

**T.C.  
KILIS 7 ARALIK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**10 Gbit/s SEVİYESİNDE PASİF OPTİK NETWORK SİSTEMLERİNİN  
PERFORMANS DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ**

**SEZAI BİLİCİ**

**DANIŞMAN: Prof. Dr. Ömer Faruk FARSAKOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**KILIS  
2019**

## TEZ ONAYI

Prof. Dr. Ömer Faruk FARSAKOĞLU danışmanlığında, Sezai BİLİCİ tarafından hazırlanan “10 Gbit/s SEVİYESİNDE PASİF OPTİK NETWORK SİSTEMLERİNİN PERFORMANS DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Ünvanı, Adı Soyadı (Kurumu)	İmza
Başkan	Prof. Dr. Ömer Faruk FARSAKOĞLU Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği	
Üye	Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği	
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Mikail ÖZÇİLOĞLU Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği	

Bu tezin kabulü, Fen bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun ...../...../201... tarih ve ...../..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Tez No: .....

ONAY

...../...../2019

ÜNVANI ADI SOYADI

Dr. Öğr. Üyesi Hülya DEDE

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### 10 Gbit/s SEVİYESİNDE PASİF OPTİK NETWORK SİSTEMLERİNİN PERFORMANS DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

SEZAI BİLİCİ

Kilis 7 Aralık Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer Faruk FARSAKOĞLU

Yıl: 2019

Sayfa: 90

Günümüz teknolojisinde bilgiye erişim ve bilgi aktarımı çok büyük önem taşımaktadır. Bu durum, haberleşme sistemlerinin önemini oldukça artırmıştır. Verinin işlenmesi, modülasyon ve demodülasyonu; elektronik teknolojisinin de paralelinde ilerleyen bir bölümdür. Bununla birlikte, erişim ve iletim sistemlerindeki yüksek kapasite ihtiyacı sürekli artmaktadır. Özellikle yüksek miktarda verinin mümkün olan en düşük kayıpla iletilmesi istenmektedir. Aynı zamanda bu verinin mümkün olan en uzak noktaya ve mümkün olan en fazla kullanıcıya ulaştırılması da çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında GPON değerleri baz alınarak 10 Gbit/s aşağıyön, 2,5 Gbit/s yukarıyön ve 40 Gbit/s aşağıyön, 10 Gbit/s yukarıyön veri taşıma kapasitesine sahip XG-PON ve TWDM PON sistemlerinin farklı parametrelere göre performans değerlerinin değişimleri incelenmiştir. Tasarım ve ölçümler tamamen GPON sistemini oluşturan üst ve uç cihaz parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Bu tasarım sonucunda her iki sistemin de çıkış gücü, mesafe ve pasif ağdaki kullanıcı sayısına göre dallanma gibi parametrelere bağlı olarak performans değerlerinin nasıl değiştiği değerlendirilmiştir. Değişen bu parametrelerin pasif optik ağda oluşturduğu etkiler temel olarak; Q - Kalite Faktörü ve BER-Bit Hata Oranı değerlerindeki değişimlere göre yorumlanmıştır.

Sistem performansını artırmak için EDFA-Erbiyum katkılı fiber yükselteç kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra alıcı kısmında kazanç ve hassasiyetlerin artırılması sonucu performanstaki değişimler kaydedilerek nihai tasarım ve değerlere varılmıştır. Bunun sonucunda

TWDM PON sisteminde 41 dBm güç bütçesi elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aşağı ve yukarıyöndeki karakteristikler; XG-PON ve TWDM PON üzerinde incelenmiş ve yeni nesil pasif optik ağ sistemlerinin farklı parametrelere göre performans değerleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Pasif optik ağ, GPON, XG-PON, TWDM PON, erbiyum katkılı fiber yükselteç, kalite faktörü, bit hata oranı



## ABSTRACT

MSc. Thesis

### DETERMINATION OF PERFORMANCE VALUES OF THE PASSIVE OPTICAL NETWORK SYSTEMS AT THE LEVEL OF 10 Gbit / s

SEZAI BİLİCİ

Kilis 7 Aralık University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer Faruk FARSAKOĞLU

Year: 2019      Pages: 90

In today's technology, access to information and information transfer are of great importance. This situation increased the importance of communication systems. The processing, modulation and demodulation of the data are progressing in parallel with the electronic technology. However, the high capacity requirement in the access and transmission systems is constantly increasing. In particular, it is desirable to transmit large amounts of data with the lowest possible loss. It is also very important that this data is delivered to the farthest possible point and to the maximum possible number of users.

In this thesis, the changes in performance values of XG-PON with 10 Gbit/s downstream, 2,5 Gbit/s upstream and TWDM PON with 40 Gbit/s downstream, 10 Gbit/s upstream data are investigated based on GPON system values. Design and measurements were made by using the upper and end device parameters which form the GPON system. As a result of this design, it is evaluated how performance values change according to parameters such as output power, distance and branching according to number of users in passive network. The effects of these changing parameters on the passive optical network are basically; Q - Quality Factor and BER- Bit Error Rate values are interpreted according to the changes.

The results were obtained using the EDFA-Erbium doped fiber amplifier to improve system performance. Then, the changes in the performance were recorded as a result of increasing the gain and precision in the receiver part and the final designs and values were reached. At the end, 41 dBm power budget was obtained to use in TWDM PON system. According to the

results,obtained downstream and upstream characteristics on the XG-PON and TWDM PON have been examined on the new generation of passive optical network systems.

**Keywords:** Passive optical network, GPON, XG-PON, TWDM PON, erbiyum doped fiber amplifier, quality factor, bit error rate.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında emeğini, vaktini, çok değerli tecrübe ve bilgilerini benden esirgemeyen kıymetli hocam sayın Prof. Dr. Ömer Faruk FARSAKOĞLU'na,

Yüksek lisans sürecim boyunca yardım ve yönlendirme anlamında bana önemli destek olan değerli hocam sayın Arş. Gör. Habip Yusuf HASIRCI'ya,

Tez sürecim boyunca hertürlü konuda yardımlarını esirgemeyen ve tezimi tamamlamamda önemli katkıları olan değerli yöneticim sayın Kerem FIRAT'a,

Beni yetiştiren, eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen sevgili annem Ümran BİLİCİ ve babam Mehmet BİLİCİ'ye,

Bu tezin hazırlanma sürecinde gerek gösterdiği sabır ve gerekse verdiği hertürlü destek ile “hayat arkadaşı” kelimesinin içini tam olarak dolduran biricik eşim Yasemin'e,

sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sezai BİLİCİ

Kilis, Haziran 2019

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vi
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	vii
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xvi
<b>BİRİNCİ BÖLÜM</b> .....	1
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Kablolü Erişim Türleri .....	2
1.1.1. Bakır erişim şebekeleri .....	2
1.1.2. HAES(Harici aktif erişim sistemleri) .....	6
1.1.3. Fiber optik erişim sistemleri .....	7
1.1.3.1. Fiber optiğın tarihçesi .....	7
1.1.3.2. Fiber optik kablo yapısı ve ışığın temel iletim prensibi.....	7
1.1.3.3. İletim şekli ve tesis türüne göre fiber optik kablo çeşitleri .....	10
1.1.3.4. Fiber optik kablolarda veri iletimi .....	12
1.2. Pasif Optik Ağlar.....	13
1.2.1. APON - BPON.....	15
1.2.2. EPON, GEAPON, 10 GEAPON .....	15
1.2.3. GPON.....	15
1.2.4. XG-PON ve NG-PON .....	16
<b>İKİNCİ BÖLÜM</b> .....	18
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	18
2.1. Optisystem 7.0 Simülasyon Programı ve Yeni Nesil Pasif Optik Ağlar.....	18
2.2. GPON OLT Yapısı ve Özellikleri .....	19
2.3. EDFA ile Kuvvetlendirme ve Alıcı Parametrelerinin Optimizasyonu.....	22
<b>ÜÇÜNCÜ BÖLÜM</b> .....	25
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	25
3.1. GPON Üzerinde Yapılan Ölçümler.....	25



3.2. XG-PON Üzerinde Yapılan Ölçümler.....	31
3.2.1. GPON parametreleri kullanılarak yapılan ölçümler .....	31
3.2.2. EDFA kullanımı ile yapılan ölçümler.....	36
3.2.2.1. EDFA parametrelerinin belirlenmesi .....	37
3.2.2.2. 1480 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri .....	43
3.2.2.3. 980 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri .....	46
3.2.3. ONU alıcı kısmı parametrelerinin belirlenmesi ve nihai ölçümler.....	49
3.3. TWDM PON Üzerinde Yapılan Ölçümler .....	52
3.3.1. GPON parametreleri kullanılarak yapılan ölçümler .....	52
3.3.2. TWDM PON üzerinde EDFA ile yapılan ölçümler.....	58
3.3.2.1. EDFA konumunun belirlenmesi .....	58
3.3.2.2. WDM giriş ve çıkış EDFA uygulamalarının karşılaştırılması.....	65
3.3.2.3. TWDM PON parametrelerine göre WDM multiplexer'in çalışma frekansının tespiti .....	70
3.3.2.4. EDFA parametrelerinin belirlenmesi .....	70
3.3.2.5. 1480 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri .....	74
3.3.2.6. 980 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri .....	77
3.3.3. ONU alıcı kısmı parametrelerinin belirlenmesi ve nihai ölçümler.....	80
<b>DÖRDÜNCÜ BÖLÜM .....</b>	<b>84</b>
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>84</b>
<b>5. KAYNAKLAR .....</b>	<b>86</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>90</b>

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\alpha_k$	Kritik açı
M	Tepkisellik çarpanı
$n_1$	1.Ortamın kırılma indisi
$n_2$	2.Ortamın kırılma indisi
P	Güç
R	Tepkisellik
R'	Çarpanlı tepkisellik
$R_x$	Sinyal alıcı uç / alınan sinyal
$T_x$	Sinyalgönderen uç / gönderilen sinyal
W	Watt
$\theta_1$	1.Ortamda geliş açısı
$\theta_2$	2.Ortamda geliş açısı
$\lambda$	Lambda

## KISALTMALAR

ADSL	Asimetrik Dijital Abone Hattı
APD	Avalans Fotodiyot
APON	ATM PON
ATM	Asenkron Transfer Mod
BER	Bit Hata Oranı
BPON	Broadband Pasif Optik Ağ
BRAS	Geniřbandlı Uzaktan Erişim Sunucusu
DSLAM	Dijital Abone Hattı Erişim Çoklayıcısı
EDFA	Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç
EDF	Erbiyum Katkılı Fiber
EPON	Ethernet Pasif Optik Ağ
FTTB	Binaya Kadar Fiber
FTTC	Kabinete Kadar Fiber
FTTH	Eve Kadar Fiber
GEPON	Gigabit Ethernet Pasif Optik Ağ
GPON	Gigabit Pasif Optik Ağ
HAES	Harici Aktif Erişim Sistemleri
HDSL	Yüksek Bit Hızında Sayısal Abone Hattı
HDTV	Yüksek Çözünürlükte Televizyon
IEEE	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Enstitüsü
IP	İnternet Protokolü
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
LAN	Yerel Alan Ağı

MPLS	Çok Protokollü Katman Anahtarlama
NDSL	Yalın Dijital Abone Hattı
NRZ	Sıfıra Dönüşsüz
OLT	Optik Hat Terminali
ONU	Optik Ağ Ünitesi
PBX	Özel Şube Değişimi
P2P	Noktadan Noktaya
P2MP	Noktadan Çok Noktaya
PSTN	Halka Açık Anahtarlama Telefon Şebekesi
Q	Kalite Faktörü
SDSL	Simetrik Sayısal Abone Hattı
SNR	İşaret Gürültü Oranı
TDM	Zaman Bölmeli Çoğullama
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
TWDM PON	Zaman ve Dalgaboyu Bölme Çoğullama Pasif Optik Ağ
VDSL	Çok Yüksek Hızda Dijital Abone Hattı
VPN	Sanal Özel Ağ
WDM	Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
XG-PON	Aşağıyönde 10 Gbit/s Seviyesindeki Pasif Optik Ağ

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Temel bakır şebekesi .....	2
Şekil 1.2. Çeşitli bakır telefon kabloları .....	3
Şekil 1.3. Bakır erişim şebekesi (yerel dağıtım şebekesinin tanıtımı).....	3
Şekil 1.4. Bakır erişim şebekesi.....	4
Şekil 1.5. Bakır şebekede ses ve veri iletim bandları .....	4
Şekil 1.6. Bakır şebeke üzerinden verilebilen genişband servisler .....	5
Şekil 1.7. Harici aktif erişim sistemleri(HAES) ve bakır erişim sistemleri karşılaştırmalı topoloji. ....	7
Şekil 1.8. Fiber optik kablo katmanları.....	8
Şekil 1.9. Farklı türde havai ve yeraltı fiber optik kablolar .....	8
Şekil 1.10. Snell yasasına göre ışığın kırılması ve yansımaları.....	9
Şekil 1.11. Snell yasasına göre çok yoğun ortamdaki az yoğun ortama ışığın yansıma ve kırılması .....	10
Şekil 1.12. Işığın fiberdeki iletimi .....	10
Şekil 1.13. Işığın iletim şekline göre fiber optik kablo çeşitleri .....	11
Şekil 1.14. Tekmodlu ve çokmodlu fiber optik kabloların iletim ve parametrik özellikleri .....	11
Şekil 1.15. Temel fiber optik haberleşme sistemi.....	12
Şekil 1.16. Elektromanyetik spektrum ve fiber optik veri iletiminde kullanılan dalgalarda.....	13
Şekil 1.17. Optik bölücüde ikiye bölünen optik sinyalin giriş ve çıkış şekilleri .....	14
Şekil 1.18. Temel pasif optik ağ yapısı.....	16
Şekil 1.19. GPON OLT-ONU arası veri paketlerinin iletimi .....	16
Şekil 1.20. GPON ve XG-PON sistemlerinin WDM yöntemi ile birleştirilmesi .....	17
Şekil 1.21. Temel NG-PON2(TWDM PON) mimarisi .....	17
Şekil 2.1. Optisystem 7.0 simülasyon programı arayüzü ve örnek çıktılar .....	19
Şekil 2.2. Farklı GPON OLT modelleri(A:Ericsson BLM 1500,B:Nokia 7360 ISAM FX-16).....	22
Şekil 3.1. Performans ölçümü için tasarlanan GPON yapısı (16 kullanıcı) .....	26
Şekil 3.2. GPON OLT ve ölçülen çıkış güç seviyeleri (A: Ericsson BLM 1500 OLT,B: Nokia 7360 ISAM FX-16 OLT) .....	26

<b>Şekil 3.3.</b> ONU üzerinde veri iletim aralığı ve dışında yapılan ölçümler (A: optical ışığı kırmızı iken veri iletimi yok, B: optical ışığı yeşil iken veri iletimi var) .....	27
<b>Şekil 3.4.</b> Simülasyon sonuçlarına göre GPON sınır değerleri (A,B: veri iletim yok; C,D: veri iletimi var) .....	27
<b>Şekil 3.5.</b> GPON aşağıyön ve yukarıyön iletim dalgaboyu spektrumları (A: aşağıyön, 1490 nm; B: yukarıyön, 1310 nm) .....	28
<b>Şekil 3.6.</b> GPON aşağıyön göz diyagramları(yukarıdan aşağıya 16, 32, 64 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km).....	28
<b>Şekil 3.7.</b> GPON mimarili sistem kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri.....	30
<b>Şekil 3.8.</b> GPON yukarıyön göz diyagramı (60 km) .....	31
<b>Şekil 3.9.</b> Performansölçümü içintasarlanan XG-PON yapısı (16 kullanıcı) .....	31
<b>Şekil 3.10.</b> XG-PON aşağıyön ve yukarıyön iletim dalgaboyu spektrumları (A: aşağıyön, 1577 nm; B: yukarıyön, 1270 nm).....	32
<b>Şekil 3.11.</b> XG-PON aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10,20,40,60 km).....	33
<b>Şekil 3.12.</b> XG-PON mimarili sistemkullanıcı ve mesafe değişimine göre aşağıyön veri trafiği Q değerleri.....	35
<b>Şekil 3.13.</b> XG-PON yukarıyön göz diyagramı (60 km) .....	36
<b>Şekil 3.14.</b> Performans ölçümü için tasarlanan XG-PON mimarili referans pasif optik ağ yapısı (EDFA ile birlikte, 16 kullanıcı) .....	37
<b>Şekil 3.15.</b> EDF girişine pompalama .....	42
<b>Şekil 3.16.</b> EDF çıkışına pompalama.....	42
<b>Şekil 3.17.</b> EDF'nin çift yönüne pompalama .....	43
<b>Şekil 3.18.</b> 1480 nm EDFA ilavesi ile XG-PON aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km).....	44
<b>Şekil 3.19.</b> 1480 nm EDFA ilavesi ile XG-PON sistemi kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri (A: 16 ONU, B: 32 ONU, C: 64 ONU, D: 128 ONU).....	45
<b>Şekil 3.20.</b> 980 nm EDFA ilavesi ile XG-PON aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km).....	47
<b>Şekil 3.21.</b> 980 nm EDFA ilavesi ile XG-PON sistemi kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri (A: 16 ONU, B: 32 ONU, C: 64 ONU, D: 128 ONU).....	48
<b>Şekil3.22.</b> 980 nm ve 1480 nm EDFA'ların katkılarının XG-PON üzerinde karşılaştırmalı Q değerleri (A: 16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU D:128 ONU).....	49
<b>Şekil 3.23.</b> XG-PON sisteminde farklı M parametrelerinin, aşağıyön ayrı ayrı vetoplam BER değeri değişimlerine etkisi (128 ONU, 10,20,40, 60 km).....	50

<b>Şekil 3.24.</b> Nihai XG-PON tasarımı aşağı yön göz diyagramları (yukarıdan aşağıda 16, 32, 64 ve 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km) .....	52
<b>Şekil 3.25.</b> Performans ölçümü için tasarlanan TWDM PON yapısı (16 kullanıcı).....	53
<b>Şekil 3.26.</b> TWDM PON aşağı yön ve yukarı yön iletim dalga boyu spektrumları (A: aşağı yön; 1596, 1598, 1600, 1602 nm; B: yukarı yön; 1522, 1524, 1526, 1528 nm).....	54
<b>Şekil 3.27.</b> TWDM PON aşağı yön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km).....	55
<b>Şekil 3.28.</b> TWDM PON sistemi kullanıcı ve mesafeye bağlı olarak Q değerlerindeki değişim .....	56
<b>Şekil 3.29.</b> TWDM PON yukarı yön göz diyagramları (A: 1522 nm, B: 1524 nm, C: 1526 nm, D: 1528 nm) .....	57
<b>Şekil 3.30.</b> TWDM PON, EDFA'nın WDM multiplexer çıkışına yerleştirilmesi.....	58
<b>Şekil 3.31.</b> TWDM PON 16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön göz diyagramı .....	59
<b>Şekil 3.32.</b> TWDM PON 16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön sinyal ve gürültü spektrumu.....	59
<b>Şekil 3.33.</b> TWDM PON 16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön göz diyagramı .....	60
<b>Şekil 3.34.</b> TWDM PON 16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön sinyal ve gürültü spektrumu.....	61
<b>Şekil 3.35.</b> TWDM PON EDFA'nın WDM multiplexer girişine yerleştirilmesi .....	62
<b>Şekil 3.36.</b> TWDM PON 16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön göz diyagramı .....	62
<b>Şekil 3.37.</b> TWDM PON 16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön sinyal ve gürültü spektrumu.....	63
<b>Şekil 3.38.</b> TWDM PON 16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön göz diyagramı .....	64
<b>Şekil 3.39.</b> TWDM PON 16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağı yön sinyal ve gürültü spektrumu.....	64
<b>Şekil 3.40.</b> TWDM PON ve EDFA kullanımı ile elde edilen Q değerleri (16 ONU, 10 km) .....	65
<b>Şekil 3.41.</b> TWDM PON'da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş sinyal ve Q değerleri (16 ONU, 10 km) .....	66
<b>Şekil 3.42.</b> TWDM PON'da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş gürültü değerleri (16 ONU, 40 km) .....	66

<b>Şekil 3.43.</b> TWDM PON'da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş sinyal ve Q değerleri (16 ONU, 40 km) .....	67
<b>Şekil 3.44.</b> TWDM PON'da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş gürültü değerleri (16 ONU, 40 km).....	68
<b>Şekil 3.45.</b> 1480 nmEDFA ilavesi ile TWDM PONaşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı; soldan sağa 10, 20, 40, 60 km) .....	74
<b>Şekil 3.46.</b> Kuvvetlendiricisiz ve1480 nm EDFA katkılı TWDM PON sistemi aşağıyön Q değerlerinin kıyaslanması (A: 16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU, D: 128 ONU).....	76
<b>Şekil 3.47.</b> 980 nmEDFA ilavesi ileTWDM PON aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı; soldan sağa 10, 20, 40, 60 km) .....	77
<b>Şekil 3.48.</b> Kuvvetlendiricisiz ve 980 nm EDFA katkılı TWDM PON sistemi aşağıyön Q değerlerinin kıyaslanması (A: 16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU, D: 128 ONU).....	79
<b>Şekil 3.49.</b> 1480 nm ve 980 nm EDFA katkılı TWDM PON sistemi aşağıyön Q değerlerinin kıyaslanması (A: 16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU, D: 128 ONU).....	80
<b>Şekil 3.50.</b> TWDM PON farklı M parametrelerinin, aşağıyön ayrı ayrı ve toplam BER değeri değişimlerine etkisi (128 ONU; 10, 20, 40, 60 km).....	81
<b>Şekil 3.51.</b> Nihai TWDM PON tasarımı aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km).....	82
<b>Şekil 3.52.</b> Nihai TWDM PON tasarımı aşağıyön Q değerleri değişimi (A:16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU, D:128 ONU; $\lambda_1$ :1596 nm, $\lambda_2$ :1598 nm, $\lambda_3$ :1600 nm, $\lambda_4$ :1602 nm) .....	83



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 1.1.</b> Bakır şebeke üzerinden verilebilen genişband servisler .....	6
<b>Çizelge 2.1.</b> GPON temel özellikleri (Ericsson BLM 1500 OLT) .....	20
<b>Çizelge 2.2.</b> GPON temel özellikleri (Nokia 7360 ISAM FX OLT) .....	21
<b>Çizelge 3.1.</b> GPON kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri.....	29
<b>Çizelge 3.2.</b> XG-PON kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri .....	34
<b>Çizelge 3.3.</b> XG-PON 16 ONU, 10 km mesafe ve 100 mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF'lerin pasif optik ağ değerlerine etkileri .....	38
<b>Çizelge 3.4.</b> XG-PON 16 ONU, 40 km mesafe ve 100 mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF'lerin pasif optik ağ değerlerine etkileri.....	38
<b>Çizelge 3.5.</b> XG-PON 16 ONU, 10 km mesafede 980 nm 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri .....	39
<b>Çizelge 3.6.</b> XG-PON 16 ONU, 40 km mesafede 980 nm 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri .....	40
<b>Çizelge 3.7.</b> XG-PON 16 ONU, 10 km mesafede 980 nm 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri .....	41
<b>Çizelge 3.8.</b> XG-PON 16 ONU, 40 km mesafede 980 nm 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri .....	41
<b>Çizelge 3.9.</b> 1480 nm EDFA ile kuvvetlendirilen XG-PON mimarili sistemin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri.....	45
<b>Çizelge 3.10.</b> 980 nm EDFA ile kuvvetlendirilen XG-PON mimarili sistemin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri.....	48
<b>Çizelge 3.11.</b> TWDM PON üzerinde multiplexer çalışma frekansı analiz sonuçları (16 ONU, 10 km).....	54
<b>Çizelge 3.12.</b> TWDM PON mimarili sistemin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri.....	56
<b>Çizelge 3.13.</b> WDM multiplexer bağlantı şekillerine göre pasif optik ağ parametreleri(16 ONU, 10 km) .....	66
<b>Çizelge 3.14.</b> WDM multiplexer bağlantı şekillerine göre pasif optik ağ parametreleri(16 ONU, 40 km) .....	69
<b>Çizelge 3.15.</b> EDFA'nın WDM multiplexer üzerindeki bağlantı şekillerine göre SNR, Q ve BER değerleri .....	69
<b>Çizelge 3.16.</b> WDM multiplexer çalışma frekansına göre Q, BER ve gürültü değerleri (16 ONU, 10 km, 980 nm, 20 m EDF) .....	70

<b>Çizelge 3.17.</b> TWDM PON16 ONU, 10 km mesafe ve 100mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF'lerin pasif optik ağ değerlerine etkileri.....	71
<b>Çizelge 3.18.</b> TWDM PON16 ONU, 40 km mesafe ve 100mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF'lerin pasif optik ağ değerlerine etkileri.....	71
<b>Çizelge 3.19.</b> TWDM PON16 ONU 10 km mesafede 980 nm ve 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi .....	72
<b>Çizelge 3.20.</b> TWDM PON16 ONU 40 km mesafede 980 nm ve 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi .....	72
<b>Çizelge 3.21.</b> TWDM PON16 ONU 10 km mesafede 980 nm ve 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi .....	73
<b>Çizelge 3.22.</b> TWDM PON16 ONU 40 km mesafede 980 nm ve 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi .....	73
<b>Çizelge 3.23.</b> 1480 nm EDFA ile kuvvetlendirilen TWDM PON sisteminin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q ve BER değerleri .....	75
<b>Çizelge 3.24.</b> 980 nm EDFA ile kuvvetlendirilen TWDM PON sisteminin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q ve BER değerleri .....	78

# BİRİNCİ BÖLÜM

## 1. GİRİŞ

Üzerinde yaşadığımız dünya; hızla değişen, zaman kavramının adeta yeniden tanımlandığı, insanların ve kurumların önceleri günler süren işlemlerinin artık saniyeler içerisinde gerçekleştirilebildiği bir ortam haline gelmiştir. Genişband servisleri sayesinde internet, internet üzerinden TV yayını vb. sayesinde online alışveriş, canlı TV izleme, geçmiş yayın/film/video izleme, bankacılık işlemlerini gerçekleştirme, oyun oynama, sosyal ağlar üzerinden etkileşim gibi hayatın hemen her alanındaki birçok gereksinim hem bilgisayar hem de mobil cihazlardan artık rahatlıkla karşılanabilmektedir. Artık, evlerinde veya ofisindeki bilgisayar ve TV'ler gibi hemen herkesin sahip olduğu mobil cihazların işlemci kapasiteleri gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum ise bu cihazlarla yapılan her işlemde ihtiyaç duyulan band genişliğinin artmasına neden olmaktadır.

Diğer bir etken olarak bireysel kullanım haricinde kurumsal bazda güvenlik, eğitim, sağlık ve diğer yüksek hızda bağlantı talepleri gibi ihtiyaçlar dolayısıyla yapılan özel devre talepleri, mevcut şebeke üzerindeki trafik yükünü her geçen gün artırmaktadır. Bu nedenle telekomünikasyon operatörlerinin şebekelerini sürekli iyileştirmesi ve etkin kullanması zorunlu hale gelmektedir.

Sabit telekomünikasyon sektöründe iletişim ilk dönemlerinden beri bakır kablolarla sağlanmış olup genişbant ihtiyacının artması ile birlikte son yıllarda bakır kablolar yerini fiber optik kablolarla bırakmaya başlamıştır. Fiber Optik teknolojisinin mesafe ve band genişliği anlamında bakır iletken teknolojisine göre üstün olması, pasif optik ağların (PON) önem kazanmasına neden olmuştur[1]. Fiber optik kabloların kullanımı ile pasif optik ağlar oluşturularak yüksek band genişliği elde edilmektedir. Fiber optik ağlar, bakır ağlara kıyasla erişim mesafesi açısından çok avantajlıdır ve yüksek hızlı veri iletimi, fiber optik teknolojisinin önemini göstermektedir [2].

Yaptığımız bu çalışmada giriş bölümünde bakır şebekeler, harici aktif erişim sistemleri, fiber optik erişim sistemleri ve pasif optik ağlar ile ilgili temel bilgiler verilmiştir.

Materyal ve yöntem kısmında bu tez çalışmasına temel oluşturan GPON yapısı ve simülasyon yazılımı tanıtılarak çalışmada izlenen yol açıklanmıştır.

GPON şebeke modeli, 3. Bölümde yer alan Bulgular ve Tartışma kısmında gerçekleştirilmiş olupbu modeldeki verici ile alıcı değerleri baz alınarak 10 Gbit/s seviyesinde XG-PON, 40 Gbit/s seviyesinde TWDM PON sistemleri tasarlanmıştır. Daha sonra EDFA ile yapılan kuvvetlendirme ve ONU alıcı kısmında yapılan optimizasyon ile yeni nesil pasif optik ağların performans değerleri deneysel verilerle ölçülünerek yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen iyileşmeler ortaya konmuştur.

Daha sonra GPON, XG-PON ve TWDM PON hakkında elde edilen sonuçlar ve XG-PON ve TWDM PON ile ilgili EDFA ve alıcı duyarlılığı uygulamalarının sonuçları gözden geçirilmiştir. Ulaşılan nokta, 4. bölümdeki sonuçlar ve yorumlar kısmında değerlendirilmiştir.

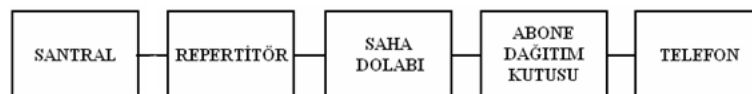
GPON yapısında elde edilen sonuçlar, aynı parametrelerle XG-PON ve TWDM PON'da elde edilenlerle kıyaslanmış ve birim zamanda iletilen veri miktarının artmasının, iletim kalitesine olumsuz etki gösterdiği belirlenmiştir. Daha sonrasında EDFA kuvvetlendirici ile alıcı duyarlılığı ve kazancı üzerinde yapılan çalışmalar sonucu ağın performansındaki iyileşmeler tartışılmıştır.

Bu çalışmasının sonucu olarak ise uygulanan yöntemlerle yeni nesil pasif optik ağların veri iletim kapasitelerinde önemli miktarda artış gözlenmiş ve varılan sonuçlar ortaya konmuştur. Tez çalışması süresince yararlanılan kaynaklara 5.bölümde yer verilmiştir.

## 1.1.Kablolu Erişim Türleri

### 1.1.1.Bakır erişim şebekeleri

Bakır erişim şebekeleri, haberleşme sistemlerinin en eski erişim yöntemlerindedir. Önceleri sadece sabit telefon ile haberleşmede aktif rol oynayan bakır erişim teknolojisi, sonrasında genişband veri iletiminde de rol oynamaya başlamış olup, günümüzde halen yoğun olarak kullanılan bir erişim türü olmaya devam etmektedir. Şekil 1.1'de genel hatlarıyla bakır şebeke ile bir telefon abonesine erişimin aşamaları görülmektedir.



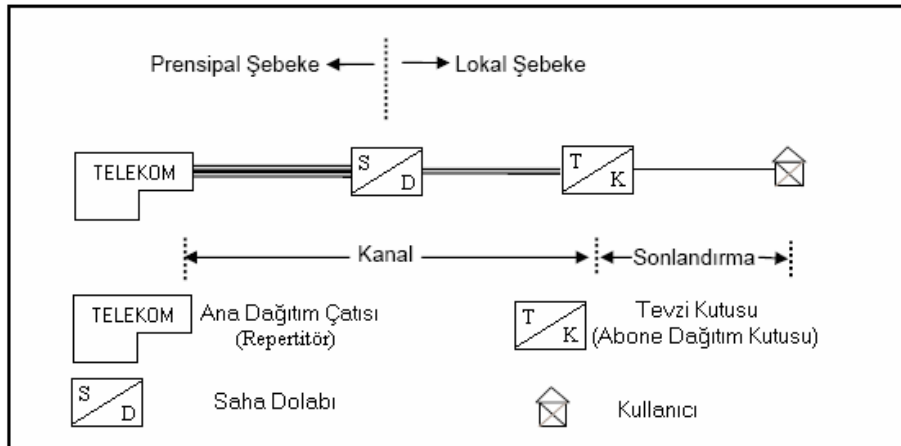
Şekil 1.1. Temel bakır şebekesi

Bakır erişim şebekelerinde santralden kullanıcıya doğru uçtan uca bakır ile erişim sağlanmakta olup bu hat boyunca çeşitli bağlantı noktaları bulunmaktadır. Şekil 1.2’de bakır şebeke mimarisi görülmektedir. Bakır kablolar damar yapısı olarak 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm ve 0,9 mm çaplarında havai ve yeraltı olarak imal edilmekte olup, her bir kabloda 2 perden 3600 pere kadar farklı kapasitelerde bulunabilmektedir [3]. Şekil 1.2’de çeşitli bakır telekom erişim kabloları görülmektedir.



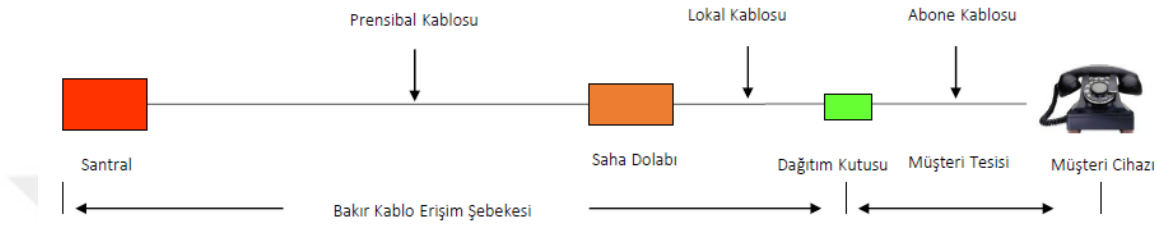
Şekil 1.2. Çeşitli bakır telekom kabloları [3]

Şekil 1.3 incelendiğinde santral ile kullanıcı arasında hat boyunca çeşitli geçişler bulunmaktadır. Sıra ile incelenirse santral içerisinde ana dağıtım çatısı (repartitör), saha dolabı, tevzi kutusu(abone dağıtım kutusu) ve kullanıcı sırasına göre son kullanıcıya erişilmiş olmaktadır [3]. Santraldeki ana dağıtım çatısı ile saha dolabı arasındaki bakır hatta prensibal şebeke, saha dolabından tevzi kutusuna kadar olan hatta lokal şebeke, tevzi kutusundan kullanıcıya kadar olan bakır hatta ise sonlandırma denmektedir [3].



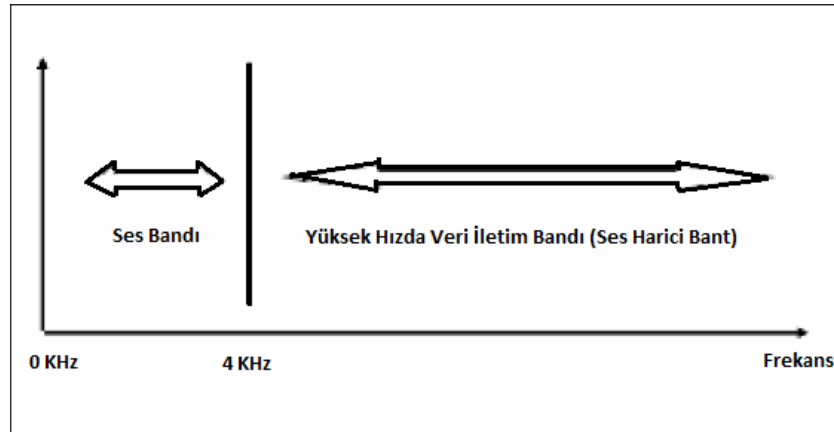
Şekil 1.3. Bakır erişim şebekesi (yerel dağıtım şebekesinin tanıtımı) [3]

Prensibal ve lokal kablonun oluşturduğu ağı bakır kablo erişim şebekesi denmektedir [4]. Bakır kablo erişim şebekesi, santralden dağıtım kutusuna kadar olan kısımdan oluşmaktadır. Dağıtım kutusu ile müşteri arasında ise abone kablosu çekilerek müşteritesisi yapılmış olmaktadır [4]. Şekil 1.4'te santralden aboneye kadar olan prensibal, lokal ve abone kablosu tesisi ile meydana getirilmiş bir diğer bakır erişim şebekesi örneği görülmektedir.



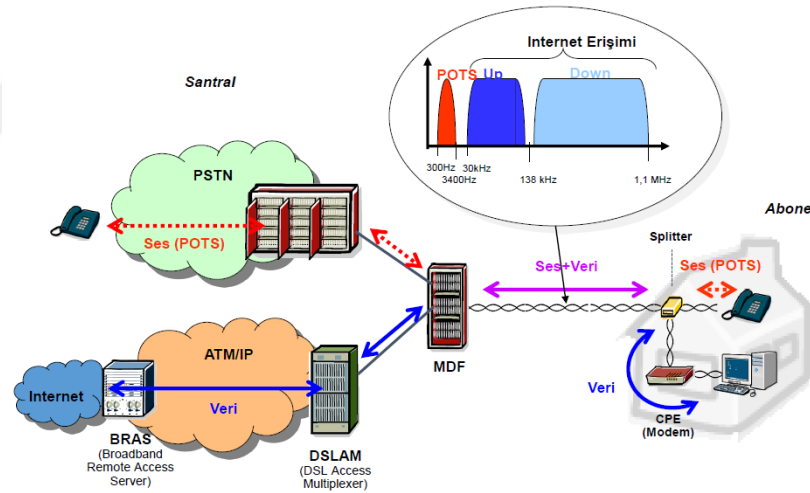
**Şekil 1.4.** Bakır erişim şebekesi[4]

Görüldüğü üzere temel olarak bakır erişim şebekeleri prensibal, lokal ve abone kablosu şeklinde 3 erişim kısmı ve bu kısımların ana ve ara istasyonları olarak tabir edebileceğimiz santral, saha dolabı ve dağıtım kutusu noktalarından yapılan bağlantılar sonucunda kullanıcıya çeşitli hizmetlerin sunulması amaçlanmıştır. DSL teknolojisi ile birlikte bakır kablolarda genişband veri iletimi sağlanmış, bununla beraber internete ilave katma değerli servisler de bakır şebekeler üzerinden internet hizmeti ile birlikte sunulmaya başlanmıştır. Bakır kablo üzerinden sunulan ses hizmetine ilave olarak internet ve diğer katma değerli servislerin de dahil olmasıyla birlikte ses hizmetleri bandı ve internet hizmetleri bandı olarak kablo spektrumu ikiye ayrılmıştır [3,4].



**Şekil 1.5.** Bakır şebekede ses ve veri iletim bandları [3]

Şekil 1.5'te bakır erişim şebekesinde ses ve veri iletim bandları görülmektedir. Şekil 1.6'da ise bakır erişim şebekesi üzerinden yapılan ses ve veri iletiminde servisler vesistemlerin şematik gösterimi görülmektedir. Şekil 1.6 incelendiğinde bandgenişliğinin ses ve internet erişimi olarak ikiye ayrıldığı ve internet erişim veri trafiğinin de kendi içinde up ve down olarak iki ayrı band genişliğine ayrıldığı görülmektedir. PSTN olarak belirtilen servis; genel anahtarlamalı telefon şebekesi - public switched telephone network, ATM DSLAM olarak belirtilen servis; asenkron transfer mod dijital abone hattı erişim çoklayıcısı - asynchronous transfer mode digital subscriber line access multiplexer. IP DSLAM olarak belirtilen servis; internet protokolü dijital abone hattı erişim çoklayıcısı - internet protokolü dijital subscriber line access multiplexer, BRAS olarak belirtilen servis; genişband uzaktan erişim sunucusu - broadband remote access server şeklinde açıklanabilir [4-7].



Şekil 1.6. Bakır erişim şebekesinde ses, veri iletimi ve servisler [4]

Çizelge 1.1'de bakır şebeke üzerinden sunulan genişband hizmetler, bu hizmetlerin teknolojileri ve bakır erişim şebekesi üzerinden alabilecekleri hız değerleri görülmektedir.

**Çizelge 1.1.** Bakır şebeke üzerinden verilebilen genişband servisler [3]

Tür	Özellik	Hız	Uzaklık	Uygulama
ADSL	Asimetrik bir çift kablo	Kullanıcıya doğru: 1,5 Mbit/s – 8 Mit/s , Kullanıcıdan: 64 Kbit/s – 1,5 Mbit/s	4-5 km	İnternet erişimi, talebe bağlı video, uzaktan LAN erişimi, VPN
ADSL Lite	ADSL tabanlı ayırıcısız bir çift kablo	Kullanıcıya doğru: 1 Mbit/s Kullanıcıdan 512 Kbit/s	4-5 km	İnternet erişimi, görüntülü telefon
HDSL	Yüksek hız simetrik bir çift kablo	2Mbit/s	4 km	E1 trunk ikamesi, PBX arabağlantısı, LAN arabağlantısı
SDSL	Simetrik bir çift kablo	2 Mbit/s	3 km	E1 trunk ikamesi, PBX arabağlantısı
VDSL	Çok yüksek hız bir çift kablo	Kullanıcıya doğru: 13 Mbit/s – 52 Mbit/s , Kullanıcıdan: 1,5 Mbit/s – 2,3 Mbit/s Simetrik: 34 Mbit/s	1 km	Çokluortam İnternet erişimi, HDTV program dağıtımı

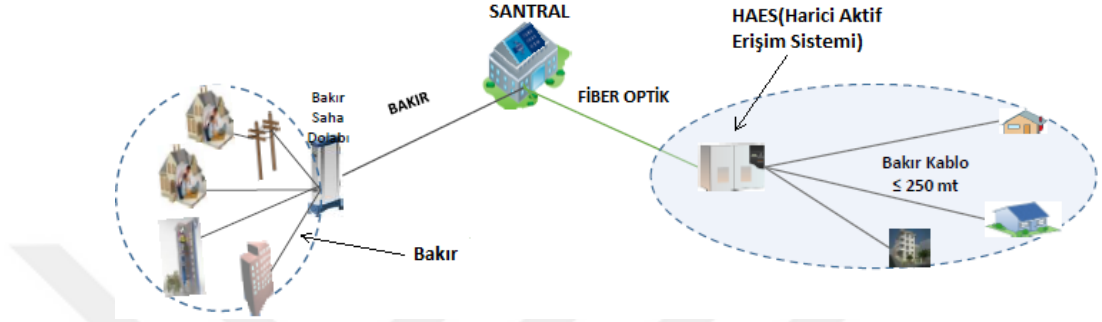
Çizelge1.1'deki veriler incelendiğinde bakır kablo üzerinden VDSL teknolojisi kullanımıyla kullanıcıya doğru(aşağıyönde) 52 Mbit/s veri iletimi sağlanabilmektedir ancak bu hızda veri iletiminin 1 km mesafe ile sınırlı olduğu görülmektedir.

### 1.1.2. HAES(Harici aktif erişim sistemleri)

Bakır şebekeler üzerinden verilebilecek bağlantı hızlarının kısa mesafelerde sınırlı kalması, sistemlerin kullanıcılara daha yakın konuşlandırılmasını gerekli kılmıştır. HAES'ler, bu ihtiyaç doğrultusunda kullanıcılara yakın bölgelere kurulan dolap tipinde mini santraller olarak tanımlanabilir. Bakır erişim şebekelerinde santral - saha dolabı - abone kutusu sırasındaki noktaların tamamındaki ara bağlantılar bakır ile yapılırken HAESlerdeki erişim yöntemi ise; santral ile saha dolabı arasının fiber optik kablolarla, saha dolabı ile abone kutusu arasının ise yine bakır kablolarla tesis edilmesi şeklindedir. Şekil 1.7'de HAES ile bakır erişim sistemlerinin topolojisi görülmektedir. Bakır kablolar ile teorik olarak ve en fazla 1 km de verilebilecek aşağıyönde en yüksek hız 52



Mbit/s iken, HAES kullanımında santral ile HAES arasında fiber optik kablo tesisi yapıldığından dolayı aşağıyönde çok yüksek hızlara (100 Mbit/s vb.) ulaşılması mümkün olmuştur. HAES ile erişim sağlandığında band genişliğini sınırlayan asıl kısım HAES ile kullanıcı arasındaki bakır kablodur. Bu nedenle HAES ile kullanıcı arasındaki bakır kablo mesafesinin  $\leq 250$  metre olması gerekmektedir [4-8].



**Şekil 1.7.** Harici aktif erişim sistemleri ve bakır erişim sistemleri karşılaştırmalı topoloji HAES'ler de kendi içerisinde iç mekan(indoor) ve dış mekan(outdoor) olarak ikiye ayrılmaktadır. İç mekan kullanımı için üretilen HAES'ler; FTTB(binaya kadar fiber - fiber to the building) olarak adlandırılırken, dış mekan kullanımı için üretilen HAES'ler ise FTTC(kabinete kadar fiber - fiber to the curb) olarak adlandırılmakta ve uygulamalarda da bu şekilde kullanılmaktadırlar.

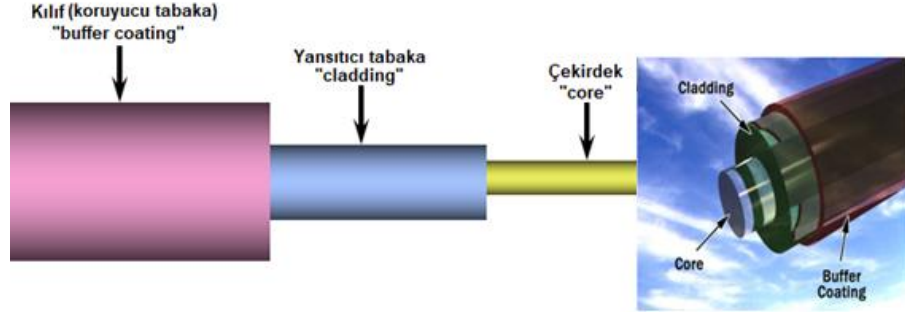
### 1.1.3. Fiber optik erişim sistemleri

#### 1.1.3.1.Fiber optiğin tarihçesi

Fiber optik teknolojisinin, ilk olarak hafif kablo adıyla 1842 yılında kullanıldığı bilinmektedir [9].1880 yılında Alexander Graham Bell tarafından ses sinyallerini ışık üzerinden ileten aynalardan ve detektörlerden oluşan fotofon adı verilen bir aletle çeşitli deneylerde kullanılmıştır [10]. Türkiyede ise Türk Telekom altyapısı olarak ilk defa 1985 yılında Ulus santrali ile Ankara Gölbaşı uydu yer istasyonu arasında yaklaşık olarak 42 km lik bir yeraltı fiber optik kablo tesisi yapılmıştır. Yapılan bu ilk bağlantıda 1310 nm dalgaboyunda 140 Mbit/s hızında veri iletimi gerçekleştirilmiştir. Türkiyedeki ilk fiber optik havai kablo tesisi ise 1987 yılında Aydın ile Denizli illeri arasında gerçekleştirilmiştir [11].

#### 1.1.3.2.Fiber optik kablo yapısı ve ışığın temel iletim prensibi

Fiber optik kablo 3 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar Şekil 1.8’de görüldüğü gibi çekirdek(core), yansıtıcı tabaka(cladding) ve kılıf(coating) dir [10,11].



Şekil 1.8. Fiber optik kablo katmanları [11]

**Çekirdek:** Kablonun merkezindeki kısım olup yüksek saflıkta camdan yapılmış, esnek ve ışığın yansımalar yaparak içerisinde ilerlediği kısımdır. Esnek bir yapıda olup bir miktar bükülebilir özelliğindedir. Tek modlu veya çok modlu kablo olmasına göre çekirdek çapı  $8\mu\text{m}$  ile  $100\mu\text{m}$  arasında değişebilmektedir. İnsan saçı yaklaşık olarak  $100\mu\text{m}$  çapındadır [10,11].

**Yansıtıcı tabaka:** Çekirdeği sararak fiber içerisinde yolculuk eden ışığın dış ortama çıkmasını engelleyen kısımdır. Çekirdeğin dış kısmını kapladığından ışığın çekirdek içerisinde ilerlemesinin daha az kayıpla sağlanabilmesi ve yansımaların en verimli şekilde olabilmesi için çekirdeğe göre daha az yoğun bir ortam içermektedir. Bir diğer deyişle koruyucu zarfın kırılma indisi çekirdeğinkinden daha azdır. Genel olarak çapı  $125\mu\text{m}$  dir [10,11].

**Kılıf(koruyucu tabaka):** Fiberin en dış kısmında fiberi darbe ve diğer dış etkenlere karşı korur. Optik bir özelliği yoktur. Plastik veya polimerden üretilebilir. Çok katmanlı olabilir [10,11]. Şekil 1.9’da farklı türden fiber optik kablolar görülmektedir.

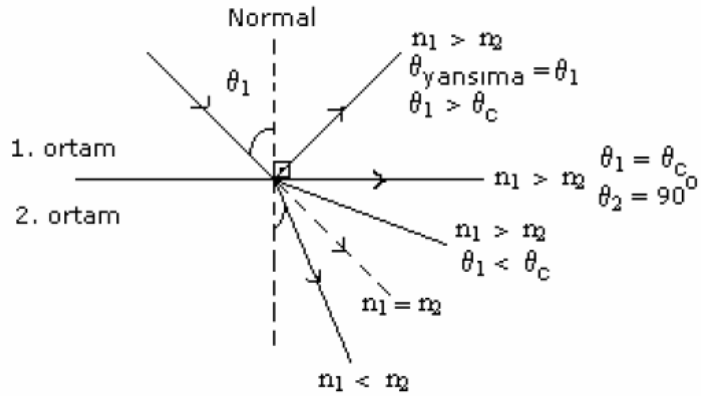


**Şekil 1.9.** Farklı türde havai ve yeraltı fiber optik kablolar [13]

Bir ışık ışınının farklı kırılma indisli iki ortamın sınırına geldiğinde davranışının ne olacağı, snell yasasına göre belirlenir. Fiber optik kablo içerisinde de ışık, snell yasasına göre hareket eder [10, 15-17].

$$n_1 \times \sin\theta_1 = n_2 \times \sin\theta_2 \quad [10, 15-17]$$

Formülde  $n_1$ ; 1. ortamın kırılma indisi,  $n_2$ ; 2.ortamın kırılma indisi,  $\theta_1$ ışığın geliş açısı,  $\theta_2$ ışığın kırılma açısıdır [10]. Şekil 1.10'da snell yasasına göre ışığın kırılması ve yansımaları görülmektedir.



**Şekil 1.10.** Snell yasasına göre ışığın kırılması ve yansımaları [10, 15-18]

Burada 3 farklı durum vardır,

a)1.ortamın kırılma indisi, 2.ortamın kırılma indisinden küçük ise ( $n_1 < n_2$ )

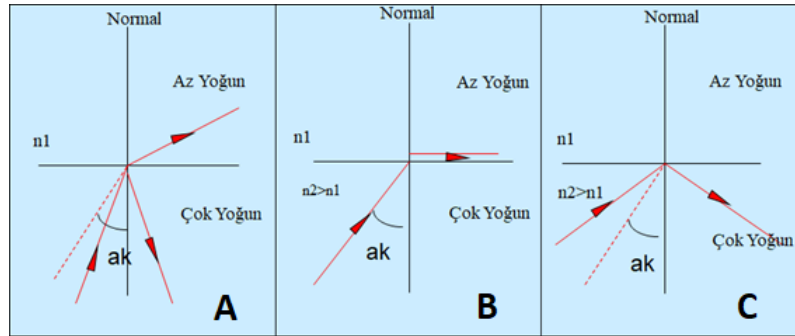
Işık her durumda kırılmaya uğrar, normale yaklaşarak karşı ortama geçer ve yoluna devam eder.

b)1.ortamın kırılma indisi, 2. Ortamın kırılma indisine eşit ise ( $n_1 = n_2$ )

Işık herhangi bir yansıma ve kırılmaya uğramadan karşı ortama geldiği doğrultuda geçer ve yoluna devam eder.

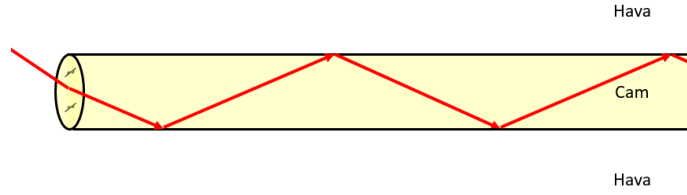
c)1. ortamın kırılma indisi, 2. ortamın kırılma indisinden büyük ise ( $n_1 > n_2$ )

Bu durumda kritik açının önemi ortaya çıkar. Kritik açı ise ortamların kırılma indis farklılığına göre değişmektedir. Gelen ışığın açısı kritik açıdan küçükse ışık karşı ortama normalden uzaklaşarak geçer. Eğer gelen ışığın açısı kritik açıya eşitse ışık iki ortam arasındaki yüzeyi yalayıp yoluna devam eder. Işığın ortama geliş açısı kritik açıdan büyükse, normalle geliş açısı kadar açı yaparak ve karşıya geçmeden mevcut ortamında tam yansır ve yoluna devam eder. Işığın fiber içerisindeki yolculuğu da bu tam yansıma prensibine göre gerçekleşmektedir. Şekil 1.11'de bu 3 farklı durumda ışığın davranış gösterilmiştir. Şeklin A bölümünde kritik açıdan daha küçük açıyla gelen ışık diğer ortama geçer ve normalden uzaklaşarak kırılır. Bir kısmı ise aynı ortama geri yansır. B'deki durum incelendiğinde, kritik açıya eşit açıyla gelen ışık yüzeyi yalayıp iki ortam arasında yol almaya devam eder. (ak: kritik açı) Şeklin C kısmındaki durumda ise kritik açıdan daha büyük açıyla gelen ışık, diğer ortama geçmeden ve geldiği açıya eşit bir açıyla yansır. Buradaki durum tam yansımadır ve fiber optik iletimin temeli bu prensibe dayanmaktadır.



**Şekil 1.11.** Snell yasasına göre çok yoğun ortamdan az yoğun ortama ışığın yansıma ve kırılması [12]

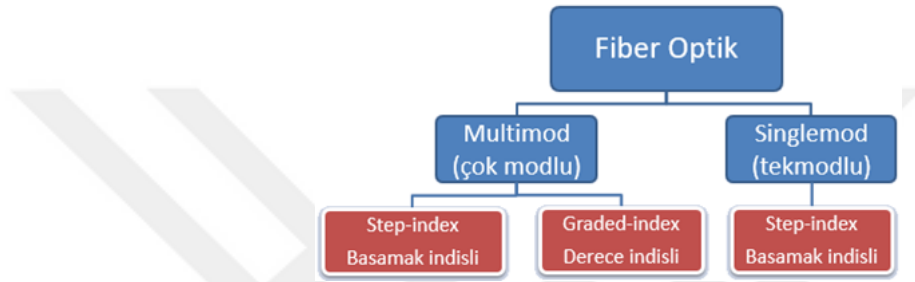
Snell yasasında tam yansıma olabilmesi için ışığın çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçiş yapıyor olması gerekmektedir. Bundan dolayı tam yansımanın sağlanabilmesi için fiberlerin üretiminde de çekirdek kısmı, yansıtıcı tabaka kısmından daha yoğun bir malzemedir üretilmektedir [10,15-18]. Şekil 1.12'de ışığın fiber içinde yansırarak ilerlemesi görülmektedir.



Şekil 1.12. Işığın fiberdeki iletimi [11,12]

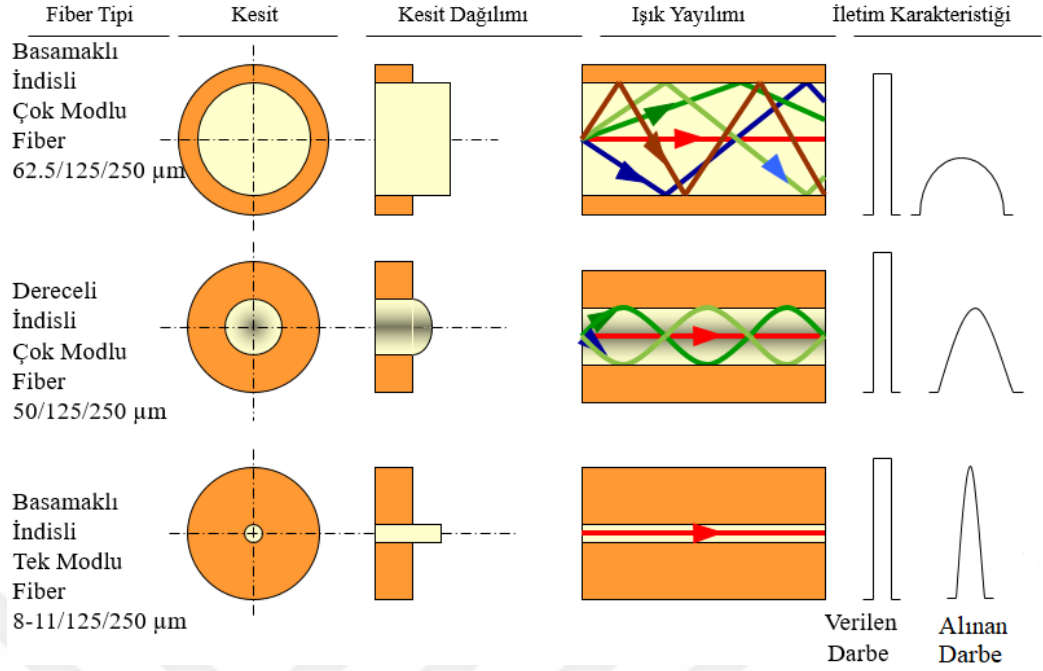
### 1.1.3.3. İletim şekli ve tesis türüne göre fiber optik kablo çeşitleri

Işığın iletim şekline göre fiber optik kabloların sınıflandırması şekil 1.13'te görülmektedir.



Şekil 1.13. Işığın iletim şekline göre fiber optik kablo çeşitleri [11,12]

Fiber optik kablolar temel olarak tekmodlu ve çokmodlu olarak ikiye ayrılmaktadır. Tekmodlu fiberlerde sadece basamak indisli, çokmodlu fiberlerde ise basamak indisli ve derece indisli türleri bulunmaktadır. Tekmodlu fiberlerde çekirdek çapı  $9\ \mu\text{m}$ , yansıtıcı tabaka  $125\ \mu\text{m}$  dir. Çokmodlu fiberlerde ise basamak indisli türlerde çekirdek çapı  $62,5\ \mu\text{m}$ , yansıtıcı tabaka  $125\ \mu\text{m}$  iken; dereceli indisli türlerde çekirdek çapı  $50\ \mu\text{m}$  ve yansıtıcı tabaka çapı  $125\ \mu\text{m}$  dir. Şekil 1.14'te tek mod ve çokmodlu fiber optik kabloların parametrik özellikleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde tek modlu fiberin çekirdek çapının çok daha küçük olduğu ve çıkışta alınan darbenin devre girişine uygulanan darbeye en yakın bu tür fiberde alındığı görülmektedir. Bu nedenle singlemod fiberler uzun mesafe transmisyon iletim hatlarında kullanılırken multimod fiberler kampüs için, bina için gibi daha kısa mesafeli erişim hatlarında tercih edilmektedir [11,12].



**Şekil 1.14.** Tekmodlu ve çokmodlu fiber optik kabloların iletim ve parametrik özellikleri [11,12]

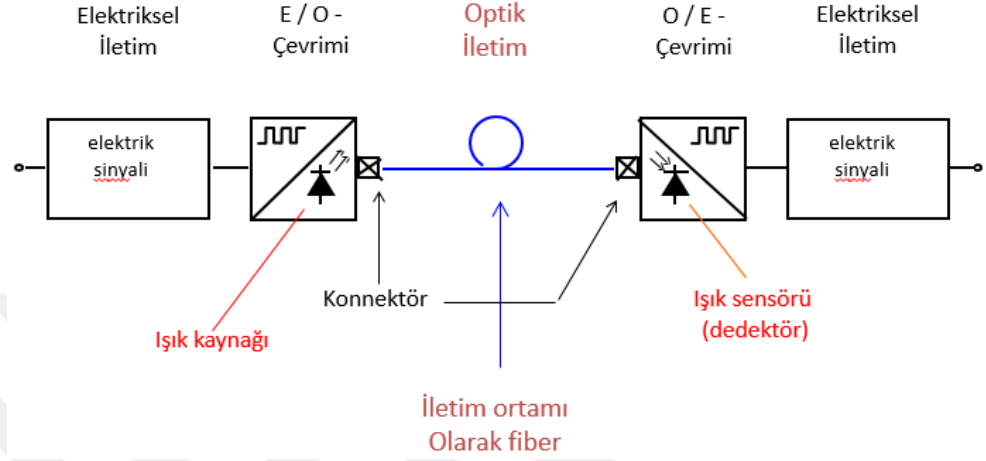
Fiber optik kablolar yukarıda belirtildiği gibi iletim karakteristiklerine göre singlemod ve multimod olarak iki farklı türde imal edilmelerinin yanında tesis biçimlerine göre de farklı türde imal edilmektedirler. Tesis biçimine (kullanım yeri) göre fiber optik kablolar;

- Yeraltı kabloları; yeraltı tesislerinde
- Havai kablolar; çelik askı teli ile birlikte üretilir, direkli güzergah ve duvara blok işleme gibi yöntemlerinin kullanıldığı bölgelerde tercih edilir
- Denizaltı kablolar; daha çok ülkelerarası, kıtalararası deniz ve okyanus zemininden tesis işlemlerinde kullanılan kablolardır. Çeşitli deniz canlılarının zarar vermelerinin önüne geçilmesi için oldukça fazla katmandan oluşmakta olup (yaklaşık 8 kat) bu katmanlar ise farklı sarmallardan oluşan çelik halatlarla örülüdür [11].
- OPGW kablolar, yüksek gerilim hatlarından çekilen fiber optik kablolardır. Buz yükü, rüzgar, çekme kuvveti gibi etkenlere karşı yüksek mukavemete sahiptir.

#### 1.1.3.4. Fiber optik kablolarla veri iletimi

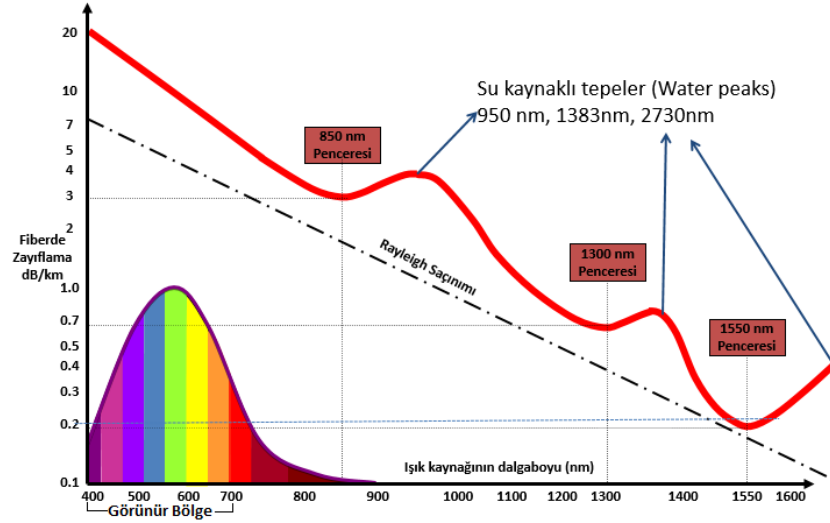
Fiber optik iletim, günümüzde bakır kabloların yerini almaya başlamıştır. Özellikle sağladığı yüksek hız ile düşük maliyet dolayısıyla kullanım alanları gün geçtikçe daha da artmaktadır. Fiber optik teknolojisinde kablo malzeme maliyeti bakır erişim

şebekelerine göre daha düşük ancak uç cihazlar bazında bakıra oranla daha yüksektir. Başka bir ifadeyle günümüz şartlarında fiber optik haberleşme sistemleri tesisi erişim yönüyle bakıra oranla daha ucuz ancak cihaz ve teçhizat yönüyle bakıra oranla daha pahalıdır.



**Şekil 1.15** Temel fiber optik haberleşme sistemi [11,12]

Şekil 1.15'te bir fiber optik haberleşme sisteminin basitleştirilmiş benzetimi görülmektedir. Şekil incelendiğinde uç cihazlar elektriksel parametrelerle çalışmakta olup ışık kaynağı ve ışık sensörü (fotodedektör) vasıtasıyla sistem çıkışlarında elektriksel sinyaller ışık sinyallerine ve sistem girişlerinde de ışık sinyalleri elektrik sinyallerine dönüştürülerek veri iletimi sağlanmaktadır. Fiber optik kablunun bakır kabloya en büyük üstünlüğü düşük kayıptır ancak bu düşük kayıp her dalgaboyu için geçerli değildir. Şekil 1.16'da elektromanyetik spektrum ve fiber optik kabloda zayıflamanın yüksek ve düşük olduğu dalgaboyları belirtilmiştir. Grafikteki veriler incelendiğinde 850 nm, 1300 nm ve 1500 – 1600 nm pencereleri zayıflama bakımından en düşük değerlere sahip bölgelerdir.



**Şekil 1.16.** Elektromanyetik spektrum ve fiber optik veri iletiminde kullanılan dalgaboyları [11,12]

850 nm dalgaboyunda 3,2-4 db/km; 1310 nm dalgaboyunda 0,36-0,4 db/km; 1550 nm dalgaboyunda 0,18-0,22 dB/km ve 1625 nm dalgaboyunda ise 0,22-0,25 db/km zayıflama değerlerine sahiptir. Bu tez çalışmasındaki uygulamalarda fiber kablonun kaybı 0,21 db/km olarak alınmıştır.

## 1.2. Pasif Optik Ağlar

Pasif optik ağlar, eve kadar fiber (FTTH) kombinasyonları geliştirilmeye başlandığından bu yana genişbant erişimine olanak sağlayan oldukça üstün bir ağ teknolojisidir. Pasif optik ağların en büyük avantajı santralden kullanıcıya kadar olan erişim ağının enerji gereksinimi olmadan tamamen pasif elemanlarla yapılmasıdır. Bu elemanlardan pasif optik ağ yapısında en önemlisi ise optik bölücüler (splitter) dir. Değişik yapıda ve değerinde birçok optik bölücü bulunmakta olup kullanım amaçlarına göre duvar tipi, panel tipi veya daha küçük ebatlarda bulunabilmektedir. Optik bölücülerin her 2 ye bölünmesinde sinyal gücü olarak ta ikiye bölünmüş olmaktadır. Bu durumda sinyal değeri dBm olarak;

$$P_{dBm} = 10 \log(P_{\text{çıkış}(W)} / P_{\text{giriş}(W)}) \quad [19]$$

1/2 optik bölücüde yukarıdaki formülü uygularsak dBm cinsinden her 2 ye bölünmedeki kayıp miktarını bulmuş oluruz. Örnek olarak giriş gücü 2mW olan bir sistemde 2 ye bölünme sonucunda çıkış gücü 1mW olacaktır. Bu değer dBm cinsinden ifadesi ise;

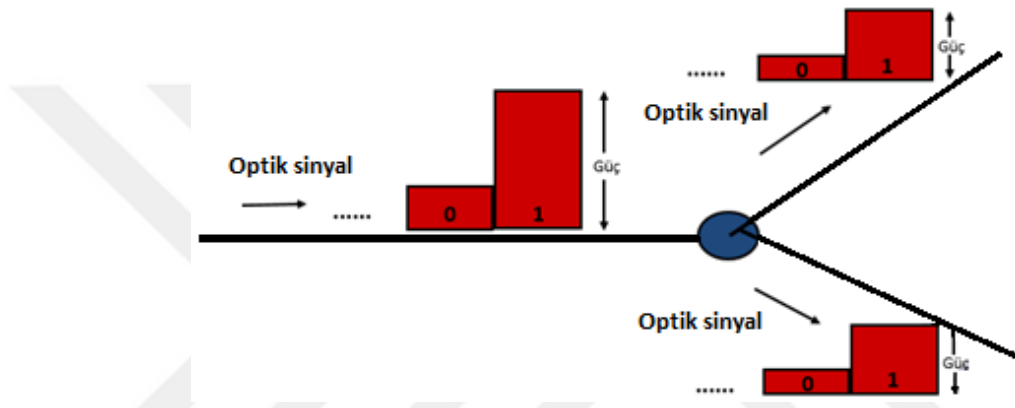
$$10 \log(1mW/2mW) = 10 \log(0,5) = -3,01 \text{ dBm}$$



Girişte 2mW olarak uyguladığımız sinyali 2 ye böldüğümüzde elde ettiğimiz değer dBm olarak -3 olmuştur. Mevcut sinyali tekrar ikiye böldüğümüzde giriş sinyali 4'e bölünmüş olacaktır. Bu durumda giriş sinyali 2mW iken çıkış sinyali 0,5mW değerine düşmüş olup çıkış sinyali giriş sinyalinin 1/4 üne düşmüş olacaktır. Bu durumda zayıflamanın dBm cinsinden ifadesi;

$$10\log(0,5mW/2mW) = 10\log(0,25) = -6,02 \text{ dBm}$$

Görüldüğü gibi her 2 ye bölünmede sinyal değeri yaklaşık 3 dBm azalmaktadır. Şekil 1.17'de bölücü çıkışındaki güç kaybı gösterilmektedir.



Şekil 1.17. Optik bölücüde ikiye bölünen optik sinyalin giriş ve çıkış şekilleri[20]

Pasif optik ağlarda; kaliteli ve yüksek hızda internet, yüksek çözünürlüklü IPTV ve ses hizmeti servisleri tek fiber lifi üzerinden P2MP (noktadan çok noktaya) olarak sunulmaktadır. Bunun yanında P2P (noktadan noktaya) devre hizmetleri de pasif optik ağlarda kullanıcılara sunulabilen hizmetlerdendir. ITU ve IEEE tarafından 4 temel Pasif Optik Network (PON) standardı oluşturulmuş olup bu yapılar temelde 2 grupta kategorize edilebilir[21].

İlk mimari çeşidi ATM (asen kron transfer mod) tabanlı mimaridir. Bu mimarideki farklı teknolojiler, APON (ATM PON) , BPON(Broadband PON) ve GPON (Gigabit PON)dur. Diğer grup ise EPON (Ethernet PON) dur. Bu mimarilerin içerisinde en önemlileri EPON ve GPON dur [21].

### 1.2.1. APON– BPON

APON ve BPON, PON ağların ilk standardıdır. ITU-T G.983 koduyla topolojide yerini almıştır. Veri trafiği ATM mekanizması ile sağlanmaktadır [22].Oluşturulan bir sonraki standartta ise taşınan paketler sadece ATM teknolojisi kullanılarak taşınmadığı için

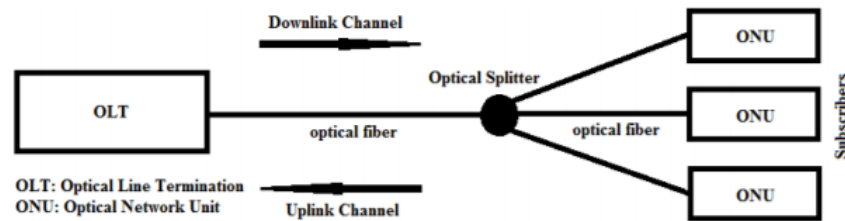
BPON adıyla anılmaya başlanmıştır [21,22]. Bu teknoloji aşağıyönde 622 Mbit/s ve yukarıyönde 155 Mbit/s band genişliği imkanı sunmaktadır. Pasif optik ağın maksimum bölünme oranı 1/32 dir.

### 1.2.2. EPON, GEPON, 10 GEPON

EPON sistemlerde veri iletimi aşağıyönde 1,5 nm dalgaboyunda ve yukarıyönde 1,3 nm dalgaboyunda sağlanmaktadır. IEEE 802.3 standardında yer almaktadır. GEPON standardı ise aşağıyön ve yukarıyönde 1,25 Gbit/s olmak üzere simetrik veri iletimi sağlamaktadır. 10G-EPON standardı ise aşağıyönde 10Gbit/s ve yukarıyönde 1 Gbit/s veri iletimi sağlamakta olup IEEE802.3av standardında yer almaktadır [21-23].

### 1.2.3. GPON

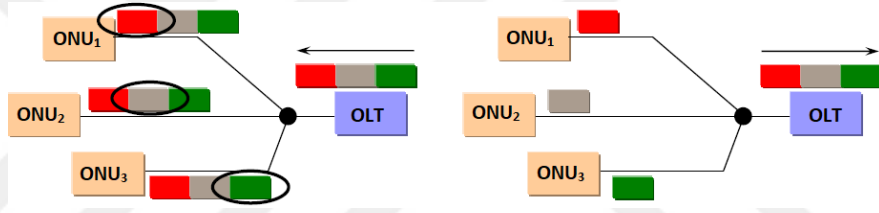
GPON standardı, ITU-T G.984 olarak yayımlanmıştır [22,23]. 2,488 Gbit/s aşağıyönde, 1,244 Gbit/s yukarıyönde veri iletim band genişliğine sahiptir. Maksimum optik ayırıcı bölünme sayısı 1/128 dir [22]. Veri iletimi aşağıyönde 1490 nm dalgaboyunda sağlanırken yukarıyönde 1310 nm dalgaboyunda gerçekleşmektedir. RF video yayını ise yalnızca kullanıcı yönüne doğru olup çoğa gönderim (multicast) olarak ve 1550 nm dalgaboyunda gerçekleşmektedir [24]. Aşağı ve yukarı yönde veri iletimi ile aşağı yönde gerçekleşen RF video yayını farklı dalgaboylarında olduğu görülmektedir. Aşağı yöndeki iletim, TDM (zaman bölmeli çoğullama - time division multiplexing) teknolojisi ile gerçekleştirilirken yukarı yönde ise TDMA (zaman bölmeli çoklu erişim - time division multiple access) teknolojisi ile gerçekleşmektedir. OLT(Optik hat terminali – Optical line terminal) port çıkış gücü +1,5 dBm ile +5 dBm arasındadır. ONU en büyük optik girişgücü -8 dBm ve en küçük optik giriş gücü -28 dBm olarak belirtilmiştir. Optik giriş güçlerinin sınırlarının belirlenmesinde maksimum bit hata oranı  $10^{-9}$  ( $BER \leq 10^{-9}$ ) olarak alınmıştır [25,26]. Şekil 1.18’de temel bir pasif optik ağın yapısı görülmektedir.



Şekil 1.18. Temel pasif optik ağ yapısı [27]

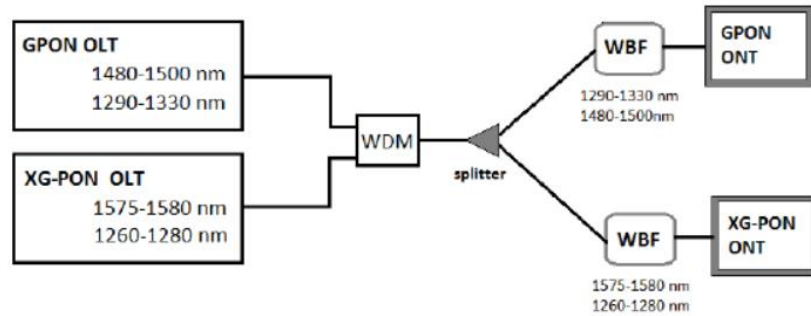
#### 1.2.4.XG-PON ve NG-PON

XG-PON ITU-T G.987 standardı altında yer almaktadır. XG-PON1 ve XG-PON2 olarak iki farklı jenerasyonu olan bu teknolojiye aşağıyönde 1575 – 1580 nm dalgaboyu aralığında veri taşınmakta iken yukarıyönde ise 1260 – 1280 nm dalgaboyunda veri taşınmaktadır. RF video yayını için ise 1550 nm dalgaboyu kullanılmaktadır. XG-PON1 aşağıyönde 10 Gbit/s ve yukarıyönde 2,5 Gbit/s olarak asimetric bir veri iletimi sağlamakta iken XG-PON2 ise 10 Gbit/s aşağıyön ve 10 Gbit/s yukarıyönde olmak üzere simetric bir veri iletimine olanak sağlamaktadır[28,29]. XG-PON teknolojisi de GPON teknolojisi gibi aşağıyönde TDM ve yukarıyönde ise TDMA teknolojisini kullanır. Bu sayede P2P ve P2MP veri iletimi sağlanmaktadır[30,31]. Şekil 1.19’da TDM ve TDMA paket akışları görülmektedir.



Şekil 1.19. GPON OLT – ONU arası veri paketlerinin iletimi [30]

XG-PON1 ve XG-PON2 teknolojileri, NG-PON1(yeni nesil pasif optik ağı - next generation passive optical network1) olarak adlandırılmaktadır. NG-PON1 teknolojisi ile birlikte kullanıcı başına düşen band genişliği artmış olup P2P ve P2MP yüksek hızlı devreler, OLT üzerinden daha çok verilmeye başlamıştır. Farklı bir uygulama olarak GPON ve XG-PON sistemleri birarada kullanılabilir. Şekil 1.20’de buna bir örnek görülmektedir [32].



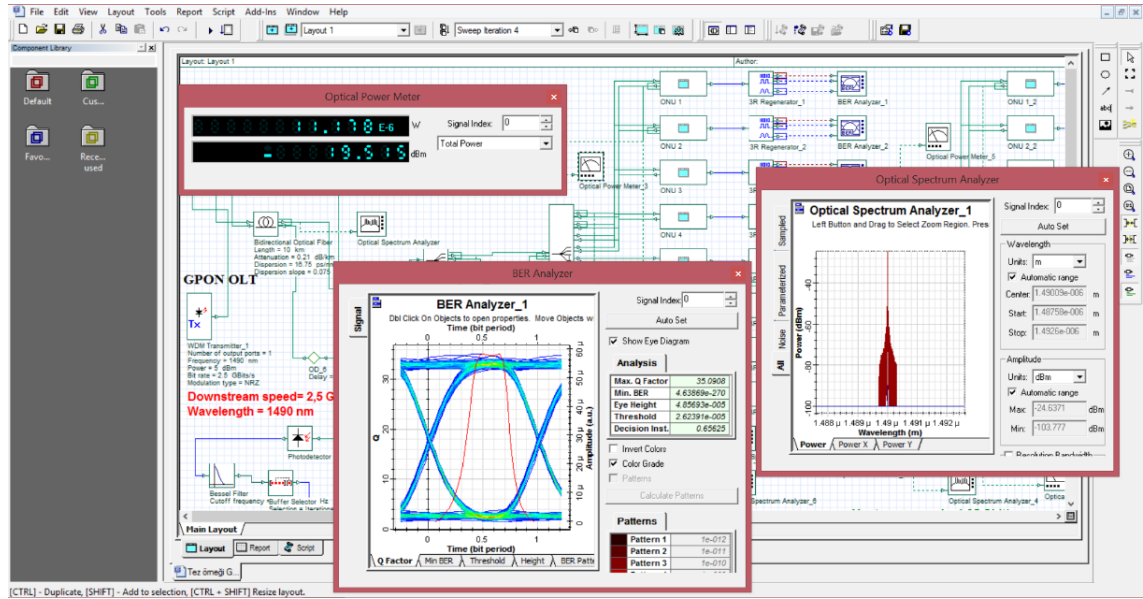
Şekil 1.20. GPON ve XG-PON sistemlerinin WDM yöntemi ile birleştirilmesi [32]



kullanımı ile artırılmış ve bu sayede kullanıcı sayısı ve iletim mesafesinde iyileştirmeler elde edilmiştir. Daha sonrasında kullanıcı tarafındaki ONU (optik ağ ünitesi – optical network unit) kısmındaki hassasiyet, tepkisellik ve kazanç gibi parametrelerin değişimlerinin veri iletim kalitesine etkileri gözlemlenmiştir. Gözlemlenen değerler sonucuna göre kullanıcı tarafındaki ONU değerleri optimize edilmiş ve optimize edilen bu değerler, simülasyonda kullanılan mevcut pasif optik ağ üzerine uygulanarak nihai değerlere ulaşılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre ise Q ve BER değerleri yorumlanarak sözkonusu sistemlerin performans değerleri matematiksel verilerle ortaya konulmuştur.

## 2.1. Optisystem 7.0 Simülasyon Programı ve Yeni Nesil Pasif Optik Ağlar

Şekil 2.1’de pasif optik ağ üzerinde simülasyonların yapılabildiği sonuç çıktılarının alındığı simülasyon programının arayüzü görülmektedir. Programda pasif devrelerin güç ölçümü, optik spektrum ölçümü, kalite faktörü eğrileri ve değerleri, göz diyagramları ve BER değerleri, çeşitli filtreler, multiplexer, demultiplexer gibi birçok optik ve elektriksel eleman üzerinde tasarım, ölçüm ve grafiksel çıktılar alınabilmektedir. Tez çalışmamızda Optisystem 7.0 programının deneme sürümü kullanılarak tasarım ve ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.1. Optisystem 7.0 simülasyon programı arayüzü ve örnek çıktılar

Yeni nesil erişim şebekelerinde veri iletimi kullanıcıdan üst sistemlere doğru sırasıyla ONU - pasif optik ağ, OLT(optik hat terminali - optical line terminal) - MPLS (çok protokollü katman anahtarlama - multi protocol label switching) şeklinde bir yol izleyerek MPLS bulutu üzerinden ana omurgaya ve bu omurga üzerinden de veri gideceği yere ulaştırılmış olmaktadır. Bu tezde uçtan uca bir yeni nesil şebekenin ONU - pasif optik ağ - OLT sırasındaki elemanlar ve bu elemanların parametreleri üzerinde durularak temel GPON yapısından yola çıkmak suretiyle daha yüksek kapasiteli pasif optik ağların performansları incelenmiş ve farklı yaklaşımlarla pasif optik ağda iyileştirmeler sağlanmıştır.

## 2.2. GPON OLT Yapısı ve Özellikleri

Çizelge 2.1’de Ericsson GPON OLT’nin, Çizelge 2.2’de ise Nokia GPON OLT’nin belirli özellikleri verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde pasif optik ağ ve iletim özelliklerinin aynı ve temel GPON standartlarında, diğer bazı özelliklerin ise üreticinin kendi ürününe özgü olduğu görülmektedir. Örnek olarak aşağı ve yukarıyön iletim dalgaboyları sırasıyla 1490 nm, 1310 nm ve video yayın dalgaboyu 1550 nm ve her iki üreticinin ürününde de aynı değerlerde iken, kontrol kartı ve OLT-MPLS bağlantı kartı Ericsson OLT’de farklı kartlar iken, Nokia OLT’lerde ise hem kontrol hem de OLT-MPLS bağlantısı aynı kartlar üzerinden yapılmaktadır. OLT-MPLS bağlantı kartlarındaki portların bantgenişlikleri ise Ericsson OLT’lerde 2 Gbit/s’den 40 Gbit/s’ye çıkabileceği gibi Nokia OLT’lerde 2 Gbit/s den 8 Gbit/s’ye kadar çıkabilmektedir. Pasif optik ağdaki dallanma ise Ericsson OLT’de 64, Nokia OLT’de ise 128 kullanıcıya kadar çıkabilmektedir.

**Çizelge 2.1.** GPON Temel Özellikleri (Ericsson BLM 1500 OLT) [25]

Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Tipik Değer	Birim
OLT Çıkış Gücü	+1,5	+5	+3	dBm
ONU Giriş Gücü	-11	-28	-18	dBm
Veri İletim Mesafesi	-	20	-	km
Aşağıyön Veri İletim Dalgaboyu	-	-	1490	nm
Yukarıyön Veri İletim Dalgaboyu	-	-	1310	nm

Video Yayını Dalgaboyu	-	-	1550	nm
Pasif Ağ En Fazla Bölünme Oranı	-	-	64	ONU
OLT – MPLS Arası Band Genişliği	2	40	-	Gbit/s
Bir Şelfteki OLT – MPLS Arası Yukarıyön Kartı (E28)	-	-	2	Adet
Bir Şelfteki Kontrol Kartı (FAB3)	-	-	2	Adet
Bir Şelfteki Abone Kartı (GP8)	1	14	-	Adet
Bir Abone Kartındaki Port	-	-	8	Adet



**Çizelge 2.2.** GPON Temel Özellikleri (Nokia 7360 ISAM FX OLT) [55]

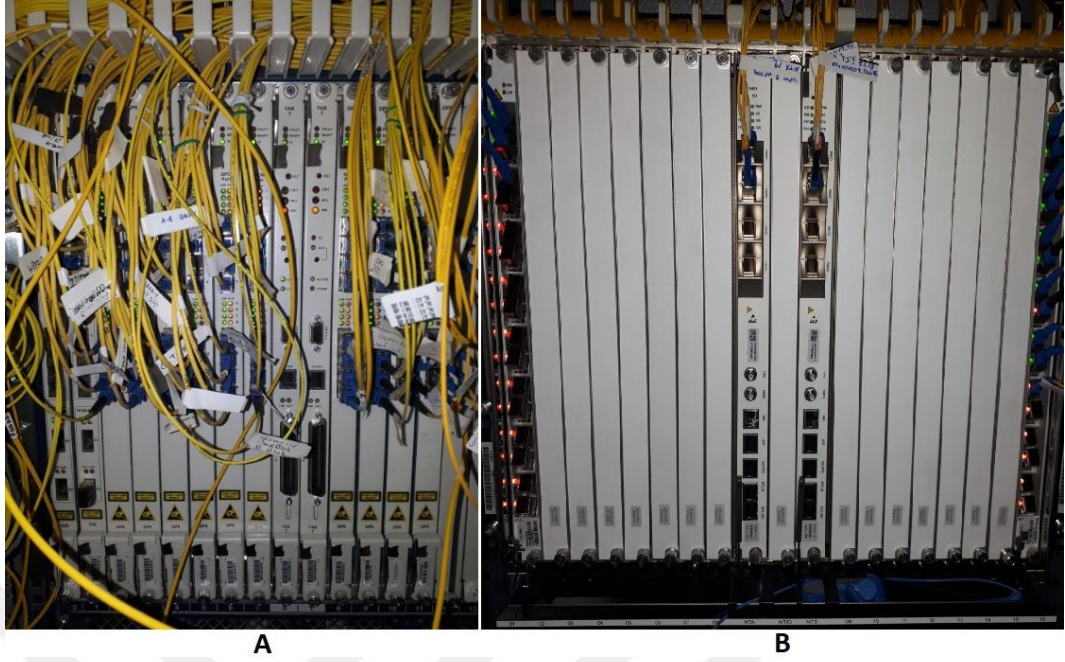
Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Tipik Değer	Birim
OLT Çıkış Gücü	+1,5	+5	+3	dBm
ONU Giriş Gücü	-11	-28	-18	dBm
Veri İletim Mesafesi	-	20	-	km
Aşağıyön Veri İletim Dalgaboyu	-	-	1490	nm
Yukarıyön Veri İletim Dalgaboyu	-	-	1310	nm
Video Yayını Dalgaboyu	-	-	1550	nm
Pasif Ağ En Fazla Bölünme Oranı	-	-	128	ONU

OLT – MPLS Arası Band Genişliği	2	8	-	Gbit/s
Bir Şelfteki OLT - MPLS Arası Yukarıyön Bağlantı + KontrolKartı (FANT-F)	-	-	2	Adet
Bir Şelfteki Abone Kartı (FGLT-B / FGLT-C)	1	16	-	Adet
Bir Abone Kartındaki Port	8	16	-	Adet

Tez çalışmasına esas oluşturan GPON parametrelerinde OLT çıkış gücü +5 dBm olarak alınmıştır. Pasif optik ağdaki elemanlar (optik bölücü, konnektör, fiber optik kablo değerleri vb.) günümüzde ülkemizde Telekom sistemlerinde kullanılan sistemler ile birebir uyumlu olacak şekilde tasarlanmış ve mimari bu şekilde oluşturulmuştur. Optik bölücülerdeki her bir 2'ye bölme 3 dBm kayıp olarak değerlendirilmiş, fiber optik zayıflama değeri 0,21dB/km olarak alınmıştır. ONU alıcı parametrelerinde germanyum türü APD(avalans fotodiyot–avalanche photodiode) kullanılmış, tepkisellik (responsivity) değeri 0,835 A/W, iyonizasyon değeri 0,9 ve dark current 10nA olarak alınmıştır. Gerçekleştirdiğimiz pasif optik ağ tasarımındaki tüm öğeler, gerçekte kullanılan sistemlerin çalışma aralıklarındaki değerlerle örtüşecek şekilde oluşturulmuş ve simülasyon sonuçlarının da bu değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 2.2'de Ericsson ve Nokia OLT modelleri görülmektedir. Her iki OLT de incelendiğinde Ericsson'da 2 ayrı kontrol ve 2 ayrı MPLS bağlantı kartı bulunuyorken Nokia da sadece 2 kart hem kontrol hem de MPLS bağlantısını sağlamaktadır. Bu durumdan dolayı Ericsson OLT'de 1 şelfte 14 adet olan abone kartı Nokia OLT'de 16 ya çıkmıştır.





**Şekil 2.2.** Farklı GPON OLT modelleri(A:Ericsson BLM 1500, B:Nokia 7360 ISAM FX-16)

### **2.3. EDFA ile Kuvvetlendirme ve Alıcı Parametrelerinin Optimizasyonu**

XG-PON için EDFA değerlerinin belirlenmesinde öncelikli olarak EDF (erbiyum katkılı fiber – erbium doped fiber) boyunun farklı uzunlukta kullanımının performans değerlerine etkisi incelenmiş ve belirlenmiştir. Sonrasında belirlenen EDF boyu kullanılarak farklı güçte pompalamalar yapıp hangi güçteki pompalamanın daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Pompalama gücünün belirlenmesinin ardından EDF nin girişine, çıkışına ve her iki taraftan da olmak üzere 3 ayrı pompalama şekliyle hangi bağlantının performans açısından daha üstün olduğu belirlenmiştir. EDFA değerlerinin belirlenmesinde yapılan tüm testler hem 1480 nm dalgaboyunda pompalama için hem de 980 nm dalgaboyunda pompalama için ayrı ayrı uygulanarak elde edilen değerler kaydedilmiştir.EDFA değerlerinin tespitinden sonra ONU kısmında fotodedyektör tepkisellik ve kazanç değerleri üzerinde en yüksek verim için en uygun parametrelerin belirlenmesi amaçlanarak çalışmalar yapılmış olup sonuçta istenilen nihai değerlere ulaşılmıştır.TWDM PON için ise EDFA parametrelerinin belirlenmesinden önce en yüksek performansın elde edilmesi için EDFA konumunun tespiti yapılmıştır. EDFA'nın WDM multiplexer girişine ve çıkışına konumlandırılması sonucunda elde edilen değerlere göre EDFA konumu belirlenmiştir. EDFA konumunun belirlenmesinden sonra farklı EDF uzunluklarının EDFA performansına etkileri

incelenmiş olup EDF uzunluğu tespit edilmiştir. Sonrasında farklı pompalama güçlerinin etkileri incelenmiş ve pompalamadaki iyi sonucu veren güç değeri belirlenmiştir. Pompalama güç değerinin belirlenmesinin ardından ise yine girişe çıkışa ve çift yönde yapılan pompalamaların değerleri tek tek simüle edilerek tabloya işlenmiş ve en iyi performansı veren değer alınmıştır. Bu değerler de yine hem 1480 nm dalgaboyunda hem de 980 nm dalgaboyunda pompalamalar yapılarak ayrı ayrı testler gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirdiğimiz bu tez çalışmasında hem 1480 nm hem de 980 nm dalgaboyundaki pompalama yapılan EDFA kullanılan pasif optik ağlarda 16, 32, 64 ve 128 kullanıcı yapıların 10, 20, 40 ve 60 km mesafelerdeki göz diyagramları çıkarılarak bu diyagramlardaki değerler tablo olarak gösterilmiştir. TWDM PON için aşağıyön göz diyagramları sadece  $\lambda_1$  (1596 nm) dalgaboyu için çıkarılmıştır. Diğer dalgaboylarının ( $\lambda_2=1598$  nm,  $\lambda_3=1600$  nm ve  $\lambda_4=1602$  nm) aşağıyön karakteristikleri  $\lambda_1$  dalgaboyuna ait sinyal değerleriyle kıyaslanmış, birbirlerine çok yakın değerlerde oldukları görülmüş ve bu 4 dalgaboyu tez içerisinde ayrıca grafiksel olarak karşılaştırmalı şekilde verilmiştir. Daha sonra elde edilen verilerin 1480 nm ve 980 nm pompalamalı EDFA katkılarının sonuçları öncelikle EDFA kullanılmayan modele göre kıyaslanmış ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Ardından 980 nm dalgaboyunda pompalama yapılan EDFA kullanımı ile 1480 nm dalgaboyunda pompalama yapılan EDFA kullanımının pasif optik ağda OLT çıkış gücüne etkisinin değerlendirilmesi yine grafiksel olarak karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

XG-PON üzerindeki ölçümlerde öncelikle GPON parametreleri baz alınmıştır. Baz alınan bu parametrelerden farklı olanlar band genişliği ve dalgaboylarıdır. GPON aşağıyön dalgaboyu 1490 nm iken XG-PON da 1577 nm kullanılmış; yukarıyön dalgaboyu ise GPON da 1310 nm iken XG-PON da 1270 nm kullanılmıştır. İlave olarak GPON'da aşağıyönde 2,5 Gbit/s olan veri iletim hızı XG-PON da 10 Gbit/s olarak ve 1,25 Gbit/s olan yukarıyön hızı ise 2,5 Gbit/s olarak değiştirilerek band genişliği artırımının veri iletim kalitesine etkileri göz diyagramları, oluşturulan tablolar ve karşılaştırmalı grafikler yardımıyla yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan varılan noktada ise birim zamanda iletilen veri miktarının artmasının, veri iletiminde bozulmalara yol açtığı görülmüştür. Ayrıca bu bozulmaların hem pasif optik ağdaki iletim mesafesinin hem de bölünme oranının düşmesine neden olduğu sonucuna

varılmıştır. Bu durumdan dolayı veri iletim kalitesinin artırılması için EDFA kullanımı ile OLT çıkış gücü artırılmış, ONU alıcısında ingaas(indium galyum arsenik) tipifotodiyot kullanılmıştır. Kullanılan fotodiyot tipik olarak tepkisellik 0,835A/W, iyonizasyon 0,45 ve dark current 10nA değerlerine sahip olup bu değerler üzerinden simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda çarpanlı tepkiselliğin(M), farklı değerlerindeki simülasyon sonuçları değerlendirilerek en az BER değeri elde edilen M parametresi belirlenmiş ve göz diyagramlarında kayda değer iyileşmeler olduğu görülmüştür.

TWDM PON daki ölçümlerde de baz alınan temel yapı GPON dur. GPON parametrelerinin kullanıldığı TWDM PON yapısında devreye ilave olarak WDM multiplexer eklenmiştir. TWDM PON üzerinde ilk aşamada yapılan ölçümler için tamamen GPON parametreleri (OLT çıkışı gücü, pasif optik ağ yapısı ve ONU alıcı hassasiyeti) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TWDM PON da 4 ayrı dalgaboyu WDM multiplexer kullanılarak tek fiber lifi üzerine bindirilmiş ve alıcı kısımlarındaki ONU larda farklı dalgaboylarına göre filtreler kullanılarak her 4 dalgaboyu için de ayrı ayrı sinyaller ayrı ayrı alınmış ve ölçümlenmiştir. Her bir dalgaboyu için aşağıyön bandgenişliği 10 Gbit/s olmak üzere 4 ayrı dalgaboyunda toplam 40 Gbit/s band genişliği ile veri iletimi sağlanmıştır. Aşağıyönde kullanılan dalgaboyları ise 1596 nm, 1698 nm, 1600 nm ve 1602 nm dir. Yukarıyönde ise yine 4 farklı dalgaboyunda herbir dalgaboyu için 2,5 Gbit/s band genişliği olmak üzere toplamda 10 Gbit/s bandgenişliği sağlanmış olmaktadır. Yukarıyönde veri iletimi yapılan dalgaboyları ise 1522 nm, 1524 nm, 1526 nm ve 1528 nm dir. Gerçekleştirdiğimiz TWDM PON uygulamasında da ilk aşamada kullanılan temel GPON yapısı parametreleri sonucu elde edilen veriler değerlendirilmiş ve sonrasında veri iletiminin hem mesafe hem bölünme oranı açısından iyileştirilmesi yönünde EDFA kullanımı ile OLT çıkış gücü artırılmış olup, ONU alıcı kısmında ingaas APD kullanımı ile hassasiyet artırılmıştır. Burada OLT çıkış gücü GPON da olduğu gibi +5 dBm olup WDM multiplexer çıkışı sonrası EDFA kullanımının etkisiyle artırılmıştır. ONU alıcı kısmında tepkisellik 0,835A/W, iyonizasyon 0,45 ve dark current 10 nA olarak belirlenmiştir. Tüm bu parametreler belirlendikten sonra nihai ölçümler yapılmış olup yapılan optimizasyonlar sonucunda TWDM PON da 41 dBm güç bütçesi elde edilmiştir. Bu güç bütçesi ile 5 km mesafeye kadar 8192 adet ONU ya

veri iletimi gerçekleştirilebileceği görülmüştür. Benzer şekilde 1024 adet ONU ya 50 km mesafede bağlantı sağlanabildiği gösterilmiştir.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

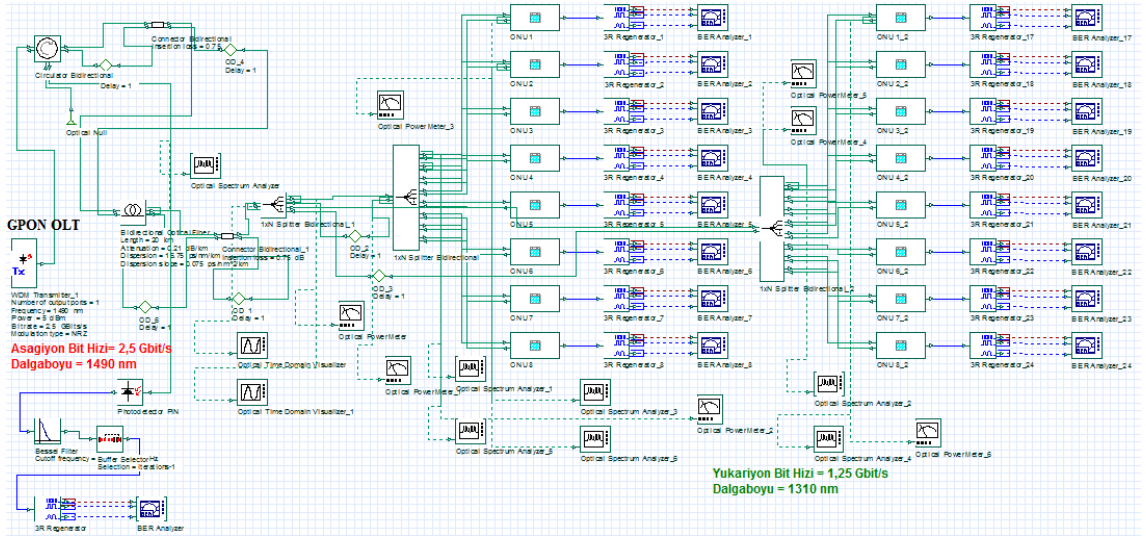
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. GPON Üzerinde Yapılan Ölçümler

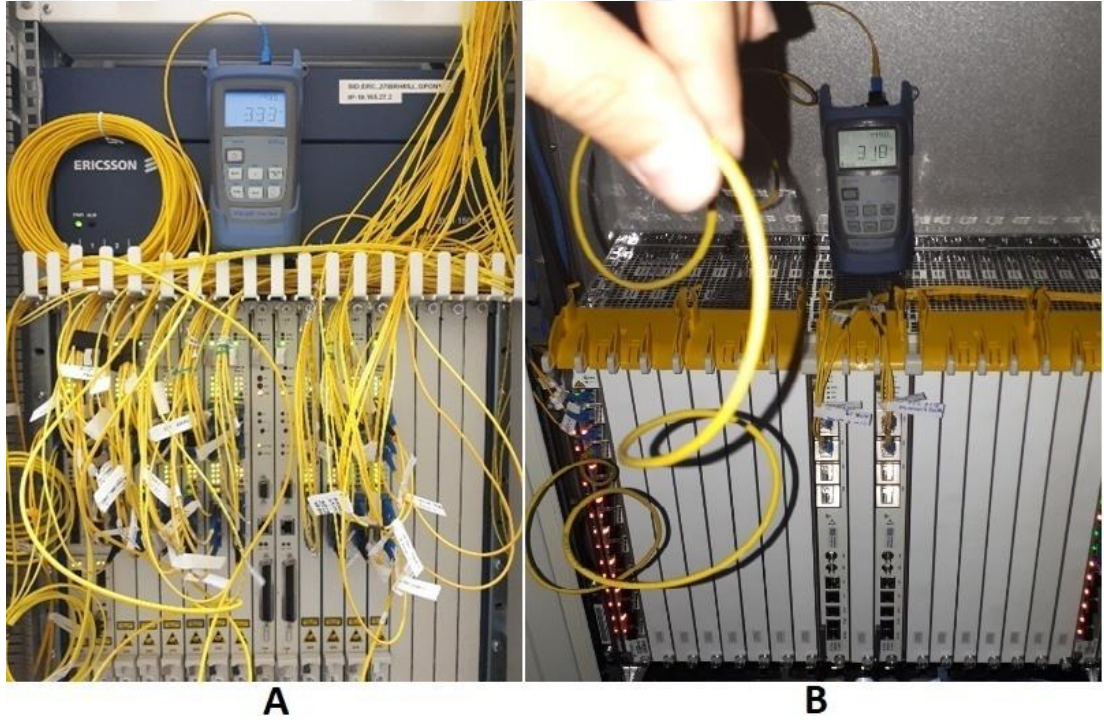
Pasif optik ağlarda kullanıcı sayısının artırılması için optik bölücülerin kullanılması, sinyalin daha da zayıflamasına neden olmaktadır. Bu duruma ilave olarak verinin uzak mesafelere ve daha yüksek hızlarda iletim ihtiyacından dolayı pasif optik ağ sistemleri üzerinde akademik makale, tez gibi çalışmalar yürütülmektedir. Aynı zamanda teknoloji lideri firmalar tarafından ise laboratuvar ortamlarında deneyler ve bazı iyileştirmeler yapılmaktadır.

Simülasyonda oluşturulan tasarımda OLT çıkış gücü (Tx) +5 dBm olarak belirlenmiş olup (kayıplar düşüldüğünde simülasyon güçölçer değeri +2,5 dBm), fiber optik kablonun birim zayıflama değeri 0,21 dB/km olarak seçilmiştir. Pasif optik bölücülerin her 2 ye bölme aşamasındaki kayıp miktarı, 3dBm olarak belirlenmiştir. ONU'ların alıcı kısmında (Rx)'i oluşturan fotodedektör yapının tepkisellikdeğeri 0,835A/W olarak belirlenmiş ve simülasyon sonuçları da bu elemanların karakteristiklerine göre değerler üretmiştir. [39,40]

Şekil 3.1'de referans GPON yapısı görülmektedir. Bu analizde, GPON'da OLT'nin çıkış gücü +5 dBm alınarak aşağıyönde 2,5 Gbit/s hızında veri iletimi simüle edilmiş ve bu değerler altında 16, 32 ve 64 kullanıcı modellerin 10, 20, 40 ve 60 km fiber optik erişim hat uzunluklarındaki davranışları incelenmiştir. ONU alıcı kısmında çarpan kazancı 3 olan APD kullanılmıştır. Bu değerlerde yapılan ölçüm ve simülasyonlarla Q ve BER değerlerinin sonuçları yorumlanmıştır.



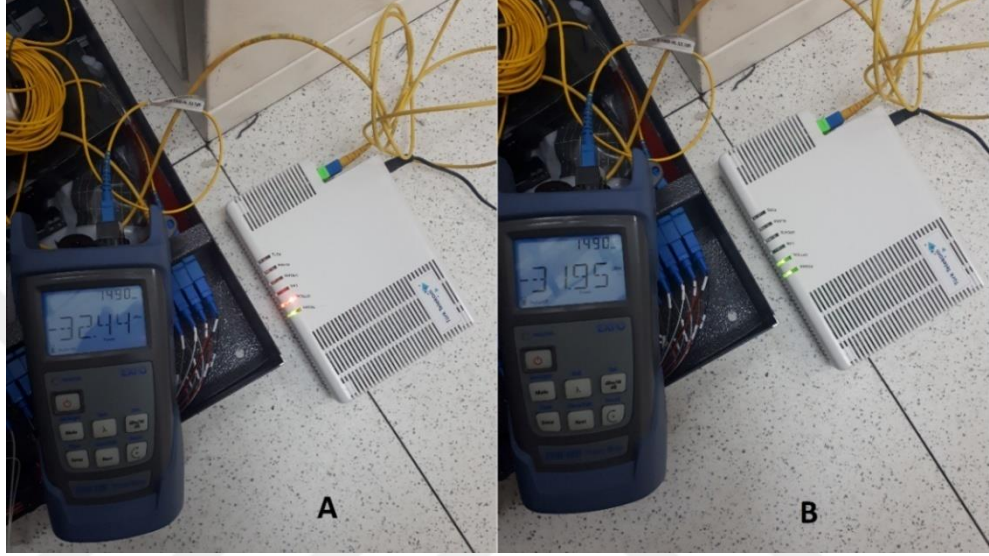
**Şekil 3.1.** Performans ölçümü için tasarlanan GPON yapısı (16 kullanıcılı)



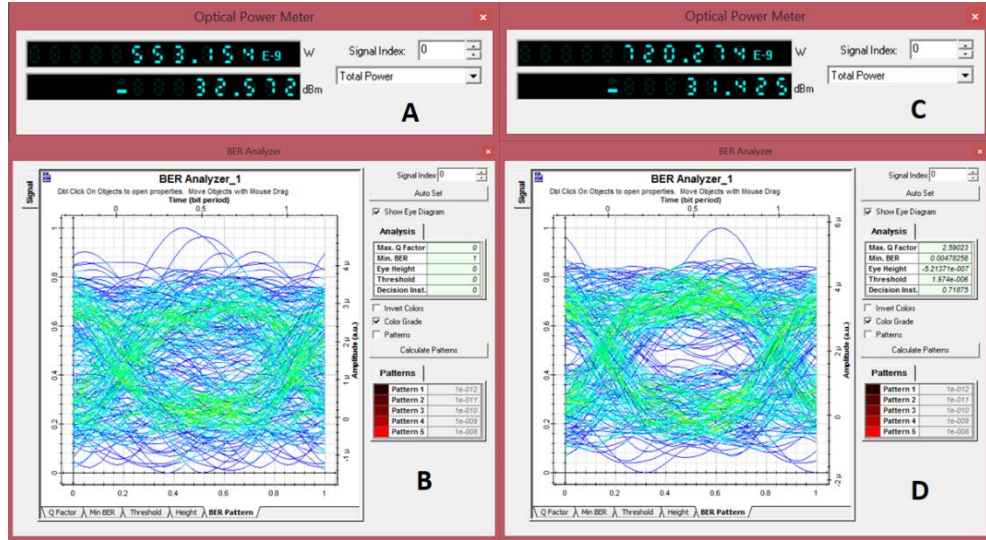
**Şekil 3.2.** GPON OLT ve ölçülen çıkış güç seviyeleri (A: Ericsson BLM 1500 OLT, B: Nokia 7360 ISAM FX-16 OLT)

Şekil 3.2’de Ericsson ve Nokia OLT’ler görülmektedir. Bu OLT’lerin kullanıcı tarafı port çıkış sinyal seviyeleri deneysel olarak ölçülmüş ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Yapılan ölçümler 1490 nm dalgaboyunda ve dBm olarak ölçülmüştür. Değerler incelendiğinde Ericsson BLM 1500 OLT’nin çıkış gücü 3,33 dBm ölçülmüş, Nokia 7360 ISAM FX-16 OLT’nin çıkış gücü ise 3,18 dBm olarak ölçülmüş ve teorik GPON verileri deneysel olarak ta gösterilmiştir.

OLT çıkış güçlerindeki ölçümler sonrasında ONU alıcı kısmındakisinyal seviyeleri üzerinde birtakım ölçümler yapılmış ve bu ölçümlerin sonucunda elde edilen değerler Şekil 3.3'te deneysel olarak ve Şekil 3.4'te de simülasyon ortamında gösterilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda Şekil 3.4'deki simülasyon sonuçlarının Şekil 3.3'deki deneysel verilerle örtüştüğü görülmektedir.



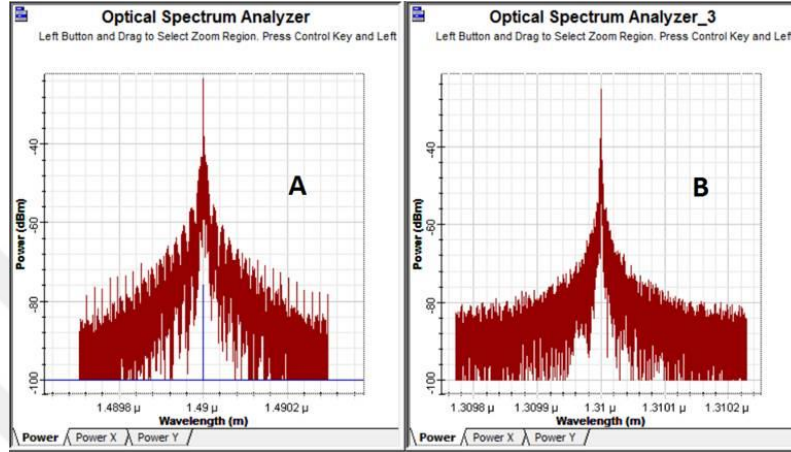
**Şekil 3.3.** ONU üzerinde veri iletim aralığı ve dışında yapılan ölçümler (A: optical ışığı kırmızı iken veri iletimi yok, B: optical ışığı yeşil iken veri iletimi var)



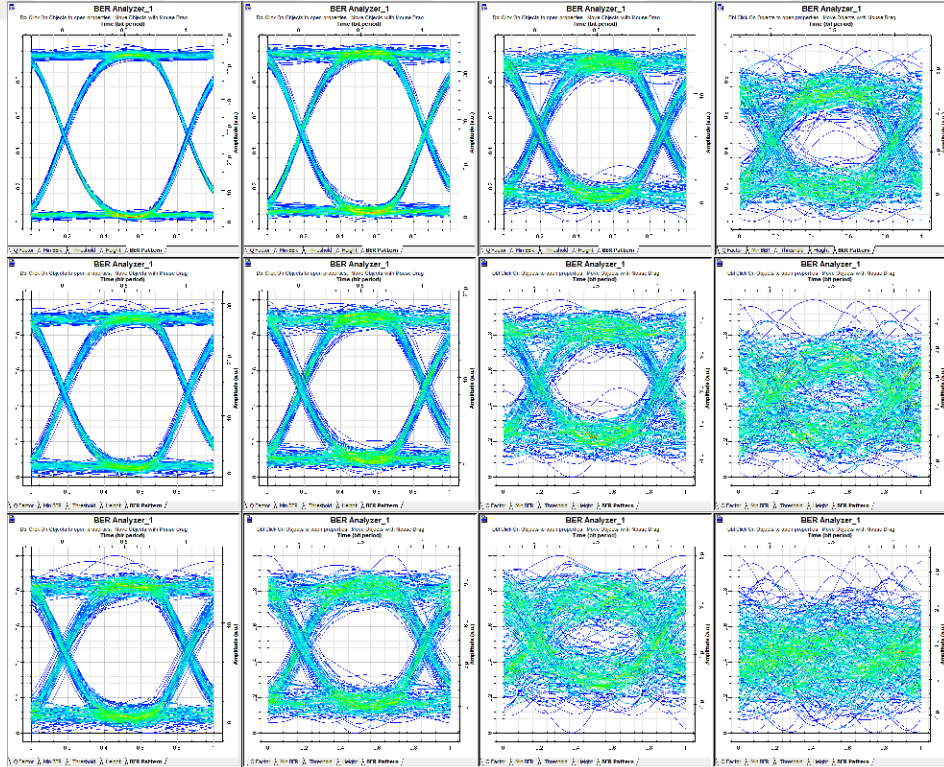
**Şekil 3.4.** Simülasyon sonuçlarına göre GPON sınır değerleri (A,B: veri iletim yok; C,D: veri iletim var)

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 incelendiğinde Şekil 3.3'de gerçek sistemler üzerinde yapılan ölçümlerin sonuçları görülmekte olup Şekil 3.4'de ise simülasyon sonuçları

görülmektedir. Şekiller incelendiğinde gerçek sistem üzerinden elde edilen verilerin simülasyon ortamında doğrulandığı ve birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sırasıyla GPON aşağıyön ve yukarıyön iletim dalgaboyları simülasyon çıktıları ile tasarlanan GPON yapısının kanal bölünme sayısı ve mesafeye bağlı olarak aşağı yön göz diyagramları verilmiştir.



Şekil 3.5. GPON aşağıyön ve yukarıyön iletim dalgaboyu spektrumları (A: aşağıyön, 1490 nm; B: yukarıyön, 1310 nm)



Şekil 3.6. GPON aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16,32, 64 kullanıcı, soldan sağa 10,20,40,60 km)

Şekil 3.6'daki diyagramlar incelendiğinde 16 kullanıcı yapılarının 40 km lik mesafeye kadar iletim sağlayabildiği ve daha uzak mesafelerde göz diyagramının daralıp bozulduğu görülmektedir. 32 kullanıcı yapı için ise 40 km mesafeye ulaşmadan optik iletimin bozulduğu ölçülen değerlerden görülmekte olup 64 kullanıcı için ise 20 km nin maksimum iletim mesafesi olarak görülmüştür. Tasarımı yapılan devre mimarisi, minimum BER değeri  $1 \times 10^{-9}$  seviyesi baz alınarak değerlendirilmiştir. Ölçümleri yapılan devrelerde OLT çıkış gücü +5 dBm olarak alınmış olup harici olarak herhangi bir kuvvetlendirici kullanılmamıştır. Bu durumdan dolayı ölçülen değerlerin, GPON mimarisinin standartlarını oluşturan değerler ile örtüşmekte olduğu görülmüştür. Ölçülen bu değerler baz alınarak XG-PON teknolojisinde aşağıyönde sunulan 10 Gbit/s seviyesinde veri iletim kapasitesine sahip pasif optik ağların performans değerleri kıyaslanmıştır. XG-PON mimarili sistemin performansında iyileştirmeler sağlamak amacıyla EDFA kullanımının sonuçları incelenip değerlendirilmiştir. Neticede EDFA kullanımıyla XG-PON mimarili sistemin uzun mesafe, yüksek hız ve yüksek sayıda kullanıcı gereksinimleri karşılanmış olacaktır.

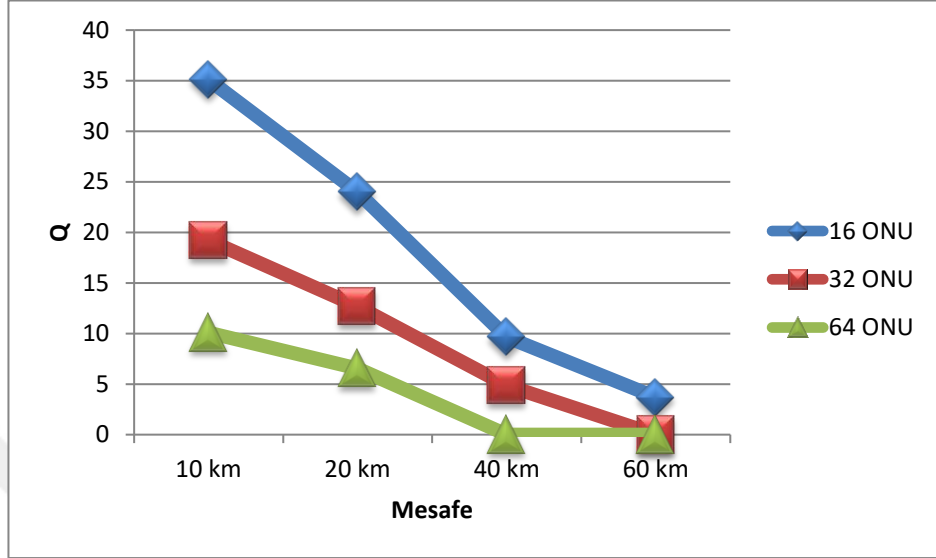
Çizelge3.1'de sırasıyla mesafe, kullanıcı sayısı, Q ve BER ölçüm değerleri görülmektedir. BER sınır değeri  $\leq 1 \times 10^{-9}$  olarak alındığında 64 ONU ile 20 km mesafeli yapının bu kullanıcı sayısı ile birlikte iletim sağlanabilecek maksimum mesafenin olduğu görülmüştür. Çizelge3.1'deki simülasyon sonuçları incelendiğinde 64 kullanıcı 20 km mesafede Q 6,55 olarak ölçülmüş ve BER  $2,96 \times 10^{-11}$  şeklinde gerçekleşmiştir. Ve bu değer belirtilen şartlarda veri iletiminin sağlıklı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

**Çizelge3.1.** GPON kullanıcı ve mesafe değişimine göre Qdeğerleri

Optik Mesafe	Kullanıcı Sayısı	Q	BER
10 km	16 ONU	35,09	$4,64 \times 10^{-270}$
	32 ONU	19,21	$1,54 \times 10^{-82}$
	64 ONU	10,08	$3,4 \times 10^{-24}$
20 km	16 ONU	23,97	$2,87 \times 10^{-127}$
	32 ONU	12,68	$5,05 \times 10^{-37}$
	64 ONU	6,55	$2,96 \times 10^{-11}$
40 km	16 ONU	9,64	$2,76 \times 10^{-22}$
	32 ONU	4,86	$5,91 \times 10^{-7}$
	64 ONU	0	1
60 km	16 ONU	3,7	0,00011
	32 ONU	0	1

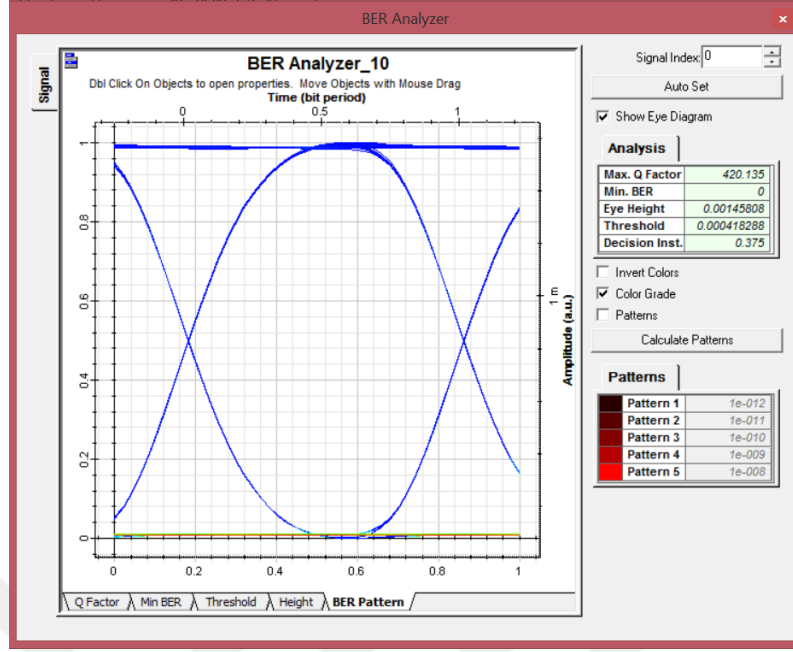


GPON mimarili sistem üzerinde yapılan ölçümlerde ulaşılan değerler ve bu değerlerden elde edilen grafik Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. GPON mimarili sistem kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri

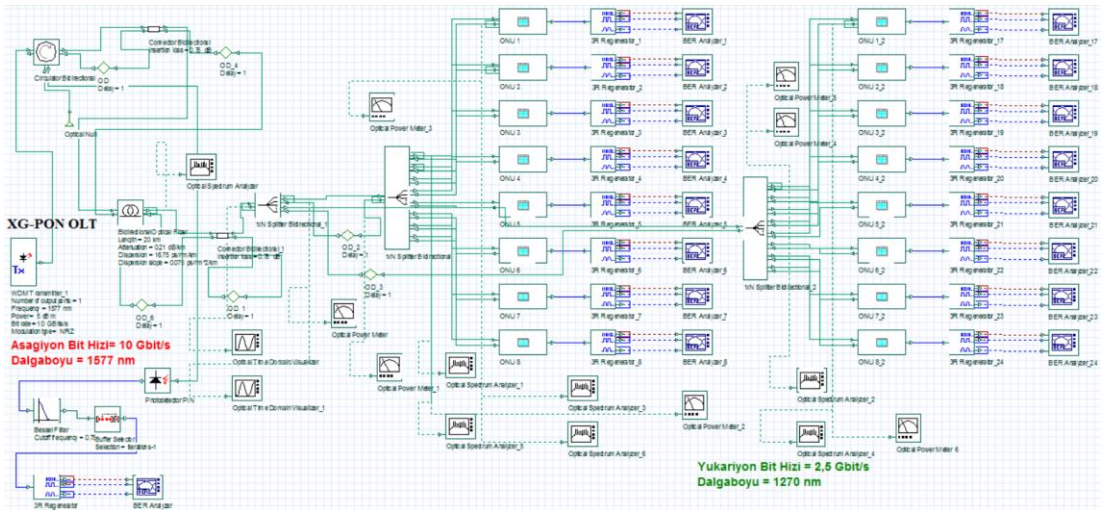
Şekil 3.7 incelendiğinde abone sayısının artmasının, Q nun düzenli bir şekilde düşüşüne neden olduğu görülmektedir. Aynı kullanıcı sayısında mesafeyi değiştirdiğimizde ise artan mesafeye bağlı olarak Q nun yine düştüğü görülmektedir. Ölçüm sonuçlarında elde edilen değerler ise Çizelge3.1’de görülmektedir. Bu değerler yorumlanırken sağlıklı bir optik iletim için bit hata oranının (BER)  $\leq 10^{-9}$  olması gerekmektedir. Şekil 3.8’de GPON yukarıyön veri iletiminin göz diyagramı görülmektedir. Ölçümler 60 km mesafede yapılmış olup bu mesafedeki yukarıyön veri iletiminin, aşağıyön veri iletimine göre daha kayıpsız olduğu görülmektedir. Bu noktada ulaşılan sonuç iletim mesafesini kısıtlayan asıl etkenin aşağıyön veri iletim karakteristikleri olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni ise aşağıyönde ilerleyen sinyalin optik bölücüler vasıtasıyla bölünmeye mazur kalmasındandır.



Şekil 3.8. GPON yukarıyön göz diyagramı (60 km)

## 3.2. XG-PON Üzerinde Yapılan Ölçümler

### 3.2.1. GPON parametreleri kullanılarak yapılan ölçümler

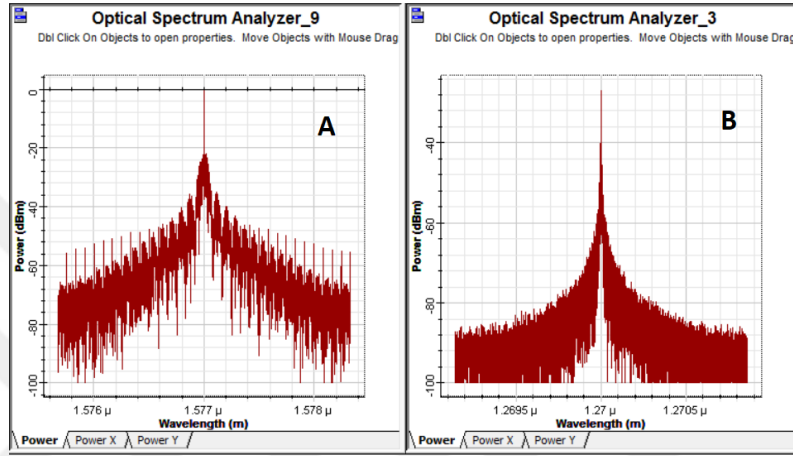


Şekil 3.9. Performans ölçümü için tasarlanan XG-PON yapısı (16 kullanıcı)

XG-PON teknolojisi kullanılarak tasarlanan Şekil 3.9'daki pasif optik ağda, OLT çıkış gücü +5 dBm, modülasyon tipi NRZ, aşağıyön dalgaboyu 1577 nm ve band genişliği 10 Gbit/s, yukarıyön dalgaboyu 1270 nm ve band genişliği 2,5 Gbit/s olarak optik parametreler belirlenmiştir. GPON'da kullanıldığı gibi, ONU alıcı kısmında çarpan

kazancı 3 olan APD kullanılmıştır. Elde edilen değerler veri trafiğinin 10, 20, 40 ve 60 km mesafelerde 16, 32, 64 ve 128 kullanıcıli topolojileri incelenmiş ve simülasyon sonuçlarına göre Q ve BER değerleri yorumlanmıştır.

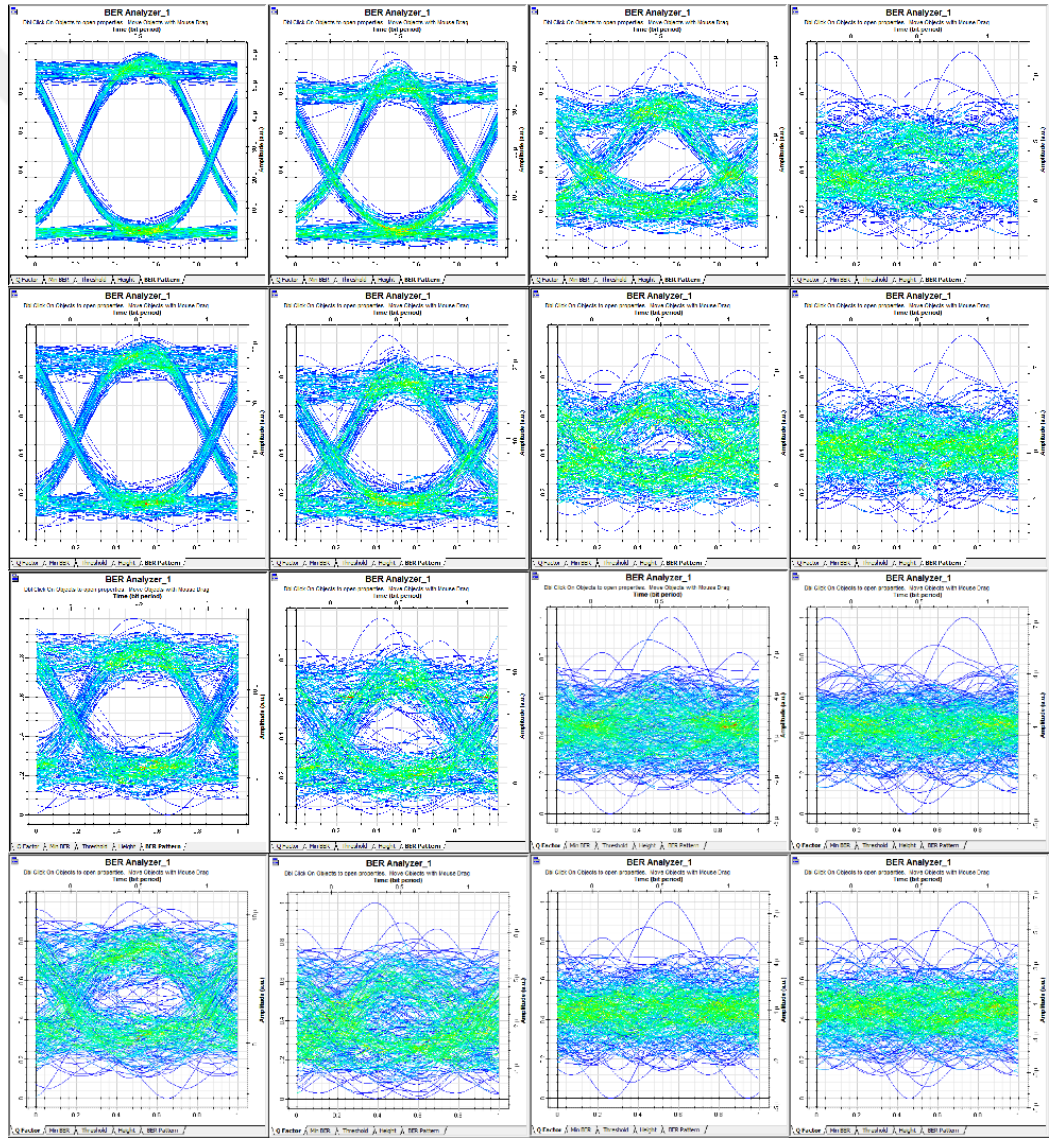
Şekil 3.10'da simülasyonunu yaptığımız XG-PON da spektrum analizörleri vasıtasıyla ölçümlenen aşağıyönde 1577 nm dalgaboyunda ve yukarıyönde 1270 nm dalgaboyundaki iletim sinyalinin spektrumları görülmektedir.



Şekil 3.10. XG-PON aşağıyön ve yukarıyön iletim dalgaboyu spektrumları (A: aşağıyön, 1577 nm; B: yukarıyön, 1270 nm)

Ölçümler sonucunda elde edilen aşağıyön göz diyagramları Şekil 3.11'de görülmektedir. Diyagramlar incelendiğinde, GPON mimarisine göre göz diyagramlarında daha çok bozulmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun temel sebebi ise birim zamanda iletilebilecek veri miktarının GPON'da iletilen verinin 4 katı olmasındandır. Birim zamandaki veri iletiminin artması, sinyaldeki hassasiyetin de artmasına neden olmaktadır. İletilen sinyalde artan bu hassasiyet, birim mesafedeki zayıflama değerlerinin yükselmesine, sistemin gürültülerden daha fazla etkilenmesine ve dolayısıyla sistemin kararlılığının azalmasına yol açmaktadır. İncelenen göz diyagramlarına göre 10 km mesafe baz alındığında 16, 32 ve 64 kullanıcıli topolojilerin optik iletim sağlayabildiği ancak 128 kullanıcıli modelin optik iletimi 10 km mesafede dahi sağlayamadığı göz diyagramındaki bozulmadan görülmektedir. 20 km uzunluğundaki fiber optik erişim şebekesi ile veri iletimi yapılmak istendiğinde ise 16 ve 32 kullanıcıli topolojide diyagram çizgilerinin belirgin olduğu ancak bu mesafede daha fazla kullanıcı sayısına erişim istendiğinde veri iletiminin yapılamayacağı görülmektedir. 40 km ve 60 km mesafelerde ise hiçbir kullanıcı sayısında veri iletiminin

gerçekleşmediği diyagramlardaki bozulmalardan görülmektedir. 40 km mesafede ve 16 kullanıcıli topolojide göz diyagramı kısmen açık gibi görünse de Çizelge 3.2'deki BER değeri veri iletiminin sağlanması için yeterli gelmemektedir. Veri iletiminin sağlanabilmesi için  $BER \leq 10^{-9}$  eşitsizliğindeki değerin sınırları dahilinde olması gerekmektedir. Sonuç olarak Şekil 3.11'deki değerler ile uzak mesafe ve çok sayıda kullanıcıya yüksek hızda veri iletimi sağlanması oldukça zor görülmektedir. Gereksinim duyulan şartlarda sağlıklı veri iletimi için pasif optik ağ üzerinde birtakım iyileştirmeler yapılarak değerlerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Şekil 3.11'deki değerlere göre 16 ve 32 kullanıcı haricindeki neredeyse hiçbir yapıda iletimin sağlanamadığı görülmektedir.



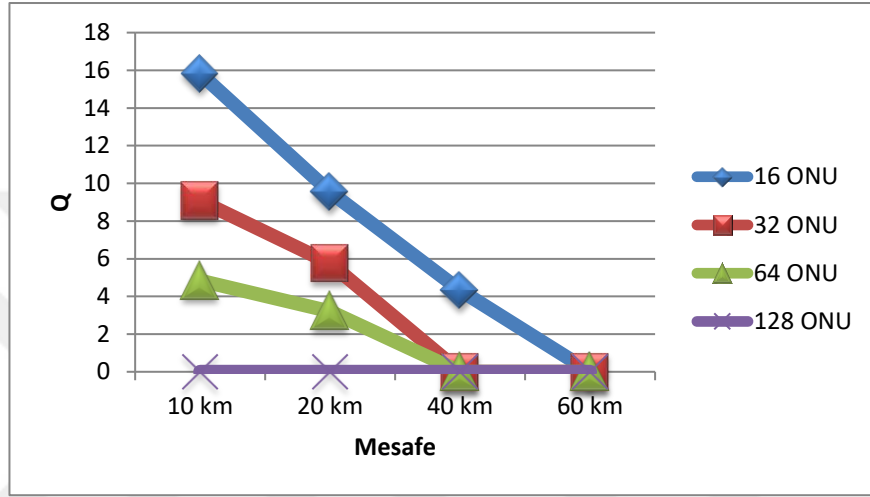
Şekil 3.11. XG-PON aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıya 16,32, 64 ve 128 kullanıcıli, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km)

Çizelge3.2’de simülasyon sonuçlarına göre Q ve BER değerlerinin 16, 32, 64 ve 128 kullanıcı yapıları ve 10, 20, 40, 60 km mesafelerdeki sonuçları görülmektedir. Dikkat çeken en önemli nokta ise 128 kullanıcı topolojide hiçbir mesafede veri iletimi görülmemesidir. Aynı şekilde 40 km ve 60 km mesafede oluşturulan 16, 32 ve 64 kullanıcı topolojilerden hiçbirisinde veri iletiminin sağlanmadığı görülmektedir. Tablodaki diğer değerler incelendiğinde 64 kullanıcı topoloji üzerinde 20 km mesafeli fiber optik şebekede de veri iletiminin sağlanmadığı görülmektedir. 20 km mesafede ancak 32 kullanıcı topolojide sınır değerlerde veri iletimi sağlandığı gözlemlenmiştir. XG-PON yapısında birim zamanda iletilen veri miktarının artması kararlılığı etkilemiş olup, GPON yapısında 64 kullanıcı topolojide 20 km mesafede veri iletimi sağlanabilirken, XG-PON yapısında ölçülen simülasyon değerlerine göre 64 kullanıcı topolojide 20 km mesafede veri iletimi sağlanamamaktadır.

**Çizelge3.2.** XG-PON kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri

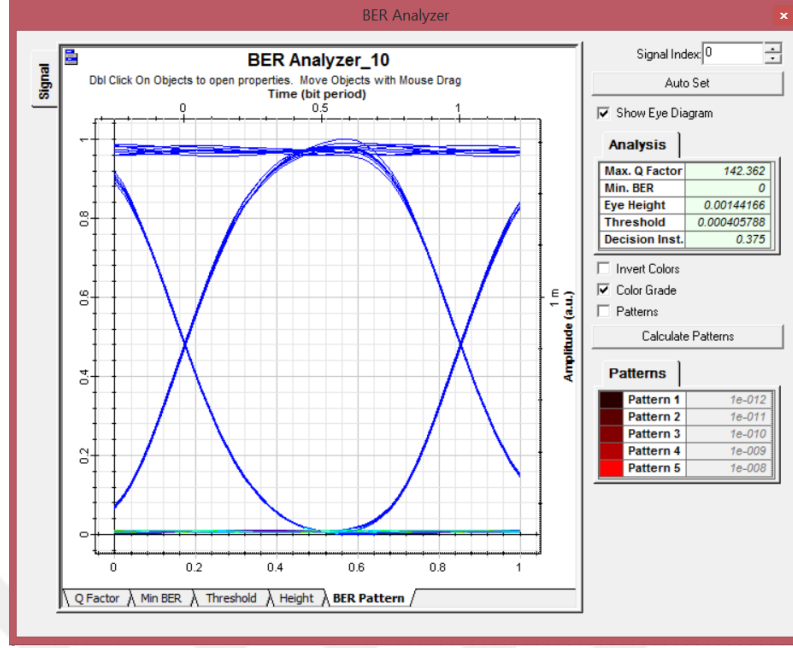
Optik Mesafe	Kullanıcı Sayısı	Q	BER
10 km	16 ONU	15,83	$1,04 \times 10^{-56}$
	32 ONU	9,08	$5,43 \times 10^{-20}$
	64 ONU	4,84	$6,63 \times 10^{-7}$
	128 ONU	0	1
20 km	16 ONU	9,54	$7,16 \times 10^{-22}$
	32 ONU	5,76	$4,24 \times 10^{-9}$
	64 ONU	3,2	0,0007
	128 ONU	0	1
40 km	16 ONU	4,33	$7,48 \times 10^{-6}$
	32 ONU	0	1
	64 ONU	0	1
	128 ONU	0	1
60 km	16 ONU	0	1
	32 ONU	0	1
	64 ONU	0	1
	128 ONU	0	1

Şekil 3.12’de XG-PON sistemi üzerinde farklı kullanıcı sayılarına ve mesafeye bağlı olarak Q değerinin değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde Q, artan kullanıcı sayısına ve artan mesafeye bağlı olarak düşüş göstermektedir. Diğer bir dikkat çeken nokta ise 128 kullanıcı yapılarının hiçbir erişim mesafesinde veri iletimi sağlayamamasıdır. Bunun temel sebebi ise yüksek band genişliğine bağlı hassasiyet ve bölünmeye bağlı olarak optik sinyalin fazla miktarda zayıflamasıdır.



Şekil 3.12. XG-PON mimarili sistem kullanıcı ve mesafe değişimine göre aşağıyön veri trafiği Q değerleri

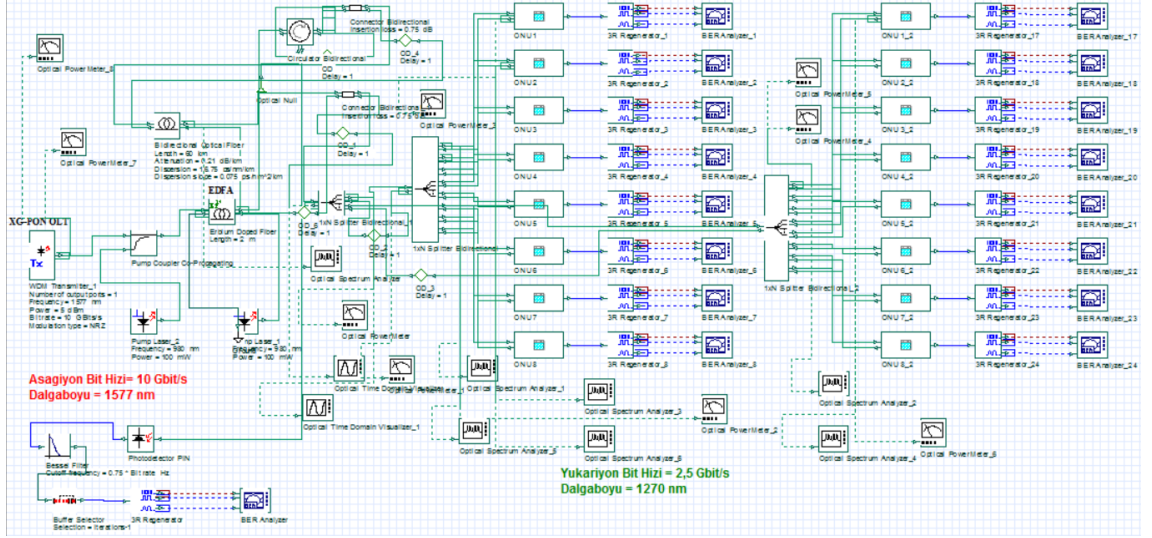
Şekil 3.13’te XG-PON 60 km mesafeli bir hatta yukarıyön veri iletiminin göz diyagramı görülmektedir. Yukarıyön trafiğinde bölünme olmadığından dolayı sinyaldeki zayıflama sadece konnektör bağlantıları ve fiber mesafesine bağlı olmaktadır. Bu nedenle pasif optik ağdaki iletim kalitesini asıl sınırlayan etken yukarıyön değil aşağıyön trafiğidir. Bu durumdan dolayı aşağıyönde optik iletimin sağlanabiliyor olması, yukarıyönde de iletimin sağlandığını göstermektedir.



Şekil 3.13. XG-PON yukarıyön göz diyagramı (60 km)

### 3.2.2.EDFA kullanımı ile yapılan ölçümler

XG-PON mimarisinde birim zamanda iletilen veri miktarının yüksek olması, iletim mesafesi ve buna bağlı olarak uzak mesafelerde yüksek sayıda kullanıcıya erişimin sağlanmasını kısıtlamaktadır. Günümüz şartlarında fazla sayıda ve uzak mesafedeki kullanıcıya enerji gereksinimi olmaksızın pasif optik ağlarla ve yüksek hızlarla erişebilmek bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle bu çalışma ile XG-PON mimarili pasif optik ağ üzerinde EDFA kullanılarak XG-PON sisteminin performans değerlerinde kayda değer iyileştirmeler sağlanmıştır. Bu sayede uzak mesafelere ve daha fazla sayıda kullanıcıya çağımızın gerektirdiği seviyelerde yüksek hızda veri iletim imkanı sağlanmış olacaktır. Şekil 3.14’de XG-PON mimarisiyle oluşturulmuş ve EDFA ile OLT çıkış sinyali güçlendirilmiş pasif optik ağ görülmektedir.



**Şekil 3.14.** Performans ölçümü için tasarlanan XG-PON mimarili referans pasif optik ağ yapısı (EDFA ile birlikte, 16 kullanıcı)

### 3.2.2.1. EDFA parametrelerinin belirlenmesi

EDFA kullanımı ile optik şebekelerde zayıflama değerlerinin iyileştirildiği ve iletim mesafe ve kalitesinde yüksek kazançlar elde edildiği görülmüştür [41]. Bundan dolayı bu yöntemden faydalanılarak pasif optik ağlar üzerinde EDFA kullanımı ile iletim kalitesi ve verimin artırılması amaçlanmıştır. EDFA entegre edilen sistemde 980 nm dalgaboyunda çift yönlü pompalama yapılarak 10 km fiber mesafesi ve 16 ONU'lu sistemde 2m, 5m, 10m, 25m, 50m ve 100m uzunluklarındaki EDFA kullanımlarında ONU giriş sinyalleri ve bu seviyedeki gürültü değerleri dBm cinsinden tek tek ölçümlenip kaydedilmiştir. Bu ölçümlerin tamamı, aynı şartlar altında 1480 nm dalgaboyunda tekrarlanmış ve elde edilen veriler kaydedilmiştir. 980 nm ve 1480 nm dalgaboyunda yapılan ölçümlerin tamamı, 40 km fiber mesafesi ve 16 ONU'lu sistemde de ayrıca tekrarlanmış ve ONU giriş ve gürültü sinyal seviyeleri dBm cinsinden ölçülünerek kaydedilmiştir. Çizelge 3.3'te 16 ONU 10 km, Çizelge 3.4'te ise 16 ONU 40 km mesafedeki XG-PON sisteminin ONU giriş sinyal değerleri ve gürültü değerleri simüle edilen devreler üzerinde ölçümlenmiş ve tabloya işlenmiştir.



**Çizelge3.3.** XG-PON16 ONU, 10 km mesafe ve 100mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF’lerin pasif optik ağ değerlerine etkileri

Optik Mesafe	EDFA Değerleri	EDF Uzunluğu(m)	ONU Giriş Sinyali(dB m)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
16 ONU	980 nm-100mW	100 m	-4,423	-77,5	38,06	$3,28 \times 10^{-317}$
		50 m	-2,323	-82,5	43,45	0
		25 m	-1,657	-82,5	44,1	0
		10 m	-1,321	-83	44,3	0
		5 m	-1,687	-84	43	0
		2 m	-1,607	-92,5	35,12	$1,94 \times 10^{-270}$
10 KM	1480nm-100mW	100 m	-1,352	-81	43,78	0
		50 m	0,124	-80,5	43,94	0
		25 m	0,526	-80	43,39	0
		10 m	0,62	-80	43,45	0
		5 m	-0,872	-86	40,35	0
		2 m	-1,532	-96	31,15	$2,36 \times 10^{-213}$

**Çizelge 3.4.** XG-PON16 ONU, 40 km mesafe ve 100mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF’lerin pasif optik ağ değerlerine etkileri

Optik Mesafe	EDFA Değerleri	EDF Uzunluğu(m)	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
16 ONU	980 nm-100mW	100 m	-10,723	-84	9,43	$1,48 \times 10^{-21}$
		50 m	-8,623	-88,5	9,11	$2,9 \times 10^{-20}$
		25 m	-7,956	-89	9,55	$4,5 \times 10^{-22}$
		10 m	-7,621	-89	9,75	$6,6 \times 10^{-23}$
		5 m	-7,988	-91	8,76	$7,43 \times 10^{-19}$
		2 m	-7,906	-99,5	10,93	$3,69 \times 10^{-28}$
40 KM	1480nm-100mW	100 m	-7,651	-87	9,42	$1,63 \times 10^{-21}$
		50 m	-6,176	-87	10,16	$1,02 \times 10^{-24}$
		25 m	-5,774	-87	9,6	$2,9 \times 10^{-22}$
		10 m	-5,68	-86,5	9,67	$1,55 \times 10^{-22}$
		5 m	-7,172	-92	8,84	$3,46 \times 10^{-19}$
		2 m	-1,532	-96	31,15	$2,36 \times 10^{-213}$

Çizelge3.3 ve Çizelge3.4’teki değerler incelendiğinde EDF boyu 100 m’den 2 m’ye doğru kısaltıldıkça ONU giriş gücünde çok bir düşüş olmazken gürültü değerlerinde ciddi miktarda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı yöndeki Q değerleri

incelendiğinde artışın olduğu, BER değerleri de incelendiğinde azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca 980nm EDFA ile kuvvetlendirilen sinyalin tüm değerleri, 1480 nm EDFA ile kuvvetlendirilen sinyale göre daha iyi olduğu görülmüştür. Örnek olarak 1480 nm - 100mW EDFA ile EDF boyu 100 m iken -7,651 dBm ONU giriş sinyali ölçümlenmiş olup EDF boyu 2 m'ye düştüğünde ise ONU giriş sinyali değeri -7,831 dBm olmuştur. Burada ONU giriş sinyalindeki düşüş sadece 0,18 dBm'dir. Aynı parametrelerle gürültü seviyesinin değerlerine bakılacak olursa, 100 m EDF kullanımında gürültü seviyesi -87 dBm iken, 2 m EDF kullanımında ise gürültü seviyesinin -100 dBm olduğu görülmektedir. Bu değerlere bakıldığında gürültüdeki azalmanın ise yaklaşık 13 dBm olduğu görülmektedir. Sonuç olarak 2 m EDFA kullanımı, 0,18 dBm güç kaybına neden olurken buna karşın 13 dBm gürültünün daha az olduğu ve daha kararlı iletim yapısına sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle 2 m uzunluğunda EDF kullanımının en uygun seçim olduğu anlaşılmıştır.

2 m EDF üzerinde pompalama gücünün değişimi 16 ONU 10 km ve 16 ONU 40 km için ayrı ayrı incelenmiş, 980 nm ve 1480 nm dalgaboylarında ayrı ayrı 25mW, 50mW, 75mW ve 100mW pompalama güçleri uygulanarak sonuçlar kaydedilmiştir. Simüle edilip ölçülen değerler 16 ONU 10 km için Çizelge3.5'te, 16 ONU 40 km için Çizelge3.6'da görülmektedir.

**Çizelge 3.5.** XG-PON16 ONU 10 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri

EDF Uzunluğu	EDFA Değerleri	ONU Giriş Sinyali(dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
<b>2 m</b>	980 nm - 100 mW	-1,607	-92,5	35,12	$1,94 \times 10^{-270}$
	980 nm - 75 mW	-2,847	-93	34,95	$7,01 \times 10^{-268}$
	980 nm - 50 mW	-4,591	-93,5	34,63	$4,47 \times 10^{-263}$
	980 nm - 25 mW	-7,568	-94	33,7	$2,9 \times 10^{-249}$
<b>2 m</b>	1480 nm - 100 mW	-1,532	-96	31,15	$2,36 \times 10^{-213}$
	1480 nm - 75 mW	-2,747	-96	31,06	$3,9 \times 10^{-212}$
	1480 nm - 50 mW	-4,443	-96,25	30,89	$6,99 \times 10^{-210}$
	1480 nm - 25 mW	-7,276	-96,5	30,4	$2,54 \times 10^{-203}$

**Çizelge 3.6.** XG-PON 16 ONU 40 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri

EDF Uzunluğu	EDFA Değerleri	ONU Giriş Sinyali(dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
<b>2 m</b>	980 nm - 100 mW	-7,906	-99,5	10,93	3,69x10 <sup>-28</sup>
	980 nm - 75 mW	-9,147	-99,5	10,93	3,98x10 <sup>-28</sup>
	980 nm - 50 mW	-10,891	-99,75	10,9	5,53x10 <sup>-28</sup>
	980 nm - 25 mW	-13,868	-100	10,72	3,83x10 <sup>-27</sup>
<b>2 m</b>	1480 nm - 100 mW	-7,831	-100	9,92	1,6x10 <sup>-23</sup>
	1480 nm - 75 mW	-9,047	-100	9,9	2,09x10 <sup>-23</sup>
	1480 nm - 50 mW	-10,743	-100	9,84	3,67x10 <sup>-23</sup>
	1480 nm - 25 mW	-13,577	-100	9,66	2,19x10 <sup>-22</sup>

Çizelge 3.5 ve Çizelge3.6'da görünen değerlere göre 980 nm ve 1480 nm dalgaboylarındaki pompalama güçlerinden 100mW seviyesindeki pompalamanın diğer güçlere göre pasif optik ağda daha fazla güç aktarımı oluşturduğunu göstermektedir. Bununla birlikte gürültü değerlerinin tüm pompalama güçlerinde de yaklaşık olarak aynı olduğu tablodaki değerlerden görülebilmektedir. Farklı varyasyonların simülasyonu sonucu elde edilen değerlerden varılan sonuç XG-PON yapısında kullanılacak EDFA'nın karakteristiklerinin 980 nm ve 1480 nm'de 2 m EDF uzunluğu ve 100mW pompalama en verimli şekilde çalışacağı görülmüştür. Bu noktaya kadar yapılan inceleme ile EDF'nin uzunluğu ve pompalama gücü belirlenmiştir. EDF'ye çift yönlü, giriş ve çıkış olmak üzere 3 farklı pompalama uygulaması bulunmakta olup bu 3 farklı durumun 980 nm ve 1480 nm dalgaboylarındaki sonuçları ise 16 ONU 10 km için Çizelge3.7 ve 16 ONU 40 km için ise Çizelge3.8'de gösterilmiştir.

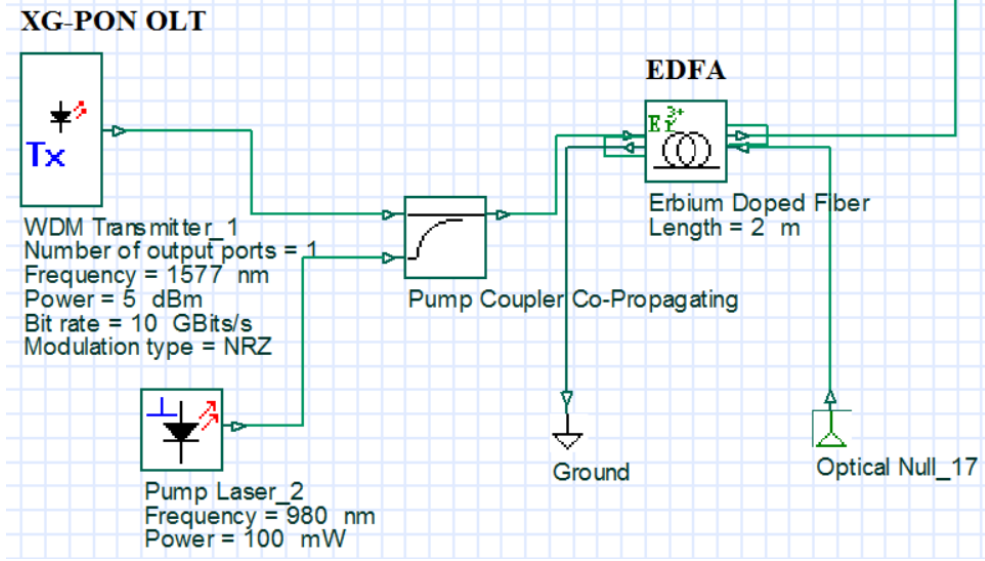
**Çizelge3.7.** XG-PON 16 ONU 10 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri

EDFA Değerleri	Pompalama Şekli	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
980 nm,	Çift Yöne Pompalama	-1,607	-92,5	35,12	$1,94 \times 10^{-270}$
100 mW,	Girişe Pompalama	-2,156	-93,5	34,64	$3,48 \times 10^{-263}$
2 m EDF	Çıkışa Pompalama	-10,648	-93	34,64	$3,48 \times 10^{-263}$
1480 nm,	Çift Yöne Pompalama	-1,532	-96	31,15	$2,36 \times 10^{-213}$
100 mW,	Girişe Pompalama	-1,716	-96	30,9	$5,44 \times 10^{-210}$
2 m EDF	Çıkışa Pompalama	-13,421	-96	30,9	$5,11 \times 10^{-210}$

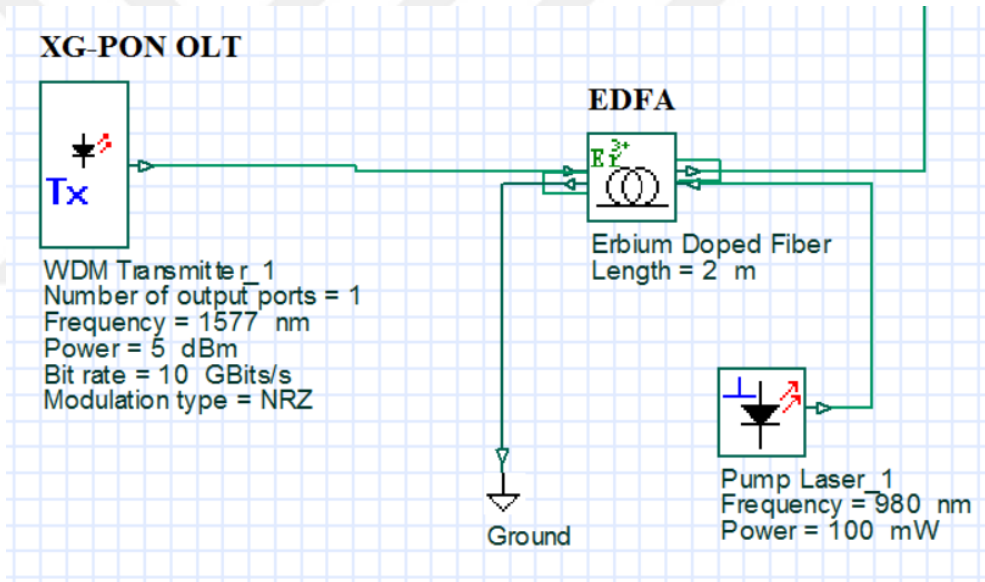
**Çizelge 3.8.** XG-PON16 ONU 40 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkileri

EDFA Değerleri	Pompalama Şekli	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
980 nm,	Çift Yöne Pompalama	-7,906	-99,5	10,93	$3,69 \times 10^{-28}$
100 mW,	Girişe Pompalama	-8,456	-99,5	10,89	$5,97 \times 10^{-28}$
2 m EDF	Çıkışa Pompalama	-16,948	-99,5	10,9	$5,28 \times 10^{-28}$
1480 nm,	Çift Yöne Pompalama	-7,831	-100	9,92	$1,6 \times 10^{-23}$
100 mW,	Girişe Pompalama	-8,015	-100	9,83	$3,9 \times 10^{-23}$
2 m EDF	Çıkışa Pompalama	-19,721	-100	9,84	$3,52 \times 10^{-23}$

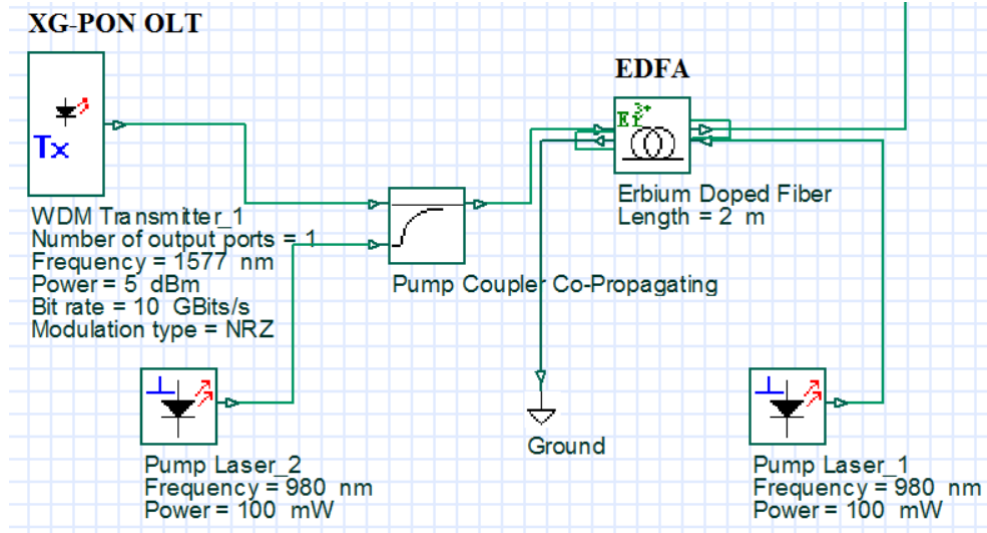
Ölçülen tüm değerlerden elde edilen sonuçlara göre 980 nm ve 1480 nm EDFA için 2 m EDF boyu, 100 mW pompalama gücü ile beraber çift yönlü pompalamanın olması gerektiği görülmektedir. Şekil 3.15, 3.16 ve 3.17'de EDF'ye pompalama şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 3.15. EDF girişine pompalama



Şekil 3.16. EDF çıkışına pompalama

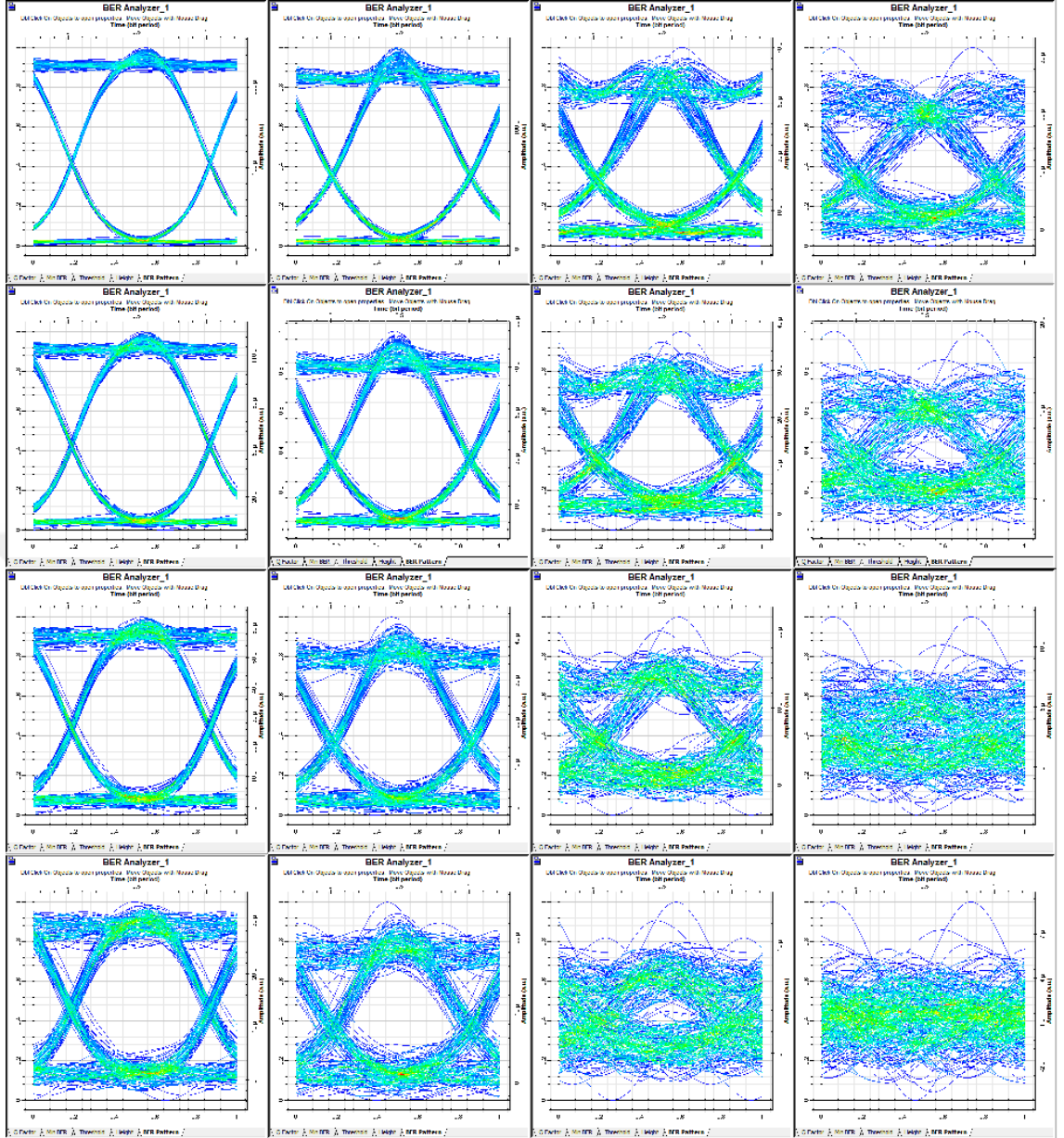


Şekil 3.17. EDF'nin çift yönüne pompalama

### 3.2.2.2. 1480 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri

Şekil 3.18'de, 1480 nm EDFA kullanımı ile simüle edilen XG-PON aşağıyön göz diyagramları görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, kuvvetlendirici kullanılmayan XG-PON'a göre ciddi farklılıkların olduğu görülmüştür. XG-PON'da 64 ONU için 10 km mesafede dahi veri iletimi sağlanamamakta iken 1480 nm EDFA kullanımı ile iletim sinyali kuvvetlendirilen tasarımda 128 ONU'ya 20 km mesafede veri iletimi sağlanabildiği görülmektedir.

Bu durum haricinde grafikteki ilk 2 sütunda (10 km ve 20 km) diyagramın göz açıklığının belirli olduğu ancak 3 ve 4. sütunlarda ise (30 km ve 40 km) diyagramın bariz bir şekilde bozulduğu ve veri iletiminin sağlıklı yapılamadığı görülmektedir.



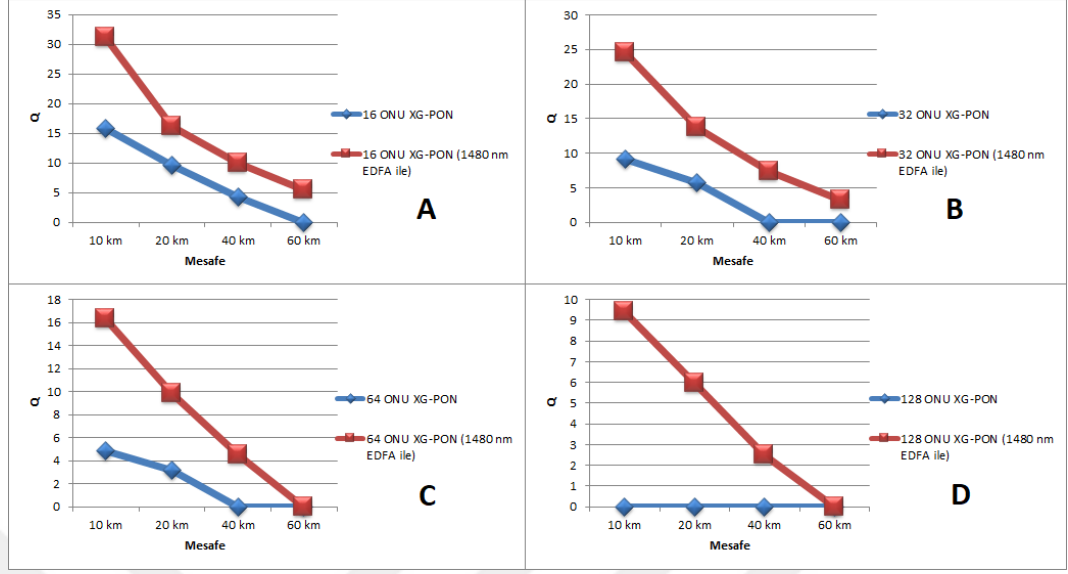
**Şekil 3.18.** 1480 nmEDFA ilavesi ile XG-PON aşağıyön göz diyagramları(yukarıdan aşağıya 16,32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km)

Çizelge3.9’da, Şekil 3.18’de görülen diyagramların sayısal değerleri belirtilmiş olup  $BER \leq 10^{-9}$  şartını sağlayacak şekilde değerler incelendiğinde 10 km ve 20 km mesafede tüm yapılar ve 40 km mesafede 16 ONU ve 32 ONU bulunan yapılar veri iletiminin sağlanabildiği ve diğer durumlarda veri iletiminin sağlanamadığı görülmektedir. 40 km iletim mesafesinde özellikle 64 ONU ve 128 ONU ile veri iletimi sağlanamazken, 60 km mesafede hiçbir kullanıcı sayısında veri iletimi sağlanamadığı görülmektedir.

**Çizelge3.9.** 1480 nm EDFA ile kuvvetlendirilenXG-PON mimarili sistemin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri

<b>Optik Mesafe</b>	<b>Kullanıcı Sayısı</b>	<b>Q</b>	<b>BER</b>
10 km	16 ONU	31,15	$2,36 \times 10^{-213}$
	32 ONU	24,58	$9,07 \times 10^{-134}$
	64 ONU	16,33	$3,19 \times 10^{-60}$
	128 ONU	9,43	$2,06 \times 10^{-21}$
20 km	16 ONU	16,15	$5,85 \times 10^{-59}$
	32 ONU	13,65	$1,02 \times 10^{-42}$
	64 ONU	9,81	$5,04 \times 10^{-23}$
	128 ONU	5,97	$1,19 \times 10^{-9}$
40 km	16 ONU	9,92	$1,6 \times 10^{-23}$
	32 ONU	7,3	$1,43 \times 10^{-13}$
	64 ONU	4,49	$3,48 \times 10^{-6}$
	128 ONU	2,48	0,0065
60 km	16 ONU	5,48	$2,08 \times 10^{-8}$
	32 ONU	3,25	0,00057
	64 ONU	0	1
	128 ONU	0	1





**Şekil 3.19.** 1480 nm EDFA ilavesi ile XG-PON sistemi kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri (A: 16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU D:128 ONU)

Şekil 3.19’da kullanıcı ve mesafe değişikliğine bağlı olarak XG-PON sistemi Q değerleri ile 1480 nm EDFA destekli XG-PON sistemi Q değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde EDFA’nın çok önemli miktarda katkısı olduğu görülmüştür.

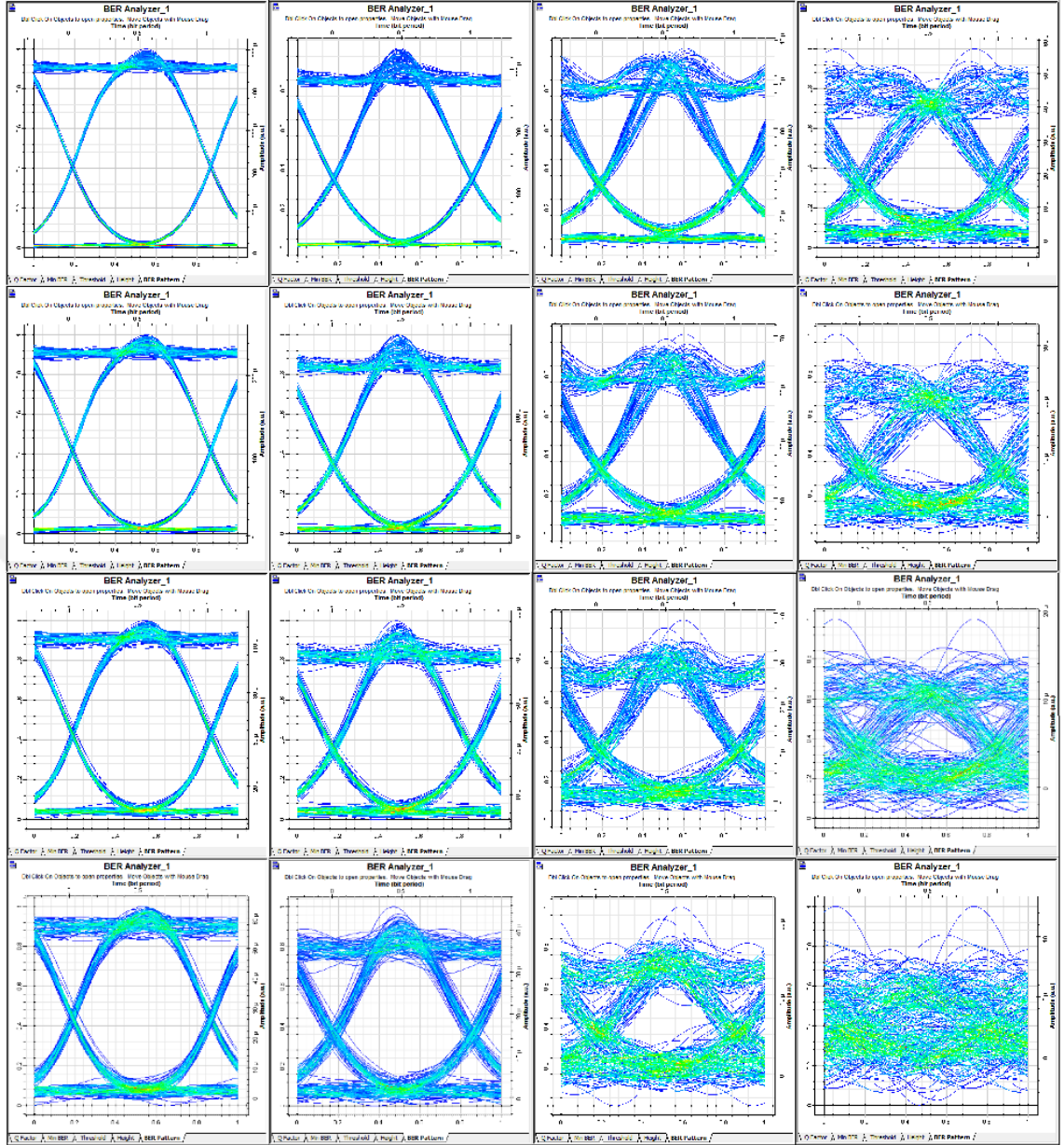
### 3.2.2.3. 980 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri

Şekil 3.20’de 980 nm EDFA kullanımı ile OLT sinyal çıkış gücü artırılmış XG-PON aşağıyön göz diyagramları görülmektedir. Tasarımda 2 metre uzunluğundaki EDF’ye 980 nm dalgaboyunda ve 100mW gücündeki kaynak ile çift taraftan pompalama yapılmıştır. Bu tasarımda kuvvetlendirici kullanılmayan tasarıma oranla göz diyagramlarında önemli ölçüde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Kuvvetlendiricisiz XG-PON mimarisinde 64 kullanıcıya 10 km mesafede dahi veri iletimi sağlanamazken, kuvvetlendirici ile güçlendirilmiş ağda 64 kullanıcıya 40 km mesafeye kadar veri iletimi sağlanabildiği görülmüştür.

Benzer şekilde 128 kullanıcıya kuvvetlendirici olmadan veri iletimi sağlanamazken kuvvetlendirici ile birlikte 20 km mesafede veri iletiminin oldukça sağlıklı bir biçimde sağlandığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.20’deki diyagramlar Şekil 3.11’deki diyagramlar ile birlikte incelendiğinde kuvvetlendiricinin katkısının çok fazla olduğu açıkça görülmüş olacaktır. İlave olarak 1480 nm EDFA kullanımı ile tasarlanmış ve giriş sinyali güçlendirilmiş XG-PON’un Şekil 3.18’de görünen simülasyon sonuçları, Şekil

3.20'deki 980 nm EDFA ile tasarlanmış devre ile kıyaslandığında Şekil 3.20'deki devrenin değerlerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.





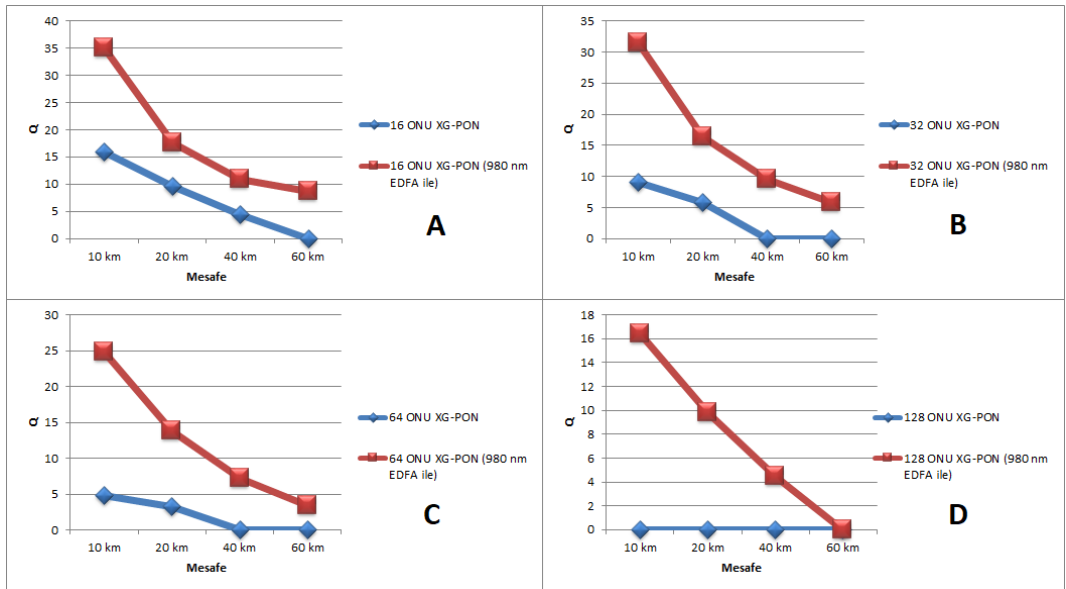
**Şekil 3.20.** 980 nmEDFA ilavesi ileXG-PON aşağıyön göz diyagramları(yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km)

Çizelge3.10’da EDFA ilavesi sonrası ölçüm sonuçları görülmektedir. Şekil 3.21’de ise bu değerlerin kullanıcı ve mesafeye göre değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.21’de ise 980 nm EDFA ile güçlendirilmiş XG-PON devresi EDFA kullanılmayan XG-PON devresi ile grafiksel olarak kıyaslanmıştır.

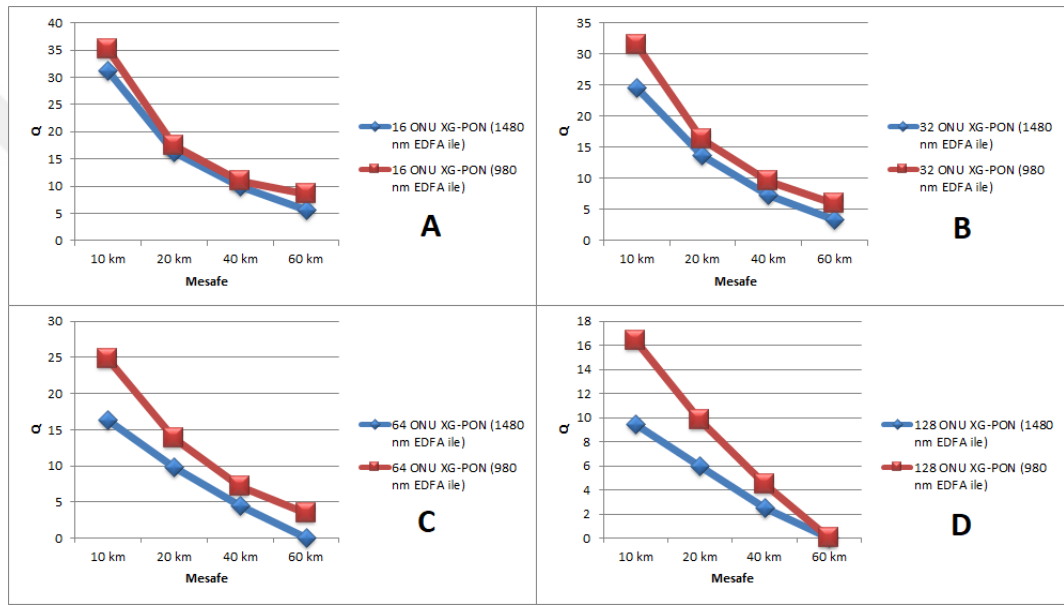
**Çizelge 3.10.** 980 nm EDFA ile kuvvetlendirilen XG-PON mimarili sistemin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri

Optik Mesafe	Kullanıcı Sayısı	Q	BER
10 km	16 ONU	35,12	$1,94 \times 10^{-270}$
	32 ONU	31,45	$1,9 \times 10^{-217}$
	64 ONU	24,76	$1,16 \times 10^{-135}$
	128 ONU	16,41	$7,92 \times 10^{-61}$
20 km	16 ONU	17,49	$8,85 \times 10^{-69}$
	32 ONU	16,3	$4,84 \times 10^{-60}$
	64 ONU	13,79	$1,54 \times 10^{-43}$
	128 ONU	9,83	$4,02 \times 10^{-23}$
40 km	16 ONU	10,93	$3,69 \times 10^{-28}$
	32 ONU	9,53	$7,49 \times 10^{-22}$
	64 ONU	7,15	$4,12 \times 10^{-13}$
	128 ONU	4,5	$3,34 \times 10^{-6}$
60 km	16 ONU	8,58	$4,79 \times 10^{-18}$
	32 ONU	5,83	$2,82 \times 10^{-9}$
	64 ONU	3,4	0,00034
	128 ONU	0	1



**Şekil 3.21.** 980 nm EDFA ilavesi ile XG-PON sistemi kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri (A: 16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU D:128 ONU)

Şekil 3.22’de XG-PON sistemi üzerinde yapılan tüm testlerin sonucunda 980 nm ve 1480 nm EDFA kullanımlarıyla gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen değerlerin her ikisi de aynı grafikte gösterilerek 16, 32, 64 ve 128 ONU sayısı ve bu sayıların her birisi için ise 10, 20, 40 ve 60 km mesafeli pasif ağların performans değerleri karşılaştırılmıştır. Grafiklerin incelenmesi sonucunda özellikle kullanıcı sayısı (ONU) artış gösterdikçe 980 nm dalgaboyunda pompalama kaynağıyla ilave edilmiş EDFA’nın 1480 nm pompalama kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiş devreye göre performans açısından çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 3.22. 980 nm ve 1480 nm EDFA’ların katkılarının XG-PON üzerinde karşılaştırmalı Q değerleri (A: 16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU D:128 ONU)

### 3.2.3. ONU alıcı kısmı parametrelerinin belirlenmesi ve nihai ölçümler

Yapılan hesaplamalar sonucunda 980 nm EDFA kullanımına karar verilmesinin ardından, ONU alıcı ünitesinde bulunan ingaas APD’nin kazancı hesaplanmıştır. APD’ler ışığı absorbe etmelerine göre bir tepkisellik(responsivity) değerine sahiptir. Ayrıca, üretildikleri malzemeye göre değişebilen bir çarpan (M) parametresi vardır. Ve bu M parametresi, sağlayabilecekleri kazanç anlamına gelir [54,55]. Sonuç olarak, APD’den sağlanan toplam kazanç bu formülden hesaplanabilir;

$$R' = R \times M \quad [42]$$

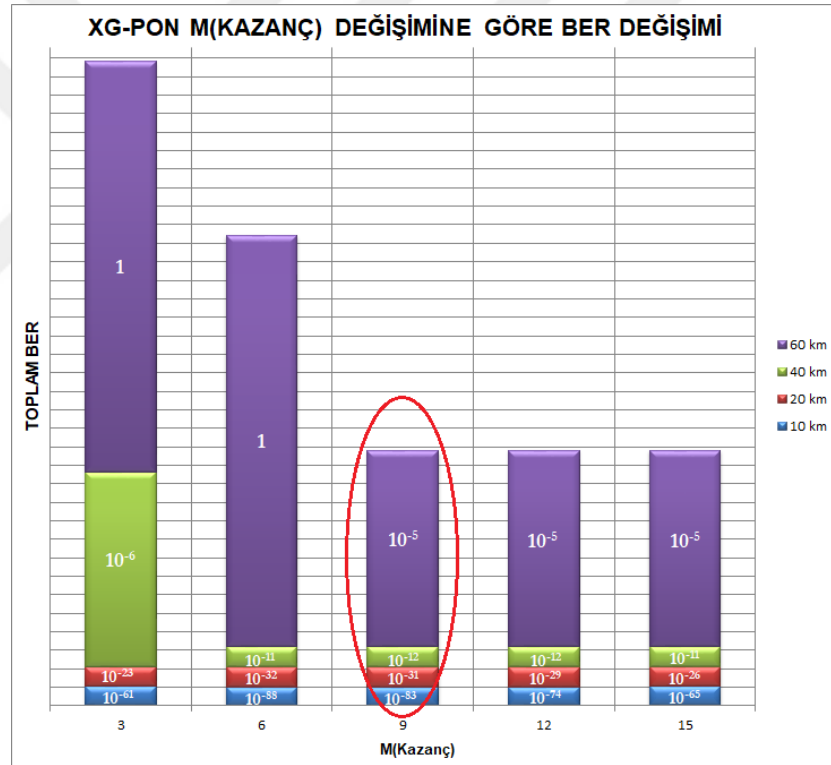
R', çarpanlı tepkisellik

M, çarpan (kazanç)

R, çarpansız tepkisellik

Farklı etkenlere bağlı olarak, ingaas APD'lerde M parametresi 20 ye kadar artabilmektedir [42].

Bu bölümde, M parametreleri 3'ten 15'e kadar değiştirilerek tasarımdaki son parametreler belirlenmiştir. M, 15 yapıldığında iletim kalitesinin bozulmaya başladığı, Q'nun düştüğü ve BER in arttığı görülmüştür. Bu nedenle 3'ten 15'e kadar farklı M değerlerinin türettiği sonuçlar değerlendirilecektir. Ölçümler 128 ONU üzerinden alınmıştır. Şekil 3.23'de XG-PON'da 128 ONU ve 60 km mesafede farklı M değerleriyle yapılan analizdeki Q değerleri grafiksel olarak görülmektedir.

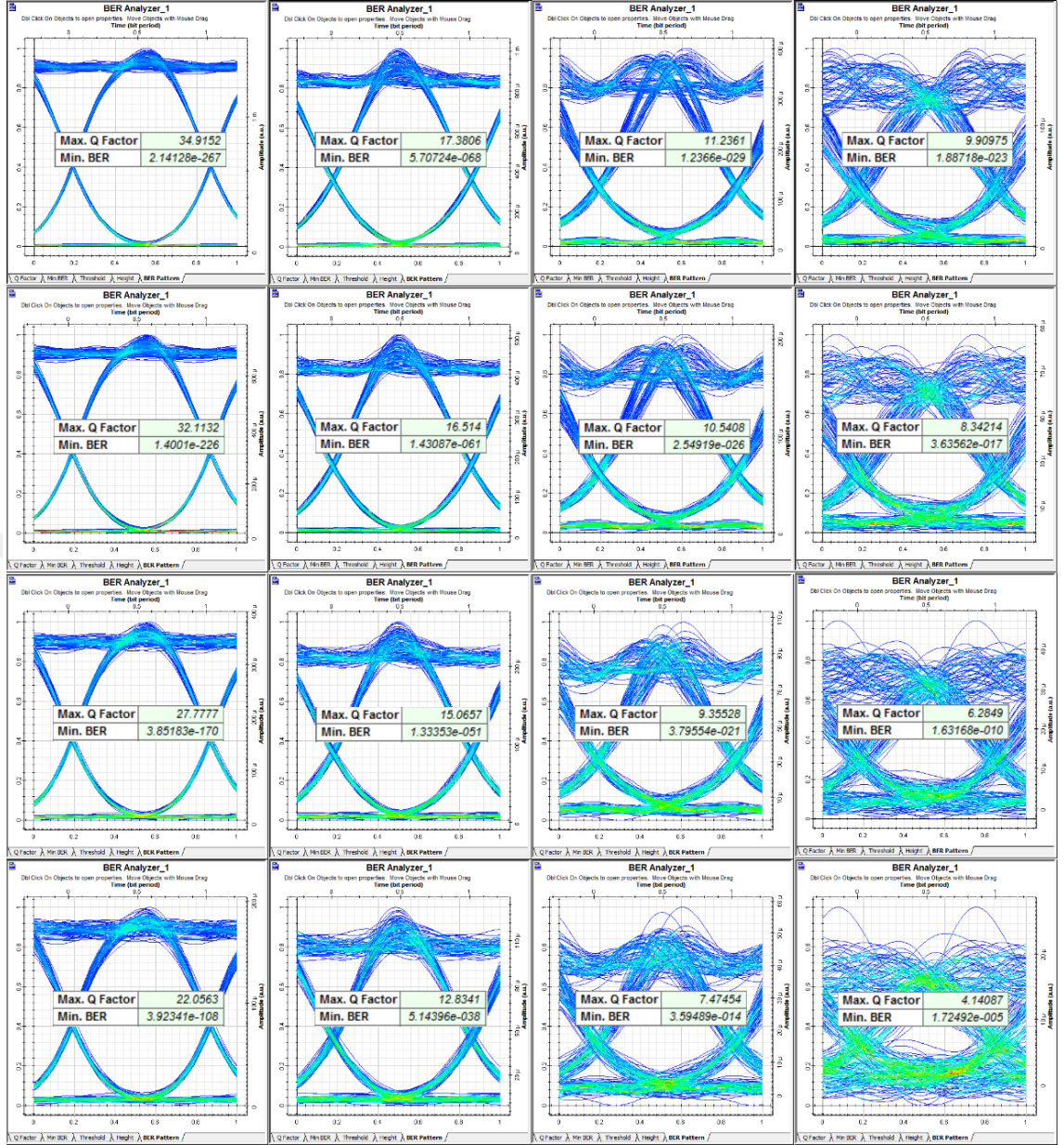


Şekil 3.23. XG-PON sisteminde farklı M parametrelerinin, aşağıyön ayrı ayrı ve toplam BER değeri değişimlerine etkisi (128 ONU, 10,20,40, 60 km)

Şekil 3.23'deki grafik incelendiğinde M=9 değerinde BER, tüm mesafe ve zayıflama değerlerinde en düşük değeri almaktadır. Daha düşük ve daha yüksek değerlerde BER'in artış gösterdiği görülmektedir. Bundan dolayı XG-PON tasarımının en son parametresi olan M, 9 olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı XG-PON şebekesinin nihai hesaplamalarında M=9 olarak alınmıştır.

Şekil 3.24, bu çalışmada oluşturulan XG-PON'un en son tasarım aşağıyön göz diyagramı sonuçlarını göstermektedir. En son XG-PON tasarımında 980 nm, 100 mW ve iki yönlü pompalama EDFA; alıcı bölümünde, duyarlılık değerinin 0,835 A/W olduğu ve  $M=9$  olduğu belirlenmiştir. Fotodiyot iyonizasyon değeri ise 0,45 alınarak ölçümler yapılmıştır. Diyagramlar Şekil 3.24'ten incelendiğinde, 64 ONU 60 km veya 128 ONU 40 km kullanarak sağlıklı veri iletimi sağlanabildiği görülmüştür. Şekil 3.24'ten 64 ONU ve 60 km uzaklıktaki BER değeri sonucunun  $10^{-10}$  olduğu görülmüştür. Bu değer limit değere yakın bir değerdir ( $BER \leq 10^{-9}$ ). Ancak 128 ONU ve 40 km mesafe kullanarak BER değeri  $10^{-14}$  olarak ölçülmüştür.  $BER \leq 10^{-9}$  değeri göz önüne alındığında bu değerinsınırdan olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, 128 ONU yapısı kullanıldığında, bu XG-PON mimarisinde 40 km'den fazla mesafelerde veri iletimi sağlandığı görülmüştür.





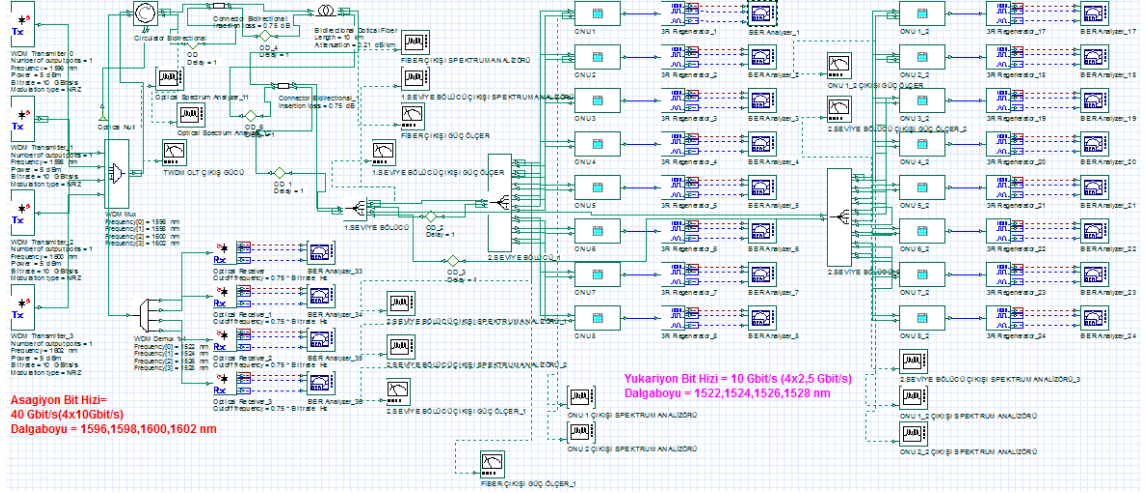
Şekil 3.24. Nihai XG-PON tasarımı aşağıyön göz diyagramları (yukarıdan aşağıda 16, 32, 64 ve 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40, 60 km)

### 3.3. TWDM PON Üzerinde Yapılan Ölçümler

#### 3.3.1. GPON parametreleri kullanılarak yapılan ölçümler

TWDM PON (zaman ve dalgaboyu bölme çoğullamalı pasif optik ağ - time and wavelength division multiplexed passive optical network) kullanımı ile pasif ağdaki kullanıcılara XG-PON dakinden 4 kat daha fazla band genişliği sağlanabilmektedir. Şekil 3.25'te ölçümleri yapılan temel TWDM PON mimarisi yer almaktadır.



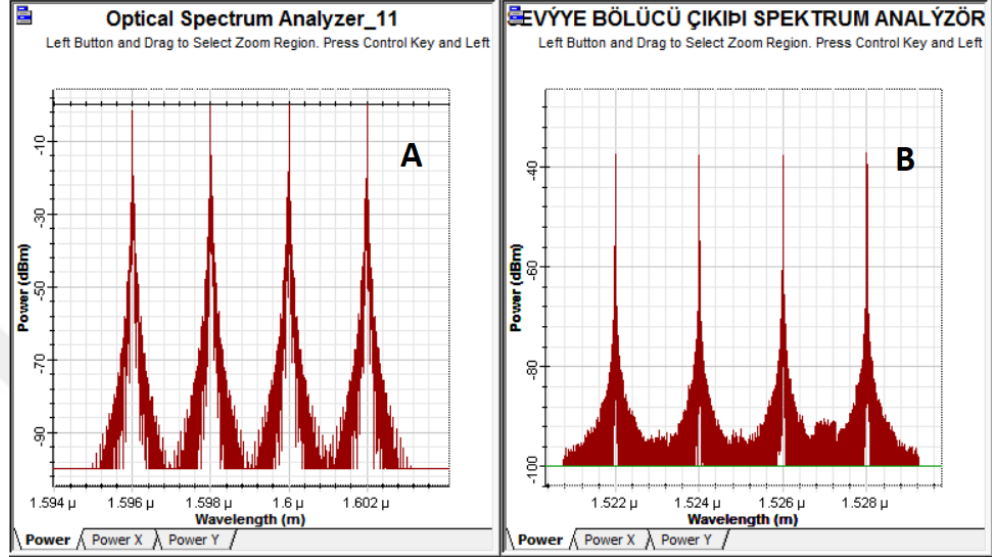


**Şekil 3.25.** Performans ölçümü için tasarlanan TWDM PON yapısı (16 kullanıcılı)

TWDM PON teknolojisi kullanılarak tasarlanan Şekil 3.25’deki pasif optik ağda; OLT’yi oluşturan ve 4 ayrı dalgaboyunda sinyal üreten WDM Transmitter’ların her birinin port çıkış gücü +5 dBm, modülasyon tipi NRZ(sıfıra dönüşüz - not return to zero), aşağıyön dalgaboyları sırasıyla 1596, 1598, 1600, 1602 nm ve herbirinin band genişliği 10 Gbit/s, toplam aşağıyön bandgenişliği 40 Gbit/s; yukarıyön dalgaboyları sırasıyla 1522, 1524, 1526, 1528 nm ve her birinin bandgenişliği 2,5 Gbit/s, toplam yukarıyön band genişliği 10 Gbit/s olarak optik parametreler belirlenmiştir [44-49]. Bu değerlerin tek bir fiber lifinden iletimini sağlayacak olan WDM multiplexer, farklı çalışma frekansı değerleri üzerinden simüle edilerek en iyi iletimi sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Daha sonra elde edilen değerler veri trafiğinin 10, 20, 40, 60 km mesafe ve 16, 32, 64, 128 kullanıcıli topolojileri üzerinde incelenmiş ve simülasyon sonuçlarına göre Q ve BER değerleri yorumlanmıştır.

Çizelge 3.11’de WDM multiplexer’in farklı çalışma frekanslarına göre sistemdeki kalite değerleri görülmektedir. 10 km mesafeye konumlandırılmış olan 16 ONU kullanımı ile yapılandırılmış TWDM PON’da WDM multiplexer’in farklı çalışma frekanslarında kullanımı sonucu ONU’lardaki Q, BER ve gürültü değerleri ölçümlenmiş ve Çizelge3.11’deki değerler elde edilmiştir. Bu değerler incelendiğinde farklı çalışma frekanslarında gürültü değerlerinin hiç değişmediği ve -100 dBm seviyesinde bulunduğu ancak Q ve BER değerlerinin değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Tablodaki değerlerden WDM multiplexer 29,424 GHz frekansında çalıştırıldığında Q değerinin 18,39 ve BER değerinin ise  $8,24 \times 10^{-76}$  ile sinyal kalitesinin diğer değerlere

göre çok daha kaliteli ve hata oranı düşük değerlere ulaştığı görülmüştür. Şekil 3.26 A'da TWDM PON aşağıyönünde 1596 nm, 1598 nm, 1600 nm ve 1602 nm dalgaboylarında iletim sinyali spektrumu, Şekil 3.26 B'de ise 1522 nm, 1524 nm, 1526 nm ve 1528 nm dalgaboylarında yukarıyön iletim sinyali spektrumu görülmektedir [50-53].

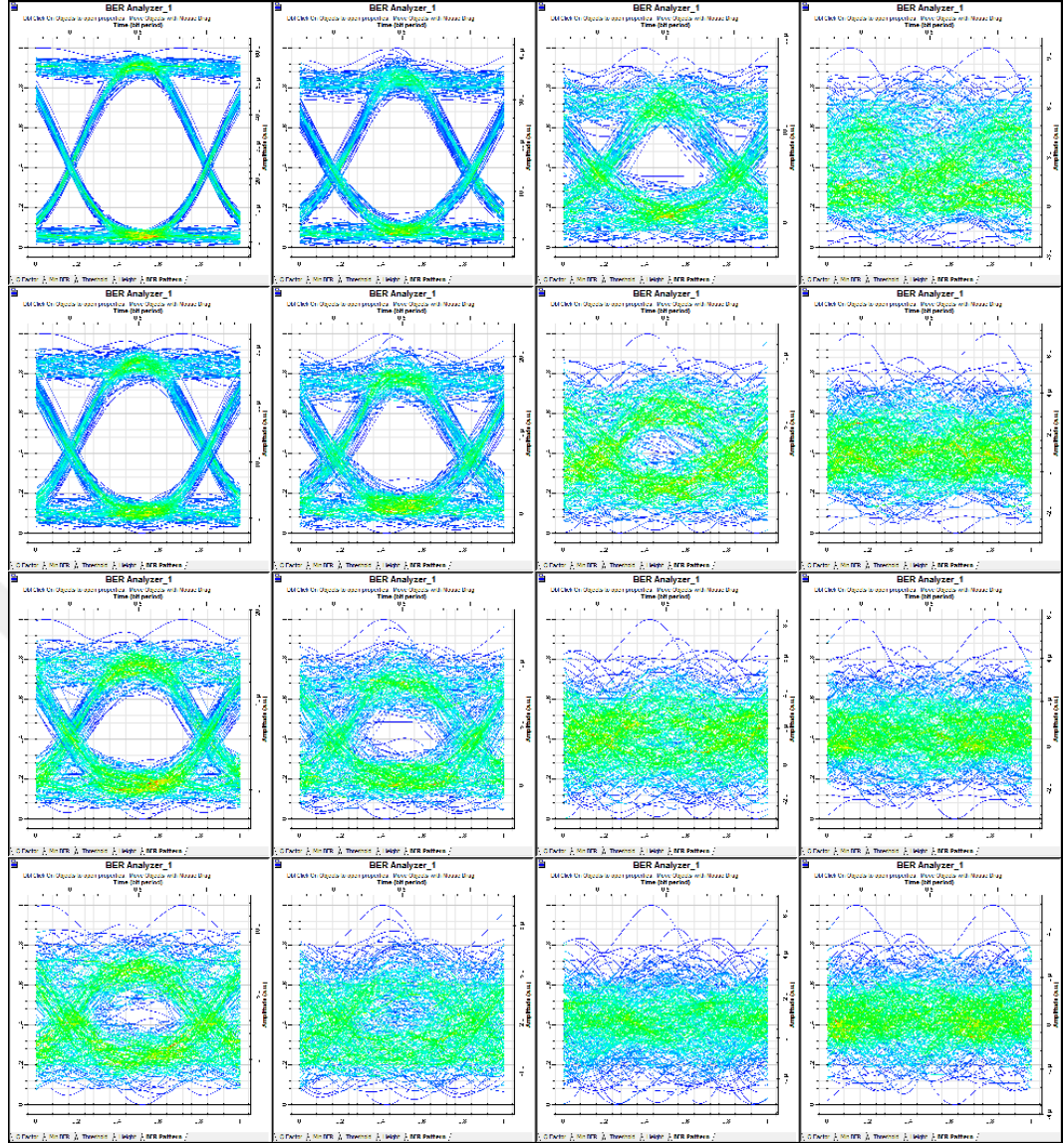


Şekil 3.26. TWDM PON aşağıyön ve yukarıyön iletim dalgaboyu spektrumları (A: Aşağıyön, 1596, 1598, 1600, 1602 nm; B: Yukarıyön, 1522, 1524, 1526, 1528 nm)

Çizelge 3.11. TWDM PON üzerinde multiplexer çalışma frekansı analiz sonuçları (16 ONU, 10 km)

WDM Multiplexer Çalışma Frekansı	Q	BER	Gürültü (dBm)
941,553GHz	15,89	$3,55 \times 10^{-57}$	-100
470,777GHz	15,92	$2,13 \times 10^{-57}$	-100
235,388GHz	16,01	$5,28 \times 10^{-58}$	-100
117,694GHz	16,27	$8,4 \times 10^{-60}$	-100
58,847 GHz	17,16	$2,79 \times 10^{-66}$	-100
29,424 GHz	18,39	$8,24 \times 10^{-76}$	-100
14,712GHz	16,16	$4,79 \times 10^{-59}$	-100
7,356 GHz	4,88	$4,66 \times 10^{-007}$	-100
3,678 GHz	2,46	0,0067	-100

Bu noktadan yola çıkılarak temel TWDM PON devresinin göz diyagramları, WDM multiplexer çalışma frekansı 29,424 GHz olacak şekilde ayarlanmıştır.



**Şekil 3.27.** TWDMPON aşağıyön göz diyagramları (Yukarıdan aşağıya 16,32, 64, 128 kullanıcı, soldan sağa 10, 20, 40,60 km)

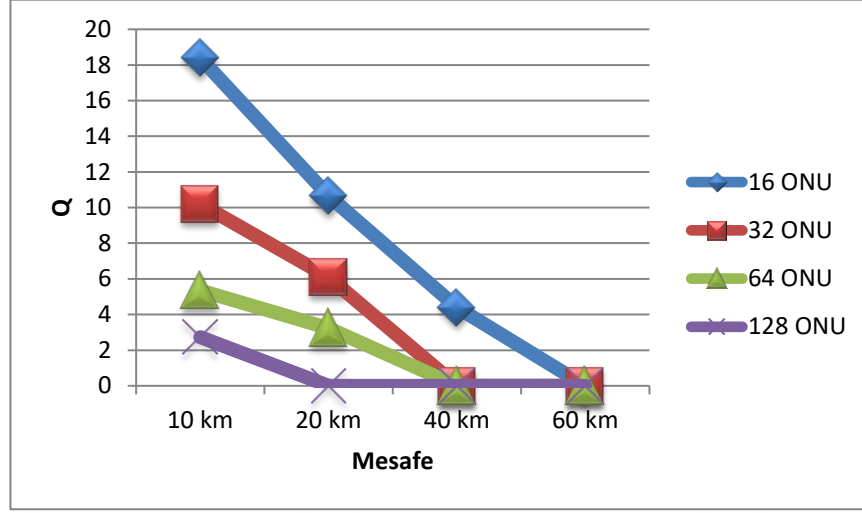
Şekil 3.27’de TWDM PON’a ait ölçümler sonucu elde edilen aşağıyön göz diyagramları verilmiştir. Diyagramlar incelendiğinde hiçbir ONU sayısı dağılımında 60 km mesafede veri iletimi sağlanamazken 128 ONU sayısında ise 10 km mesafede dahi veri iletimi sağlanamadığı görülmektedir. Ölçümlere ait sayısal değerler, Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12’deki değerler incelendiğinde 10 km ve 20 km mesafelerdeki iletimlerde 16 ONU ve 32 ONU’lu sistemlerde iletim sağlanabildiği görülmekte iken, bu mesafeler ve ONU sayıları haricindeki tüm mesafe ve ONU’lu sistemlerde veri iletiminin sağlanamadığı görülmektedir. Bu değerler, WDM multiplexer’ın çalışma frekansı

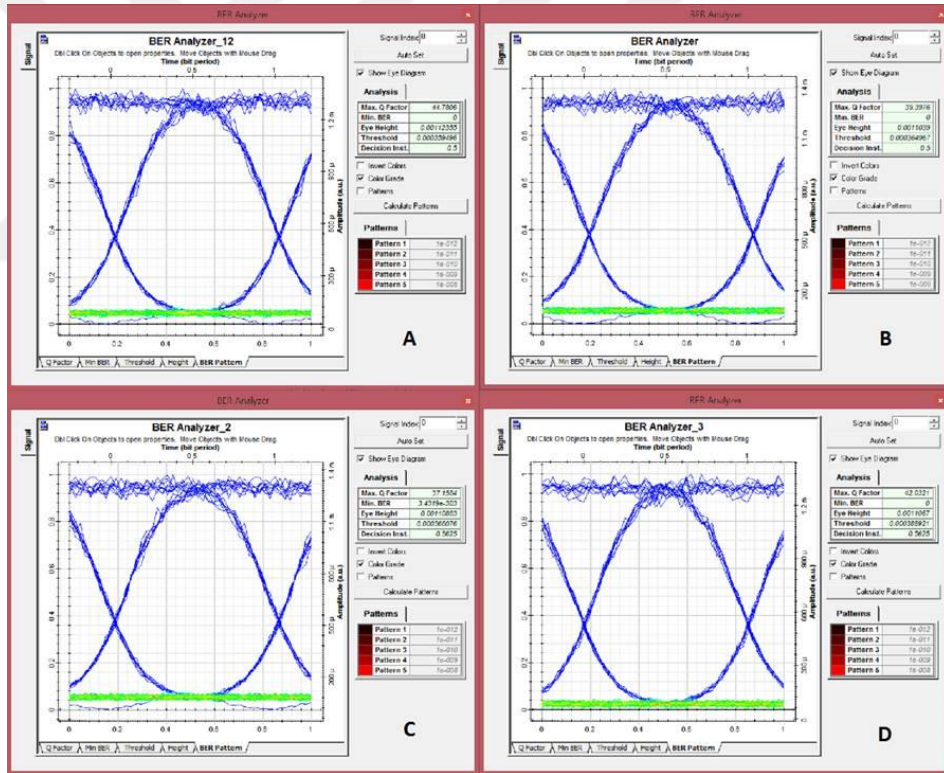
değerleri optimize edilerek elde edilmiştir. Ancak buna rağmen istenilen değerler ve veri iletim kalite seviyesinin mevcut değerlerle elde edilemediği görülmüştür. Ölçülen değerler grafiksel olarak Şekil 3.28’de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.12.** TWDM PON mimarili sistemin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q değerleri

<b>Optik Mesafe</b>	<b>Kullanıcı Sayısı</b>	<b>Q</b>	<b>BER</b>
10 km	16 ONU	18,39	$8,24 \times 10^{-76}$
	32 ONU	10,2	$1,02 \times 10^{-24}$
	64 ONU	5,35	$4,48 \times 10^{-008}$
	128 ONU	2,73	0,003
20 km	16 ONU	10,64	$9,16 \times 10^{-27}$
	32 ONU	6,09	$5,42 \times 10^{-10}$
	64 ONU	3,23	0,0006
	128 ONU	0	1
40 km	16 ONU	4,39	$5,76 \times 10^{-006}$
	32 ONU	0	1
	64 ONU	0	1
	128 ONU	0	1
60 km	16 ONU	0	1
	32 ONU	0	1
	64 ONU	0	1
	128 ONU	0	1



Şekil 3.28. TWDM PON sistemi kullanıcı ve mesafeye bağlı olarak Q değerindeki değişim



Şekil 3.29. TWDM PON yukarıyön göz diyagramları (A: 1522 nm, B:1524 nm, C:1526, D:1528 nm, 60 km)

Şekil 3.29'da TWDM PON 60 km mesafede yukarıyön veri iletiminin göz diyagramları görülmektedir. Şekilde 1522 nm, 1524 nm, 1526 nm ve 1528 nm dalgaboylarındaki yukarıyön iletim grafikleri, Q ve BER değerleri bulunmaktadır. Yukarıyön veri iletiminde sinyalde bölünme olmamaktadır. Bu durumdan dolayı aşağıyön iletimindeki

gibi sinyal zayıflaması olmadığı görülmektedir. Bu nedenle pasif optik ağın kalite ve iletim sınırlarının belirleyici parametreleri sinyalin yukarıyön iletim değerleri değil, aşağıyön iletim değerleridir. Şekil 3.29'daki göz diyagramlarındaki Q ve BER değerlerinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Diyagramlarda görünen bozukluklar ise multiplexer girişine 4 farklı dalgaboyundaki sinyalin farklı kanallardan gelip WDM multiplexer üzerinden ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Aşağıyönde bu bozulmanın görülmemesinin sebebi, tüm dalgaboylarının WDM multiplexer ile tek fiber üzerine bindirilmesi ve pasif ağ üzerinden her bir ONU'nun kendi dalgaboyundaki veriyi filtreleyip almasından kaynaklanmaktadır. Özet olarak aşağıyönde pasif bir filtreleme yöntemiyle veri trafiği akarken yukarıyönde aktif bir demultiplexer sayesinde veri akışı sağlanmakta ve yukarıyöndeki göz diyagramlarında görülen bozulmalar bundan kaynaklanmaktadır. Ancak buna rağmen Şekil 3.29'daki diyagram ve değerler incelendiğinde yukarıyöne doğru gerçekleşen veri iletimine ait Q ve BER değerlerinin oldukça iyi seviyelerde olduğu görülmektedir.

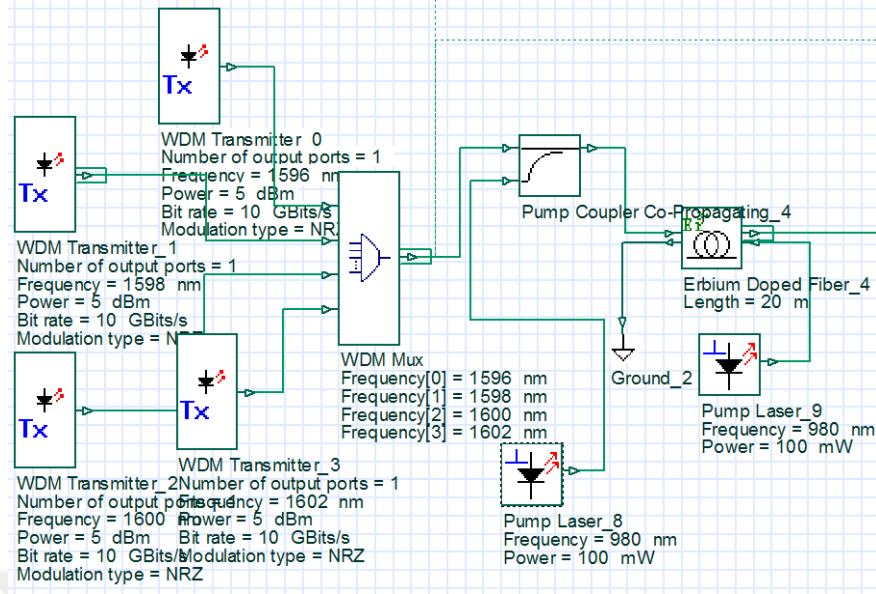
### **3.3.2. TWDM PON Üzerinde EDFA İle Yapılan Ölçümler**

#### **3.3.2.1.EDFA konumunun belirlenmesi**

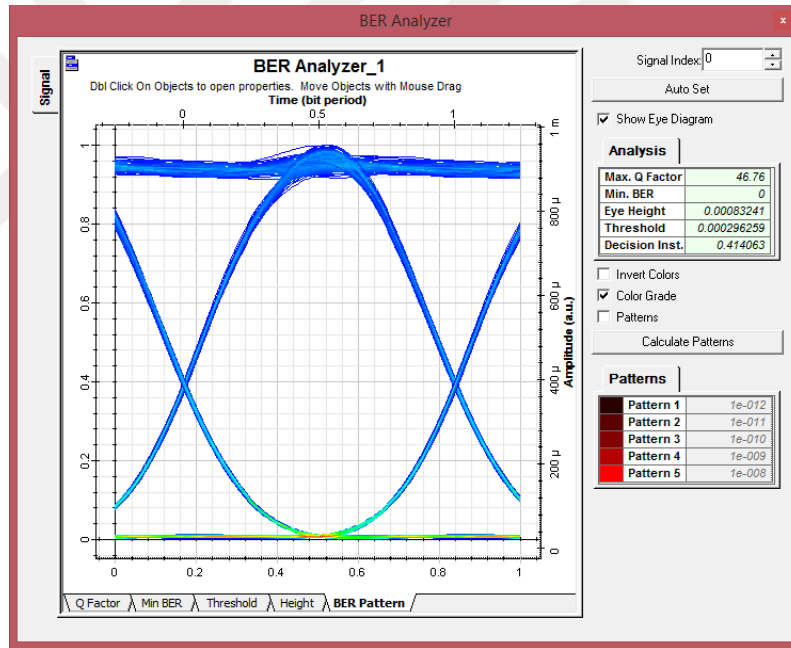
Bu bölümde aşağıyönde 4 adet 10 Gbps bandgenişliğinde veri iletimi sağlayan 4 kanalın veri trafiğinin tek fiber lifi üzerinden iletilmesini sağlayan WDM multiplexer ve pasif optik ağın daha uzaklarda ve daha çok kullanıcıya hizmet verebilmesi için sinyal gücünün kuvvetlendirilmesini sağlayan EDFA'nın bu uygulamaya özel parametreleri belirlenecektir. EDFA'nın WDM multiplexer giriş veya çıkışına konumlandırılması ile ilgili ölçümler 16 ONU 10 km ve 16 ONU 40 km lik pasif optik ağlar üzerinde yapılacaktır.

#### **a)EDFA'nın WDM multiplexer çıkışına yerleştirilmesi**

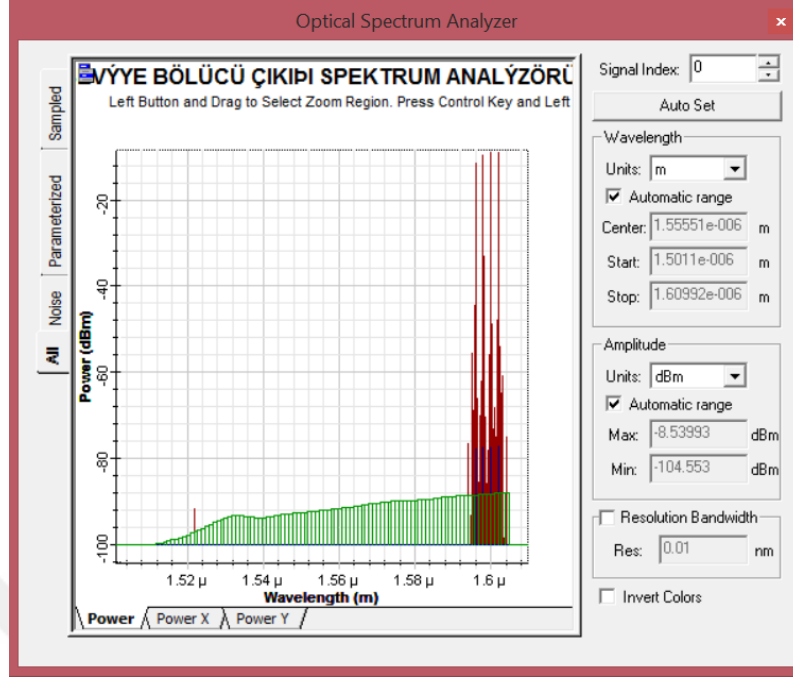
EDFA'nın ilk durumda WDM multiplexer'ın çıkışına yerleştirildiğinde elde edilen değer ölçümlenip kaydedilmiştir. Yapılan ölçümlerde 20 m uzunluğunda EDF kullanımı ile 980 nm dalgaboyunda 100 mW gücünde çift yönde pompalama değerlerinden oluşan bir EDFA kullanılmıştır. Oluşturulan yapıda WDM multiplexerın çalışma frekansı ise 29,424GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.30'da WDM multiplexer çıkışına yerleştirilmiş 1 adet EDFA görülmektedir.



Şekil 3.30. TWDM PON,EDFA'nın WDM multiplexer çıkışına yerleştirilmesi



Şekil 3.31. TWDM PON16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön göz diyagramı

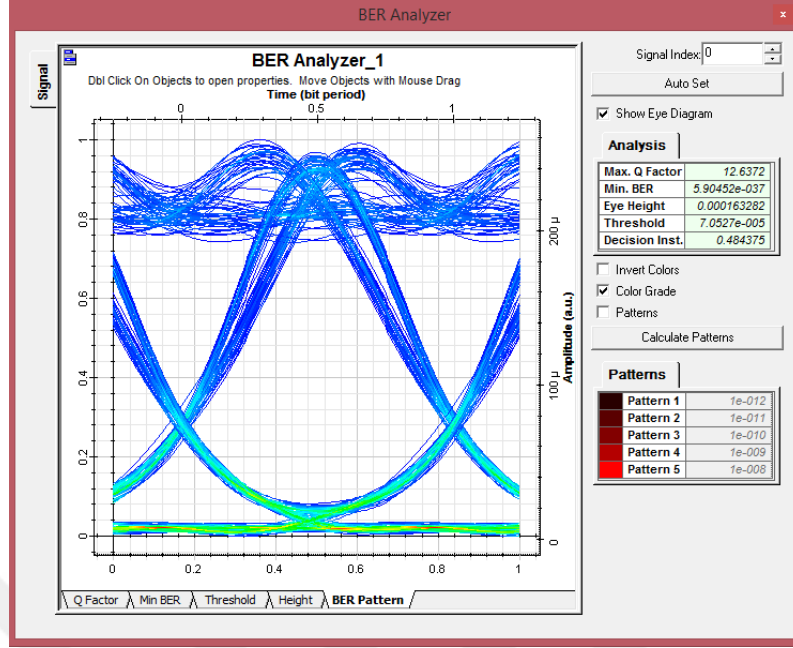


**Şekil 3.32.** TWDM PON16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön sinyal ve gürültü spektrumu

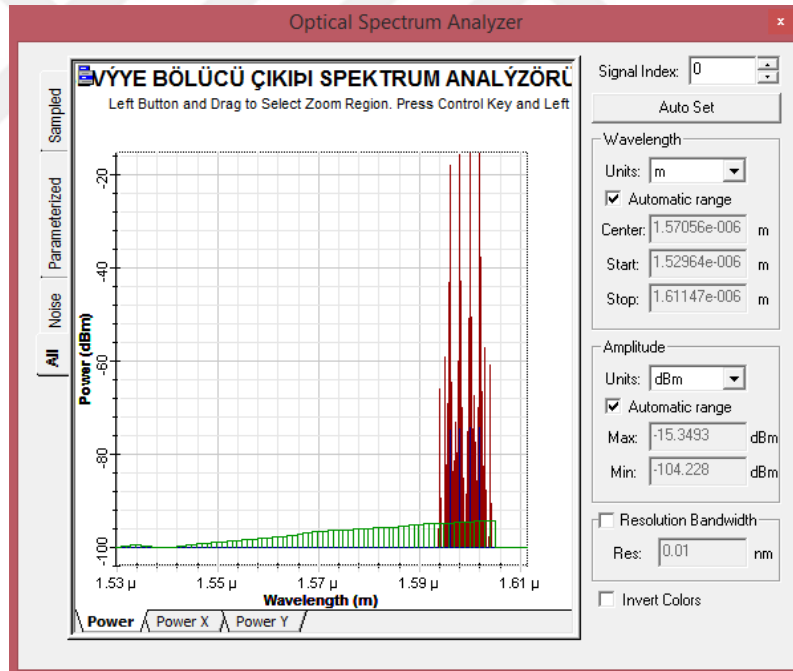
16 ONU, 10 km mesafe için yapılan simülasyon sonucu göz diyagramı Şekil 3.31’de görüldüğü gibidir. Şekil 3.31 incelendiğinde EDFA kullanımının veri iletim değerlerini oldukça iyi seviyelere getirdiği görülmektedir. 16 ONU ve 10 km mesafede aşağıyönde Q değeri 46,76 seviyesinde ölçümlenmiş olup BER değeri ise 0 olarak görülmektedir. EDFA kullanılmadan yapılan TWDM PON ölçümlerinde Çizelge 3.12’deki değerlere bakıldığında 16 ONU ve 10 km mesafede Q değerinin 18,39 ve BER değerinin  $8,24 \times 10^{-76}$  olduğu görülmektedir. Değerlerden de görülmektedir ki EDFA kullanımının veri iletim kalitesine, daha uzak ve daha çok sayıda kullanıcıya ulaşım noktasında katkısı çok fazladır.

Şekil 3.32 incelendiğinde aşağıyön veri iletim bölgesinde gürültü değerinin yaklaşık -88 dBm olduğu görülmektedir. Şekil 3.33’de ise 16 ONU ve 40 km mesafede pasif optik ağın aşağıyön göz diyagramı görülmektedir. Diyagramı incelediğimizde zayıflama ve gürültü değerlerindeki değişime göre diyagramda bozulmaların meydana geldiği görülmektedir.





Şekil 3.33. TWDM PON16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön göz diyagramı

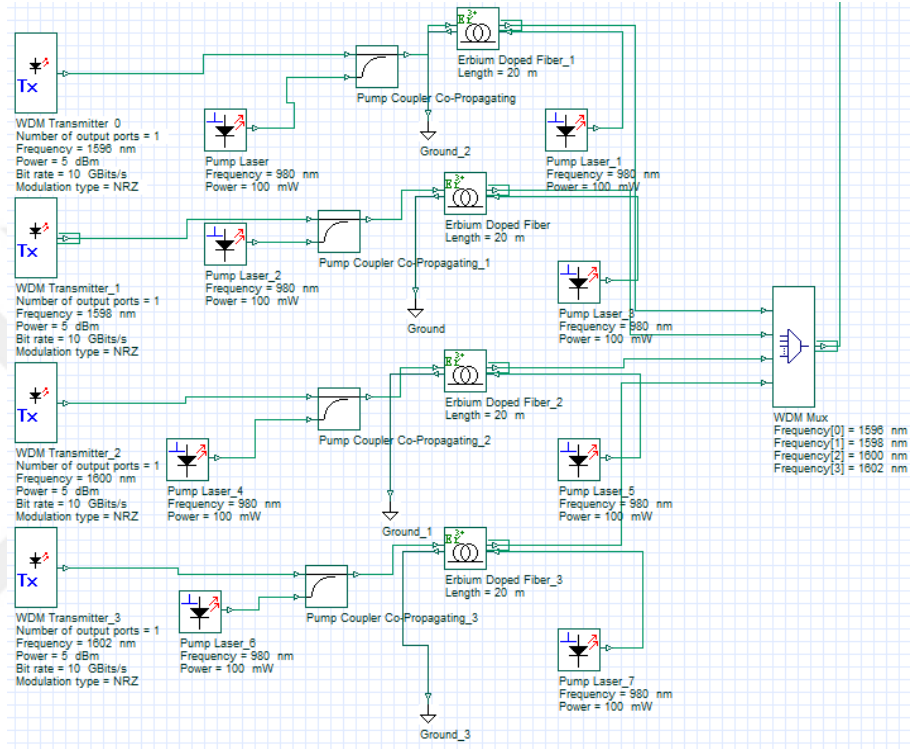


Şekil 3.34. TWDM PON16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer çıkışı EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön sinyal ve gürültü spektrumu

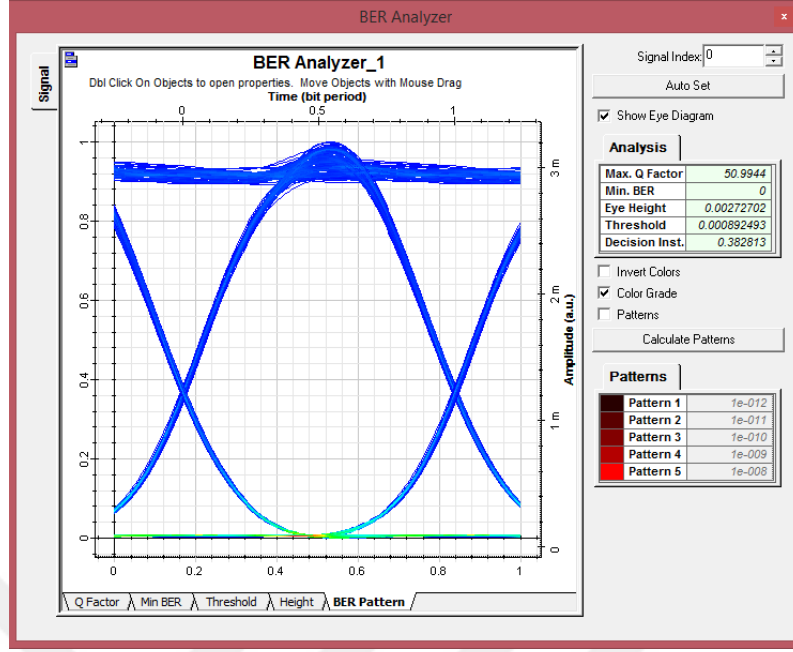
Şekil 3.34 incelendiğinde aşağıyön veri iletim bölgesinde gürültü değerinin yaklaşık -94,5 dBm olduğu görülmektedir.

b) EDFA'nın WDM multiplexer girişine yerleştirilmesi

Bu pasif optik ağ yapısında ise yine 20 m uzunluğunda EDF kullanımı ile 980 nm dalgaboyunda 100 mW gücünde çift yönde pompalama değerlerinden oluşan bir EDFA kullanılmıştır. Oluşturulan yapıda WDM multiplexerin çalışma frekansı ise 29,424GHz olarak ayarlanmıştır. EDFA, Şekil 3.35’de görüldüğü gibi WDM multiplexer girişine yerleştirilmiştir. Bu yapıda EDFA’nın WDM multiplexer çıkışına yerleştirilmesinden farklı olarak 4 adet EDFA kullanımı görülmektedir.

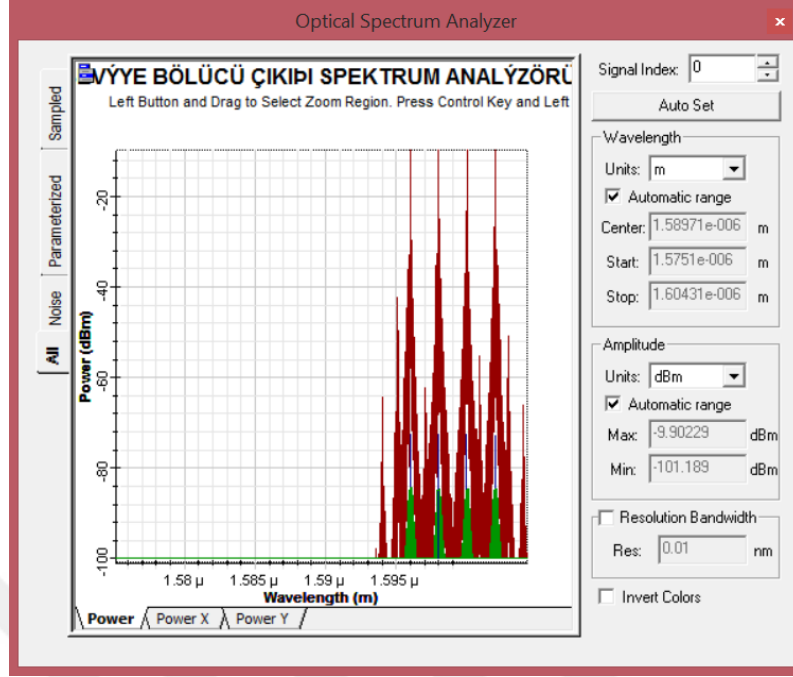


Şekil 3.35. TWDM PON EDFA'nın WDM multiplexer girişine yerleştirilmesi



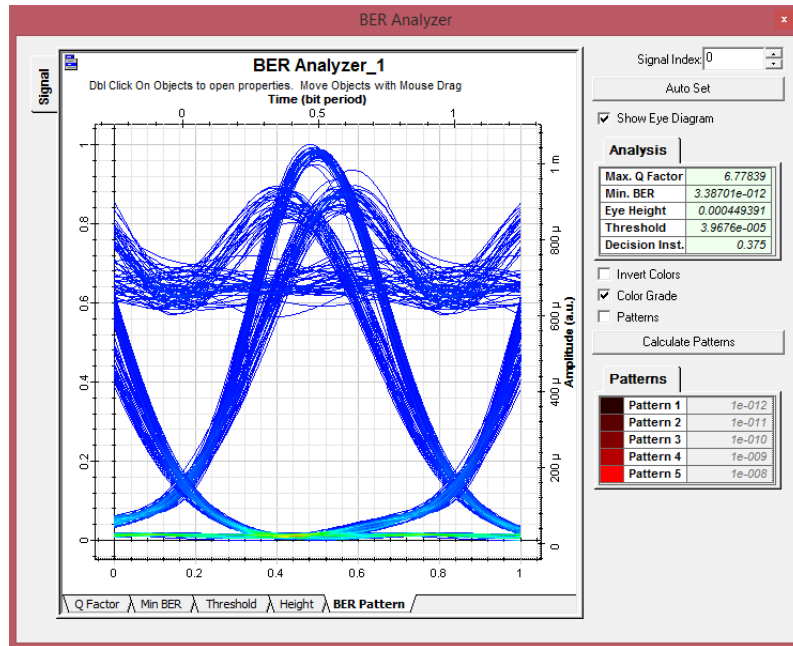
**Şekil 3.36.** TWDM PON16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön göz diyagramı

Şekil 3.36’da WDM multiplexer girişine konumlandırılmış EDFA ile kuvvetlendirilen TWDM PON yapısına ait aşağıyön göz diyagramı görülmektedir. Bu diyagramdan elde edilen sonuçlara göre, WDM multiplexer girişine bağlanan EDFA ile 16 ONU ve 10 km mesafede Q değerinin 50,99 ve BER değerinin 0 olduğu görülmüştür. Şekil 3.37’de ise bu devrenin gürültü spektrumu görülmektedir. Gürültü seviyesi -84 dBm olarak ölçülmüştür. Burada dikkat edildiğinde gürültünün iletim sinyal dalgaboyu bölgesine yayılma şeklinde değil de noktasal olarak tam iletim sinyalinin olduğu dalgaboyunda oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu durum ise zayıflamanın arttığı durumlarda sinyali çok fazla bozan bir etken olduğundan uygulamamızda bu tasarımın tercih edilmemesindeki en büyük etkendir.

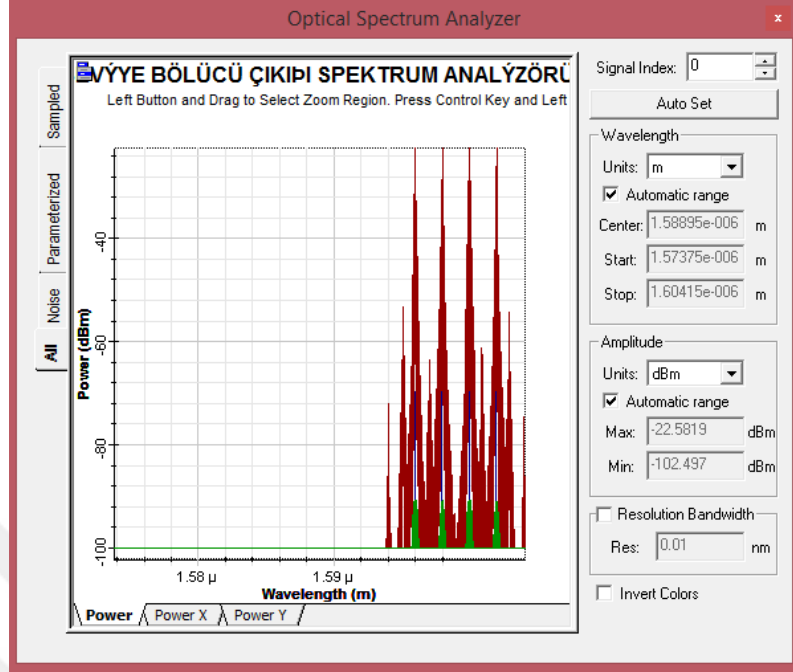


Şekil 3.37. TWDM PON16 ONU ve 10 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön sinyal ve gürültü spektrumu

Şekil 3.38 ve 3.39’da da Şekil 3.36. ve 3.37’deki durumun 16 ONU 40 km şartları altındaki ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde de Şekil 3.36 ve 3.37’deki sonuçlar ile benzer durumlar gözlemlenmiş olup WDM girişine bağlanan EDFA ile gürültü seviyelerinin sinyalde ciddi bozulmalar oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

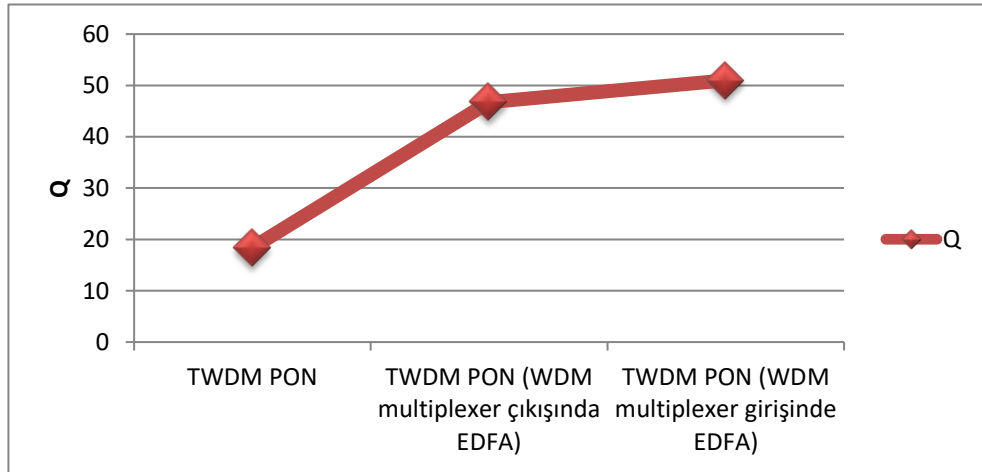


Şekil 3.38. TWDM PON16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön göz diyagramı



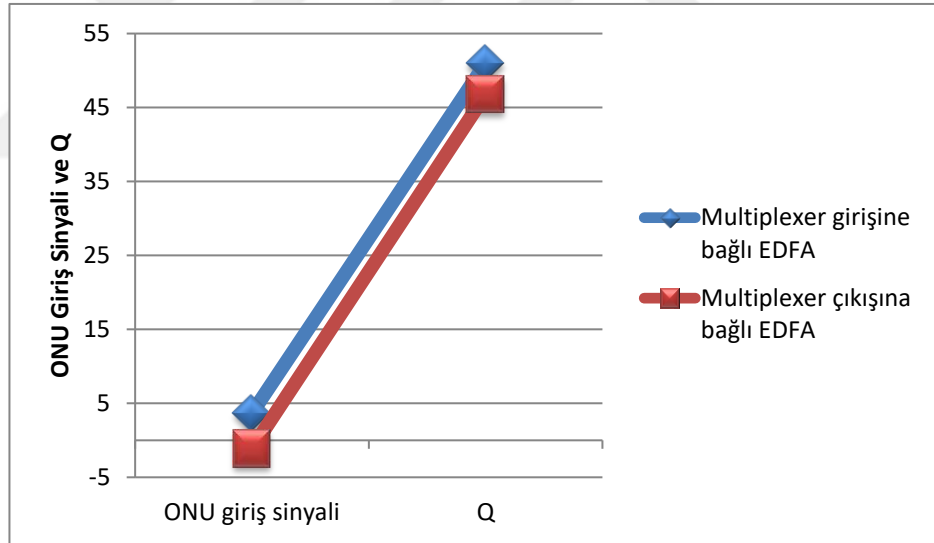
Şekil 3.39. TWDM PON16 ONU ve 40 km mesafede WDM multiplexer girişi EDFA uygulaması sonucu elde edilen aşağıyön sinyal ve gürültü spektrumu

### 3.3.2.2. WDM giriş ve çıkış EDFA uygulamalarının karşılaştırılması

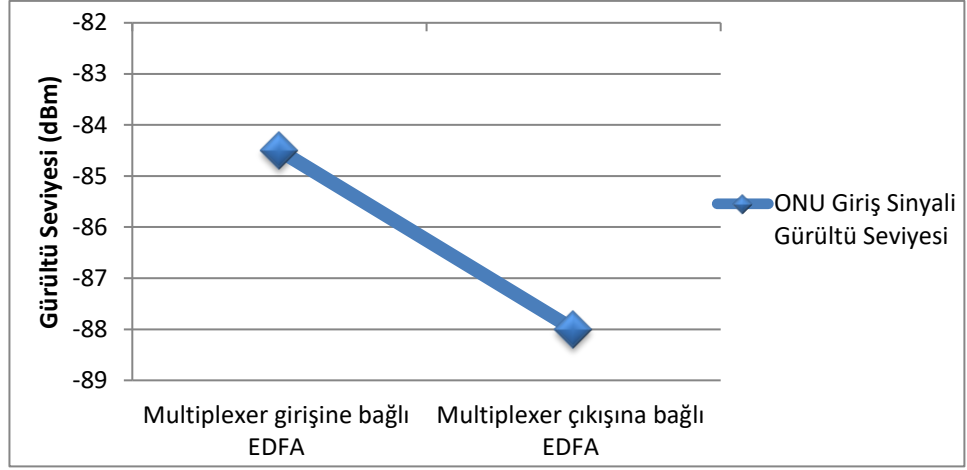


Şekil 3.40. TWDM PON ve EDFA kullanımı ile elde edilen Q değerleri (16 ONU 10 km)

Şekil 3.40’da Q faktörü kıyaslamaları görülmektedir. WDM multiplexer çıkışına ve girişine yerleştirilen EDFA ile Q iyileştirilmiş ve her iki uygulamanın Q değerine olumlu etki ettiği ve sağlanan katkının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak sadece Q değerine göre tasarım yapmak yeterli olmamakta, ONU sinyal giriş değerleri ile bu sinyale ait gürültü değerlerinin detaylı incelenmesi de uzak mesafelerde iletim konusunda oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Şekil 3.41’de 16 ONU, 10 km mesafede WDM multiplexer girişine ve çıkışına bağlanan EDFA’nın ONU giriş sinyal değerinin değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 3.41 incelendiğinde her iki uygulamanın da Q değerine paralel etkiler gösterdiği, pasif optik ağın güç bütçesine yakın katkılılarda bulunduğu görülmektedir. Grafikte ONU giriş sinyali bir miktar düşük olan EDFA uygulamasının Q değerinde de bir miktar düşüklük görülmüştür. ONU giriş sinyali bir miktar yüksek olan EDFA uygulamasının Q değerinin de yaklaşık olarak aynı oranda yüksek olduğu görülmüştür. Bu değerler sonucunda EDFA konumunun belirleyici etkini gürültü değerleri ve SNR (işaret gürültü oranı - signal to noise ratio) olacaktır.



Şekil 3.41. TWDM PON’da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş sinyal ve Q değerleri (16 ONU 10 km)



**Şekil 3.42.** TWDM PON’da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş gürültü değerleri (16 ONU 10 km)

16 ONU ve 10 km mesafede yapılan testlerin sonucuna göre oluşturulan grafikler Şekil 3.41 ve Şekil 3.42’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlar olarak Çizelge3.13’te belirtilmiştir.

**Çizelge3.13.** WDM multiplexer bağlantı şekillerine göre pasif optik ağ parametreleri (16 ONU 10 km)

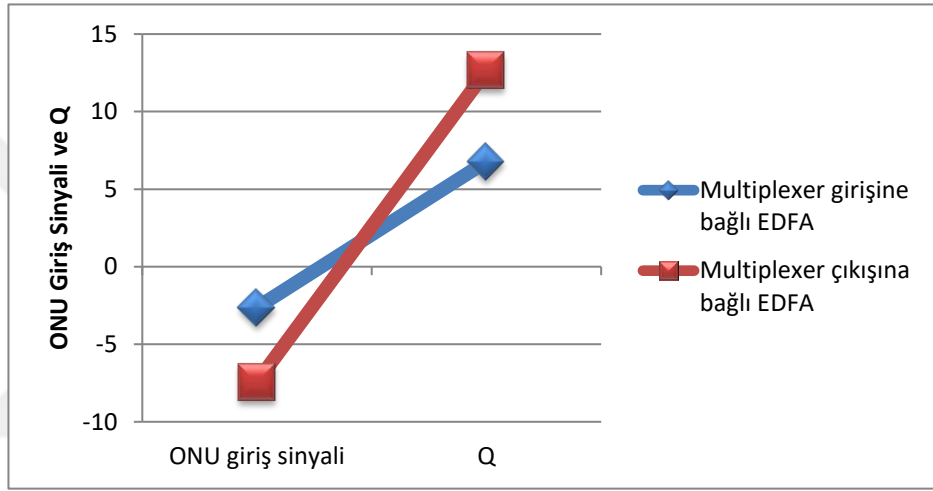
	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Q	Gürültü Sinyali (dBm)	BER
<b>Multiplexer girişine bağlı EDFA</b>	3,671	50,99	-84,5	0
<b>Multiplexer çıkışına bağlı EDFA</b>	-1,125	46,76	-88	0

Çizelge3.13. incelendiğinde WDM multiplexer girişine bağlanan EDFA ile elde edilen sonuçların, çıkışa bağlanan EDFA ile elde edilen sonuçlara göre daha iyi olduğu ancak gürültü değerlerinde WDM multiplexer çıkışına bağlanan EDFA’nın daha az gürültü seviyesine sahip olduğu tespit edilmiştir. 16 ONU ve 10 km mesafe için elde edilen bu sonuçlar, 16 ONU ve 40 km için de ölçümlenmiş ve optimum kararlılıkla sistem çalışmasını sağlayan değerler tespit edilmiştir.

Çizelge3.13’te elde edilen değerler için SNR değerleri hesaplandığında;  $SNR_{dBm} = 10 \log [P_{sinyal(W)} / P_{gürültü(W)}]$  [18,43]. WDM multiplexer girişine bağlı EDFA’da ONU giriş sinyali; 3,671 dBm = 2,33 mW. Gürültü sinyali : -84,5 dBm = 0,00355 mW olarak hesaplanmış ve SNR değeri;  $10 \log [(2,33) / (0,00355)] = 28,17$  dBm olarak gerçekleşmiştir.

WDM multiplexer çıkışına bağlı EDFA’da ONU giriş sinyali;  $-1,125 \text{ dBm} = 0,77 \text{ mW}$ . Gürültü sinyali :  $-88 \text{ dBm} = 0,00158 \text{ mW}$  olarak hesaplanmış ve SNR değeri;  $10\log[(0,77)/(0,00158)] = 26,88 \text{ dBm}$  olarak gerçekleşmiştir.

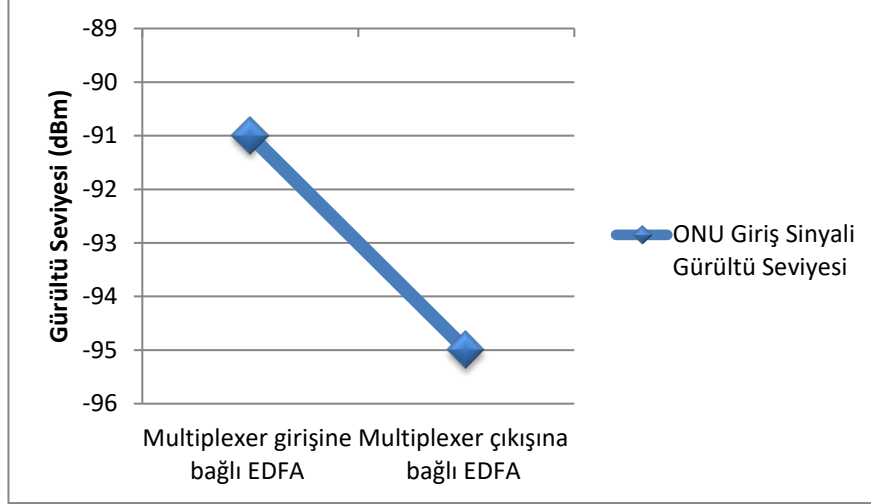
Bu değerlere göre işaret gürültü oranının; WDM multiplexer girişine yapılan EDFA bağlantısında, çıkışa yapılan EDFA bağlantısından  $1,29 \text{ dBm}$  daha yüksek olduğu görülmüştür. Sinyal değerinin yüksek olmasının yanında WDM multiplexer girişine bağlanan EDFA nın, WDM multiplexer çıkışına bağlanan EDFA’ya göre yaklaşık  $3,5 \text{ dBm}$  daha fazla gürültüye sahip olduğu görülmüştür.



**Şekil 3.43.** TWDM PON’da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş sinyali ve Q değerleri (16 ONU 40 km)

Şekil 3.43’de ise 16 ONU ve 40 km mesafeli TWDM pasif optik ağı üzerinde WDM multiplexer girişine ve çıkışına uygulanan EDFA kuvvetlendirici uygulamalarının ONU giriş sinyali ve Q üzerinde etkileri incelenmiş ve grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde önemli bir nokta dikkat çekmektedir. WDM multiplexer girişine bağlı EDFA kullanılan pasif optik ağda ONU giriş sinyali daha yüksek bir değerde olmasına rağmen Q değeri incelendiğinde WDM multiplexer çıkışına bağlı EDFA kullanımının daha iyi bir sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 3.44’de aynı pasif optik ağa ait gürültü değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.





**Şekil 3.44.** TWDM PON’da EDFA kullanımı sonucu ONU giriş gürültü değerleri (16 ONU 40 km)

Şekil 3.44’deki gürültü değerleri incelendiğinde WDM multiplexer çıkışına bağlanan EDFA’lı pasif optik ağın daha az gürültü ile veri iletimine olanak sağladığı görülmektedir. Çizelge3.14, 16 ONU 40 km mesafe için EDFA kullanımı ile gerçekleştirilen pasif optik ağda elde edilen parametreleri göstermektedir. Çizelge3.14 incelendiğinde WDM multiplexer çıkışına uygulanan EDFA ile ONU giriş sinyal seviyesinin, WDM multiplexer girişine uygulanan EDFA uygulamasına göre daha düşük olmasına rağmen; gürültü seviyesi, Q değeri ve BER değerlerinde çok daha iyi bir performansa sahip olduğu tablodaki değerlerden anlaşılmaktadır.

**Çizelge3.14.** WDM multiplexer bağlantı şekillerine göre pasif optik ağ parametreleri (16 ONU 40 km)

	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Q	Gürültü Sinyali (dBm)	BER
<b>Multiplexer girişine bağlı EDFA</b>	-2,629	6,78	-91	$3,39 \times 10^{-12}$
<b>Multiplexer çıkışına bağlı EDFA</b>	-7,425	12,64	-95	$5,9 \times 10^{-37}$

Çizelge 3.14’te elde edilen değerler için SNR değerleri hesaplandığında; WDM multiplexer girişine bağlı EDFA’da ONU giriş sinyali;  $-2,629 \text{ dBm} = 0,55 \text{ mW}$ . Gürültü sinyali :  $-91 \text{ dBm} = 0,000794 \text{ mW}$  olarak hesaplanmış ve SNR değeri;  $\text{SNR} = 10 \log[(0,55)/(0,000794)] = 28,41 \text{ dBm}$  olarak gerçekleşmiştir.

WDM multiplexer çıkışına bağlı EDFA’da ONU giriş sinyali;  $-7,425 \text{ dBm} = 0,18 \text{ mW}$ . Gürültü sinyali :  $-95 \text{ dBm} = 0,000316 \text{ mW}$  olarak hesaplanmış ve SNR değeri;  $10\log[(0,18)/(0,000316)] = 27,56 \text{ dBm}$  olarak gerçekleşmiştir.

Hesaplamalar sonrasında yukarıdaki bazı değerlere ulaşılmıştır. Bu değerlere göre işaret gürültü oranının; WDM multiplexer girişine yapılan EDFA bağlantısında, çıkışa yapılan EDFA bağlantısından  $0,85 \text{ dBm}$  daha yüksek olduğu görülmüştür. Gürültü değerleri incelendiğinde ise WDM multiplexer girişine uygulanan EDFA’nın, WDM multiplexer çıkışına uygulanan EDFA’ya göre  $4 \text{ dBm}$  daha fazla gürültüye yol açtığı görülmüştür.

Elde edilen değerlerden varılan sonuca göre uzak mesafelerde ve kaybın arttığı, sinyal değerinin düştüğü durumlarda Q faktörü, gürültü seviyesi ve BER değerlerinin daha kararlı seyretmesinden dolayı uygulamamızda EDFA, WDM multiplexer’ın çıkışına konumlandırılmıştır. SNR, Q ve BER değerlerine ilişkin elde edilen sonuçlar Çizelge 3.15’te görülmektedir.

**Çizelge3.15.** EDFA’nın WDM multiplexer üzerindeki bağlantı şekillerine göre SNR, Q ve BER değerleri

		WDM Multiplexer Giriş EDFA	WDM Multiplexer Çıkış EDFA
<b>16 ONU 10 km</b>	SNR (dBm)	28,17	26,88
	Q	50,99	46,76
	BER	0	0
<b>16 ONU 40 km</b>	SNR (dBm)	28,41	27,56
	Q	6,78	12,64
	BER	$3,39 \times 10^{-12}$	$5,9 \times 10^{-37}$

### 3.3.2.3. TWDM PON parametrelerine göre WDM multiplexer’ın çalışma frekansının tespiti

WDM multiplexer çalışma frekansının tespiti için WDM multiplexer üzerinde testler yapılmış ve değerleri Çizelge 3.16’ya işlenmiştir. Çizelge 3.16 incelendiğinde gürültü değerlerinin en düşük olduğu değerin  $-84,5 \text{ dBm}$  olduğu görülmekte olup Q değerinin en yüksek noktaya ulaştığı değer ise  $57,45$  tir. Bu değerde BER ise 0 olmaktadır. Bu değerlerin elde edildiği WDM multiplexer çalışma frekansı  $14,712 \text{ GHz}$  dir. Bu tezde TWDM PON’da EDFA kullanımı durumunda WDM multiplexer çalışma frekansı  $14,712 \text{ GHz}$  olarak seçilmiştir.

**Çizelge3.16.** WDM multiplexer çalışma frekansına göre Q, BER ve gürültü değerleri (16 ONU, 10 km, 980 nm, 20 m EDF)

WDM Multiplexer Çalışma Frekansı	Q	BER	Gürültü (dBm)
941,553GHz	31,32	$1,26 \times 10^{-215}$	-78,5
470,777GHz	31,79	$3,47 \times 10^{-222}$	-80
235,388GHz	31,79	$4,18 \times 10^{-222}$	-83,5
117,694GHz	37,06	$7,03 \times 10^{-301}$	-84,5
58,847 GHz	43,01	0	-84
29,424 GHz	50,99	0	-84,5
14,712GHz	57,45	0	-84,5
7,356 GHz	5,69	$5,42 \times 10^{-009}$	-84,5
3,678 GHz	2,58	0,0048	-84,5

### 3.3.2.4. EDFA parametrelerinin belirlenmesi

EDFA kullanılarak çıkış gücü yükseltileen TWDM PON için diğer parametreler belirlenmiş olup bu kısımda EDFA parametrelerinin tespit edilmesiyle pasif optik ağı tüm parametreleri belirlenmiş olacaktır.

Parametrelerinin belirlenmesinde 16 onu 10 km ve 16 onu 40 km lik iki ayrı ağı üzerinde ölçümler yapılmıştır. EDFA testinde 100 metreden 2 metreye kadar farklı EDF boyları kullanılarak sonuçları listelenmiştir. Çizelge3.17’de 16 onu 10 km değerlerine sahip ağı üzerinde, Çizelge3.18’de ise 16 onu 40 km değerine sahip ağı üzerinde testler yapılmıştır. Tablodaki değerler incelendiğinde 5 metre uzunluğundaki EDF kullanımının özellikle uzun mesafeli fiber kullanımında (16 ONU 40 km) en iyi Q ve BER değerlerini verdiği görülmüştür. Bu durumdan dolayı kullanılacak EDF boyu 5 metre olarak belirlenmiştir.

**Çizelge3.17.** TWDM PON16 ONU, 10 km mesafe ve 100mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF’lerin pasif optik ağı değerlerine etkileri

Optik Mesafe	EDFA Değerleri	EDF Uzunluğu(m)	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
980 nm-100mW		100 m	-2,579	-85,5	32,6	$2,06 \times 10^{-233}$
		50 m	-1,634	-87	37,67	$7,77 \times 10^{-311}$
		25 m	-1,223	-88	40,11	0
		10 m	-0,996	-88,5	41,97	0
		5 m	-1,315	-90	39,95	0

16 ONU		2 m	-1,365	-96,5	31,53	1,37x10 <sup>-218</sup>
10 KM	1480nm-100mW	100 m	0,087	-84	35,91	9,65x10 <sup>-283</sup>
		50 m	0,476	-86	40,99	0
		25 m	0,736	-86,5	44,47	0
		10 m	0,82	-86,5	46,39	0
		5 m	-0,491	-91,5	37,82	2,05x10 <sup>-313</sup>
		2 m	-1,244	-99	28,08	7,45x10 <sup>-174</sup>

**Çizelge3.18.** TWDM PON16 ONU, 40 km mesafe ve 100mW çift yönlü pompalama şartları altında farklı uzunluklardaki EDF'lerin pasif optik ağ değerlerine etkileri

Optik Mesafe	EDFA Değerleri	EDF Uzunluğu(m)	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
16 ONU	980 nm-100mW	100 m	-8,878	-92	11,94	3,7x10 <sup>-33</sup>
		50 m	-7,934	-94	17,52	5,29x10 <sup>-69</sup>
		25 m	-7,523	-94,5	19,9	1,68x10 <sup>-88</sup>
		10 m	-7,296	-95	19,54	2,72 x 10 <sup>-85</sup>
		5 m	-7,615	-96,5	20,14	1,51 x 10 <sup>-90</sup>
		2 m	-7,665	-100	11	1,73 x 10 <sup>-28</sup>
40 KM	1480nm-100mW	100 m	-6,388	-91,5	15,87	4,9 x 10 <sup>-57</sup>
		50 m	-5,823	-92	19,71	8,54x10 <sup>-87</sup>
		25 m	-5,564	-92,5	16,63	1,98x10 <sup>-62</sup>
		10 m	-5,48	-92,5	14,76	1,23x10 <sup>-49</sup>
		5 m	-0,491	-91,5	37,82	2,05x10 <sup>-313</sup>
		2 m	-1,244	-99	28,08	7,45x10 <sup>-174</sup>

980 nm ve 1480 nm dalgaboyundaki EDFA'ların her birinin pompalama güçleri 100 mW'tan 25 mW'a kadar değiştirilmiş ve bu değişimin pasif optik ağ üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çizelge3.19'da 16 ONU 10 km ve Çizelge 3.20'de ise 16 ONU 40 km değerlerindeki pasif optik ağ üzerinde yapılan testler sonucunda her iki mesafede ve her iki dalgaboyunda da 100 mW pompalama gücü ile en iyi değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre TWDM PON da pompalama gücü olarak 100 mW değeri kullanılacaktır.

**Çizelge3.19.** TWDM PON16 ONU 10 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi

EDF Uzunluğu	EDFA Değerleri	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
5 m	980 nm - 100 mW	-1,315	-89,5	39,95	0
	980 nm - 75 mW	-2,337	-91	38,75	0
	980 nm - 50 mW	-3,887	-92	36,92	$1,04 \times 10^{-298}$
	980 nm - 25 mW	-6,663	-95	30	$3,23 \times 10^{-198}$
5 m	1480 nm - 100 mW	-0,491	-91,5	37,82	$2,05 \times 10^{-313}$
	1480 nm - 75 mW	-1,498	-91,5	37,38	$3,99 \times 10^{-306}$
	1480 nm - 50 mW	-2,894	-92	36,55	$7,69 \times 10^{-293}$
	1480 nm - 25 mW	-5,323	-93,5	34,27	$9,08 \times 10^{-258}$

**Çizelge3.20.** TWDM PON16 ONU 40 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı güçlerdeki pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi

EDF Uzunluğu	EDFA Değerleri	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
5 m	980 nm - 100 mW	-7,615	-96,5	20,14	$1,51 \times 10^{-90}$
	980 nm - 75 mW	-8,637	-97	19,67	$1,97 \times 10^{-86}$
	980 nm - 50 mW	-10,188	-98,5	16,72	$4,47 \times 10^{-63}$
	980 nm - 25 mW	-12,963	-100	12,13	$3,77 \times 10^{-34}$
5 m	1480 nm - 100 mW	-6,79	-97,5	17,67	$3,84 \times 10^{-70}$
	1480 nm - 75 mW	-7,798	-98	16,56	$6,97 \times 10^{-62}$
	1480 nm - 50 mW	-9,194	-98	15,89	$3,47 \times 10^{-57}$
	1480 nm - 25 mW	-11,623	-100	13,79	$1,55 \times 10^{-43}$

Pompalama gücünün belirlenmesi sonrası EDF'nin girişine, çıkışına veya çift yönlü(hem girişine hem çıkışına) pompalama durumuna göre pasif optik ağın performans değerleri tabloya işlenmiştir. Çizelge3.21'de 16 ONU 10 km ve Çizelge3.22'de ise 16 ONU 40 km değerlerindeki pasif optik ağ üzerinde EDF'nin girişine, çıkışına ve hem girişine hem çıkışına(çift yönlü) yapılan pompalamanın pasif optik ağın performansına etkileri görülmektedir. Çift yönde ve 980 nm dalgaboyunda pompalamanın diğer durumlara göre hem 16 ONU 10 km de hem de 16 ONU 40 km de daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

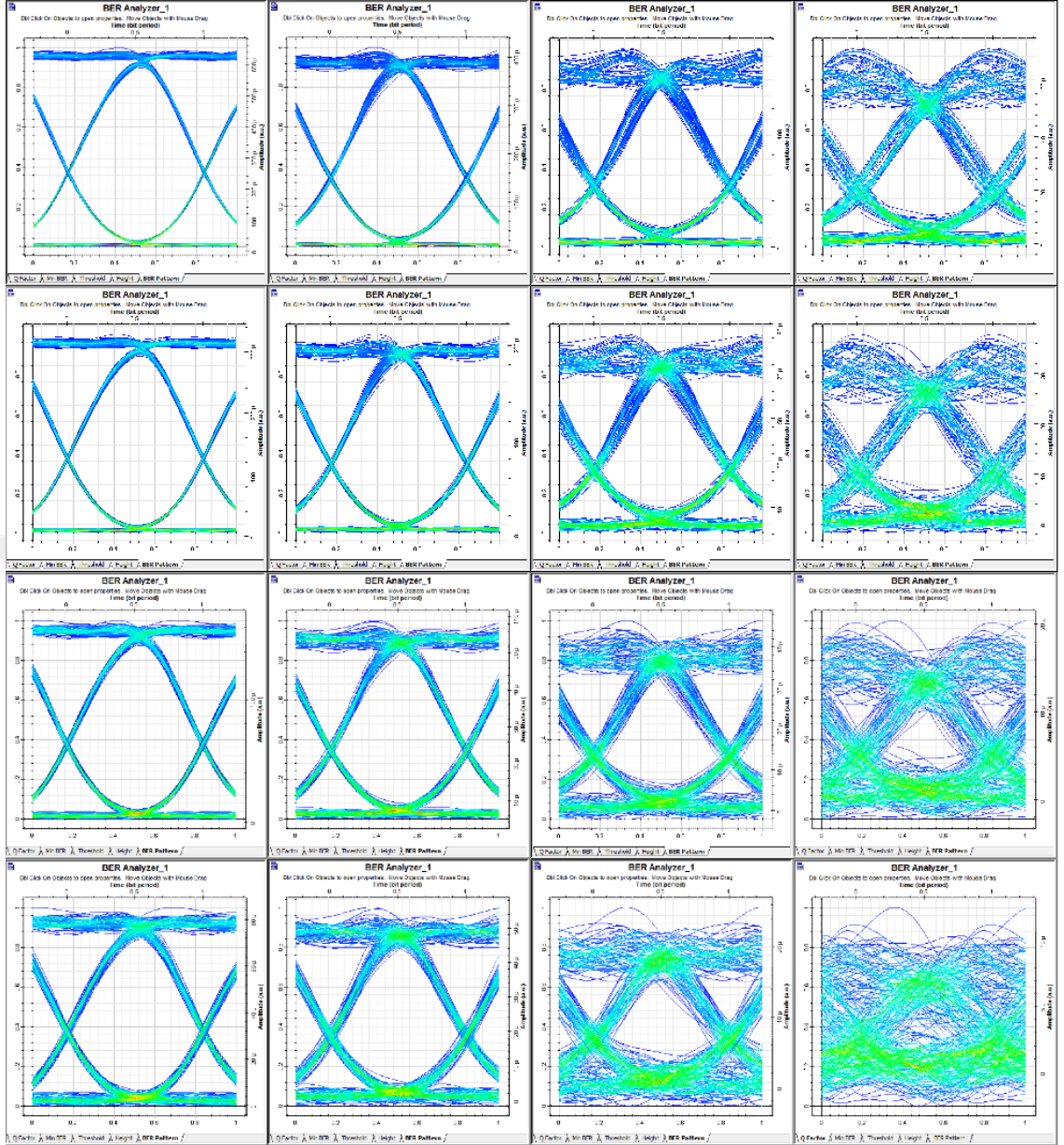
**Çizelge 3.21.** TWDM PON16 ONU 10 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi

EDFA Değerleri	Pompalama Şekli	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
980 nm,	Çift Yöne Pompalama	-1,315	-90	39,95	0
100 mW,	Girişe Pompalama	-3,846	-92	36,73	$1,12 \times 10^{-295}$
5 m EDF	Çıkışa Pompalama	-4,019	-92	36,89	$3,32 \times 10^{-298}$
1480 nm,	Çift Yöne Pompalama	-0,491	-91,5	37,82	$2,05 \times 10^{-313}$
100 mW,	Girişe Pompalama	-1,877	-92	36,57	$3,53 \times 10^{-293}$
5 m EDF	Çıkışa Pompalama	-4,226	-92	36,54	$1,06 \times 10^{-292}$

**Çizelge 3.22.** TWDM PON16 ONU 40 km mesafede 980nm ve 1480 nm EDF'nin farklı yönlerden pompalanmasının pasif optik ağ değerlerine etkisi

EDFA Değerleri	Pompalama Şekli	ONU Giriş Sinyali (dBm)	Gürültü Sinyali (dBm)	Q	BER
980 nm,	Çift Yöne Pompalama	-7,615	-96,5	20,14	$1,51 \times 10^{-90}$
100 mW,	Girişe Pompalama	-10,146	-98,5	16,41	$8,09 \times 10^{-61}$
5 m EDF	Çıkışa Pompalama	-10,319	-98	17,08	$1,03 \times 10^{-65}$
1480 nm,	Çift Yöne Pompalama	-6,79	-97,5	17,67	$3,84 \times 10^{-70}$
100 mW,	Girişe Pompalama	-8,178	-98,5	16,36	$1,9 \times 10^{-60}$
5 m EDF	Çıkışa Pompalama	-10,526	-98,5	16,16	$4,74 \times 10^{-59}$

### 3.3.2.5. 1480 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri



**Şekil 3.45.** 1480 nm EDFA ilavesi ile TWDM PON aşağıyön göz diyagramları (Yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı; soldan sağa 10, 20, 40, 60 km)

Şekil 3.45’de 1480 nm EDFA kullanımı ile farklı kullanıcı ve mesafelerde fiber uzunluğuna sahip TWDM PON yapılarının aşağıyön göz diyagramları görülmektedir. Diyagram incelendiğinde EDFA kullanılmayan TWDM PON yapısına göre çok daha başarılı veri iletim karakteristiklerinin elde edildiği görülmektedir. Göz diyagramlarının sayısal değerleri ise Çizelge3.23’te işlenmiş olup 32 ONU kullanımında 60 km ‘ye kadar veya 128 onu kullanımında 40 km ye kadar veri iletiminin sağlandığı görülmektedir.

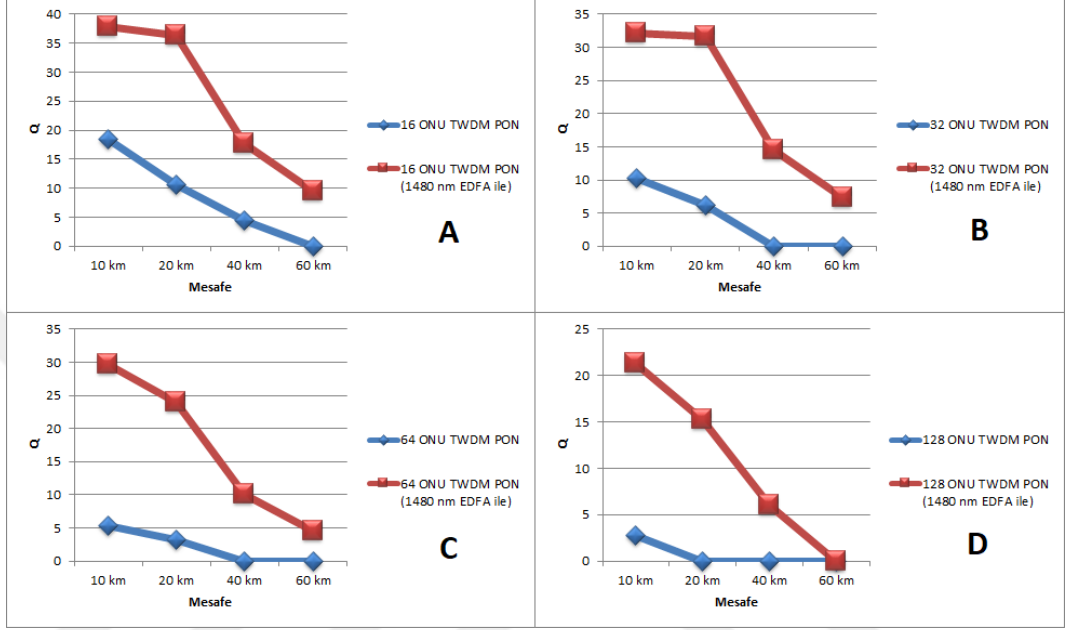
Diğer bir bakış açısıyla 1480 nm dalgaboyunda EDFA ile tasarlanan TWDM PON yapısında 32 onu 60 km mesafeye kadar tüm onu sayılarında ve tüm mesafelerde veri iletimini mümkün kılmaktadır.

**Çizelge 3.23.** 1480 nm EDFA ile kuvvetlendirilen TWDM PON sisteminin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q ve BER değerleri

Optik Mesafe	Kullanıcı Sayısı	Q	BER
10 km	16 ONU	37,82	$2,05 \times 10^{-313}$
	32 ONU	32,2	$9,43 \times 10^{-272}$
	64 ONU	29,61	$4,47 \times 10^{-193}$
	128 ONU	21,25	$1,5 \times 10^{-100}$
20 km	16 ONU	36,38	$5,09 \times 10^{-290}$
	32 ONU	31,65	$3,7 \times 10^{-220}$
	64 ONU	23,96	$3,46 \times 10^{-127}$
	128 ONU	15,18	$2,07 \times 10^{-52}$
40 km	16 ONU	17,67	$3,84 \times 10^{-70}$
	32 ONU	14,5	$6,04 \times 10^{-48}$
	64 ONU	10,08	$3,53 \times 10^{-24}$
	128 ONU	5,98	$1,1 \times 10^{-9}$
60 km	16 ONU	9,5	$1,09 \times 10^{-21}$
	32 ONU	7,27	$1,83 \times 10^{-13}$
	64 ONU	4,47	$3,88 \times 10^{-6}$
	128 ONU	0	1

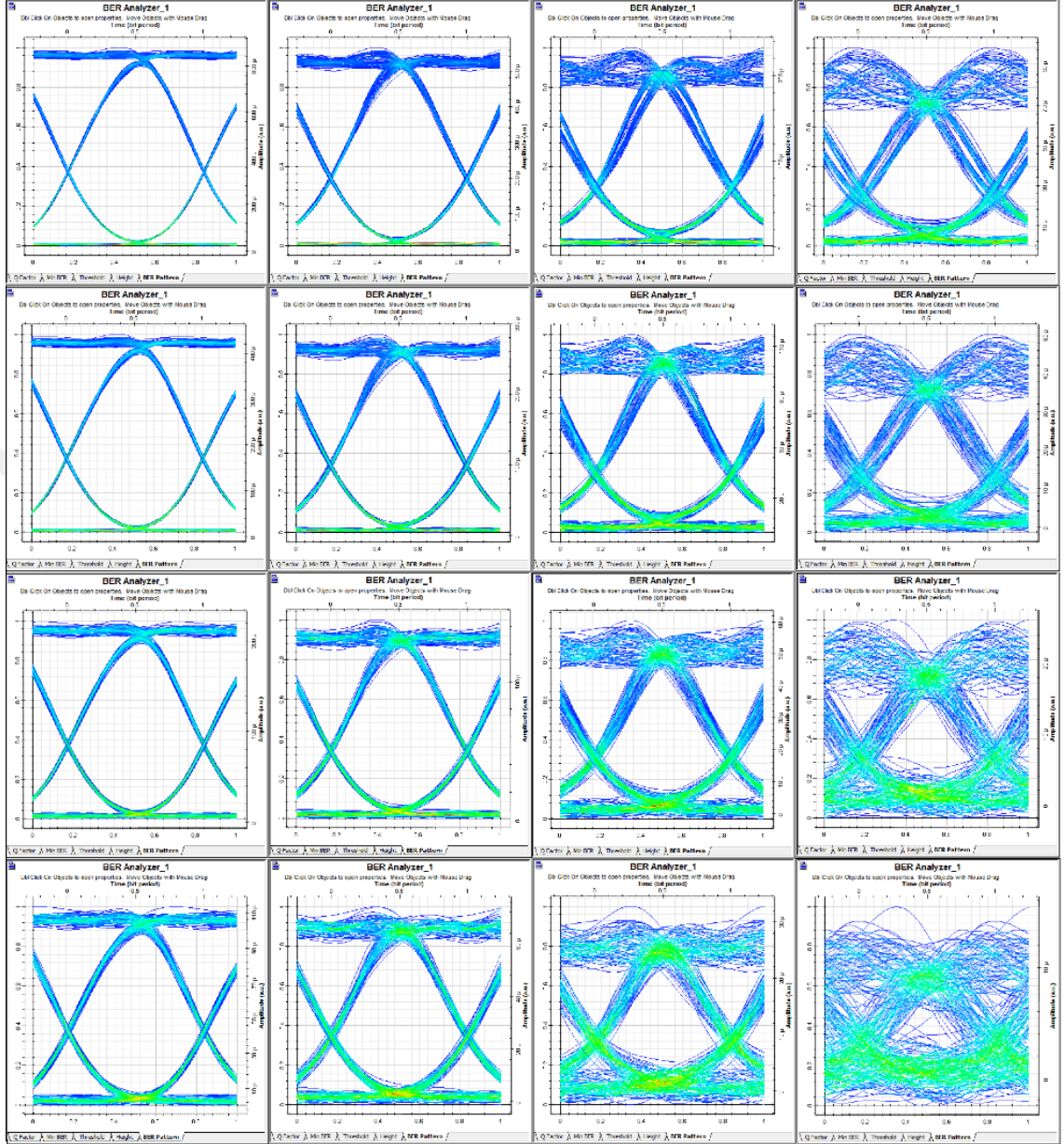


Şekil 3.46'da EDFA kullanılmayan ve 1480 nm EDFA kullanımı ile gerçekleştirilen TWDM PON yapısının Q değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde 1480 nm EDFA kullanımının EDFA kullanılmayan yapıya oranla çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 3.46. Kuvvetlendiricisiz ve 1480 nm EDFA katkılı TWDM PON sistemi Q değerlerinin kıyaslanması (A: 16 ONU, B: 32 ONU, C: 64 ONU, D: 128 ONU)

### 3.3.2.6. 980 nm EDFA kullanımıyla elde edilen performans değerleri



Şekil 3.47. 980 nmEDFAilavesi ileTWDM PON aşağıyön göz diyagramları(Yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı; soldan sağa 10, 20, 40, 60 km)

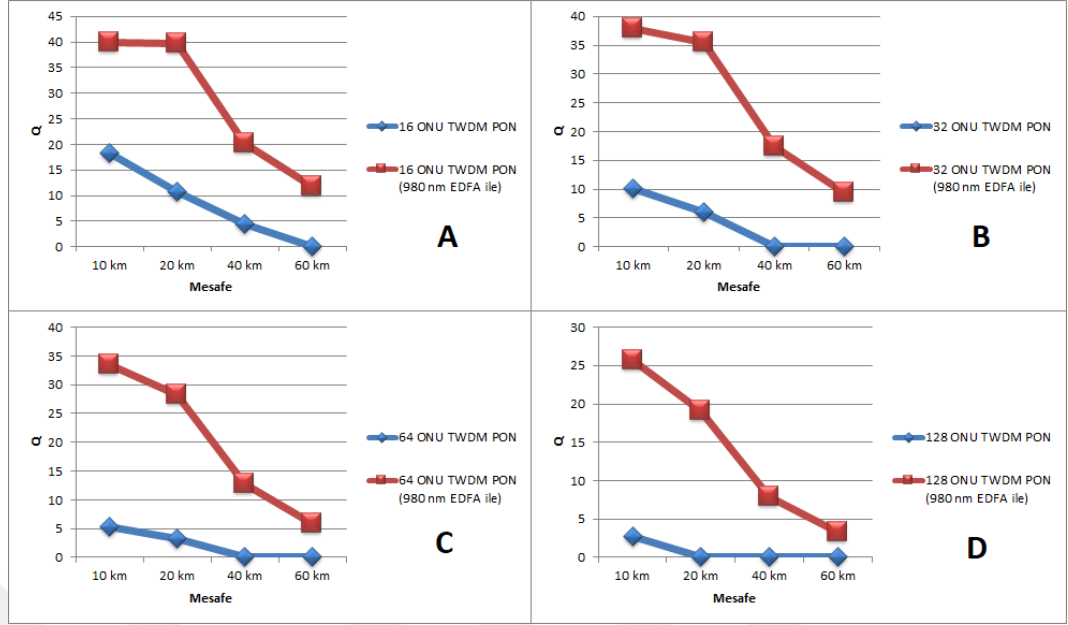
Şekil 3.47’de 980 nm EDFA kullanımı ile farklı kullanıcı ve mesafelerde fiber uzunluğuna sahip TWDM PON yapılarının aşağıyön göz diyagramları görülmektedir. Diyagram incelendiğinde EDFA kullanılmayan TWDM PON yapısına göre çok daha başarılı veri iletim karakteristiklerinin elde edildiği görülmektedir. Göz diyagramlarının sayısal değerleri ise Çizelge 3.24’te işlenmiş olup 64 onu kullanımında 60 km ‘ye kadar veya 128 onu kullanımında 40 km ye kadar veri iletiminin sağlandığı görülmektedir.

Diğer bir bakış açısıyla 980 nm dalgaboyunda EDFA ile tasarlanan TWDM PON yapısında 64 onu 60 km mesafeye kadar tüm onu sayılarında ve tüm mesafelerde veri iletimini mümkün kılmaktadır. Çizelge3.24'te 980 nm EDFA ile gerçekleştirilen TWDM PON yapısına ilişkin sayısal verilere yer verilmiştir.

**Çizelge3.24.** 980 nm EDFA ile kuvvetlendirilen TWDM PON sisteminin kullanıcı ve mesafe değişimine göre Q ve BER değerleri

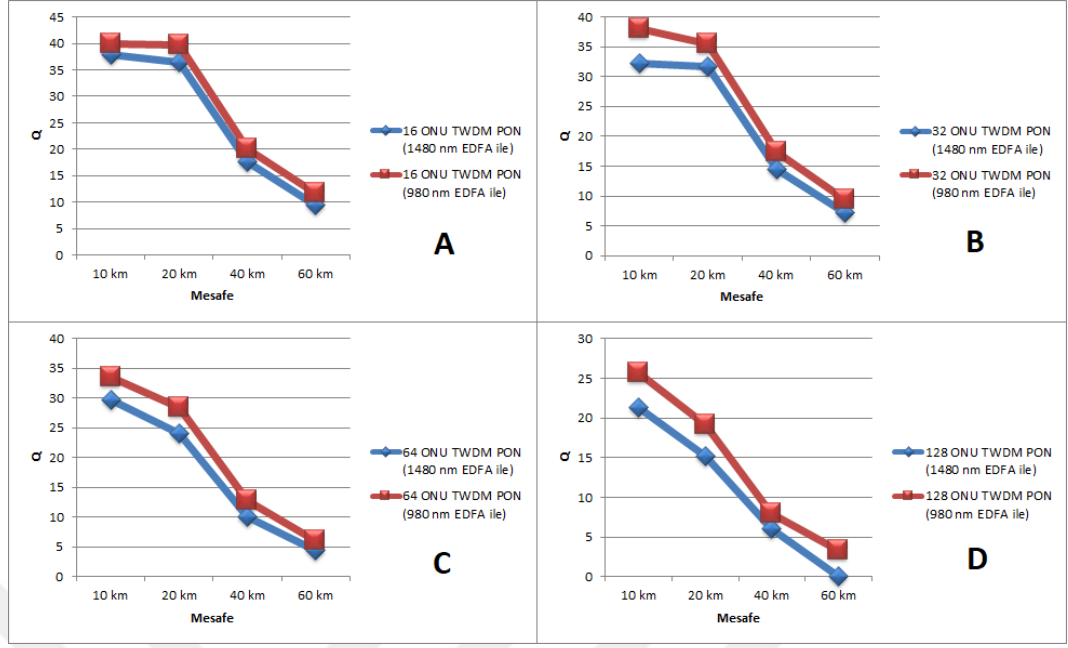
Optik Mesafe	Kullanıcı Sayısı	Q	BER
10 km	16 ONU	39,95	0
	32 ONU	37,98	$5,02 \times 10^{-316}$
	64 ONU	33,49	$2,69 \times 10^{-246}$
	128 ONU	25,64	$2,35 \times 10^{-145}$
20 km	16 ONU	39,77	0
	32 ONU	35,56	$3,27 \times 10^{-277}$
	64 ONU	28,32	$8,47 \times 10^{-177}$
	128 ONU	19,1	$1,29 \times 10^{-81}$
40 km	16 ONU	20,14	$1,51 \times 10^{-90}$
	32 ONU	17,31	$2 \times 10^{-67}$
	64 ONU	12,75	$1,63 \times 10^{-37}$
	128 ONU	7,9	$1,42 \times 10^{-15}$
60 km	16 ONU	11,72	$5,12 \times 10^{-32}$
	32 ONU	9,33	$5,46 \times 10^{-21}$
	64 ONU	5,96	$1,22 \times 10^{-9}$
	128 ONU	3,28	0,0005

Şekil 3.48'de EDFA kullanılmayan ve 980 nm EDFA kullanımı ile gerçekleştirilen TWDM PON yapısının Q değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde 980 nm EDFA kullanımının EDFA kullanılmayan yapıya oranla çok daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir.



**Şekil 3.48.** Kuvvetlendiricisiz ve 980 nm EDFA katkılı TWDM PON sistemi Q değerlerinin kıyaslanması (A: 16 ONU, B: 32 ONU, C: 64 ONU, D: 128 ONU)

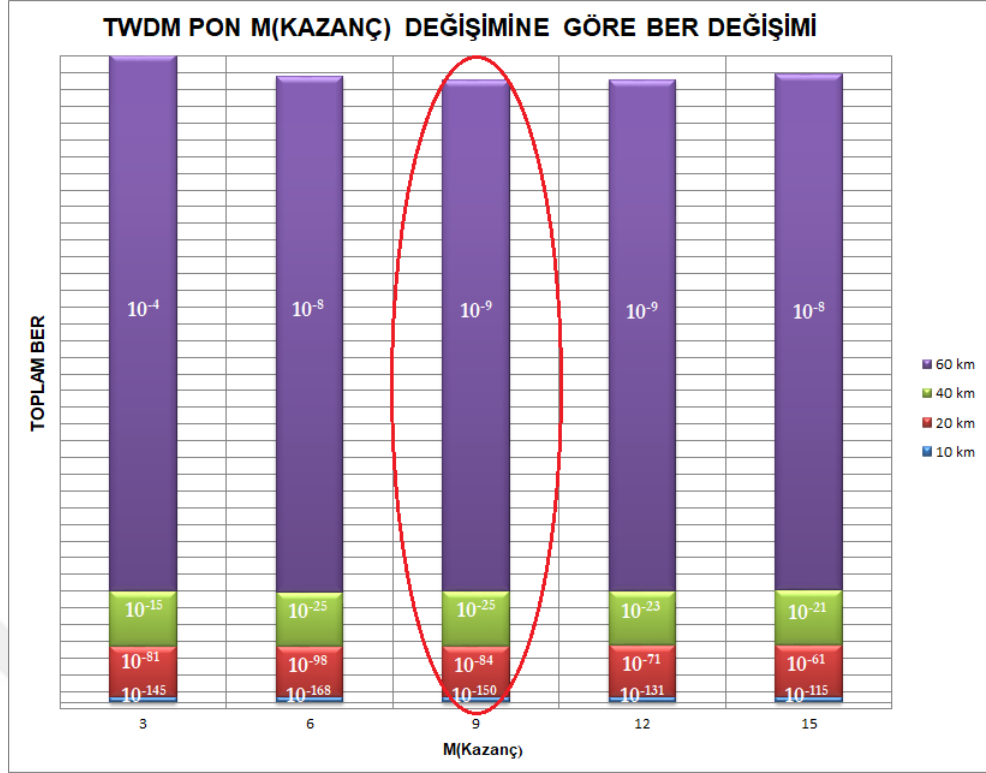
Şekil 3.49’da ise 1480 nm ve 980 nm EDFA kullanımıyla performans değerleri belirlenen TWDM PON yapılarının birbirleriyle kıyaslandığı grafikler görülmektedir. Bu grafiklerde 980 nm EDFA kullanılarak çıkışı güçlendirilen pasif optik ağın daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Şekil 3.49’daki grafikler incelendiğinde 980 nm EDFA ile kuvvetlendirilmiş modelin 1480 nm kullanılan modele göre her ONU sayısında ve her mesafede daha iyi Q değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu üstünlükte en dikkat çeken nokta ise, 980 nm EDFA ile güçlendirme yapılarak 60 km mesafede 64 onu ile iletim sağlanmış olmasıdır. 1480 nm EDFA ile 64 ONU ve 60 km mesafede iletim sağlanamamış ve 32 ONU ile sınırlı kalmıştır. Bu değerlere göre 980 nm EDFA kullanımı, 1480 nm EDFA kullanımına oranla pasif optik ağda daha üstün ve daha kararlı değerlerin ölçülmesini sağlamıştır.



Şekil 3.49. 1480 nm ve 980 nm EDFA katkılı TWDM PON sistemi Q değerlerinin kıyaslanması (A: 16 ONU, B: 32 ONU, C: 64 ONU, D: 128 ONU)

### 3.3.3. ONU alıcı kısmı parametrelerinin belirlenmesi ve nihai ölçümler

980 nm EDFA kullanımının daha verimli olduğunun tespitinin ardından, ONU alıcı ünite de TWDM PON yapısında bulunan ingaas APD'nin kazancı belirlenmiştir. Bu bölümde, M parametreleri 3'ten 15'e kadar eşit aralıklı değerlerle değiştirilerek son tasarım parametreleri elde edilmiştir [42]. Ölçümler 128 ONU'da alınmıştır. Şekil 3.50'de TWDM PON'da 128 ONU ve 10, 20, 40 ve 60 km mesafelerdeki farklı M değerleri ile her bir M parametresi için toplam Q değerleri grafiksel olarak analiz edilmiştir.

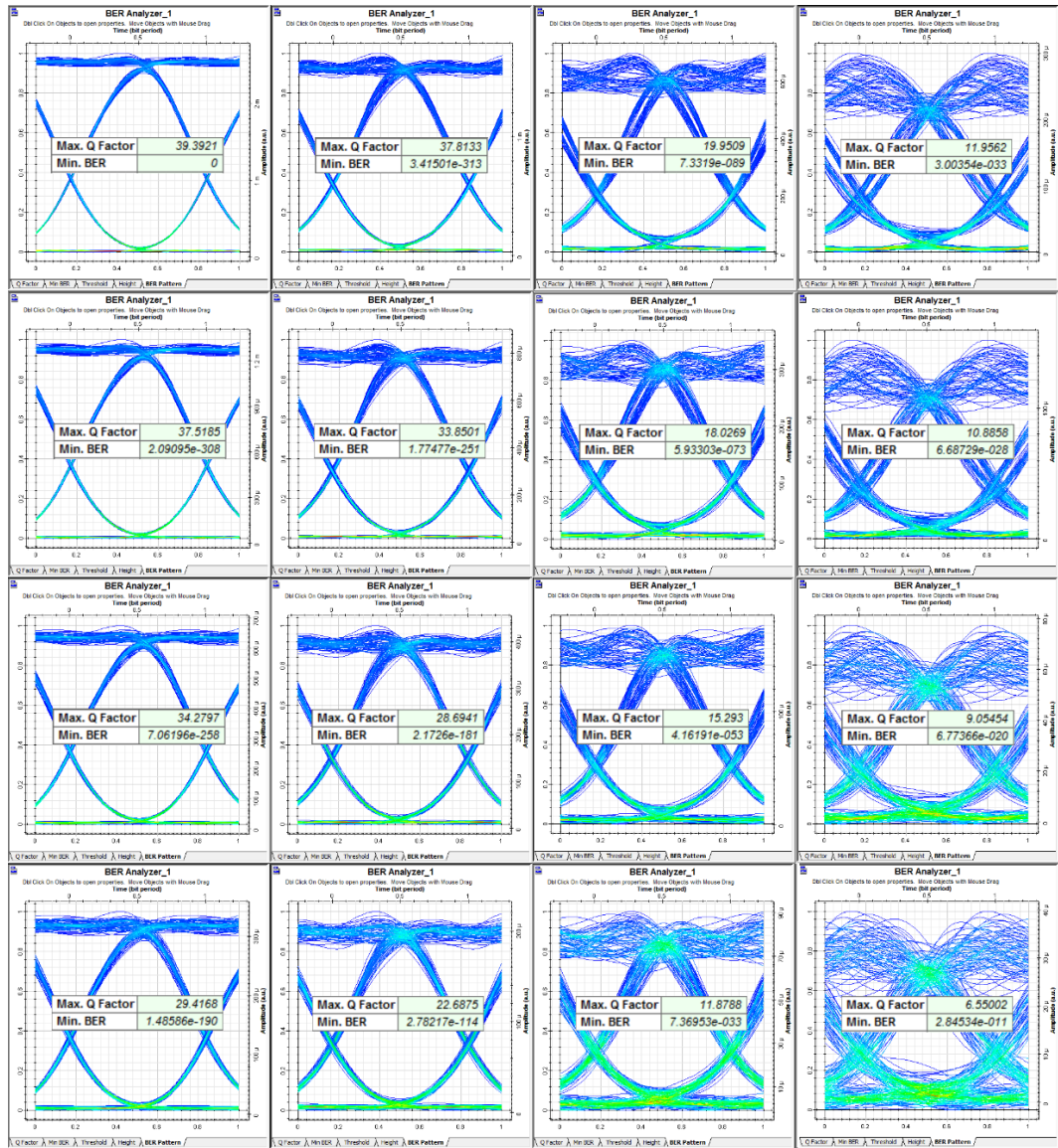


**Şekil 3.50.** TWDM PON farklı M parametrelerinin, aşağıyön ayrı ayrı ve toplam BER değeri değişimlerine etkisi (128 ONU; 10,20,40, 60 km)

Şekil 3.50'deki grafik incelendiğinde, M değerleri 9 ve 12 alınarak, 60 km mesafeli ağda aşağıyönde BER minimum değeri olan  $10^{-9}$  değerini aldığı görülmüştür. M = 9 ve M = 12 karşılaştırıldığında ise, 60 km'lik mesafede ikisinin de veri iletimi sağlayabildiği ancak 60 km'den daha düşük mesafelerde ise M = 9 değerinin daha iyi BER sonuçları verdiği görülmektedir. M'nin daha yüksek ve daha düşük değerlerinde, BER daha yüksek değerlere sahiptir. Elde edilen bu değerlerden dolayı bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen TWDM PON da ONU alıcı kısmı M değerinin yüksek performans elde edilen değer olan 9 olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı TWDM PON ağının son hesaplamalarında M = 9 olarak alınmış ve son değerler buna göre hesaplanmıştır [43-45].

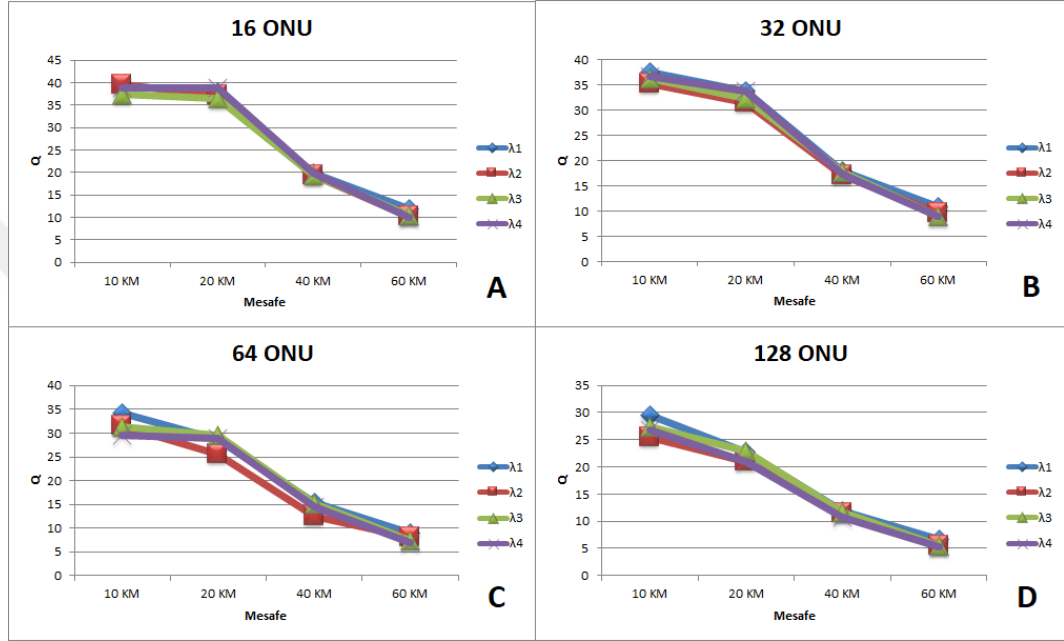
Şekil 3.51, bu çalışmada oluşturduğumuz TWDM PON'un nihai tasarımı neticesinde elde edilen simülasyon sonuçlarını göstermektedir. TWDM PON'un nihai tasarımında, verici kısım 980 nm, 100 mW ve çift yönlü pompalama EDFA ile kuvvetlendirilmiş, alıcı bölümünde tepkisellik değerinin 0,835 A/W olduğu ingaas APD kullanılmış ve M değeri 9 olarak alınmıştır. Fotodiyot iyonizasyon değeri ise 0,45 alınarak ölçümler tamamlanmıştır. Şekil 3.51'deki diyagramlar incelendiğinde, 128 ONU'ya kadar 60 km

kullanılmasının sağlıklı veri iletimi sağlayabildiği görülmüştür. Şekil 3.51'deki diyagram ve verilerden, 128 ONU ve 60 km mesafede BER değerinin  $10^{-9}$  olduğu görülmekte olup bu değer sağlıklı veri iletimi için sınır değerdir. Bu değerler baz alınarak, bu çalışmada TWDM PON mimarisinin 128 ONU ve 60 km mesafeli yapısında veri aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında yapılan EDFA ve fotodiyot optimizasyonları sonucunda OLT ile ONU arasında toplam 41 dBm güç bütçesi elde edilmiştir. Böylece 41 dBm bütçe sınırları dahilinde, kullanıcı sayısı 256, 512, 1024 vb. şeklinde artırılabilir. Örneğin gerçekleştirdiğimiz bu TWDM PON yapısı ile en fazla 10 km mesafede toplam 4096 kullanıcıya veri transferi sağlanabilmektedir [46-54].



**Şekil 3.51.** Nihai TWDM PON tasarımı aşağıyön göz diyagramları (Yukarıdan aşağıya 16, 32, 64, 128 kullanıcı; soldan sağa 10, 20, 40, 60 km)

Şekil 3.52’de ise TWDM PON aşağıyön veri iletimi gerçekleşen 4 ayrı dalgaboyunun mesafeye göre Q değerleri değişimlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Grafikler incelendiğinde farklı dalgaboylarındaki veri iletimlerinin mesafe ve Q değerlerinin birbirleriyle paralel olarak değiştiği görülmüştür.



**Şekil 3.52.** Nihai TWDM PON tasarımı aşağıyön Q değerleri değişimi (A:16 ONU, B:32 ONU, C:64 ONU, D:128 ONU; λ1: 1596 nm, λ2:1598 nm, λ3: 1600 nm, λ4:1602 nm)



## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

GPON, XG-PON ve TWDM PON sistemleri üzerinde yapılan bu çalışma sonucunda XG-PON ve TWDM PON sistemlerinin performans değerlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Performans değerlerinin iyileştirilmesi için mevcut pasif optik ağlara entegre edilebilen, 980 nm ve 1480 nm dalgaboyunda pompalama ile optik sinyali kuvvetlendiren EDFA sistemleri kullanılmıştır. Bu sistemler kullanılarak çeşitli bulgular elde edilmiş olup EDFA kullanımı ile XG-PON ve TWDM PON sistemlerinin veri iletim kapasitelerinde iyileştirmeler sağlandığı görülmüştür. Sonuçlardan elde edilen verilere göre XG-PON'da 980 nm dalgaboyunda 100mW gücünde ve 2 m EDF uzunluğunda çift yönlü pompalama yöntemi en iyi performansı vermiştir.

Benzer şekilde TWDM PON da ise WDM multiplexer çıkışına bağlanan, 980 nm dalgaboyunda, 100mW gücünde ve 5 m EDF uzunluğunda çift yönlü pompalama kullanılan kuvvetlendirme yöntemi, performansı en yüksek tasarım olmuştur.

Sonraki aşamada XG-PON ve TWDM PON nihai tasarım parametrelerinin belirlenmesi için ONU üzerinde fotodiyot parametrelerindeki değişkenlerin optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu tez çalışmasında baz alınan temel GPON devresinin ONU alıcı kısmında tepkisellik değeri olan 0,835 A/W, bu çalışmada da aynı değerde alınmıştır. Daha sonra çarpanlı tepkisellik değeri hesaplanmış ve yapılan ölçüm ve elde edilen değerler sonucunda M değeri 9 olarak hesaplanmıştır. Bundan dolayı XG-PON ve TWDM PON'un her ikisi için de çarpanlı tepkisellik değeri,  $9 \times 0,835 = 7,515$  A/W'dır. Tepkisellik değeri belirlendikten sonra alıcı tarafındaki fotodiyot iyonizasyon değeri 0,45 alınarak son ölçümler yapılmış ve göz diyagramları ile Q ve BER değerleri şekiller üzerinde belirtilmiştir.

Bu çalışmada temel amaç olarak GPON parametreleri kullanımı ile daha yüksek band genişliklerinde veri iletimi sağlayan pasif optik ağlardaki sınır değerlerin tespiti ve sonrasında elde edilen bu değerlerin hem OLT tarafında verici sinyalinin kuvvetlendirilmesi hem de ONU tarafında alıcı sinyaldeki hassasiyet ve diğer

parametrelerin optimize edilmesi olmuştur. Uygulanan metodlar ile mevcut GPON parametrelerinden yola çıkılarak elde edilen optik değerlerin çok daha iyi noktalara getirilmesiyle hem XG-PON hem de TWDM PON yapılarında özellikle pasif optik ağ ve bu ağdaki güç parametrelerinin standartlaşması adına katkıda bulunulması bu tez çalışmasındaki en temel amaçlardandır.

Pasif optik ağlar üzerinde yaptığımız bu çalışma sonucunda ağdaki iletim mesafesi, bölünme oranı, OLT çıkış gücü, ONU alıcı hassasiyeti ve diğer ONU parametreleri göz önünde bulundurularak bir yandan bu parametrelerle pasif optik ağ değerlerinde farklı şekillerde iyileştirme sağlanırken diğer yandan da hangi yöntemde gürültünün daha az etkili olduğu incelenmiştir. Gürültü sonucunda doğal olarak sinyalde bozulmalar meydana gelebilmektedir bu durumun bir neticesi olarak iletim kalitesinde ciddi miktarda düşüş olmaktadır. Bu çalışmada gürültünün az olduğu uygulamalar ve yöntemler incelenip tercih edildiğinden gürültünün neden olduğu bozulmaların da daha kabul edilebilir seviyelerde olduğu sonuçlarını veren uygulamalar yapılmış ve sonuçları bu doğrultuda incelenmiştir. Bunun sonucu olarak ta pasif optik ağda, belirtilen parametrelerde en uygun tasarım elde edilmiş ve değerleri yorumlanmıştır.

Bu çalışma, mevcutta Türkiye’de henüz yeni bir sistem olarak kullanımda olan GPON sisteminin parametrelerini baz alarak daha yüksek kapasite ve band genişliklerine sahip pasif optik ağların bu değerlerdeki davranışlarını incelenmiş, elde edilen sonuçların iyileştirilmesi amacıyla yönelik yeni nesil ağların performanslarının geliştirilmesi kapsamında OLT çıkış gücünün kuvvetlendirilmesi ve ONU alıcı hassasiyetlerinin yükseltilmesine odaklanmıştır. Bu performans değerlerinin daha da arttırılması için OLT çıkış gücünün farklı yöntemlerle (raman kuvvetlendirici vb.) güçlendirilmesi üzerinde durulabilir. Aynı zamanda ONU alıcı kısmındaki elemanların malzeme yapısı ve bu malzemelerin farklı karakteristik değerleri üzerinde çalışmalar yapılabilir.

## 5.KAYNAKLAR

- [1]Pekküçük, G.,Ünverdi, N.Ö.,“Pasif Optik Ağların Analizi ve Uygulamaları” ,Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Kasım 2014.
- [2]Yıldız, M.,Turna, Ö.C., Aydın, M.A.,“Pasif Optik Ağlar ve WDM-PON Gelişimi”, Akademik Bilişim’11 - XIII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Malatya, Şubat 2011.
- [3]<https://www.elektronikhaberlesme.org/wp-content/uploads/2017/04/yerel-da%20m-%20c5%9eebekes%20n%20n-tanitimi-1.pdf>(Erişim Tarihi: Mart 2019)
- [4][http://www.emo.org.tr/ekler/37376228324aa3b\\_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=14](http://www.emo.org.tr/ekler/37376228324aa3b_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=14) (Erişim Tarihi: Mart 2019)
- [5]<https://searchnetworking.techtarget.com/definition/PSTN>(Erişim Tarihi: Mart 2019)
- [6]<https://www.elektronikbilimi.com/kutuphane/nedir-ne-ise-yarar/pstn-public-switched-telephone-network-genel-anahtarlamali-telefon-sebekesi>(Erişim Tarihi: Mart 2019)
- [7]<https://searchnetworking.techtarget.com/definition/DSLAM-Digital-Subscriber-Line-Access-Multiplexer>(Erişim Tarihi: Mart 2019)
- [8] <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/slug/yeni-nesil-sebekeler-ve-yeni-nesil-erisim-iktisadi-duzenleyici-incelemeler-ve-ulke-deneyimleri.pdf> (Erişim Tarihi: Haziran 2019)
- [9]<https://www.elektronikhaberlesme.org/2017/04/11/fiber-optik-kablonun-tarihcesi/> (Erişim Tarihi: Mart 2019)
- [10] <http://w3.balikesir.edu.tr/~myuksek/dersnotu/fiber.pdf>(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [11] Türk Telekom Erişim Şebekeleri 2.Faz Eğitim Dökümanı, Ankara, 2014.
- [12] Türk Telekom Erişim Şebekeleri “Fiber Optik Ek ve Terminasyon Tekniği” Eğitim Dökümanı, Ankara, 2018.
- [13] <https://a-globaltech.com/fiber-optik-kablo/>(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [14] [http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ormanamenajmani\\_93b23.pdf](http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ormanamenajmani_93b23.pdf)(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [15] Pingarron, A. A., Brennan, P. V., Corr, H., “Refraction Angle Calculation In Multilayered Ice For Wide-Beam Airborne Radar”, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium., Valencia, Spain, July2018.

- [16] Zuoxi, T., Kaina, N., "A method of calculating propagation loss of sound wave in air from an underwater sound source" IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), January 2016.
- [17] Tsitsas, N.L., Valagiannopoulos, C. A., "Mitigating Snell's-Law Reflection and Transmission With Metasurfaces of Ordinary Dielectrics", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). September 2017.
- [18] Amanatiadis, S., Kantartzis, N., "On the application of Snell's Law for refracted graphene surface plasmon polariton waves", 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS). September 2016.
- [19] <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/radio-receiver-sensitivity/signal-to-noise-ratio-s-n-snr-formula.php> (Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [20] Türk Telekom Erişim şebekeleri "FTTH Sistemleri Planlama ve Kurulum" Eğitim Dökümanı, Ankara, 2018.
- [21] Saleh Abbas, H., Gregory, M.A., 2016. The next generation of passive optical networks: A review", Journal of Network and Computer Applications. 67(C), 53-74.
- [22] Turna, Ö.C., Aydın, M. A., Zaim, A. H., "Pasif Optik Erişim Ağlarının Gelişimi", Akademik Bilişim'09 - XI. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, şanlıurfa, şubat 2009.
- [23] International Telecommunication Union, "Series G: Transmission Systems And Media, Digital Systems And Networks", 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON), 2017.
- [24] Hoccođlu, S., Yücel, M., 2017. FTTH ağlarda performans analizi. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 10(1), 79-88.
- [25] <https://fccid.io/ANATEL/00309-08-03892/Manual/BA33DBE7-B015-4CCC-9BBC-A3C4F922C6E7> (Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [26] Preet, S., Dewra, S., 2015. Performance analysis of gigabit passive optical network using 2Gbit/Sec downstream transmission, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 4(2), 743-748.
- [27] Saleh, A. Y., Karlık, S. E., 2018. Four-wave mixing impacts on the uplink performance of dense wavelength division multiplexing gigabit passive optical networks. Uludađ University Journal of The Faculty of Engineering, 23(1), 189-203.
- [28] Batagelj, B., Erzen, V., Tratnik, J., Naglic, L., "Optical Access Network Migration from GPON to XG-PON", The Third International Conference on Access Networks, 62-67, January 2012.
- [29] Effenberger, F. J., Mukai, H., Kani, J., Wiech, M. R., 2009. Next-generation PON-Part III: System specifications for XG-PON, IEEE. 43(11), 58-64.

- [30] <http://www.baudcom.com.cn/blog/time-division-multiplexing>(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [31] [https://www.researchgate.net/figure/Upstream-and-downstream-wavelength-plan-for-XG-PON-10-GE-PON-GPON-and-1-GE-PON\\_fig3\\_230743763](https://www.researchgate.net/figure/Upstream-and-downstream-wavelength-plan-for-XG-PON-10-GE-PON-GPON-and-1-GE-PON_fig3_230743763)(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [32] Eržen, V., Batagelj, B., 2012. NG-PON1: Technology presentation, implementation in practice and coexistence with the GPON system, NG-PON1: Technology Presentation, Implementation In Practice And Coexistence With The GPON, 79(3), 117-122.
- [33] Asaka, K., Kani, J. I., 2015. Standardization Trends for Next-Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2). Global Standardization Activities, NTT Technical Review. 13(3), 1-5.
- [34] Salleh, M.S., Supaat, A.S.M., Idrus, S.M., Yaakob, S., Yusof, Z. M., 2014. Flexible broadcasting and multicasting in  $4 \lambda \times 10$  Gb/s AOPR TWDM-PON system. International Journal for Light and Electron Optics, 125(23), 7030-7033.
- [35] Zhang, X., Zhang, C., Zhu, M., Chen, C., Jin, W., Qiu, K., 2018. Power budget of 25-Gb/s digital orthogonal filter multiple access PONs with 10G-class optics. Optics Communications, 434, 196-202.
- [36] Yi, L., Li, Z., Bi, M., Wei, W. and Hu, W., 2013. Symmetric 40-Gb/s TWDM-PON with 39-dB power budget. IEEE Photonics Technology Letters, 25(7), 644-647.
- [37] Cheng, N., Gao, J., Xu, C., Gao, B., Liu, D., Wang, L., Wu, X., Zhou, X., Lin, H. and Effenberger, F., 2014. Flexible TWDM PON system with pluggable optical transceiver modules. Optical Society Of America, 22(2), 2078-2091.
- [38] Müllerová, J., Korček, D., Dado, M., "On Wavelength Blocking for XG-PON Coexistence with GPON and WDM-PON Networks", Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference. July 2012.
- [39] Kimukin, İ., "High Speed And High Efficiency Infrared Photodetectors", Doktora Tezi, Bilkent Üniversitesi, Fen Bilimleri ve Mühendislik Enstitüsü, 2004.
- [40] <https://www.viavisolutions.com/ru-ru/literature/there-need-1490-nm-testin-pons-white-paper-en.pdf>(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [41] Çokrak, A. C., Altuncu, A., 2004. Gain and noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFA)", Journal Of Electrical & Electronics Engineering, İstanbul Üniversitesi. 4(2), 1111-1122.
- [42] [https://www.sonoma.edu/users/r/rahimi/courses/es485\\_opto/resources/KasapPP5\\_02.pptx](https://www.sonoma.edu/users/r/rahimi/courses/es485_opto/resources/KasapPP5_02.pptx)(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [43] Xiao, Z., Yi, L., Xue, L. and Hu, W., 2018. Single-fiber bi-directional burst-mode EDFA for TWDM-PON", IEEE Photonics Journal. 10(6), 7908206

- [44] Pasquale, F. D., Grasso, G., Meli, F., Sacchi, G. and Turolla, S. “23 dBm Output Power Er/Yb Co-doped Fiber Amplifier for WDM Signals in the 1575–1605 nm Wavelength Region”, Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, 1999.
- [45] Pekküçük, G., Uzar, İ., Ünverdi, N. Ö., “Optik Kuvvetlendiriciler ve Uygulamaları”, Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Kasım 2014.
- [46] Mahad, F. D. B., Supa’at, A. S. B. M., 2009. EDFA Gain Optimization for WDM System. *Elektrika*. 11(1), 34-37.
- [47] [http://www.emo.org.tr/ekler/22587e7d4155faa\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/22587e7d4155faa_ek.pdf)(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [48][http://www.yimi.com.tr/wp-content/uploads/2018/03/OY\\_Sunu1.pdf](http://www.yimi.com.tr/wp-content/uploads/2018/03/OY_Sunu1.pdf)(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [49] Horvath, T., Fujdiak, R., Cucka, M., Misurec, J.,2014. Using miller’s code in NG-PON2 networks”, *elektrorevue*. 5(2), 20-25.
- [50] Bindhaiq, S., Zulkifli, N., Supa’at, A. S. M., Idrus, S. M., Salleh, M. S., 2018. Power budget improvement of symmetric 40 Gb/s TWDM based PON2 system utilizing DMLs and DCF technique. *Optics Communications*, 407, 153-164.
- [51] Bindhaiq, S., Zulkifli, N., Supa’at, A. M.,2016. The transmission of symmetric 40 Gb/s TWDM-based NG-PON2 utilizing delay interferometer (DI) for RSOA bandwidth enhancement, *Optical Fiber Technology*. 30, 65-71.
- [52] Kocher, D., Kaler, R. S., Randhawa, R., 2013.50 km bidirectional FTTH transmission comparing different PON standards.*International Journal for Light and Electron Optics*, 124(21), 5075-5078.
- [53][http://www.excelitas.com/downloads/app\\_avalanchephotodiodesusersguide.pdf](http://www.excelitas.com/downloads/app_avalanchephotodiodesusersguide.pdf)(Erişim Tarihi: Nisan 2019)
- [54] Laird, J. S., Hirao, T., Onoda, S., Ohyama, H. and Kamiya, T., 2003. Heavy-ion induced single-event transients in high-speed InP-InGaAsavalanche photodiodes”, *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 50(6), 2225-2232.
- [55][http://lightspeedt.com/wp-content/uploads/2018/06/Nokia\\_7360\\_Data\\_Sheet\\_EN.pdf](http://lightspeedt.com/wp-content/uploads/2018/06/Nokia_7360_Data_Sheet_EN.pdf)(Erişim Tarihi: Nisan 2019)

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı:** Sezai BİLİCİ

**Doğum Yeri:** Gaziantep

**Doğum Tarihi:** 13.04.1985

**E posta:** sezaibilici@gmail.com

**Yabancı Dili:** İngilizce

### **Eğitim Durumu:**

**Lisans:** Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
2005-2010, Kayseri

### **Mesleki Tecrübeler:**

Merinos Halı ve Tekstil A.Ş., Polipropilen İplik Bakım ve Onarım Mühendisi, 2011 -  
2012, Gaziantep

Türk Telekomünikasyon A.Ş. Gaziantep İl Müdürlüğü, Fiber Optik Ekip Lideri, 2012 -  
..., Gaziantep

### **Yayın ve/veya Bildirileri:**

1. İsadet 2019, Farsakoğlu, Ö. F, Bilici, S, “*In Fiberoptical Systems At The Level Of 2.5 and 10 Gbps Passive Optical Networks And Its Applications*” Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 2 Mayıs 2019.