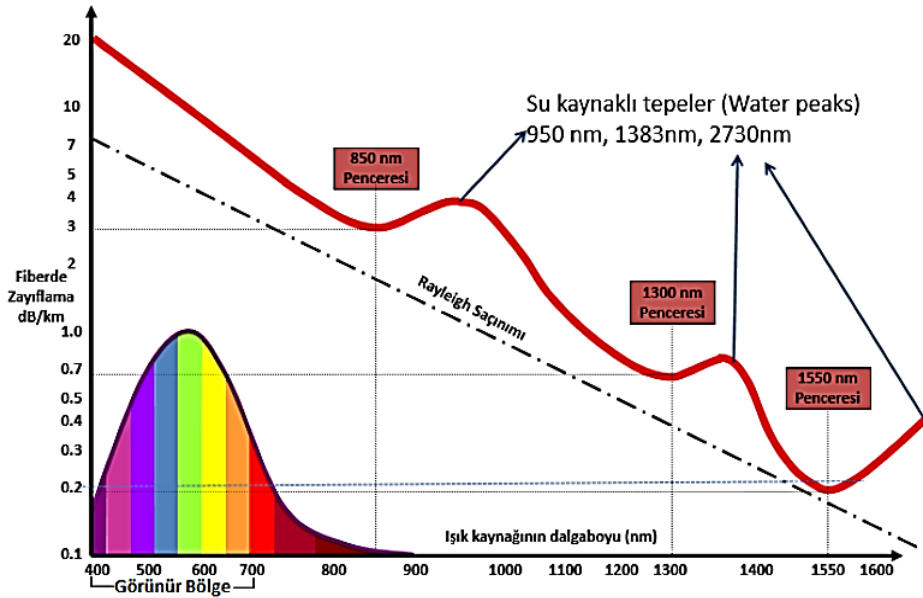
Müşteri memnuniyeti, FTTX tekniğinin bir başka önemli avantajıdır. Kaliteli ve güvenilir hizmet sunma yeteneği, müşteri sadakatini arttırarak marka itibarını güçlendirir. Daha uzun mesafelerdeki abonelere hizmet verilmesi yeteneğiyle, hizmet sahasının genişleterek daha fazla müşteriye ulaşılması amaçlanır. Böylece santral ve santral binaları sayıları azaltılır. Bu da maliyet tasarrufu ve daha az bakım avantajı anlamına gelir. Fiber optik kabloların, bakır kablolarla nazaran hurda değerinin çok düşük olması nedeniyle hırsızlık olaylarına karşı önemli bir çözüm olur. Yaşanabilecek hırsızlıkların bertaraf edilmesi altyapı güvenliğini ve hizmet sürekliliğini arttırır.

Bu tür avantajların yanında, FTTX tekniğinin bazı dezavantajları da söz konudur. Nitelikli işgücü gereksinimi, eğitim ve işe alım maliyetlerini yukarı çeker. Fiber tesisi için uygun saha bulma zorluğu, özellikle yoğun nüfuslu veya coğrafi olarak zorlu alanlarda bir sorun meydana getirir. Kırsal alanlardaki uzun süreli elektrik kesintilerinden etkilenmesi, hizmet sürekliliğini ve güvenilirliğini olumsuz etkileyebilir. Enerji yedekliliği açısından ihtiyaç duyulan aküler, ilave maliyet noktasıdır. Eskiden merkez ofis için tek bir enerji faturası çıkarken, artık FTTX tekniği ile çok daha fazla sayıda fatura çıkar ve bu fatura süreçlerinin takibi için ayrıca uygulama ihtiyacı ve işgücü maliyetleri olarak ortaya çıkar. Bakır, FTTC ve FTTB gibi uygulamalarda bina içi tesisat bina sahibi tarafından yapılırken, FTTH uygulamalarında fiberin son noktaya kadar çekilme gereksinimi şirketler açısından altyapı maliyetlerini yükseltir [1, 5].

5

OPTİK SİSTEM ELEMANLARININ KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak sistem elemanlarının ve dalga boyu, hız gibi temel parametrelerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak en iyi performanslı model tasarlanması amaçlanmıştır. Karşılaştırmalar vericiden başlayarak, iletim ortamına ve alıcıya doğru yapılmıştır. Merkez ofiste bulunan verici için veri üretici, lazer, darbe üretici ve modülatör karşılaştırmaları yapılmıştır. İletim ortamında; fiber optik kablo, optik bölücü ve kuvvetlendirici çeşitleri ele alınmıştır. Alıcı kısımda ise fotodedektör ve filtre analizleri yapılmıştır. Tasarlanan modelin performansını yükseltmek ve sinyal kalitesini arttırmak için sistem elemanları eklenerek analizler detaylandırılmıştır.

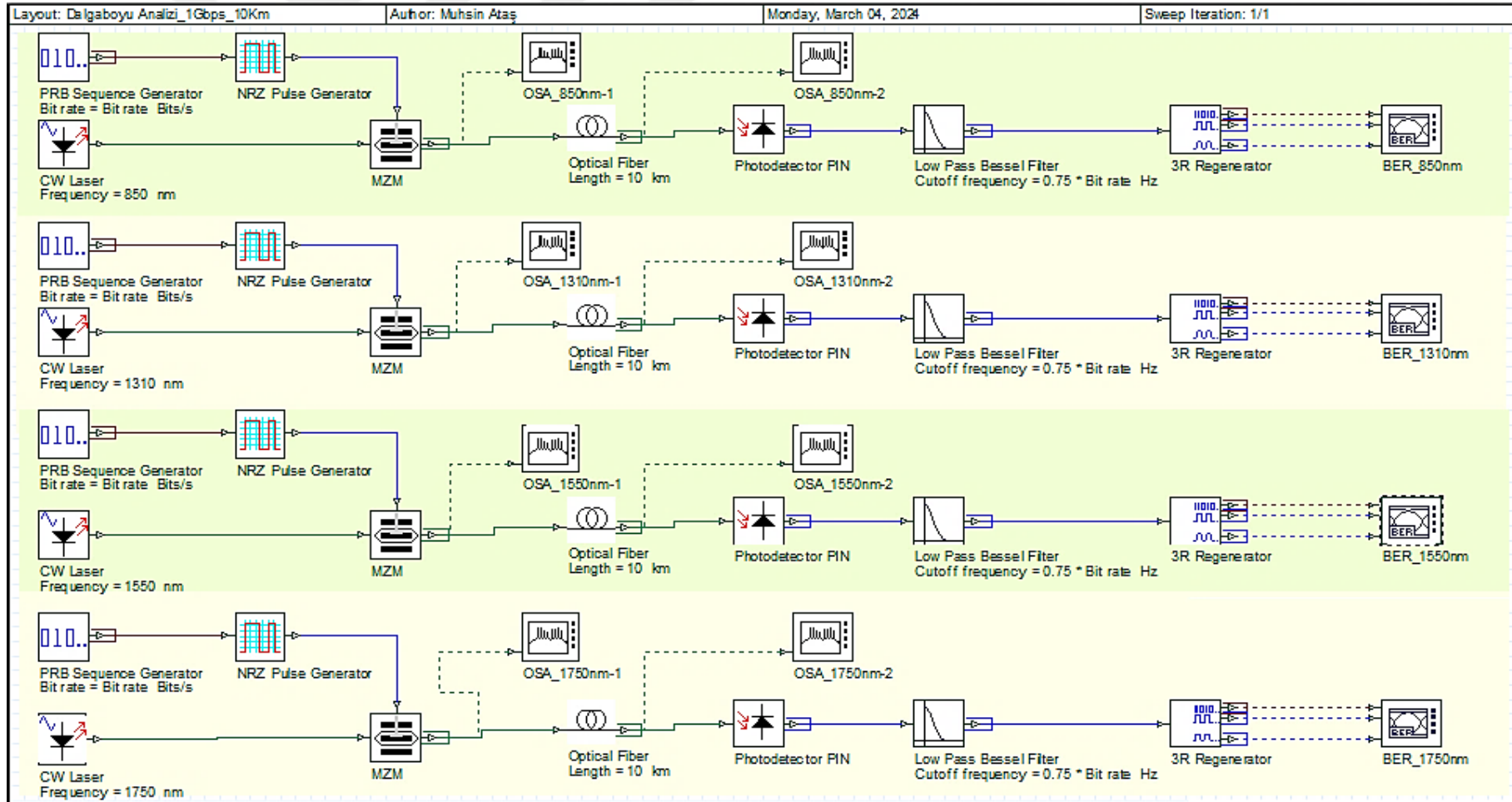


Şekil 5.1 Fiber optik veri iletiminde kullanılan dalga boyları ve zayıflama değerleri [6].

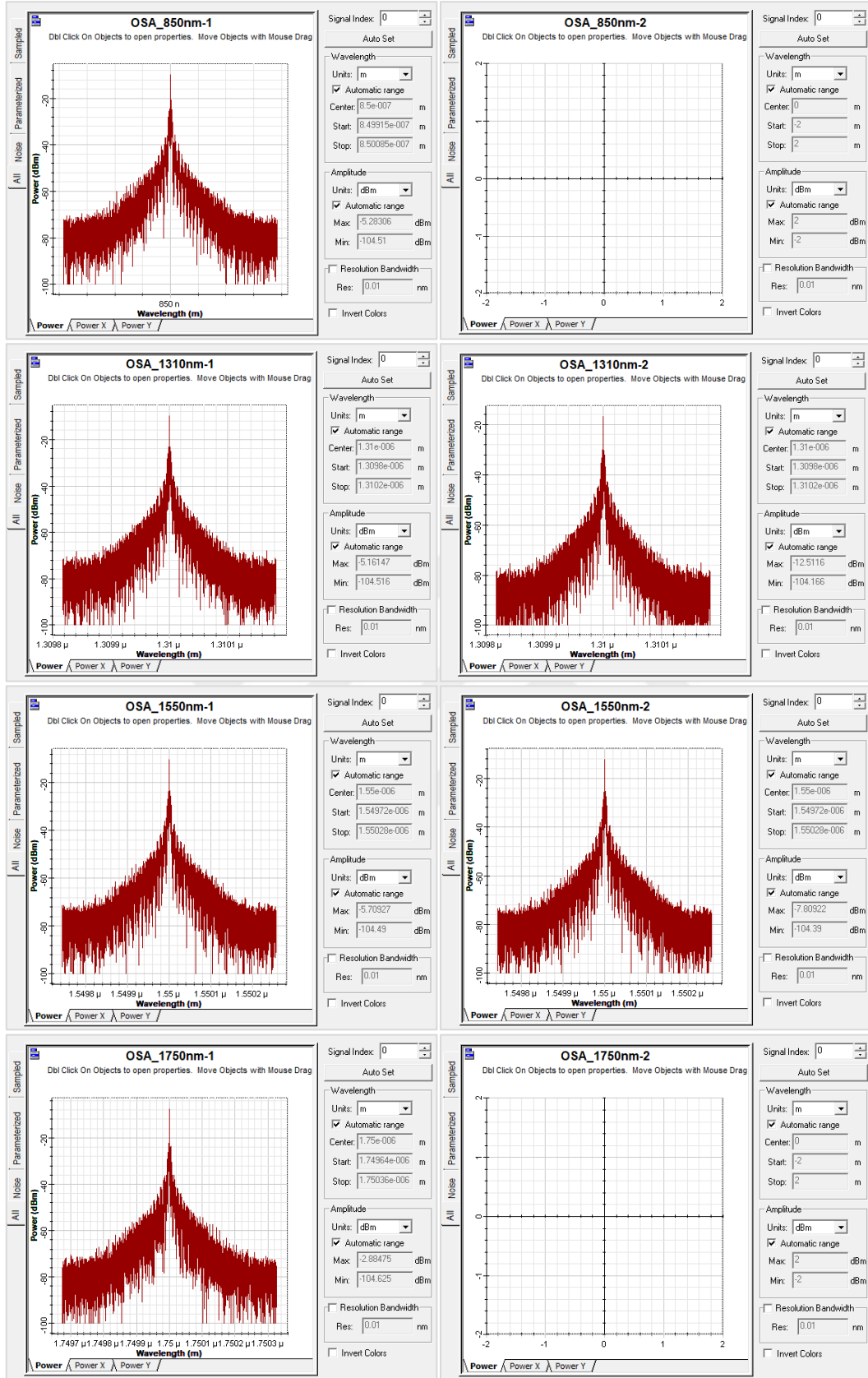
5.1 Dalga Boylarının Karşılaştırılması

FTTX uygulamalarında taşıyıcı olarak ışık sinyali kullanılır ve fiber optik kablo içinde ışığın taşınmasındaki en büyük avantaj zayıflamaların oldukça düşük olmasıdır. Bu sebeple de veri sinyalleri çok uzak mesafelere gönderilebilmektedir. Fiber optik kablo içinde iletilen sinyaller incelendiğinde bu düşük kayıpların her dalga boyu için geçerli olmadığı belirlenmiştir. Şekil 5.1’de fiber optik kabloya ait elektromagnetik spektrum yer almaktadır. Burada su kaynaklı tepeler (water peaks) zayıflama değerlerini arttırarak spektrumu pencerelere bölmüştür. İlk olarak 800-900 nm penceresi fiber optik kablolarda iletim dalga boyu olarak kullanılmıştır. Birince pencere bölgesi olarak ifade edilen bu bölgede zayıflama yaklaşık 3 dB/km değerindedir. Kısa mesafe ve düşük hızlar için kullanılan birinci bölge zamanla teknolojinin de gelişmesiyle yerini 1150-1330 nm ve 1400-1600 nm bölgelerine bırakmıştır. Bu bölgeler ikinci ve üçüncü pencere bölgeleri olarak belirlenmiştir. İkinci pencere bölgesinde zayıflamalar 0,7 dB/km’ye kadar düşmüşken, üçüncü pencere bölgesinde bu değer 0,2 dB/km gibi çok daha düşük seviyelere ulaşmaktadır.

Şekil 5.2’de tasarlanan referans düzenek ile pencere bölgelerinden seçilen 850 nm, 1310 nm, 1550 nm ve 1750 nm dalga boylarına ait performansların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Verici kısmında PRB (Pseudo Random Binary, Sözcük Rastgele İkili) dizi üreticisi olarak 1 Gbps hızında, darbe üreticisi (pulse generator) olarak NRZ (Non Return to Zero, Sıfıra Dönüşsüz) darbe üreticisi, modülatör olarak MZM (Mach-Zehnder Modulator, Mach-Zehnder Modülatörü) ve lazer olarak CWL (Continuous Wave Laser, Sürekli Dalga Lazeri) kullanılmıştır. Lazer dalga boyları 850 nm, 1310 nm, 1550 nm ve 1750 nm seçilerek 10 km’lik tek modlu fiber optik kablo iletim ortamından alıcı kısmına iletilmiştir. Her bir dalga boyu için modüle edilen sinyalleri karşılaştırmak için MZM çıkışlarına ve iletilen sinyaller için 10 km’lik fiber optik kablo çıkışlarına OSA (Optical Spectrum Analyser, Optik Spektrum Analizörü) kurularak karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca alıcı kısmında bulunan PIN fotodedektör ve alçak geçiren Bessel filtreden sonra sinyallerin BER (Bit Error Rate, Bit Hata Oranı) sonuçları ve maksimum kalite faktörleri (Q) karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.2 Dalga boyu analizine ait referans düzenek.

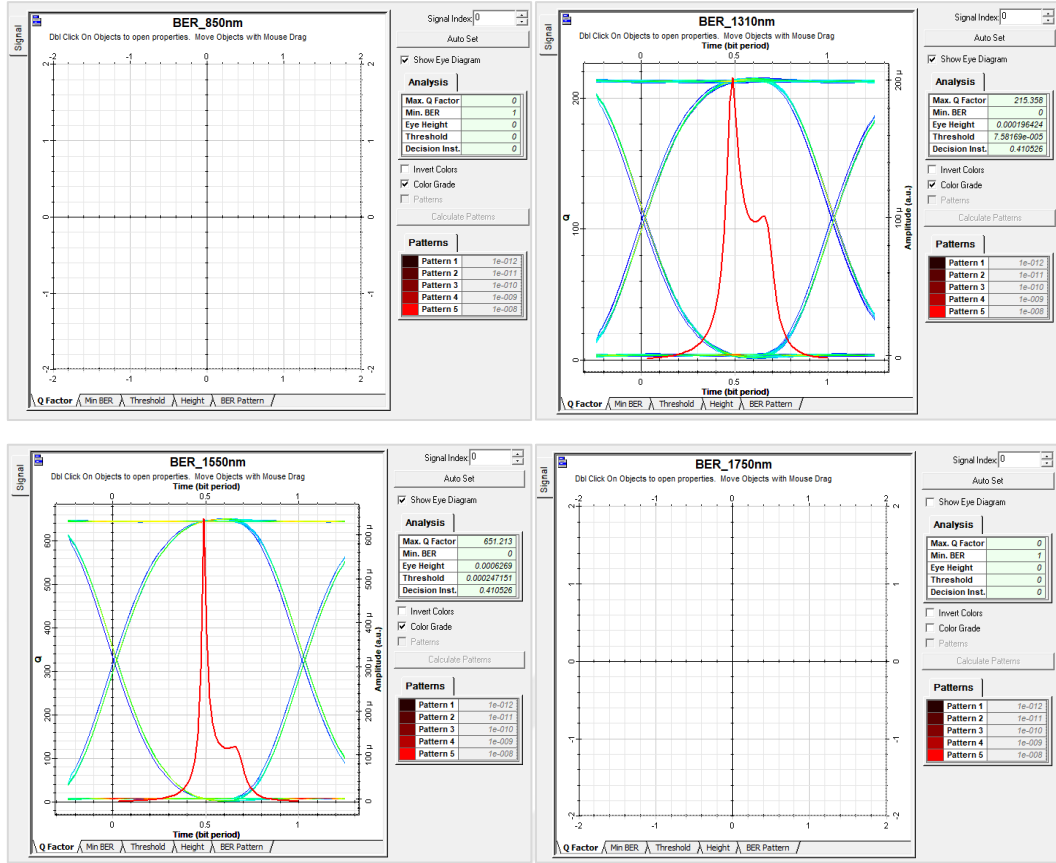


Şekil 5.3 850 nm, 1310 nm, 1550 nm ve 1750 nm için MZM (sağ sütun) ve fiber optik kablo (sol sütun) çıkışlarına ait OSA sonuçları.

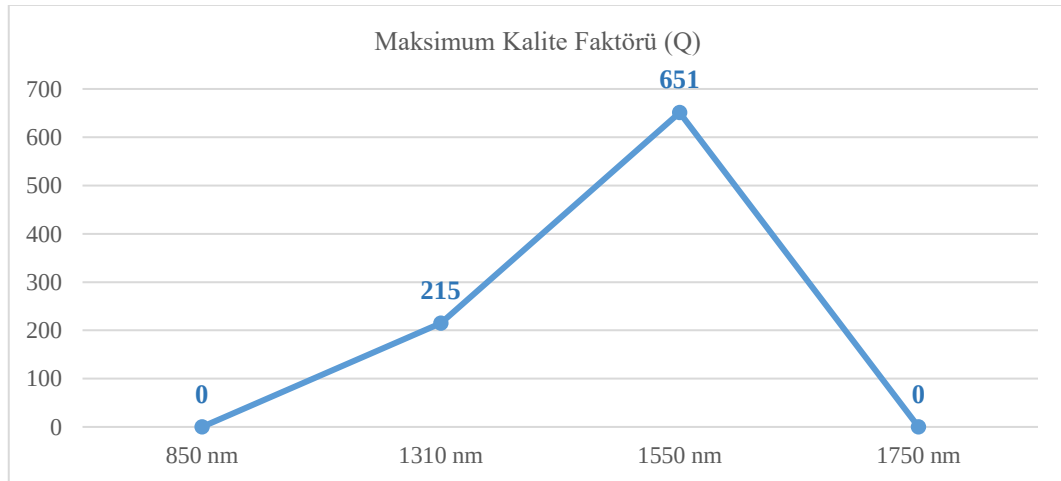
Dalga boyu karşılaştırma referans düzeneğinde yer alan MZM ve fiber optik kablo çıkışlarına bağlanan OSA sonuçları Şekil 5.3'te bulunmaktadır. 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için modülatör çıkışındaki sinyal 10 km'lik tek modlu fiber optik kablo üzerinden iletilemediği görülmektedir. 1310 nm ve 1550 nm dalgaboyları için 10 km'lik tek modlu fiber optik kablo üzerinden sinyalin iletildiği belirlenmiştir.

Alıcı kısmında yer alan BER analizörü sonuçları Şekil 5.4'te verilmiştir ve maksimum kalite faktörüne (Q) ait grafik de Şekil 5.5'te yer almaktadır. BER analizörü sonuçlarında elde edilen göz diyagramları incelendiğinde, 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için göz diyagramlarının oluşmadığı ve maksimum kalite faktörünün 0 (sıfır) olduğu belirlenmiştir. 1310 nm dalga boyu için göz açıklığının net olduğu ve maksimum kalite faktörünün 215 olduğu, 1550 nm dalga boyu için de göz açıklığının net olduğu ve maksimum kalite faktörünün 651 olduğu görülmektedir. İncelenen dalga boylarına ait sonuçlar değerlendirildiğinde, 1550 nm dalga boyunun uzun mesafe için tek modlu fiber optik kablolarda en iyi performansı sağladığı belirlenmiştir. Referans olarak tasarlanan ve Şekil 5.2'de verilen düzeneğe 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için 10 km'lik tek modlu fiber optik kablodan sinyal iletimi sağlanamaması üzerine sırasıyla 5 km, 3 km ve 1 km uzunluklarında fiber optik kablo uygulanmıştır. Sonuç olarak, 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için tek modlu fiber optik kablo ile veri iletiminin sağlanamayacağı tespit edilmiştir.

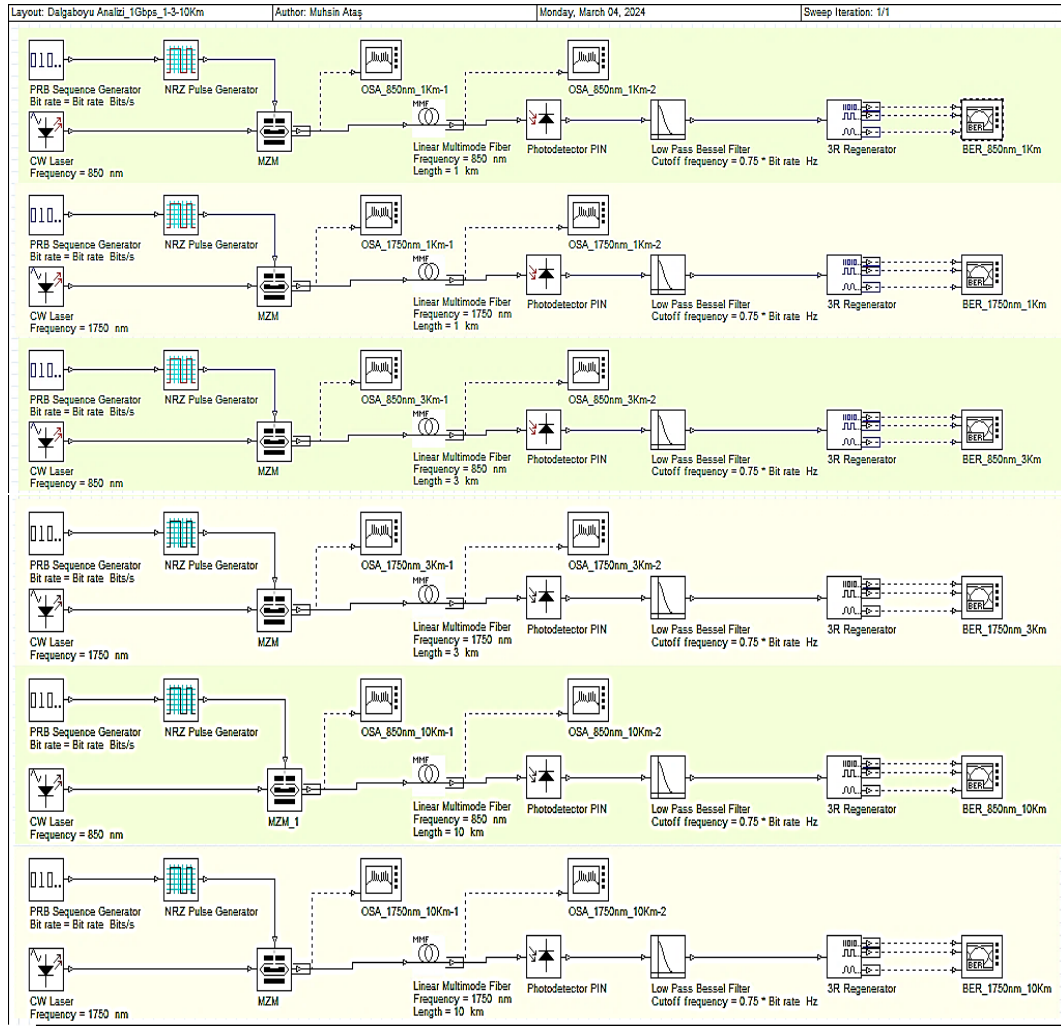
Tek modlu fiber optik kablo yerine çok modlu fiber optik kablo kullanılarak Şekil 5.6'daki referans düzeneğe tasarlanmıştır. Tasarlanan bu düzeneğe ile 850 nm ve 1750 nm dalga boylarının 1 km, 3 km ve 10 km uzunluklarındaki çok modlu fiber optik kablo için sonuçların incelenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 5.4 850 nm, 1310 nm, 1550 ve 1750 nm için BER analizörü sonuçları.

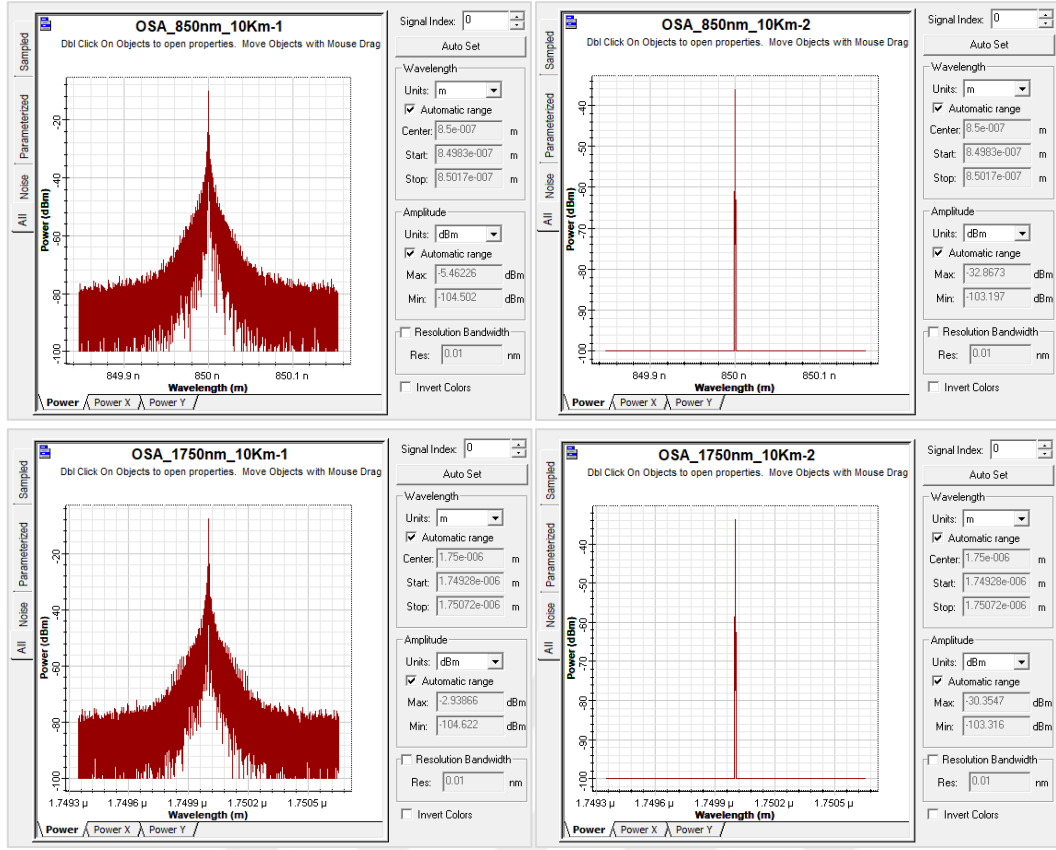


Şekil 5.5 850 nm, 1310 nm, 1550 ve 1750 nm için maksimum kalite faktörü grafiği.



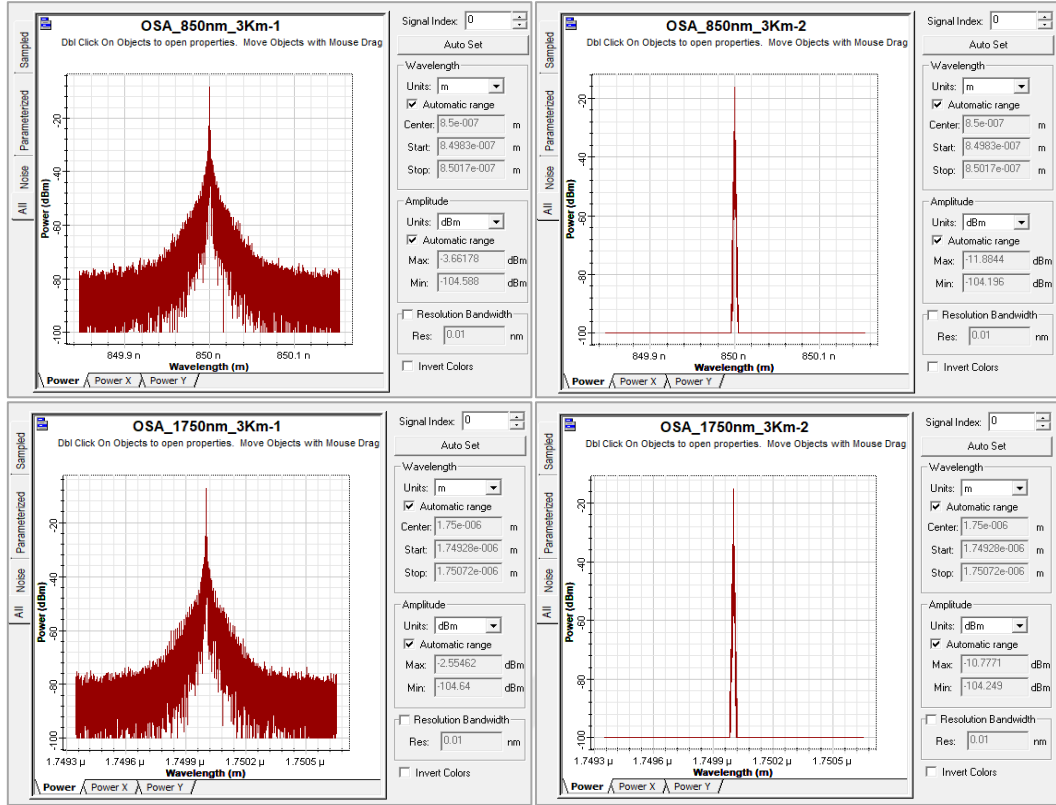
Şekil 5.6 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için çok modlu fiber optik kablo ile tasarlanan düzenek.

Tasarlanan düzenekte 10 km’lik tek modlu fiber optik kablo yerine her iki dalga boyu için ayrı ayrı 1 km, 3 km ve 10 km’lik çok modlu fiber optik kablo kullanılmıştır. Bir önceki analizde olduğu gibi yine MZM ve fiber optik kablo çıkışlarına bağlanan OSA’larla modüle edilen sinyalin iletilmesi incelenmiştir. Ayrıca alıcı kısmında bulunan PIN fotodedektör ve alçak geçiren Bessel filtreden sonra sinyallerin BER analizörü sonuçları ve maksimum kalite faktörleri (Q) karşılaştırılmıştır.

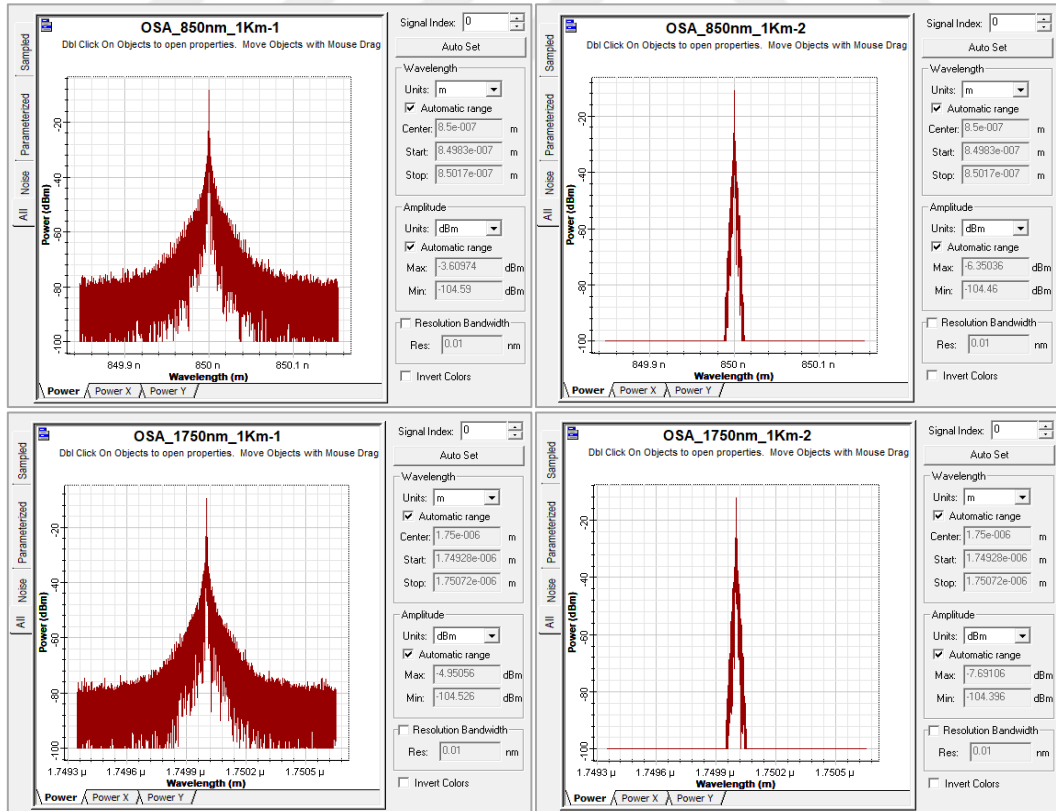


Şekil 5.7 10 km’lik çok modlu fiber optik kablo için OSA sonuçları.

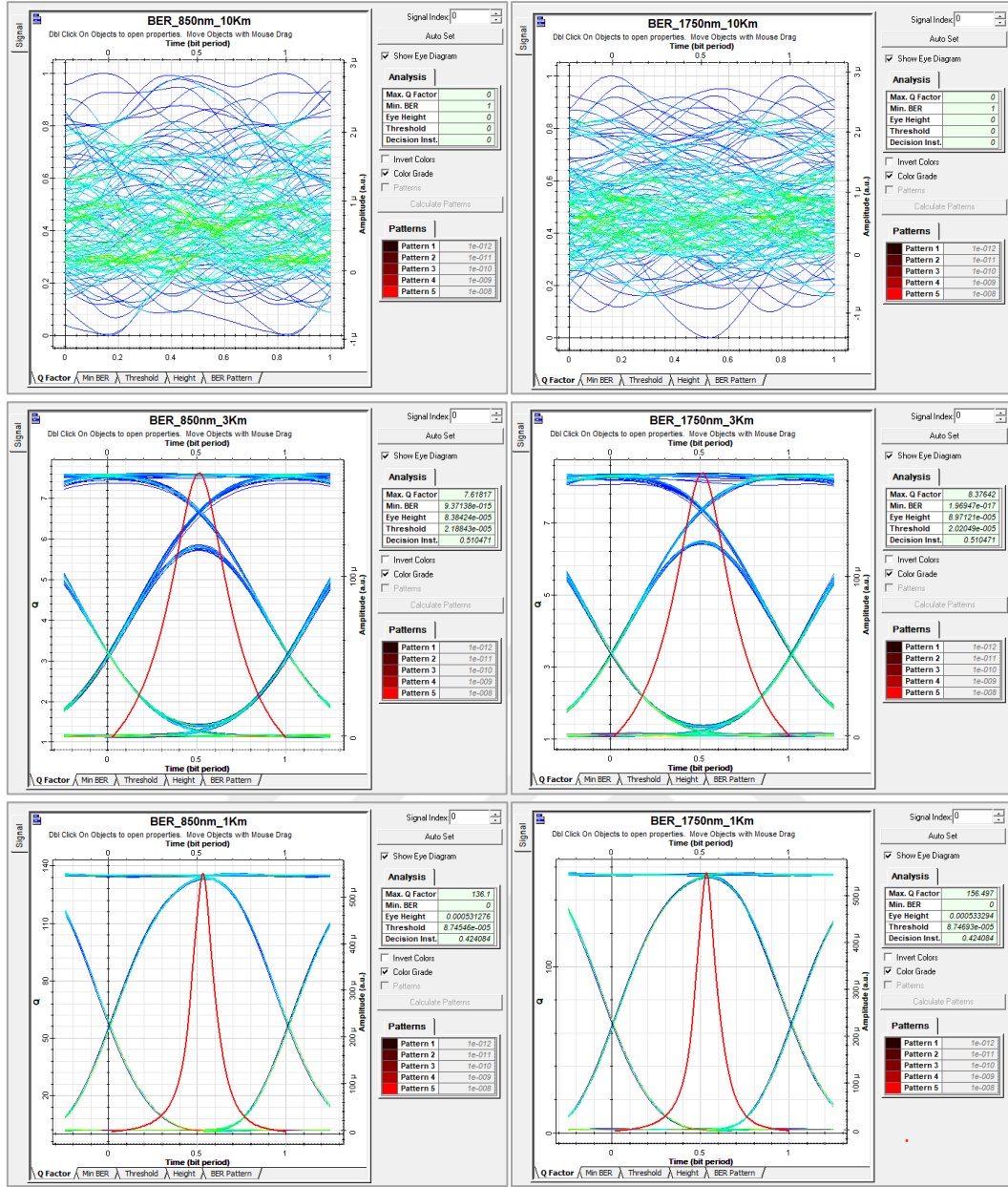
İlk olarak 10 km’lik çok modlu fiber optik kablo kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Şekil 5.3’teki sonuca göre az da olsa sinyal iletiminin olduğu görülsede Şekil 5.10’da verilen BER analizörü sonuçları analiz edildiğinde bu sinyalin yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısı çok modlu fiberlerin kısa mesafelerde kullanıldığı bilgisine istinaden kablo uzunluğu 3 km olacak şekilde inceleme yapılmıştır. Şekil 5.8’deki OSA sonuçlarında sinyalin belirginleşmeye başladığı görülmektedir ve son olarak 1 km’lik çok modlu fiber optik kablo kullanılarak 850 nm ve 1750 nm dalga boylarının modüle edilmiş sinyal iletimi incelenmiştir. Şekil 5.9’daki OSA sonuçlarına bakıldığında sinyalin daha da belirginleştiği izlenmektedir.



Şekil 5.8 3 km’lik çok modlu fiber optik kablo için OSA sonuçları.



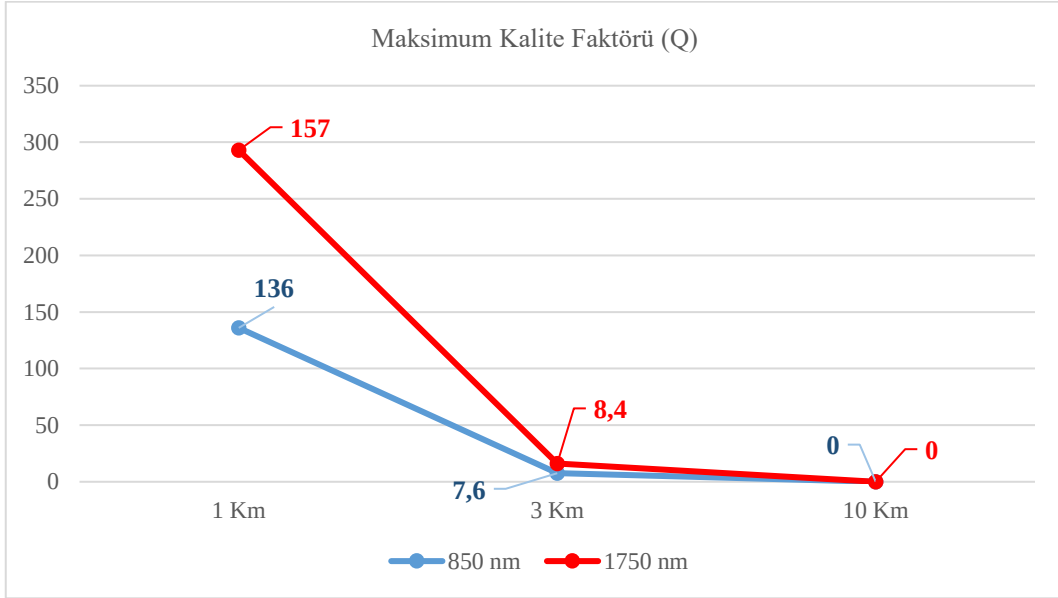
Şekil 5.9 1 km’lik çok modlu fiber optik kablo için OSA sonuçları.



Şekil 5.10 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için 10 km (üstte), 3 km (ortada) ve 1 km (altta) çok modlu fiber optik kablo BER analizörü sonuçları.

Şekil 5.10'da bulunan BER analizörü sonuçlarında ve Şekil 5.11'de yer alan maksimum kalite faktörü grafiğinde 10 km'lik çok modlu fiber optik kablo için hem 850 nm hem de 1750 nm dalga boylarında bir göz açıklığının oluşmadığı, maksimum kalite faktörü değerinin 0 olduğu ve dolayısı ile sinyal iletiminin olmadığı görülmektedir. Kablo mesafesi kısaldıkça BER analizörü sonuçlarındaki göz açıklığının giderek belirginleştiği ve 3 km'lik mesafede göz diyagramının belirginleşmeye başladığı belirlenmiştir. Maksimum kalite faktörü 850 nm dalga boyu için 7,6 iken 1750 nm dalga boyu için yakın bir değer olan 8,4'e yükselmiştir.

Daha kısa mesafe olan 1 km’lik çok modlu fiber optik kablo incelendiğinde hem 850 nm hem de 1750 nm için BER analizörü sonuçlarındaki göz açıklığının netleştiği, maksimum kalite faktörünün de yükseldiği görülmektedir. Maksimum kalite faktörü değeri 1750 nm için 157 olurken, 850 nm için 136 olarak elde edilmiştir. 1550 nm dalga boyundaki 10 km’lik tek modlu fiber optik kablonun maksimum kalite faktörü olan 651 ile karşılaştırıldığında bu değerler oldukça düşük kalmaktadır.

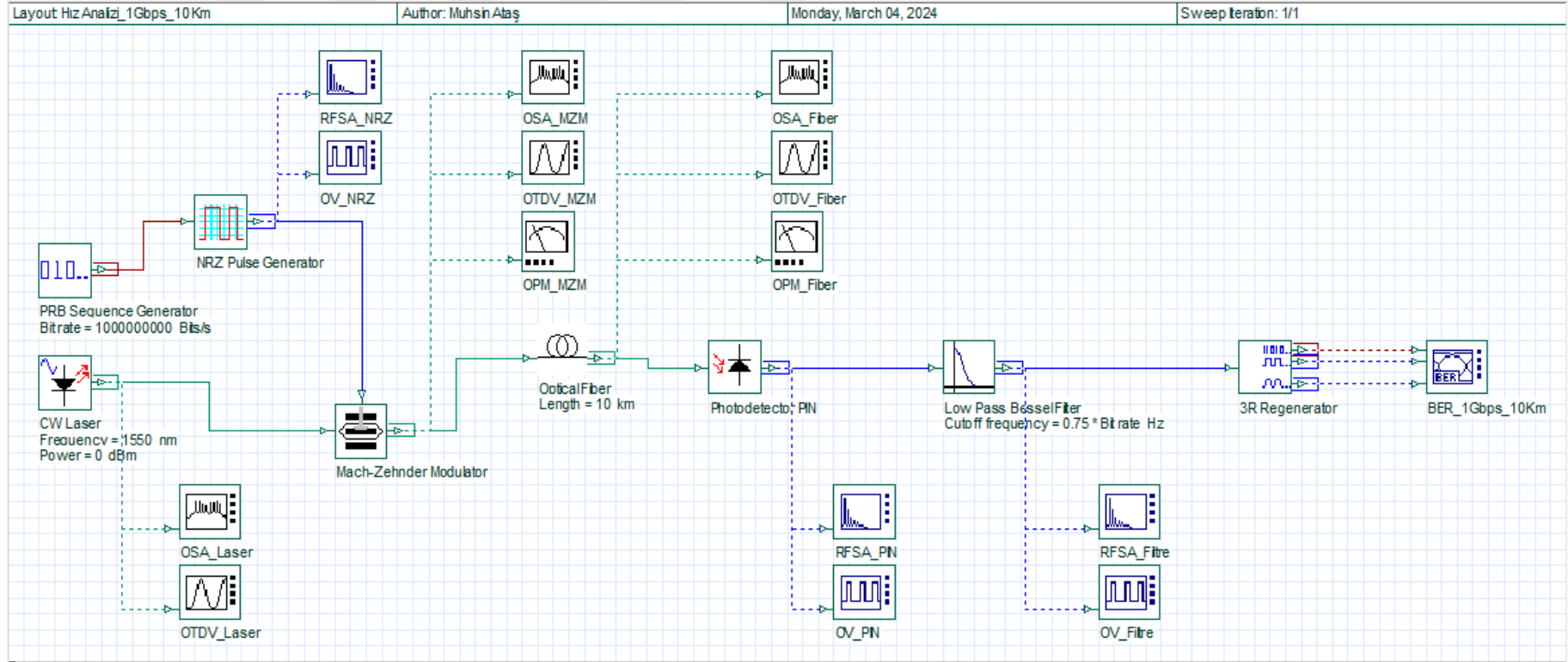


Şekil 5.11 850 nm ve 1750 nm dalga boyları için çok modlu fiber optik kabloya ait maksimum kalite faktörü grafiği.

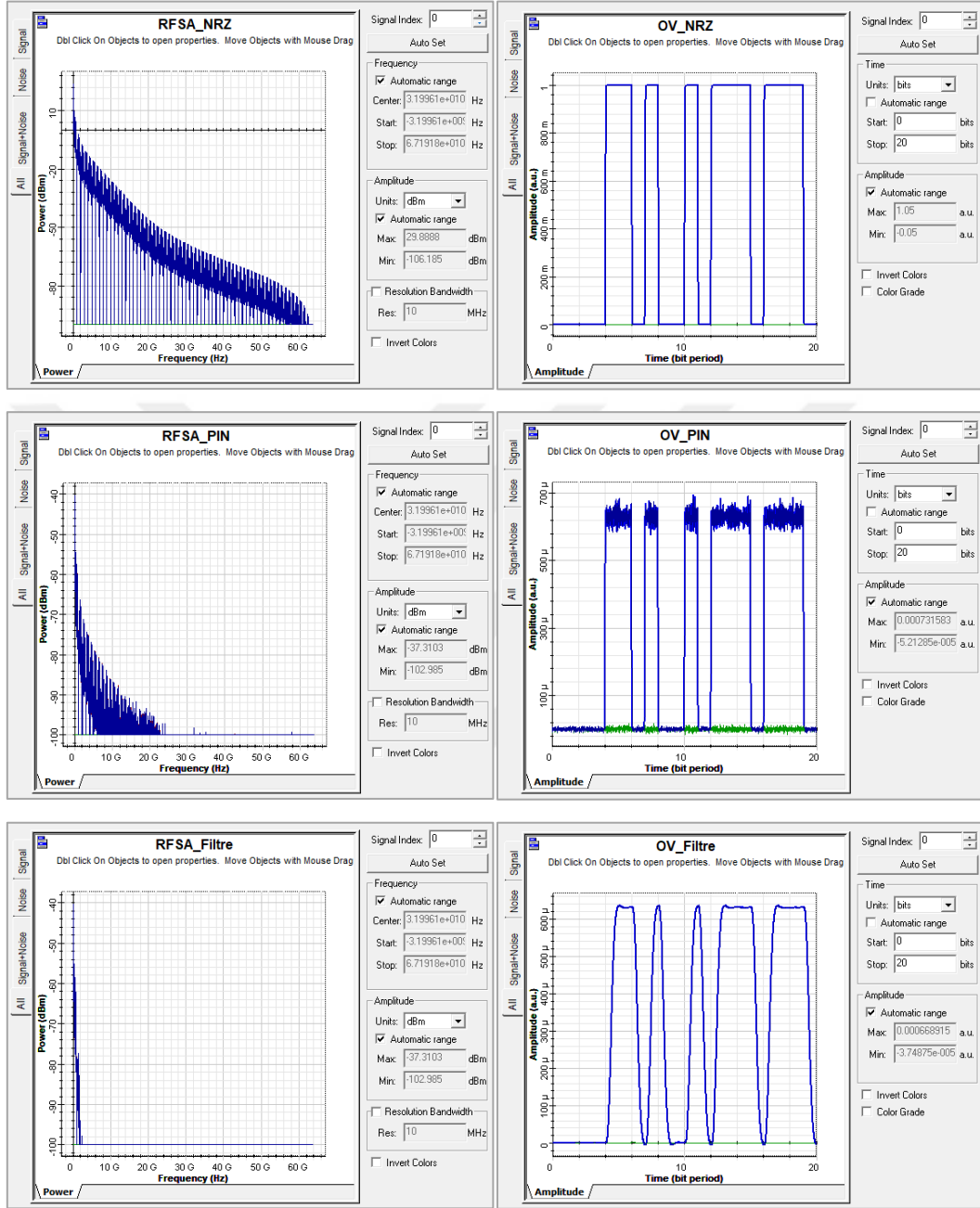
Sonuç olarak dalga boyları için yapılan tüm incelemeler göz önüne alındığında en iyi sonucun 1550 nm tek modlu fiber optik kablo ile elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 5.11’de görüldüğü gibi mesafe arttıkça sinyal kalitesinde dolayısıyla maksimum kalite faktörü değerinde düşmeler olduğu belirlenmiştir.

5.2 Bit Hızlarının Karşılaştırılması

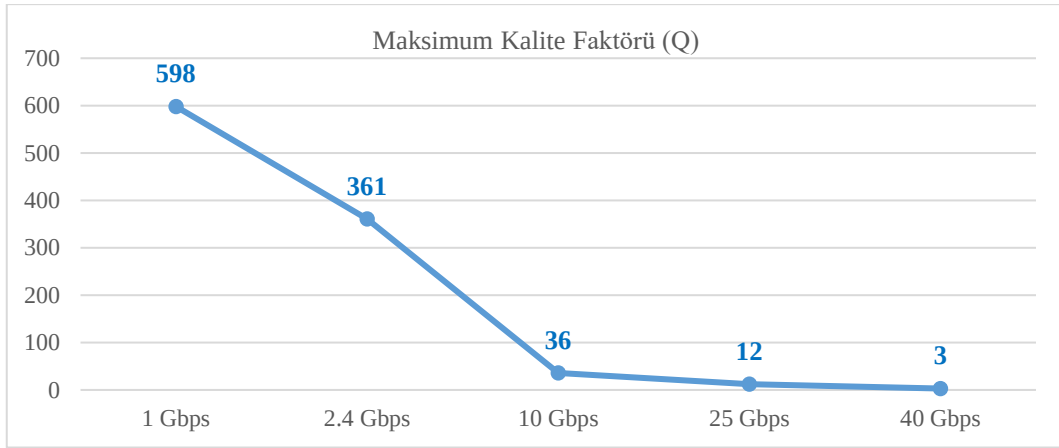
Günümüzde kullanılan iletim hatlarında kapasite ve hız vazgeçilmez en temel fonksiyon olarak karşımıza çıkmaktadır. Teoride fiber optik kabloların sonsuz kapasitede olduğu kabul edilse de mesafe ve sistem parametreleri nedeniyle hızın sistem performansına etkileri söz konusu olmaktadır. OptiSystem 7.0 simülasyon programında hızların uygulanma arayüzü Şekil 5.12’de gösterilmektedir. PRB dizi üreticisi üzerinde sağ tıklanarak özellikler menüsünden bit hızı değeri düzenlenebilir.



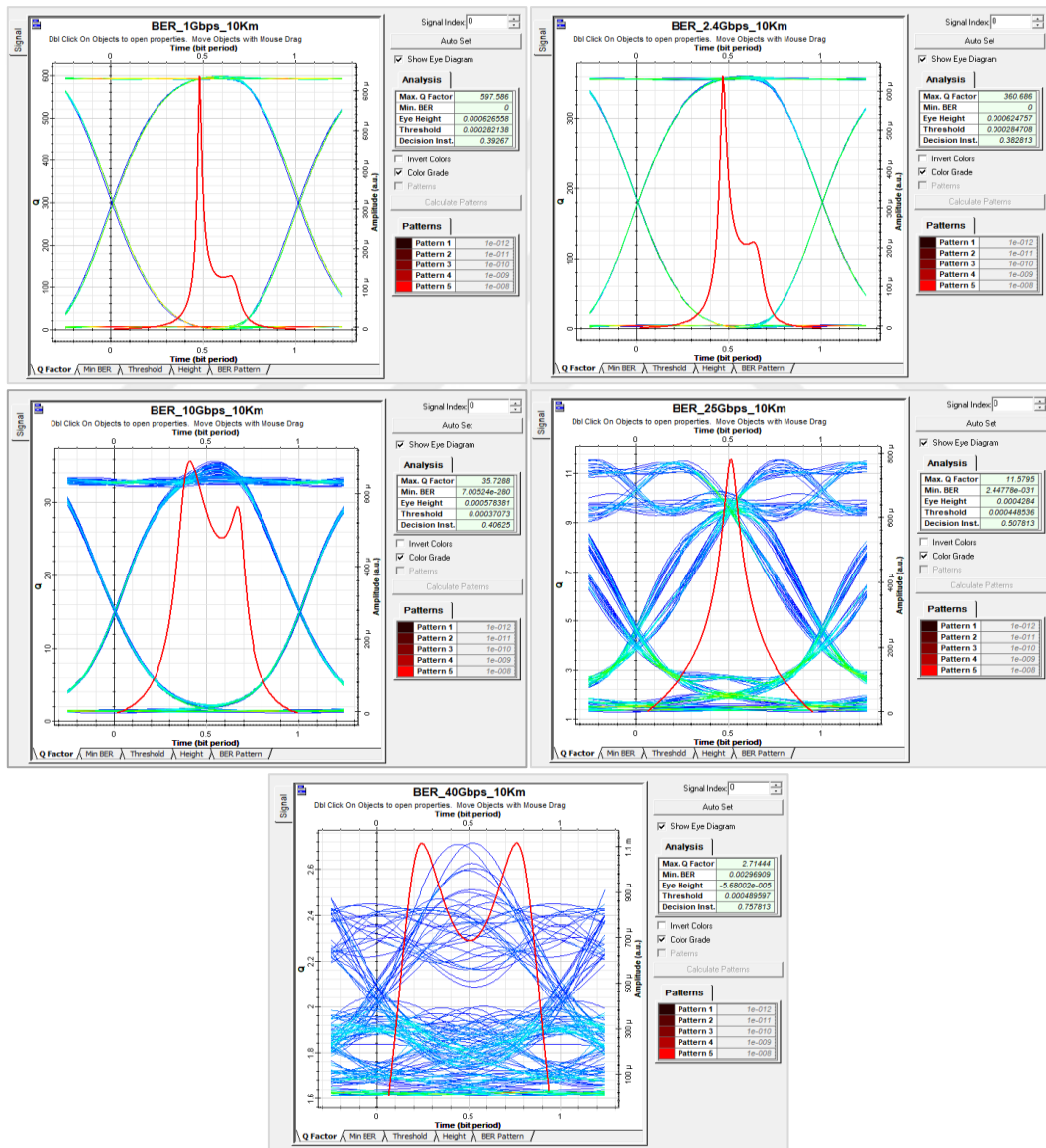
Şekil 5.13 Farklı bit hızlarının uygulanması için tasarlanan referans düzenek.



Şekil 5.14 1 Gbps bit hızı için MZM, PIN ve filtre çıkışlarının frekans ve zaman domeni analizleri.



Şekil 5.15 Hız değerlerine göre maksimum kalite faktörünün değişim grafiği.



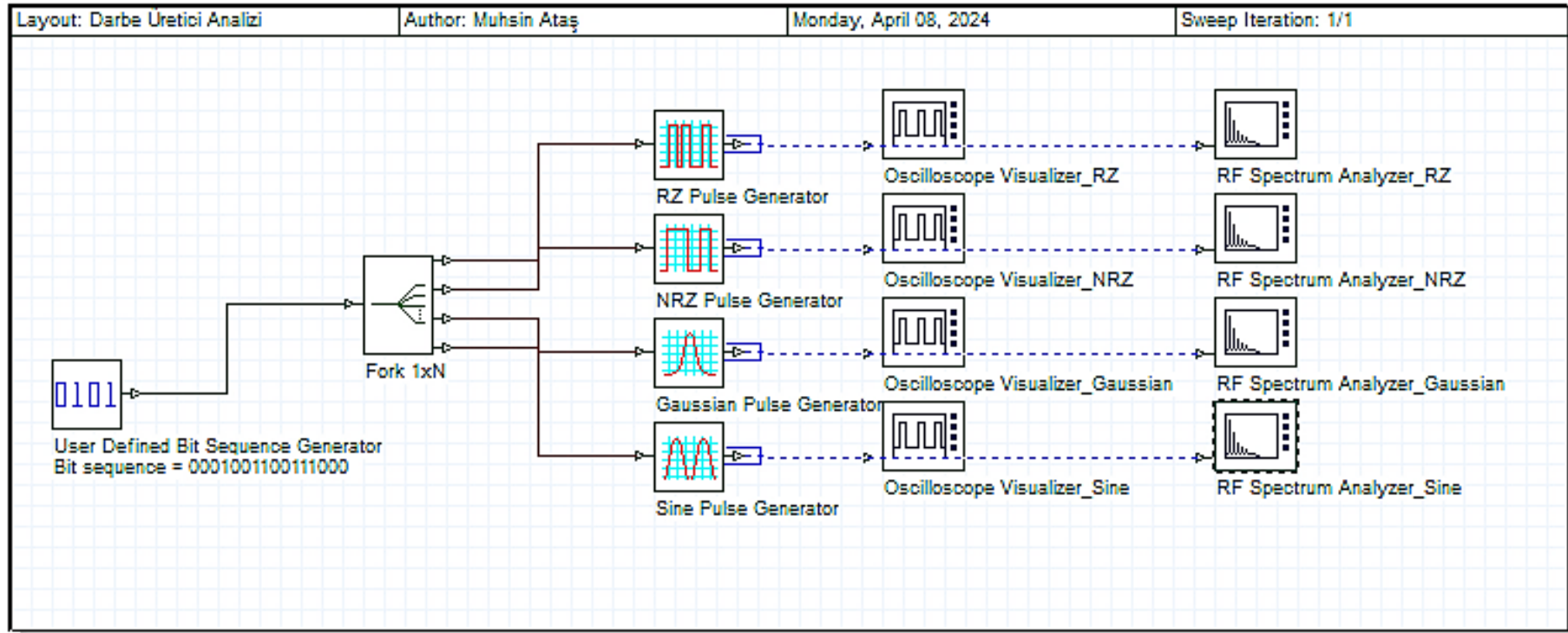
Şekil 5.16 Hız değerlerine göre BER analizörü sonuçları.

Maksimum kalite faktörü grafiği ve BER analizörü sonuçları incelendiğinde; 1 Gbps hız için maksimum kalite faktörü 598 olup göz diyagramı açıklığının net olduğu, 2,4 Gbps hız için maksimum kalite faktörü 361 olup yine göz diyagramının net olduğu belirlenmiştir. 10 Gbps hız için maksimum kalite faktörü 36'ya düşerken göz diyagramında hafif bozulmalar görülmektedir. 25 Gbps hız için maksimum kalite faktörü 12'ye inerken göz diyagramını gözle görülür bir şekilde bozulduğu gözlemlenmektedir. 40 Gbps hız için maksimum kalite faktörü 3'e düşerken göz diyagramının iyice bozulduğu belirlenmiştir. RFSA, OV ve BER analizörü sonuçları ve maksimum kalite faktörü değerleri incelendiğinde elde edilen sinyalin hız arttıkça bozulduğu, maksimum kalite faktörü değerinin de düştüğü belirlenmiştir.

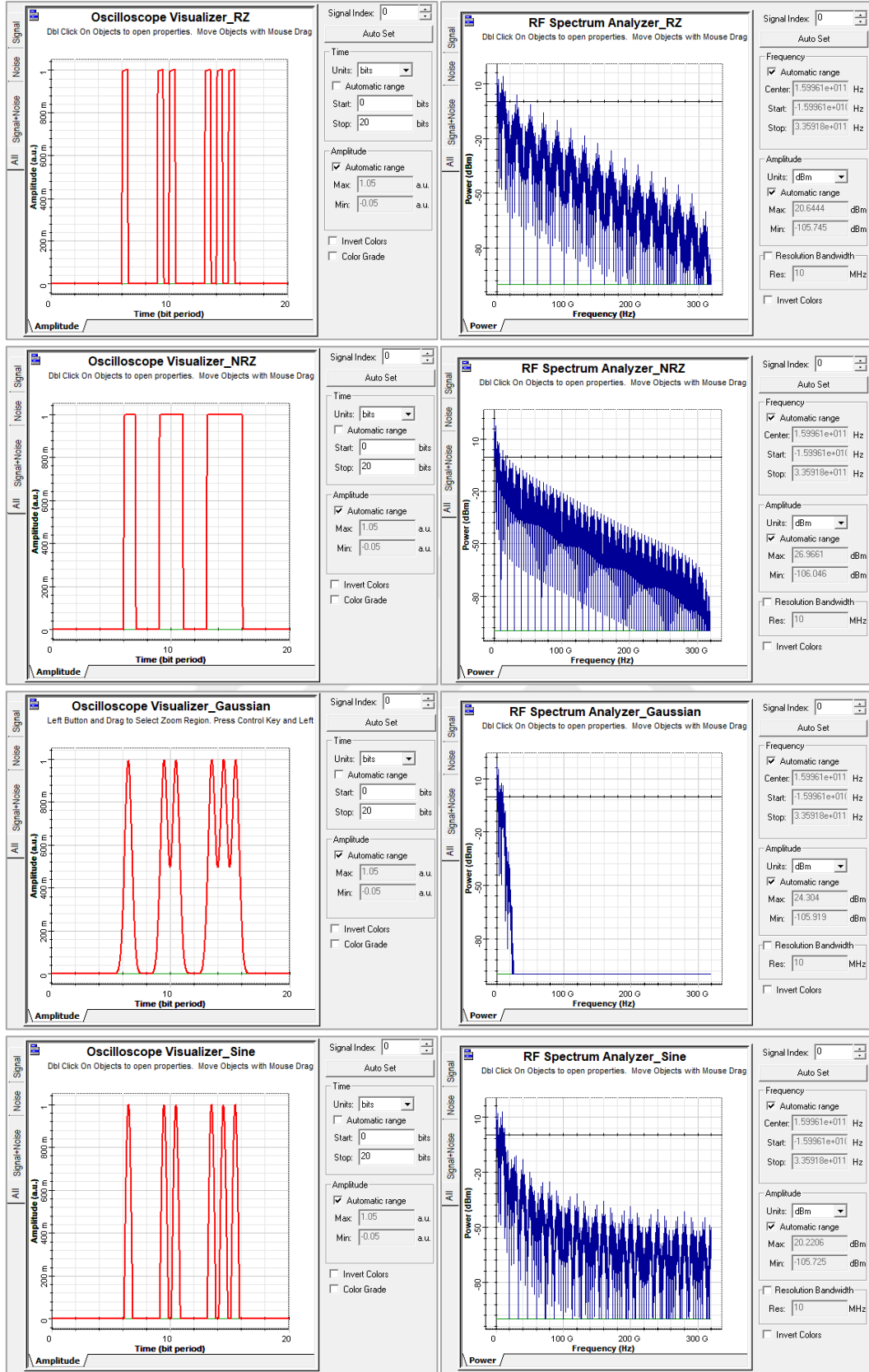
5.3 Darbe Üreticilerin Karşılaştırılması

Darbe üreticileri, dizi üreticisi tarafından üretilen bitleri modülatöre elektriksel darbeler şeklinde ileten sistem elemanlarıdır. Darbelerin dalga şekline, sıfıra dönüp dönmemelerine göre darbe üreticilerinin çeşitli türleri bulunmaktadır. Karşılaştırma düzeneğinde kullanılacak RZ (Return Zero, Sıfıra Dönüslü), NRZ (Non Return Zero, Sıfıra Dönüşsüz), Gaussian ve Sine (sinüs dalga) darbe üreticilerinin çıkış sinyallerini incelemek amacıyla Şekil 5.17'de bulunan düzenek tasarlanmıştır. Tasarlanan düzenekte UDB (User Defined Bit, Kullanıcı Tanımlı Bit) dizi üreticisi çıkışına sinyali bölmek amacıyla fork (çatal) yapısı eklenerek çıkışlarına RZ, NRZ, Gaussian ve Sine Pulse Generator (darbe üreticisi) kullanılmıştır. Her bir darbe üretişinin çıkış sinyalini analiz edebilmek için ayrı ayrı OV ve RFSA kurulmuştur.

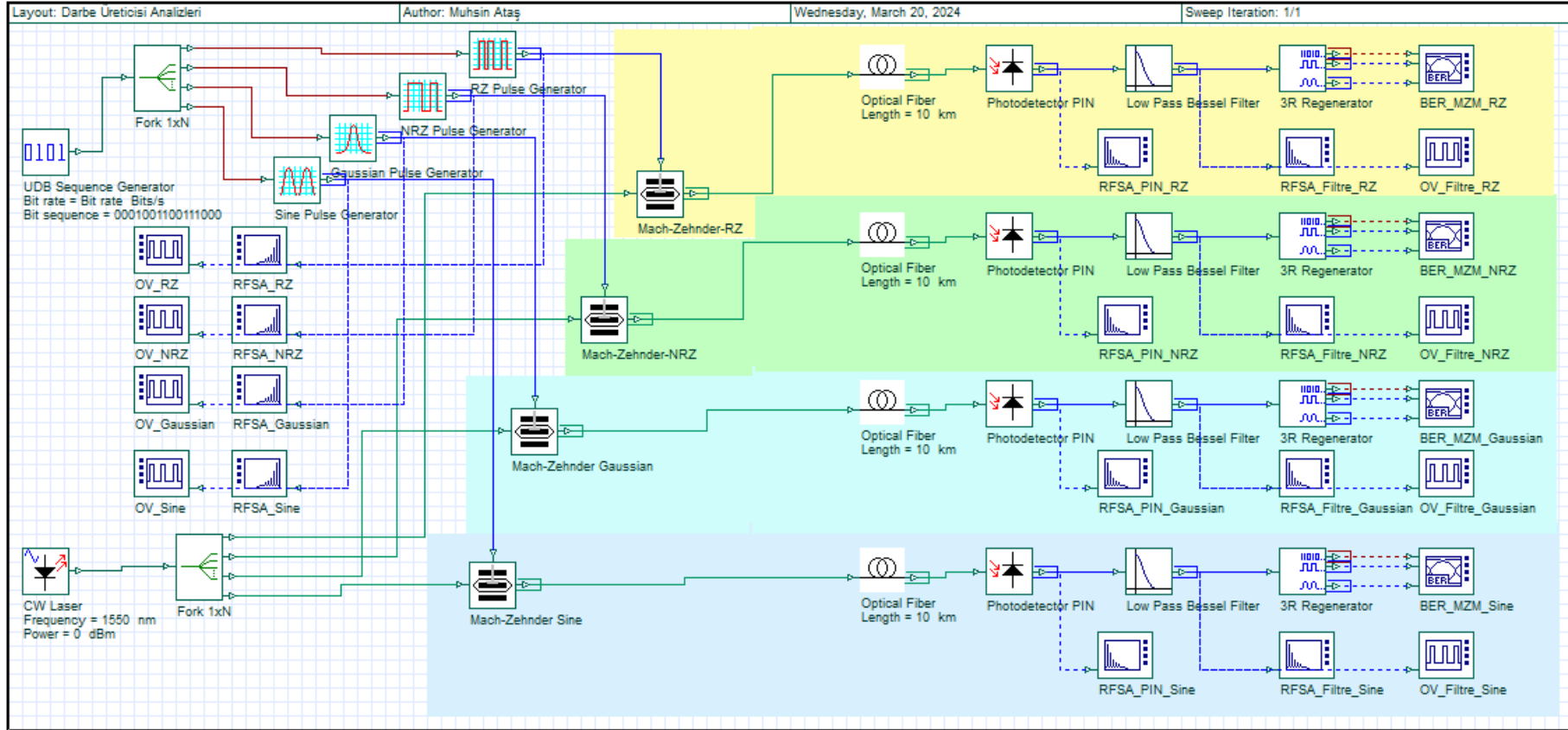
UDB dizi üreticisine "0001001100111000" dizisi tanımlanarak RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerinden Şekil 5.18'de yer alan OV ve RFSA görüntüleri elde edilmiştir. RZ darbe üreticisinde her bir "1" için gerilim tekrar sıfıra dönerken, NRZ darbe üreticinde birbirini takip eden "1" değeri için sıfıra düşmemektedir. Gaussian darbe üreticisinde her "1" darbesi gauss dağılımlı iken, sine darbe üreticisinde yarım sinüs dalga şeklinde olmaktadır. Darbe üreticilerinin çıkışlarındaki sinyal incelendikten sonra darbe üreticilerinin birbiriyle kıyaslanabilmesi için Şekil 5.19'da bulunan referans düzenek tasarlanmıştır. Her bir darbe üreticisi çıkışı MZM modülatörü, 10 km'lik fiber optik kablo, PIN fotodedektör ve alçak geçiren Bessel



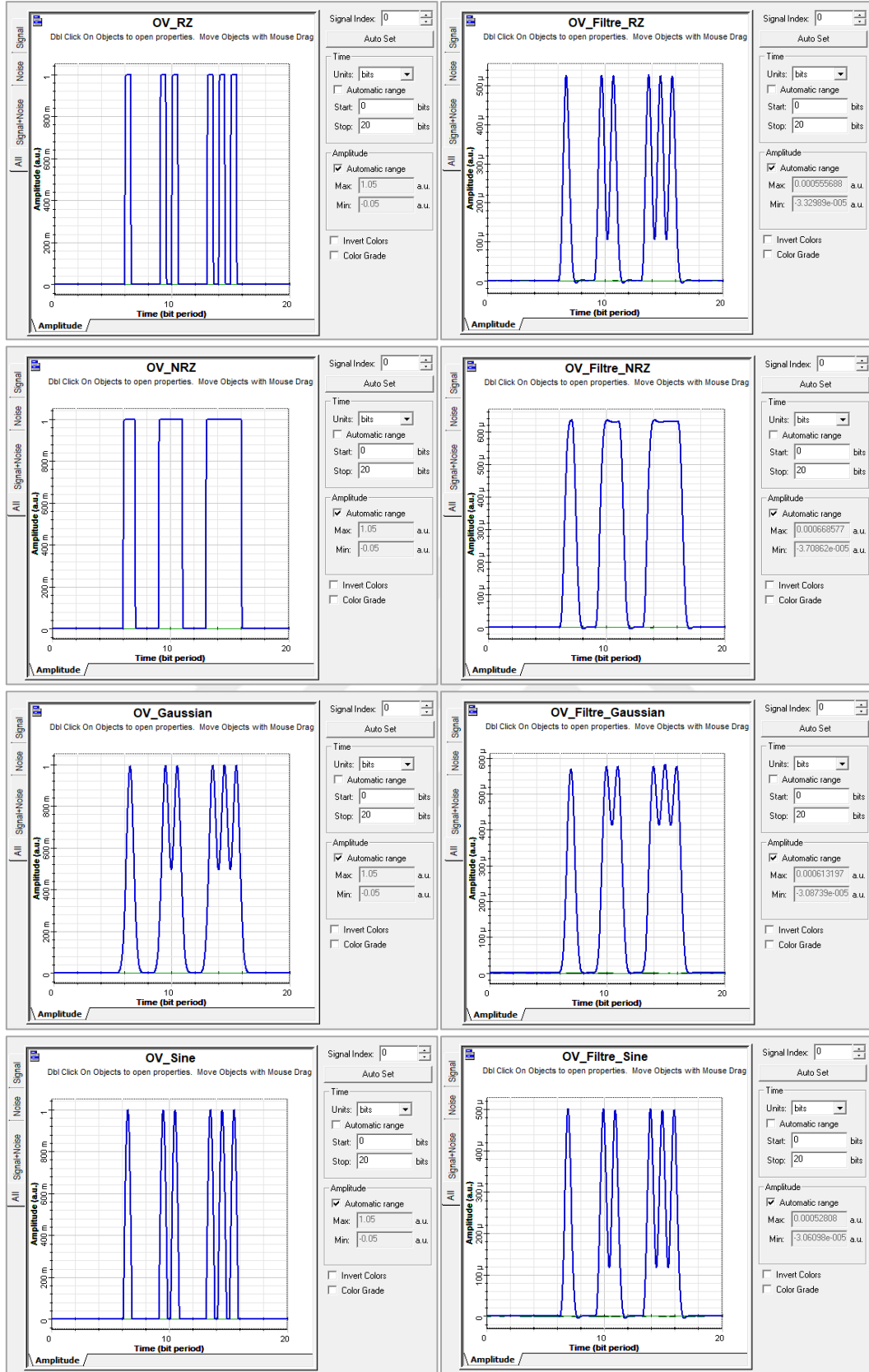
Şekil 5.17 Karşılaştırması yapılacak RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticileri.



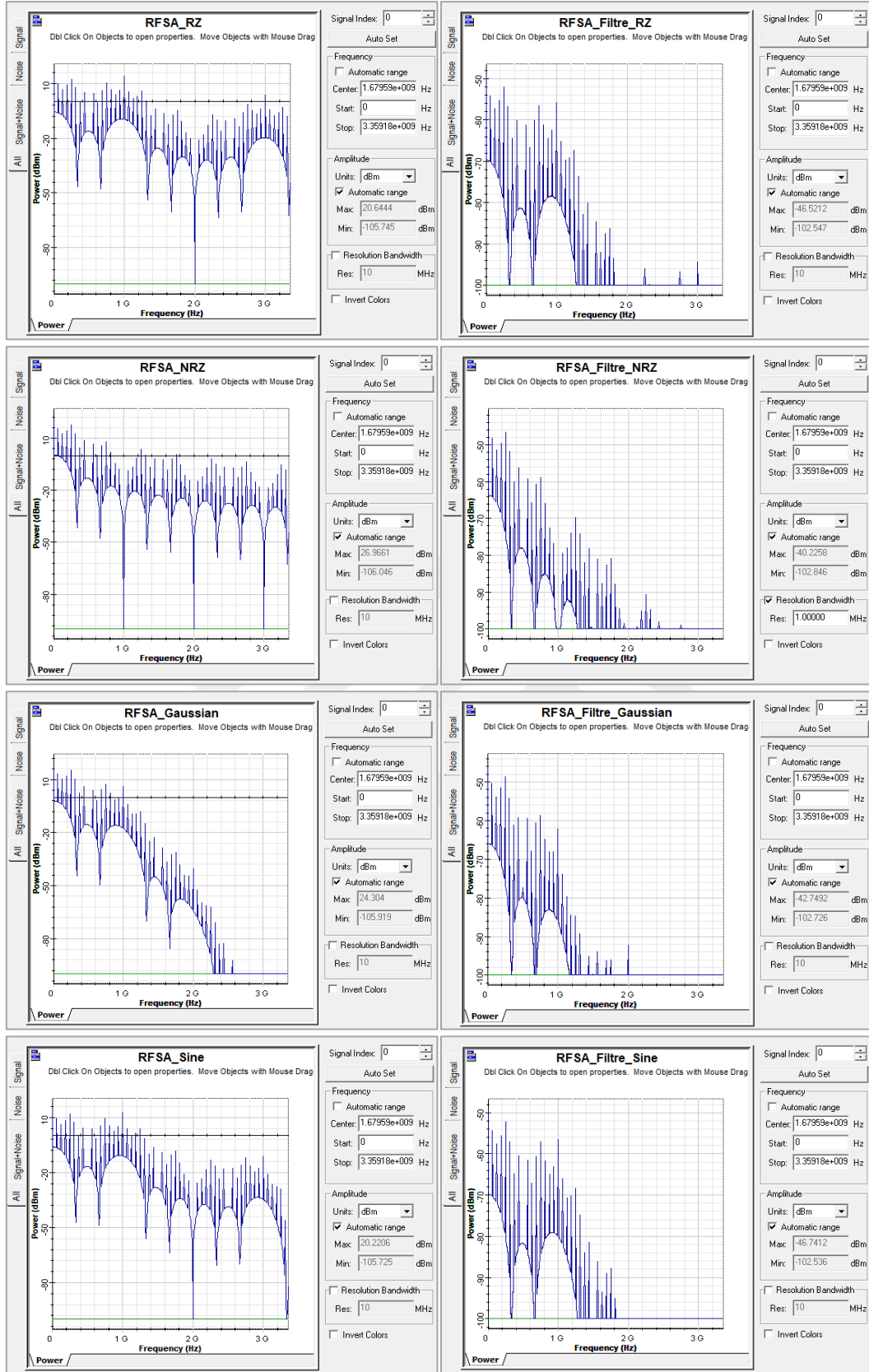
Şekil 5.18 RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerine ait OV (sol sütun) ve RFSA (sağ sütun) sonuçları.



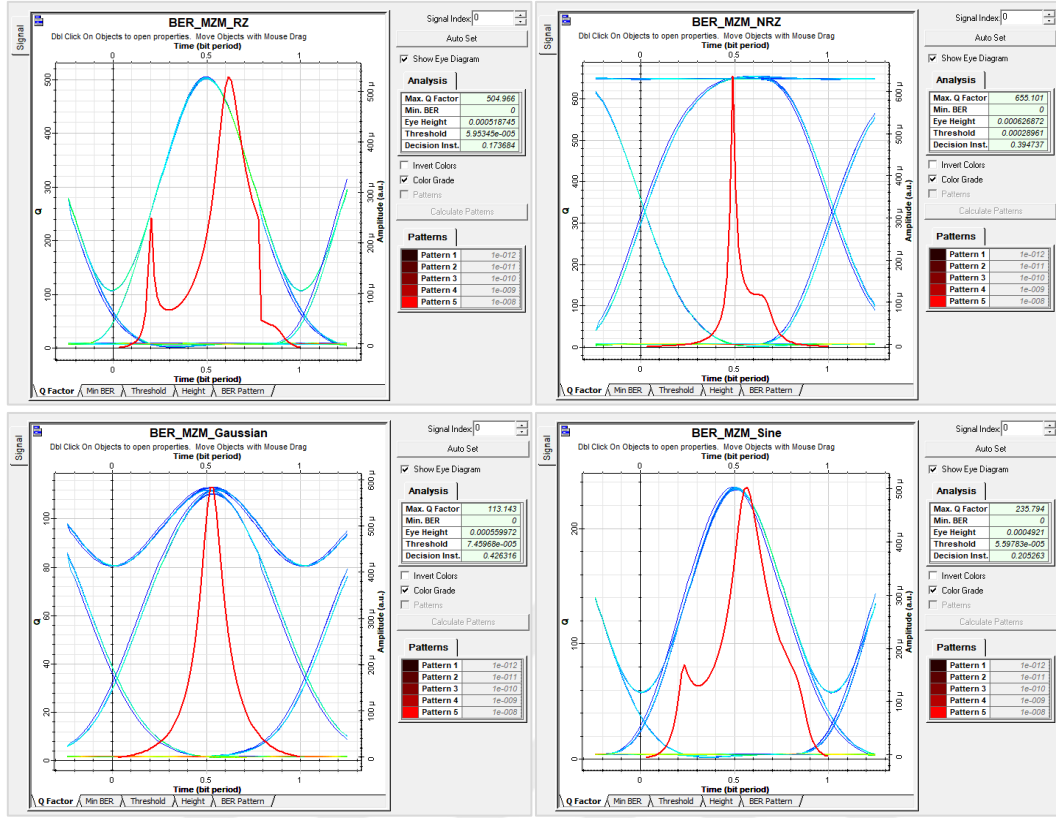
Şekil 5.19 Darbe üreticilerini karşılaştırmak için tasarlanan referans düzenek.



Şekil 5.20 Darbe üreticisi çıkışındaki sinyaller (sol sütun) ile alçak geçiren Bessel filtre çıkışındaki sinyallerin (sağ sütun) zaman domeni analizleri.

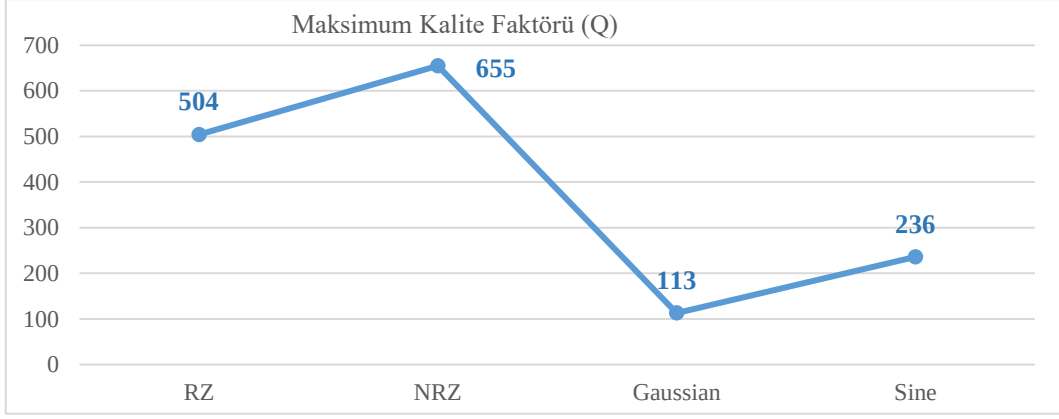


Şekil 5.21 Darbe üreticisi çıkışındaki sinyaller (sol sütun) ile alçak geçiren Bessel filtre çıkışındaki sinyallerin (sağ sütun) frekans domeni analizleri.



Şekil 5.22 RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerine ait BER analizörü sonuçları.

filtre kullanılarak BER analizleri gerçekleştirilmiştir. Darbe üreticisinin çıkışından elde edilen sinyal ile alıcı kısımda bulunan alçak geçiren Bessel filtre çıkışındaki sinyale ait zaman ve frekans domeni analizleri Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir. Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’deki OV ve RFSA ekran görüntüleri incelendiğinde iletilen sinyallerin bütün alıcılar tarafından net alınabildiği, RZ ve Sine darbe üreticilerinin sonuçlarının birbirine yakın olduğu, en belirgin sinyalin NRZ darbe üreticisinin sağladığı gözlemlenmiştir. Düzenek sonuna bağlanan BER analizörü sonuçları Şekil 5.22’de, maksimum kalite faktörü değerlerine ait grafik sonuçları Şekil 5.23’te verilmiştir. RZ darbe üretici ile hazırlanan düzenekte maksimum kalite faktörü 504 olurken, NRZ darbe üretici ile hazırlanan düzenekte 655, Gaussian darbe üretici ile hazırlanan düzenekte 113 ve Sine darbe üretici ile hazırlanan düzenekte 236 olmuştur. Sonuç olarak; Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 değerlendirildiğinde en iyi sonucun NRZ darbe üreticisi ile elde edildiği belirlenmiştir.



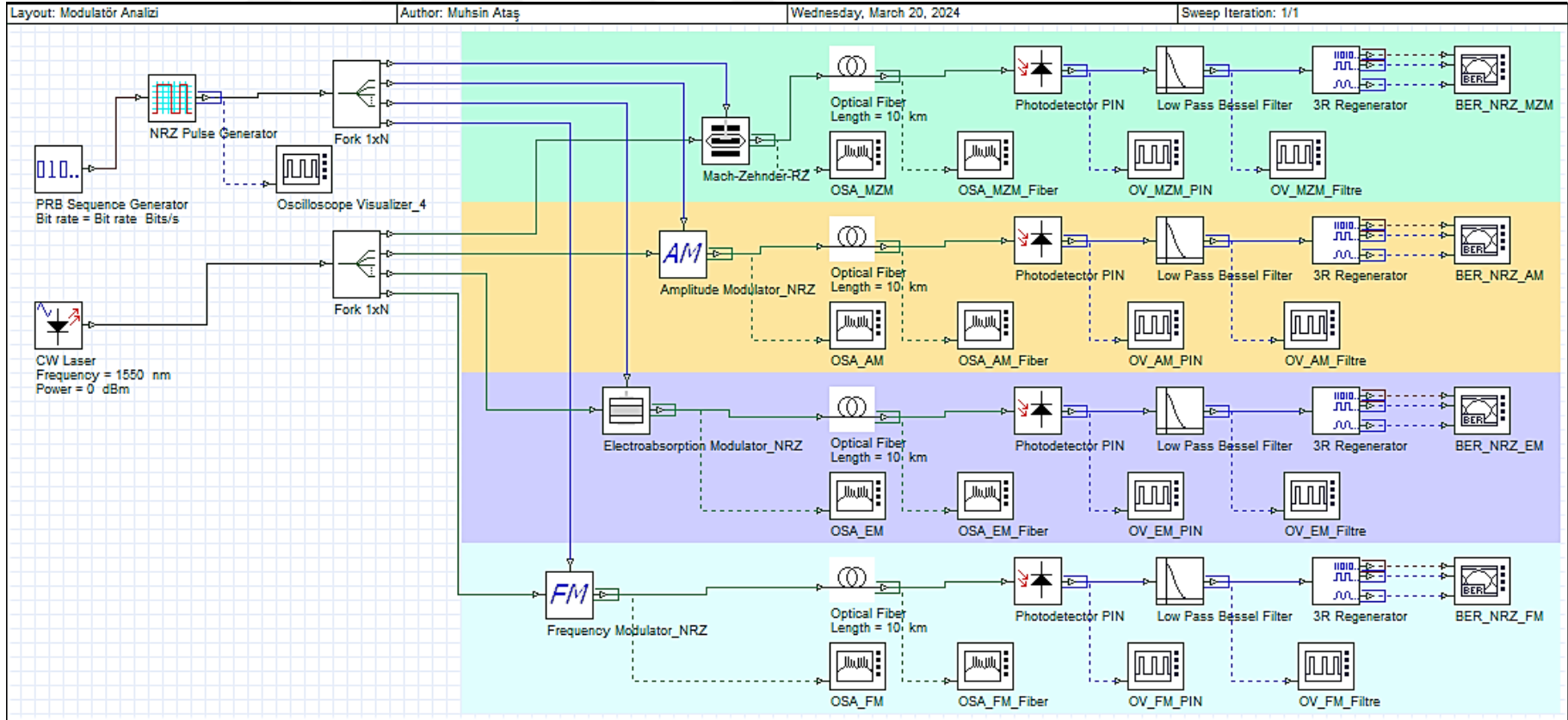
Şekil 5.23 RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerine ait maksimum kalite faktörü grafiği.

5.4 Modülatörlerin Karşılaştırılması

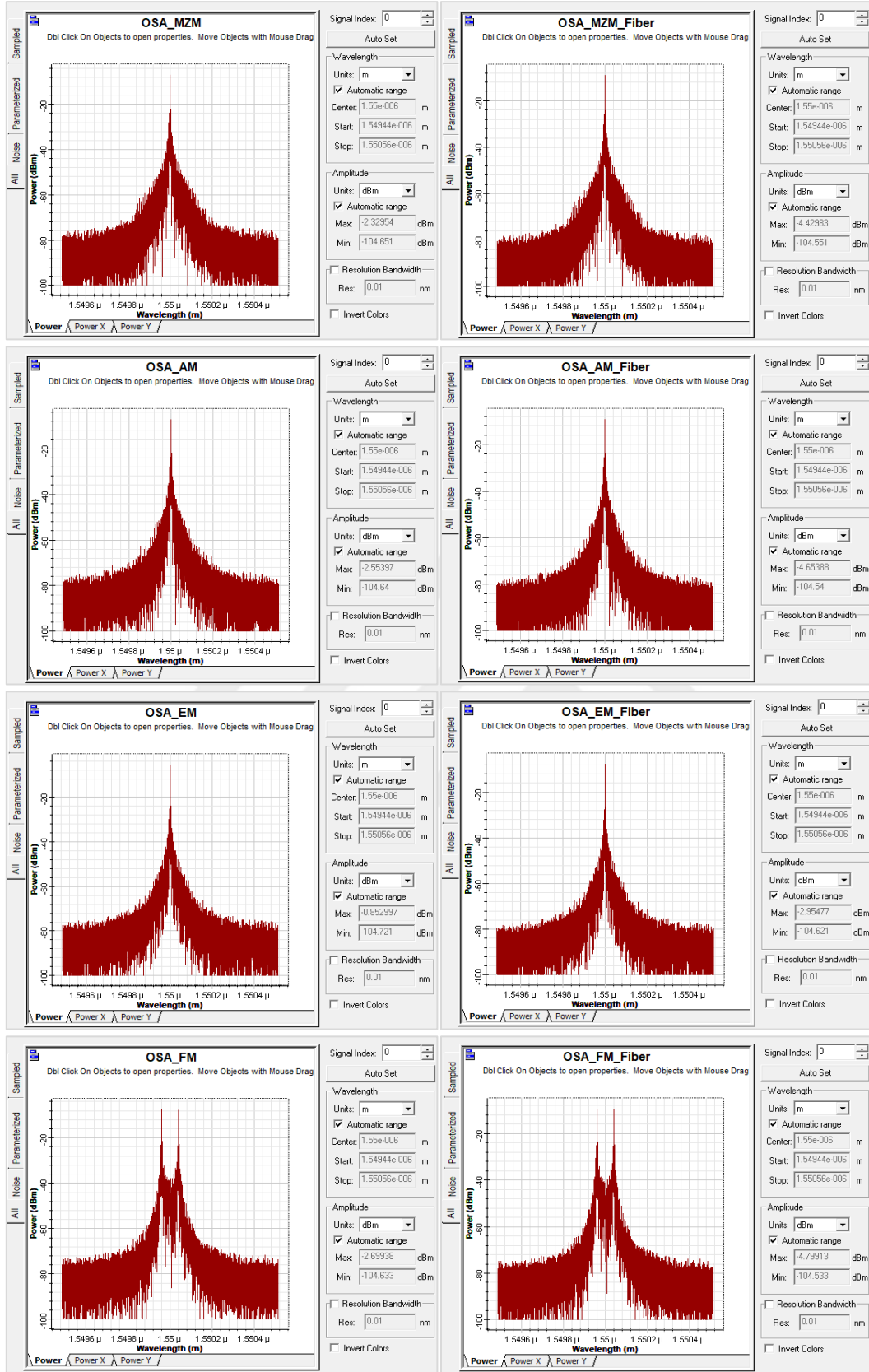
Modülatörler, ışık kaynağından gelen modüle edilmemiş ışığı darbe üreticisinden gelen elektriksel sinyal ile şekillendiren yapılar olarak tanımlanır. Harici modülasyonda darbe üreticinin ürettiği sinyal sürekli bir ışık kaynağı ile modüle edilerek iletim ortamına gönderilmektedir. Optik modülatör sınıfları arasında genlik modülatörü (Amplitude Modulator, AM), faz modülatörü (Phase Modulator, PM), elektrooptik faz modülasyonu, frekans modülatörü (Frequency Modulator, FM), elektroabsorbsiyon modülatörü (Electroabsorption Modulator, EM) ve Mach-Zehnder modülatörü (Mach-Zehnder Modulator, MZM) bulunur.

Bu bölümde, yaygın kullanımı olan MZM, AM, EM ve FM modülatörlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Şekil 5.24'te tasarlanan düzenekte PRB dizi üreticisi ve NRZ darbe üreticisi ile üretilen sinyal fork yapısı ile bölünerek her bir çıkışı ayrı bir modülatöre bağlanmıştır. Yine fork yapısıyla çoklanan CW lazer ile birlikte modüle edilen sinyal 10 km'lik fiber optik kablo ile PIN fotodiyotu ve alçak geçiren Bessel filtreden oluşan alıcıya iletilmektedir.

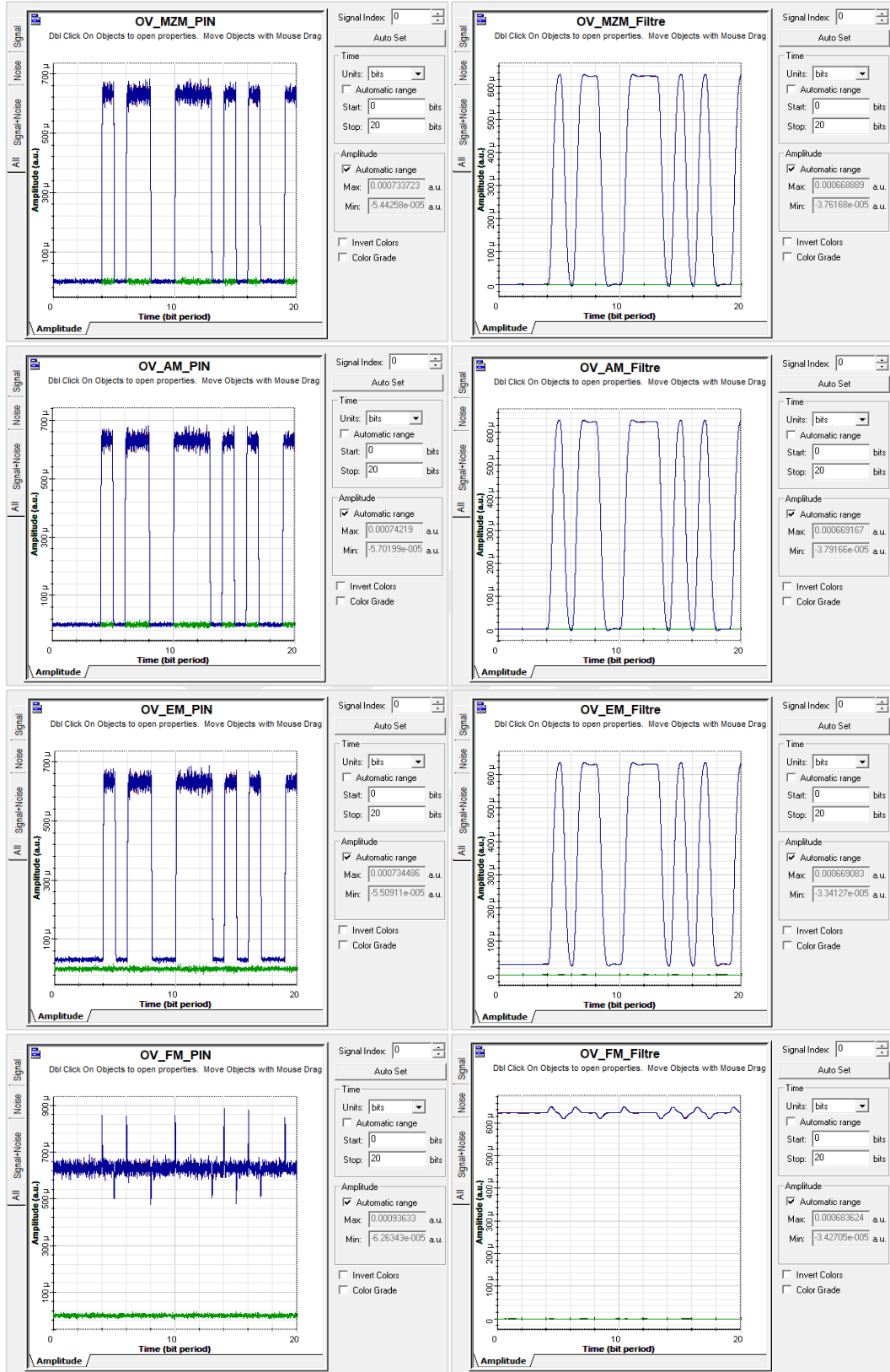
Şekil 5.25'te verilen, modülasyon çıkışlarına ve 10 km'lik fiber kablo çıkışlarına bağlanan OSA sonuçları, FM hariç diğer modülatör çıkışlarındaki sinyallerin 1550 nm merkez olacak şekil simetrik bir dağılımlı olarak benzerlik gösterdiğini ifade eder. FM için ise 1550 nm'nin sağında ve solunda 2 tepe oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 5.26'da PIN ve alçak geçiren Bessel filtre çıkışlarına bağlanan OV sonuçlarına ait ekran görüntüleri yer almaktadır. OSA sonuçlarında olduğu gibi



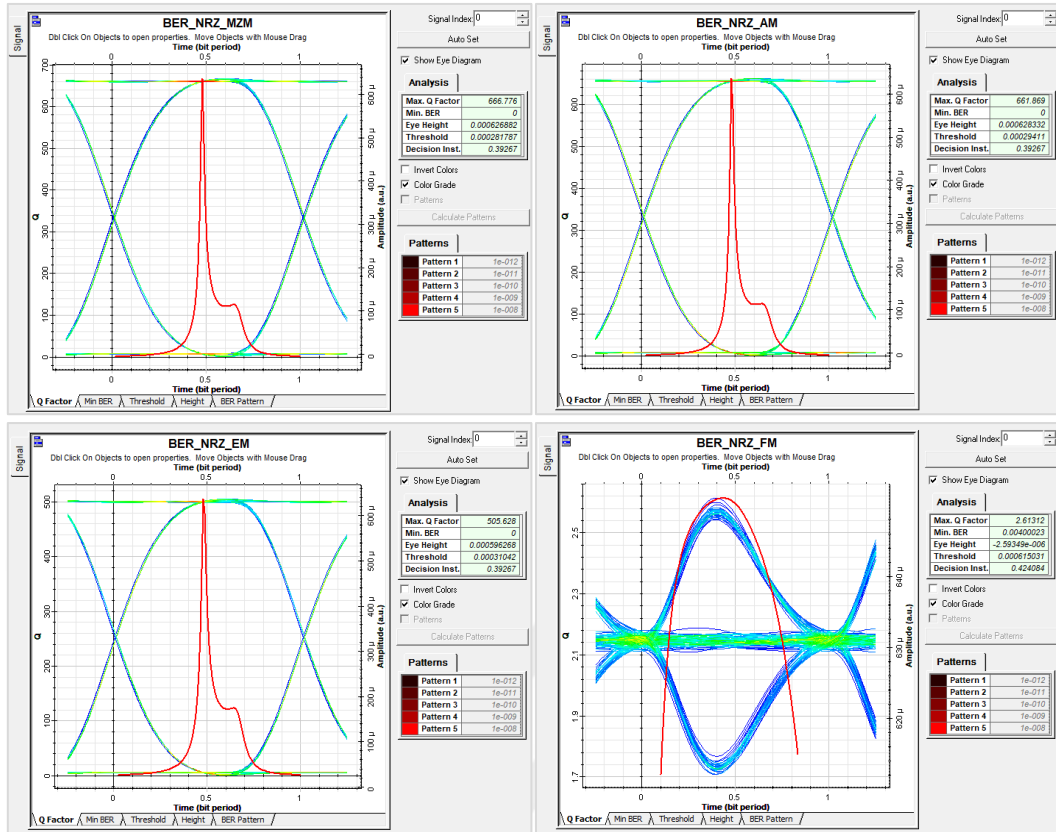
Şekil 5.24 Modulatörlerin karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.



Şekil 5.25 Modülatör çıkışlarına (sol sütun) ve fiber optik kablo çıkışlarına ait OSA sonuçları.



Şekil 5.26 Modülatör çıkışlarına (sol sütun) ve fiber optik kablo çıkışlarına ait OV sonuçları.

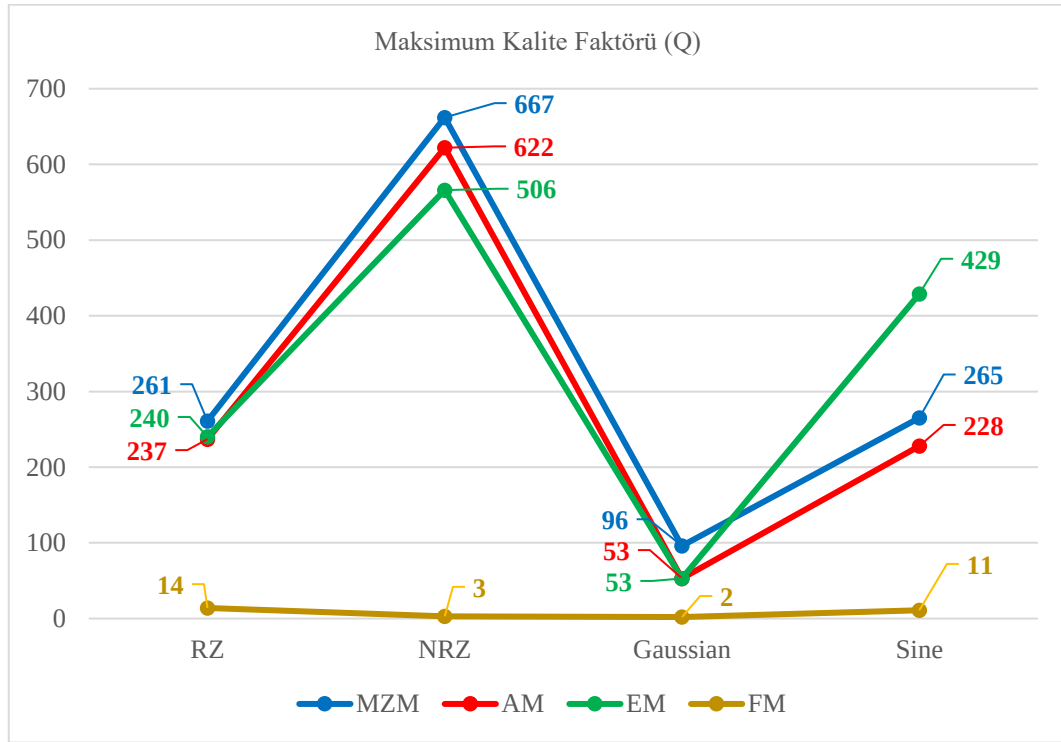


Şekil 5.27 NRZ darbe üreticisinin MZM, AM, EM ve FM'ye ait BER analizörü sonuçları.

MZM, AM ve EM sonuçları benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. FM ise birden sıfıra ve sıfırdan bire dönüşümlerin frekansını modüle ettiğinden tasarlanan düzenek için iyi bir performans sağlayamadığı belirlenmiştir.

Şekil 5.27'de yer alan NRZ darbe üreticisine ait BER analizörü sonuçlarında, MZM, AM ve EM sonuçlarının benzerliği ve FM sonucunun farklılığı tekrar görülmektedir. Şekil 5.24'teki referans düzeneginde NRZ darbe üreticisi yerine sırasıyla RZ, Gaussian ve sine darbe üreticileri kullanılarak darbe üreticisi ve modülatör ikililerine ait maksimum kalite faktörleri elde edilmiştir. Şekil 5.28'deki maksimum kalite faktörüne ait grafik incelendiğinde, MZM'nin modülatör olarak kullanıldığı düzenekte sırasıyla RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerinden elde edilen maksimum kalite faktörleri 261, 667, 96 ve 265'tir. AM modülatör olarak kullanıldığı düzenekte RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerinden sırasıyla maksimum kalite faktörleri 237, 622, 53 ve 228 olarak elde edilmiştir. AM modülatörün bütün sonuçları MZM'den daha düşüktür. EM modülatör olarak tercih edildiğinde RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe

üreticilerilerinden maksimum kalite faktörleri 240, 506, 53 ve 429 değerlerini almıştır. EM modülatörü sonuçları, Sine darbe üreticisi hariç her seferinde MZM'den düşük kalmıştır. FM modülatör olarak kullanıldığında RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerilerinden maksimum kalite faktörleri sırasıyla 14, 3, 2 ve 11 olmuştur. FM'nin her bir darbe üreticisi ile de en düşük performans sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.28 RZ, NRZ, Gaussian ve sine darbe üreticilerin MZM, AM, EM ve FM'ye ait maksimum kalite faktörü grafiği.

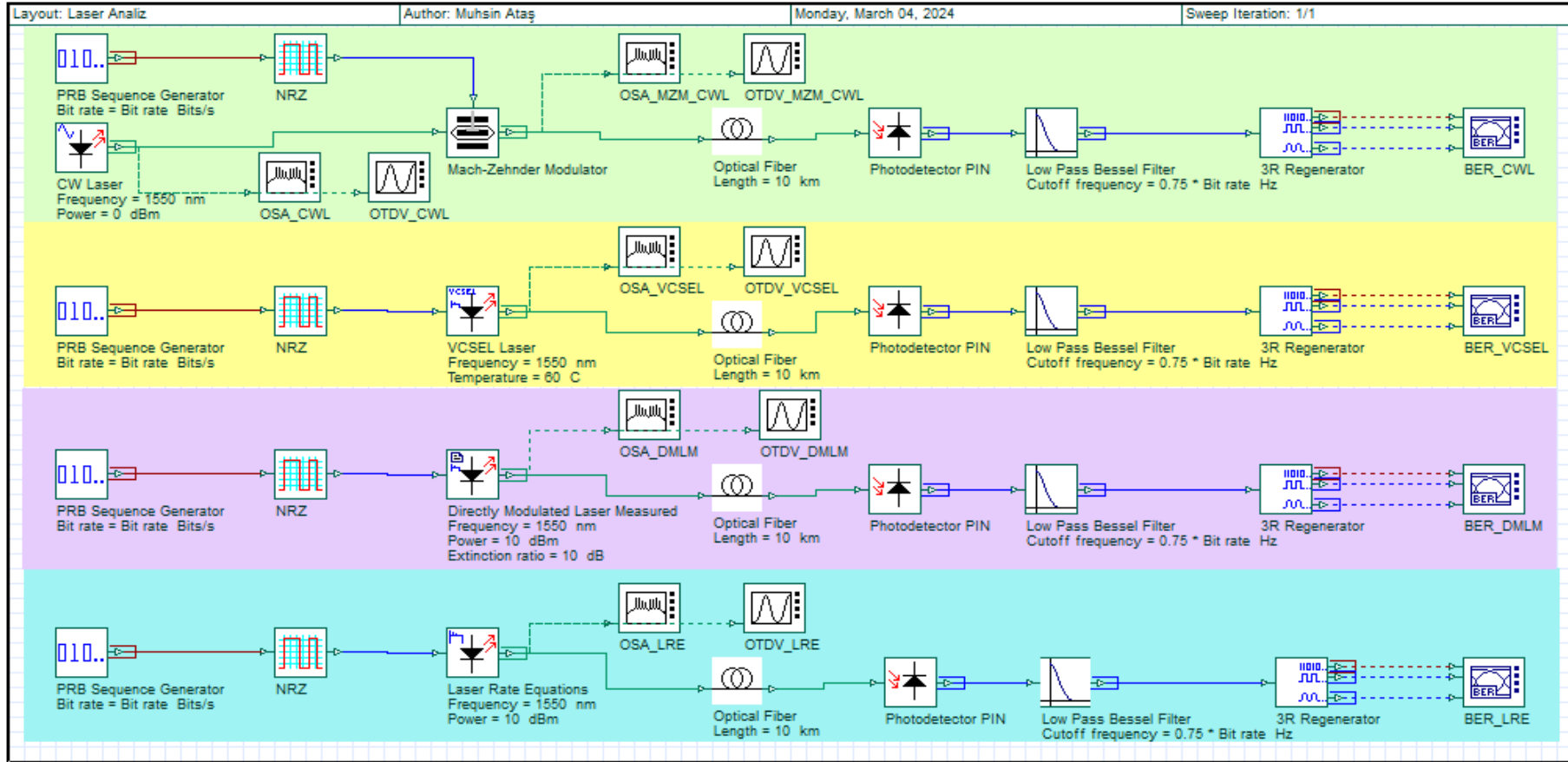
MZM'nin sine darbe üreticisi ile birlikte kullanıldığı düzeneğe hariç diğer 3 darbe üreticisi ile birlikte kullanımı en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir. Sine darbe üreticisi için 4 modülatör arasında EM ile birlikte kullanılması en yüksek maksimum kalite faktörünü sağlasa bile NRZ ile MZM'nin birlikte kullanıldığında elde edilen 667 değerinin altında kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak RZ, NRZ, Gaussian ve sine darbe üreticileri ile MZM, AM, EM ve FM birlikte analiz edildiğinde en iyi sonucu NRZ ile MZM'nin birlikte kullanıldığı düzeneğin verdiği belirlenmiştir.

5.5 Lazerlerin Karşılaştırılması

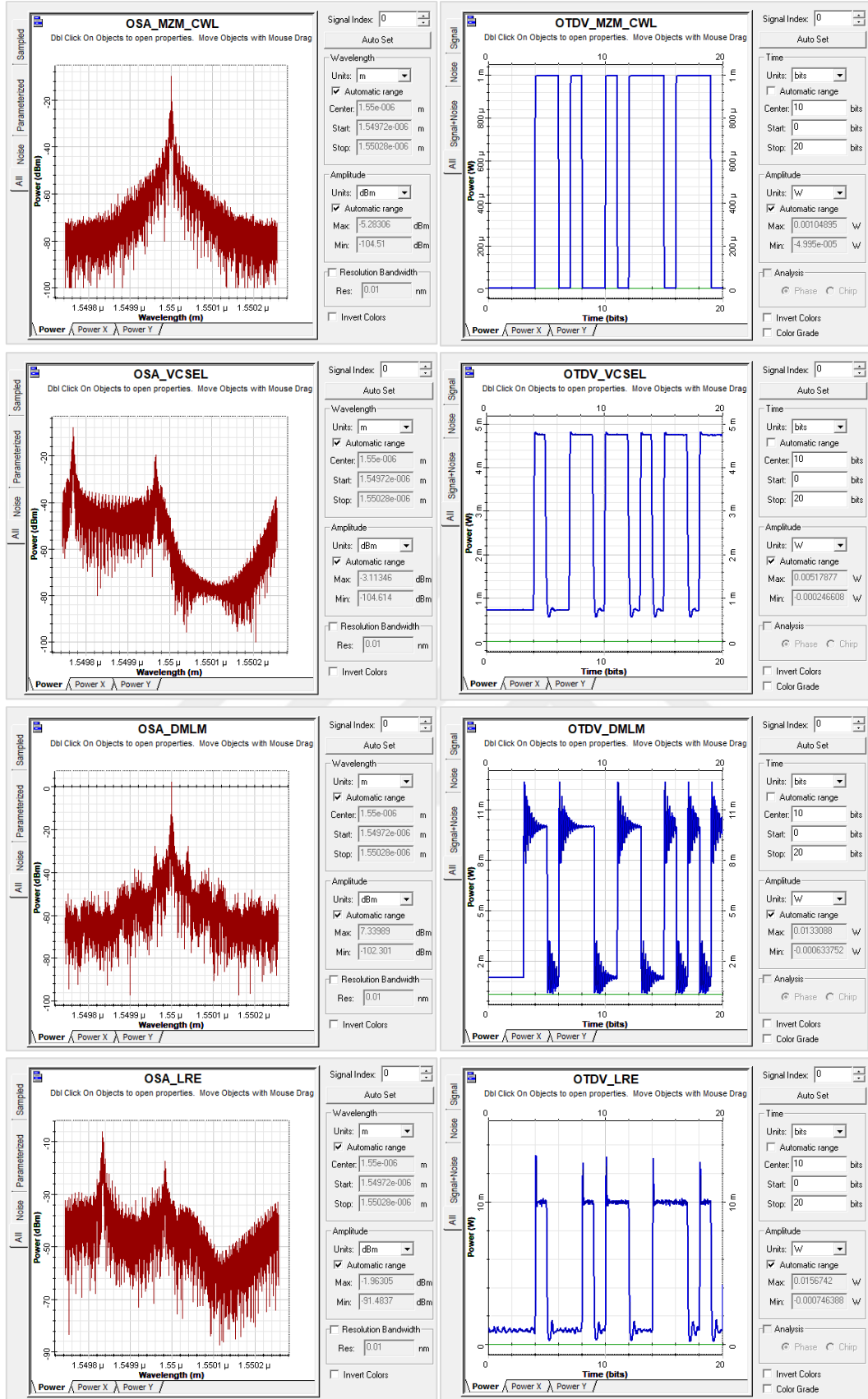
Işık kaynakları yüksek frekanslı taşıyıcı sinyaller olarak modülatör girişlerine bağlanır ve darbe üreticisinden gelen elektriksel verinin modülatörde şekillenerek iletim ortamına taşınmasını sağlar. Işık kaynağı olarak lazerler ve LED'ler kullanılır. LED'ler kısa mesafe ve düşük hızlar için kullanılmalarından dolayı uzun mesafe karşılaştırmalarına dahil edilmemiştir. Bu başlık kapsamında, OptiSystem 7.0 simülasyon programı kütüphanesinde bulunan lazer türlerinden CWL (Continuous Wave Laser, Sürekli İşaretli Lazer), VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, Dikey Boşluklu Yüzey Yayan Lazer), DMLM (Directly Modulated Laser Measured, Doğrudan Modüle Edilmiş Lazerle Ölçülen) ve LRA (Laser Rate Equations, Lazer Hız Denklemleri) karşılaştırmaları yapılacaktır. Şekil 5.29'da tasarlanan referans düzeneklerinde 1 Gbps hızında PRB dizi üreticisi, NRZ darbe üreticisi, sırasıyla CWL, VCSEL, DMLM ve LRA lazerler, 10 km'lik fiber optik kablo, alıcı kısmında PIN fotodedektör ve alçak geçiren Bessel filtre kullanılmıştır. CWL çıkışına diğer lazerlerden farklı olarak MZM kullanılmıştır.

Şekil 5.30'de sırasıyla CWL, VCSEL, DMLM ve LRA için sağ sütunda OSA sonuçları, sol sütunda OTDV (Optical Time Domain Visualiser, Optik Zaman Domeni Görselleştirici) sonuçları verilmiştir. OSA sonuçları incelendiğinde MZM ve CWL'ye ait sonucun merkezi 1550 nm olan simetrik bir yapıda olduğu ve diğer sonuçlarda ise çeşitli dalgalanmalar gözlemlenmiştir. MZM ve CWL kullanılarak elde edilen modüle edilmiş işaretler için OTDV sonuçları incelendiğinde ise sinyalin düzgün dikdörtgen şeklinde olduğu, VCSEL'deki sonuç ile yakın bezerlikte olduğu görülmektedir. DMLM ve LRA lazerlerde ise sönümlenen osilasyon salınımları gözlemlenmiştir.

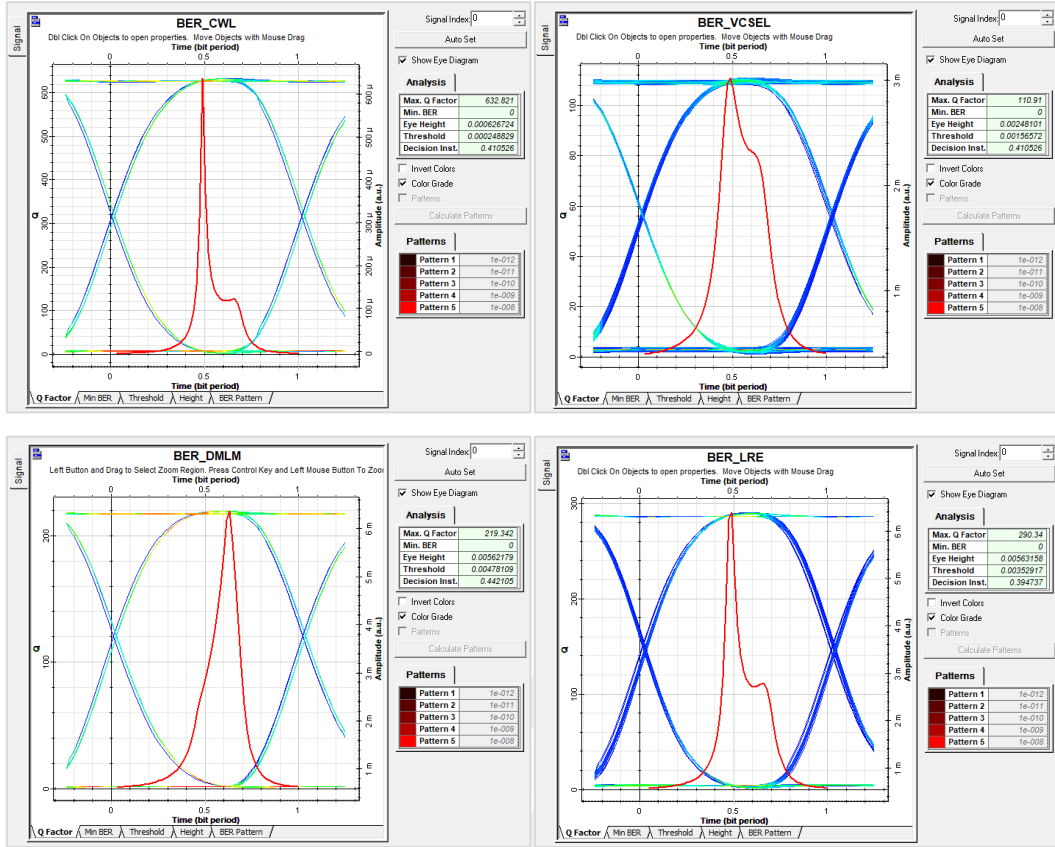
Şekil 5.31'da bulunan BER analizörü sonuçlarına bakıldığında her bir lazer için de göz açıklığının net olduğu, her bir lazer için yarım dalga sinüs alternanslı bir formda olduğu görülmektedir.



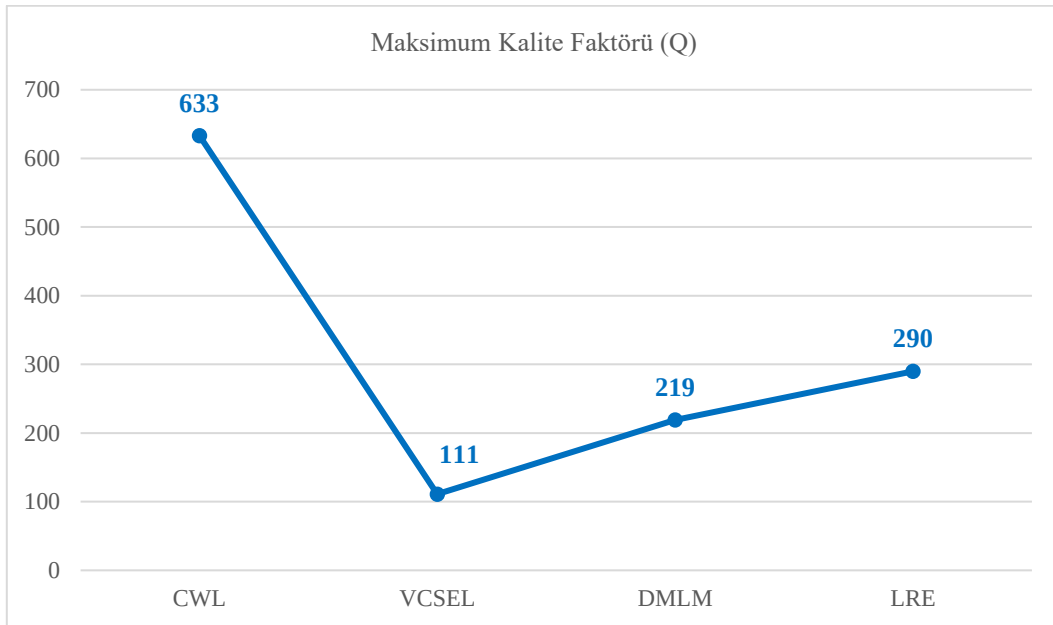
Şekil 5.29 Lazerlerin karşılaştırıldığı referans düzenek.



Şekil 5.30 Lazer çıkış sinyallerine ait OSA ve OTDV sonuçları.



Şekil 5.31 Lazer sinyallerinin alıcı kısmına ait BER analizörü sonuçları.



Şekil 5.32 Lazer sinyallerin alıcı kısmında elde edilen maksimum kalite faktörlerine ait grafik.

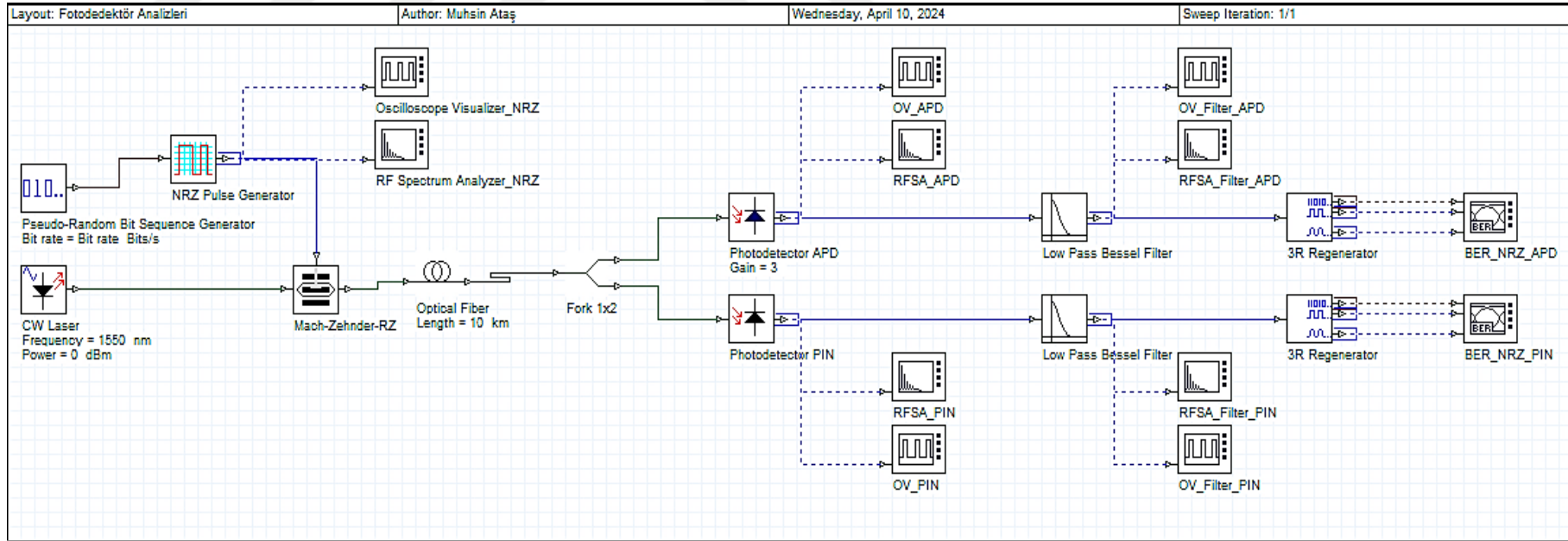
Maksimum kalite faktörüne ait grafiğin verildiği Şekil 5.32'ye göre en iyi sonucu CWL ile elde edildiği belirlenmiştir. CWL ile maksimum kalite faktörü 633 iken, LRE ile 290, DMLM ile 219 ve VCSEL ile 111 değerlerine ulaşılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada, 1550 nm CWL ışık kaynağının kullanılacağı belirlenmiştir.

5.6 Fotodedektörlerin Karşılaştırılması

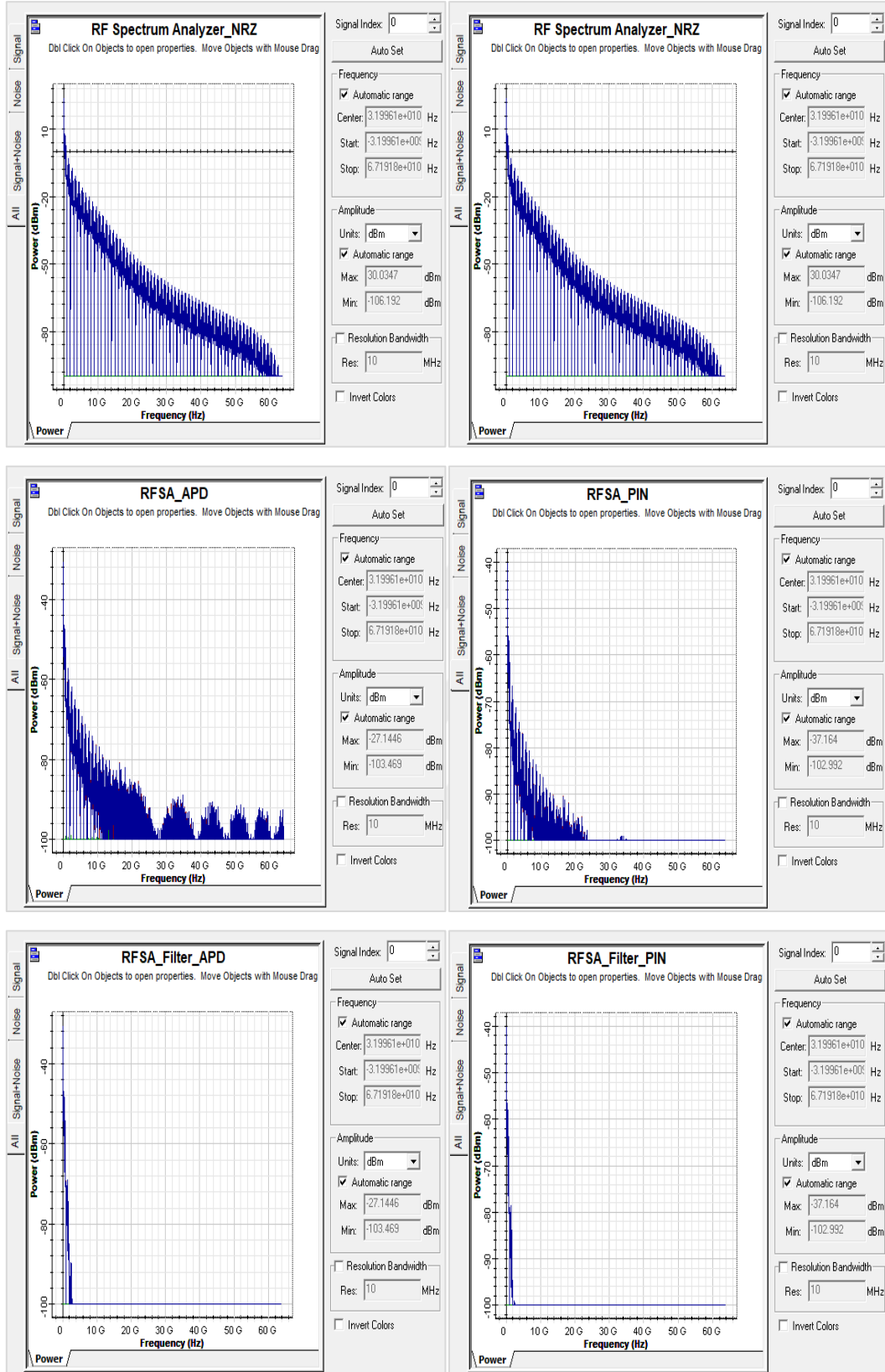
Vericiler tarafından üretilen sinyaller, fiber optik kablo üzerinden ışık olarak iletdikten sonra alıcı kısımda bulunan fotodedektörler tarafından algılanmaktadır. Fotodiyot, optik sensör ve ışık dedektörü olarak anılan fotodedektörler gelen ışığın etkisiyle yapısında bulunan yarı iletkenler vasıtasıyla elektrik sinyaline çevirmektedir. Bu başlık altında, en yaygın kullanılan fotodiyotlardan APD (Avalanche Photodiode, Çığ Fotodiyot) ve PIN'nin karşılaştırması yapılmıştır.

Fotodiyotların performans analizi karşılaştırmaları için tasarlanan düzenek Şekil 5.33'te görülmektedir. PRB dizi üreticisi ile 1 Gbps hızında, NRZ darbe üreticisi ve 1550 nm dalga boyunda ve 0 dBm gücünde CW lazer kullanılarak MZM ile modüle edilen işaret 10 km'lik fiber optik kablodan alıcı kısmına iletilmiştir. Fork yapısı ile karşılaştırma yapabilmek için alıcıya gelen sinyal ikiye bölünmüş, bir çıkışına APD diğerine de PIN fotodiyot ve onlardan sonra da alçak geçiren Bessel filtre bağlanmıştır. NRZ darbe üreticisi çıkışına, APD ve PIN fotodiyot çıkışlarına ve alçak geçiren Bessel filtre çıkışlarına frekans ve zaman domainleri sonuçlarını elde etmek için RFSA ve OV bağlanmıştır. En son olarak da BER ve maksimum kalite faktörü değerlerini analiz edilmiştir.

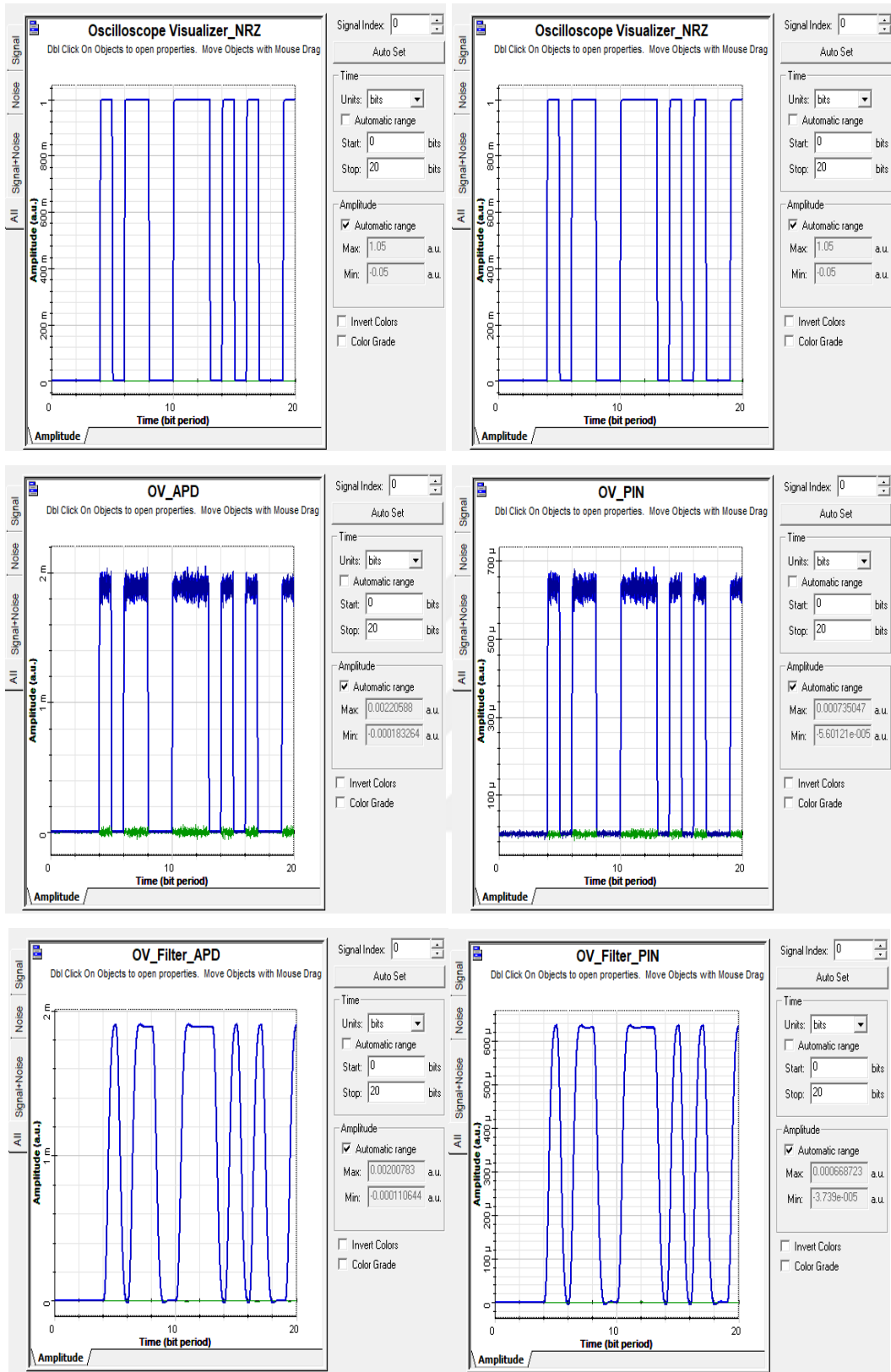
Şekil 5.34'te yer alan RFSA sonuçlarında, APD çıkışında yüksek frekanslarda gürültülerin daha fazla olduğu, PIN fotodiyot çıkışındaki sinyalin daha az gürültüye sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.35'te bulunan OV sonuçları incelendiğinde, özellikle alçak geçiren Bessel filtreden geçtikten sonra APD ve PIN fotodiyot sinyallerinin benzer özelliklerde olduğu gözlemlenmiştir.



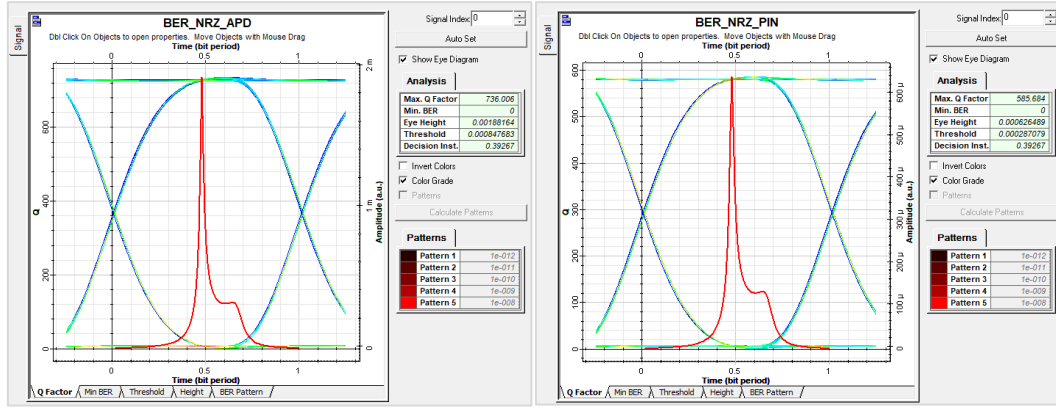
Şekil 5.33 Fotodedektör karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.



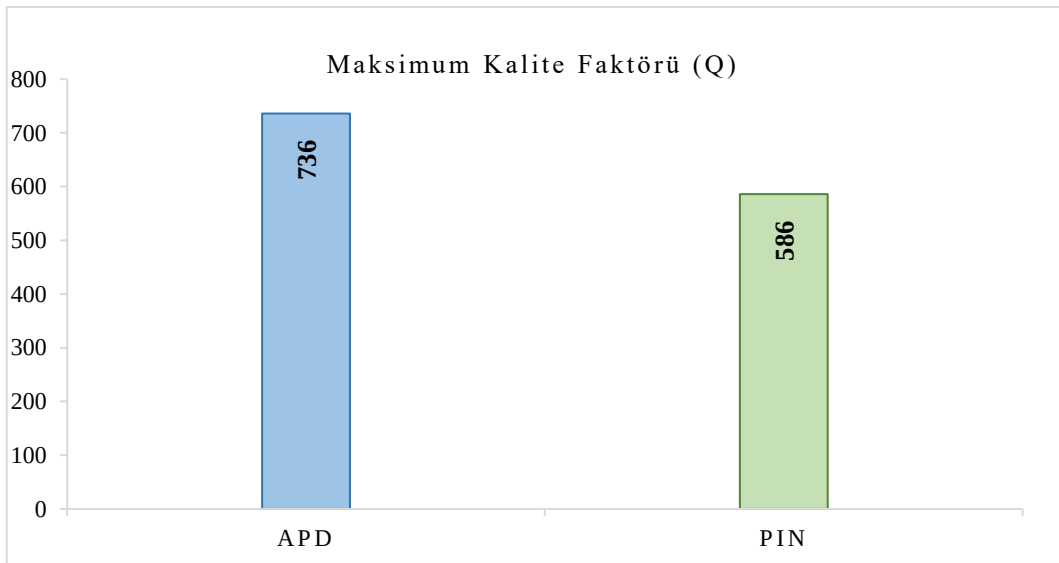
Şekil 5.34 NRZ çıkışına, APD ve PIN çıkışlarına ve filtre çıkışlarına ait RFSA sonuçları.



Şekil 5.35 NRZ çıkışına, APD ve PIN çıkışlarına ve filtre çıkışlarına ait OV sonuçları.

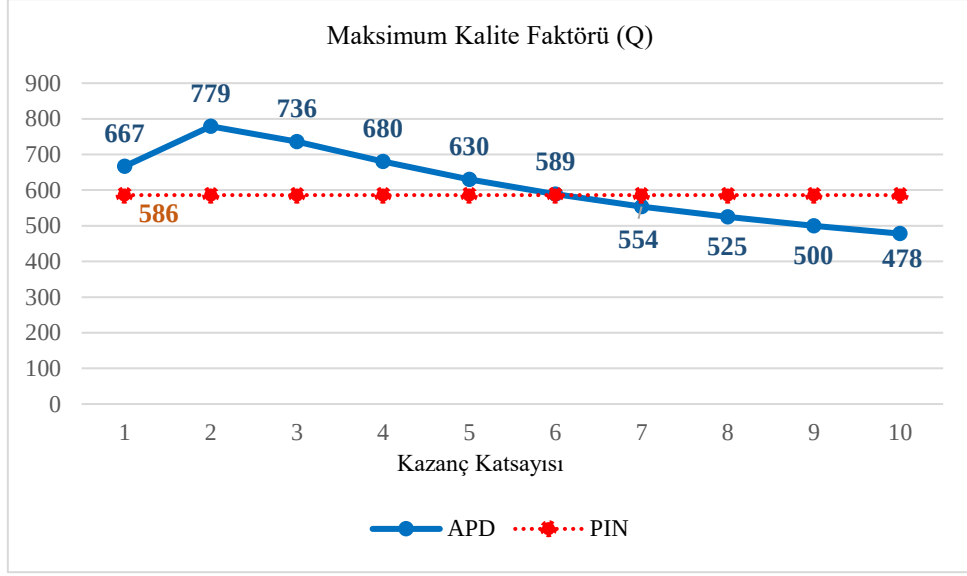


Şekil 5.36 APD ve PIN fotodiyotuna ait BER analizörü sonuçları.



Şekil 5.37 APD ve PIN fotodiyotuna ait maksimum kalite faktörü grafiği.

Şekil 5.36'daki BER analizörü sonuçlarında her iki fotodiyot için de göz açıklığının net olduğu ve Şekil 5.37'deki maksimum kalite faktörüne ait grafik analiz edildiğinde 736'ya karşı 586 değeri ile APD'nin PIN fotodiyotuna göre daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. APD'nin PIN fotodiyotuna göre %26 daha iyi sonuç vermesinin bir etkeni yapısında bulunan iç kazançtır. Şekil 5.32'deki referans düzenekte bulunan APD kazancı, OptiSystem 7.0 simülasyon programında 3 olarak atanmıştır. APD kazancı 1'den başlayarak 10'a kadar değiştirilerek maksimum kalite faktörü değişimi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.38'deki grafikte verilmiştir. PIN fotodiyot için kazanç söz konusu olmadığından maksimum kalite faktörü sabit kabul edilerek kıyaslama yapılmıştır. Kazanç yapısı nedeniyle APD'nin maliyet ve karmaşıklığı artsada bu çalışmada performans öncelikli tutulması nedeniyle kazancı 3 olan APD üstün kabul edilmiştir.

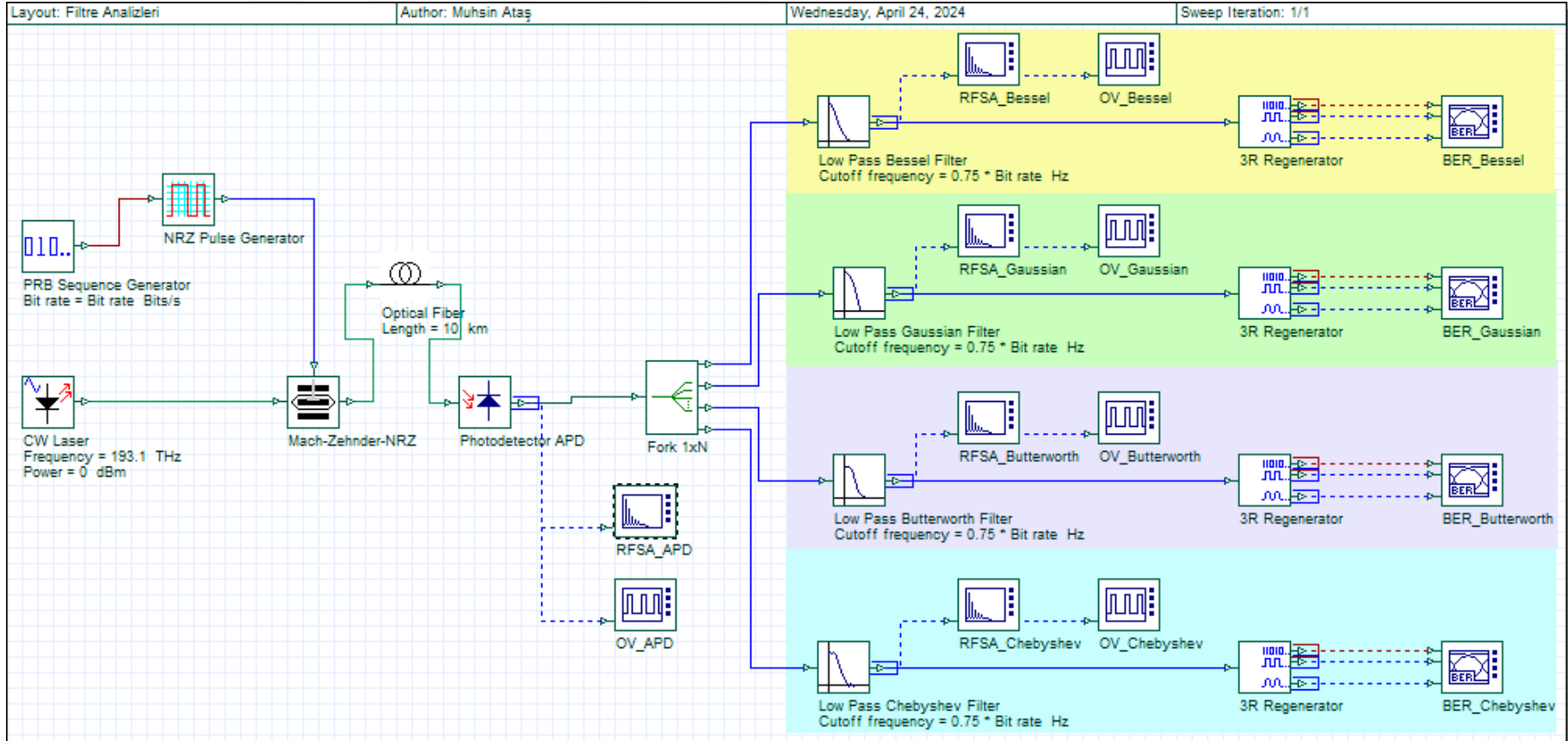


Şekil 5.38 1 Gbps hız için APD ve PIN fotodiyotlarına ait kazanç katsayısı ile maksimum kalite faktörü grafiği.

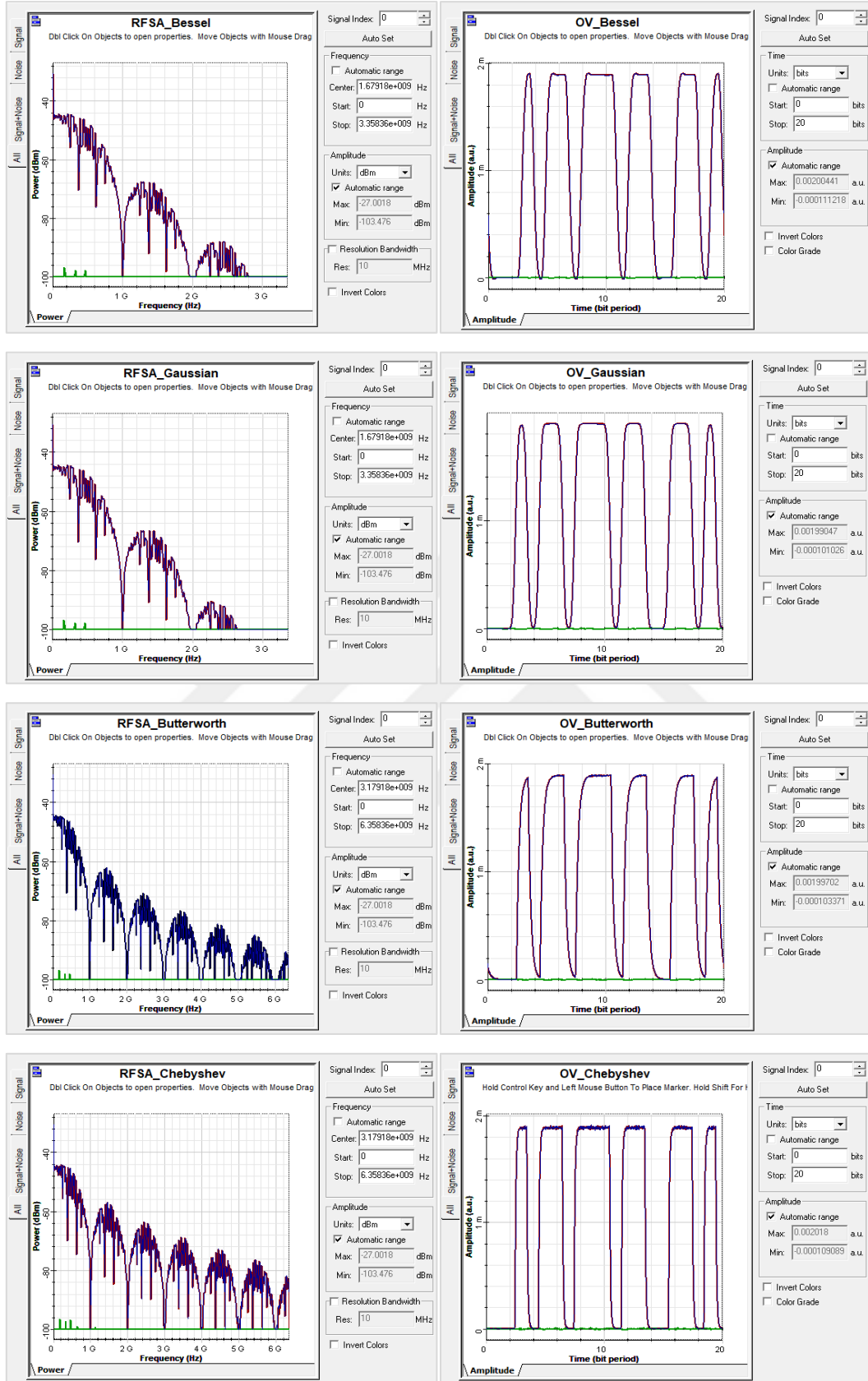
5.7 Filtrelerin Karşılaştırılması

Optik filtreler, belirli bir frekans aralığındaki sinyallerin seçilmesine ve bu aralığın dışındaki sinyallerin zayıflatılmasına olanak sağlamasından dolayı sinyal gürültüsünü azaltmak, sinyal kalitesini iyileştirebilmek, daha net ve daha güvenilir veri iletimi sağlamak için kullanılır. Bu bölümde, alıcı kısmında yüksek frekanslarda oluşan gürültüyü azaltmak için alçak geçiren filtreler türlerinden en yaygın kullanılan Bessel, Gaussian, Chebyshev ve Butterworth filtreler incelenmiştir.

Filtrelerin performans analizlerini karşılaştırmak için tasarlanan düzenek Şekil 5.39’da görülmektedir. PRB dizi üreticisi ile 1 Gbps hızında, NRZ darbe üreticisi ve 1550 nm dalga boyunda ve 0 dBm gücünde CW lazer kullanılarak MZM ile modüle edilen işaret 10 km’lik fiber optik kablodan alıcı kısmına iletilmiştir. Alıcı kısmında APD kullanılarak çıkışı fork yapısı ile 4’e ayrılmış ve çıkışlara sırasıyla alçak geçiren Bessel filtre, alçak geçiren Gaussian filtre, alçak geçiren Butterworth filtre ve alçak geçiren Chebyshev filtre bağlanmıştır. APD çıkışına ve her bir filtre



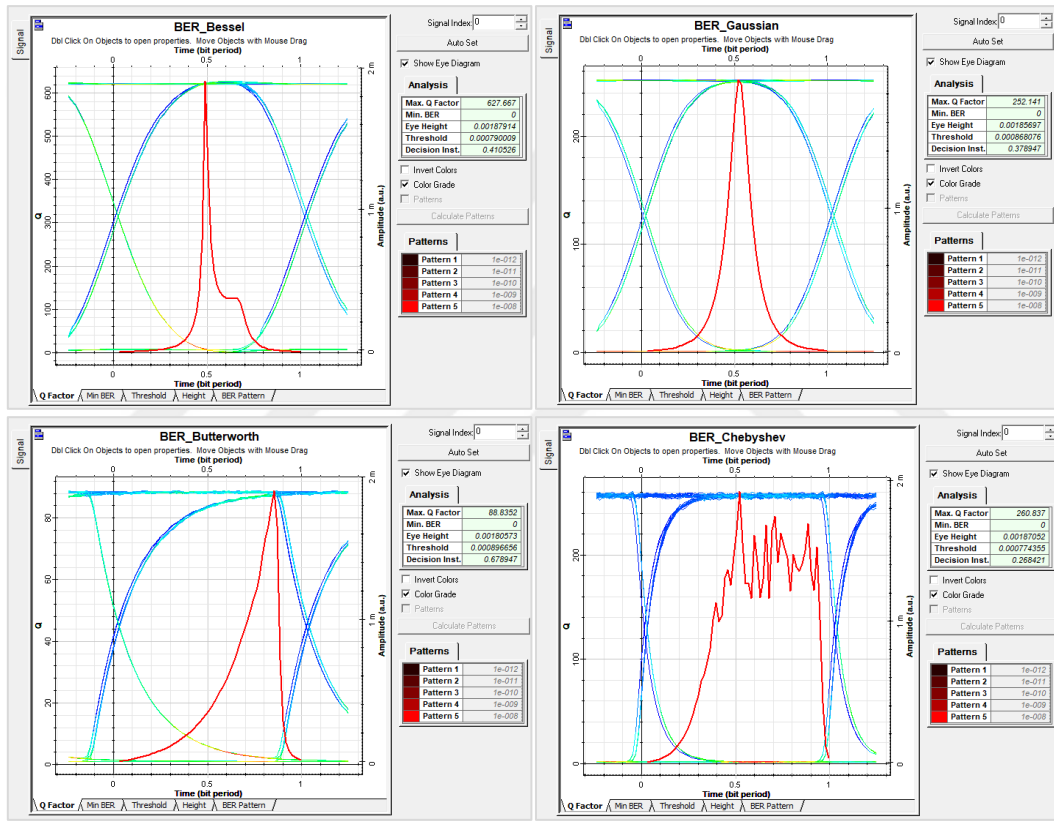
Şekil 5.39 Filtrelerin karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.



Şekil 5.40 Filtre çıkışlarına ait RFSA (solda) ve OV (sağda) sonuçları.

çıkışına frekans ve zaman domenleri sonuçların elde edilmesi için RFSA ve OV bağlanmıştır. Burada, BER analizörü sonuçları ve maksimum kalite faktörü değerleri analiz edilmiştir.

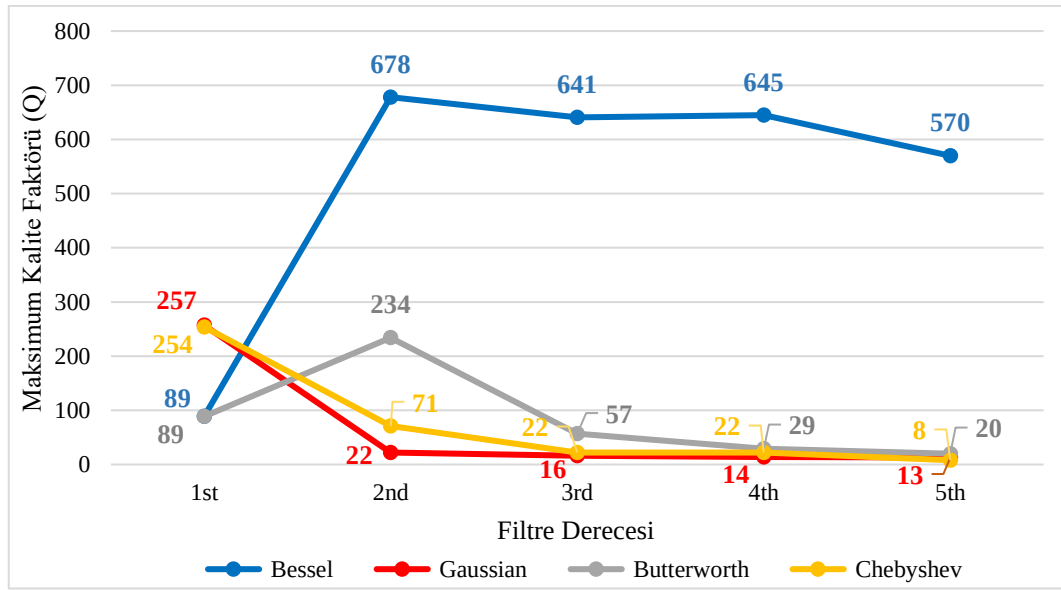
Şekil 5.40’da filtre çıkışlarına ait RFSA ve OV sonuçları yer almaktadır. Bessel ve Gaussian için sonuçlar benzer olup, en iyi sonucu vermiştir. Butterworth ve Chebyshev için ise sinyallerde ani düşmelerin ve dalgalanmaların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.41’de yer alan BER analizörü sonuçları incelendiğinde her bir filtre için de göz açıklığının olduğu gözlemlense de göz diyagramı en düzgün olan filtrenin Bessel ve Gaussian olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.41 Filtrelere ait BER analizörü sonuçları.

OptiSystem 7.0 simülasyon programında filtreler seçilirken filtre derecelerinin varsayılan olarak atandığı izlenmiştir. Filtre özelliklerine bakıldığında alçak geçiren Bessel filtre için varsayılan olarak atanan derece 4, alçak geçiren Gaussian filtre için varsayılan olarak atanan derece 1, alçak geçiren Butterworth filtre için varsayılan olarak atanan derece 1 ve alçak geçiren Chebyshev filtre için varsayılan olarak atanan derece 1 olduğu saptanmıştır. Filtre derecesinin etkilerinin analiz edilmesi için her bir filtre derecesi 1’den 5’e kadar değiştirilerek Şekil 5.42’deki

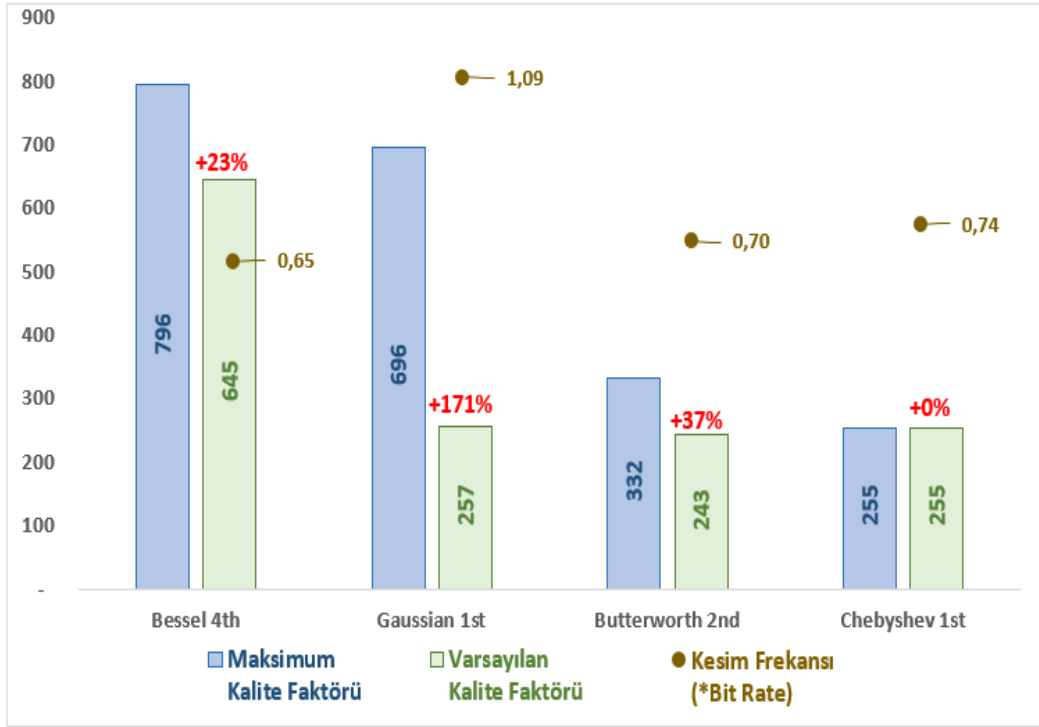
grafik elde edilmiştir. Alçak geçiren Bessel filtresi için birinci derece hariç diğer derecelerin maksimum kalite faktörü değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Alçak geçiren Gaussian filtre için birinci derece hariç diğer derecelerin maksimum kalite faktörü değerlerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Alçak geçiren Butterworth filtre için ikinci derece hariç diğer derecelerin maksimum kalite faktörü değerlerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Alçak geçiren Chebyshev filtre için de birinci derece hariç diğer derecelerin maksimum kalite faktörü değerlerinin düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.42 Filtre derecelerine göre maksimum kalite faktörü grafiği.

Filtre derecelerinin yanı sıra alçak geçiren filtrelerin kesim frekansları da maksimum kalite faktörünü etkilemektedir. OptiSystem 7.0 simülasyon programında kesim frekansı, alçak geçiren filtrede varsayılan olarak $0.75 \cdot \text{Bit Rate}$ olarak atanmıştır. Çalışmanın bu aşamasında filtre dereceleri de göz önünde bulundurularak kesim frekansının maksimum kalite faktörü üzerindeki etkisi deneme yapılarak incelenmiştir.

Şekil 5.43'te yer alan grafikte, dördüncü derece alçak geçiren Bessel filtresinin varsayılan kesim frekansına göre maksimum kalite faktörü 645 iken, kesim frekansı $0.65 \cdot \text{Bit Rate}$ değerine geldiğinde maksimum kalite faktörü maksimum değeri almıştır. Elde edilen maksimum kalite faktörü değeri 796 olup, bu durumun %23'lük bir artış sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 5.43 Kesim frekansına göre maksimum kalite faktörü grafiği.

Birinci dereceden alçak geçiren Gaussian filtresi için varsayılan kesim frekansına göre maksimum kalite faktörü 257 olup, kesim frekansı $1,09 \cdot \text{Bit Rate}$ olarak kullanıldığında maksimum kalite faktörü 696 olmaktadır. %171'lik artış olmasına karşın yine de alçak geçiren Bessel filtresini geçememiştir.

İkinci dereceden alçak geçiren Butterworth filtresinde varsayılan kesim frekansı için maksimum kalite faktörü 243'tür. Kesim frekansı $0,7 \cdot \text{Bit Rate}$ olarak seçildiğinde maksimum kalite faktörü %37'lik bir artışla 332 olmaktadır.

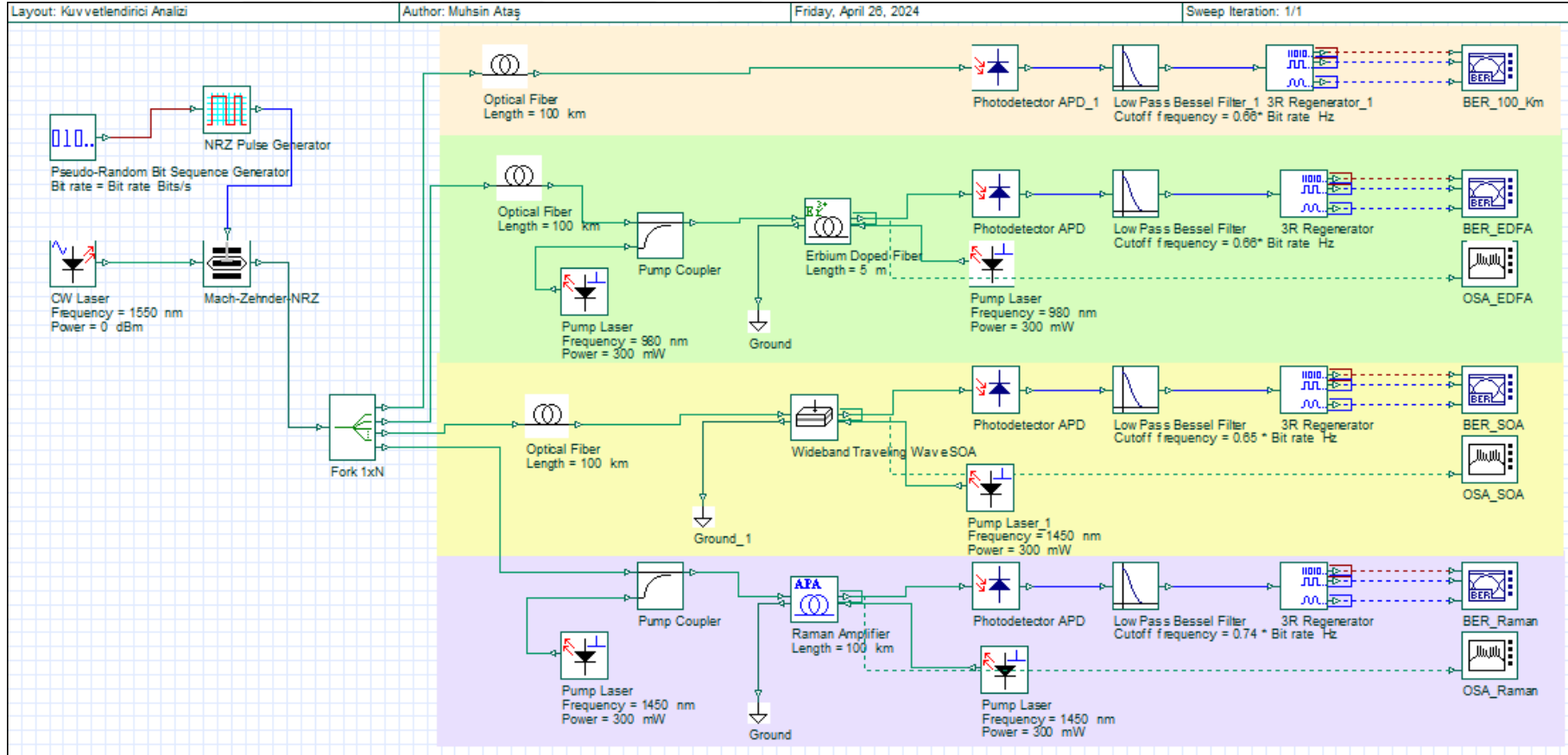
Son olarak birinci dereceden alçak geçiren Chebyshev filtresinde varsayılan ile maksimum kalite faktörünün çok yakın olduğu, her iki durumda da yaklaşık 255 olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak Şekil 5.39'da tasarlanan düzenek için yapılan filtre analizlerinden sonra en iyi sonucu alçak geçiren Bessel filtresi ile elde edilebileceği belirlenmiştir. Tasarlanan düzenek yapısına göre maksimum kalite faktörü değeri değişkenlikler gösterse bile genel olarak alçak geçiren Bessel filtre en iyi performansı sağlamaktadır.

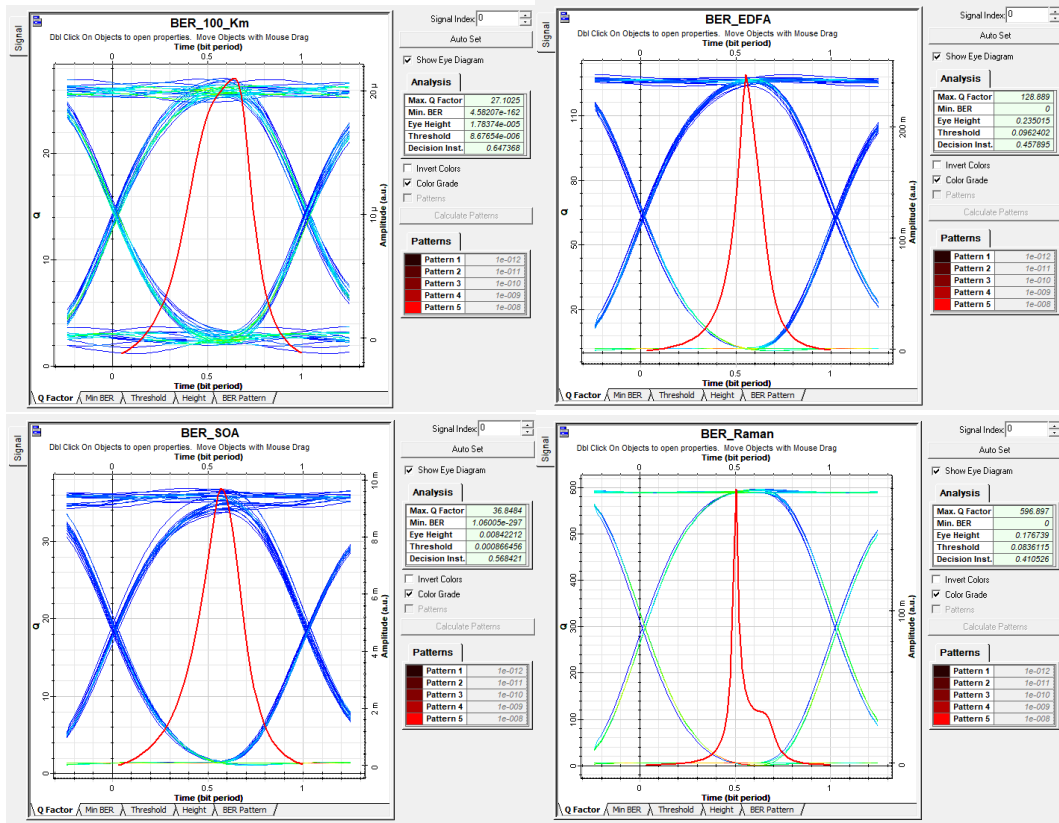
5.8 Kuvvetlendiricilerin Karşılaştırılması

Optik iletişim sistemlerinde, iletilen sinyallerin mesafesi arttığında ve yüksek hızlarda çalışıldığında artan zayıflamalar sinyallerde bozulmalara neden olmaktadır. Bozulan sinyallerin düzeltilmesi için iletim hatlarında kuvvetlendiriciler kullanılmaktadır. Bu bölümde, EDFA, SOA ve Raman kuvvetlendiricilerine ait 100 km'lik mesafe için performansların karşılaştırılması ve en iyi sonucu veren kuvvetlendirici için farklı mesafelere göre BER analizörü sonuçları ve maksimum kalite faktörü değerlerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

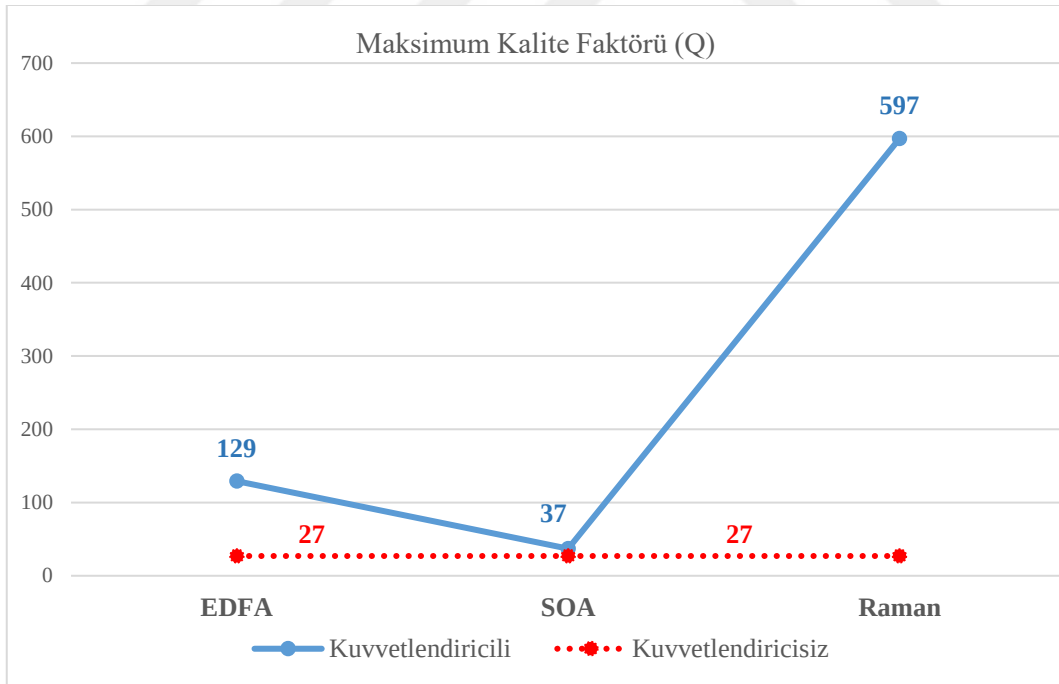
Şekil 5.44'te verilen referans düzenekte, 1 Gbps hızında PRB dizi üreticisi, NRZ darbe üreticisi, 1550 nm dalga boyunda CWL ve MZM ile tasarlanmış vericiden sinyal fork yapısı ile çoklanarak 100 km'lik mesafede bulunan APD ve alçak geçiren Bessel filtreden oluşan alıcılara iletilmektedir. Uzak mesafe olması nedeniyle sinyalde oluşan kayıplar kuvvetlendiricilerle telafi edilir. İlk düzenek kuvvetlendiricisiz olarak tasarlanmış sonra sırasıyla EDFA, SOA ve Raman kuvvetlendiriciler eklenerek karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.45'te kuvvetlendiricilere ait BER analizörü sonuçları yer almaktadır. Her dört durum için de göz diyagramlarının oluştuğu, sistemin iletişim sağlayabildiği görülmüştür. Şekil 5.46'da maksimum kalite faktörü değerleri analiz edildiğinde, ise kuvvetlendirici kullanılmadan 100 km'lik mesafeye sinyal gönderildiğinde maksimum kalite faktörü değerinin 27 olduğu, EDFA kuvvetlendirici ile kuvvetlendirildiğinde maksimum kalite faktörü değerinin 129'a yükseldiği belirlenmiştir. SOA kuvvetlendirici ile kuvvetlendirildiğinde maksimum kalite faktörünün 37 olduğu belirlenmiştir. Son olarak Raman kuvvetlendirici ile analiz yapıldığında maksimum kalite faktörü 597 değerine yükselmiştir. EDFA, SOA ve Raman kuvvetlendiricileri arasında yapılan analizlerde 100 km'lik mesafe için Raman kuvvetlendiricilerin en iyi performansı sunduğu, EDFA kuvvetlendiricilerin de etkili olduğu ama Raman kuvvetlendiricilere göre düşük kaldığı, SOA kuvvetlendiricilerin ise bu mesafe için doğru bir seçim olamayacağı sonuçlarına varılmıştır.



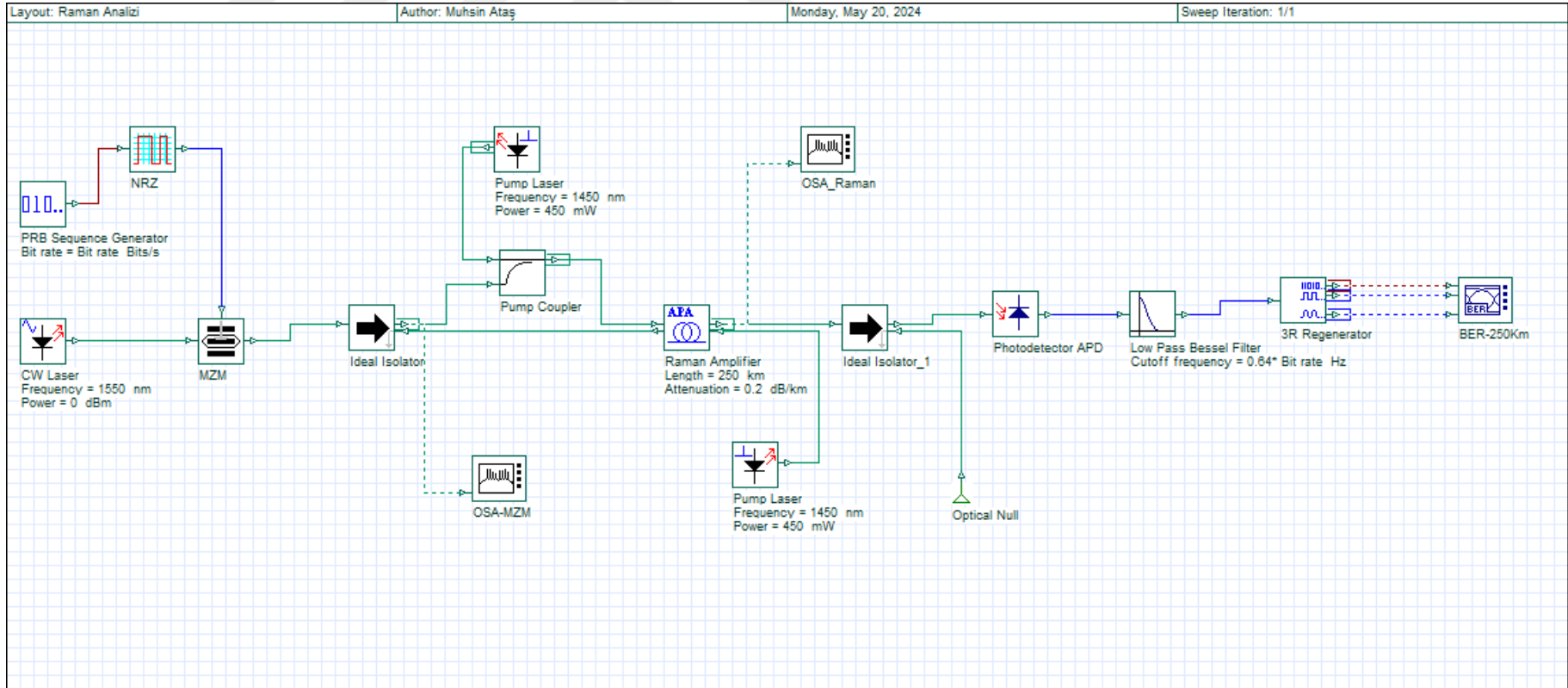
Şekil 5.44 Kuvvetlendiricilerin karşılaştırılması için tasarlanan referans düzenek.



Şekil 5.45 Kuvvetlendiricilere ait BER analizörü sonuçları.



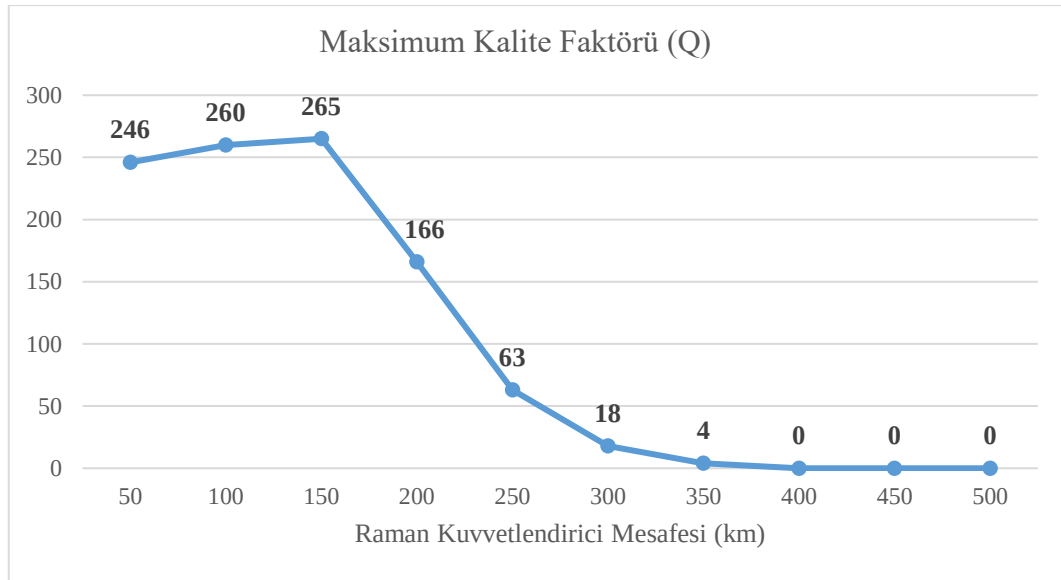
Şekil 5.46 Kuvvetlendiricili ve kuvvetlendiricisiz olarak elde edilen maksimum kalite faktörü grafiği.



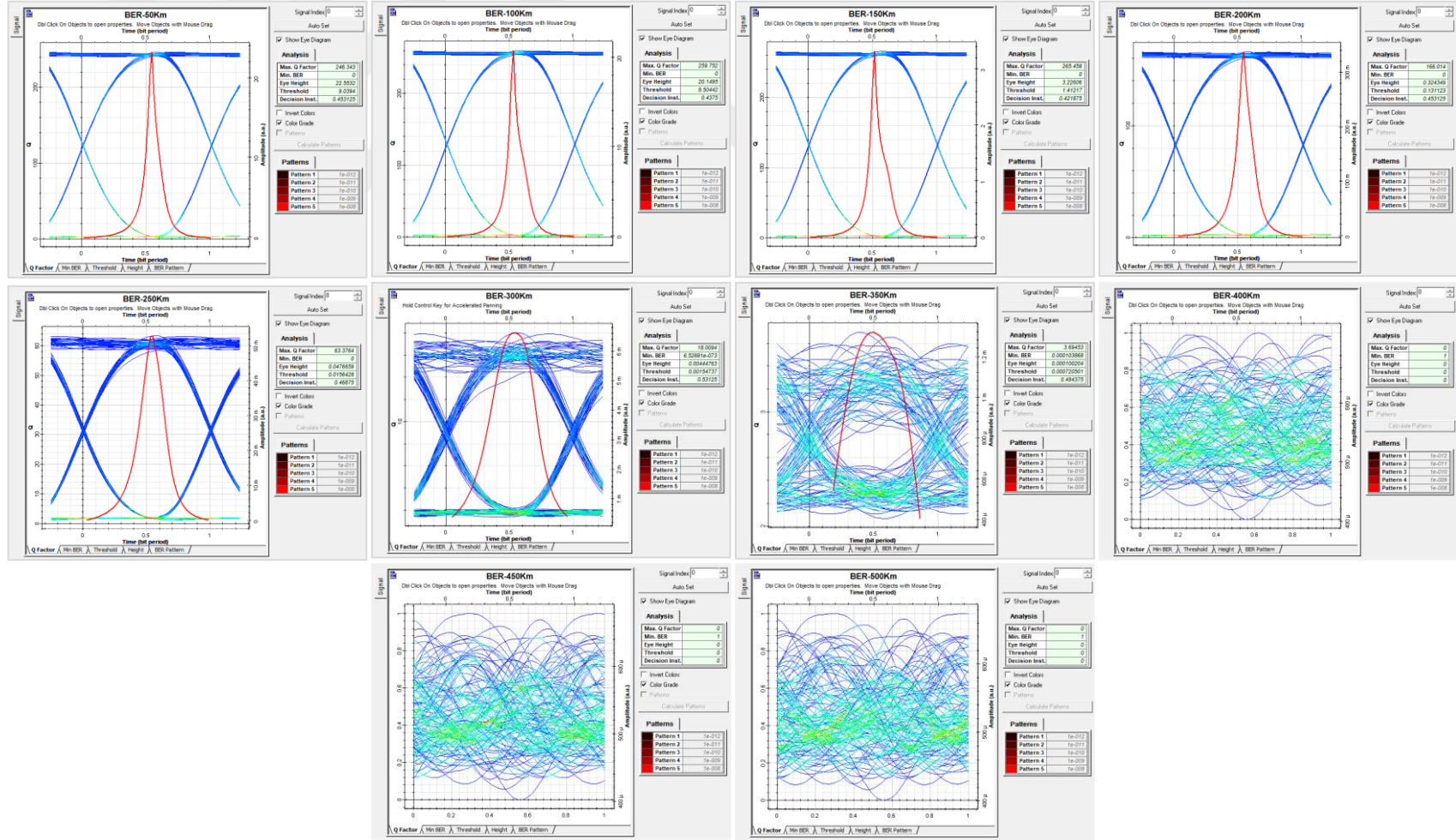
Şekil 5.47 Raman kuvvetlendiricinin mesafeye göre performans analizi için tasarlanan referans düzenek.

Raman kuvvetlendiricilerin uzun mesafe için sergilediği performansları incelemek amacıyla Şekil 5.44'teki referans düzeneğinden hareketle, Şekil 5.47'deki düzenek tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni düzenekte, raman kuvvetlendirici pompa lazer gücü sinyal kalitesini arttırabilmek amacıyla 300 mW'tan 450 mW'ta yükseltilmiştir. Sırasıyla tek parçalı olarak 50 km, 100 km, 150 km, 200 km, 250 km, 300 km, 350 km, 400 km, 450 km ve 500 km uzunluklardaki katkılanmış fiber kablolarla Raman kuvvetlendiricilere ait BER analizörü sonuçları ve maksimum kalite faktörü değerleri irdelenmiştir.

Şekil 5.48'de Raman kuvvetlendiricinin mesafeye göre maksimum kalite faktöründeki değişim grafiği ve Şekil 5.49'da Raman kuvvetlendiricinin mesafelere göre elde edilen BER analizörü sonuçlarına verilmiştir. Raman kuvvetlendiriciler tek parçalı olarak 350 km'ye kadar sinyali ilettiği belirlenmiştir. Maksimum kalite faktörü için sırasıyla 50 km'de 246 değeri, 100 km'de 260 değeri, 150 km'de en büyük değer olan 265 değeri, 200 km'de 166 değeri, 250 km'de 63 değeri, 300 km için 18 değeri ve 350 km için en düşük değer olan 4 değeri alınmıştır. 400 km, 450 km ve 500 km mesafeleri için veri iletimi sağlanamamıştır. Sonuç olarak, uzak mesafeler için en iyi performansı sunan Raman kuvvetlendiricilerle tek parça halinde 350 km'ye kadar sinyal iletiminin mümkün olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.48 Raman kuvvetlendiricinin 1550 nm için maksimum kalite faktörünün mesafeye göre değişim grafiği.



Şekil 5.49 Raman kuvvetlendiricinin mesafelere göre elde edilen BER analizörü sonuçları.

6

OPTİK AĞ UYGULAMALARI

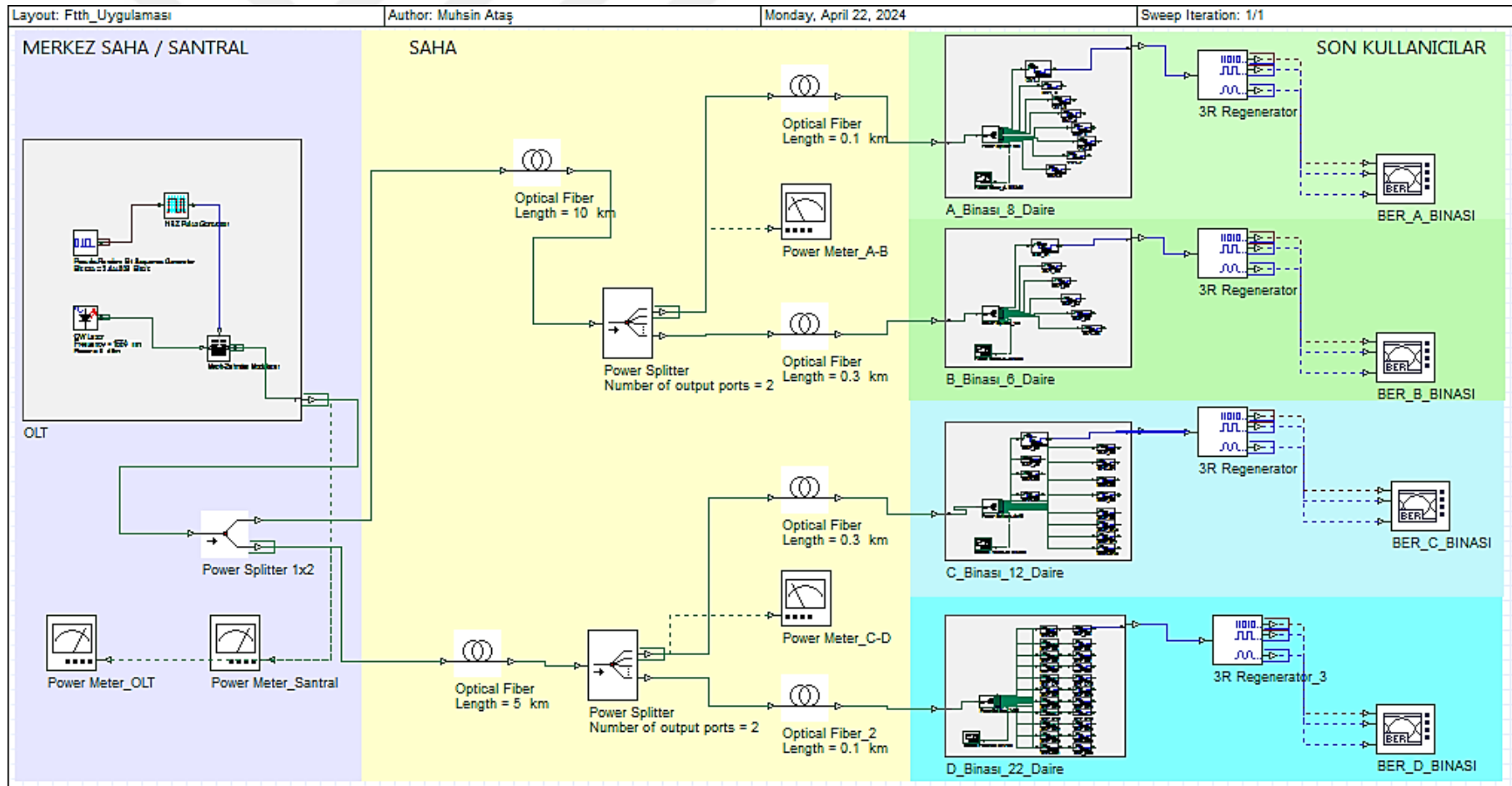
Bu bölümde, 5. Bölüm’de elde edilen en iyi performanslardan yola çıkılarak P2MP içinden FTTH uygulamasının ve P2P içinden de WDM uygulamasının yapılması amaçlanmıştır. Çalışılacak dalga boyu her iki uygulama için de 1550 nm seçilmiştir ve WDM uygulamasında 1565 nm ile 1580 nm dalga boyları ilave edilmiştir. Hız ve mesafe arttıkça sinyal kalitesinin düştüğü bilgisi ışığında, FTTH uygulaması için günümüz teknolojisine uygun olması açısından 2,4 Gbps hızı ile 5 km ve 10 km mesafe seçilmiştir. P2P uygulaması için ise 10 Gbps hızı ile 450 km, 500 km ve 600 km mesafeleri üzerinde çalışılmıştır. Her iki uygulama için de darbe üretici olarak NRZ, modülatör olarak MZM, lazer olarak CWL, fotodedektör olarak APD ve filtre olarak da alçak geçiren Bessel filtresi kullanılmıştır.

Bu bölümde ilave olarak FTTH uygulamasında son kullanıcıya sinyallerin dağıtılması için optik güç bölücüler (power splitters), P2P uygulamasında Raman kuvvetlendiricilerden sistemlerin etkilenmemesi için izolatörlerden yararlanılmıştır.

6.1 FTTH Uygulaması

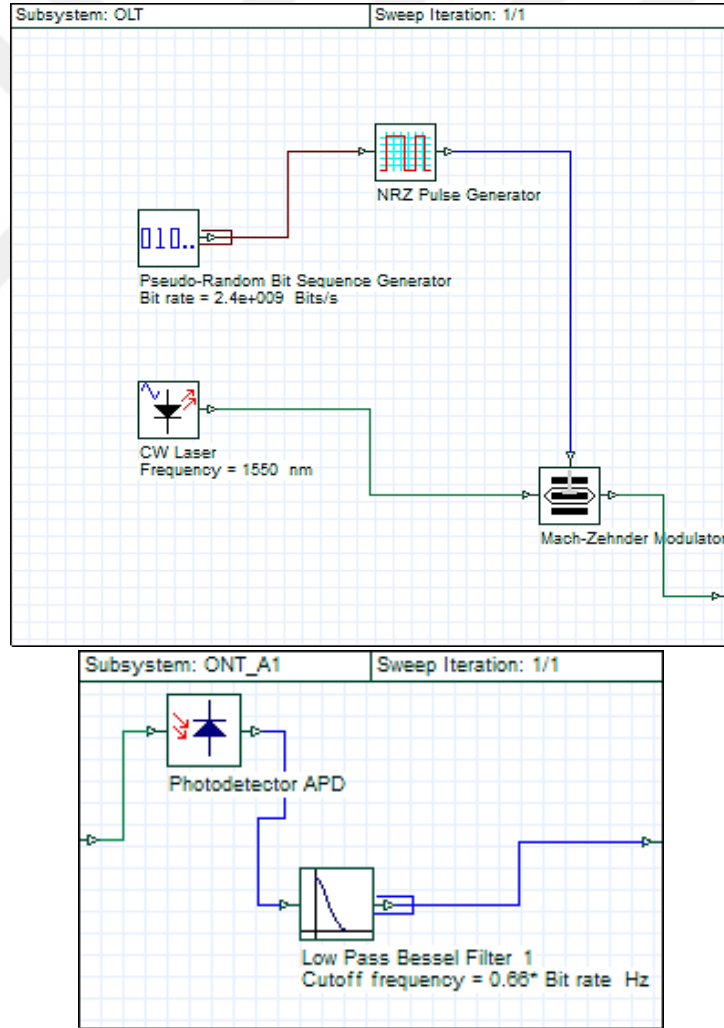
FTTX uygulamalarında fiber optik kablo aşamalı olarak son kullanıcıya kadar yakınsanmıştır. Günümüzde son kullanıcının artan band genişliğinin karşılanabilmesi amacıyla, fiber optik kablolu erişim evlere kadar erişmektedir. Telekomünikasyon şirketleri yatırımlarını bu yönde değerlendirmektedir. Bu bölümde, eve kadar fiber uygulaması modelleneyecektir. Merkez santralden çıkan fiber optik kablolar optik bölücülerle bölünerek son kullanıcıların evlerine kadar ulaşmaktadır.

Şekil 6.1’de tasarlanan düzenekte merkez ofiste 2,4 Gbps hızında sinyal üreten vericiden (OLT) çıkan sinyaller 1x2 optik bölücü ile bölünerek sahaya, oradan da A, B, C ve D binalarında bulunan son kullanıcılara iletilmektedir. Santralden ikiye ayırma her ne kadar sahada daha fazla fiber kablo çekilmesine sebep olacak olsa da verici sinyalin farklı bölgelere dağıtılabilmesi açısından esneklik sağlamaktadır. Ayrıca karşılaşılabilecek olası kapasite artışlarına da ön hazırlık olmaktadır.

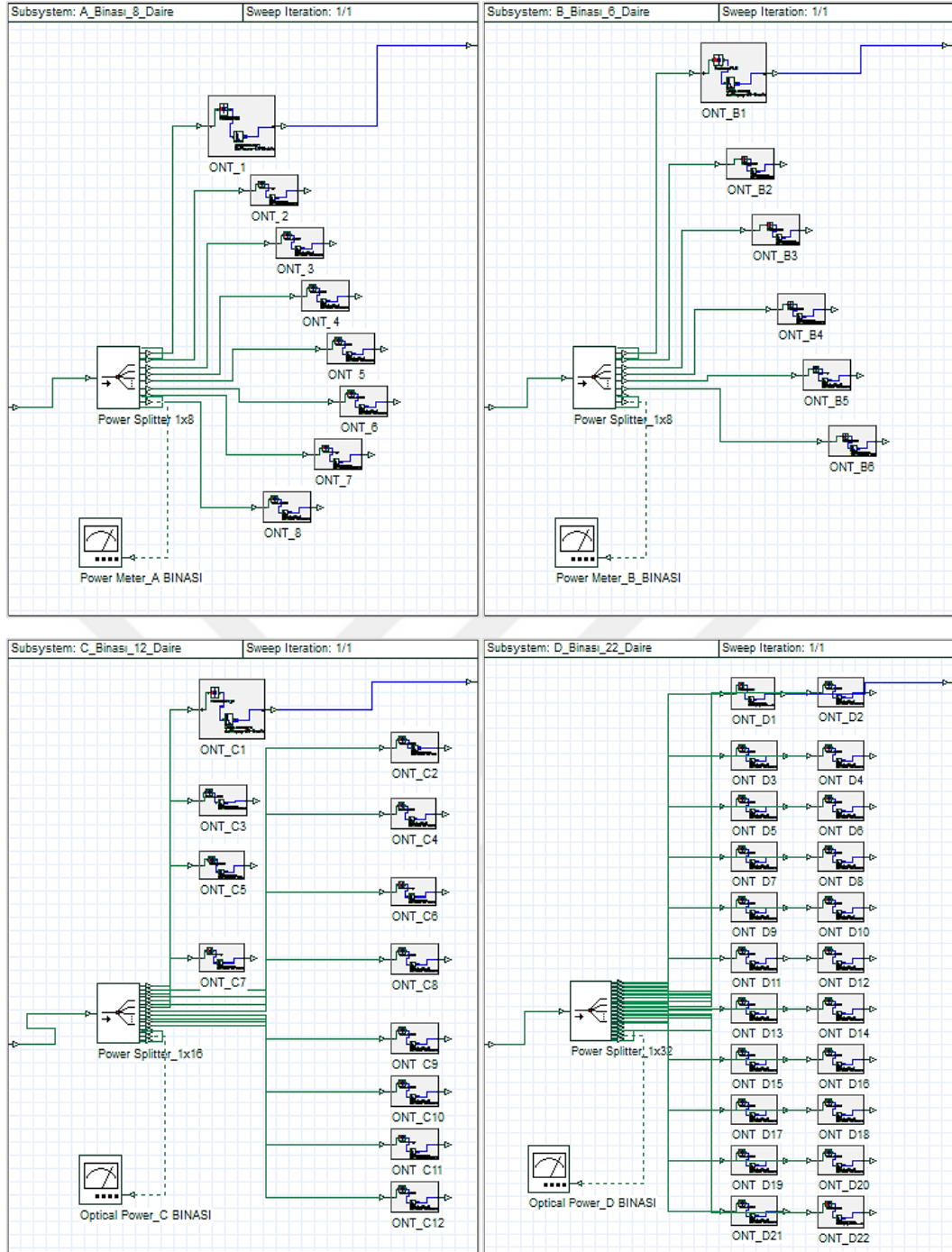


Şekil 6.1 Tasarlanan referans FTTH modeli.

Şekil 6.2’de yer alan vericiden iletilen sinyalin biri 5 km, diğeri 10 km uzaklıkta bulunan iki farklı yöne gönderildiği varsayılmıştır. 5 km’lik yöne gönderilen sinyal sahada tekrar 1x2 bölücü ile bölünerek bu kez 300 m uzaklıktaki C binasına ve 100 m uzaklıkta bulunan iki farklı binaya iletilmiştir. Modelde C ve D binaları olarak gösterilen binalardan C binası 12 daire ve D binası ise 22 daire olarak kurgulanmıştır. Dolayısıyla C binasına 1x16 kapasiteli ve D binasına da 1x32 kapasiteli optik bölücü bağlanmıştır. 10 km’lik yöne gönderilen sinyal de sahada tekrar 1x2 bölücü ile bölünerek 100 m uzaklıktaki A binasına ve 300 m uzaklıktaki B binasına iletilmektedir. A binası 8 daire ve B binası 6 daire olarak modellendiğinden her iki bina için de 1x8 splitter kullanılmıştır. Binalara ait detaylar Şekil 6.3’te bulunmaktadır. Modellenen bu yapıda her bir binadan elde edilen BER analizörü sonuçları ile optik zayıflama değerleri analiz edilmiştir.

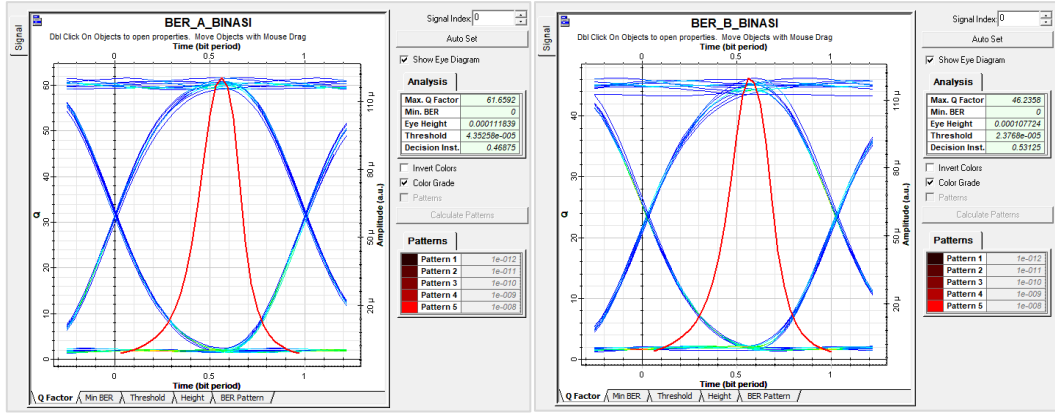


Şekil 6.2 Tasarlanan referans FTTH düzeneğinde bulunan verici (OLT) ve alıcı (ONT) detayı.

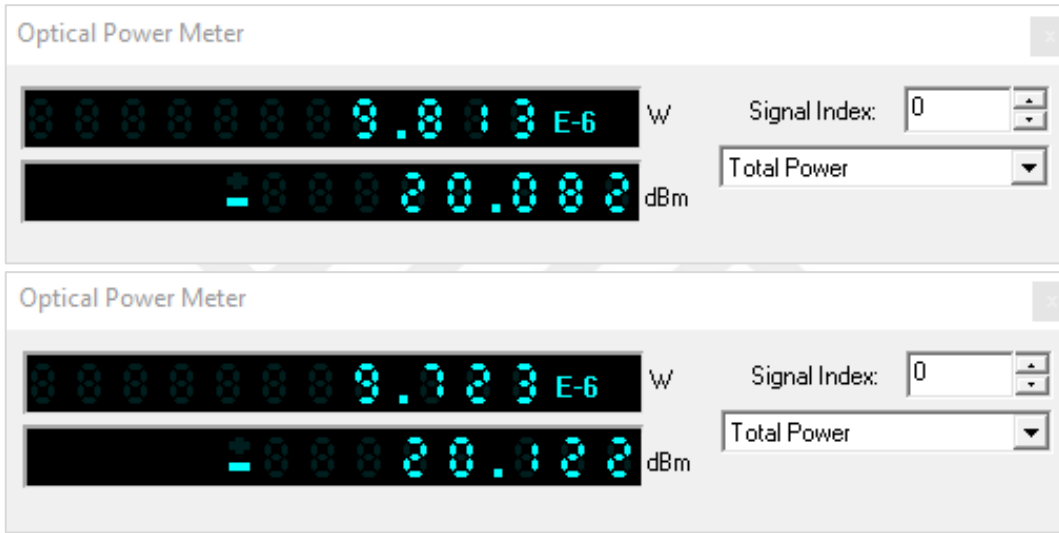


Şekil 6.3 Tasarlanan referans FTTH düzeneğinde bulunan A, B, C ve D binalarının detayları.

Şekil 6.4'te A ve B binalarında bulunan ONT çıkışlarına ait BER analizörü sonuçları bulunmaktadır. Göz diyagramları açıklığının net olduğu ve maksimum kalite faktörü değerlerine ait grafiğin beklenildiği gibi, yarım sinüs alternansına benzer formda düzgün olduğu görülmektedir.



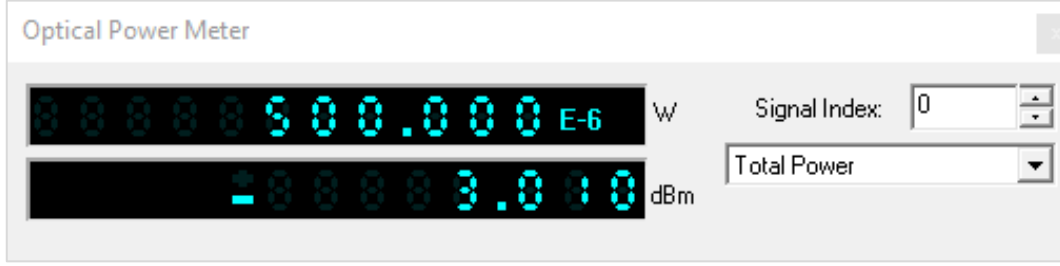
Şekil 6.4 A (solda) ve B (sağda) binalarına ait BER analizörü sonuçları.



Şekil 6.5 A (üstte) ve B (altta) binalarındaki kullanıcılara ait zayıflama değerleri.

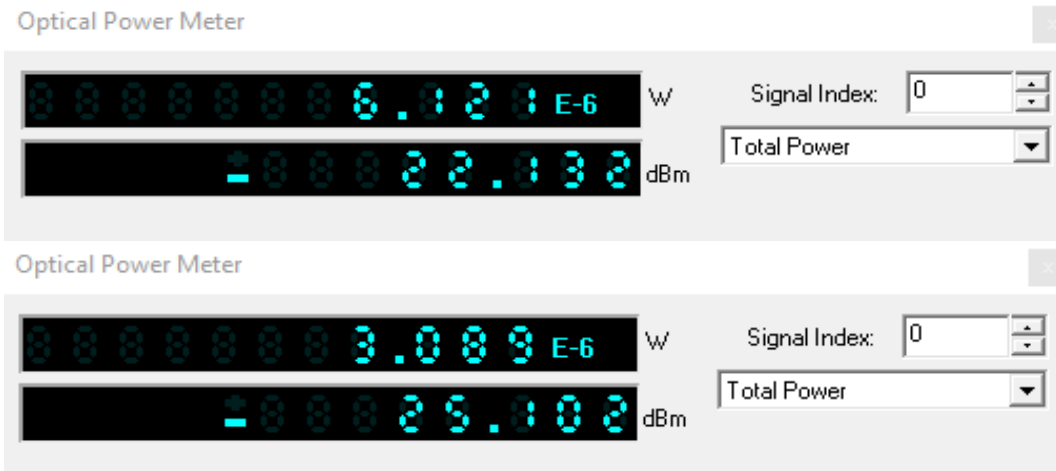
Şekil 6.5'te A ve B binalarında bulunan optik bölücü çıkışlarına ait zayıflama değerlerine ait optik güç ölçer (Optical Power Meter, OPM) sonuçları bulunmaktadır. Güç bütçesi hesabı yapılacak olursa, merkez ofise olan toplam mesafeye bakıldığında A binası 10,1 km ve B binası 10,3 km uzaklıkta bulunmaktadır. Her iki binadaki kullanıcılar merkez ofise kadar, santralde 1x2, sahada 1x2 ve bina altında 1x8 bölünme ile toplamda 1x32 bölünme ile erişim sağlamaktadır. Şekil 6.6'da santralde bulunan OLT çıkışına ait zayıflama değerinin -3 dBm olduğu ölçülmüştür. Her 1x2'lik bölünme -3 dBm kayıp getirdiğinden dolayı 1x32 bölünmenin toplam zayıflama değeri -15 dBm olmaktadır. Fiber optik kablunun zayıflaması 0.2 dBm/km olduğundan yaklaşık 10 km olan mesafeden dolayı -2 dBm'lik kayıp eklenir. Konnektör ve diğer bağlantı zayıflamaları ihmal

edildiğinde yaklaşık toplam kayıp A ve B binasındaki kullanıcılar için -20 dBm olup OPM ile ölçülen değerlerle örtüşmektedir.

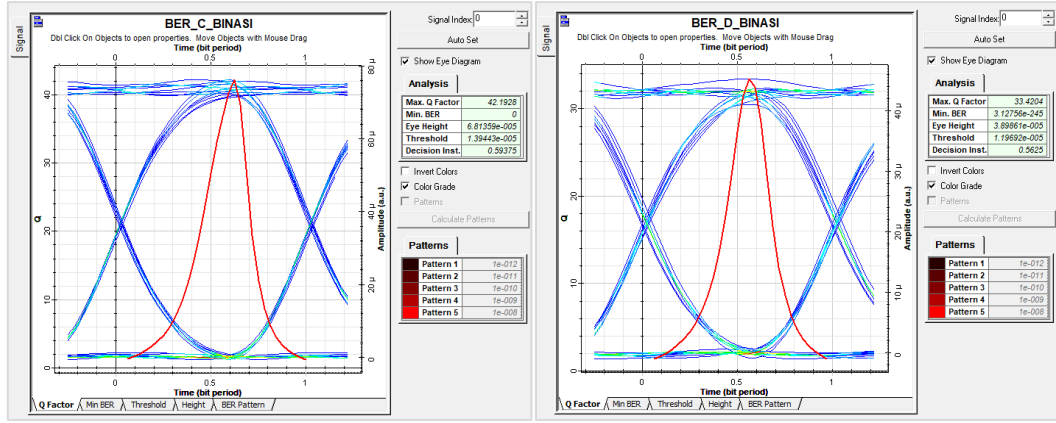


Şekil 6.6 OLT çıkışındaki güç kaybı.

Güç hesabı işlemleri, C ve D binalarındaki kullanıcılar için de yapılabilir. Her iki bina için de OLT çıkışı -3 dBm ve fiber optik kablo zayıflaması yaklaşık -1 dBm'dir. C binasındaki kullanıcılar santralde 1x2, sahada 1x2 optik bölücü ile bölündükten sonra binada 1x16 olmak üzere toplamda 1x64'lük bölünme ile erişim sağlamaktadır. 1x64'lük bölünme 6 kez 1x2 bölünme anlamına gelir ve her 1x2 bölünme -3 dBm kayıp olduğundan C binasındaki kullanıcılar bölünmeden dolayı -18 dBm'lik zayıflamaya maruz kalırlar. Toplamda hesaplanan -22 dBm'lik zayıflama Şekil 6.7'deki sonuç ile uyumludur. D binasındaki kullanıcılar ise altındaki 1x32'lik bölücüden dolayı ilave bir bölünmeye daha uğramış ve merkez ofisten itibaren toplamda 1x128 bölünme ile erişim sağlanmaktadır. Dolayısı ile toplam zayıflama değerine -3 dBm'lik bir ek zayıflama gelerek toplamda -25 dBm'lik zayıflamaya ulaşmıştır. Toplamda hesaplanan -25 dBm'lik zayıflama Şekil 6.7'deki OPM sonuçları ile uyumludur.



Şekil 6.7 C (üstte) ve D (altta) binalarındaki kullanıcılara ait zayıflama değerleri.



Şekil 6.8 C (solda) ve D (sağda) binalarına ait BER analizörü sonuçları.

Şekil 6.8’de C ve D binalarında bulunan ONT çıkışlarına ait BER analizörü sonuçları bulunmaktadır. Göz diyagramları açıklığının net olduğu ve maksimum kalite faktörü değerlerine ait grafiğin düzgün olduğu görülmektedir.

Tablo 6.1 A, B, C ve D binalarındaki kullanıcıların mesafe, bölünme sayısı ve maksimum kalite faktörü değerleri tablosu.

Bina Adı	Mesafe (km)	Bölünme Sayısı	Maksimum kalite faktörü (Q)
A Binası	10,1	32	62
B Binası	10,3	32	46
C Binası	5,3	64	42
D Binası	5,1	128	33

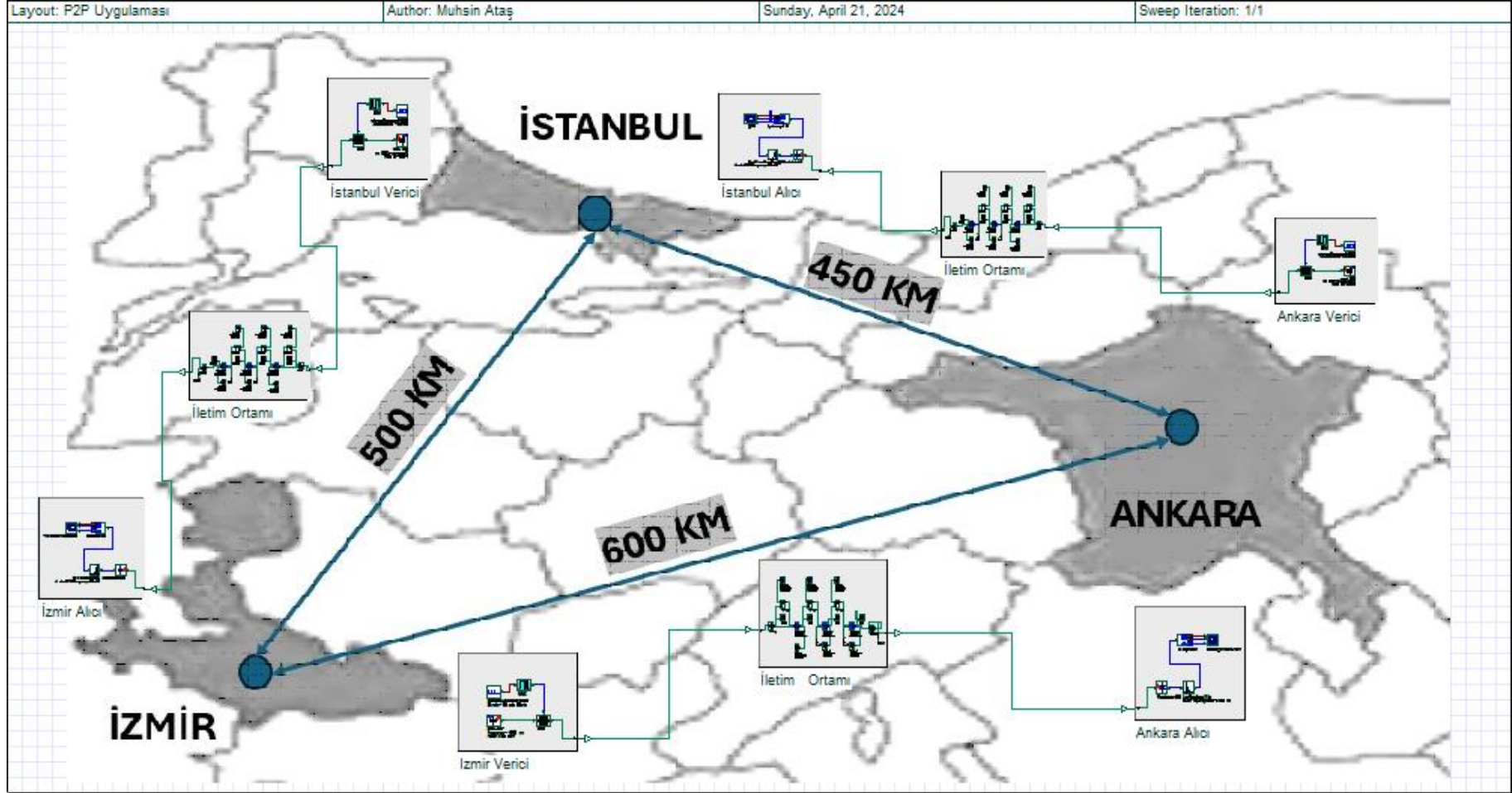
Tablo 6.1’de A, B, C ve D binalarındaki kullanıcıların mesafe, bölünme sayısı ve maksimum kalite faktörü değerleri verilmiş olup bölünme sayısının mesafeye göre zayıflatmada daha etkin olduğu ve aynı bölünme oranında ise mesafe arttıkça maksimum kalite faktörü değerinin düştüğü belirlenmiştir.

6.2 P2P Uygulaması

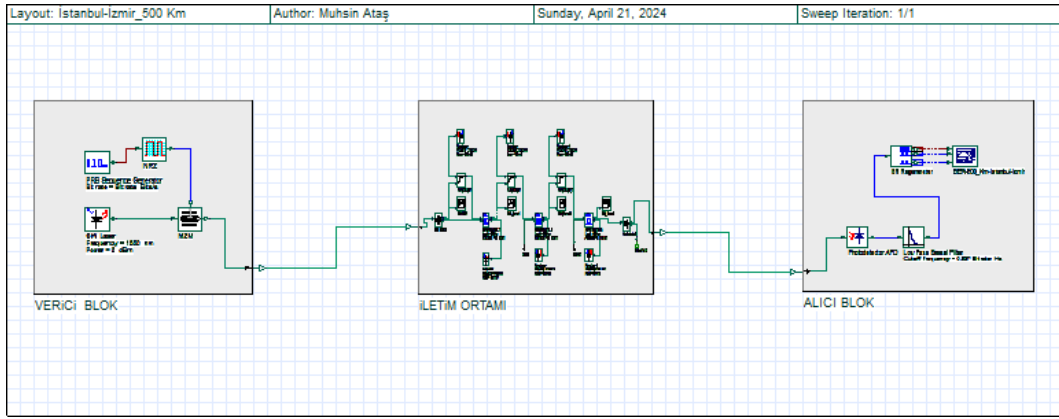
P2P (Point to Point, noktadan noktaya) optik bağlantılarda, son kullanıcılara yüksek kapasitede ve güvenilirlikte veri iletimi gerçekleştirilmesi ve kullanıcıların diğer kullanıcı trafiğinden etkilenmeden hizmet alabilmesi için her kullanıcıya özel bir optik hat sunulmaktadır. İletim hatlarının uzak mesafelerdeki noktaları arasındaki haberleşmeler de noktadan noktaya kabul edilebilir.

FTTH uygulamasında nispeten yakın mesafede bulunan ancak aynı hattın birden çok kullanıcıya bölünmesi incelenmiştir. Burada, uzak mesafede yer alan noktalar arasındaki bağlantı modellenenecektir. İstanbul, İzmir ve Ankara illerinde bulunan noktalar arasında 10 Gbps hızında iletimin sağlanması amaçlanmıştır. Yapılan hesaplamalarda İstanbul ile İzmir illeri arası yaklaşık olarak 500 km, İzmir ile Ankara arası yaklaşık olarak 600 km ve Ankara ile İstanbul arası yaklaşık olarak 450 km olarak kabul edilmiştir. İller arası tek yönlü olarak verici ve alıcılar Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Her bir il için Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de verilen verici, iletim ortamı ve alıcı blokları tasarlanmıştır. Şekil 6.13’te vericiye, Şekil 6.14’te de alıcıya ait detay tasarımlar görülmektedir.

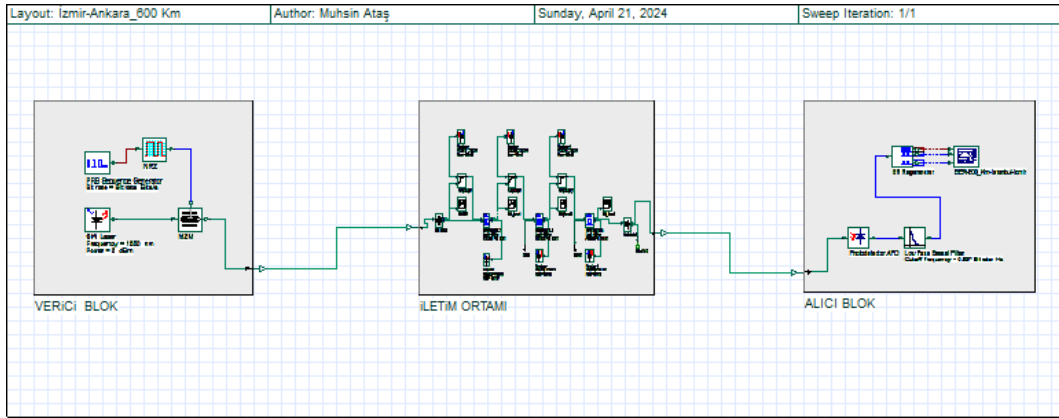
İletilen sinyaller, uzak mesafe ve yüksek hız nedeniyle zayıflamaktadır. Dolayısıyla tasarlanan düzeneğin iletim kısmında kuvvetlendirici kullanılma ihtiyacı doğmaktadır ve Raman kuvvetlendiricisi ile sinyallerin uzak mesafelere iletilmesi sağlanmaktadır. 600 km, 500 km ve 450 km mesafeleri için tek parça halinde Raman tasarlandığında ileri ve geri lazer pompalamaların yetersiz kaldığı belirlenmiş olup bu çalışmada kaskat bağlantılar uygulanmıştır. Bölüm 5.8’de en iyi performansı 150 km’lik fiber uzunlukla sağlanmasında dolayı, 600 km’lik İzmir ile Ankara arası dört defa 150 km’lik Raman kuvvetlendiricili fiber kaskat bağlanarak modellenmiştir. 500 km’lik İstanbul ile İzmir arası üç defa 150 km’lik ve bir defa 50 km’lik Raman kuvvetlendiricili fiber ile modellenmiştir. 450 km’lik Ankara ile İstanbul arası üç defa 150 km’lik Raman kuvvetlendirici fiber ile modellenmiştir. Şekil 6.15’te yer alan Raman kuvvetlendirici yapısında ileri ve geri yönde 1450 nm dalga boyunda 450 mW gücünde lazer pomplayıcılar kullanılmıştır. Ayrıca kuvvetlendiricilerden dolayı vericinin ve alıcının zarar görmemesi için iletim ortamının başında ve sonunda izolatör kullanılarak sistemin olumsuz etkilenmesi engellenmiştir.



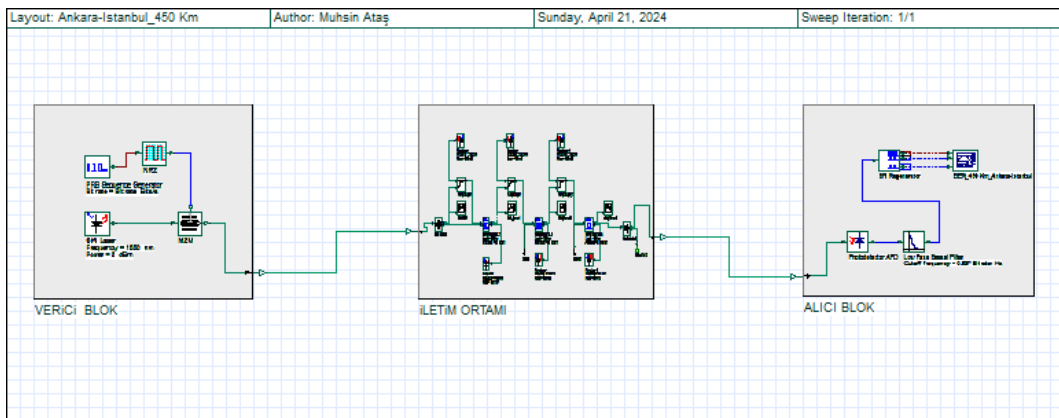
Şekil 6.9 İstanbul, İzmir ve Ankara illerinde bulunan noktalar için tasarlanan referans model.



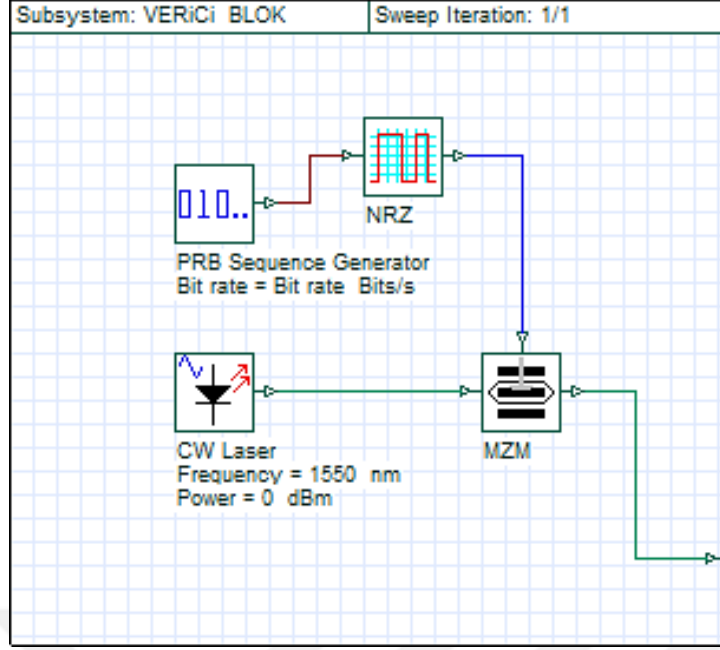
Şekil 6.10 İstanbul ile İzmir illeri için tasarlanan verici, iletim ve alıcı blokları.



Şekil 6.11 İzmir ile Ankara illeri için tasarlanan verici, iletim ve alıcı blokları.

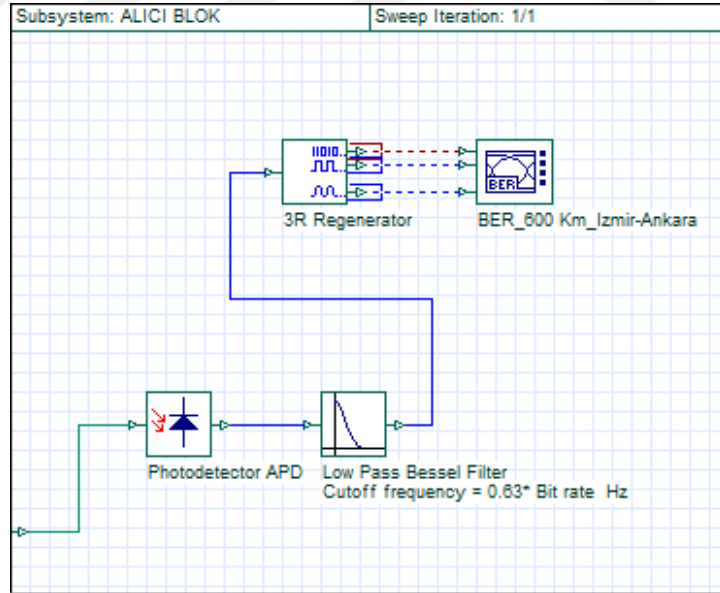


Şekil 6.12 Ankara ile İstanbul illeri için tasarlanan verici, iletim ve alıcı blokları.



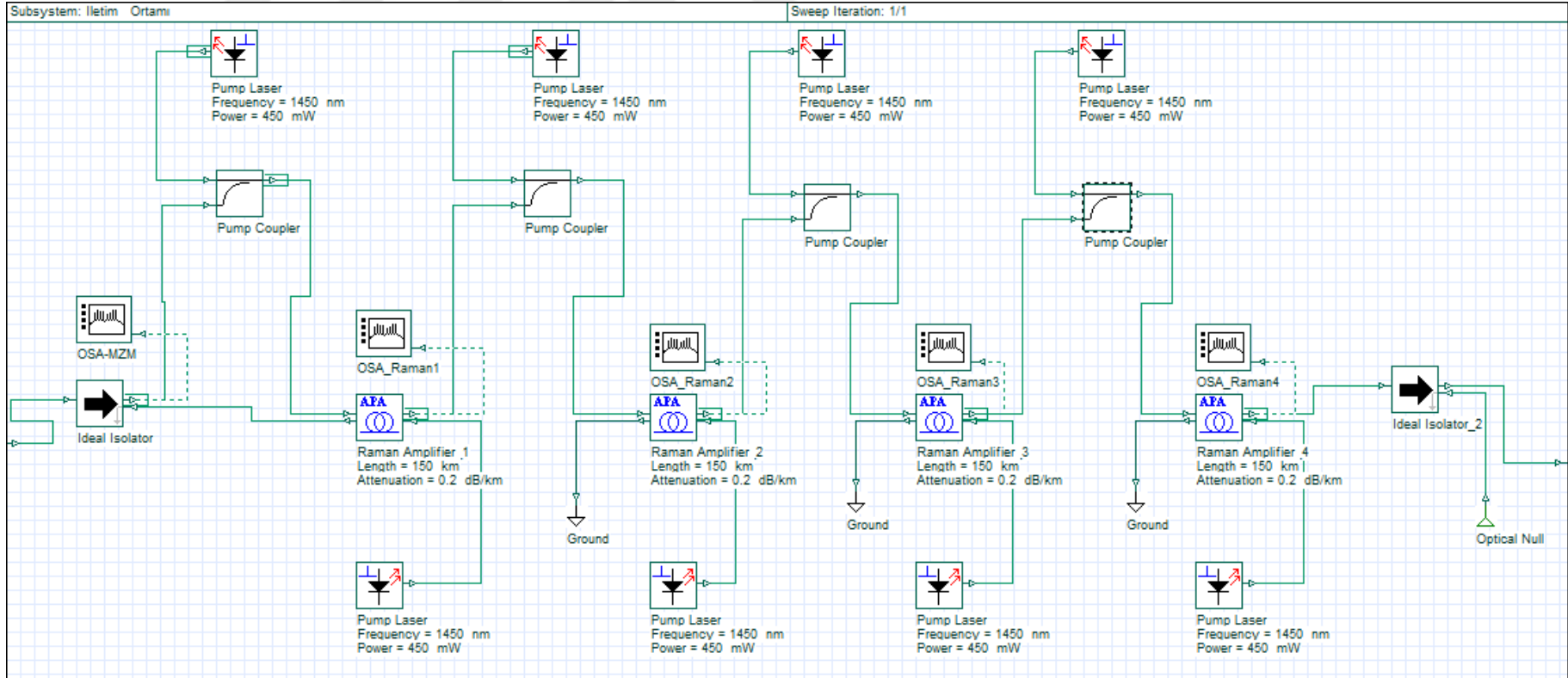
Şekil 6.13 Tasarlanan verici blok detayı.

Şekil 6.13'te 10 Gbps hızında PRB dizi üreticisi, NRZ darbe üreticisi, MZM ve 1550 nm dalga boyuna sahip CW lazerin oluşturduğu vericiye ait detay görülmektedir.

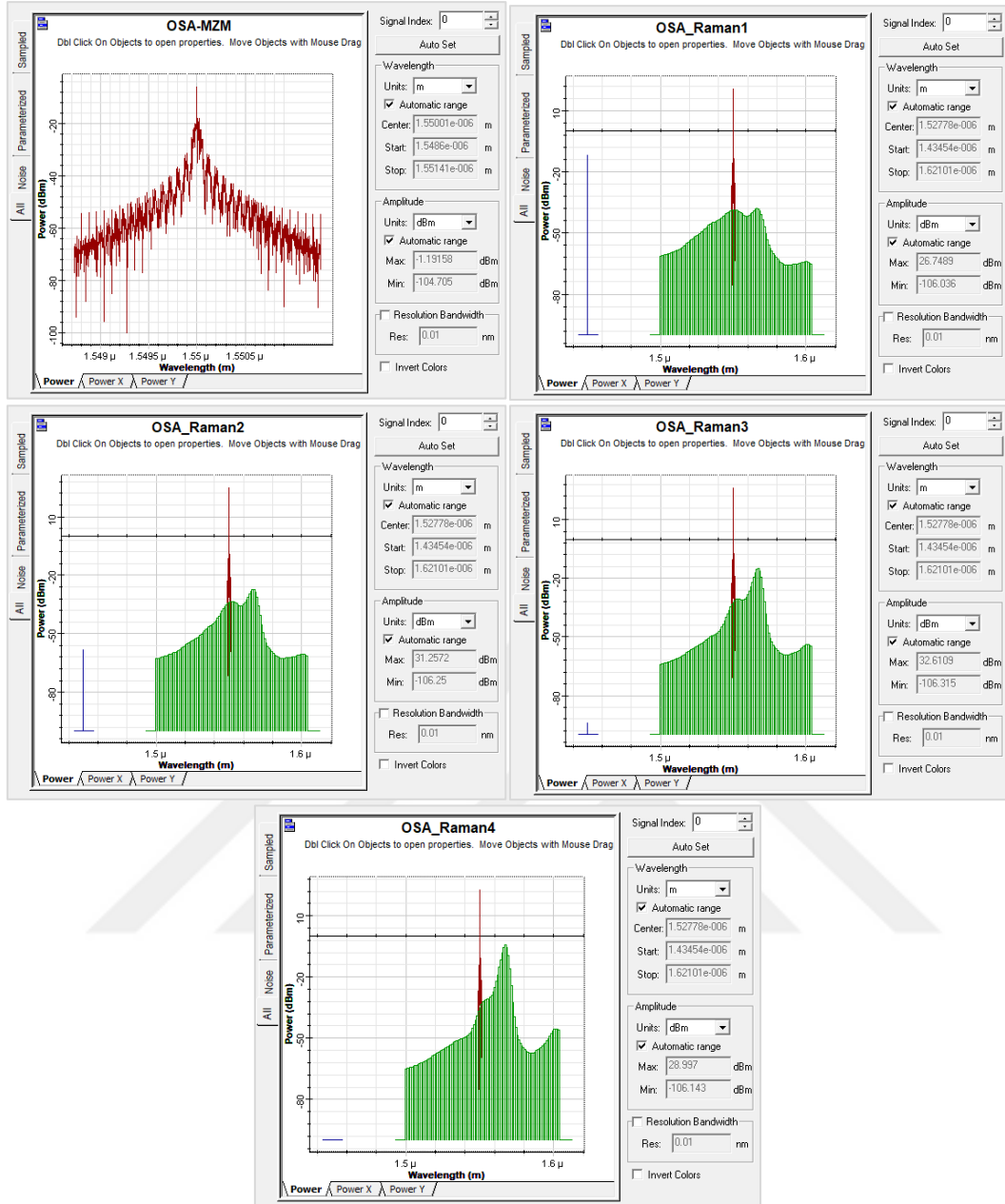


Şekil 6.14 Tasarlanan alıcı blok detayı.

Şekil 6.14'te APD ve alçak geçiren Bessel filtrenin oluşturduğu alıcıya ait detay tasarım yer almaktadır. Burada, alıcıda elde edilen sonuçların analizi için BER analizör kullanılmıştır.



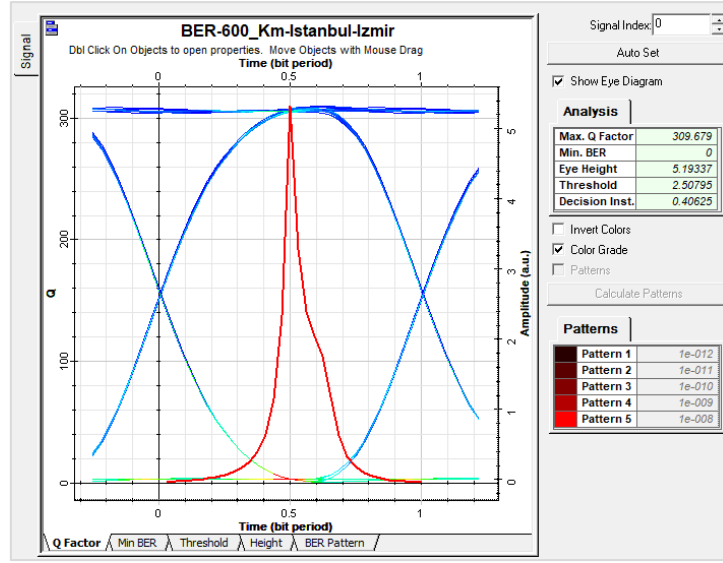
Şekil 6.15 Tasarlanan 600 km'lik iletim ortamı blok detayı.



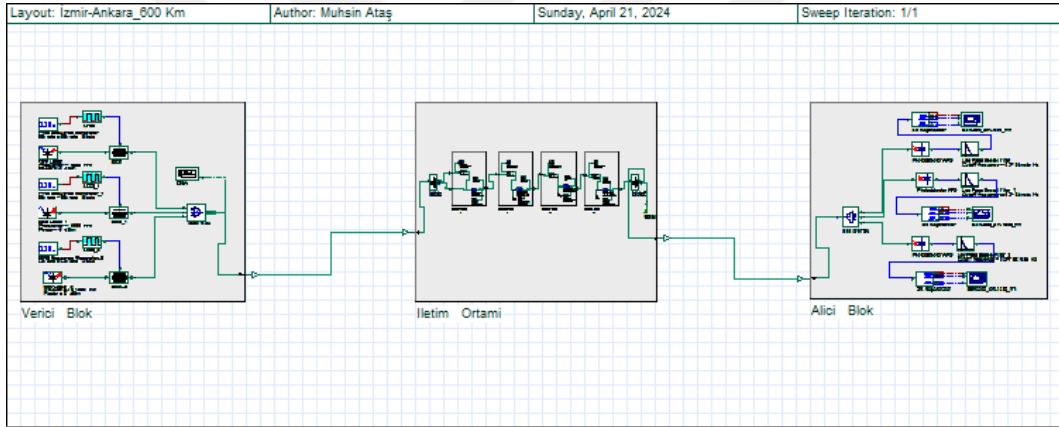
Şekil 6.16 600 km'lik İzmir ile Ankara düzeneğine ait OSA sonuçları.

Şekil 6.16'da 600 km'lik İzmir ile Ankara arasında kullanılan MZM ve Raman kuvvetlendiricilerin çıkışına bağlanan OSA'lara ait sonuçlar bulunmaktadır. İletim ortamı boyunca üç defa kuvvetlendirilen sinyal alıcı tarafına ulaştırılmaktadır.

Şekil 6.17'de 600 km'lik İzmir ile Ankara düzeneğinin alıcı tarafında elde edilen BER analizörü sonucu yer almaktadır. Göz diyagramında, göz açıklığının net olduğu, maksimum kalite faktörünün 310 olduğu ve 10 Gbps hızındaki sinyalin 600 km'ye iletildiği belirlenmiştir.

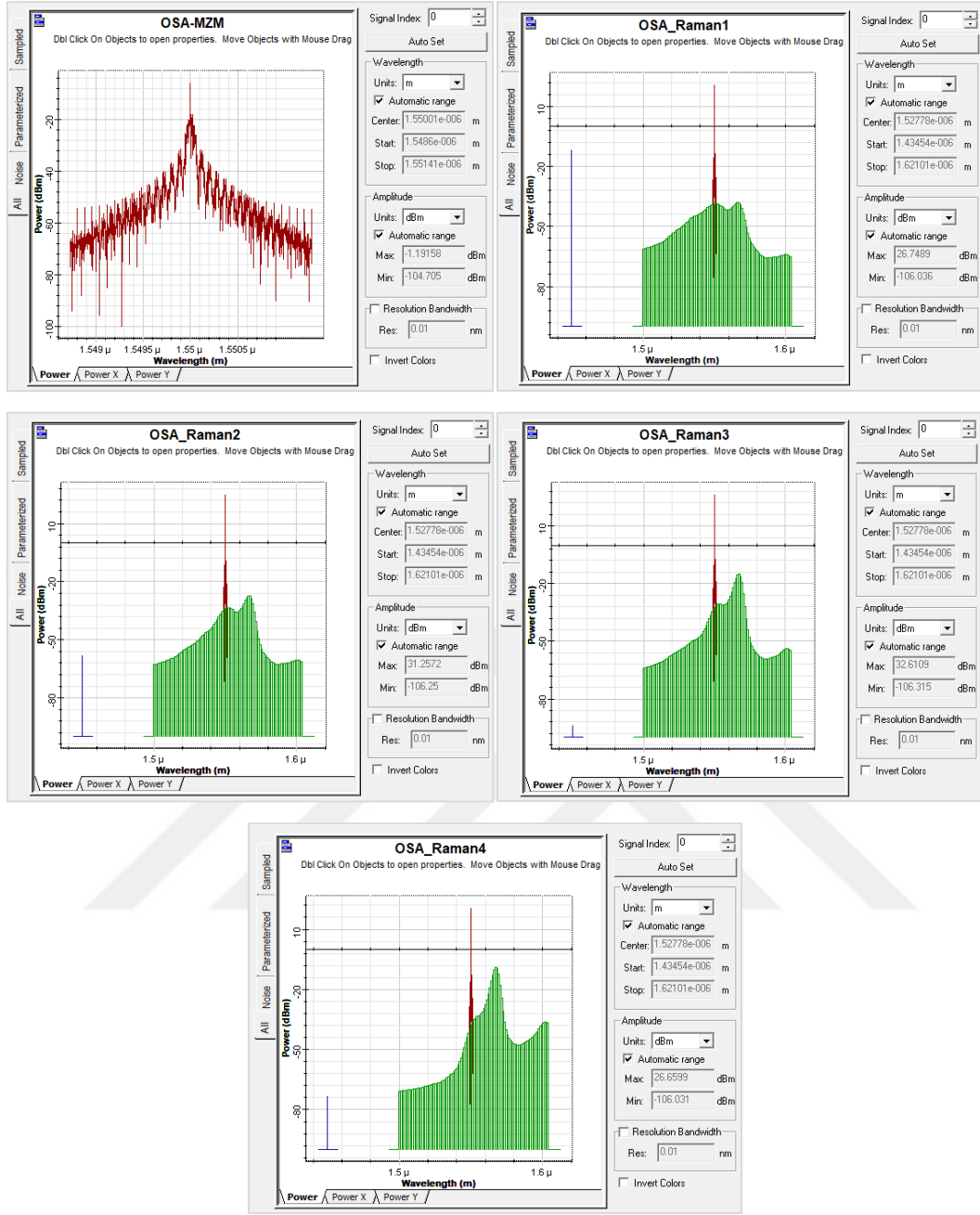


Şekil 6.17 600 km'lik İzmir ile Ankara düzeneğine ait BER analizörü sonucu.



Şekil 6.18 Tasarlanan 500 km'lik iletim ortamına ait verici, iletim ve alıcı blokları.

İstanbul ile İzmir arası referans düzeneğe yer alan Raman kuvvetlendirici fiber mesafesi toplamda 500 km olarak Şekil 6.18'de modellenmiştir. Şekil 6.19'da MZM ve Raman kuvvetlendiricilerin çıkışına bağlanan OSA'lara ait sonuçlar bulunmaktadır. İletim ortamı boyunca üç defa 150 km'lik ve bir defa da 50 km'lik Raman kuvvetlendirilen sinyal alıcı tarafına ulaştırılmaktadır.

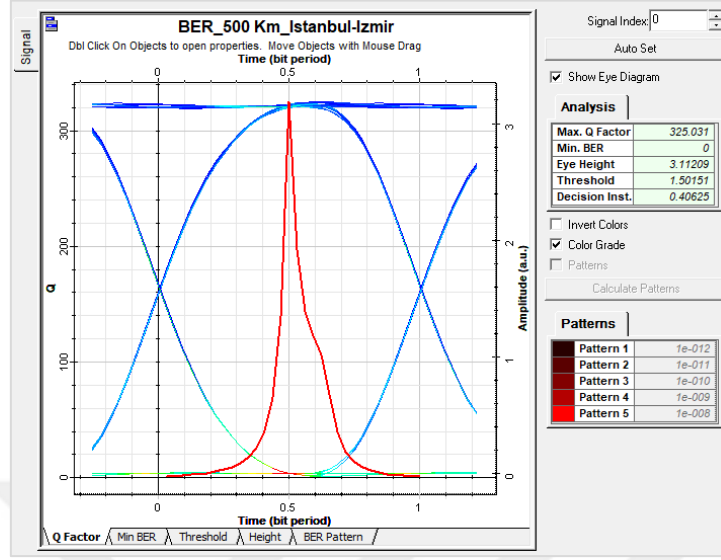


Şekil 6.19 500 km’lik İstanbul ile İzmir düzeneğine ait OSA sonuçları.

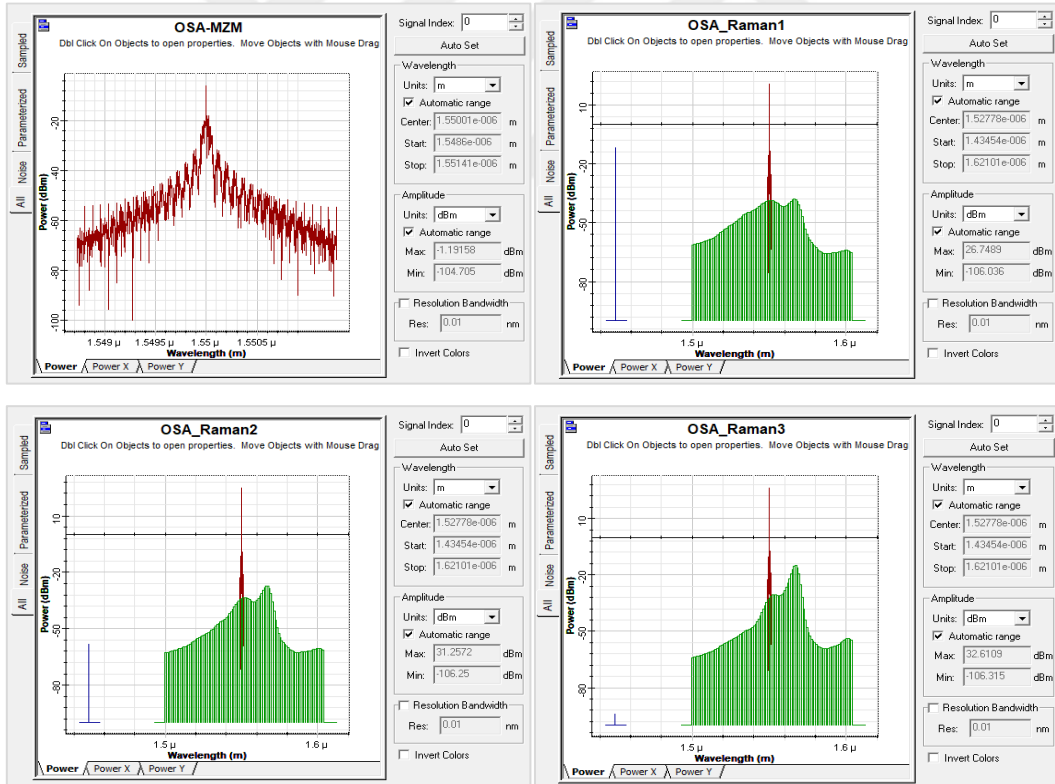
500 km’lik İzmir ile Ankara düzeneğinin alıcı tarafında elde edilen BER analizörü sonuçları Şekil 6.20’de verilmiştir. Göz diyagramında, göz açıklığının net görüldüğü, maksimum kalite faktörü değerinin 325 olduğu ve 10 Gbps hızındaki sinyalin 500 km’ye iletildiği belirlenmiştir.

Referans düzeneğe yer alan Raman kuvvetlendirici fiber mesafesi toplamda 450 km olacak şekilde tasarlanarak Ankara ile İstanbul arası modellenmiştir. Şekil 6.21’de MZM ve Raman kuvvetlendiricilerin çıkışına bağlanan OSA’lara ait

sonuçlar bulunmaktadır. İletim ortamı boyunca üç defa 150 km'lik fiber ile kuvvetlendirilen sinyal alıcı tarafına iletilmiştir.



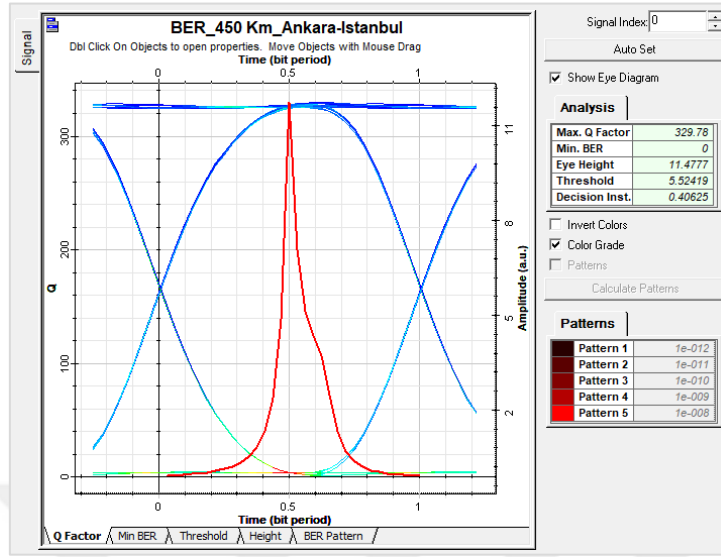
Şekil 6.20 500 km'lik İstanbul ile İzmir düzeneğine ait BER analizörü sonucu.



Şekil 6.21 450 km'lik Ankara ile İstanbul düzeneğine ait OSA sonuçları.

450 km'lik Ankara ile İstanbul düzeneğinin alıcı tarafında elde edilen BER analizörü sonucunun bulunduğu Şekil 6.22'de, göz açıklığının net olduğu

gözenmiştir. Maksimum kalite faktörü 330 olarak elde edilmiştir ve 10 Gbps hızındaki sinyalin 450 km'ye iletildiği belirlenmiştir.

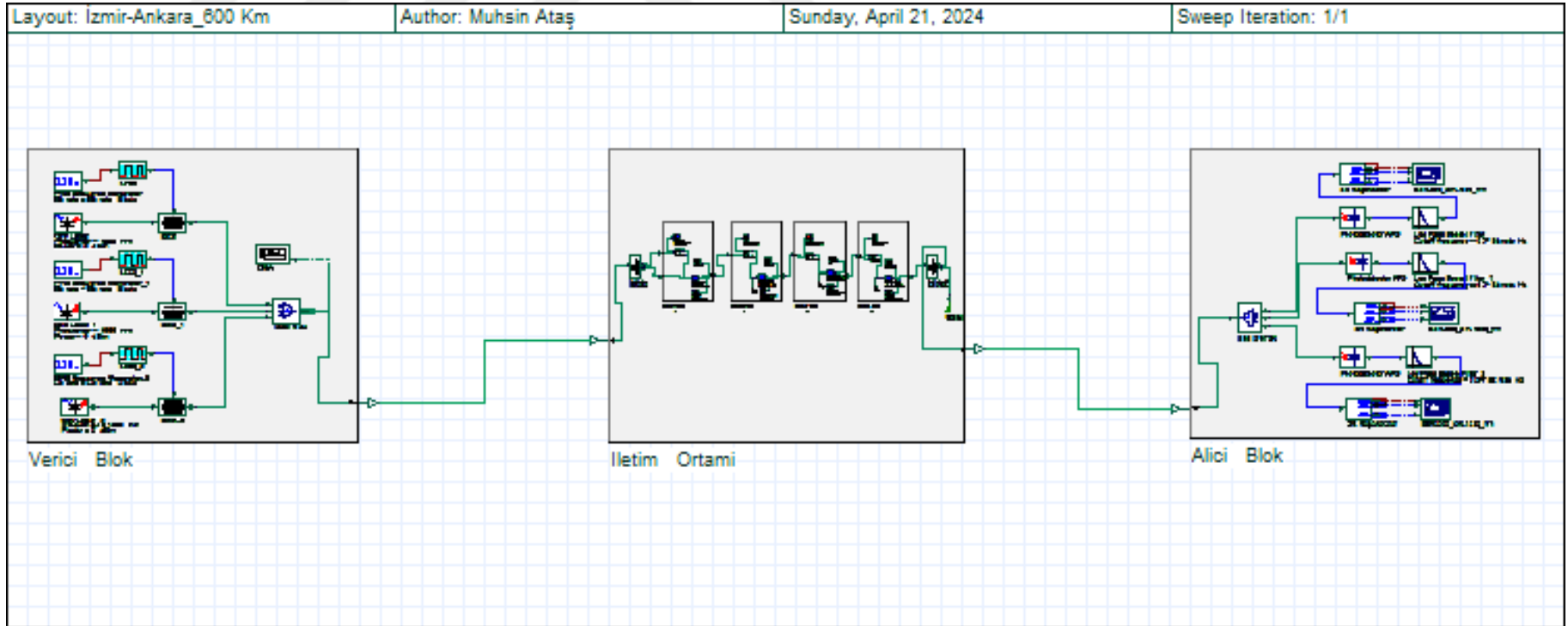


Şekil 6.22 450 km'lik Ankara ile İstanbul düzeneğine ait BER analizörü sonucu.

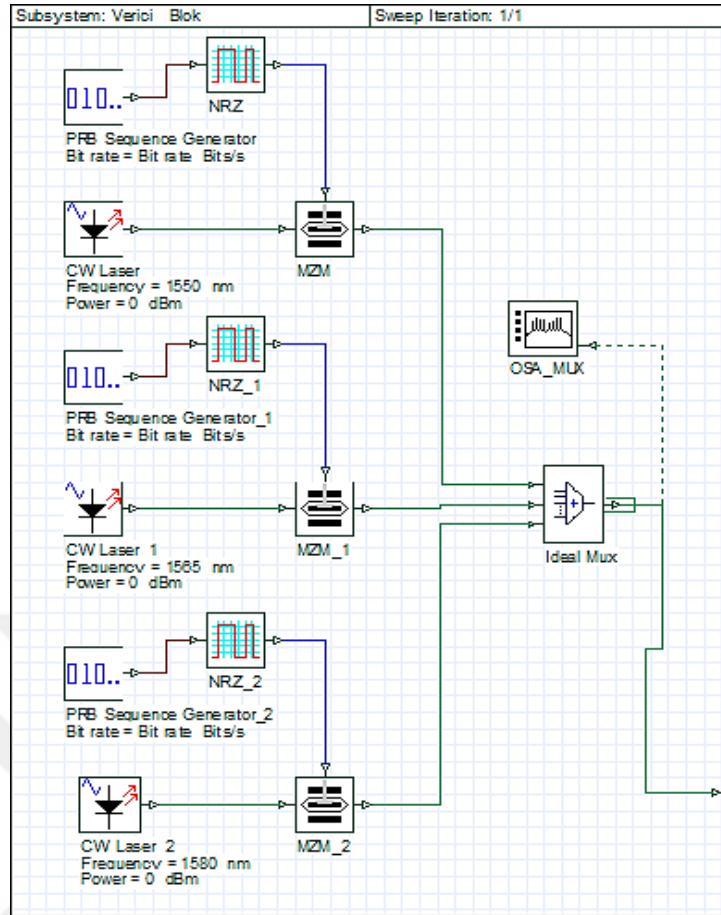
WDM uygulaması için İzmir ile Ankara arasındaki 600 km'lik mesafe referans alınarak Şekil 6.23'teki verici, iletim ve alıcı blokları tasarlanmıştır. Tasarlanan modelde, dalga boyları 1550 nm, 1565 nm ve 1580 nm olarak seçilmiştir. Oluşturulan vericiye ait detay Şekil 6.24'te verilmiştir. Verici kısmında dalga boylarına ait modüle edilmiş sinyaller ideal multiplexer ile çoklanarak iletim ortamına gönderilmiştir.

İletim ortamında sinyal Şekil 6.25'te verilen 150 km'lik Raman kuvvetlendiricili fiber ile dört defa kuvvetlendirilmiştir. Verici kısmında multiplexer çıkışına ve iletim ortamında her bir Raman kuvvetlendirici çıkışına sinyali inceleyebilmek adına OSA bağlanılmıştır. Şekil 6.26'da bulunan OSA sonuçlarına bakıldığında üç dalga boyu için de sinyalin kuvvetlendirilerek alıcıya iletildiği görülmektedir.

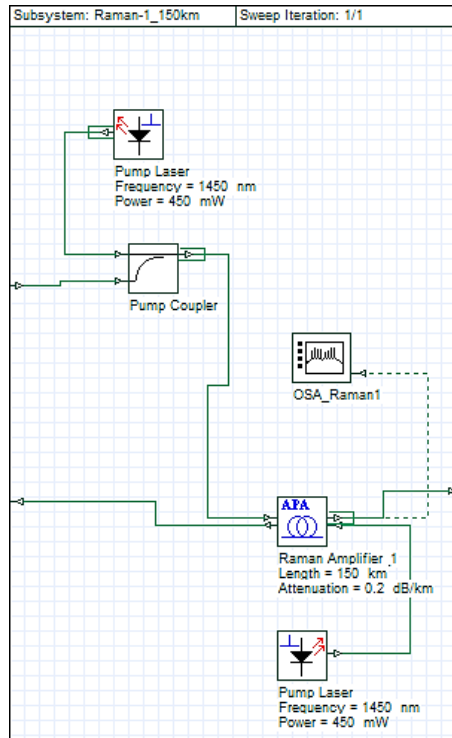
Şekil 6.27'de alıcıya ait detay görsel sunulmuştur. Alıcı kısmında ideal demultiplexer ile dalga boylarına göre sinyaller ayrıştırılarak BER analizörlerine gönderilmiştir. 10 Gbps iletim hızında 1550 nm, 1565 nm ve 1580 nm dalga boylarının 600 km'lik Raman kuvvetlendiricili fiber mesafesi için elde edilen BER analizörü sonuçları Şekil 6.28'de verilmiştir. Her bir dalga boyunun, alıcı tarafına düzgün iletildiği, göz diyagramları açıklıklarının net olduğu, maksimum kalite faktörü değerlerinin 1550 nm için 244, 1565 nm için 244 ve 1580 nm için 263



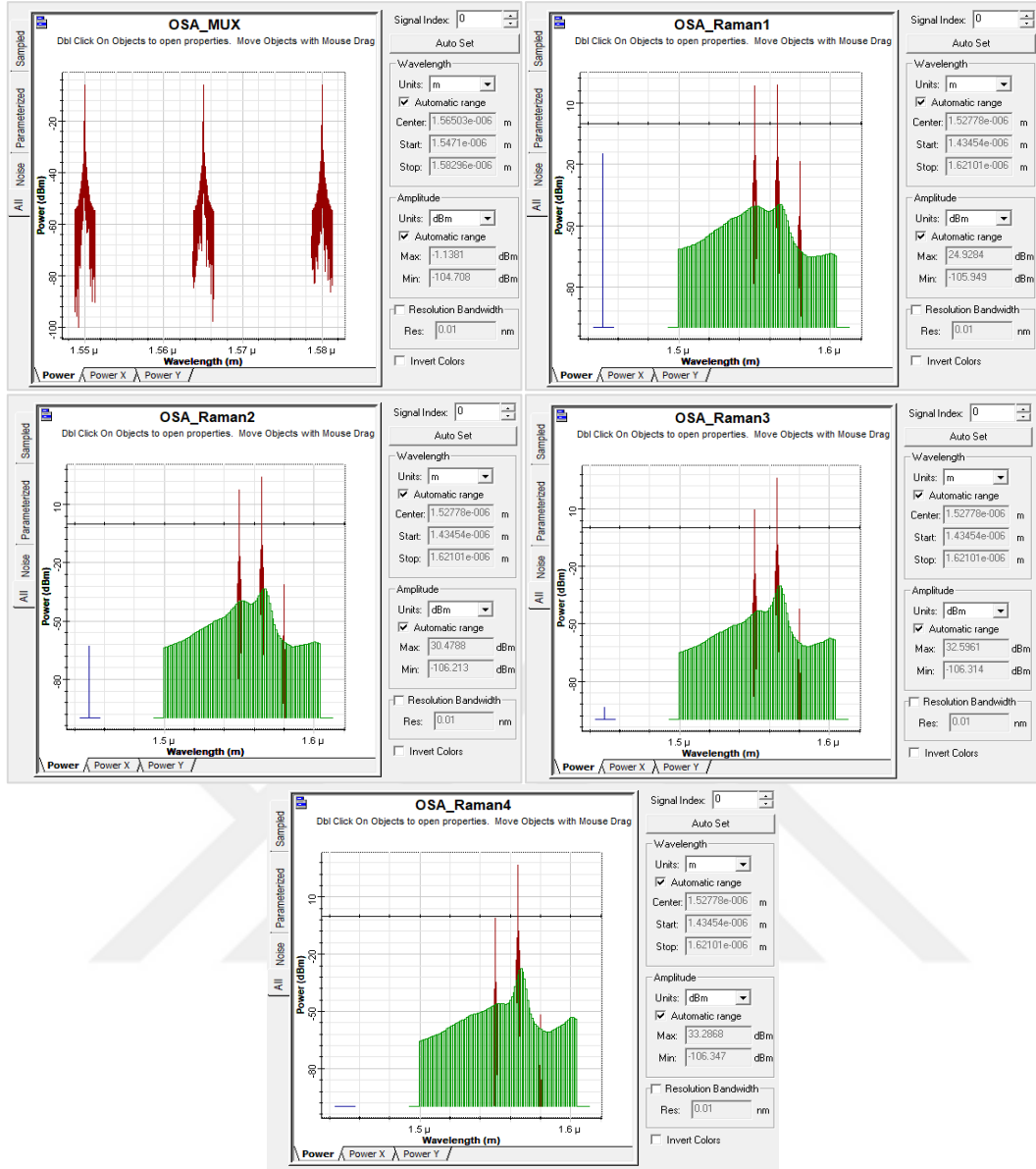
Şekil 6.23 İzmir ile Ankara arasında tasarlanan WDM modeline ait blok yapısı.



Şekil 6.24 WDM vericiye ait blok detayı.

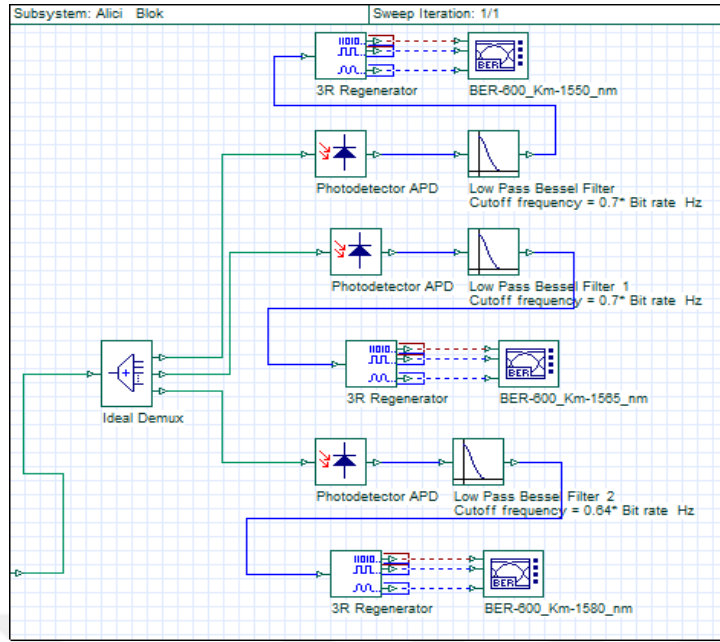


Şekil 6.25 Tasarlanan 150 km'lik Raman kuvvetlendirici detayı.

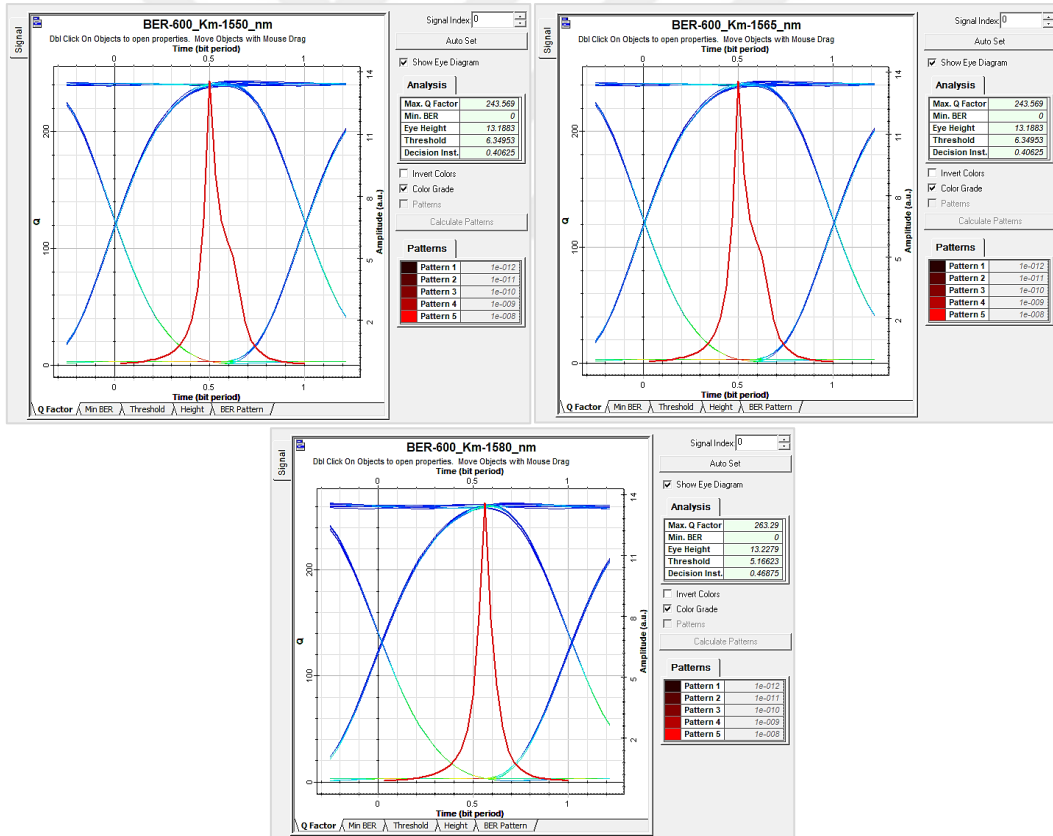


Şekil 6.26 Multiplexer ve Raman kuvvetlendirici çıkışlarındaki OSA'lara ait sonuçlar.

olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.26'daki OSA sonuçlarından görüldüğü gibi 1580 nm gürlütünün düşük olduğu bölüme denk gelmesinden dolayı maksimum kalite faktörü değeri 1550 nm ve 1565 nm dalga boylarına göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, İzmir ile Ankara arasında modellenen WDM uygulamasında 600 km'lik mesafe dört defa 150 km'lik Raman kuvvetlendiricili fiber ile 10 Gbps iletim hızında 1550 nm, 1565 nm ve 1580 nm dalga boylarındaki sinyaller multiplexer ve demultiplexer yapılarıyla vericiden alıcıya iletilmiştir.



Şekil 6.27 Tasarlanan alıcı bloğa ait detay.



Şekil 6.28 10 Gbps hızında 1550 nm, 1565 nm ve 1580 nm dalga boylarının 600 km'lik mesafe için elde edilen BER analizörü sonuçları

Optik haberleşme sistemlerinin performans analizlerini içeren bu tez çalışmasında, vericiden alıcıya doğru optik düzenek elemanlarının karşılaştırmaları yapılmıştır. En iyi performansı sağlayan düzenek elemanlarıyla FTTH ve P2P optik düzenekler tasarlanmıştır.

Çalışmanın 1. Bölümü'nde, optik haberleşmenin geçmişten günümüze kadar gelen kısa bir literatür özeti paylaşılarak tezin amacı ve hipotezi ortaya konulmuştur. 2. Bölüm'de, optik haberleşme sistemlerini oluşturan verici, iletim ortamı ve alıcı kısımları açıklanmıştır. Optik haberleşme sistemlerinin türlerinden olan PDH, SONET/SDH ve WDM sistemlerinin genel özellikleri, optik sistem elemanlarının türleri ve özellikleri detaylandırılmıştır.

3. Bölüm'de, optik ağların özellikleri ve çeşitleri ele alınmıştır. P2P ağlar ile M2MP ağlardan AON ve PON hakkında bilgiler verilerek PON türleri hakkında detaylı bilgiler aktarılmıştır. 4. Bölüm'de FTTX teknikleri incelenerek fiber altyapının son kullanıcıya kadar yakınsadığı erişim tekniklerinden FTTC, FTTB ve FTTH hakkında bilgiler verilerek FTTX tekniğinin avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

5. Bölüm'de, OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak sistem elemanlarının, dalga boyu ve hız gibi temel parametrelerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Farklı optik pencere bölgelerinden seçilen 850 nm, 1310 nm, 1550 nm ve 1750 nm dalga boyları karşılaştırmaları yapılarak en iyi sonucu 1550 nm dalga boyunun sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca uzak mesafeler için de tek modlu fiber optik kabloların kullanıldığı görülmüştür. Mesafesi 10 km olan sistem için 1 Gbps, 2,4 Gbps, 10 Gbps, 25 Gbps ve 40 Gbps bit hızları analiz edildiğinde hız değerinin artmasıyla sinyal kalitesinin düştüğü belirlenmiştir. Darbe üreticileri için RZ, NRZ, Gaussian ve Sine darbe üreticilerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu aşamada da en iyi sonucu NRZ darbe üreticisinin sağladığı belirlenmiştir. Modülatör karşılaştırması için yaygın kullanılan MZM, AM, EM ve FM modülatörleri arasında en iyi sonucu MZM vermiştir. Bu kısımda darbe üreticisi ve modülatör ikilisine de bakıldığında yine NRZ ve MZM ikilisinin en iyi sonucu verdiği

saptanmıştır. Kullanılan ışık kaynaklarını karşılaştırmalarında LED'ler kısa mesafeli uygulamalarda kullanılmasından dolayı tercih edilmeyerek CWL, VCSEL, DMLM ve LRA lazer karşılaştırmaları yapılmıştır. En iyi sonucu CWL'nin verdiği belirlenmiştir.

Alıcı kısımda bulunan fotodedektör karşılaştırmalarında APD ile PIN fotodiyotun performansları karşılaştırılmıştır. APD'nin PIN fotodiyottan daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Alıcı tarafta kullanılan alçak geçiren filtre analizlerine bakıldığında ise alçak geçiren Bessel filtresinin alçak geçiren Gaussian filtresinden, alçak geçiren Butterworth filtresinden ve alçak geçiren Chebyshev filtresinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca alçak geçiren Bessel filtrenin kesim frekansı ve derece değeri değiştirildiğinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Uzun mesafeli sinyal iletimleri için kuvvetlendiricilerin performans analizleri yapılmıştır. Tasarlanan 100 km'lik düzenekte karşılaştırılan EDFA, SOA ve Raman kuvvetlendiricilerinden en iyi sonucu Raman kuvvetlendiricinin sağladığı belirlenmiştir.

6. Bölüm'de, 5. Bölüm'deki sonuçlardan hareket ile en iyi sonuçları veren sistem elemanları kullanılarak FTTH ve P2P uygulamaları tasarlanmıştır. Tasarlanan FTTH düzeneğinde 10,1 km'de 8 dairelik A binası, 10,3 km'de 6 dairelik B binası, 5,3 km'de 12 dairelik C binası ve 5,1 km'de 22 dairelik D binası kurgulanmıştır. A ve B binalarının altına 1x8 optik bölücü, C binasının altına 1x16 optik bölücü ve D binasının altına 1x32 optik bölücü kullanılmıştır. Kullanıcı tarafta bulunan ONT'lerde elde edilen sinyallere ait BER analizörü ve optik güç ölçer sonuçlarında, bölünme sayısının mesafeye göre zayıflatmada daha etkin olduğu ve aynı bölünme oranında ise mesafe arttıkça maksimum kalite faktörü değerinin düştüğü belirlenmiştir.

P2P uygulamasında ise uzak mesafede yer alan noktalar arasındaki bağlantı modellenmiştir. İstanbul ile İzmir arası 500 km, İzmir ile Ankara arası 600 km ve Ankara ile İstanbul arası 450 km olarak kabul edilmiştir ve Raman kuvvetlendiriciler kullanılarak sinyal sağlıklı bir şekilde ulaştırılabilmektedir.

WDM uygulamasında 600 km'lik İzmir ile Ankara arası dört defa 150 km'lik Raman kuvvetlendiricili fiber ile modellenmiştir. 10 Gbps iletim hızında 1550 nm,

1565 nm ve 1580 nm dalga boylarındaki sinyaller multiplexer ve demultiplexer yapılarıyla vericiden alıcıya iletilmiştir.

Sonuç olarak bu tezde, optik haberleşme sistemleri tasarlanırken yüksek performanslı uygun sistem elemanlarının seçilerek birlikte kullanılması, önemli parametrelerle optimize edilmesi, mesafelere göre gerektiğinde kuvvetlendirici ile sinyalin kuvvetlendirilmesi gereklilikleri ortaya konulmuştur.



- [1] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [2] G. Keiser, Optical Communications Essentials, McGraw-Hill, United States of America, 2003.
- [3] A. H. Köse, Optik Haberleşme Sistemlerinde Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2022.
- [4] E. Koman, Optik Analizi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [5] J. M. Senior, Optical Fiber Communications Principles and Practice, Third Edition, FT Prentice Hall, England, 2009.
- [6] S. Bilici, 10 Gbit/s Seviyesinde Pasif Optik Network Sistemlerinin Performans Değerlerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis, 2019.
- [7] Ö. Güre, Pasif Optik Ağlar ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [8] N. Ö. Ünverdi ve N. A. Ünverdi, “Optik Haberleşme Sistemlerinin Dizayını,” V. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu (İTUSEM 2013), İzmir, 2013.
- [9] M. M. Ibrahim, M. Ismail, and A. I. Safana, A Comparative Study on the Activities of PDH & SDH Technology, International Journal of Information and Computing Science, Nigeria, 2019.
- [10] O. Babatunde, and S. Mbarouk, “A review of Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) and Synchronous Digital Hierarchy (SDH),” International Journal of Scientific Research Engineering & Technology, vol.3, 2014, pp.677-681.
- [11] G. Verma, and D. Ramaiya, “Analysis, Review and Optimization of SONET/SDH Technology for today and future aspects,” International Journal of Advanced Studies in Computer Science & Engineering, vol.3, 2014, pp.10-17
- [12] H. G. Perros, Connection-Oriented Networks SONET/SDH, ATM, MPLS and Optical Networks, John Wiley & Sons, England, 2005.
- [13] N. A. Hussain, “Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network modeling Using OpticalSystem Simulator,” Al-Khwarizmi Engineering Journal, vol.11, 2015, pp.61-71.
- [14] C. Hentschel, Fiber Optics Handbook, Hewlett Packard, Germany, 1983.
- [15] S. N. Gistvik, Optical Fiber Theory for Communication Networks, Second Edition, Ericsson Network Technologies, Sweden, 2002.
- [16] J. G. Proakis, M. Salehi, Fundamentals of Communication Systems, Second Edition, Pearson Prentice Hall, United States of America, 2010.

- [17] C. H. Townes, Review of To How the Laser Happened: Adventures of a Scientist, First Edition, Oxford University Press, New York, 1999.
- [18] J. T. Verdeyen, Laser Electronics, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [19] Z. Onursal, Gigabit Passive Optical Networks (GPON) and The Network Analysis in The Fiber To the Home (FTTH) Project Applications in Ankara, Çankaya University Graduate School of Natural and Applied Sciences Electronic and Communication Engineering, Master Thesis, Ankara, 2012.
- [20] T. Küçükarslan, Optik Kuvvetlendiricilerin Analizi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [21] U. U. Kazancı, Fiber Üzerinden Radyo Haberleşmesinin Analizi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [22] M. Akkuş, Bessel, Butterworth ve Chebyshev Aktif Filtre Modellerinde Parametere Kestirimi İçin PSO, De ve ABC Optimizasyon Algoritmalarının Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2014.
- [23] Y. Hacısalihoğlu, Halka Rezonatör Yapılarının Kullanıldığı Tamamen Optik Butterworth ve Chebyshev Filtrelerin Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [24] Ö. Türkmen, Optik Dalga Kılavuzlarında Propagasyon Özelliklerinin İncelenmesi ve Optik Kuplör İle Optik Sensör Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
- [25] M. Selçuk ve N. Ö. Ünverdi, “Paralel Ve Paralel Olmayan Fiberlerde Karşılıklı Kuplaj Analizi”, İTUSEM 2009, İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu, Adana, Ekim 2009.
- [26] A. Burhan Sert, Pasif Optik Ağların Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2021.
- [27] D&O Committee, FTTH Handbook, 9th Edition, FTTH Council Europe, Europe, 2021.
- [28] E. Kayhan, Dalga boyu Bölmeli Çoğullama Yöntemini Kullanan Bir Gigabit Pasif Optik Ağ Sisteminin Modellenmesi Ve Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2015.
- [29] A. O. Abdullahi, Performance Analysis Of Multiplexing Techniques For Passive Optical Network, Master Thesis, Istanbul Aydın University Institute of Graduate Studies, Istanbul, 2021.
- [30] İ. Uzar ve N. Ö. Ünverdi, “Optik Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan FTTH Teknolojisi ve Uygulamaları”, Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Kasım 2014.
- [31] H. S. Abbas and M. A. Gregory, “The next generation of passive optical networks: A review,” J. Netw. Comput. Appl. 67, 2016, pp. 53–74.

- [32] T. Horvath, P. Munster, V. Oujezsky, and N. H. Bao, “Passive Optical Networks Progress: A Tutorial,” *Electron.*, vol. 9, no. 7, 2020, pp. 1–31.
- [33] G. Pekküçük ve N. Ö. Ünverdi, “Pasif Optik Ağların Analizi ve Uygulamaları,” *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Kasım 2014.
- [34] I. Cale, A. Salihovic, and M. Ivekovic, “Gigabit Passive Optical Network–GPON,” in *29th International Conference on Information Technology Interfaces*, 2007.
- [35] S. Hocaoglu ve M. Yücel, “FTTH Ağlarda Performans Analizi,” *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 1, no. 1, Jan. 2017



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. Ataş, N. Ö. Ünverdi, "Optik Filtrelerin Performans Analizi" 31. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2023), 5-8 Temmuz 2023, İstanbul.

