



**İLETİŞİM KALİTESİNİN ARTTIRILMASI İÇİN UZUN MESAFELİ FİBER
OPTİK AĞLARIN KARAKTERİZASYONU**

Ayşe Seda İZİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLİŞİM SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2021

Ayşe Seda İZİN tarafından hazırlanan “İLETİŞİM KALİTESİNİN ARTTIRILMASI İÇİN UZUN MESAFELİ FİBER OPTİK AĞLARIN KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Bilişim Sistemleri Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat YÜCEL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mahir DURSUN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 13/09/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Aslıhan TÜFEKÇİ

Bilişim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

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

Ayşe Seda İZİN

13/09/2021

İLETİŞİM KALİTESİNİN ARTTIRILMASI İÇİN UZUN MESAFELİ FİBER OPTİK AĞLARIN KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Ayşe Seda İZİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Haberleşme teknolojisinde verinin hızlı ve eksiksiz olarak iletimi çok önemlidir. Artan veri iletimi ihtiyacı ve artan kullanıcı sayısı ile orantılı olacak şekilde kapasitesi artırılmış sistemler kullanılması gerekmektedir. Bu beklentilerin karşılanması için haberleşme teknolojisinde büyük oranda fiber optik iletişim sistemleri kullanılmaktadır. Fiber optik ağlar; yüksek bant genişliği, yüksek veri hızları ve çok uzak mesafelere kadar iletim kapasitesi ile en çok tercih edilen sistemler olmuşlardır. Fiber optik iletişim sistemlerinde modülasyon formatı, iletim mesafesi, veri hızı, modülatör seçimi, kanal sayısı gibi özelliklerin seçimi sistemin kapasitesi açısından oldukça kritiktir. Bir fiber optik iletişim sistemi tasarlanırken ilk olarak, elektrik sinyalinin optik sinyale nasıl dönüştürüleceğine karar verilir. Yarıiletken lazer gibi bir optik kaynağa elektrik sinyali uygulayarak doğrudan modüle edilebilir. Ya da yarıiletken lazer harici bir modülatöre bağlanabilir. Bu çalışmada; oluşturulan sistemde; 40 Gb/s için 16 kanal ve optik iletişimde birden çok ışık dalgaboyu kullanılarak aynı fiber üzerinden veri gönderimini sağlayan dalgaboyu bölmeli çoğullama (DBÇ) kullanılmış ve sinyal 300 km uzunluğunda tek modlu fiber (TMF) üzerinden gönderilmiştir. Sonrasında tasarımın alt elemanları incelenip, simülasyon ortamında iletim kalitesi; veri modülasyon tekniği, fiber uzunluğu, veri hızı ve iletilen kanal sayısı yönünden incelenerek kıyaslanmıştır. Sonuç olarak; sistemde modülasyon yöntemi olarak sıfıra dönmeyen (NRZ) modülasyonun, modülatör olarak Mach-Zehnder modülatörün tercih edilmesi, iletim mesafesinin azalmasının, kanal sayısının artmasının, veri hızının azalmasının iletişimi daha kaliteli hale getirdiği gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 90532
Anahtar Kelimeler : Fiber optik, WDM, Modülasyon, Karakterizasyon, İletim Hattı Kalitesi
Sayfa Adedi : 76
Danışman : Prof. Dr. Murat YÜCEL

CHARACTERIZATION OF LONG-DISTANCE FIBER OPTIC NETWORKS TO IMPROVE COMMUNICATION QUALITY

(M. Sc. Thesis)

Ayşe Seda İZİN

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF INFORMATICS

September 2021

ABSTRACT

Fast and complete transmission of data is very important in communication technology. It is necessary to use systems with increased capacity in proportion to the increasing need for data transmission and the increasing number of users. In order to meet these expectations, fiber optic communication systems are widely used in communication technology. fiber optic networks; They have become the most preferred systems with their high bandwidth, high data rates and transmission capacity up to very long distances. In fiber optic communication systems, the selection of features such as modulation format, transmission distance, data rate, modulator selection, number of channels is very critical in terms of the capacity of the system. When designing a fiber optic communication system, it is first decided how to convert the electrical signal to an optical signal. It can be directly modulated by applying an electrical signal to an optical source such as a semiconductor laser. Or the semiconductor laser can be connected to an external modulator. In this study; in the created system; For 40 Gb/s, 16 channels and wavelength division multiplexing (DBÇ), which provides data transmission over the same fiber by using multiple light wavelengths in optical communication, was used and the signal was sent over a 300 km long single mode fiber (TMF). Afterwards, the sub-elements of the design are examined and the transmission quality in the simulation environment; The modulation formats were compared in terms of the modulator used, transmission distance, data rate and number of channels. As a result; In the system, it has been observed that non-zero (NRZ) modulation is preferred as the modulation method, Mach-Zehnder modulator is preferred as the modulator, the decrease in the transmission distance, the increase in the number of channels, and the decrease in the data rate make the communication better quality.

Science Code : 90532

Key Words : Fiber, Optical, WDM, Modulation, Characterization, Transmission Line Quality

Page Number : 76

Supervisor : Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli yardım, destek ve katkılarıyla beni yönlendiren çok saygıdeğer değerli Hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL'e desteklerinden ötürü aileme, eşime, canım oğluma teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KAVRAMLAR.....	5
2.1. İletişim Sistemleri.....	5
2.2. İletişimin Tarihsel Gelişimi.....	6
2.2.1. Bilgisayar ağları gelişimi.....	6
2.2.2. Uydu iletim sistemleri gelişimi.....	7
2.2.3. Fiber optik iletişim sistemleri gelişimi.....	7
2.3. Veri İletim Ortamları.....	8
2.3.1. Çift bükümlü kablo.....	9
2.3.2. Optik fiberler.....	10
2.4. Fiber Optik İletimin Avantajları.....	10
2.5. Fiber Optik Haberleşme Blok Diyagramı.....	12
2.5.1. Optik vericiler.....	12
2.5.2. Optik modülatörler	13
2.5.3. Optik alıcılar.....	15
2.5.4. Optik dedektör.....	15

	Sayfa
2.6. Fiber Optiğin Kullanım Alanları.....	16
2.7. Fiber Kablo Yapısı.....	17
2.7.1. Fiber kablolarda kullanılan malzemeler.....	17
2.7.2. Elektromanyetik spektrum.....	18
2.7.3. Fiberde ışın yayılımı.....	19
2.7.4. Snell yasası.....	20
2.7.5. Kritik açı.....	20
2.7.6. Sayısal açıklık.....	21
2.7.7. Fresnel yansıması.....	21
2.8. Fiber Optik Kablo Çeşitleri.....	22
2.8.1. Çok modlu fiberler.....	23
2.8.2. Tek modlu fiber.....	24
2.9. Optik Sinyal İletimi Üzerindeki Etkiler.....	25
2.9.1. Bant genişliği.....	25
2.9.2. Fiber kayıplar.....	25
2.10. Fiber Optik Dispersiyon.....	30
2.10.1. Modal dispersiyon.....	30
2.10.2. Malzeme dispersiyonu.....	31
2.10.3. Dalga kılavuzu dispersiyonu.....	32
2.10.4. Polarizasyon modu dispersiyonu.....	32
2.10.5. Kromatik dispersiyon.....	32
2.10.6. Fiber optik dispersiyon kompanzasyonu.....	34
2.11. Fiber Optik Çoğullama Teknikleri.....	35
2.11.1. Optik zaman bölmeli çoğullama.....	35
2.11.2. Alt taşıyıcı çoğullama.....	36
2.11.3. Dalgaboyu bölmeli çoğullama.....	36

	Sayfa
2.11.4. Ortogonal frekans bölmeli çoğullama.....	36
2.11.5. Optik kod bölmeli çoklu erişim.....	36
3. SİSTEMİN SİMÜLASYONU VE BULGULAR.....	43
3.1. Sistemde Yer Alan Alt Elemanların İncelenmesi.....	44
3.2. Sistem İletişim Kalitesinin RZ VE NRZ Modülasyon Formatları Yönünden Karşılaştırılması.....	45
3.2.1. Sistemde NRZ modülasyon formatı kullanılarak elde edilen sonuçlar..	45
3.2.2. Sistemde RZ modülasyon formatı kullanılarak elde edilen sonuçlar...	46
3.3. Sistem İletim Kalitesinin Mach-Zehnder ve Elektrosoğurum Modülatör Kullanılması Yönünden Karşılaştırılması.....	48
3.3.1. Sistemde Mach-Zehnder modülatör kullanılarak elde edilen sonuçlar...	48
3.3.2. Sistemde Elektrosoğurum modülatör kullanılarak elde edilen sonuçlar.	50
3.4. Sistemde İletim Kalitesinin İletim Mesafesi Yönünden Karşılaştırılması.....	52
3.4.1. Sistemde 300 km iletim mesafesi için elde edilen sonuçlar.....	54
3.4.3. Sistemde 350 km iletim mesafesi için elde edilen sonuçlar.....	55
3.5. Sistemde İletim Kalitesinin İletim Hızı Yönünden Karşılaştırılması.....	58
3.5.1. Sistemde 40 Gb/s iletim hızı için elde edilen sonuçlar.....	58
3.5.2. Sistemde 20 Gb/s iletim hızı için elde edilen sonuçlar.....	59
3.5.3. Sistemde 10 Gb/s iletim hızı için elde edilen sonuçlar.....	61
3.6. Sistemde İletim Kalitesinin Kanal Sayısı Yönünden Karşılaştırılması.....	64
3.6.1. 32 kanallı sistem için elde edilen sonuçlar.....	64
3.6.2. 16 kanallı sistem için elde edilen sonuçlar.....	64
4. SONUÇ.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tipik bir haberleşme sisteminin blok diyagramı	5
Şekil 2.2.Çift Büklümlü Kablo	9
Şekil 2.3. Koaksiyel Kablo	9
Şekil 2.4. Fiber optik kablo.....	10
Şekil 2.5. Fiber Optik İletişim Blok Diyagramı.....	12
Şekil 2.6. Optik Verici Diyagramı	13
Şekil 2.7. Mach-Zehnder modülatör yapısı.....	14
Şekil 2.8. Optik Alıcı Diyagramı	15
Şekil 2.9. Elektromanyetik spektrum.....	18
Şekil 2.10. Işın yayılımı	19
Şekil 2.11. Fiberde ışığın ilerlemesi	20
Şekil 2.12. Fiber optikte sayısal açıklık gösterimi	21
Şekil 2.13. Fiber optik kablo çeşitleri blok diyagramı.....	22
Şekil 2.14. Çok modlu fiber optik gösterimi.....	23
Şekil 2.15. Çok modlu fiber aracılığıyla ışık yayılımı.....	24
Şekil 2.16. Çok modlu fiber aracılığıyla dalga yayılımı.....	24
Şekil 2.17. Tek modlu fiber gösterimi	25
Şekil 2.18. Tek modlu optik fibere ilişkin kayıp spektrumu.....	26
Şekil 2.19. Rayleigh saçınım	28
Şekil 2.20. Makro bükme yoluyla optik merkezden ışığın kırılması.....	29
Şekil 2.21. Mikro bükme yoluyla optik merkezden ışığın kırılması.....	29
Şekil 2.22. Kromatik dispersiyon.....	32
Şekil 2.23. Dalgaboyu bölmeli çoğullama gösterimi.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 2.25. Göz diyagramı yapısı.....	40
Şekil 2.26. Göz diyagramı parametreleri.....	40
Şekil 3.1. Simülasyonu yapılan fiber optik haberleşme sistemi diyagramı	43
Şekil 3.2. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	45
Şekil 3.3. Göz diyagramı ve Q faktörü	46
Şekil 3.4 Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	47
Şekil 3.5. Göz diyagramı ve Q faktörü	47
Şekil 3.6. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	49
Şekil 3.7. Göz diyagramı ve Q faktörü	50
Şekil 3.8. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	51
Şekil 3.9. Göz diyagramı ve Q faktörü	51
Şekil 3.10. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	53
Şekil 3.11. Göz diyagramı ve Q faktörü	53
Şekil 3.12. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	54
Şekil 3.13. Göz diyagramı ve Q faktörü	55
Şekil 3.14. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	56
Şekil 3.15. Göz diyagramı ve Q faktörü	57
Şekil 3.16. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	58
Şekil 3.17. Göz diyagramı ve Q faktörü	59
Şekil 3.18. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	60
Şekil 3.19. Göz diyagramı ve Q faktörü	60
Şekil 3.20. Çıkış Optik Güç Spektrumu.....	61
Şekil 3.21. Göz diyagramı ve Q faktörü	62
Şekil 3.22. Göz diyagramı ve Q faktörü	63

Şekil**Sayfa**

Şekil 3.23. Göz diyagramı ve Q faktörü	64
--	----



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Lazer dizisi frekans değerleri.....	44
Çizelge 3.2. Modülasyon formatlarına göre elde edilen sonuçlar.....	48
Çizelge 3.3. Modülatör seçimlerine göre elde edilen sonuçlar.....	52
Çizelge 3.4. İletim mesafesine göre elde edilen sonuçlar.....	57
Çizelge 3.5. İletim mesafesine göre elde edilen sonuçlar.....	62
Çizelge 3.6. Kanal sayısına göre elde edilen sonuçlar	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
c	Işığın boşluktaki hızı
dB	Desibel
Er^{3+}	Erbium
f	Frekans
Mb	Megabit
mW	Miliwatt
n	Kırılma indisi
nm	Nanometre
OH^-	Su iyonu
v	Işığın ortamdaki hızı
λ	Dalgaboyu
θ	Işının normalle açısı
α_{max}	Maksimum kabul açısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
ATÇ	Alt taşıyıcı çoğullama
BER	Bit hata oranı
ÇMF	Çok modlu fiber
DBÇ	Dalgaboyu bölmeli çoğullama
Dİ	Derece indisli
DKF	Dispersiyon kompanzasyon fiber
EA	Elektrosoğurum
EKFY	Erbium katkılı fiber yükselteç
FBI	Fiber Bragg ızgara
Kİ	Kademe indisli

NRZ	Sıfıra dönüş olmayan
OFBÇ	Ortogonal frekans bölmeli çoğullama
OKBÇE	Optik kod bölmeli çoklu erişim
OZBÇ	Optik zaman bölmeli çoğullama
PBÇ	Polarizasyon bölmeli çoğullama
PMD	Polarizasyon mod dispersiyonu
RZ	Sıfıra dönen
SA	Sayısal açıklık
TİY	Toplam İç yansıma
TMF	Tek modlu fiber
Q	Kalite değeri



1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji beraberinde ses, veri ve görüntü iletiminde olağanüstü bir artış meydana getirmiştir. Bu durumla birlikte artan hız ihtiyacı ışık hızında iletim sağlayan fiber optik iletişim sistemlerine olan ihtiyacı arttırmıştır. Fiber optik kablolarla sinyal kaybının az olması fiber optik sistemlerin daha uzun mesafelere veri iletimini sağlar. Ayrıca fiber optik kablolar çevresel etkilere karşı oldukça dayanıklı olması ile bilgi güvenliği sağlanır. Başlangıç maliyeti yüksek de olsa fiber optik sistemlerin avantajları göz önüne alındığında; bilginin en verimli, en ekonomik ve en kısa zamanda ulaşımı sağlanır. Dünyada artan daha hızlı veri iletimi ihtiyacı fiber optik iletişim sistemleri ile ilgili yeni araştırmalar yapılmasına neden olmaktadır.

Fiber optik iletişim sistemlerinde sistem elemanlarının doğru seçilmesi çok önemlidir. İlk aşamada fiber optik iletişim sistemlerinde modülasyon formatını seçimi sistemin kapasitesi açısından oldukça kritiktir. Bir optik iletişim sistem tasarlanırken ilk olarak, elektrik sinyalinin optik sinyale nasıl dönüştürüleceğine karar verilir. Modülasyon formatı ve modülatör çeşidi belirlendikten sonra, fiber optik sistemlerde kaliteli bir iletişim sağlayabilmek için iletim mesafesi, iletim hızı, dispersiyonun ne şekilde yapılacağı, iletimi sağlanacak kanal sayısı gibi sistem parametrelerinin doğru belirlenmesi çok kritiktir. Bu çalışmanın amacı; uzun mesafeli iletişim sistemlerinde fiber optik sistemler tercih edildiğinde kurulacak sistemin eleman seçimlerinin veri iletim kalitesinin nasıl etkilediğini araştırmaktır. Bu amaçla; bu çalışmada bir sistem oluşturulup, seçilen sistem elemanları için optik bir yazılım kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar kıyaslanmıştır.

Çalışmanın 1. bölümünde iletişim sistemleri tarihsel gelişimleriyle ele alınmış, 2. bölümünde fiber optik iletişim sistemleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Çalışmanın 3. bölümünde uzun mesafeli fiber optik sistemler için kaliteyi arttıracak faktörler araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan ve fiber optik sistemlerde birden çok dalga boyunu kullanarak aynı ortam üzerinden veri gönderimini sağlayan bir fiber optik iletim tekniği olan dalgaboyu bölmeli çoğullama (DBC)'nın temel özelliklerini ele aldıktan sonra, oluşturulan sistemde 40 Gb/s iletim hızı , NRZ modülasyon formatı, Mach-Zehnder modülatörü kullanılarak 16 kanal dalgaboyu çoğullama yöntemi (DBC) ile birleştirilerek

300 km uzunluğunda tek modlu fiber üzerinden sinyaller gönderilmiştir. Sistemin optik bir yazılım kullanılarak yapılan simülasyonu ile; NRZ-RZ modülasyon formatları, Mach-Zehnder ve elektrosoğurum modülatör seçimi, iletim hızı, iletim mesafesi ve kanal sayısı yönünden kullanılarak analizi yapılmıştır. Elde edilen değerler kıyaslanarak, uzun mesafeli fiber optik iletişim sistemlerinde iletim kalitesinin arttırılmasının yolları araştırılmıştır.

Literatür Çalışmaları:

1999 yılında M.I. Hayee 40 Gb / s'ye kadar veri hızlarında çalışan dalgaboyu bölmeli çoğullamalı sistemler için geri dönüşü sıfıra dönüşü olmayan ve sıfıra dönüş modülasyon formatıyla karşılaştırmıştır [1].

1999 yılında A. Royset ve arkadaşları; dengeli kablo kullanan ultra yüksek bit hızlı tek kanallı tekrarlanmayan sistemlerde verici ucunda negatif dispersiyon kullanmanın avantajını göstermişlerdir [2].

2002 yılında K.S. Cheng ve arkadaşları; 40 Gb/s'de darbeden darbeye etkileşimin, değiştirilmiş çift taraflı sıfıra dönüş modülasyon formatı veya alternatif fazlı sıfıra dönüş kullanılarak bitişik bitlerin optik fazının değiştirilmesiyle azaltılabileceğini göstermişlerdir [3].

2003 yılında Olivier Leclerc ve arkadaşları; optik amplifikatörler, ultra yüksek kapasitelere ve uzun mesafeli iletim mesafelerine sahip optik iletişim sistemleri için yeni perspektifler açtıkça, sınırlamalar sebebiyle, yayılma bozukluklarının üstesinden gelmek için, başka teknolojileri ele almışlardır [4].

2005 yılında L.S. Yan ve arkadaşları; ayarlanabilir darbe genişliği yönetimini kullanarak 10 Gb/s dalgaboyu bölmeli çoğullamalı performans optimizasyonunu göstermişlerdir [5].

2008 yılında O. Bertran-Pardo ve arkadaşları; polarizasyon bölmeli çoğullama, dalgaboyu bölmeli çoğullama ve 10 Gb/s geri dönüşsüz kanalların neden olduğu 40 Gb/s polarizasyon bölme çoğullamanın faz kaydırmalı anahtarlama üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Ayrıca, doğrusal olmayan etkilerden kaynaklanan sınırlamalara karşı taşıyıcı faz tahmin sürecini optimize etmişlerdir [6].

2010 yılında Anu Sheetal ve arkadaşları; 10 ve 40 Gb/s 'lik optik sistemleri, diferansiyel faz yönünden araştırmışlardır [7].

Yine 2010 yılında Anu Sheetal ve arkadaşları; taşıyıcı tarafından bastırılmış sıfıra dönüşlü, çift taraflı dönüş için 1,28 Tb/s'ye kadar ultra yüksek kapasiteli 40 Gb/s uzun mesafe dalga bölmeli çoğullama sisteminin simülatif analizi yapmışlar ve modülasyon formatları, giriş gücü, iletim mesafelerindeki değişimin etkisi, çeşitli formatlar için kalite değeri değeri ve göz diyagramı açısından gözlemlemişlerdir [8].

2011 yılında Rahul Chhilar ve arkadaşları; dağıtık yönetilen sıfıra dönüş sistemini, yüksek bit hızında farklı modülasyon formatları yönünden incelemişlerdir [9].

2012 yılında Lucky Sharan ve arkadaşları; ikili sıfıra dönüş modülasyon formatı ile 1.28 Tb / s'de çalışan uzun mesafeli 40 Gb/s yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama sisteminin simülasyon tabanlı bir analizini sunmuşlardır [10].

2019 yılında Cheikh Kherici dalgaboyu bölmeli çoğullama sistemini ayrıntılı olarak ele almıştır [11].

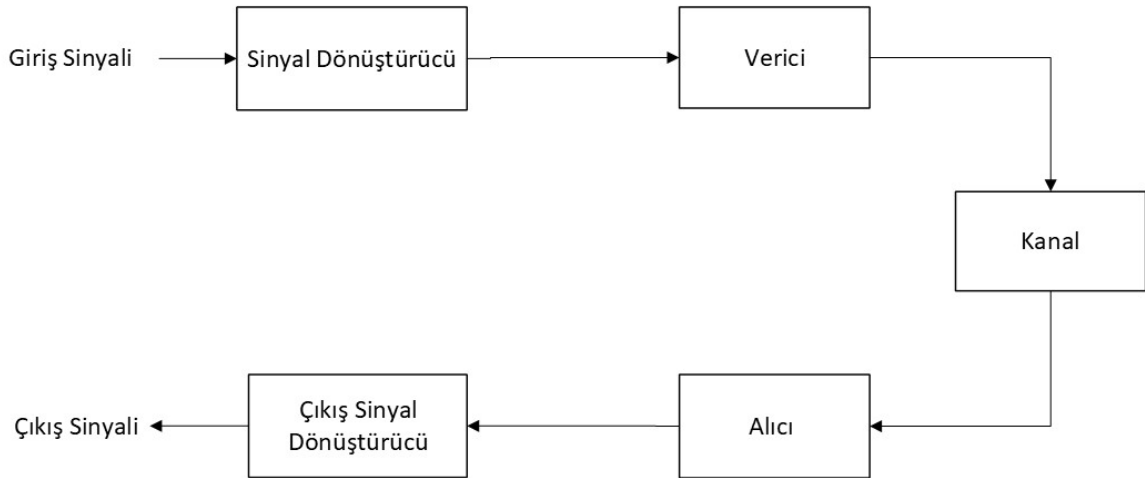


2. GENEL KAVRAMLAR

2.1. İletişim Sistemleri

Genel olarak iletişim; bilginin bir yerden başka bir yere aktarılması olarak tanımlanır. Bilginin bu şekilde bir mesafeden başka bir mesafeye iletilmesi ise bir sistem gerektirir. Bu sistem iletişim sistemidir. İletişim sisteminde; bilgi; bilgi sinyali için taşıyıcı görevi gören bir elektromanyetik dalga üzerine bindirilir veya modüle edilir. Modüle edilen bilgi daha sonra, demodülasyon ile orijinal bilgiye dönüştürülüp, gerekli hedefe iletilir [12].

Genel olarak, bir iletişim sistemi Şekil 2.1'de gösterilen blok diyagramı ile temsil edilir. Kaynak tarafından üretilen bilgiler; ses, resim veya belirli bir dilde düz bir metin olabilir. Bir kaynaktan çıkan bilginin iletme uygun bir sinyale dönüştürülebilmesi için dönüştürücü kullanılır. Bilginin gönderildiği hedefte; alınan elektrik sinyallerinin kullanıcı için uygun bir biçime dönüştürülmesi için benzer bir dönüştürücü gereklidir [13].



Şekil 2.1. Tipik bir haberleşme sisteminin blok diyagramı

Bir iletişim sistemi ara ve temel bileşenlerden oluşur. Ara bileşenler; haber (bilgi) kaynağı, giriş dönüştürücüsü, çıkış dönüştürücüsüdür. Temel bileşenler; verici, haberleşme kanalı, alıcıdır [14].

2.2. İletişimin Tarihsel Gelişimi

İletişimin tarihsel gelişimine baktığımızda önemli gelişmelerden ilk olarak karşımıza, Samuel Morse'un 1835'te geliştirdiği elektromıknatıslı telgraf çıkar [4]. Sonrasında Graham Bell telgrafi geliştirmeye çalışmaya başlaması ile birlikte; ses ve notaların aynı anda farklı perdelerden iletilmesi fikri ile ortaya harmonik telgrafi çıkmıştır. 1875 yılında Thomas Watson ile yaptığı çalışmalar sonucunda Graham Bell, farklı ses tonlarının elektrik akımını değiştirebildiğini ve dalgalanmaların ortaya çıktığını fark etmiştir. Böylece ardı ardına gelen çalışmalarla 1876'da telefonun patentinin alınması ile birlikte 1877'de ilk telefon hattı çekilmiştir [16].

Akademisyen Reginald Fessenden, 1906'da ilk radyo yayını yapınca önemli bir adım daha atılmıştır. Neredeyse tüm radyo alıcılarında bulunan radyo alıcısı 1918'de Edwin H. Armstrong tarafından icat edilmiştir [15].

İnsanlığın uzakları görme hayali de İskoç asıllı John Logie Baird'in 1924 yılında ilk görüntü iletimini yapan televizyonun icadı ile gerçekleşmiştir [17]. 1948'de John Bardeen ve Walter Brattain transistörü keşfetmişler, transistörün icadı ile anahtarlama ve dijital iletişime geçilmesi kolaylaşmıştır. [18].

2.2.1. Bilgisayar ağları gelişimi

En basit tanımıyla bilgisayar ağları, belirlenen kurallara uymak koşuluyla verinin bir iletim ortamında iletilmesidir. Tarihte bilinen en eski bilgisayar ağı ARPANET in fikri, 1961'de Leonard Kleinrock tarafından önerilmiştir. 1965'te paket terimi Donald Davies tarafından bir ağ üzerinden bilgisayarlar arasında gönderilen verileri tanımlamak için kullanılmıştır. Sonrasında önemli bir gelişme meydana gelmiş ve ilk e-posta Ray Tomlinson tarafından 1971'de gönderilmiştir.

Fakat internet için dönüm noktası, 1990 yılında Tim Berners-Lee'nin dünya çapında ağ (www) adını verdiği internet ara yüzü yazılımı ortaya koymasıyla meydana gelmiştir. İki yıl içinde, www dünya çapında bir popülerlik kazanmıştır [15].

Sonrasında meydana gelen gelişmeler ile birlikte telefon uyumlu hatlar ile daha fazla veri taşıyan hatlar bağlanmış, bu durum bilgisayar ağlarının erişimini ve kapsamını genişletmiştir [19].

2.2.2. Uydu iletim sistemleri gelişimi

Uydu iletimi iki veya daha fazla iletişim noktasının birbiriyle bağlantı kurmasını sağlamak için yapılır. Uydu iletim sistemi fikri, 1945'te Arthur C. Clarke tarafından ortaya atılmıştır. 1957'de Sputnik-1 ve Sputnik-2 uzaya gönderilen ilk uydular olmuşlardır [20].

2.2.3. Fiber optik iletişim sistemleri gelişimi

Bir iletişim sisteminde bilgi ister kısa mesafeler ister okyanus ötesi mesafeler olsun bir yerden başka bir yere iletilir. Fiber optik iletişim sistemleri, bilgi aktarımı için optik fiberleri kullanan ışık dalgası sistemleridir. Optik iletişim sistemi, elektromanyetik spektrumun görünür veya yakın kızılötesi bölgesinde yüksek taşıyıcı frekansları kullanır [21].

Antik çağlara kadar döndüğümüzde ışığın haberleşme amacıyla kullanıldığını görürüz. Birçok medeniyette, bilgiyi iletmek amacıyla aynalar, ateş fenerleri veya duman sinyalleri kullanmıştır. Benzer yöntemler on sekizinci yüzyılın sonuna kadar sinyal lambaları, bayraklar ve diğer cihazlar aracılığıyla kullanılmıştır. Hızlı ve uzun mesafe haberleşmede en önemli yenilik ise, Fransız rahip ve bilim adamı Claude Chappe 'nin 1792' de uzaktan duyma ve görme esasına dayalı optik telgrafi icadıyla olmuştur [22].

İlk optik telgraf 1794'te yaklaşık 200 km'lik mesafede hizmete girmiştir. 1830'a kadar ise ağ tüm Avrupa'ya yayılmıştır. Sonrasında telgraf ve telefonun icadı ile dünya çapında yaşanan gelişmeler ile pek çok yenilik ortaya çıkmıştır. Telefon ağlarında ilk olarak koaksiyel kablolar kullanılmaya başlanmıştır. Böylece sistem kapasitesi arttırılmıştır. Ancak koaksiyel kablolarla oluşturulan bu sistemler belli bant genişliğinin üzerindeki frekanslarda oluşan kablo kayıpları nedeniyle sistemi sınırlandırdığından, yeni sistemlerin geliştirilmesine gereksinim duyulmuştur.

Böylece 1948’de ilk mikrodalga sistem geliştirilmiştir. Bu tarihten itibaren hem koaksiyel hem de mikrodalga sistemlerde önemli gelişmeler yaşanmıştır. En gelişmiş koaksiyel sistem 1975 yılında hizmete girmiş ve 274 Mb/s bit hızında çalıştırılmıştır. Ancak bu tür yüksek hızlı koaksiyel sistemlerde tekrarlayıcı aralıkların (~ 1 km) sistemi daha pahalı hale getirmesi, sistemin dezavantajı olmuştur. Mikrodalga iletişim sistemleri ise daha büyük bir tekrarlayıcı aralığına izin vermiş, ancak bit hızları da bu tür dalgaların taşıyıcı frekansı ile sınırlanmıştır [23].

Yirminci yüzyılın ikinci yarısında, taşıyıcı olarak optik dalgaların kullanılması halinde, sistemde büyük bir gelişme yaşanacağı anlaşılmış ancak bu tarihlerde ne optik bir kaynak ne de aktarım için bir ortam olmaması problem olmuştur. 1960’da lazerin icadı ile optik kaynak olmaması problemi çözülmüştür. 1966 yılına gelindiğinde Charles Kao cam fiberin ışık kılavuzu olarak kullanılabileceği ispatlamıştır.

1970’lerin ortalarına gelindiğinde, fiber optik haberleşme sistemleri pek çok ülkede kurulmaya başlanmıştır. 1983’te tek modlu fiber kablo üretilmiştir. 1987 yılında optik fiberlerdeki zayıflama 0.20 dB/km değerine kadar düşürülmüştür. 1990 yılında, aynı fiber kablo üzerinden birden fazla dalgaboyuna sahip sinyalin iletimi sağlanmıştır. 1997’de, 40 Gb/s’lik hızla 300 km’lik fiber üretilmiş, 2000 yıllarında ise tek fiber üzerinden Tbit/s iletim hızlarına ulaşılmıştır [24].

Günümüzde artan veri iletimi ihtiyacı ile fiber optik teknolojisi telekom ve yerel alan ağlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat fiber optik teknolojisi telekom ve yerel alan ağlarının yanı sıra; havacılık, otomotiv sektörü, güvenlik ve zayıf akım sistemleri gibi pek çok sistemde yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir [24].

2.3. Veri İletim Ortamları

Veri iletiminin gerçekleşmesi için, iletim kanalı vasıtasıyla cihazların birbirine bağlanması gerekir. Veri iletim ortamı fiziksel bir ortamdır ve bu ortamlar bakır tel, optik kablo ve hava olabilir. Veri; veri iletim ortamında elektromanyetik dalgalar, elektrik, ışık ve hatta akustik dalgalar şeklinde taşınabilir [25].

2.3.1. Çift bükümlü kablo

Elektrik akımını taşımak için kullanılan kablolar iki kısımdan meydana gelir; iletken ve yalıtkan kısım. Çift bükümlü kablo birbiri etrafında bükülmüş bir veya daha fazla çift yalıtımlı bakır telden oluşur. Elektromanyetik radyasyonun olabildiğince azaltmak ve parazitleri engellemek için bükme gereklidir. Ayrıca teorik olarak yalıtımın iyi olabilmesi için metre başına düşen bükülme miktarının da artırılması gerekir. Ancak bu durum, metre başına oluşan kapasitans değerini artırır [26].



Şekil 2.2. Çift bükümlü kablo

Koaksiyel kablo; içinde bir ve ya birden fazla metalik iletkenler yerleştirilmiş, kablonun dışında yalıtkan bir madde ile kaplanmış bir kablo çeşididir. Koaksiyel bir sistemde, düğümler tek bir omurga üzerinden birbirine bağlanır, yani kablo tüm istasyonlardan geçerek tek bir hat olarak döşenir. Koaksiyel kablo sistemleri, ucuz ve kolay bulunabilir olduğundan, ağ oluşturulduğu ilk zamanlarda çok yaygın olarak kullanılmıştır [26].

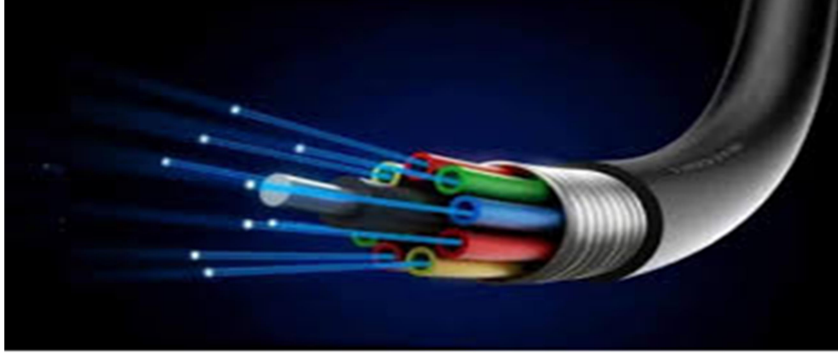


Şekil 2.3. Koaksiyel kablo

2.3.2. Optik fiberler

Optik fiber, camdan (silika) veya plastikten yapılmış, insan saçından biraz daha kalın olan esnek, şeffaf bir yapıdadır. Fiberin iki ucu arasında ışığın iletilmesi ile iletişim sağlanır. Optik fiberlerin tasarımı ve uygulamasıyla ilgili uygulamalı bilim ve mühendislik alanı fiber optik olarak bilinir [28].

Optik fiberler ile hem sayısal hem analog olan büyük kapasiteli verileri taşınabilir. Farklı veriler, aynı optik fiber üzerinde aynı anda farklı dalga boylarıyla taşınabilir [27].



Şekil 2.4. Fiber optik kablo

Optik fiberler, tel kablolardan daha uzun mesafelerde ve daha yüksek bant genişliklerinde iletme izin verdikleri için haberleşmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiberler ayrıca görüntüleri taşımak için kullanılabilmesi için demetler halinde sarılır. Sensörler ve fiber lazerler dâhil olmak üzere çeşitli diğer uygulamalar için özel olarak tasarlanmış fiberler kullanılır [28].

2.4. Fiber Optik İletimin Avantajları

Optik fiberler, elektrik iletimine göre avantajları nedeniyle, gelişmiş dünyada iletişim teknolojisinde bakır tel iletişiminin yerini büyük ölçüde almıştır.

a) Yüksek potansiyel bant genişliği: Optik taşıyıcı frekansı, metal kablo sistemlerinden çok daha büyük bir potansiyel iletim kapasitesine sahiptir.

b) Küçük boyut ve düşük ağırlık: Optik fiberin çapı küçüktür. Bu nedenle, bu tür fiberler koruyucu kaplama ile kaplandıklarında bile karşılık gelen bakır kablolardan çok daha küçük ve daha hafiftirler.

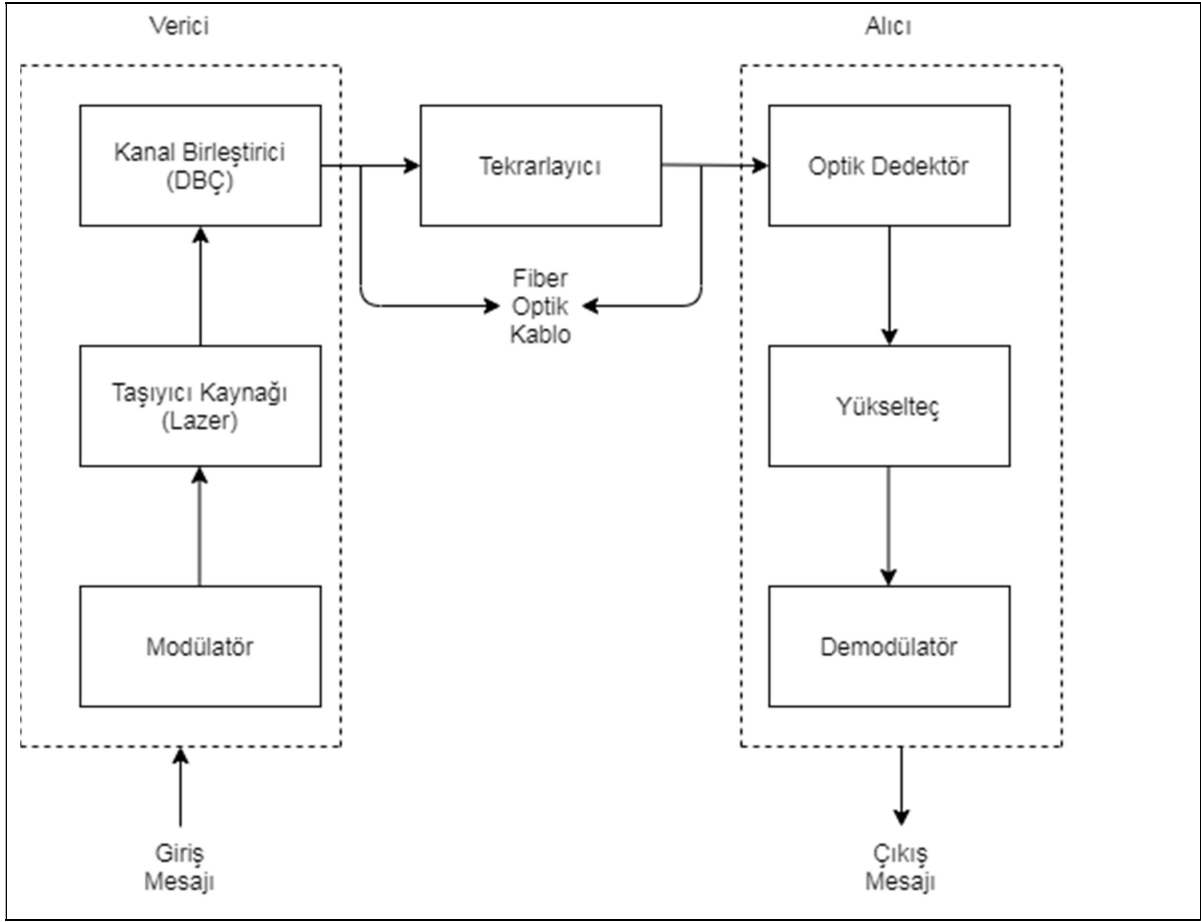
c) Elektriksel İzolasyon: Camdan veya plastik polimerden imal edilen optik fiberler elektrik izolatörleri olup, metalik muadillerinden farklı olarak topraklama problemleri göstermezler. Fiber, aşınma veya kısa devrelerde arklanma veya kıvılcım tehlikesi oluşturmadiğundan, bu özellik, fiber optik iletimi elektriksel olarak tehlikeli ortamlarda iletişim için ideal hale getirir.

d) Sinyal güvenliği: Optik fiberde gelen ışık önemli ölçüde yayılmaz ve bu nedenle yüksek derecede sinyal güvenliği sağlarlar. Bu özellik askeri, bankacılık ve genel veri iletimi, yani bilgisayar ağları uygulamaları için kullanışlıdır.

e) Düşük iletim kaybı: Son yirmi yılda optik fiberdeki teknolojik gelişmeler ile en iyi bakır iletkenlerle bile kıyaslandığında çok düşük zayıflama, iletim kaybı sağlayan optik fiberler ortaya çıkmıştır.

f) Düşük maliyet: Optik fiberde iletimi sağlayan cam, kumdan yapılır. Dolayısıyla, bakır iletkenlere kıyasla fiber optik, düşük maliyetli iletişim imkânı sağlar [29].

2.5. Fiber Optik Haberleşme Blok Diyagramı

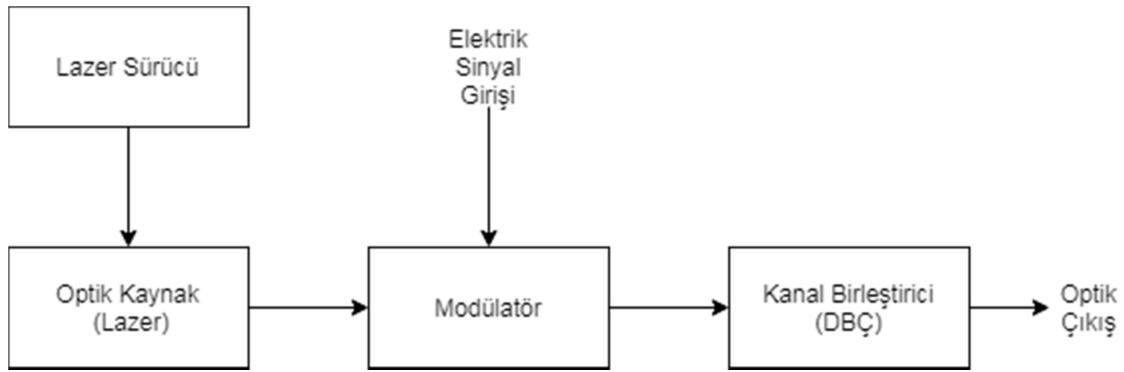


Şekil 2.5. Fiber optik iletişim blok diyagramı

Şekil 2.5’te fiber optik haberleşme sistemlerini genel manada temsil eden blok diyagramı görülmektedir. Bir fiber optik haberleşme sisteminin ana bileşenleri; verici, alıcı ve iletim ortamıdır.

2.5.1. Optik vericiler

Optik vericilerin görevi elektrik sinyalini optik forma çevirip, elde edilen optik sinyali iletişim kanalı olan optik fibere göndermektir. Şekil 2.6’da bir optik vericinin blok diyagramı görülmektedir. Optik vericilerin ana bileşenleri, optik kaynaklar ve modülörlerdir. Optik vericiler ışık yayan diyotlar ve yarı iletken lazerler gibi yarı iletken optik kaynakları kullanır. Bazı durumlarda, doğrudan bir modülasyon uygun olmayabilir ve harici bir modülör gereklidir [21, 30].



Şekil 2.6. Optik verici diyagramı

2.5.2. Optik modülatörler

Optik iletişim sistemlerinin tasarımındaki ilk adım, elektrik sinyalinin bir bit akışına nasıl dönüştürüleceğine karar vermektir. Sinyalin modülasyon formatı için iki tipik seçenek vardır [31].

- Sıfıra dönen (RZ)
- Sıfıra dönmeyen (NRZ)

Sıfıra dönüş (RZ) ve sıfıra dönüşsüz (NRZ), optik ağlarda optik darbeleri kodlamak için kullanılan popüler tekniklerdir. Basit bir karşılaştırmada; NRZ tekniği, iletim için RZ tekniğine göre daha az bant genişliği gerektirir ve lazer faz gürültüsüne duyarlı değildir. Ayrıca, NRZ daha ekonomik iken, diğer yandan RZ, doğrusal olmayan durumlara NRZ ile karşılaştırıldığında daha toleranslıdır [32].

Sıfıra dönüşsüz (NRZ) hat kodu, birlerin genellikle pozitif bir voltajı temsil ettiği, sıfırların ise genellikle negatif bir voltaj gibi başka bir önemli koşulla temsil edildiği ikili bir koddur [32].

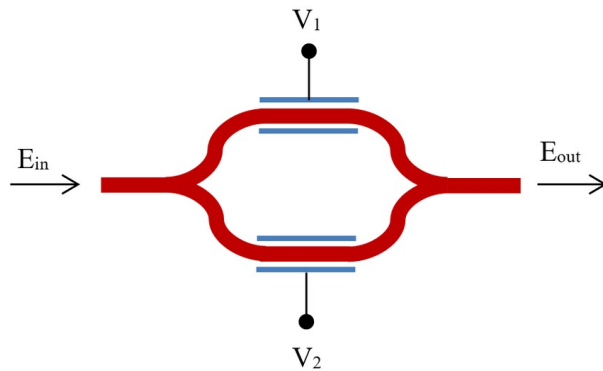
Sıfıra dönüş (RZ), sinyalin her darbe arasında sıfıra döndüğü telekomünikasyon sinyallerinde kullanılan bir hat kodunu tanımlar. Bu, sinyalde bir dizi ardışık 0 veya 1 meydana gelse bile gerçekleşir [32].

Optik haberleşme sistemlerinde; verici bloğunda elektriksel giriş sinyali üzerinde faz, genlik, frekans ve polarizasyon modülasyon gibi işlevleri yerine getiren elamanlara optik modülatör denir. Işık kaynağı, optik yoğunluk, faz, polarizasyon, dalgaboyu ve spektral dağılım olmak üzere ışığın beş temel özelliği kullanılarak modüle edilir. Optik modülatörler; modülasyon için kullanılan maddelerin kullanılan özelliklerine göre elektro-optik, manyeto-optik, akusto-optik gibi sınıflara ayrılabilir [33].

Modülasyon iki şekilde yapılır; analog ve sayısal modülasyon. Bu ayırmada kullanılan bilgi sinyalinin şekli önemlidir. Analog modülasyon, sürekli (analog) bir işaretin (sinüzoidal işaret gibi) özelliklerinin bildiri işaretine bağlı olarak değişmesidir. Ancak sayısal modülasyonda, ışık yoğunluğunda değişimler söz konusudur. Sayısal modülasyon, sayısal sinyalleri haberleşme kanallarına uygun dalga formların dönüştürmek için kullanılır. Diğer bir ifade ile sayısal modülasyon, sayısal bilgiye göre analog taşıyıcının karakteristik özelliklerinin değiştirilmesidir [33, 34].

Bunlardan başka optik modülatörler elektriksel kaynak işaretinin faz, genlik veya frekansının modüle edilmesine göre faz modülatörü, genlik modülatörü ve frekans modülatörleri olmak üzere üçe ayrılır. [33].

Optik sistemlerde en çok tercih edilen modülatörler Mach-Zehnder ve elektrosoğurum modülatörlerdir. Mach-Zehnder modülatörü, güçlü elektro-optik etkiye sahip bir malzemeden (LiNbO_3 , GaAs, InP gibi) yapılır. Kollara elektrik alanları uygulamak, optik yol uzunluklarını değiştirerek faz modülasyonuna neden olur. İki kolu farklı faz modülasyonu ile birleştirmek, faz modülasyonunu yoğunluk modülasyonuna dönüştürür [35].



Şekil 2.7. Mach-Zehnder modülatör yapısı

Bir elektrosöğürüm modölatörü (EA), bir lazer ışınının yoğunluğunu bir elektrik voltajı yoluyla modöle etmek için kullanılabılen bir yarı iletken cihazdır. Çalışma prensibi Franz-Keldysh etkisine, yani uygulanan bir elektrik alanının neden olduğu, bant aralığı enerjisini değiştiren, ancak genellikle uyarımı içermeyen absorpsiyon spektrumundaki bir değişikliği temel alır.

2.5.3. Optik alıcılar

Bir optik alıcı, optik fiberin çıkış ucunda alınan optik sinyali orijinal elektrik sinyaline dönüştürür. şekil 2.8’de bir optik alıcının blok diyagramı görölmektedir. Optik alıcının ana bileşeni, ışığı fotoelektrik etki yoluyla elektriğe dönüştüren bir fotodedektördür. Yarı iletken fotodiyotlar, tüm sistemle uyumlulukları nedeniyle fotodedektör olarak kullanılır. Demodölatörün tasarımı, Fiber optik haberleşme sistemi tarafından kullanılan modöstasyon formatına bağlıdır. Demodöstasyon, elektrik sinyalinin genliğine bağlı olarak bitleri 1 veya 0 olarak tanımlayan bir karar devresi tarafından yapılır [21, 32].



şekil 2.8. Optik alıcı diyagramı

2.5.4. Optik dedektör

Çoğu fotonik uygulaması, optik gücü veya enerjiyi ölçmek için optik dedektörlerin kullanılması gerektirir. Lazer bazlı fiber optik iletişimde, alıcıda bir dedektör kullanılır. Çoğu ışık uygulamasında, lazer veya diğer ışık kaynağının çıkışını ölçmek için bir optik dedektör kullanılır. Bu nedenle, fotonik teknolojisinin çoğu uygulamasında optik güç ve enerjiyi ölçmek için optik dedektörler gereklidir. Bazı uygulamalarda, dedektörler girişim saçaklarının konumunu ve hareketini ölçmek için kullanılır. Optik dedektörler, ışık dalgasıyla ilişkili elektrik alanının karesiyle orantılı olan optik ışındaki güce yanıt verir. Optik dedektörler bu nedenle; kare yasa dedektörleri olarak adlandırılır. Bu, elektrik alan yoğunluğunu doğrudan ölçebilen mikrodalga dedektörlerinin durumunun tersidir [35].

2.5.5. Optik Yükselteç

Fiber kabloların dünyada yayılması ile mesafeler de artmaya başlamış ve bu nedenle zayıflayan sinyalleri yükseltme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Optik yükselteçler yarı iletken optik yükselteçler, fiber Raman yükselteçler, Brillouin yükselteçler ve nadir toprak elementi katkılı yükselteçler olmak üzere 4 ana grupta toplanırken, en yaygın olarak kullanılan optik yükselteç nadir toprak elementi katkılı yükselteçlerden erbiyum katkılı fiber yükselteçlerdir (EKFY) [36].

EKFY, bir optik sinyali yükseltmek için bir kazanç ortamı olarak katkılı bir optik fiber kullanan bir optik yükselticidir. Yükseltilecek sinyal ve bir pompa lazer, katkılı fibere çoğullanır ve sinyal, doping iyonları ile etkileşim yoluyla güçlendirilir. EKFY, silika bazlı fiberin düşük kayıplı optik penceresi nedeniyle en sık kullanılan optik amplifikatördür. EKFY ayrıca, normalde onlarca nanometre olan geniş bir kazanç bant genişliğine sahiptir ve kazanç daralmasının herhangi bir etkisi olmadan veri kanallarını en yüksek veri hızlarıyla yükseltmek için fazlasıyla yeterlidir [37].

2.6. Fiber Optiğin Kullanım Alanları

Optik iletişim sistemleri; büyük olanaklar sağlaması nedeniyle kısa sürede aşağıda belirtilen, geniş bir alanda kullanılmaya başlamıştır:

- Zayıflamanın az, bant genişliğinin büyük, kanal başına düşen maliyetlerin düşük olması nedeniyle, uzun mesafeli büyük kapasiteli haberleşme sistemlerinde ve orta mesafeli düşük kapasiteli haberleşme sistemlerinde,
- Hem analog hem sayısal iletme olanak sağlaması ve geniş bantlı servis verebildiğinden santraller arası bağlantıda,
- Düşük kayıp, yüksek hız nedeniyle bina içlerindeki iletim sistemlerinde,
- Kapalı devre TV sistemlerinde,
- Veri (data) iletiminde,
- Elektronik aygıtların birbiri ile bağlantısında,
- Havacılık alanında, yüksek hız gerektiren aygıtlar arası ve uçak iç donanımlarında,
- Demiryolu elektrifikasyon ve sinyalizasyon uygulamalarında,

- Yüksek gerilim iletkenlerinin içine fiber damarlar yerleştirilerek iletkenlerin, enerji taşırken aynı anda haberleşmeyi de sağlamasında,
- Trafik kontrol sistemlerinde,
- Askeri haberleşme sistemlerinde,
- Reklam panolarında,
- Tıp alanında kullanılan cihazlarda,
- Nükleer enerji santralleri ve radyoaktif ışımların iletişimi bozduğu yerlerde kullanılmaktadır [36].

2.7. Fiber Kablo Yapısı

2.7.1. Fiber kablolarda kullanılan malzemeler

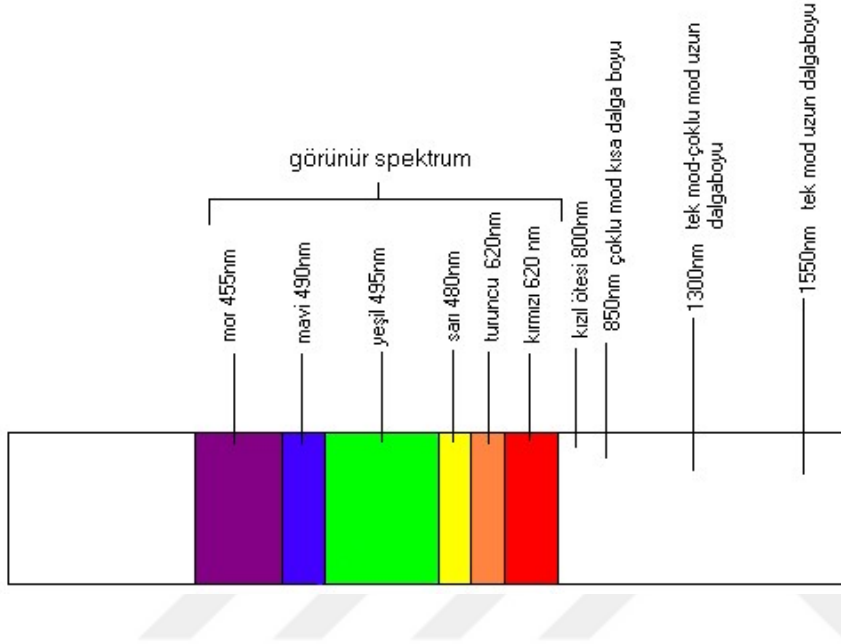
Fiberlerin çoğu ya silika (SiO_2) ya da silikattan oluşan camdan yapılmıştır. Kısa iletim mesafeleri için yüksek kayıplı cam fiberler ve uzun mesafeli uygulamalar için düşük kayıplı cam fiberler kullanılır. Plastik elyaflar, cam elyaflara göre daha az kullanılmaktadır [38, 39].

Bu bölümde, bir optik fiberin yapısını ve özelliklerini, ışığı nasıl yönlendirdiğini ve koruma için nasıl kablolandığını ele alınmıştır. Bir optik fiber, katmanlardan oluşur. Bu katmanlar aşağıda açıklanmıştır.

- Çekirdek : Silika veya katkılı silisten yapılmış bu orta kısım, elyafların ışık geçiren bölgesidir.
- Koruyucu Kılıf : Bu, çekirdek etrafındaki ilk katmandır. Bu katman silikadan yapılmıştır, ancak çekirdek ile aynı bileşime sahip değildir. Bu, çekirdek-kaplama ara yüzünde toplam iç yansıma ile çekirdekteki ışığı sınırlayan bir optik dalga kılavuzu yaratır.
- Kaplama : Kaplama, koruyucu kılıf etrafındaki optik olmayan ilk tabakadır. Kaplama tipik olarak silika yapıyı fiziksel veya çevresel hasara karşı koruyan bir veya daha fazla polimer katmanından oluşur [40, 42].

- Tampon : Tampon, fiberin önemli bir özelliğidir. 900 mikrondur, kurulum ve sonlandırma sırasında elyafın kırılmasını önlemeye yardımcı olur ve kaplamanın dışında bulunur [40, 41].

2.7.2. Elektromanyetik spektrum



Şekil 2.9. Elektromanyetik spektrum

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi fiber optik, görünür ve kızılötesi ışık kullanır. Kızılötesi ışık oldukça geniş bir dalgaboyu aralığını kapsar ve genellikle tüm fiber optik iletişim için kullanılır. Görünür ışık normalde plastik bir fiber kullanarak çok kısa menzilli iletim için kullanılır [38].

Boşlukta elektromanyetik dalganın (c) hızı yaklaşık 3×10^8 m/sn'dir. Her döngüde kat edilen mesafeye dalgaboyu (λ) denir. Birimi Hz olarak belirtilen değişken frekanstır (f). Fiber optikte, dalgaboyu genellikle mikron veya nanometre cinsinden belirtilir [38].

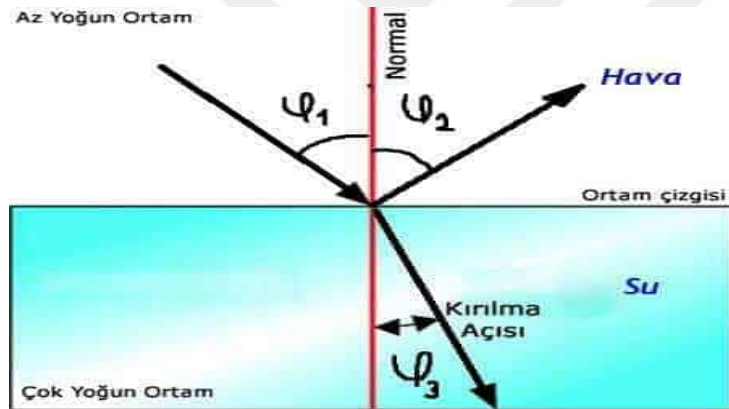
Işığın dalgaboyu Eş. 2.1 ile hesaplanabilir.

$$\lambda(m) = \frac{c(m/s)}{f(1/s)} \quad (2.1)$$

2.7.3. Fiberde ışın yayılımı

Bu bölümü anlaşılabilmesi için öncelikle, fiziğin bazı temel ilkelerine değinmek gerekmektedir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, bir elektromanyetik dalganın (buna ışık, radyo dalgaları, x-ışınları, gama ışınları vb. dâhildir) ilerlemesi sırasında yönünde değişikliklere neden olan iki ana etki vardır; yansıma, kırılma [43].

Yansıma, ışığın bir nesneden sıçramasıdır. Yüzey cam, su veya cilalı metal gibi pürüzsüz ve parlaksa, ışık yüzeye çarptığı açıda yansıyacaktır. Buna aynasal yansıma denir. Yaygın yansıma ise ışığın bir nesneye çarpması ve birçok farklı yönde yansımalarıdır. Bu durum eğer yüzey pürüzlü ise olur [44].



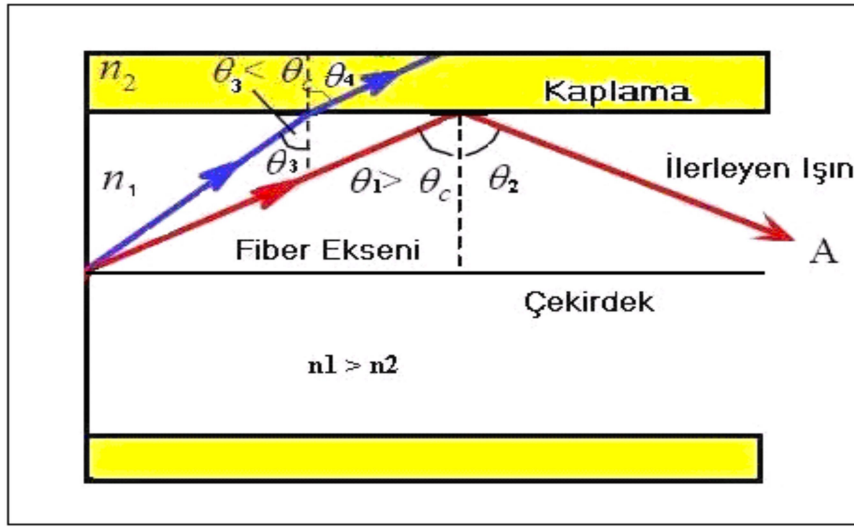
Şekil 2.10. Işın yayılımı

Kırılma; az yoğun ortamdan daha yoğun bir ortama geçen dalganın yönünün değişmesidir [43-45].

Işığın her zaman aynı hızda gittiğine dair yaygın bir görüş vardır. Ancak bu görüş doğru değildir. Işığın hızı, içinden geçtiği malzemeye bağlıdır. Boş alanda, ışık mümkün olan en yüksek hızda hareket eder. Ancak ortamın yoğunluğu arttığında ışığın ilerleme hızı azalır. Işık şeffaf bir malzemedan geçtiğinde, malzemenin kırılma indisi adı verilen bir özelliğine bağlı olarak yavaşlar. Optik fiberlerde kullandığımız çoğu malzeme için kırılma indisi 1,5 civarındadır [46].

Kırılma indisi bir malzemedeki ışık hızının boş uzaydaki ışık hızına oranı olduğundan, herhangi bir birimi yoktur. Kırılma indisi için örnek değer olan 1,5 kullanıldığında, bu saniyede yaklaşık 200 milyon metre hız verir. Kırılma indisi ne kadar küçük olursa ışık hızı o kadar yüksek olur [46].

2.7.4. Snell yasası



Şekil 2.11. Fiberde ışığın ilerlemesi

Eş. 2.11’de görüldüğü üzere ışınların açıları normale göre ölçülür. Normal iki kırılma indisi arasındaki sınır çizgisine dik açıyla çizilen bir çizgidir. Bu terimler Şekil 2.11’de gösterilmektedir [46].

$$\sin \theta_3 \cdot n_1 = \sin \theta_4 \cdot n_2 \quad (2.2)$$

n_1 : birinci ortamın indisi

n_2 : ikinci ortamın indisi

θ_3 : gelen ışının normale göre açısı

θ_4 : kırılan ışının normale göre açısı

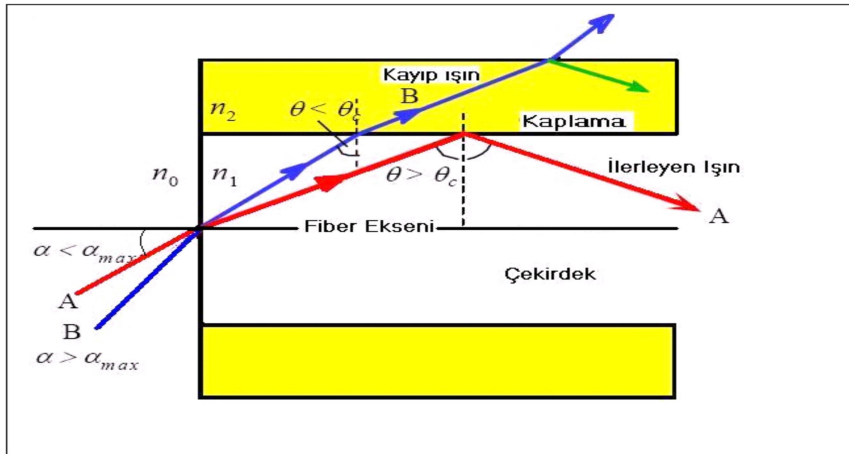
2.7.5. Kritik açı

Önceki bölümde bahsedildiği üzere, ışın daha düşük kırılma indisine sahip malzemeye girerse açısı artar. İlk malzemedeki geliş açısı arttıkça, kırılma açısının 90° 'ye ulaştığı ve ışığın iki malzeme arasındaki sınır boyunca kırıldığı bir durum oluşur. Bu durumun ortaya çıkmasına sebep olan geliş açısı, kritik açı olarak adlandırılır [46].

Işık sınıra kritik açıdan daha büyük bir açıyla gelirse, sınır bölgesinden ilk malzemeye geri yansıtılır. Sınır bölgesi bu durumda bir ayna görevi görür. Bu etkiye toplam iç yansıma denir [46].

Bir optik fiber, ışığı kendi eksenı boyunca toplam iç yansıma ile iletir. Elyaf, her ikisi de dielektrik malzemelerden yapılmış bir kaplama tabakası ile çevrili çekirdekten oluşur. Optik sinyalin iletilebilmesi için, çekirdeğin kırılma indisinin kaplamanınkinden daha büyük olması gerekir [47].

2.7.6. Sayısal açıklık



Şekil 2.12. Fiber optik kabloda sayısal açıklık gösterimi

Sayısal Açıklık, optik sistemin önemli bir özelliğidir. Sayısal açıklık, optik sistemin tüm ışığı tek bir alanda toplayabilmesidir [48].

Işığın fiber içerisinde iletilebilmesi için fiberin belli bir değere kadar artabilen bir kabul açısı vardır. Fiberin kabul açısını belirleyen parametre sayısal açıklık olarak bilinir. Burada

dış ortamın kırılma indisi olup genelde hava için 1 kabul edilir sayısal açıklık, ışık ışınlarının fibere girip aşağıya doğru iletileceği maksimum açının ölçüsüdür [49]. Şekil 2.12’ de gösterilen sayısal açıklık, Eş. 2.3 ile temsil edilir:

$$SA = n_0 \sin(\alpha_{max}) = n_1 \cos(\theta_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.3)$$

SA: sayısal açıklık

α_{max} : maksimum kabul açısı

n_1 : birinci ortamın indisi

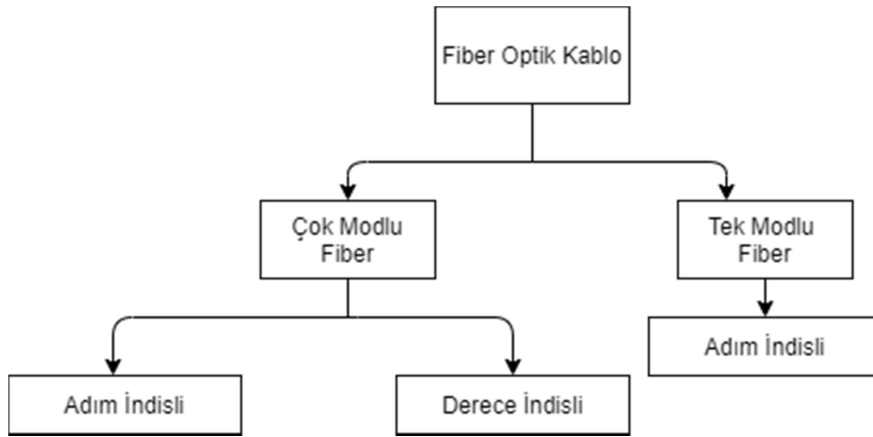
n_2 : ikinci ortamın indisi

2.7.7. Fresnel yansımaları

Işık bir fiberin çekirdeğine girdiğinde ve kaplamaya kritik açıdan daha düşük bir açıyla çarptığında, ışık enerjisinin çoğu kaplamanın içine kırılır ve kaybolur. Işığın bir kısmı da çekirdeğe geri yansıtılır. Yansıyan ışık, Fresnel yansıyan ışık olarak adlandırılır ve genellikle toplamın % 4'ünden daha azdır [50].

2.8. Fiber Optik Kablo Çeşitleri

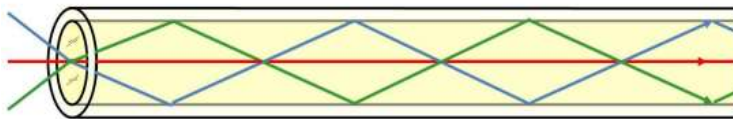
Fiber optik kablolar, ışığın içinden geçme şekline göre; Şekil 2.13’de görüldüğü gibi çok modlu fiber optik veya tek modlu fiber optik olarak sınıflandırılır. Çok modlu fiberler ise kademe indisli çok modlu fiber ve derece indisli çok modlu fiber olarak iki sınıfa ayrılır [51].



Şekil 2.13. Fiber optik kablo çeşitleri blok diyagramı

2.8.1. Çok modlu fiberler

Şekil 2.14’te gösterimi bulunan çok modlu fiber, geniş çekirdeği nedeniyle, bağlantı boyunca farklı yollar (çoklu modlar) kullanarak ışığın iletilmesine izin verir. Çok modlu fiber tek modlu fibere göre daha düşük maliyetlidir, ancak kayıpları daha fazladır. Çok modlu fiberler özellikle modal dağılmaya oldukça duyarlıdır. Çok modlu fiberin başlıca avantajları, ışık kaynaklarına ve diğer fiberlere bağlanma kolaylığı, düşük maliyetli ışık kaynakları (vericiler), bağlantı ve ekleme işlemlerinin daha kolay olmasıdır. Bununla birlikte, zayıflamanın daha yüksek olması ve düşük bant genişliği, ışığın çok modlu fiber üzerinden kısa mesafelere iletilmesini sınırlar [52].

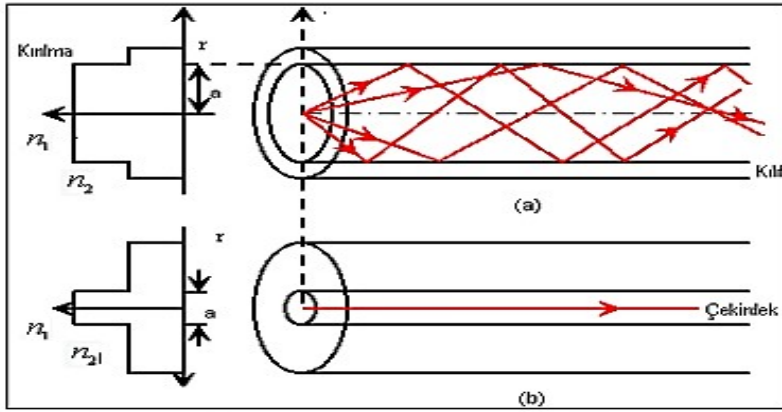


Şekil 2.14. Çok modlu fiberde ışık modları

Kademe indisli çok modlu fiber

Kademe indisli çok modlu fiber, ışık ışınlarını çekirdek ve kaplama arasındaki sınırdaki toplam yansıma yoluyla iletir. Kırılma indisi çekirdekte tek tiptir. Kademe indisli çok modlu fiber, 50 veya 62,5 μm minimum çekirdek çapı, 100 ile 140 μm arasında bir kaplama çapı ve 0,2 ile 0,5 arasında sayısal bir açıklığa sahiptir.

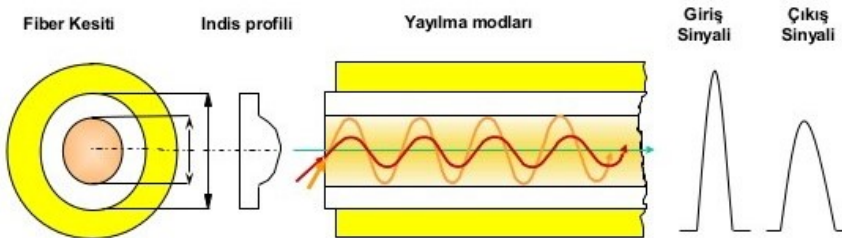
Modal dağılım nedeniyle, Kademe indisli çok modlu fiberde bant genişliği çok düşük olur. Kademe indisli; genel olarak zayıflamanın yüksek olduğu kısa mesafeli bağlantılar için kullanılır. Kademe indisli plastik bir kaplama ile kaplanır [52]. Şekil 2.15(a)'da çok modlu, Şekil 2.15(b)'de tek modlu basamak indisli fiber içindeki dalga yayılımı görülmektedir.



Şekil 2.15. Kademe indisli çok modlu fiber aracılığıyla ışık yayılımı

Derece indisli çok modlu fiber

Dereceli indisli çok modlu fiberin çekirdeği, merkezi eksenenden kaplamaya doğru kademeli olarak azalan bir kırılma indisine sahiptir. Çekirdeğin bu indeks değişimi, ışık ışınlarını fiberde sinüzoidal bir şekilde ilerlemesine sebep olur. Şekil 2.16'da çok modlu derece indisli fiber içindeki dalga yayılımı görülmektedir.



Şekil 2.16. Derece indisli çok modlu fiber aracılığıyla dalga yayılımı

2.8.2. Tek modlu fiber

Şekil 2.17’de gösterimi bulunan tek modlu fiber, adından anlaşılacağı üzere ışığın tek mod üzerinden iletimine izin verir. Tek modlu fiberin avantajı, bant genişliği ve zayıflatma açısından daha yüksek performansa sahip olmasıdır. Azaltılmış çekirdek çapı tek modlu fiber, ışığı yalnızca tek bir yayılma modu ile sınırlayarak modal dağılmayı tamamen ortadan kaldırır. Düzgün seçilmiş bileşenlerle, tek modlu bir fiber, uzun mesafelerde 10 Gb/s ve 40 Gb/s veya üzeri sinyalleri taşıyabilir.

Sistem taşıma kapasitesi, farklı dalga boylarına sahip çoklu sinyallerin (dalga boyu bölmeli çoğullama) fibere enjekte edilmesiyle daha da artırılabilir. Tek modlu fiberin küçük çekirdek boyutu, verimli bağlantı sağlamak için genellikle daha pahalı ışık kaynakları ve hizalama sistemleri gerektirir. Ek olarak, birleştirme ve bağlama çok modlu fibere göre daha zordur. Yine de, yüksek performanslı sistemler için veya birkaç kilometreden uzun sistemler için tek modlu fiber en iyi çözüm olarak kabul edilmektedir [52].



Şekil 2.17. Tek modlu fiber gösterimi

2.9. Optik Sinyal İletimi Üzerindeki Etkiler

2.9.1. Bant genişliği

Bir analog sinyal, minimum ve maksimum frekans arasında değişim gösterir ve bu frekanslar arasındaki fark, bu sinyalin bant genişliğidir. Bant genişliği bir kanalın belirli bir süre boyunca iletebileceği bilgi miktarı kapasitesini belirler [43].

2.9.2. Fiber kayıplar

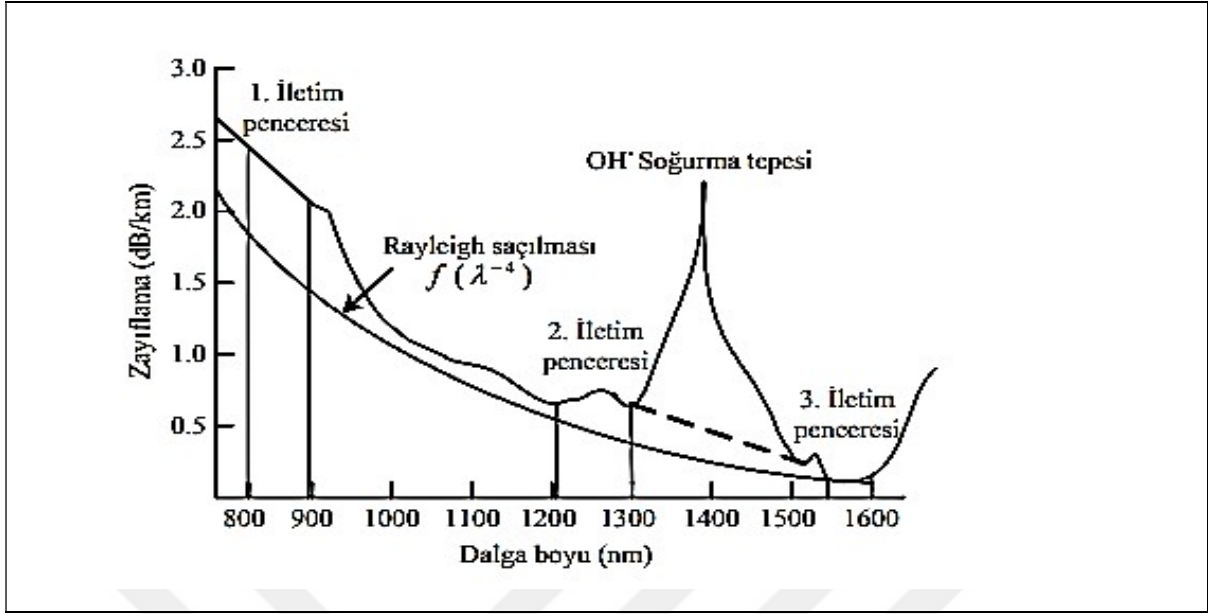
Zayıflama; bir iletim kanalı boyunca sinyalin, fiziksel ortamdan dolayı elektrik veya elektromanyetik enerjinin akışı sırasında oluşan direnç nedeniyle genliğinin azalmasıdır. Zayıflama, birçok nedenden kaynaklanabilir [53, 54].

Sinyal zayıflaması, optik iletişimin uzun mesafelerde gerçekleşmesini önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Belli mesafeli fiber optik sistemler için düşük kayıplı fiber optikler tercih edilir. Fiber optik kablolar sıcaklık değişikliğine veya diğer çevresel etkilere maruz kaldığında ışık kayıpları meydana gelir. Zayıflama aynı zamanda fiberin türlerine ve özelliklerine de bağlıdır. İlk zamanlar zayıflama problemi elektriksel tekrarlayıcılar ile giderilirken yakın zamanda geliştirilen optik yükselteçler sayesinde zayıf optik sinyalleri doğrudan optik olarak yükseltmek mümkün olmuştur. Optik yükselteçler ile yüksek kazanç, düşük gürültü, yüksek bant genişliği ve büyük çıkış gücü karakteristikleri elde etmek mümkündür [54, 55].

Bir fiber optik kabloda, fiber optik cihazlarda ve birçok sistemlerinde meydana gelen kayıplar hesaplanabilir. Fiber kablolar için zayıflama kilometre başına desibel (dB/km) cinsinden belirtilir [53,54]. Eş. 2.4'te görüldüğü gibi iki güç seviyesini karşılaştırmak için kullanılan desibel, belirli bir optik dalgaboyu için, fiberden çıkış optik gücü P_o 'nun giriş optik gücü P_i 'ye oranı olarak tanımlanabilir [56].

$$Kayıp(dB) = -10\log_{10} \left(\frac{P_o}{P_i} \right) = 10\log_{10} \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \quad (2.4)$$

Optik fiberlerde zayıflama, Şekil 2.18'de görüldüğü gibi ışığın dalgaboyuna göre değişir. Üç düşük kayıp aralığı vardır: 850, 1300 ve 1550 nm. 850 nm dalgaboyu ucuz olduğundan en yaygın kullanılanıdır. 1300 nm'lik dalgaboyu daha düşük kayba sahiptir, ancak ana ışık kaynakları olan ışık yayan diyotlar için maliyette az da olsa bir artış sağlar. Günümüzde 1550 nm'lik dalgaboyu genel olarak uzun mesafeli iletişim uygulamalarında en çok tercih edilendir [57].



Şekil 2.18. Tek modlu optik fibere ilişkin kayıp spektrumu

Fiber optik kayıplar iç ve dış kaynaklı kayıplar olarak ikiye ayrılır. Dış kaynaklı kayıplar fiberlerin yapısına ve üretim şekli ile meydana gelir. İçsel fiber kayıpları, fiber optik malzeme ile ilgili olan kayıplardır [58].

İyon rezonans zayıflaması

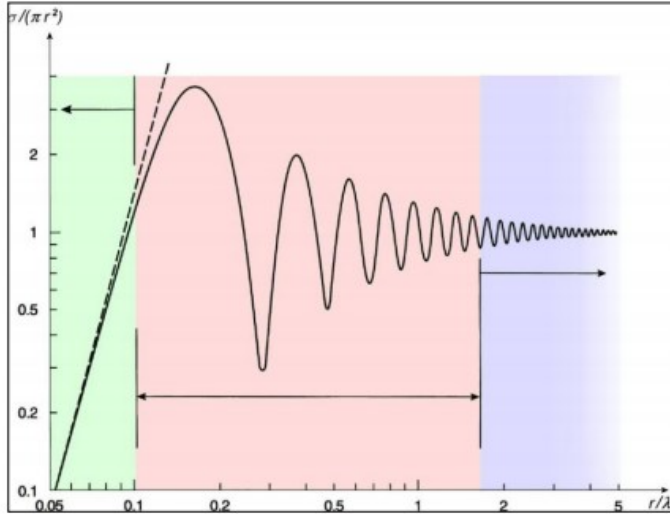
Optik fiberin üretim sürecinde, camı olabildiğince saf yapmak için her türlü çaba gösterilir. Üretim sürecinde temizlik, saflık ve kalite kontrolü, yarı iletken endüstrisi uygulamaları kadar önemle ele alınır. Ancak % 100 saf cam üretmek mümkün değildir. Camda kalan kirler ışığı emer. Demir, bakır ve nikel gibi metal iyonları sebebiyle oluşan safsızlıklar iyonize moleküller şeklindedir. Bunlar ışık partiküllerini (fotonlar) emerler ve enerji alış veriş sürecinde fiber ısınmasına sebep olurlar. Metal iyon safsızlıklarının neden olduğu absorpsiyon kayıpları, kalitesiz camda daha fazla olur.

Ayrıca cam belirli frekanslarda rezonansa giren önemli miktarlarda su iyonu (OH⁻) safsızlıkları da içermektedir. Su iyonlarından kaynaklanan sinyal zayıflamalarının çoğu 850 nm dalgaboyu bölgesinde meydana gelir. Bu durum fiber optik kablolar ticari olarak ilk üretildiğinde sinyal zayıflamasının ana kaynağı olmuştur. İmalat teknolojisindeki önemli gelişmeler bu sorunu büyük ölçüde azaltmıştır [43].

Saçılım zayıflaması

Fiber optik kablolarda oluşan iki tür saçılma kaybı vardır. İlki, üretilen veya doğal olarak oluşan tüm materyalin moleküler yapısının asla mükemmel olmaması nedeniyle oluşur. Elektron mikroskobu ile bir parça optik fiber incelenirse, camın moleküler yapısında düzensizlikler olduğu görülür. Bu düzensizlikler (yani materyalin homojen yapıda olmaması) kaçınılmazdır çünkü moleküller ve atomlar doğaları gereği doğal olarak düzenli değildirler ve malzeme oluştuğunda rastgele bir düzende bir araya gelirler. Düzensizlikler, ışık dalgalarının bir kısmını kablo boyunca çaprazlamasına saçılmasına sebep olur. Bu tür saçılma kaybı, Rayleigh saçılması olarak adlandırılır. Saçılma derecesi, artan dalgaboyu ile orantılı olarak hızlı bir şekilde azalır. Bu sebeple kızılötesi dalga boyları (1300 ve 1550 nm) kullanılarak düşük saçılma kayıpları elde edilmiştir [43].

Ortaya çıkan ikinci tip saçılma kaybı, çekirdek / kaplama ara yüzündeki düzensizliklerden kaynaklanmaktadır. Bunlar fiziksel kusurlar olarak görülür ve üretim aşamasında ortaya çıkar. Bir ışık ışını bu kusurlardan birisi ile karşılaştığında, daha yüksek dereceli bir moda geçebilir ve dağılabilir. Bu, daha yüksek sinyal zayıflamasıyla sonuçlanır [43].

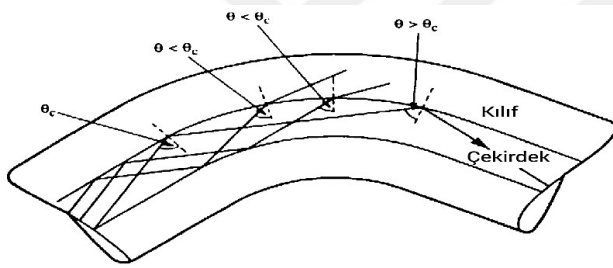


Şekil 2.19. Rayleigh saçılımı

Bükülme kayıpları

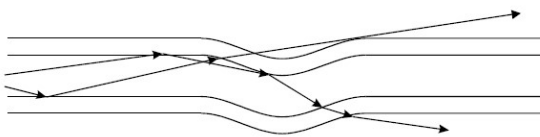
Bir fiberde bükülme meydana gelirse iletim sırasında kayıplar meydana gelir. Fiberdeki hafif kıvrımlar kayıplara neden olmaz. Kayıplar, yalnızca bükülme yarıçapı, ışık ışınının kritik açıdan daha küçük bir açıyla gelmesine neden olduğunda meydana gelir. Kablo üretilirken, söz konusu fiber optik kablo için minimum bükülme yarıçapı belirlenir. Kayıplara neden olan iki tür bükülme vardır. İlki makro bükülme olarak adlandırılır.

Şekil 2.20’de görülen makro bükülme, bir elyaf kritik bir eğrilik değerinin üzerinde önemli miktarda bükülmeye maruz kaldığında meydana gelir (eğrilik, elyaf çapına kıyasla büyüktür). Büyük bükülme eğriliği, ışığın çekirdeğe geri yansıtılması için çok keskin bir açı yaratır ve bir kısmı fiberin çekirdeğinden kaplamaya kaçarak zayıflamaya neden olur [43, 59].



Şekil 2.20. Makro bükme yoluyla optik merkezden ışığın kırılması

Şekil 2.21’de görülen mikro bükülme, üretim süreci, kablo montaj işlemi veya servisler sırasında herhangi bir aşamada üretilebilen fiber ekseninin küçük mikroskobik kıvrımlarıdır. Çevresel etkilere, özellikle sıcaklık değişimlerinden kaynaklanırlar. Mikro bükülme, bitişik modlar arasında mod bağlantısına neden olabilecek ve dolayısıyla radyasyon kaybına neden olabilecek hafif yüzey kusurları ortaya çıkarır [59].



Şekil 2.21. Mikro bükme yoluyla optik merkezden ışığın kırılması

Fresnel bağlantı kayıpları

Daha önce bahsedildiği gibi çekirdek ve kaplamanın buluştuğu ve ışığın bu sınıra kritik açıdan daha küçük bir açıyla çarptığı durumlarda, ışığın yaklaşık % 4'ünün çekirdeğe geri yansıtılmaktadır. İki fiber mükemmel düz ve pürüzsüz uçlarla birleştirilmiş olsa bile, iki fiber arasındaki az miktarda hava nedeniyle kırılma endekslerinde hala kaçınılmaz bir değişiklik vardır. Bu etki her ara yüzde sinyal seviyesinde % 4'lük bir kaybı temsil eder. Dolayısıyla kaybedilen toplam enerji miktarı % 8'dir. Bir bağlantı üzerinden güç kaybını değerlendirirken, bu, fiber-hava arayüzü başına yaklaşık 0,17 dB kaybı ve fiberden fibere bağlantı başına 0,34 dB kaybı temsil eder [43].

Fiber boyutu ve sayısal açıklık uyumsuzluğu

Farklı boyutlarda ve farklı sayısal açıklık değerine sahip fiberlerin bağlanması gerektiğinde kayıp meydana gelir. Işığın yayıldığı fiber çapı, ışığı alan fiber çapından daha büyükse, ışık ışınları dışarı çıkacaktır. İki fiber aynı çaplara sahip, fakat ışığın yayıldığı fiber daha büyük bir sayısal açıklık değerine sahipse, sinyal kırılma yoluyla enerjisinin küçük bir miktarını kaybedecektir.

Işığın yayıldığı fiber, alıcı fiberden daha küçük bir çapa veya daha küçük bir sayısal açıklık değerine sahipse, o zaman herhangi bir sinyal kaybı olmaz. Eş. 2.5'te meydana gelen kayıpları yaklaşık olarak göstermektedir [43].

$$Kayıp(dB) = -20\log(SA_1/SA_2) \quad SA_1 > SA_2 \quad (2.5)$$

SA_1 : ışığın yayıldığı fiberin sayısal açıklık değeri

SA_2 : ışığı alan fiberin sayısal açıklık değeri

2.10. Fiber Optik Dispersiyon

Fiber optik iletişimin performansını büyük ölçüde engelleyen dispersiyon, ışık sinyalinin bir optik fiber boyunca ilerledikçe yayılmasıdır. Dispersiyon, bir fiberin bant genişliğini veya bilgi taşıma kapasitesini sınırlar [60].

Bir fiberde beş ana dispersiyon türü vardır:

- Modal dispersiyon
- Malzeme dispersiyonu
- Dalga klavuzu dispersiyonu
- Polarizasyon modu dispersiyonu
- Kromatik dispersiyon

2.10.1. Modal dispersiyon

Mod, iletim ortamında elektromanyetik dalgaların yayılmasını açıklayan matematik ve fiziğe dayalı bir kavramdır. Fiber olması durumunda mod, bir ışık ışınının fiberde hareket ettiği yoldur. Bir fiber tarafından desteklenen modların sayısı 1 ila 100000 arasında değişir. Dolayısıyla, bir fiber, boyutuna ve özelliklerine bağlı olarak bir veya birkaç ışık ışını için bir hareket yolu sağlar. Işık, farklı yollar veya modlar için farklı açılarda yansıdığından, çekirdekten dümdüz geçen ışın önce diğer uca ulaşır, diğer ışınlar daha sonra gelir. Böylece aynı anda fibere giren ışık diğer uçtan farklı zamanlarda çıkar.

Modal dispersiyon şu yollarla azaltılabilir:

- Daha az moda izin veren daha küçük bir çekirdek çapı kullanılarak.
- Daha uzun yol alan ışınların diğer uca daha kısa yolu izleyen ışınlarla hemen hemen aynı anda ulaşabilmesi için derecelendirilmiş indisli fiber kullanılarak.
- Modlar arasında dispersiyona izin vermeyen tek modlu fiber kullanarak [61].

2.10.2. Malzeme dispersiyonu

Farklı dalga boyları da aynı moda sahip fiber boyunca farklı hızlarda hareket eder.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.6.)$$

n : kırılma indisi

c : boşluktaki ışığın hızı

v : malzemedeki dalgaboyunun hızı

Eş. 2.6'da v değeri her dalgaboyu için değişir, bu nedenle kırılma indisi dalgaboyuna göre değişir. Malzeme dispersiyonu, fiberin materyal özelliklerinden kaynaklandığı için malzeme dispersiyonu olarak adlandırılır [62].

2.10.3. Dalga kılavuzu dispersiyonu

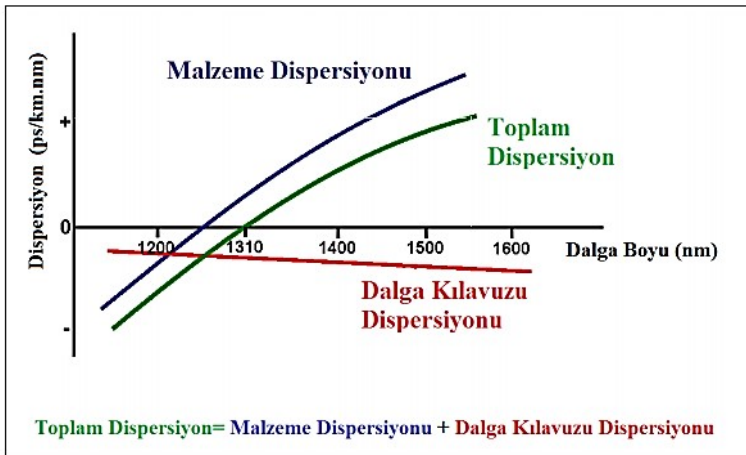
Tek modlu bir fiberde, dalga kılavuzu dispersiyonu, ışığın farklı kırılma indislerine sahip olan çekirdek ve kaplamada hareket etmesi nedeniyle oluşur. Malzemelerin farklı kırılma indislerine sahip olması nedeniyle ışık çekirdek ve kaplamada biraz farklı hızlarda hareket eder. Fiberin iç yapısının değiştirilmesi ile dalga kılavuzu dispersiyonunda değişikliğe sağlanabilir [62].

2.10.4. Polarizasyon modu dispersiyonu

Polarizasyon modu dispersiyonu, optik fiberlerde küçük ama kaçınılmaz çift kırılmanın varlığından kaynaklanan polarizasyona bağımlılığından kaynaklanır. PMD fiberde çift kırılmalı ortamda ışık, polarizasyon ve yayılma yönüne göre farklı etkili kırılma indislerine maruz kalır. Dairesel yapısı bozulmamış bir elyaf çift kırınımı değildir; imalat sürecinde, fiberlerin dairesele yapısında bozulmalar meydana gelir. Ayrıca fiberler hem üretim sürecinde hem de kablolamada bükülmeler ve bükülmeler nedeniyle mekanik gerilimlerle karşılaşır. PMD sadece sinyalin genliğini değil, aynı zamanda fazını da etkilediğinden, optik sistemlerde, azaltılmalı veya telafi edilmelidir [63].

2.10.5. Kromatik dispersiyon

Fiber optik kablolarda bant genişliğini, iletişim hızını ve dolayısı ile iletişim mesafesini kısıtlayan önemli bir dağılma türü kromatik dispersiyondur. Mod içi dispersiyon olarak da bilinen kromatik dispersiyon daha çok tek modlu fiberler için önemli bir faktördür. Şekil 2.22’de görüldüğü gibi kromatik dispersiyon malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonlarının toplamı olarak da tanımlanabilir.



Şekil 2.22. Kromatik Dispersiyon

Bir ortam içindeki ışık, boşlukta olduğundan daha yavaş bir hızda hareket eder. Işığın hareket ettiği hız, ortamın kırılma indisine göre belirlenir. İdeal bir durumda, kırılma indisi ışığın dalgaboyuna bağlı olmayacaktır. Durum böyle olmadığından, bir optik fiber içinde farklı dalga boyları farklı hızlarda hareket eder. Lazer kaynakları spektral olarak tek renkli değildir. Bu, giriş darbesinin farklı hızlarda hareket eden ve darbenin yayılmasına neden olan birkaç dalgaboyu bileşeni içerdiği anlamına gelir. Farklı dalga boylu ışık bileşenlerinin çekirdek içerisinde farklı hızlarda hareket etmesi sonucunda gönderilen darbe ya da sinyalin genişleyip yayılması kromatik dispersiyondur.

Bir fiberin kromatik dağılımı, fiberin 1 km üzerinde hareket eden 1 nm spektral genişliğe sahip bir kaynak için diferansiyel gecikmeyi veya zaman yayılmasını (ps cinsinden) temsil eden ps / nm / km cinsinden ifade edilir [64, 66].

Dağılım parametresi olan D birimi ps / nm / km olarak verilir ve fibere göre değişim gösterir ve aynı zamanda dalgaboyunun bir fonksiyonudur. D, standart tek modlu bir fiber için 1.55 μm dalgaboyu aralığında genellikle yaklaşık 17 ps / nm / km'dir. Dispersiyon kompanzasyon fiber (DSF) için aynı pencerede maksimum 3,3 ps / nm / km'dir. Sıfır olmayan dispersiyon fiber (NDF), 1 ile 6 ps / nm / km veya -1 ile -6 ps / nm / km arasında bir kromatik dispersiyona sahiptir.

Harici olarak modüle edilmiş kaynaklar için, kromatik dağılımla sınırlanan iletim mesafesi Eş. 2.7 ile temsil edilir.

$$L < \frac{2\pi c}{16|D|\lambda^2 B^2} \quad (2.7.)$$

2.10.6. Dispersiyon kompanzasyonu

Optik iletim sisteminde, uzak mesafeyi ve yüksek hızlı fiber optik iletişimi kısıtlayan temel konu dispersiyondur. Dispersiyon sorununun üstesinden gelmek için, dispersiyon kompanzasyon fiber, dispersiyon kompanzasyon filtresi, daha yüksek dereceli mod filtreleri ve fiber Bragg ızgara gibi birçok teknik kullanılmaktadır. Tüm bu dispersiyon dengeleme teknikleri arasında, fiber Bragg ızgara ve dispersiyon kompanzasyon fiber en verimli dispersiyon dengeleme teknikleridir. Dispersiyon kompanzasyon fiberde, bir fiber optik iletişim bağlantısındaki pozitif dispersiyonun etkisini telafi etmek için bir negatif dispersiyon katsayılı özel bir fiber eklenir. Literatürden anlaşıldığı üzere, DKF tekniği basit, güvenilir ve hâlihazırda kurulu fiber bağlantıların yükseltilmesi kolaydır, ancak önemli doğrusal olmayan etkileri ve fiber iletişim sistemlerinin maliyetini arttırır [60-67]. Dispersiyon kompanzasyon tekniği Eş 2.8 ile ifade edilir:

$$\frac{\partial A_j(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{2}i\beta_2(\lambda j)\frac{\partial^2 A_j(z,t)}{\partial t^2} - i\gamma|A_j(z,t)|^2 A_j(z,t) + \frac{\alpha}{22}A_j(z,t) = 0 \quad (2.8.)$$

$A_j(z,t)$: optik darbenin karmaşık genliğidir,

$\beta_2(\lambda j)$: dispersiyon parametresi

λj : doğrusal olmayan katsayıdır

α : kayıp katsayısıdır.

DKF'nin N-kesit dispersiyon kompanzasyonundan sonra, kanal dispersiyonu Eş. 2.9'daki gibi ifade edilir:

$$\Delta D(\lambda j) = NL_{TMF}(1 - \mu_p)D_{TMF}(\lambda p) + (1 - p)\Delta\lambda\left(\frac{dD_{TMF}(\lambda p)}{d\lambda} - \frac{\mu p}{D_{DKF}(\lambda p)}\frac{dD_{TMF}(\lambda p)}{d\lambda}\right) \quad (2.9.)$$

Eş. 2.10’da , μp ; p-kanalının dağılım telafi oranıdır.

$$\mu p = \left| \frac{D_{DKF}(\lambda p)L_{DKF}}{D_{TMF}(\lambda p)L_{TMF}} \right| \quad (2.10.)$$

L_{TMF} ve L_{DKF} , amplifikatör aralığı içindeki geleneksel tek modlu fiber uzunluğu ve dispersiyon kompanzasyon fiber uzunluğudur. $\Delta\lambda$, kanal dalgaboyu aralığıdır. $D_{DKF}(\lambda p)$ ve $D_{TMF}(\lambda p)$, λp dalgaboyunda geleneksel tek modlu fiberin ve dispersiyon kompanzasyon fiberinin dağılım katsayısıdır

$$\eta_p = \frac{E_{darbe}}{E_b} \quad (2.11.)$$

Eş.2.11’de E_{darbe} darbe başına oluşan enerjidir ve E_b bit başına oluşan enerjidir.

2.11. Fiber Optik Çoğullama Teknikleri

Optik iletişimde beş tür çoğullama türü vardır:

1. Optik zaman bölmeli çoğullama (OZBÇ)
2. Alt Taşıyıcı Çoklama (ATÇ)
3. Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (DBÇ)
4. Optik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFBÇ)
5. Optik Kod Bölmeli Çoklu Erişim (OKBÇ)

2.11.1. Optik zaman bölmeli çoğullama

Elektrik sinyalinin optik taşıyıcıları modüle edebileceği hız sınırlı olduğundan, fiber optik bant genişliğinden tam olarak yararlanmak için OZBÇ kullanılır. OZBÇ yüksek bant genişliğine sahip bir iletiyi birden çok bağlantıya paylaştırır. Birçok sayısal sinyal zaman boyutunda birbirinden ayırt edilir. OZBÇ bilinen zaman bölmeli çoğullama tekniklerini kullanıp, bu teknikleri optik olarak gerçekleştirmeye çalışır, böylece çok daha yüksek hızlara ulaşılır. Tek bir dalgaboyu bant genişliği içinde elektronik tarafından uygulanan bit hızı sınırlamasının üstesinden gelmek için, dar optik darbeleri lazer kaynakları kullanan OZBÇ teknikleri geliştirilmiştir [58, 69].

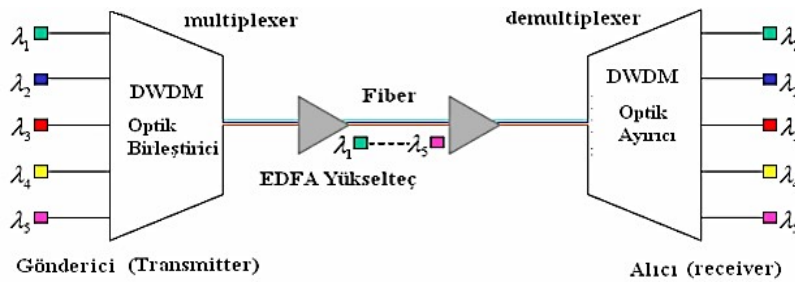
2.11.2. Alt taşıyıcı çoğullama

Alt taşıyıcı çoğullama, tek dalgaboyu kullanarak optik fiber üzerinden birçok farklı sinyali birleştirilerek iletmek için kullanılır. ATÇ'nin optik iletişimdeki en önemli avantajı, farklı optik taşıyıcıları birbirine yakın yerleştirme yeteneğidir [70].

2.11.3. Dalgaboyu bölmeli çoğullama

Şekil 2.23'te görülen dalgaboyu bölmeli çoğullama, optik iletişimin genişlemesinde önemli bir özelliktir. DBÇ ile, sistemde daha fazla esneklik sağlanır ve ağ tasarımını basitleştir. DBÇ ile tek bir fiber üzerinden birden fazla dalgaboyu göndererek sistem kapasitesi artırılır. Veri hızında, her dalgaboyunda ayrı bir kanalın taşındığı çoklu dalga boyları kullanılarak tek bir fiber üzerinden geçirilen DBÇ sistemleri tarafından önemli bir artış sağlanabilir [71, 72].

DBÇ sistemi için her dalgaboyu ayrı kanal olarak korunabilir ve farklı veriler taşınabilir. DBÇ, ışık sinyallerinin tek bir fiberde farklı dalga boylarıyla birleştirildiği pasif cihazlar olarak kabul edilebilir [73].



Şekil 2.23. Dalgaboyu bölmeli çoğullama gösterimi

2.11.4. Ortogonal frekans bölmeli çoğullama

Ortogonal frekans bölmeli çoğullama, yeni ve gelişmekte olan geniş bantlı kablolu ve kablosuz iletişim sistemlerinin çoğunda kullanılan bir çoğullama tekniğidir. Bu yöntem ile, aynı frekans spektrumunda veri gönderilir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, OFBÇ'nin optik iletişim için de umut verici bir teknoloji olduğunu göstermiştir.

OFBÇ'nın dezavantajları, yüksek tepe / ortalama güç oranı, faz gürültüsüne ve frekans kaymasına karşı duyarlılığıdır [74, 75].

2.11.5. Optik kod bölmeli çoklu erişim

Optik kod bölmeli çoklu erişim, her kullanıcıya benzersiz bir kod atayarak çoklu erişim sağlar. Başka bir düğümle iletişim kurmak için, kullanıcıya atanan kodu verinin üzerine yazar. Daha sonra alıcı tarafında kod dizisine göre oluşturulan bit akışının kodu çözülür. OKBÇ'in ilkesi, yayılı spektrum tekniklerine dayanmaktadır. Kavram, optik sinyalin enerjisini, bilgiyi göndermek için gereken minimum bant genişliğinden çok daha geniş bir frekans bandı üzerine yaymaktır. Yayma, sinyalin kendisinden bağımsız bir kodla yapılır. Optik kodlayıcı, her bir bilgi bitini yüksek hızlı (daha uzun kod uzunluğu) optik diziyle eşlemek için kullanılır. Optik diziler kümesi, bireysel ağ kullanıcıları için bir dizi benzersiz adres kodları veya imza dizileri haline gelir [76].

2.12. Optik Ağlarda Bit Hata Oranı ve Q Faktörünün Değerlendirilmesi

Optik haberleşme sistemlerinde iletim mesafesini sınırlayan en önemli faktörlerden biri Q faktörü ve bit hata oranı (BER) dir. Sinyalleri uzun mesafelerde iletmek için fiberde düşük bir BER ve yüksek Q faktörüne sahip olmak gerekir. Optik yükselteçlerin ana avantajı, optik sinyallerin herhangi bir dönüştürme olmaksızın optik olarak doğrudan yükseltilmesidir [77].

Q faktörü, bir analog iletim sinyalinin kalitesini, sinyal-gürültü oranı (SNR) açısından ölçer. Bu nedenle, sinyaldeki fiziksel bozulmaları (örneğin, gürültü, kromatik dağılım ve herhangi bir polarizasyon veya doğrusal olmayan etkiler) dikkate alır ve bu, sinyali bozabilir ve sonuçta bit hatalarına neden olabilir. Başka bir deyişle, Q faktörünün değeri ne kadar yüksek olursa, SNR o kadar iyi olur ve dolayısıyla bit hatası olasılığı o kadar düşük olur [77].

Telekomünikasyon iletiminde, bit hata oranı (BER), bir iletimde alınan toplam bit sayısına göre hata içeren bitlerin yüzdesidir. Örneğin, bir iletimin BER değeri 10^{-6} olabilir, bu, iletilen 1.000.000 bitten bir bitin hatalı olduğu anlamına gelir. BER, bir hata nedeniyle verilerin ne sıklıkla yeniden iletilmesi gerektiğinin bir göstergesidir [77] .

Bir görselleştirici kullanılarak, kullanıcının bir elektrik sinyalinin bit hata oranını otomatik olarak hesaplamasını ve görüntülemesi sağlanabilir. BER'in tahmin edilmesi için Gaussian ve Ki-Kare gibi farklı algoritmalar kullanılabilir ve göz diyagramından; Q faktörü, göz açma, göz kapatma, sönme oranı, göz yüksekliği, titreşim vb. gibi farklı metrikler türetebilir. BER, sayısal veri iletim sistemleri için alınan sinyal kalitesinin bir ölçüsüdür [78].

Telekomünikasyon sistemlerinin iletim kalitesi, çıkış sinyalinin girişi ne kadar iyi ürettiğini ölçerek doğrudan değerlendirilebilir.

Eş. 2.12'deki görüldüğü gibi; BER ölçümleri, bitlerin hangi bölümünün yanlış alındığını değerlendirmek için dijital giriş ve çıkış sinyallerini karşılaştırır.

$$BER = \frac{E(t)}{N(t)} \quad (2.12)$$

Eş. 2.12'de E, t zamanında hatalı olarak alınan bit sayısıdır ve N, t zamanında iletilen toplam bit sayısıdır.

BER esasen yanlış bit tanımlamasının ortalama olasılığını belirtir. Bu nedenle, 10^{-9} 'luk bir BER, 10^9 her bittten 1 bitin ortalama olarak yanlış okunduğu anlamına gelir. 10^{-9} bit hata oranı genellikle telekomünikasyon uygulamaları için kabul edilebilir minimum BER olarak kabul edilir. 10^{-13} ' ün genellikle minimum olarak kabul edildiği durumlarda, veri iletişiminin daha katı gereksinimleri vardır [79].

Göz modeli osiloskopu tipik olarak Q faktör değerinin ne olduğunu gösteren bir rapor oluşturur. Bir Q faktörü ölçümü, klasik optik parametreler (güç, optik SNR ve dalgaboyu) ile BER değerine dayalı dijital uçtan uca performans parametreleri yer alır. Optik sinyalin darbe şeklinin istatistiklerini analiz ederek zaman alanında bir Q faktörü ölçülür. Q faktörü, yalnızca basit optik parametrelerle mümkün olmayan, darbe şekli üzerindeki gürültü, filtreleme ve doğrusal/doğrusal olmayan bozulmaların etkilerini hesaba katan bir optik kanalın sinyal kalitesi için kapsamlı bir ölçüdür. Optik SNR'nin bir fonksiyonu olan Q faktörü, alıcı performansının niteliksel bir tanımını sağlar. Q faktörü, belirli bir sinyal için

belirli bir BER elde etmek için gereken minimum sinyal-gürültü oranını belirler. Optik SNR, desibel cinsinden ölçülür [80].

Eş. 2.13 ve Eş. 2.14'te Q göz diyagramı içindeki karar noktasından (D) gözün her bir kenarına olan mesafenin toplamı ile gözün her bir kenarındaki gürültü toplamı arasındaki oran olarak belirlenir.

$$Q = \frac{|\mu_1 - D| + |\mu_0 - D|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.13.)$$

$$Q = \frac{(\mu_1 + \mu_0)}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.14.)$$

2.13. Sinyal Gürültü Oranı

Sinyal gürültü oranı (SNR), genellikle bir analog iletişim sisteminin kalitesini değerlendirmenin yoludur. SNR, sinyal gücünün gürültüye oranının ölçüsüdür. Sinyal-gürültü oranı ne kadar yüksek olursa, sinyalin kalitesi de o kadar yüksek olur. SNR, bir dijital iletişim sistemi için sıklıkla kullanılsa da, sistemin SNR'si ile BER arasında bir ilişki vardır; SNR ne kadar yüksekse, karşılık gelen BER o kadar düşük olur [81].

BER; Eş. 2.15 ve Eş. 2.16'da görüldüğü şekilde SNR ile ilişkilidir.

$$BER = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}})] \quad (2.15.)$$

burada erf hata işlevini temsil eder. $x > 3$ için, $\text{erf}(x)$ 'e çok iyi bir yaklaşım

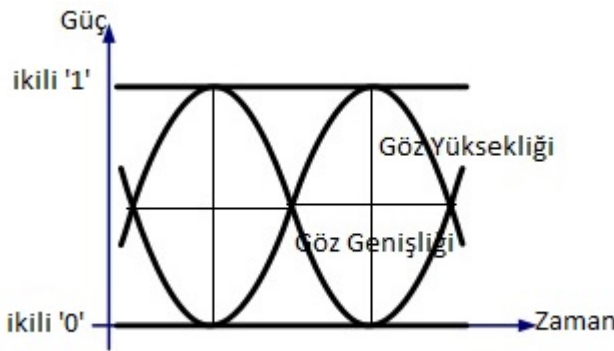
$$\text{erf}(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}x} e^{-x^2} \quad (2.16.)$$

2.14. Göz Diyagramı

Göz diyagramı, hem zamanlama titreşiminin hem de genlik gürültüsünün veriler üzerindeki etkisini karakterize eden bir yöntemdir. Sinyalin elektriksel kalitesi göz

diyagramı aracılığıyla görselleştirilebilir ve belirlenebilir. Göz diyagramı, birkaç veri modelinin geçiş kenarının üst üste binmesiyle oluşturulur [82].

Telekomünikasyonda, göz diyagramı olarak da bilinen bir göz modeli, bir alıcıdan gelen sayısal bir sinyalin tekrar tekrar örneklendiği ve dikey girişe uygulandığı, veri hızının ise yatay taramayı tetiklemek için kullanıldığı bir osiloskop ekranıdır. Bir temel bant darbe iletim sisteminin performansı üzerindeki kanal gürültüsü, dağılım ve semboller arası girişimin birleşik etkilerinin değerlendirilmesi için bir araçtır [83].



Şekil 2.24. Göz diyagramı yapısı

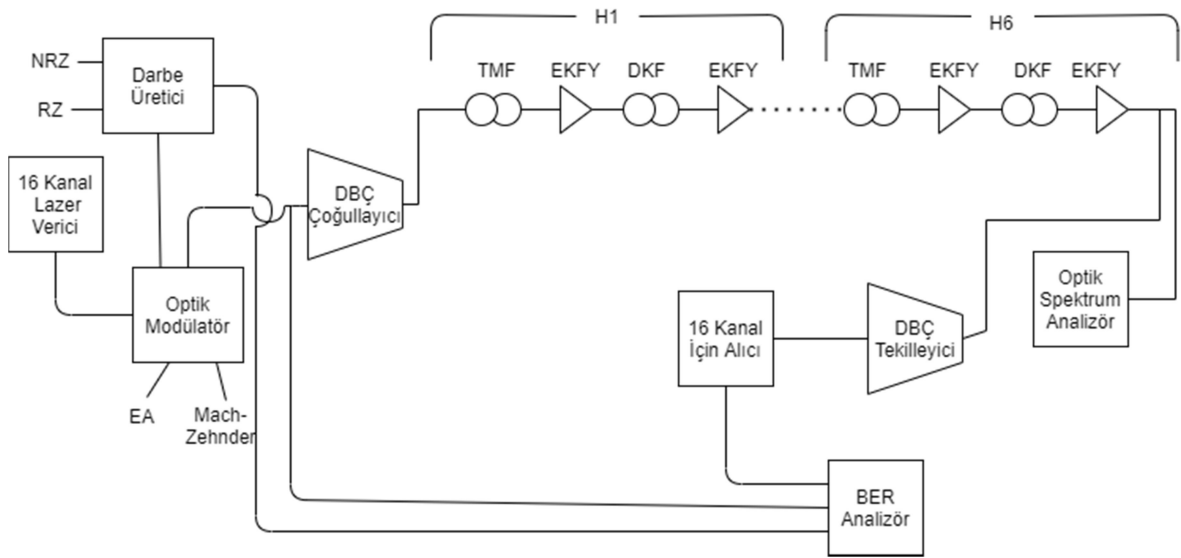
Sayısal alanda sinyal kalitesi hakkında iyi bir fikir edinmek için göz diyagramı kullanılır. Göz diyagramı adını, insan gözü görünümünde olmasından alır. Basitçe, bileşik bir görüntü oluşturmak için ardışık dalga biçimlerinin üst üste bindirilmesiyle oluşturulur. Göz diyagramı, bozulmanın etkilerini tanımak ve kaynağını bulmak amacıyla öncelikle dijital sinyallere bakmak için kullanılır [84].

İdeal olarak, sayısal sinyaller için göz diyagramı, ani yükselme ve düşme süreleri neredeyse görünmez olan iki paralel çizgiden oluşacaktır. Gerçek dünyada, oldukça iyi bir sayısal sinyal bile, iki paralel çizgi dışında çizgiler olarak ortaya çıkacak ve karanlık alanlar oluşacaktır .



3. SİSTEMİN SİMÜLASYONU VE BULGULAR

Bu çalışmada optik bir yazılım kullanarak Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistem üzerinden, iletim hızı, modülasyon formatları, modülatör çeşitleri, iletim mesafesi, kanal sayısı gibi kriterlerin kıyaslanması yapılmıştır. Böylece uzun mesafeli fiber optik sistemlerde iletim kalitesinin artırılması amaçlanmıştır.



Şekil 3.1. Simülasyonu yapılan fiber optik haberleşme sistemi diyagramı

3.1. Sistemde Yer Alan Alt Elemanların İncelenmesi

Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistemde 16 taşıyıcı kanallı lazer dizisi kullanılmış, her kanal için ayrı ayrı dalgaboyu değerleri atanmıştır. Sistemde kullanılan 16 taşıyıcı kanal dalgaboyu Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi 1541,349 nm- 1565,495 nm aralığında seçilmiştir. Sisteme uygulanan 16 taşıyıcı kanalın giriş gücü -10 dBm’dir.

Çizelge 3.1. Lazer dizisi frekans değerleri

Kanal	Dalgaboyu(nm)
0	1565,495
1	1563,862
2	1562,232
3	1560,606
4	1558,983
5	1557,363
6	1555,747
7	1554,134
8	1552,524
9	1550,918
10	1549,315
11	1547,715
12	1546,118
13	1544,525
14	1542,935
15	1541,349

Sistemde yer alan tek modlu fiber için seçilen parametreler son derece önemlidir ve simülasyon sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Sistemde yer alan fiberin; uzunluğu 50 km, zayıflama değeri 0,2 dB/km olarak belirlenmiştir. Sistemin toplam iletim mesafesi 300 km'dir.

Sistemde; yalnızca kazanç ve gürültü değerleri belirlenebilen bir EKFY modeli kullanılmıştır. Kazancın; fiberdeki güç kaybını telafi edecek şekilde ayarlanması gerektiğinden, gürültü değeri 6 dB'lik standart bir değere ayarlanmıştır. Ayrıca gürültü parametreleri, simüle edilen tüm bant genişliği boyunca gürültüyü içerecek şekilde ayarlanmıştır. Doğruluğu arttırmak için de yeterli olacak şekilde küçük bir bölme aralığı seçilmiştir. Kağıda yaptığımız hesaplamayı verebilirsin

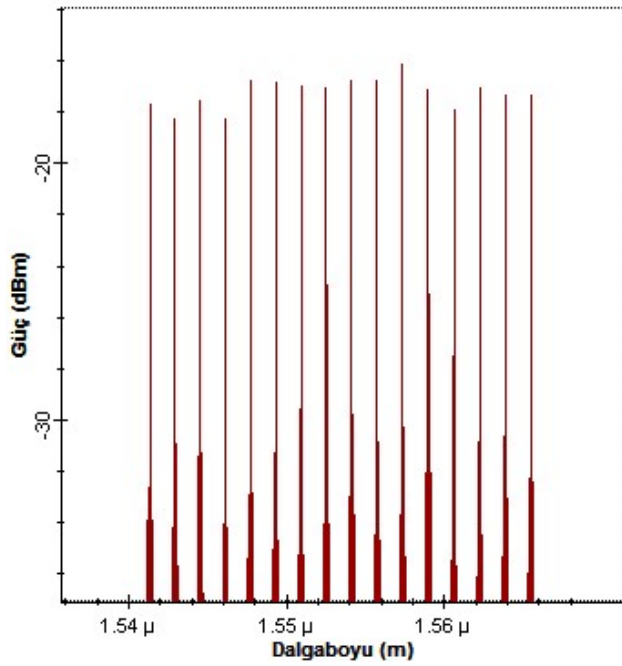
Sistemde yer alan dispersiyon kompanzasyonlu fiberin (DKF) parametreleri, tek modlu fibere benzer şekilde seçilmiştir. Dispersiyon kompanzasyonlu fiberin; uzunluğu 10 km, zayıflama değeri 0,5 dB/km olarak belirlenmiştir. DKF ile birlikte toplam hat uzunluğu 360 km'ye ulaşmıştır.

Sistemde kanalları uygun şekilde birleştirmek ve ayırmak için dalgaboyu çoğullayıcı ve tekilleyici kullanılmıştır.

3.2. Sistem İletişim Kalitesinin RZ VE NRZ Modülasyon Formatları Yönünden Karşılaştırılması

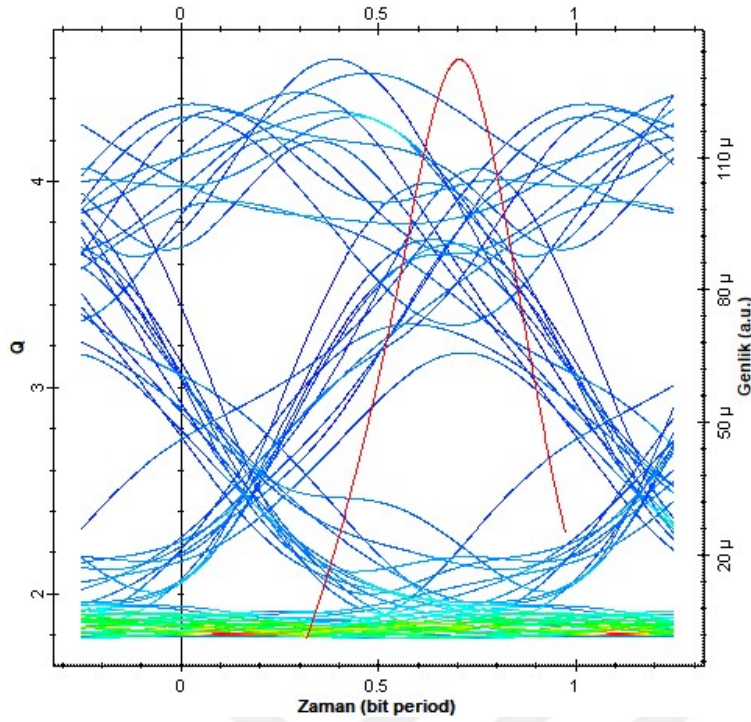
3.2.1. Sistemde NRZ modülasyon formatı kullanılarak elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı 40 Gb/s iletim hızına sahip sistemin, modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach- Zehnder olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2’de optik spektrum analizöründen elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktı incelendiğinde 16 kanal için; TMF’nin zayıflama eğrisi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiğinden ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -8 dBm’lik bir kayıp oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.2. Çıkış optik güç spektrumu

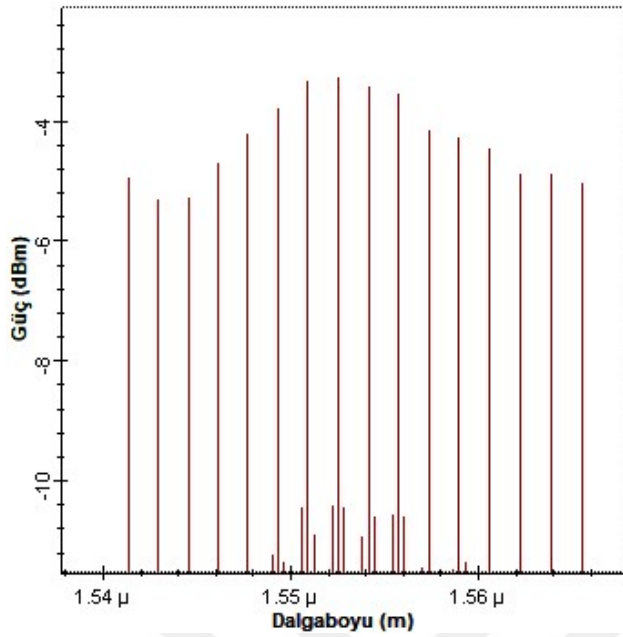
Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.3’te BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı ve yüksekliği belirgin olduğu için sinyalin anlaşılabilir olduğu görülmektedir. Kalite faktör değerinin 4,59118 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.3. Göz diyagramı ve Q faktörü

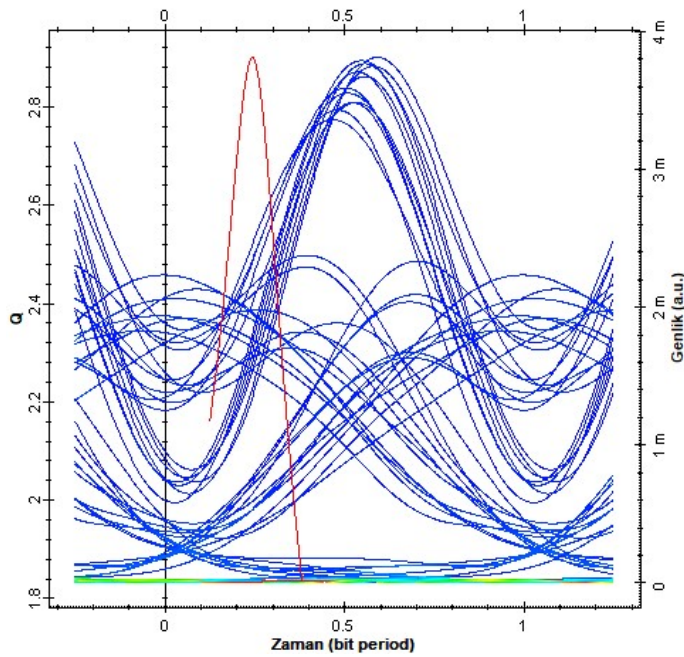
3.2.2. Sistemde RZ modülasyon formatı kullanılarak elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı 40 Gb/s iletim hızına sahip sistemin, modülasyon formatı RZ, modülatörü Mach- Zehnder olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4’te optik spektrum analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktı incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama 5 dBm’lik bir kayıp olduğu görülmüştür.



Şekil 3.4. Çıkış optik güç spektrumu

Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.5'te BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal "1" durumunda bozulmalar oluşmuştur ayrıca göz açıklığı bozulmuş ve yüksekliği belirginliği ve sinyalin iletim kalitesi düşmüştür. Kalite faktör değerinin 2,90113 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.5. Göz diyagramı ve Q faktörü

Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistemde modülasyon formatı olarak önce NRZ, sonra RZ modülasyon formatları kullanılıp ve her iki kullanım için sinyal iletimi optik bir yazılım ile analiz edildiğinde, kalite faktör değerleri Şekil 3 ve Şekil 5 ‘te görüldüğü gibi sırasıyla 4,59118 ve 2,90113 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde RZ modülasyon formatı kullanıldığı durumda, NRZ modülasyon formatı kullanılması durumuna göre kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, göz diyagramı da RZ modülasyon formatı kullanılması durumunda simetrik yapısını kaybetmiştir.

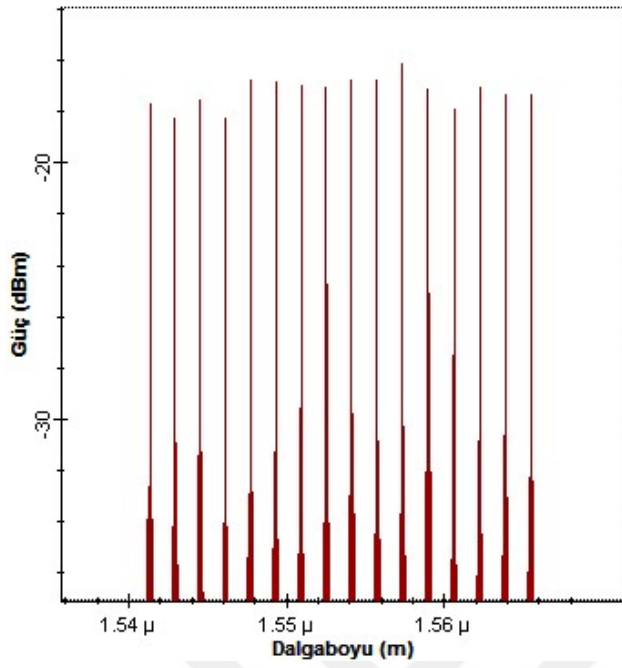
Çizelge 3.2. Modülasyon formatlarına göre elde edilen sonuçlar

Modülasyon Formatı	Kalite Faktörü	BER Değeri
NRZ	4,59118	1,80526e-006
RZ	2,90113	1,77567e-003

3.3.Sistem İletim Kalitesinin Mach-Zehnder Modülatör ve Elektrosoğurum Modülatör Kullanılması Yönünden Karşılaştırılması

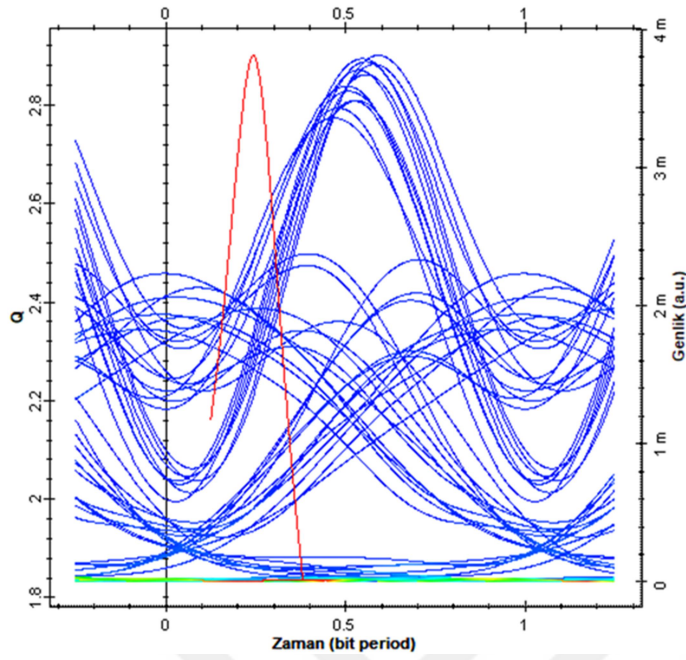
3.3.1. Sistemde Mach-Zehnder modülatör kullanılarak elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı 40 Gb/s iletim hızına sahip sistemin, modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach- Zehnder modülatörü olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6’da optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -8 dBm’lik bir kayıp olduğu görülmüştür.



Şekil 3.6. Çıkış optik güç spektrumu

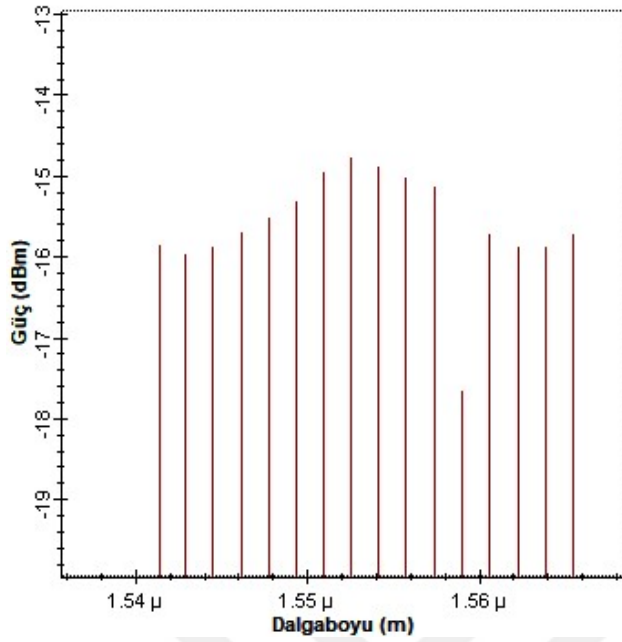
Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.7’de BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı ve yüksekliği belirgin olduğu için sinyalin anlaşılabilir olduğu görülmektedir. Kalite faktör değerinin 4,59118 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.7. Göz diyagramı ve Q faktörü

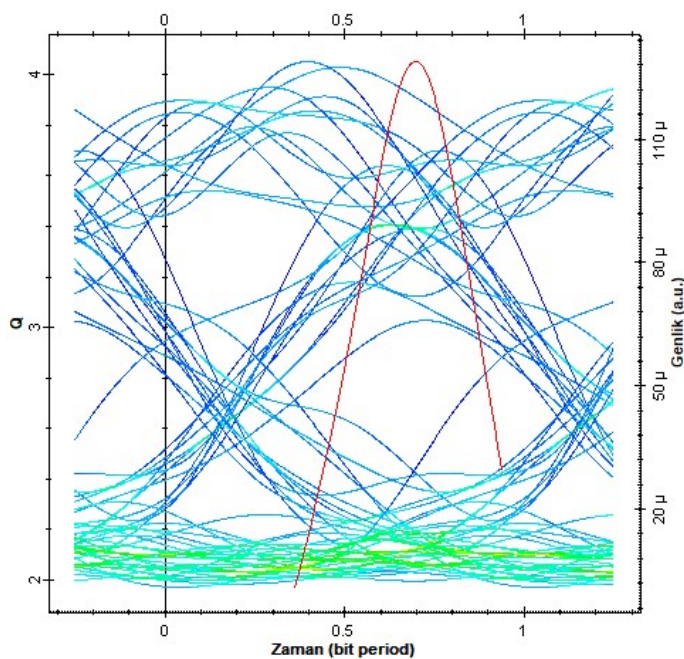
3.3.2. Sistemde Elektrosoğurum modülatör kullanılarak elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı 40 Gb/s iletim hızına sahip sistemin, modülasyon formatı NRZ, modülatörü elektrosoğurum modülatör olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’de optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -6 dBm’lik bir kayıp olduğu görülmüştür.



Şekil 3.8. Çıkış optik güç spektrumu

Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.9’da BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ve göz açıklığı bozulmuş ve yüksekliğin belirginliği ve sinyalin iletim kalitesinin düşmüştür. Kalite faktör değerinin 4,05255 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.9. Göz diyagramı ve Q faktörü

Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistemde; önce Mach-Zehnder modülatör ve sonra elektrosoğurum modülatör kullanılıp, her iki kullanım için sinyal iletilmesi optik bir yazılım ile analiz edildiğinde; kalite faktör değerleri Şekil 7 ve Şekil 9 ‘da görüldüğü gibi sırasıyla 4,59118 ve 4,02304 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde elektrosoğurum modülatör kullanımı, mach-zehnder modülatör kullanımı ile kıyaslandığında kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, elektrosoğurum modülatör kullanımı sonucunda göz diyagramı da simetrik yapısını kaybetmiştir.

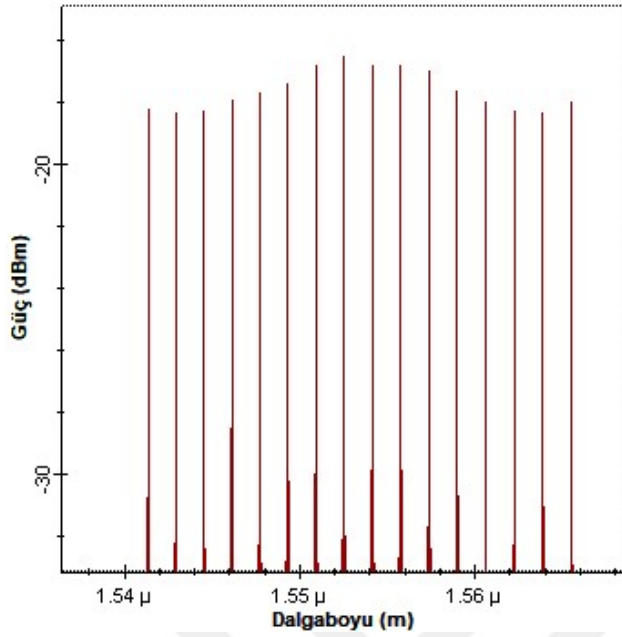
Çizelge 3.3. Modülatör seçimlerine göre elde edilen sonuçlar

Modülatör	BER Değeri	Kalite Faktörü
Mach-Zehnder	1,80526e-006	4,5911
EA	2,46766e-005	4,02304

3.4. Sistemde İletim Kalitesinin İletim Mesafesi Yönünden Karşılaştırılması

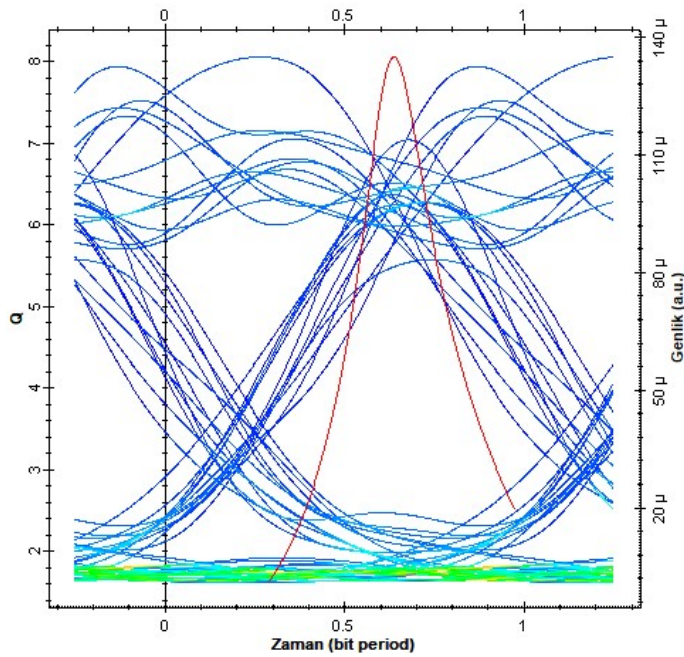
3.4.2. 250 km iletim mesafesi için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı 40 Gb/s iletim hızına sahip, modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach- Zehnder olan sistemin iletim mesafesi 250 km olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10’da optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -8 dBm’lik bir kayıp oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.10. Çıkış optik güç spektrumu

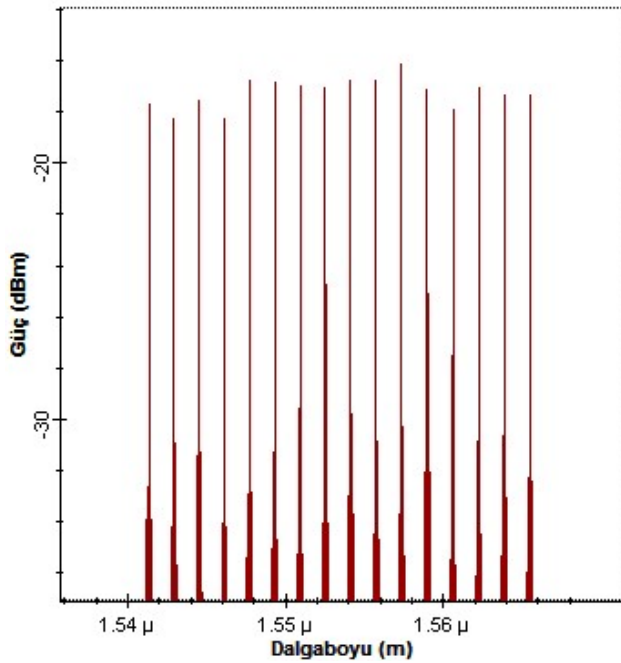
Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.11’de BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz açıklığı ve yüksekliğin belirginliği ve sinyalin iletim kalitesi artmıştır. Kalite faktör değerinin 8,05392 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.11. Göz diyagramı ve Q faktörü

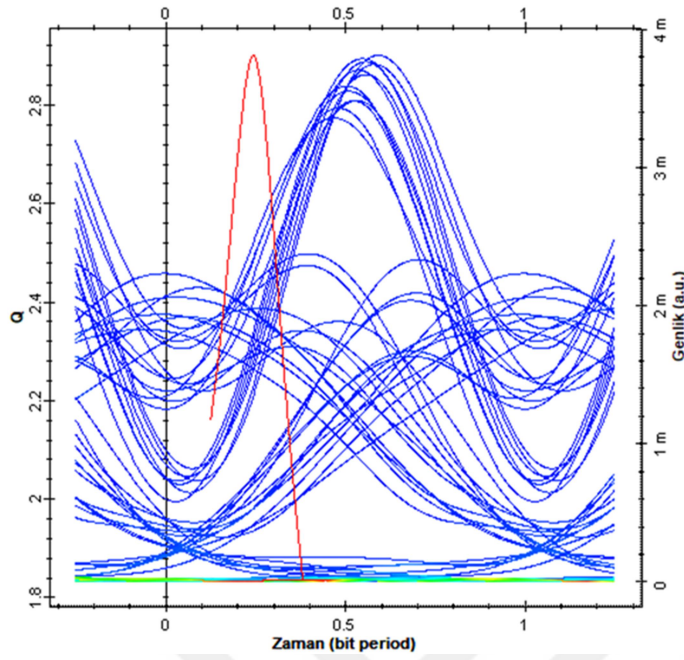
3.4.1. Sistemde 300 km iletim mesafesi için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı 40 Gb/s iletim hızına sahip, modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach- Zehnder olan sistemin iletim mesafesi 300 km olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.12’de optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -8 dBm’lik bir kayıp oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.12. Çıkış optik güç spektrumu

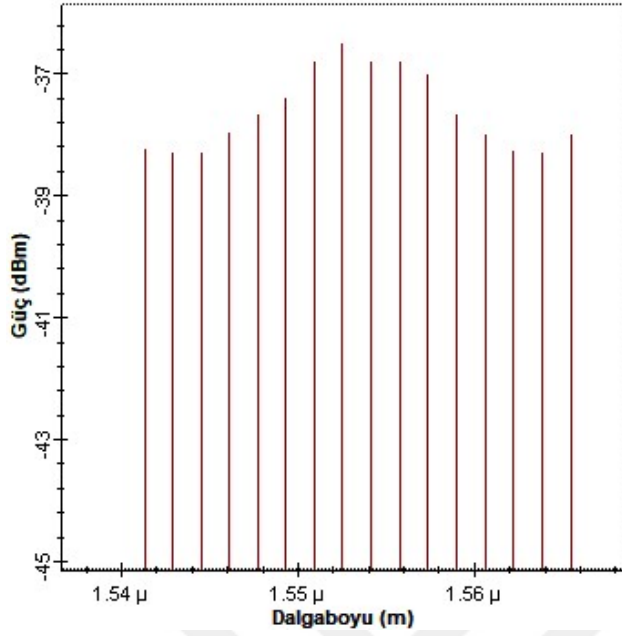
Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.13’te BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı ve yüksekliği belirgin olduğu için sinyalin anlaşılabilir olduğu görülmektedir. Kalite faktör değerinin 4,59118 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.13. Göz diyagramı ve Q faktörü

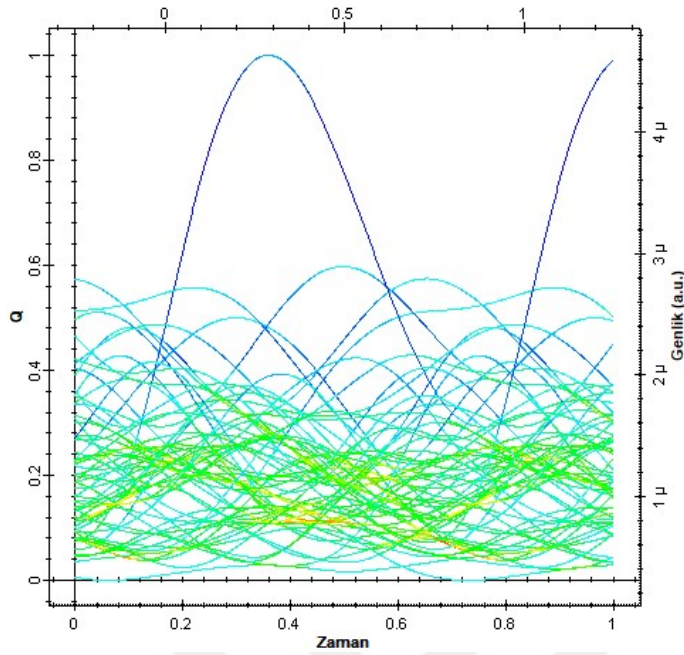
3.4.3. Sistemde 350 km iletim mesafesi için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı 40 Gb/s iletim hızına sahip, modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach- Zehnder olan sistemin iletim mesafesi 350 km olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14’te optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -28 dBm’lik bir kayıp olduğu görülmüştür.



Şekil 3.14. Çıkış optik güç spektrumu

Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.15'te BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal "1" durumunda bozulmalar oluşmuştur ayrıca göz açıklığı ve yüksekliğin belirginliği bozulduğundan, sinyalin anlaşılabilir olmadığı görülmektedir. Kalite faktör değerinin 0 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.15. Göz diyagramı ve Q faktörü

Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistemde; iletim mesafesi sırasıyla 300km, 250 km, 350 km olarak ayarlanıp sinyal iletimi üç durum için de optik bir yazılım ile analiz edildiğinde kalite faktör değerleri; Şekil 11, Şekil 13 ve Şekil 15 ‘te görüldüğü gibi sırasıyla 8,05392 4,5911, ve 0 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde iletim mesafesi arttıkça kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, 300km ve 350 km iletim mesafelerinde 250 km iletim mesafesine kıyasla göz diyagramları da simetrik yapısını kaybetmiştir.

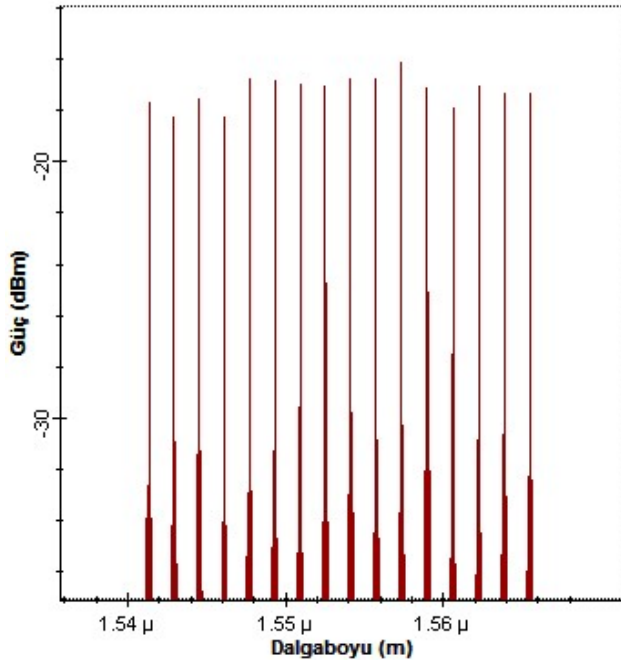
Çizelge 3.4. İletim mesafesine göre elde edilen sonuçlar

İletim Mesafesi	BER Değeri	Kalite Faktörü
250 km	3,50646e-016	8,05392
300 km	1,80526e-006	4,5911
350 km	1	0

3.5. Sistemde İletim Kalitesinin İletim Hızı Yönünden Karşılaştırılması

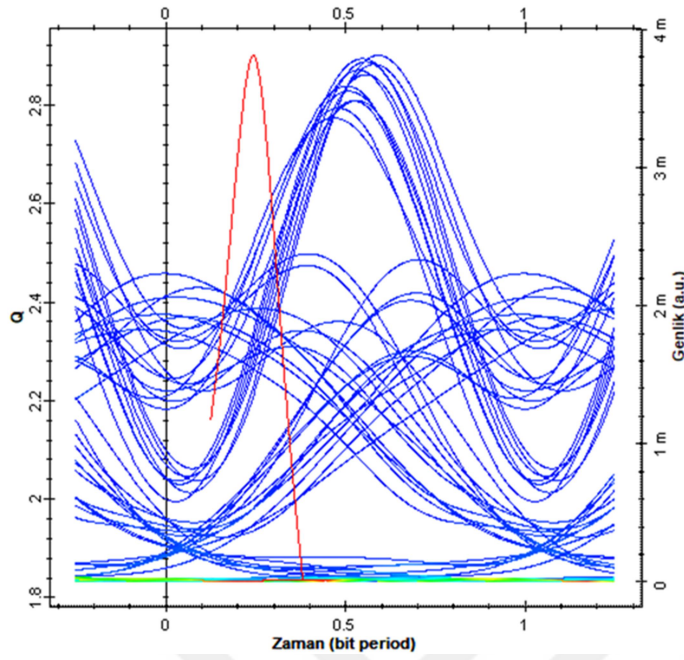
3.5.1. Sistemde 40 Gb/s iletim hızı için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach-Zehnder olan sistemin iletim hızı 40 Gb/s olarak seçildiğinde; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16’da optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -8 dBm’lik bir kayıp oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.16. Çıkış optik güç spektrumu

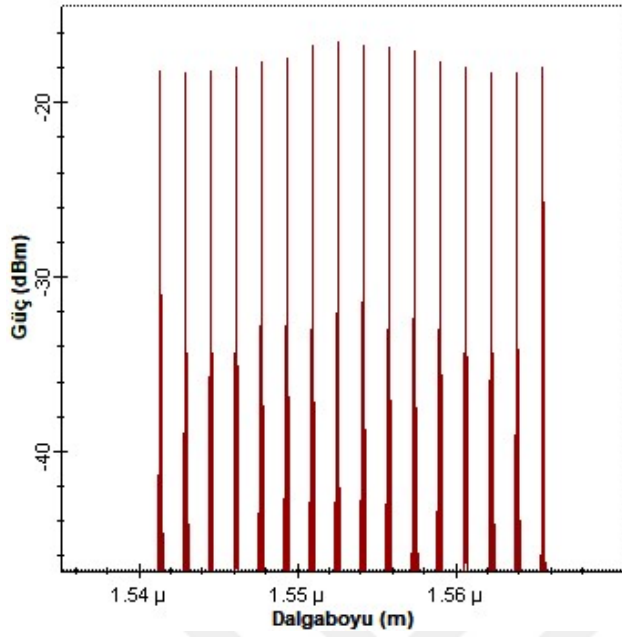
Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.17’de BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı ve yüksekliği belirgin olduğu için sinyalin anlaşılabilir olduğu görülmektedir. Kalite faktör değerinin 4,59118 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.17. Göz diyagramı ve Q faktörü

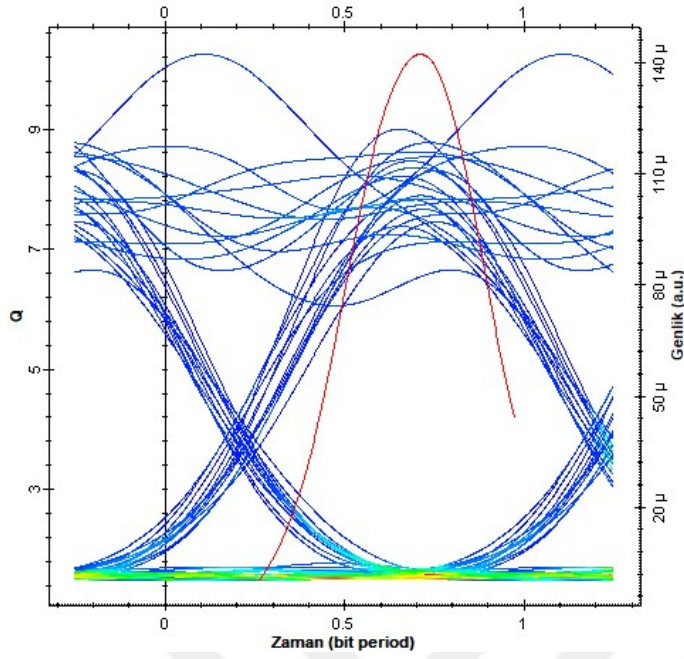
3.5.2. Sistemde 20 Gb/s iletim hızı için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach-Zehnder olan sistemin iletim hızı 20 Gb/s olarak seçildiğinde; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18’de optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -8 dBm’lik bir kayıp olduğu görülmüştür.



Şekil 3.18. Çıkış optik güç spektrumu

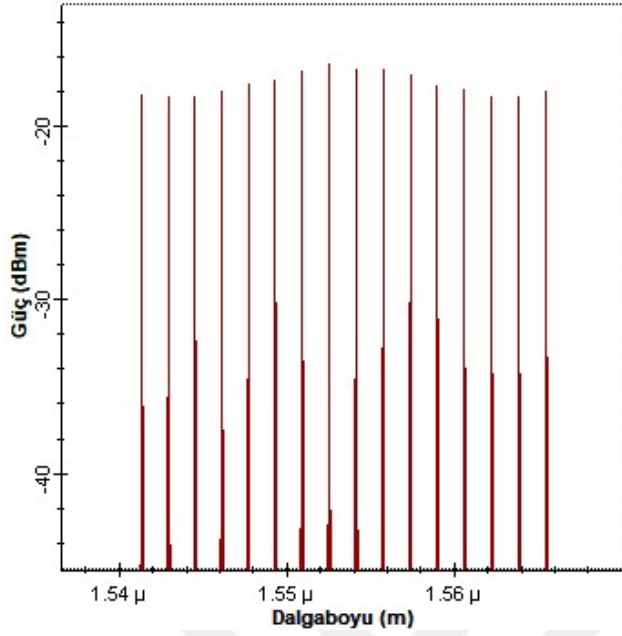
Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.19’da BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı daha simetrik hale gelmiş ve yüksekliğin belirginliği arttığı için sinyalin iletim kalitesinin arttığı görülmüştür. Kalite faktör değerinin 10,2427 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.19. Göz diyagramı ve Q faktörü

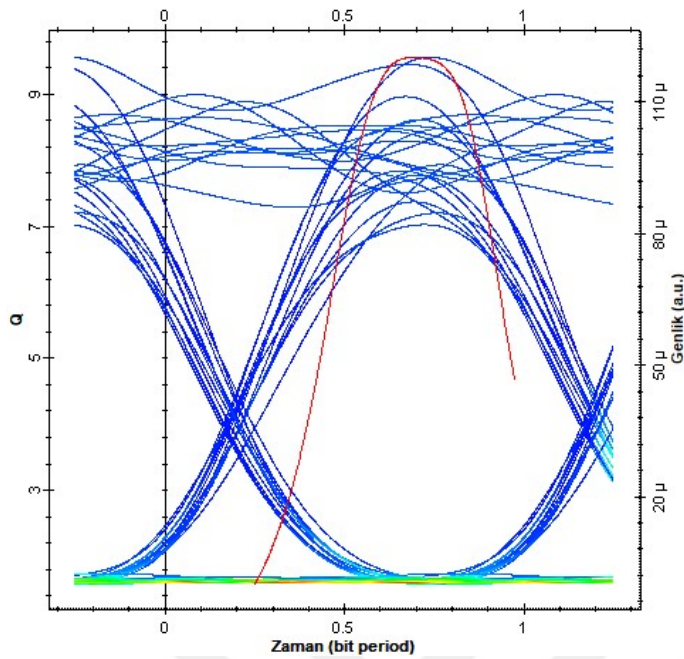
3.5.3. Sistemde 10 Gb/s iletim hızı için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen 16 kanallı modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach-Zehnder olan sistemin iletim hızı 10 Gb/s olarak seçildiğinde; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20’de optik spektrum analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde 16 kanal için; TMF zayıflama eğimi ve EKFY’nin kazanç spektrumu dalgaboyuna bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülür ve malzeme kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda ortalama -8 dBm’lik bir kayıp oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.20. Çıkış optik güç spektrumu

Aynı sistemin simülasyonu sonucunda Şekil 3.21’de BER analizörü ile elde edilen çıktı görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı daha simetrik hale gelmiş ve yüksekliğin belirginliği arttığı için sinyalin iletim kalitesinin arttığı görülmüştür. Kalite faktör değerinin 9,55666 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.21. Göz diyagramı ve Q faktörü

Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistemde; iletim hızı 40 Gb/s, 20 Gb/s ve 10 Gb/s olarak ayarlanıp, sinyal iletimi üç durum için de analiz edildiğinde kalite faktör değerleri Şekil 17, Şekil 19 ve Şekil 21’de ‘de görüldüğü gibi sırasıyla 4,59118, 10,2427 ve 9,55666 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde iletim hızı arttıkça kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, göz diyagramları 40 Gb/s iletim hızında simetrik yapısını kaybetmiştir.

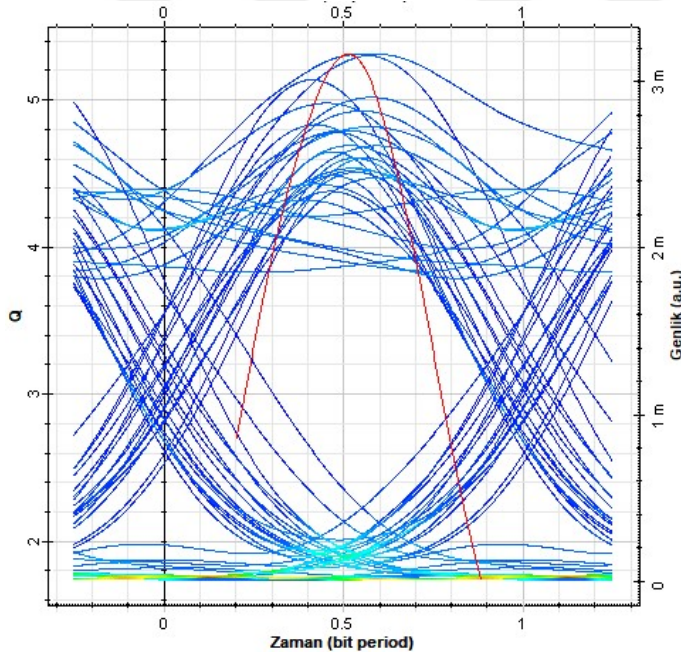
Çizelge 3.5. İletim hızına göre elde edilen sonuçlar

İletim Hızı	BER Değeri	Kalite Faktörü
40 Gb/s	1,80526e-006	4,59118
20 Gb/s	3,34537e-025	10,2427
10 Gb/s	2,87848e-022	9,55666

3.6. Sistemde İletim Kalitesinin Kanal Sayısı Yönünden Karşılaştırılması

3.6.1. 32 kanallı sistem için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach- Zehnder olan sistemin kanal sayısı 32 olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22’de BER analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı ve yüksekliği belirgin olduğu için sinyalin anlaşılabilir olduğu görülmektedir. Kalite faktör değerinin 4,89369 olduğu görülmüştür.

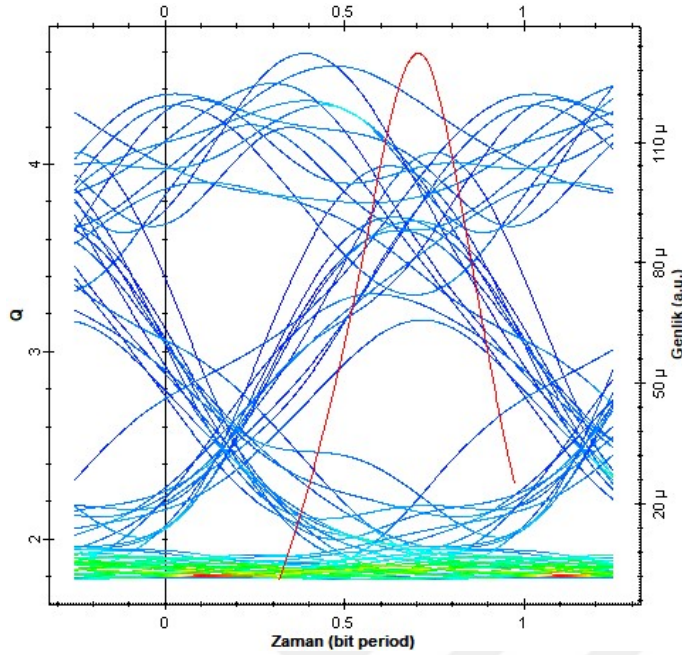


Şekil 3.22. Göz diyagramı ve Q faktörü

3.6.2. 16 kanallı sistem için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.1’de diyagramı verilen modülasyon formatı NRZ, modülatörü Mach- Zehnder olan sistemin kanal sayısı 16 olarak seçilip; optik bir yazılım ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.23’te BER analizörü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu çıktıda göz diyagramı mavi, kalite faktörü ise kırmızı eğriler ile gösterilmiştir. Göz diyagramında sayısal “1” durumunda bozulmalar oluşmuştur ancak göz açıklığı ve

yüksekliği belirgin olduğu için sinyalin anlaşılabilir olduğu görülmektedir. Kalite faktör değerinin 4,59118 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.23. Göz diyagramı ve Q faktörü

Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistemde, kanal sayısı önce 32 kanal ve sonra 16 kanal olarak ayarlanıp sinyal iletimi optik bir yazılım ile analiz edildiğinde; kalite faktör değerleri Şekil 22 ve Şekil 23 ‘te görüldüğü gibi sırasıyla 4,89369 ve 4,59118 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde kanal sayısı azaldıkça kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, 16 kanal seçilmesi durumunda göz diyagramı da simetrik yapısını kaybetmiştir.

Çizelge 3.6. Kanal sayısına göre elde edilen sonuçlar

Kanal Sayısı	BER Değeri	Kalite Faktörü
16 Kanal	1,80526e-006	4,59118
32 Kanal	6,45113e-007	4,89369



4. SONUÇ

Bu çalışmada; uzun mesafeli bir fiber optik iletişim sistemi; veri modülasyon tekniği, veri hızı, fiber uzunluğu, iletilen kanal sayısı yönünden analiz edilmiştir. Bu amaçla; öncelikle Şekil 3.1’de diyagramı verilen sistem oluşturulmuş, sonrasında sistemin alt elemanları incelenmiştir. Sistemin simülasyonu yapılmadan önce optik bir yazılım kullanılarak sistem elemanları için seçilen değerler atanmıştır. Sistemde kanal sayısı 16, modülasyon formatı olarak NRZ, modülatör olarak Mach-Zehnder modülatör seçilmiş, DBC yöntemi kullanılarak uzunluğu 50 km olarak seçilen tek modlu fiber üzerinden sinyal gönderiminin sağlanacağı şekilde sistem tasarlanmıştır. Ayrıca fiber optik iletişimde kaliteyi olumsuz etkileyen dispersiyonu engellemek amacıyla tasarımda dispersiyon kompanzasyonlu fiber kullanılmıştır. Daha sonra optik yazılım aracılığı ile sistem elemanlarının değerleri değiştirilip, iletim kalitesinin nasıl değiştiği sistemin simülasyonu ile analiz edilmiştir. Sistem simülasyonu sonucunda elde edilen BER sonuçları ve kalite değerleri kıyaslanmıştır. Böylece uzun mesafeli iletişimlerde fiber optik sistemler tercih edildiğinde hangi durumlarda sistemde iletim kalitesinin artacağı araştırılmıştır.

Sistemde; modülasyon formatı olarak önce NRZ, sonra RZ modülasyon formatları kullanılıp, her iki kullanım için sinyal iletimi optik bir yazılım ile analiz edildiğinde, kalite faktör değerleri Şekil 3 ve Şekil 5 ‘te görüldüğü gibi sırasıyla 4,59118 ve 2,90113 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde RZ modülasyon formatı kullanıldığı durumda, NRZ modülasyon formatı kullanılması durumuna göre kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, göz diyagramı da RZ modülasyon formatı kullanılması durumunda simetrik yapısını kaybetmiştir.

Sistemde; önce Mach-Zehnder modülatör ve sonra elektrosoğurum modülatör kullanılması ve her iki kullanım için sinyal iletimi optik bir yazılım ile analiz edildiğinde; kalite faktör değerleri Şekil 7 ve Şekil 9 ‘da görüldüğü gibi sırasıyla 4,59118 ve 4,02304 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde elektrosoğurum modülatör kullanımı, Mach-Zehnder modülatör kullanımı ile kıyaslandığında kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, elektrosoğurum modülatör kullanımı sonucunda göz diyagramı da simetrik yapısını kaybetmiştir.

Sistemde; iletim mesafesi sırasıyla 250 km, 300 km, 350 km olarak ayarlanıp sinyal iletimi üç durum için de optik bir yazılım ile analiz edildiğinde kalite faktör değerleri; Şekil 11, Şekil 13 ve Şekil 15 'te görüldüğü gibi sırasıyla 8,05392, 4,5911 ve 0 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde iletim mesafesi arttıkça kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, 300 km ve 350 km iletim mesafelerinde 250 km iletim mesafesine kıyasla göz diyagramları da simetrik yapısını kaybetmiştir.

Sistemde; iletim hızı 40 Gb/s, 20 Gb/s ve 10 Gb/s olarak ayarlanıp, sinyal iletimi üç durum için de analiz edildiğinde kalite faktör değerleri Şekil 17, Şekil 19 ve Şekil 21'de görüldüğü gibi sırasıyla 4,59118, 10,2427 ve 9,55666 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde iletim hızı arttıkça kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, göz diyagramları 40 Gb/s iletim hızında simetrik yapısını kaybetmiştir.

Sistemde; kanal sayısı önce 32 kanal ve sonra 16 kanal olarak ayarlanıp sinyal iletimi optik bir yazılım ile analiz edildiğinde; kalite faktör değerleri Şekil 22 ve Şekil 23 'te görüldüğü gibi sırasıyla 4,89369 ve 4,59118 olarak elde edilmiştir. Yani sistemde kanal sayısı azaldıkça kalite faktöründe düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca BER analizlerindeki grafiklerde görüldüğü gibi, 16 kanal seçilmesi durumunda göz diyagramı da simetrik yapısını kaybetmiştir.

KAYNAKLAR

1. Hayee, M.I. , Willner, A.E. (1999). The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Photonics Technology Letters, *NRZ versus RZ in 10-40-Gb/s dispersion-managed WDM transmission systems*, , 11(8), 991 – 993.
2. Royset, A., Bjornstad, S. and Hjelme, D.R. (1999). IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, *Optimal dispersion management for 40 Gbit/s non-repeated transmission systems using positive and negative dispersion fibre*,1, 364-365.
3. Cheng, K. S., Conradi, J. (2002). IEEE Photonics Technology Letters, *Reduction of pulse-to-pulse interaction using alternative RZ formats in 40-Gb/s systems.*, 14(1), 98-100.
4. Leclerc, O., Lavigne, B., Balmefrezol, E., Brindel, P., Pierre, L., Rouvillain, D. and Seguneau, F. (2003). IEEE Journal of Lightwave Technology, *Optical Regeneration at 40 Gb/s and Beyond* , 21(11), 2779-2790.
5. Yan, L.S., Motaghian Nezam, S. M. R. , Sahin, A. B. , McGeehan, J. E., Luo, T., Yu, Q. and Willner, A. E. (2005). IEEE Journal of Lightwave Technology, *Performance optimization of RZ data format in WDM systems using tunable pulse-width management at the transmitter*, 23(3), 1063.
6. Pardo, O.B., Renaudier, J., Charlet, G. and Mardoyan, H. (2008). IEEE Photonics Technology Letters, *Nonlinearity Limitations When Mixing 40-Gb/s Coherent PDM-QPSK Channels With Preexisting 10-Gb/s NRZ Channels*, 20(15), 1314 – 1316.
7. Sheetal, A., Sharma, A.K. and Kaler, R.S. (2010). Optik, *Impact of optical modulation formats on SPM-limited fiber transmission in 10 and 40 Gb/s optimum dispersion-managed lightwave systems* ,121(3), 246-252.
8. Sheetal, A., Sharma, A.K. and Kaler, R.S. (2010). Optik, *Simulation of high capacity 40 Gb/s long haul DWDM system using different modulation formats and dispersion compensation schemes in the presence of Kerr's effect* , 121(8), 739-749.
9. Chhilar, R., Khurana, J. and Gandhi, S. (2011). International Journal of Computational Engineering & Management (IJCEM), *Modulation Formats In Optical Communication System*, , Vol. 13, 110-116.
10. Sharan, L., Chaubey, V. K. (2012). IEEE 3rd International Conference on Photonics, *Design and simulation of long-haul 32 × 40 Gb/s Duobinary DWDM link in the presence of non-linearity with under-compensated dispersion*, 210-214.
11. Kherici, C., Kandouci, M. (2018). Lecture Notes in Electrical Engineering, *Comparative Study Between the WDM System and the DWDM in an Optical Transmission Link at 40 Gb/s*, 522, 488-498.

12. Senior, J.M. (2009). *Optical Fiber Communications Principles and Practice* (Üçüncü baskı), England: Pearson Education Limited, 1-10.
13. Proakis, J.G., Salehi, M. (2002). *Communication Systems Engineering* (İkinci baskı), New Jersey : Prentice-Hall, 18-25.
14. İnternet: Kızılkaya A., Haberleşme Teorisi, URL:
http://akizilkaya.pamukkale.edu.tr/B%C3%B6l%C3%BCmler_haberlesme.pdf Son Erişim Tarihi: 14.11.2020.
15. Haykin, S., Moher, M. (2008). *Introduction to Analog and Digital Communications* (İkinci baskı), United States of America: John Wiley & Sons, Inc. , 23-30.
16. İnternet: Çakır, Ö., Mete, F. ve Turan B., İletişim Teknolojisinin Gelişimi: Akıllı TelefonaGidenYol,URL:https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/175527/mod_resource/content/1/AKILLI%20TELEFONA%20G%C4%B0DEN%20YOL.pdf , Son Erişim Tarihi: 08.12.2020.
17. Uçkaç Altun, S. (2011). Gümüşhane Üniversitesi İletişim Fakültesi Elektronik Dergisi, *İnsanlığın “Uzaktan Görme” Düşü: Televizyon Ve Alternatif Medya Arayışları*, 1(2), 99-102.
18. Brinkman ,W.F., Haggan, D.E. and Troutman, W. W. (1997). IEEE Journal Of Solid-State Circuits, *A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us* 32(12), 1858.
19. İnternet: A History Of (Communications) Networks, URL:
<https://www.govtech.com/magazines/gt/A-History-Of-Communications-Networks.html> ,Son Erişim Tarihi: 20.12.2020.
20. İnternet: Uydu Haberleşme Sistemleri URL:
http://www.emo.org.tr/ekler/falbff30e2eba01_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sub , Son Erişim Tarihi:05.01.2021.
21. Agrawal, G. P. (1992). *Fiber-Optic Communication Systems* (Üçüncü baskı), New York: John Wiley & Sons,Inc., 1-15.
22. Kaçar M. (2006). *Dünden Yarına Haberleşmenin Serüveni "Nur-i Dîdem Kızım Hâmidem"* İstanbul: Yapı Kredi Yayınları 88-89.
23. İnternet: Optik Telgraf URL: <https://evrimagaci.org/matbaa-ve-telgrafin-golgesinde-kalan-bir-ihtisam-optik-telgraf-nedir-8040> Son Erişim Tarihi:05.05.2021.

24. Karabulut, M. (2019). *Fiber Optik Sistemlerinde Optimizasyon ve Alıcı - Verici Yapıların Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
25. Ketheeswaren, S., Rosilinmary, S. and Visvanath, B. (2009). *Models of Transmission Media For A Library Network: A Comparative Study*, Student Indian UGC-National Seminar on Strategic Information Management in the Digital Er.
26. İnternet: Twisted Pair Cable, URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/twisted-pair-cable>, Son Erişim Tarihi: 15.01.2021.
27. Kaptan, H. (1995). *Fiber Optik Haberleşme Sistemi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
28. Ali, H. (2015). *Modeling and Simulation of High Speed Optical Fiber Communication System with OFDM*, Yüksek Lisans Tezi, College of Physical Science & Technology Central China Normal University, China.
29. İnternet: Fiber Optic Telecommunication
URL:<https://www.coursehero.com/file/14722865/00-STEP-Module-08-for-slide-L1-4/>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2021.
30. İnternet: Optical Fibre, Cables and Systems, ITU Telecommunication Standardization Sector URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.02.2021.
31. İntenet: Optik Modülatör URL: <https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-system-modulation-formats/>, Son Erişim Tarihi: 15.09.2021.
32. Seraji, F., Kiaee, M. S. (2017). Eye-Diagram-Based Evaluation of RZ and NRZ Modulation Methods in a 10-Gb/s Single-Channel and a 160-Gb/s WDM Optical Networks, Scientific & Academic Publishing, 7(2), 31-36.
33. Tarı, E. (2010). *Optik Modülatörlerde Performans Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
34. İnternet: Sayısal Modülasyon Teknikleri ve Simülasyonu URL: https://panel.kku.edu.tr/Content/eem/documents/eem_ornek_proje_raporu.pdf, Son Erişim Tarihi: 03.02.2021.
35. İnternet: Optik Modülatör URL: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-mach-zehnder-modulator.html>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.

36. İnternet: URL: https://www.emo.org.tr/ekler/9b9b93f6ba7ea69_ek.pdf , Son Erişim Tarihi: 17.09.2021.
37. M. M., Ismaila, M.A., Othmana, Z., Zakariaa, M.H., Misrana, M.A., Meor Saida, H.A., Sulaimana, M.N., Shah Zainudina, M. A., Mutaliba, (2013). *EDFA-WDM Optical Network Design System*, 53, 294 – 302.
38. İnternet: Saleh, B. E. A. ve Teich M.C., Fundamentals of Photonics URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471213748>, Son Erişim Tarihi: 05.02.2021.
39. İnternet: Fiber Optik Kablolar URL: <http://www.hasanbalik.com/odevler/anten/fiber%20optik/fiberkablolar.pdf>, Son Erişim Tarihi: 05.02.2021.
40. İnternet: Fiber Optical Communications URL: https://mrcet.com/downloads/digital_notes/ECE/III%20Year/FIBER%20OPTICAL%20COMMUNICATIONS.pdf , Son Erişim Tarihi: 10.02.2021.
41. Maurer, R.D.(1973). Proceedings of the IEEE, *Glass Fibers for Optical Communications*, 61 (4), 452 – 462.
42. İnternet: Basics of Fiber Optics URL: <http://www.fibersystems.com/pdf/whitepapers/Basics-of-Fiber-Optics.pdf> , Son Erişim Tarihi: 25.02.2021.
43. Kachmar, W. M. (2013). *Fiber Optic Cable*, United States Patent.
44. Kachmar, W. M. ,_Nardone, K.C. ve Kleckowski, R.J. (2011). United States Patent, *Foamed Fiber Optic Cable*.
45. Bailey, D. and Wright, E. (2003), *Practical Fiber Optics* (Birinci Baskı), England: Elseiver, 68-75.
46. İnternet: Reflection of Light URL: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/48-reflection-of-light> , Son Erişim Tarihi: 08.03.2021.
47. İnternet: Refraction URL: <https://www.britannica.com/science/refraction>, Son Erişim Tarihi: 11.03.2021.
48. Elliott, B., Crisp, J. (2005). *Introduction to Fiber Optics* (Üçüncü Baskı), England: Elseiver, 11-17.

49. Reddy, M. H. (2014). Journal of Basic and Applied Engineering Research, *Optical Fibers-Principles and Applications*, 1(6), 86-89.
50. Dong, L., Peng, X. ve Thomas, B. K. (2010). United States Patent, *Ultra High Numerical Aperture Optical Fibers*.
51. Rajiv, R. ve Kumar N. S. (2002). *Optical Networks A Practical Perspective* (İkinci Baskı), United States of America: Morgan Kaufmann Publishers, 48-55.
52. Salik, E. (2012). American Journal of Physics, *Quantitative investigation of Fresnel reflection coefficients by polarimetry*, 80(3), 216-224.
53. Mitschke, F. (2016), *Fiber Optics Physics and Technology* (Second Edition), Germany: Springer, 87-90.
54. Laferrière, J., Lietaert, G., Taws, R. ve Wolszczak, S. (2011). *Reference Guide to Fiber Optic Testing* (İkinci Baskı), France: JDS Uniphase Corporation, 10-13.
55. İnternet: Fiber Terimler Sözlüğü <http://fiberkon.com.tr/pages.php?url=fiber-optik-terimler-sozlugu> , Son Erişim Tarihi: 08.02.2021.
56. İnternet: Fiber Optik URL: <https://www.tekniksattgroup.com.tr/uploads/docs/fiber-optik-hakkinda-bilgiler-icin.pdf> , Son Erişim Tarihi: 15.03.2021.
57. Dündar, Ö. (2007). *L-Band Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Analizi Ve Yapay Sinir Ağları İle Kazanç Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
58. İnternet: Lecture 5: Optical fibers URL: http://www.eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/FO/Lect5-Optical%20fibers_2.pdf , Son Erişim Tarihi: 05.01.2021.
59. Al-Azzawi, A. (2007). *Fibre Optics Principles and Advanced Practices* (İkinci Baskı), Boca Raton: Taylor & Francis Group, 75-80.
60. İnternet: Optical Losses URL: <http://research.psut.edu.jo/Project/Puplications/Optical%20losses.pdf> , Son Erişim Tarihi: 20.03.2021.
61. Touhidul Islam A.Z.M. ve Ahmed F. (2020). International Journal of Ambient Systems and Applications (IJASA), *Study Of Attenuation And Bending Losses In Signal Transmission Over Step Index Multimode PMMA Fibers*, 8 (1/2).

62. Islam, J., Islam, S. ve Rahman, M. (2012). Global Journal Of Researches In Engineering, *Dispersion Compensation in Optical Fiber Communication Using Fiber Bragg Grating*, 12 (2), 25-31.
63. Shuravi, K.S. ve Fairouz A. (2016), *Optical Fiber – Dispersion, Construction, Application, Technology, Future*, Department of Electrical and Electronic Engineering, North South University, Bangladesh.
64. Teja, N.R., Babu M.A., Prasad, T.R. and Ravi, T. (2012). International Journal of Scientific and Research Publications, *Different Types of Dispersions in an Optical Fiber*, 2(12).
65. Shenouda, M. (2013). *Temperature Effects in Optical Fiber Dispersion Compensation Modules*, Yüksek Lisans Tezi, University of Waterloo, Canada.
66. İnternet: *Dispersion in Optical Fibers* URL: https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Technical-Notes/WhitePaper/Disp_in_Opt_Fibers_PMD_CD.pdf, Son Erişim Tarihi: 28.03.2021.
67. Geçe, H., (2017). *Uzun Mesafeli Fiber Optik Haberleşme Sistemleri İçin Dispersiyon Kompanzasyon Tekniklerinin Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Ankara.
68. İnternet: Dispersiyon Kompanzasyon Fiberi Kullanılarak Dispersiyon Son Kompanzasyonu URL: <http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/dispersiyon-kompanzasyon-fiberi-kullanilarak-dispersiyon-son-kompanzasyonu/>, Son Erişim Tarihi: 05.04.2021.
69. Meena, M.L. ve Gupta, R.K. (2019). Optik, *Design and comparative performance evaluation of chirped FBG dispersion compensation with DCF technique for DWDM optical transmission systems*, 188, 212-224.
70. Majumder, S.P. (2009), *Dence Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Transmission System With Optical Amplifiers In Cascade*, Department of Computer Science and Engineering, BRAC University, Dhaka, Bangladesh.
71. İnternet: OTDM URL: <https://www.tacs.eu/Analyses/Optical%20Networks/otdm.html>, Son Erişim Tarihi: 10.04.2021.
72. Arief, M., Sevia M. I. ve Alifah, S. (2008). IEEE International RF and Microwave Conference The SCM/WDM system model for radio over fiber communication link, 344-347.
73. Ali,A.H., Alhamdane, H. J. ve Hassen, B.S., (2019). Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, *Design Analysis and Performance Evaluation of*

- the WDM Integration With CO-OFDM System For Radio Over Fiber System*, 15(2), 870.
74. Alatawi K. (2013). *Optics ve Photonics Journal, Performance Study of 1 Tbits/s WDM Coherent Optical OFDM System*, 3, 330-335.
 75. Ali, A. H. (2013). *International Journal of Current Engineering and Technology, Effect of some security mechanisms of the Qos VoIP application using OPNET*, 3(5), 1626-1629.
 76. Armstrong, J. (2009). *Journal of Lightwave Technology, OFDM for Optical Communications*, 27(3), 189-204.
 77. İnternet: Frekans Bölmeli Çoğullama URL: <https://bidb.itu.edu.tr/seyir-defteri/blog/2013/09/07/fdm-frequency-division-multiplexing-frekans-bolmeli-cogullama>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
 78. İnternet: Optical CDMA URL: https://www.brainkart.com/article/Optical-CDMA_13650/, Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
 79. Kumar, S. ve Deen, J. (2014). *Fiber Optic Communications Fundamentals And Applications* (Birinci Baskı), United Kingdom : John Wiley & Sons, Ltd, 389-416.
 80. Hossain S., Howlader, S. ve B., Rinku (2015). *Investigating the Q-factor and BER of a WDM system in Optical Fiber Communication Network by using SOA*, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 13(1), 315-322.
 81. Salim, B., Alamtaha, R., , Samijayani ,N., Rahmatia ,S., Syahriar, A., (2019), *Performance Analysis of Q Factor Optical Communication in Free Space Optics and Single Mode Fiber Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 6(3), 167 – 175.
 82. İnternet: What is BER URL: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95047174-what-is-ber-bit-error-ratio-and-bert-bit-error-ratio-tester>, Son Erişim Tarihi: 19.09.2021.
 83. Sharma, K., Tripathi, J., Nagpal, K., Dep, S. (2014). *Analysis and Estimation of Jitter Sub-Componets* (Birinci Baskı), Germany: Lap Lambert Academic Publishing, 14-16.
 84. İnternet: Eye diagram URL: <https://www.testandmeasurementtips.com/basics-eye-diagrams/>, Son Erişim Tarihi: 19.09.2021.



GAZİLİ OLMAK AYRICALIKTIR.