

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FİBER OPTİK ORTAMDA OFDM TABANLI  
KROMATİK DİSPERSİYON KOMPANZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elk. Elektronik Müh. Ayhan YAZGAN**

**TEMMUZ 2008  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

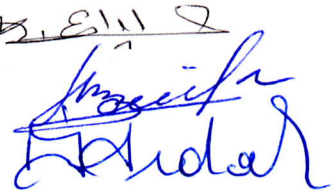
**FİBER OPTİK ORTAMDA OFDM TABANLI KROMATİK DİSPERSİYON  
KOMPANZASYONU**

**Elektrik-Elektronik Mühendisi Ayhan YAZGAN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Elektronik Yüksek Mühendisi"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.06.2008  
Tezin Savunma Tarihi : 03.07.2008**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kemal ERDOĞDU  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Vasif V. NABİYEV  
Jüri Üyesi : Doç. Dr. İ. Hakkı ÇAVDAR**



**Enstitü Müdür V. : Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2008**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılmıştır. Fiber Optik Ortamda OFDM Tabanlı Kromatik Dispersiyon Kompanzasyonu adlı bu çalışmada, optik kromatik dispersiyon kompanzasyonu olmaksızın fiber kanal oluşturulup değişik mesafelerde, değişik hızlarda ve değişik dispersiyon parametresine sahip fiberlerde optik haberleşme linki gerçekleştirilmiştir. Analizi yapılan haberleşme sisteminin bilgisayar benzetimi oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Çalışmamda danışmanlığımı üstlenerek, konu seçiminde ve çalışmaların yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Kemal ERDOĞDU' YA teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Ayrıca yardım ve desteklerini esirgemeyen Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bugüne kadar maddi ve manevi benden desteğini hiç esirgemeyen değerli aileme çok teşekkür ederim.

Ayhan YAZGAN  
Trabzon, 2008

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar DİZİNİ .....	X
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Fiber Optik Malzemeler.....	2
1.2.1. Fiber Optik Kablolar.....	2
1.2.1.1. Basamak İndisli Çok Modlu Fiber Kablolar.....	3
1.2.1.2. Dereceli İndisli Çok Modlu Fiber Kablolar.....	4
1.2.1.3. Basamak İndisli Tek Modlu Fiber Kablolar.....	5
1.2.2. Fiber Optik Vericiler .....	5
1.2.2.1. LED Vericiler .....	6
1.2.2.2. Lazer Diyot Vericiler ve Faz Gürültüsü .....	7
1.2.3. Fiber Optik Alıcılar .....	7
1.2.3.1. PIN Fotodiyotlar .....	8
1.2.3.2. APD .....	9
1.2.4. Fiber Optik Konnektörler .....	10
1.3. Optik Kuplörler.....	10
1.4. Optik Fiberlerde Sinyal Yayılımı .....	11
1.4.1. Geometrik Optik Yaklaşımı.....	13
1.4.2. Dalga Teorisi Yaklaşımı.....	15
1.5. Optik Fiberlerde Dispersiyon .....	21
1.5.1. Modlar Arası (Intermodal) Dispersiyon .....	23
1.5.1.1. Çok Modlu Basamak İndisli Fiberlerde Modlar Arası Dispersiyon.....	23
1.5.1.2. Çok Modlu Dereceli İndisli Fiberlerde Modlar Arası Dispersiyon.....	25

1.5.2.	Kromatik Dispersiyon.....	26
1.5.2.1.	Materyal Kromatik Dispersiyon .....	27
1.5.2.2.	Dalga Boyu Kromatik Dispersiyon .....	29
1.5.2.3.	PMD (Polarizasyon Mod Kromatik Dispersiyon) .....	30
1.6.	Optik Fiberlerde Sinyal Zayıflaması .....	31
1.6.1.	Madde Soğurması Kayıpları .....	32
1.6.2.	Doğrusal Saçınım Kayıpları .....	32
1.6.3.	Doğrusal Olmayan Saçınım Kayıpları.....	33
1.6.4	Işıma Kayıpları .....	34
1.7.	Optik Modülasyon .....	34
1.8.	Optik Demodülasyon.....	36
1.8.1	Optik Doğrudan Algılamalı Alıcı .....	36
1.8.2.	Optik Evre Uyumlu Alıcı .....	37
1.9.	OFDM.....	39
1.9.1.	Dikgenlik Şartı.....	40
1.9.2.	OFDM İşaretin Matematiksel İfadesi .....	41
1.9.3.	Çevrimsel Önek .....	43
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	45
2.1.	Giriş .....	45
2.2.	OFDM İşaretin Oluşturulması .....	46
2.3.	CO-OFDM .....	48
2.3.1.	CO-OFDM İçin Optik Kanal Modeli .....	48
2.3.2.	Semboller Arası Girişim (ISI) Etkisi .....	50
2.3.3.	Lazer Faz Sürüklenmesi ve Kestirimi .....	50
2.3.4.	CO-OFDM Yönteminin Tek Modlu Fiber Üzerinde Başarımı .....	51
2.3.4.1.	5 Gbps Sabit Veri Hızı İçin Elde Edilen Bulgular .....	53
2.3.4.2.	8 Gbps Sabit Veri Hızı İçin Elde Edilen Bulgular .....	60
2.3.4.3.	16 Gbps Sabit Veri Hızı İçin Elde Edilen Bulgular .....	67
2.3.4.4	10 dB Sabit SNR İçin Elde Edilen Bulgular .....	74
3.	SONUÇLAR.....	77
4.	TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	78
5.	KAYNAKLAR.....	79

ÖZGEÇMİŞ

## ÖZET

Optik iletişim sistemleri, fiber optik kabloların haberleşmede kullanılmaya başlanmasından beri optoelektronik malzemeler ve kablo üretim teknolojilerindeki yenilikler sayesinde büyük gelişmeler göstermektedir. Dünya üzerindeki haberleşmenin bel kemiğini oluşturan bu yeni teknolojinin kullanılmakta olan diğer kablosuz haberleşme sistemleriyle de uyumlu olması bu alanda çalışan mühendislerin ve araştırmacıların yeni fikirler üretmesini sağlamaktadır.

Kablo üretim ve optoelektronik malzemelerdeki teknolojik gelişmelerin yanı sıra sinyal işleme ve modülasyon tekniklerinin de gelişmesiyle son yıllarda fiber optik haberleşme alanında yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bunun sonucu olarak günümüzde kullanılan RZ, NRZ gibi OOK modülasyonlu sinyallere alternatif olarak, yeni haberleşme teknikleri fiber optik sistemlere uygulanmakta ve böylece sistem başarımı artmaktadır.

Bu çalışmada kablosuz ağ standartlarında (*802.11a/g, WiFi, HiperLAN2, 802.16 WIMAX*) son zamanlarda sıklıkla tercih edilen OFDM tekniği kullanılarak kromatik dispersiyon kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, yüksek veri hızındaki uzak mesafeli iletişim sistemlerinde OFDM tabanlı fiber optik haberleşme kullanılabileceği bir bilgisayar benzetimi ile sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber Optik Haberleşme, Elektronik Dispersiyon Kompanzasyonu, OFDM, CO-OFDM, Kromatik Dispersiyon.

## SUMMARY

### **OFDM Based Chromatic Dispersion Compensation in Fiber Optic Media**

Optical communication systems have showed great developments thanks to optoelectronic materials and the innovations in cable production technologies since fiber optic cables were started to be used in communication. The compatibility of this new technology which is the backbone of the communication systems in the world with the other wireless communication systems enables engineers and researchers working in this field to produce new ideas.

In addition to technological developments on the cable production and optoelectronic materials, in recent years the studies on the field of fiber optic communication system has accelerated by developing the signal processing and modulation technics. As a result of this, alternative to OOK modulated signals such as RZ, NRZ which are used at present time, new communication technics are applied to fiber optic systems and system performance increases.

In this work chromatic dispersion compansation has been accomplished by using the OFDM technic which is generally preferred for wireless network standarts (802.11a/g, WiFi, HiperLAN2, 802.16 WIMAX ). In this work it is also presented with a Monte Carlo computer simulation that OFDM based fiber optic communication can be used at high data rate on long haul transmission systems.

**Key words:** Fiber Optic Communication, Electronic Dispersion Compensation, OFDM, CO-OFDM, Chromatic Dispersion.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 1.1. Fiber optik kablo katmanları gösterimi .....	3
Şekil 1.2. Basamak indisli çok modlu fiber kablo .....	4
Şekil 1.3. Dereceli indisli çok modlu fiber kablo .....	4
Şekil 1.4. Dereceli indisli tek modlu fiber kablo .....	5
Şekil 1.5. Lazer diyot ile LED'in spektral kıyaslaması .....	6
Şekil 1.6. Fiber optik konnektörler .....	10
Şekil 1.7. Optik yönlü kuplör.....	11
Şekil 1.8. En genel haliyle fiber optik haberleşme yapısı.....	11
Şekil 1.9. Elektromanyetik spektrum.....	12
Şekil 1.10. Geometrik optik yaklaşımında ışığın ilerlemesi .....	13
Şekil 1.11. Geometrik optik yaklaşımında nümerik açıklık gösterimi .....	14
Şekil 1.12. Fiber içinde yayılan değişik modlardaki elektromanyetik dalgalar.....	16
Şekil 1.13. Normalize yayılma sabitinin V sayısına göre değişimi .....	21
Şekil 1.14. Modlar arası dispersiyondan dolayı fiber sonunda oluşan yayılma.....	23
Şekil 1.15. Kromatik dispersiyondan dolayı fiber sonunda oluşan yayılma .....	26
Şekil 1.16. Materyal kromatik dispersiyonun kullanılan dalga boyuyla değişimi.....	27
Şekil 1.17. Dalga boyu kromatik dispersiyonun dalga boyuna göre değişimi .....	29
Şekil 1.18. Polarizasyon mod dispersiyon .....	30
Şekil 1.19. Fiber içinde ışığın zayıflamasının dalga boyuna göre değişimi .....	32
Şekil 1.20. Optik doğrudan modülatör.....	35
Şekil 1.21. Mach-Zehnder modülatör .....	36
Şekil 1.22. Optik doğrudan algılamalı alıcı .....	36
Şekil 1.23. Evre uyumlu alıcı.....	37
Şekil 1.24. OFDM zaman ve frekans bölgesi gösterimi .....	40
Şekil 1.25. OFDM verici blok diyagram .....	43
Şekil 1.26. OFDM alıcı blok diyagram.....	43
Şekil 1.27. OFDM taşıyıcılarından oluşturulan çevrimsel önek.....	44
Şekil 2.1. Birim genlikli 64 adet dikgen sinüzoidal işaretin toplamı.....	46



Şekil 2.2.	64 adet alt taşıyıcının frekans bölgesinde simgesel gösterimi.....	46
Şekil 2.3.	512 adet OFDM alt taşıyıcısının zaman bölgesi gösterimi.....	47
Şekil 2.4.	512 adet OFDM alt taşıyıcısının frekans bölgesi gösterimi .....	47
Şekil 2.5.	CO-OFDM blok diyagramı .....	48
Şekil 2.6.	Tek modlu fiber optik kablo için kanal modeli .....	49
Şekil 2.7.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:100 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	54
Şekil 2.8.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği ...	54
Şekil 2.9.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:1000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	55
Şekil 2.10.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği .	55
Şekil 2.11.	Veri hızı:5 Gbps, Dt:6 ps/(nm.km) ve L:3000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	56
Şekil 2.12.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği .	56
Şekil 2.13.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:100 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	57
Şekil 2.14.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği .	57
Şekil 2.15.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:1000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	58
Şekil 2.16.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği	58
Şekil 2.17.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:3000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	59
Şekil 2.18.	Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği	59
Şekil 2.19.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:100 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	61
Şekil 2.20.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği ...	61
Şekil 2.21.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:1000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	62
Şekil 2.22.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği .	62
Şekil 2.23.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:3000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	63
Şekil 2.24.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği .	63
Şekil 2.25.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:100 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	64
Şekil 2.26.	Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği .	64

Şekil 2.27. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:1000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	65
Şekil 2.28. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği	65
Şekil 2.29. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:3000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	66
Şekil 2.30. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği	66
Şekil 2.31. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:100 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	68
Şekil 2.32. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği .	68
Şekil 2.33. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:1000 km durumunda SNR:4dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	69
Şekil 2.34. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği	69
Şekil 2.35. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L:3000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	70
Şekil 2.36. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği	70
Şekil 2.37. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:100 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	71
Şekil 2.38. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği	71
Şekil 2.39. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:1000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	72
Şekil 2.40. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği	72
Şekil 2.41. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L:3000 km durumunda SNR:4 dB..... (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları.....	73
Şekil 2.42. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği	73
Şekil 2.43. 5 Gbps hızda, 0-3100 km arası mesafeye göre BER değişimi .....	74
Şekil 2.44. 5 Gbps hızda, 0-1800 km arası mesafeye göre BER değişimi .....	74
Şekil 2.45. 8 Gbps hızda, 0-3100 km arası mesafeye göre BER değişimi .....	75
Şekil 2.46. 8 Gbps hızda, 0-1800 km arası mesafeye göre BER değişimi .....	75
Şekil 2.47. 16 Gbps hızda, 0-3100 km arası mesafeye göre BER değişimi .....	76
Şekil 2.48. 16 Gbps hızda, 0-1300 km arası mesafeye göre BER değişimi .....	76

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Geleneksel TE, TM, EH, HE modları ile karşılığı olan $LP_{lm}$ modları .....	18
Tablo 1.2. Optik haberleşme standartlarının kromatik dispersiyon limitleri.....	29
Tablo 1.3. IEEE 802.11.a için zamana bağlı temel parametreler .....	43
Tablo 2.1 Bilgisayar benzetiminde kullanılan temel optik fiber parametreleri.....	52
Tablo 2.2 Bilgisayar benzetiminde 5 Gbps için kullanılan temel OFDM parametreleri... .	53
Tablo 2.3 Bilgisayar benzetiminde 8 Gbps için kullanılan temel OFDM parametreleri... .	60
Tablo 2.4 Bilgisayar benzetiminde 16 Gbps için kullanılan temel OFDM parametreleri. .	67

## SEMBOLLER DİZİNİ

$a$	:	Fiber çekirdek yarıçapı
$A_c(t)$	:	OFDM için alt taşıyıcının zamanla değişen genliği
$arg$	:	Sembol faz açısı
$APD$	:	Çığ Fotodiyot
$B$	:	Manyetik alan vektörü
$B_{opt}$	:	Tek yan bant 3 dB bant genişliği
$BW$	:	Bant genişliği
$BW_{OFDM}$	:	OFDM sembolünün bant genişliği
$B_{SOURCE}$	:	Kaynak bant genişliği
$BER$	:	Bit Hata Oranı
$BPSK$	:	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
$c$	:	Boşluktaki ışık hızı
$CO-OFDM$	:	Koherent Optik OFDM
$CP$	:	Çevrimsel Önek
$DFT$	:	Ayrık Fourier dönüşümü
$D_t$	:	Kromatik dispersiyon parametresi
$D_{PMD}$	:	Polarizasyon mod dispersiyon parametresi
$E$	:	Elektrik alan vektörü
$E_c(t)$	:	Optik taşıyıcı dalga alanı
$E_{(t)}$	:	Zamanla değişen elektrik alan
$E_g$	:	Bant aralığı enerjisi
$eV$	:	Elektrovolt
$FFT$	:	Hızlı Fourier Dönüşümü
$F(M)$	:	Aşırı gürültü faktörü
$f_L$	:	Lazer frekansı
$f_k$	:	OFDM sembolündeki k. alt taşıyıcı frekansı
$f_s$	:	Örnekleme frekansı
$G_{ds}$	:	Doğrudan algılamalı alıcılarda fotodiyot kuantum gürültüsü
$G_{cs}$	:	Koherent alıcılar için fotodiyot kuantum gürültüsü

$GI$	:	Güvenlik aralığı
$G_{th}$	:	Termal gürültü
$IDFT$	:	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü
$IEEE$	:	Elektrik-Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
$IF$	:	Ara Frekans
$IFFT$	:	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
$H$	:	Manyetik alan şiddeti
$h$	:	Plank sabiti
$h_k$	:	Kanalın frekans tepkisinin k. alt taşıyıcı bileşeni
$ICI$	:	Taşıyıcılar Arası Girişim
$ISI$	:	Semboller Arası Girişim
$J$	:	Akım yoğunluğu
$K_m$	:	Modülasyon sabiti
$L$	:	Link uzunluğu
$L_{max}$	:	Maksimum link mesafesi
$L_p$	:	Lineer polarizeli mod
$M$	:	Çarpım faktörü
$MIMO$	:	Çok Girişli Çok Çıkışlı
$n$	:	Ortamın kırılma indisi
$n_{ik}$	:	i. sembol k. alt taşıyıcıya ait gürültü bileşeni
$n_{ik}^{fs}$	:	Alıcıda denkleştirmeden sonra i. Sembol k. alt taşıyıcıya karşılık gelen gürültü
$n_1$	:	Birinci ortamın kırılma indisi
$n_2$	:	İkinci ortamın kırılma indisi
$NA$	:	Nümerik açıklık
$NRZ$	:	Sıfıra Dönüşsüz Anahtarlama
$N_{SC}$	:	OFDM için alt taşıyıcı sayısı
$N_{SD}$	:	OFDM için veri alt taşıyıcı sayısı
$N_{SEMBOL}$	:	OFDM sembol sayısı
$N_{SP}$	:	OFDM için pilot alt taşıyıcı sayısı
$OFDM$	:	Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
$OOK$	:	Açık –Kapalı Anahtarlama
$OTR$	:	Optik-RF modülasyon

$P_{clad}$	:	Kaplamada taşınan güç
$P_B$	:	Brillouin saçınım kaybı
$P_s$	:	İşaret Gücü
$P_n$	:	Gürültü gücü
$P_R$	:	Raman saçınımı kaybı
$P_{total}$	:	Fiberde taşınan toplam güç
$R$	:	Alıcı hassasiyeti
$RF$	:	Radyo Frekansı
$RTO$	:	RF – Optik modülasyon
$RZ$	:	Sıfıra Dönmeli Anahtarlama
$Rbey$	:	Büküm eğrilik
$Rc$	:	Kritik büküm eğrilik yarıçapı
$R_T$	:	Veri hızı
$SNR$	:	İşaret/Gürültü Oranı
$SSMF$	:	Standart Tek Modlu Fiber
$S_{(t)}$	:	Modüle edilecek elektriksel sinyal
$T_{CP}$	:	Çevrimsel önek süresi
$TE$	:	Enine Elektrik Alan
$TM$	:	Enine Manyetik Alan
$T_{max}$	:	Maksimum ışın süresi
$T_{min}$	:	Minimum ışın süresi
$T_S$	:	Örnekleme periyodu
$T_{SYM}$	:	OFDM sembol süresi
$T_U$	:	Faydalı sembol süresi
$v$	:	Fiber ortamında ışık hızı
$V_b$	:	Kırılma voltajı
$WAN$	:	Geniş Alan Ağı
$x_{ik}$	:	Verici çıkışındaki i. sembol k. alt taşıyıcıya karşılık gelen bileşen
$y_{ik}$	:	Alıcıda girişindeki i. sembol k. alt taşıyıcıya karşılık gelen bileşen
$URZ$	:	Tek kutuplu sıfıra dönüşlü anahtarlama
$x_{ik}^{fs}$	:	Alıcıda denkleştirmeden sonra i. sembol k. alt taşıyıcıya karşılık gelen bileşen

$\bar{\varphi}_i$	:	Alıcıda kestirilen sabit lazer faz sürüklenmesi
$\varphi_0$	:	Zamanla değişmeyen sabit faz terimi
$\varphi(t)$	:	Zamanla değişen faz terimi
$\varphi_i$	:	i. sembol için lazer faz sürüklenmesi
$\bar{\phi}_D(f_k)$	:	Alıcıdaki kestirilen alt taşıyıcıya bağlı kendi kendine değişen faz bileşeni
$\varphi_c(t)$	:	OFDM için alt taşıyıcının zamanla değişen fazı
$\varphi_{D(k)}$	:	Kromatik dispersiyon kaynaklı rastgele değişen faz terimi
$\lambda_L$	:	Lazer dalga boyu
$\lambda_c$	:	Kesim dalga boyu
$\beta$	:	Faz sabiti
$\beta_2$	:	Grup hızı dispersiyon parametresi
$\alpha$	:	Zayıflama sabiti
$\alpha_{dB}$	:	dB cinsinden zayıflama sabiti
$\nabla \times$	:	Rotasyonel
$\nabla \cdot$	:	Diverjans
$\epsilon_0$	:	Ortamın bağıl dielektrik sabiti
$\mu_0$	:	Ortamın bağıl manyetik geçirgenliği
$\rho_v$	:	Hacimsel yük yoğunluğu
$\Delta f$	:	Frekans aralığı
$\Delta f_L$	:	Lazer bant genişliği
$\Delta t_1$	:	Fiber girişindeki sinyal periyodu
$\Delta t_2$	:	Fiber çıkışındaki sinyal periyodu
$\Delta \lambda$	:	Dalga boyu aralığı
$\Delta \lambda_L$	:	Lazer dalga boyu aralığı
$\theta_c$	:	Kırılma açısı
$\alpha_{max}$	:	Maksimum kabul açısı
$\sigma$	:	Darbe yayılımı
$\sigma_m$	:	Materyal kromatik dispersiyon kaynaklı etkin darbe yayılımı
$\sigma_s$	:	Modlar arası dispersiyon kaynaklı etkin darbe yayılımı
$\sigma_T$	:	Gauss şekilli ışık darbesinin etkin darbe genişliği
$\alpha_r$	:	Işıma kaybı sabiti
$\delta_{nm}$	:	Kroneker delta fonksiyonu

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Fiberlerin optik haberleşmede kullanılması fikri ilk olarak 1968'de Kao ve Davies tarafından öne sürüldü. O zamanlarda fiberlerin zayıflatması 1000 *dB/km* seviyelerindeydi. 1975'de yarı iletken lazerin ticari ürün olarak üretilmesinden kısa bir süre sonra, 1977'de "Bell Systems and General Telephone" şirketi tarafından ilk örnek fiber optik sistem üzerinden telefon hizmeti sunulmaya başlandı. 1977 ve 1983 yıllarında sistem gelişmeye devam etti ve 1986 fiber optik teknolojisinde bir dönüm noktası oldu. Fiber optik kablo üretimindeki toleransların daralması ve yeni konnektör teknolojilerinin kullanıma alınması ile fiber optik şebekelerin güvenilirliği arttı. Sistem performansının daha az kritik olmaya başlamasıyla 1986 yılından beri veri yönetimi, şebekelerin bakımı ve bilgi iletim kapasitesi üzerindeki çalışmalar yoğunlaştı. Gelişmiş teknolojiler yardımıyla alıcı hassasiyetinin artırılması ve değişik yöntemler ile link mesafesini veri hızı ile birlikte arttırmaya yönelik çalışmalar hız kazandı.

Veri hızının yüksek seviyelere ulaşması, beraberinde daha gelişmiş özellikli materyaller (*doğrusal ve düşük gürültülü yükselteçler, dispersiyon kompanzatörleri*) üretilmesini zorunlu hale getirmektedir. Ancak bu hem maliyeti yüksek hem de uygulanabilirliği kolay olmayan ayrıca uzun süreli araştırma gerektiren bir süreçtir. Doğrusal SSMF (*Standart tek modlu fiber*) kanallarda veri hızının ve link mesafesinin yüksek seviyelere ulaşmasındaki iki büyük engel fiber zayıflatması ve sinyal kromatik dispersiyonu olarak kabul edilmektedir. Yapılan bu çalışmada çok yollu sönümlenmeli kanallar için kablosuz haberleşme standartlarında son zamanlarda sıklıkla kullanılan OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) tekniğinin, doğrusal fiber kanallardaki başarımı incelenmiş ve bir bilgisayar benzetimiyle sunulmuştur.

CO-OFDM üzerine yapılan çalışmalar iki yıl önce başlamış ve zamanla fiber optik haberleşme sistemlerinde RZ, NRZ modülasyonlarının kullanıldığı direk modülatörlere karşı çok iyi bir alternatif olma noktasına gelinmiştir. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda 2007 yılında Xingwen Yi, William Shieh ve Yan Tang, 1000 km mesafede 8 Gbps hızında haberleşmeyi gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca 2007 yılında S.L. Jansen, I. Morita, N. Takeda



ve H. Tanaka “20-Gbps OFDM Transmission over 4,160-km SSMF Enabled by RF-Pilot Tone Phase Noise Compensation” adlı çalışmalarıyla 4160 km mesafede dispersiyon kompanzasyonu olmaksızın 20 Gbps hızında haberleşmeyi gerçekleştirmişlerdir. 2008 yılında W. Shieh, Q. Yang, ve Y. Ma “107 Gb/s coherent optical OFDM transmission over 1000-km SSMF fiber using orthogonal band multiplexing” adlı çalışmalarını sundular. 2008 yılında Eiichi Yamada, Akihide Sano, Hiroji Masuda, Takayuki Kobayashi, Eiji Yoshida, Yutaka Miyamoto, Yoshinori Hibino, Koichi Ishihara, Yasushi Takatori, Kazuyasu Okada, Kazuo Hagimoto, Takashi Yamada ve Hiroshi Yamazaki, “Novel No-Guard-Interval PDM CO-OFDM Transmission in 4.1 Tb/s (50 x 88.8-Gb/s) DWDM Link over 800 km SMF Including 50-GHz Spaced ROADM Nodes” adlı çalışmalarıyla DWDM kullanarak 800 km’de 4.1 Tbps data hızına ulaşabildiler.

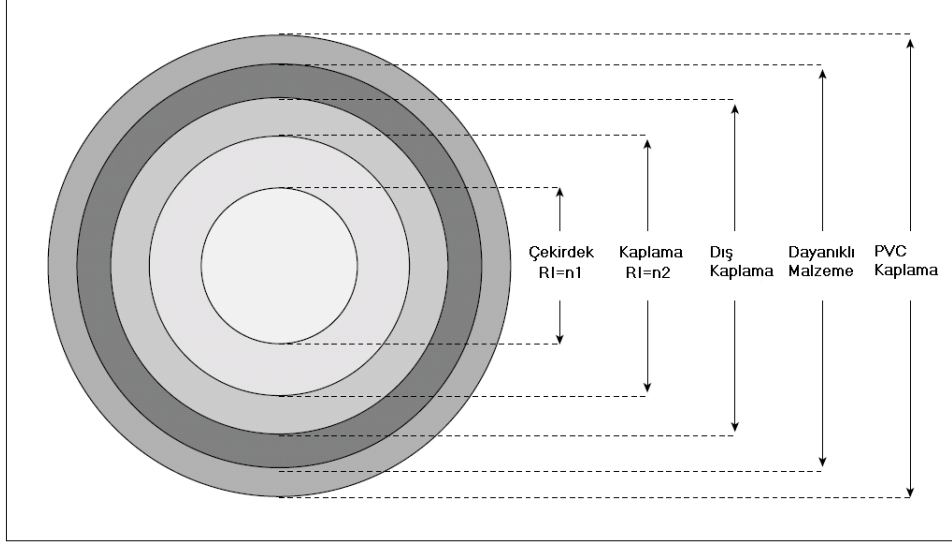
## 1.2. Fiber Optik Malzemeler

Bu kısımda fiber optik haberleşmede kullanılan bazı malzemelerden bahsedilecektir.

### 1.2.1. Fiber Optik Kablolar

Şekil1.1’de bir fiber optik kablonun iç katmanları gösterilmektedir. Işık sadece en içteki cam kısımdan iletilir. Dış kısımlar kabloyu korumak içindir. Haberleşmede fiber optik kabloların kullanılmasının avantajları ve dezavantajları sıralanacak olursa,

1. Güvenilirlik açısından askeri uygulamalarda performansları çok iyidir.
2. Bilgi taşıyıcısı ışık olduğundan elektromanyetik alanlardan etkilenmezler.
3. Değişik çevre koşullarında güvenli olarak kullanılabilirler.
4. Uzun aralıklarla tekrarlayıcı gereksinimi olmasını sağlarlar.
5. Çok yüksek bant genişliği sunarlar (*TeraHertz’ler mertebelerinde*).
6. Bakır kablolarla göre belirli bir mesafeden sonra kanal başına düşen maliyet daha düşüktür.
7. Aşındırıcı sıvı ve gazlardan daha az etkilenirler.
8. -40 dereceden +110 dereceye kadar çalışma olanağı sağlarlar.
9. Daha küçük ve daha hafiftirler.
10. Ham maddesi cam olduğundan doğada bolca bulunurlar.



Şekil1.1. Fiber optik kablo katmanları gösterimi

Dezavantajları ise, kurulum esnasındaki maliyetinin yüksek olması ve fiber kablo döşenmesi için her bölgenin uygun olmamasıdır. Ayrıca iki ayrı fiber kabloyu birleştirmenin zorluğu da bir dezavantaj olarak kabul edilmektedir[1].

Optik fiberlerin yoğun olarak kullanılanları cam fiberlerdir. Kullanımı az olmakla birlikte kısa mesafelerde zayıflatması fazla olan plastik fiberler de tercih edilmektedirler. Plastik fiberler cam fiberlerden maliyet olarak daha ucuzdur. Cam fiberlerin 3 çeşidi vardır.

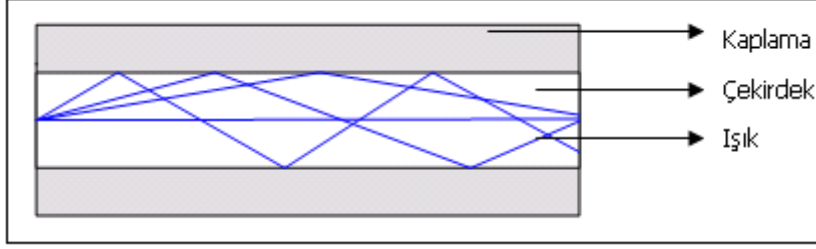
1. Basamak indisli çok modlu fiberler
2. Dereceli indisli çok modlu fiberler
3. Basamak indisli tek modlu fiberler

Basamak indisli tek modlu fiberlerin kaplama kısmı iki ayrı kırılma indisli madde ile oluşturulduğunda kablonun bükülmelere karşı daha dayanıklı olduğu bilinmektedir.

#### 1.2.1.1. Basamak İndisli Çok Modlu Fiber Kablolar

Çok modlu basamak indisli fiberler camdan, plastikten ya da silikadan üretilirler. Çekirdek çapları 100–970  $\mu m$  arasındadır. İlk tasarlanan fiberdir. Zayıflama ve zaman gecikmesi diğer fiberlere göre daha fazla olup pek çok uygulama için çok yavaş kalmaktadır. Ancak fiyatı daha düşüktür ve 5 km' ye varan linkler için çok uygundur. Bu tip fiberlerde çekirdeğin kırılma indisleri kesitin dikine doğru bir değişiklik göstermez.

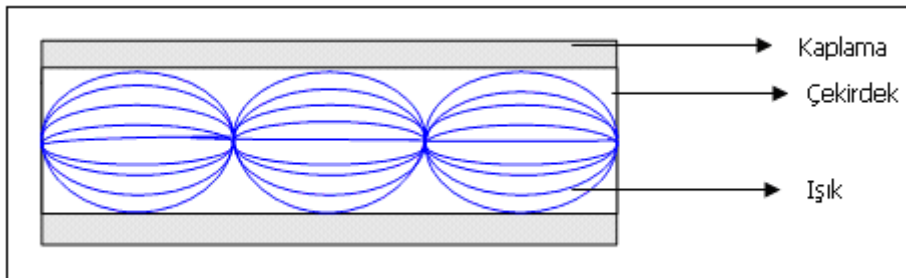
Çekirdeğin çapı çok büyük olduğu için kabul edilen mod sayısı fazladır. Artan mod sayısı modlar arası dispersiyona neden olup uzak mesafelere haberleşmeye engel olmaktadır. Şu anki teknoloji ile çok modlu fiberler, uzak mesafelere yapılan haberleşmede, montajının kolay ve maliyetinin düşük olmasına rağmen kullanılmamaktadır [1].



Şekil 1.2. Basamak indisli çok modlu fiber kablo

### 1.2.1.2. Dereceli İndisli Çok Modlu Fiber Kablolar

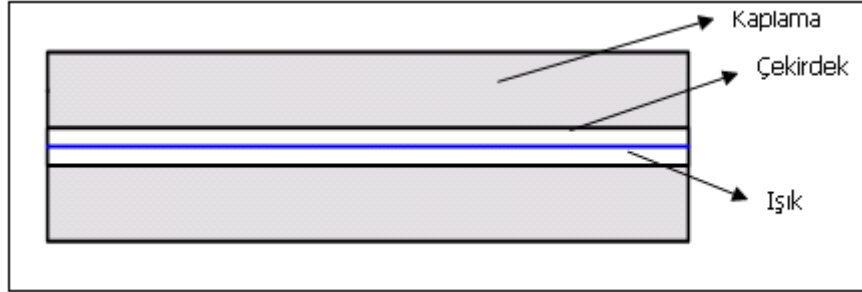
Genellikle camdan üretilen çok modlu dereceli indisli fiberlerde, zayıflama ve zaman gecikmesi, basamak indisli çok modlu fiberlere göre ideale daha yakındır. Çekirdek çapları 50, 62.5 ve 85  $\mu m$ , kaplama çapları 125  $\mu m$ 'dir. Bant genişliği yaklaşık 2 Ghz'dir. Bu tip fiberler veri haberleşmesinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle 62.5/125 fiberler haberleşmede yoğun olarak kullanılan tiplerdir. Dereceli indisli fiberler basamak indisli fiberlerde görülen modal dispersiyonu azaltmak için tasarlanmışlardır. Bunun için çekirdeğin ortasından örtü tabakasına doğru kırılma indisi derece derece azaltılır. Dolayısıyla değişik yollar izleyen ışınlar karşı uca hemen hemen aynı zamanda ulaşır ve böylece dereceli indis fiberler ile kromatik dispersiyon azaltılmış olur [1].



Şekil 1.3. Dereceli indisli çok modlu fiber kablo

### 1.2.1.3. Basamak İndisli Tek Modlu Fiber Kablolar

Camdan üretilen tek modlu fiberlerin çekirdek çapı 5–10  $\mu\text{m}$  ve kaplama çapı 125  $\mu\text{m}$ 'dir. Çekirdek çapının çok küçük olması nedeni ile ışık tek bir eksende ilerler. Işık tek bir eksende ilerlediğinden bant genişliği neredeyse sonsuz olacak şekilde artar. Ancak pratikteki limit yaklaşık 100.000  $\text{Ghz}$ 'dir. Bant genişliği fazla olduğundan WAN uygulamalarında, 100 km'yi geçen linklerde, deniz altı kablolarında tek modlu fiberler kullanılmaktadır. Buradaki belki en önemli nokta çekirdek çapının yeteri kadar küçültülmesiyle sadece ana modun iletilmiş olması ve böylelikle modlar arası dispersiyonun oluşmamasıdır. Bu sayede bilgi kilometrelerce uzağa modlar arası dispersiyon kompanzasyonu gerektirmeden iletilebilir. Son zamanlarda tek modlu fiber üzerine yapılan çalışmaların sonucu olarak tek modlu fiberlerin kaplama kısımlarının kırılma indisleri farklı iki maddeden oluşturulmakta ve bu sayede bükülme kayıpları ve kromatik dispersiyon etkisi daha da azaltılmaktadır. Bu tip kablolar ise tek modlu ikili basamak indisli fiber optik kablo olarak adlandırılırlar [1].



Şekil 1.4. Dereceli indisli tek modlu fiber kablo

### 1.2.2. Fiber Optik Vericiler

Fiber optik haberleşmede vericiler çok önemli bir rol oynar. Vericiler girişine uygulanan elektriksel işareti optik işarete dönüştürür ve bunu fibere ulaştırır. Verici; ara yüz devresi, modülatör devresi ve bir optik kaynaktan oluşur. Ara yüz devresi, giriş sinyalini alır ve modülatör devresi tarafından işlem göreceğe hale çevirir. Fiber optik vericilerde optik sinyal kaynağı olarak LED ya da lazer diyot kullanılır. Optik kaynak elektriksel enerjiyi (*akımı*) optik enerjiye (*ışığa*) çevirir.

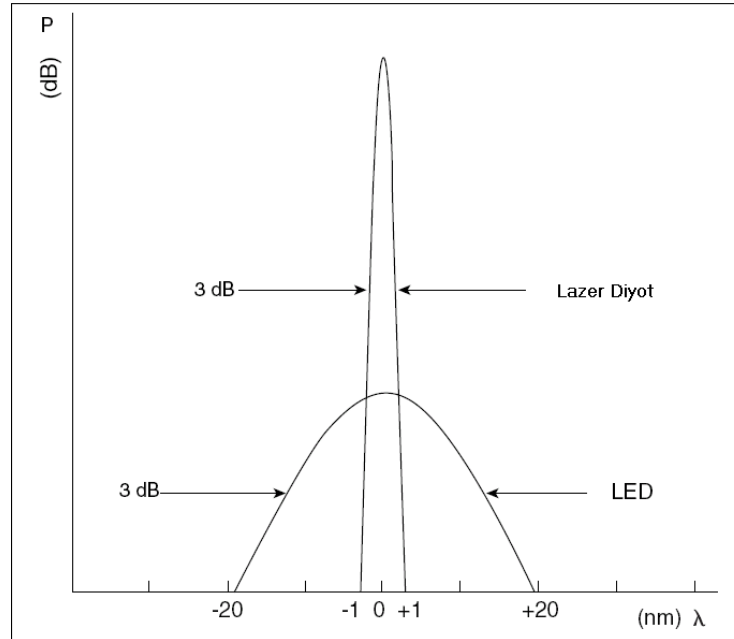
Bir optik vericide olması istenen özellikler şunlardır [2].

1. Fiber çekirdeğiyle karşılaştırıldığında küçük bir yayılım alanı olmalıdır.
2. Yayılan ışık fiberle kolayca birleştirilebilmelidir.
3. Haberleşme için en avantajlı dalga boyunda yayılım yapmalıdır.
4. Yoğun olmalıdır.
5. Cevap süresi kısa olmalıdır.
6. Güvenilir ve ekonomik olmalıdır.
7. Kolayca ve yüksek hızlarda modülasyon yapılabilmelidir.
8. Oda sıcaklığında uzun süre sürekli çalışabilmelidir.

Yukarıda bahsedilen bu özellikleri sağlayabilen iki çeşit verici vardır. Bunlardan birincisi LED'ler ikincisi ise lazerlerdir. Lazerler hem tek modlu hem de çok modlu fiberlerde kullanılırken ledler sadece çok modlu fiberlerde kullanılabilirler [2].

#### 1.2.2.1. LED Vericiler

Yaklaşık 50 Mbps ve aşağı hızlarda optik verici olarak LED kullanılır. Yaklaşık 1.000.000 saat kullanım ömrü vardır. Ucuzdur ve çalışma sıcaklığı düşüktür. Pek çok modda yayılım yaptıklarından çok modlu kaynaklar olarak da bilinirler [2].



Şekil 1.5. Lazer diyot ile LED'in spektral kıyaslaması

### 1.2.2.2 Lazer Diyot Vericiler ve Faz Gürültüsü

Lazer terimi “*Light amplification by stimulated emission of radiation*” kelimelerinin baş harflerinden oluşmuştur. Lazerlerin en büyük özelliği yaydıkları ışığın evre uyumlu (*coherent*) olmasıdır. Yani yayılan ışık aynı dalga boyundadır ve aynı fazdadır. Lazerlerin faz gürültüsü evre uyumlu alıcılarda düşünülmesi gereken bir etkidir. Doğrudan algılanmalı alıcılarda ise bu durumun çok büyük bir etkisi olmamaktadır [2].

İdeal bir lazerde sadece uyarılmış (*stimulated*) yayılım gerçekleşir. Oysa gerçek lazerlerde ek olarak kendi kendine olan (*spontaneous*) yayılım da söz konusudur. Bundan dolayı vericide kullanılan lazerler haberleşme sistemleri için modellenirken (1.1) bağıntısındaki gibi belirlenir [2].

$$E_{(t)} = |E| e^{j\phi_0} e^{j\phi_{(t)}} e^{j2\pi f_L t} \quad (1.1)$$

(1.1) denkleminde  $E_{(t)}$  yayılan optik dalganın lazer çıkışındaki elektrik alan ifadesini;  $\phi_{(t)}$ , kendi kendine olan faz değişimini;  $\phi_0$ , zamanla değişmeyen sabit faz bileşenini;  $f_{LD}$  ise yayılım yaptığı frekansı göstermektedir [2].

Yayıılımın maksimum olduğu dalga boyu (1.2) ile elde edilir.

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.244}{E_g (eV)} \quad (1.2)$$

Bu denklemde  $E_g$ ,  $eV$  cinsinden bant aralığı enerjisidir. Örnek olarak  $Ga$ ,  $Al$  ve  $As$  elementlerinin belirli oranlarda karışımı ile elde edilen bir bileşikte  $E_g = 1.51 eV$   $\lambda = 0.82 \mu m$  bulunur [1].

### 1.2.3. Fiber Optik Alıcılar

Optik alıcılar fiberden gelen optik sinyali tekrar elektriksel sinyale dönüştürürler. Bir fiber optik alıcı, optik bir detektörden, düşük gürültülü bir yükselteçten ve elektriksel sinyali üreten devre elemanlarından oluşur. Optik detektör tarafından alınan optik sinyal,

yükselteç tarafından yükseltilir ve diğer devreler aracılığı ile vericiden gönderilen orijinal elektriksel sinyale çevrilir. Alıcılar optik sinyali gürültü ve sinyal bozulması olmadan yükseltmek ve işlemek zorundadır. Optik sinyal detektörü olarak PIN tipi diyotlar ya da değişik tiplerde fotodiyotlar kullanılmaktadır [2].

Optik alıcılarda olması gereken özellikler sıralanırsa,

1. İstenen dalga boyunda yüksek hassasiyete sahip olmalıdır.
2. Yüksek işaret gürültü oranı (*signal to noise ratio, SNR*) için düşük gürültü seviyesine sahip olmalıdır.
3. Düşük maliyetli olmalıdır.
4. Güvenilir ve ekonomik olmalıdır.
5. Cevap süresi kısa olmalıdır.
6. Uzun ömürlü olmalıdır. Çevre şartlarından etkilenmemelidir.
7. Kuantum ve termal gürültü seviyeleri düşük olmalıdır. Sinyale gürültü eklememelidir.
8. Yüksek hızları desteklemesi için yeterli bant genişliğine sahip olmalıdır.

Optik alıcılarda kullanılan 2 tip fotodiyot vardır: PIN (*Positive-Intrinsic-negative fotodiyot*) ve APD (*Avalanche fotodiyot*). PIN fotodiyotlar, sistemin verici kısmında LED kullanıldığında tercih edilir. Düşük frekanslı modülasyonlarda ve kısa mesafe haberleşmesinde kullanılır. APD'ler ise yüksek hızlı modülasyonlarda ve uzak mesafe haberleşmesinde tercih edilir. [2].

### 1.2.3.1. PIN Fotodiyotlar

En çok bilinen foto detektör PIN fotodiyottur. P-n yarı iletken ekleminden ve arasındaki tabakadan oluşmuştur. Işık diyota açıklığı fiber açıklığı kadar olan küçük bir pencereden girip  $p$  eklemine düşer ve bir elektron tarafından emilir. Detektör kesim dalga boyundan daha aşağıdaki bir dalga boyuna sahip ışığı akıma çevirmez ki bu da  $eV$  cinsinden bant aralığı (*band gap*) enerjisi adı verilen bir parametreye bağlıdır [2].

$$\lambda_c = \frac{h.c}{E_g} = \frac{1.24}{E_g}(\mu m) \quad (1.3)$$

Bir fotodiyotun hassasiyeti ( $A/W$ ) cinsinden birim giriş gücüne karşılık üretilen akım olarak ifade edilir ve  $R$  ile gösterilir.

$$R = \frac{I_0}{P_0}(A/W) = \frac{e.\eta}{h.f} \quad (1.4)$$

Gürültü, fotodiyotta tamamen sıfıra indirilemeyen ve işaret gürültü oranını azaltan bir parametredir. Fiber optik sistemlerde SNR, fotodiyot girişindeki işaret gücünün gürültü gücüne oranı olarak belirlenir. Birleştirme verimi ise (1.5) denklemiyle verilmiştir [2].

$$\eta = \frac{P_{fiber}}{P_{kaynak}} \quad (1.5)$$

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_n} \quad (1.6)$$

### 1.2.3.2. APD

Alıcı hassasiyetini artırmanın bir yolu da PIN fotodiyot yerine akım yükseltmesini yükselteç devresi öncesi kendi içerisinde de yapan APD kullanmaktır. APD, genellikle lazerlerin verici olarak kullanıldığı uzak mesafe haberleşmesinde tercih edilir. Donanımsal olarak dâhili kazancı vardır. Bu sayede hassasiyeti PIN fotodiyota oranla daha yüksektir. PIN fotodiyot gibi yarı iletken malzemeden üretilmiştir. Yüksek hassasiyetinden dolayı alınan gücün sınırlı olduğu haberleşme sistemlerinde kullanılır. Çalışma prensibi kısaca, p-n eklemının p bölgesine düşen ışığın emilmesi ve daha sonra p bölgesindeki elektronların hızlandırıp diğer atomlara etki yapması olarak açıklanabilir. Böylece daha fazla taşıyıcı oluşur. Bu taşıyıcılar daha sonra daha da fazla taşıyıcıya sebebiyet verirler ve çığ (*avalanche*) etkisi oluşur. Bu etki çıkışa akımın çarpımı şeklinde iletilir [2].

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_b}\right)^n} \quad (1.7)$$

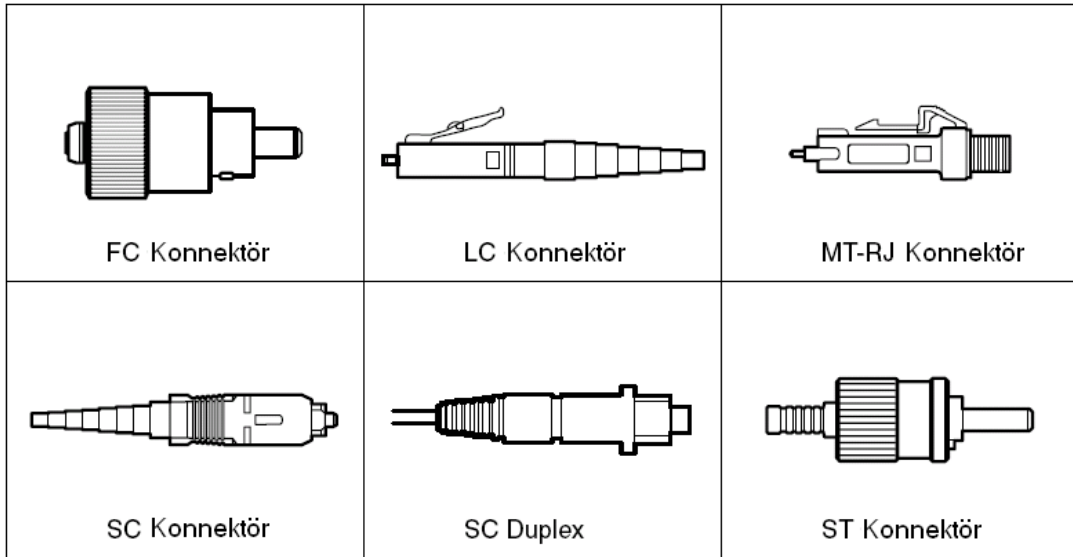
$$R = \frac{I_0}{P_0}(A/W) = \frac{M.e.\eta}{h.f} \quad (1.8)$$



Çarpım faktörü  $M$ , (1.7) formülüyle ifade edilir. Burada  $V$  uygulanan ters besleme voltajı,  $V_b$  kırılma voltajı ve  $n$  de malzemeye bağlı olarak 2.5 ile 7 arasında değişen bir sabiti ifade etmektedir. APD'nin hassasiyeti  $R$  ile belirlenir [2].

#### 1.2.4. Fiber Optik Konnektörler

Konnektörler fiber optik kablo ile verici ya da alıcı arasına eklenen mekanik malzemelerdir. Kullanım yerine ve uygulamasına göre değişen Şekil 1.6'da da görüldüğü gibi çok çeşitli fiber optik konnektörler vardır [3].



Şekil 1.6. Fiber optik konnektörler

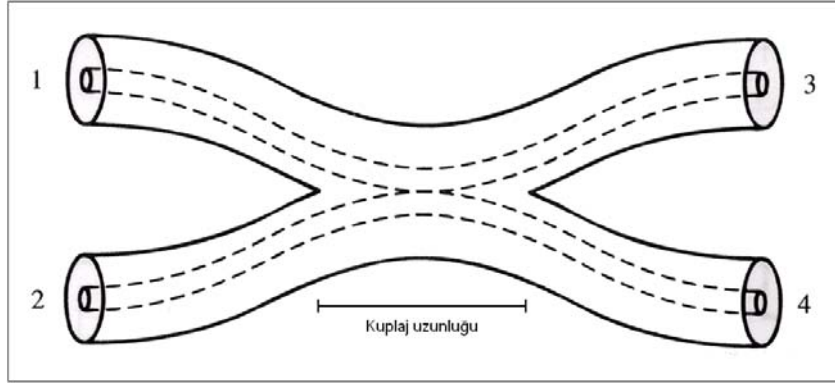
Şekil1.6'da görülen değişik tip konnektörlerin hepsi hem tek modlu hem de çok modlu fiber optik kablolar için kullanılabilir. Konnektörler ışığı zayıflatma oranlarına, takılıp sökülebilmeye kolaylığına, kullanılan malzemenin metal ya da plastik oluşuna göre değişiklik sınıflarda yer alırlar [3].

#### 1.3. Optik Kuplörler

Yönlü kuplörler optik verici ya da alıcılarda sinyalleri birleştirmek ve ayırmak için kullanılırlar. 2x2 kuplör Şekil 1.7'de görüldüğü gibi iki giriş ve iki çıkış kapısından oluşur.

3 ve 4 kaplarına gelecek olan optik sinyal kuplaj katsayısına göre değişir. Eğer kuplaj uzunluğu kuplörün 3 ve 4 kaplarına eşit optik sinyal gidecek şekilde ayarlanırsa, kuplör, 3 dB kuplör adını alır. Kuplörler ölçüm yapmak amaçlı da kullanılabilirler. Ayrıca dalga boyu bağımlı ya da bağımsız olarak üretilebilirler [4].

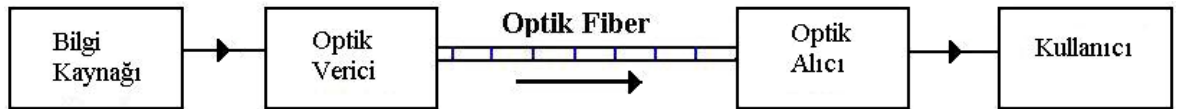
İki fiber kablo Şekil 1.7'deki gibi birbirine belirli uzunlukta yakınlaştırılırsa ışık bir fiberden diğerine kuple olur [4].



Şekil 1.7. Optik yönlü kuplör

#### 1.4. Optik Fiberlerde Sinyal Yayılımı

Daha önceden de bahsedilen genel sebeplerden ötürü fiber, haberleşme ortamı olarak boşluktan ve bakır iletkenli kablodan çok daha iyi bir ortam sağlar.



Şekil 1.8. En genel haliyle fiber optik haberleşme yapısı

Boşlukta yaklaşık 300.000 km/s hızla ilerleyen ışık madde içerisinde maddenin kırılma indisine bağlı olarak değişir.

Işığın dalga boyu ile frekansı arasındaki bağıntı yayılma hızı ile ilişkilidir. (1.9) bağıntısında  $c$  boşluktaki ışık hızını ifade etmektedir. Fiber içerisinde yayılan ışığın dalga boyu ise (1.10) bağıntısıyla elde edilir [4].

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.9)$$

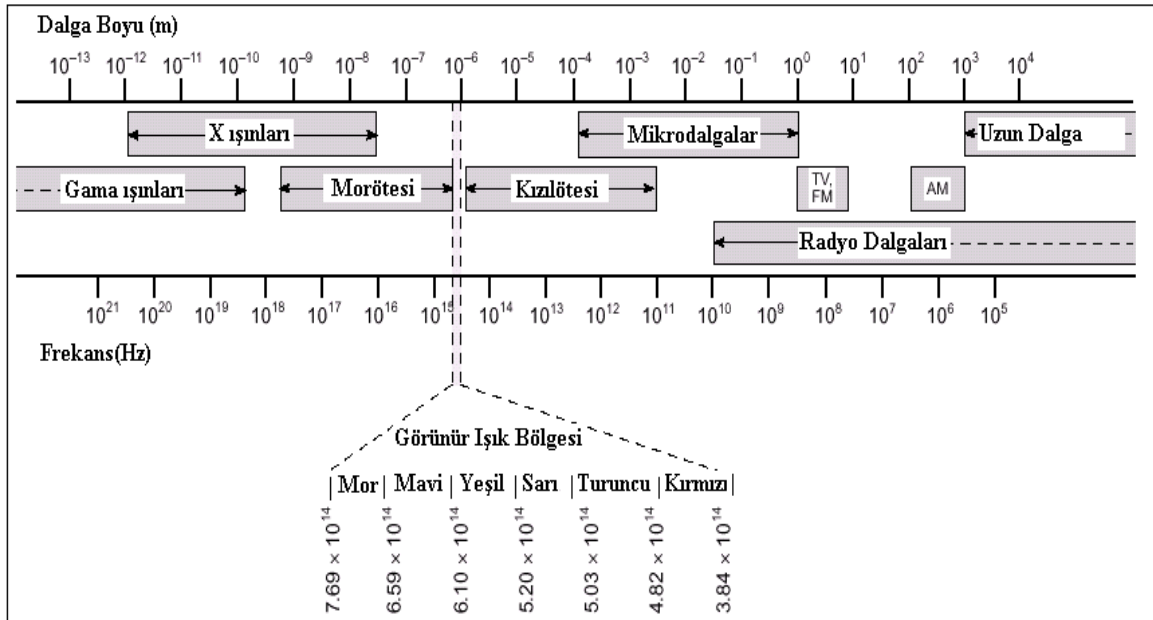
$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.10)$$

Genel olarak Şekil1.8'deki elektromanyetik spektruma bakılırsa fiber optik haberleşmenin hangi frekansları kapsadığını daha ayrıntılı bir şekilde görmek mümkündür.

Optik domende bazen frekans aralığı teriminin dalga boyu aralığı terimine dönüştürülmesi gerekir. Bunun için (1.11) denklemi kullanılmaktadır [4].

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad (1.11)$$

(1.11) denkleminde  $\Delta f$  frekans aralığını,  $\Delta \lambda$  ise dalga boyu aralığını ifade etmektedir. Bu denkleme göre 1550 nm dalga boyunda, 0.8 nm aralığında bir dalga boyu aralığı 100 Ghz' lik bir frekans bandına karşılık gelmektedir [4].



Şekil1.9. Elektromanyetik spektrum

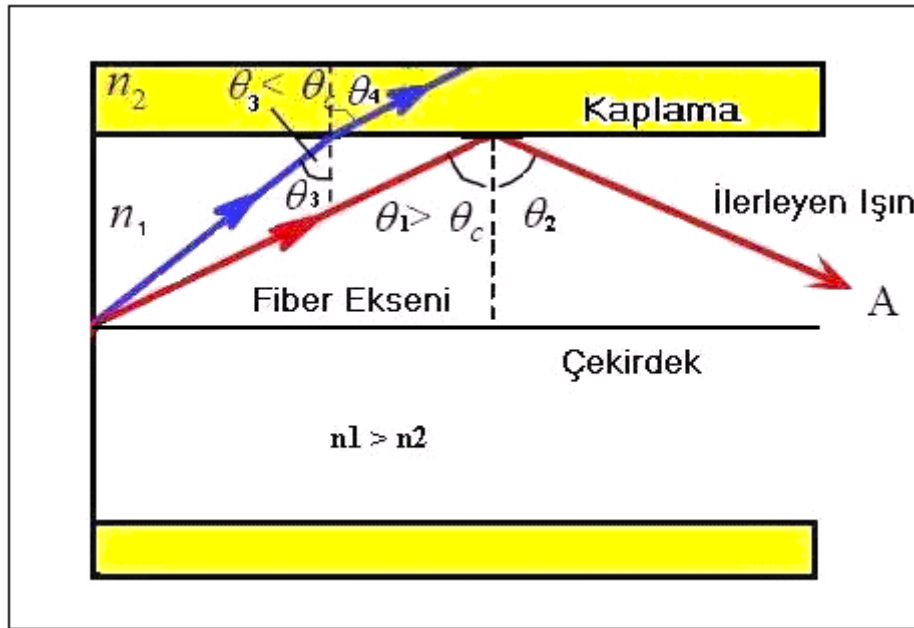
Işık üzerine yıllardan beri yapılan değişik teoriler 3 ana safhada toplanabilir.

1. Işığın çok küçük parçacıklardan oluştuğunu öne süren kuantum (*quantum*) teorisi.
2. Işığın bir elektromanyetik dalga olduğunu savunan elektromanyetik dalga teorisi.
3. Işığın geometrik optik kuralları içinde yayıldığını savunan ışın teorisi.

Kuantum teorisi üzerinde durulmadan elektromanyetik dalga teorisi ve ışın teorisi üzerine genel bilgiler verilecektir. Işın teorisi kesit alanının dalga boyundan çok büyük olduğu durumlarda geçerlidir. Buna çok modlu fiberler örnek olarak gösterilebilir. Elektromanyetik dalga teorisi ise tek modlu fiberlerin analizinde kullanılmaktadırlar.

#### 1.4.1. Geometrik Optik Yaklaşımı

Optik fiber içerisinde ışığın yayılımı geometrik optik yaklaşımı ile kolayca anlaşılabilir. Bu yaklaşım fiber çekirdek çapının dalga boyundan çok büyük olduğu durumlarda kullanılabilir.



Şekil1.10. Geometrik optik yaklaşımında ışığın ilerlemesi

Geometrik optik yaklaşımında ışığın kırılma indisi farklı iki madde arasında (*kaplama ile çekirdek*) düzgün çizgiler halinde yansımaya ve kırılmaya uğrayarak ilerlediği varsayılır. Geometrik optikte Snell yasasına göre gelen açı yansıyan açıya eşit olup kırılma durumunda (1.12) bağıntısı geçerlidir.

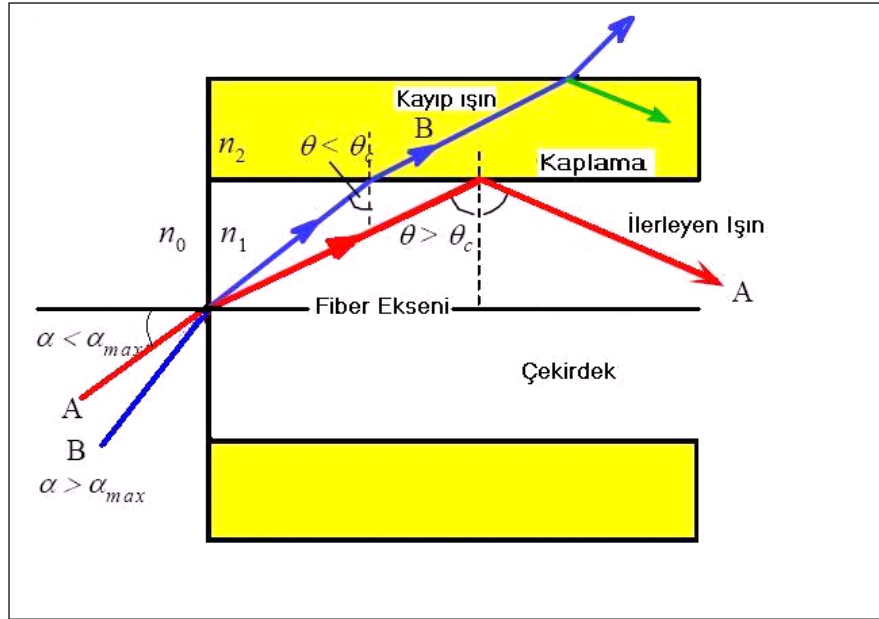
$$n_1 \cdot \sin \theta_3 = n_2 \cdot \sin \theta_4 \quad (1.12)$$

Şekil 1.10'da da görüleceği gibi fiber içerisinde ışının tam yansımalarla ilerleyebilmesi için çekirdeğin kırılma indisinin kaplamanınkinden büyük olması ve çekirdeğe gelen ışının kabul edilebilir bir açı ile gelmesi gerekmektedir.

Ayrıca fiber içerisindeki tam yansımalar için  $\theta_3$  geliş açısı arttığında snell yasasına göre  $\theta_4$  kırılma açısı da artacaktır. Eğer  $n_1 > n_2$  ise  $\theta_4$ 'ün  $90^\circ$  olduğu bir  $\theta_3$  geliş açısı vardır.  $\theta_3$ 'ün daha büyük geliş açılarında ise artık kırılma olmayacaktır. Böylece gelen ışının tüm enerjisi yansıtılmış olacaktır. Bu olay tam yansıma olarak da bilinir. Tam yansıma için gerekli minimum açıya kritik açı denilir ve yukarıdaki gibi  $\theta_c$  ile gösterilip (1.13) denkleminle ifade edilir [4].

$$\theta_3 = \theta_c = \sin^{-1}(n_2 / n_1) \quad (1.13)$$

Geometrik optik yaklaşımında ışık, Şekil 1.10'da ve Şekil 1.11'de görüldüğü gibi fiber içerisinde çekirdek ile kaplama arasındaki seri tam yansımalarla iletilir.



Şekil 1.11. Geometrik optik yaklaşımında nümerik açıklık gösterimi

Işığın fiber içerisinde iletilebilmesi için fiberin özel bir noktaya kadar artabilen bir kabul açısı vardır. Bu açığa  $\alpha$  denirse  $\alpha_{\max}$ 'tan daha büyük  $\alpha$  geliş açılarında tam yansıma olmayıp kırılma olacak ve ışık kaplamadan dışarı çıkacaktır. Geliş açısı  $\alpha = \alpha_{\max}$  olduğunda ise  $\theta = \theta_c$  olur. Fiberin kabul açısını belirleyen parametre Sayısal açıklık (*Numerical aperture*, NA) olarak bilinir ve fiber için önemli bir parametredir. Burada  $n_o$  dış ortamın kırılma indisi olup genelde hava için 1 kabul edilir [4].

$$NA = n_o \cdot \sin(\alpha_{\max}) = n_1 \cdot \cos(\theta_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.14)$$

Nümerik açıklık boyutsuz bir parametredir ve fiberin ışığı toplayabilme yeteneği olarak da bilinir. 0.1 ile 0.5 arası tipik değeri olmakla beraber telekomünikasyonda 0.1 ile 0.2 arasında değişir. Bu değerler de yaklaşık olarak 5.7 ile 11.5 derece kabul açısına karşılık gelmektedir.

Buradan fiberin maksimum kabul açısının sadece kırılma indislerine bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Yine snell yasası kullanılarak (1.15) denklemi elde edilir [4].

$$\alpha_{\max} = \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_o} \right) \quad (1.15)$$

#### 1.4.2. Dalga Teorisi Yaklaşımı

Işık bir elektromanyetik dalgadır ve herhangi bir ortamdaki yayılımı Maxwell denklemlerine bağlıdır. Işığın yayılımı,  $E_{(r,t)}$  elektrik alan ve  $H_{(r,t)}$  manyetik alan vektörlerinin uzaya ve zamana göre değişimi incelenerek belirlenebilir. Burada  $r$ , konum vektörünü ve  $t$  de zamanı göstermektedir. Aşağıda boşluk için geçerli olan Maxwell denklemleri verilmiştir. Denklemlerde  $E$  ve  $B$  sırasıyla elektrik ve manyetik alan vektörlerini;  $J$ , akım yoğunluğunu;  $\rho_v$  ise yük yoğunluğunu ifade etmektedir.  $\nabla \times$  ve  $\nabla \cdot$  operatörleri ise sırasıyla rotasyonel ve diverjansı ifade etmekte olup her bir koordinat sistemi için farklı şekilde tanımlanmaktadır [2-7].

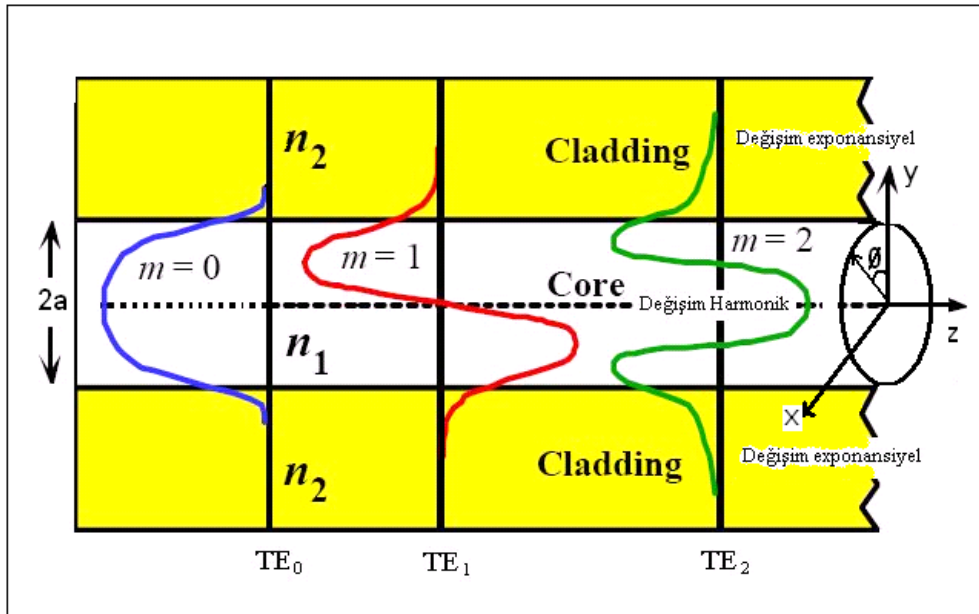
$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.16)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.17)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho_v}{\epsilon_0} \quad (1.18)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.19)$$

Yukarıda bahsedilen denklemler biraz irdelenirse (1.16), Amper yasasının Maxwell tarafından düzeltilmiş halini ifade etmektedir. (1.17), Faraday yasasıdır. (1.18), Gauss yasası ve (1.19) denklemleri ise Manyetik alanda Gauss yasasını ifade etmektedir. Amper yasası, üzerinden akım geçen bir iletken telin etrafında oluşan manyetik alanın telden geçen akıma bağlı olduğunu ifade etmektedir. Faraday yasası, bir iletken telden geçen zamanla değişken bir akımın yakınındaki diğer bir iletken telin uçlarında bir potansiyel fark oluşturduğunu, Gauss yasası ise kapalı bir hacmin içindeki toplam yük miktarının o hacimden dışarı çıkan toplam elektrik akısına eşit olduğunu ifade etmektedir [2-7].



Şekil 1.12. Fiber içinde yayılan değişik modlardaki elektromanyetik dalgalar

Şekil 1.12'de de görüldüğü gibi düzlemsel dalga kılavuzu kırılma indisi  $n_1$  olan yalıtkan maddenin, kırılma indisi  $n_2$  olan iki yalıtkan madde arasında sıkıştırılmasıyla

oluşmuştur. Fiber içerisinde yayılan ışığın kaç modlu olduğu en basit haliyle Şekil 1.12'nin incelenmesiyle anlaşılabilir. Mod derecesi çekirdek kesitindeki alanın sıfır olduğu nokta sayısına eşittir. Alan, çekirdek içerisinde harmonik değişiklik gösterirken, kaplamada (*cladding*) üstel olarak azalmaktadır. Düşük dereceli modlarda alan çekirdeğin merkezinde yoğunlaşmakta ve kaplamaya sızıntı çok az miktarda olmaktadır. Ters olarak yüksek dereceli modlarda ise yoğunluk kenarlara kaymakta ve sızıntı artmaktadır.

Dalga denklemlerinin sınır koşullarını sağlayan her çözümünün bir fiber modu olduğu bilinmektedir. Fiber optik kablolarında ilerleyen elektromanyetik dalga en uygun silindirik koordinat sisteminde ( $r, \phi, z$ ) ifade edilebilir. Bu durumda Maxwell denklemlerinin silindirik koordinat sisteminde ifadesini çıkarmak gerekir [2–7].

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0 \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} = 0 \quad (1.21)$$

$H_z$  ve  $E_z$  sırasıyla manyetik ve elektrik alanın  $z$  bileşenlerini ifade etmektedir. Ayrıca  $c$ , ışığın boşluktaki hızını;  $n$ , ortamın kırılma indisini ifade etmektedir.

(1.22) ve (1.23) ise  $z$  yönünde yayılan bir elektromanyetik dalganın sırasıyla  $E_z$  ve  $H_z$  bileşenlerinin değişimini göstermektedir.

$$E_z(r, \phi, z) = E_z(r, \phi).e^{[-j(\alpha r - \beta z)]} \quad (1.22)$$

$$H_z(r, \phi, z) = H_z(r, \phi).e^{[-j(\alpha r - \beta z)]} \quad (1.23)$$

(1.22) ve (1.23) denklemleri sırasıyla (1.20) ve (1.21)'de yerine konursa (1.24) ve (1.25) denklemleri elde edilir.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \left( \frac{n^2 \omega^2}{c^2} - \beta^2 \right) E_z = 0 \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \left( \frac{n^2 \omega^2}{c^2} - \beta^2 \right) H_z = 0 \quad (1.25)$$



Sınır koşulları gereğince alanın teğetsel bileşenleri  $E_\phi$  ve  $E_z$  'nin dielektrik maddenin içerisindeki değeri, dışarıdaki herhangi bir  $r = a$  noktasındaki değere eşit olmalıdır. Aynı şekilde  $H_\phi$  ve  $H_z$  içinde bu kural geçerlidir. Yayılan mod,  $E_z = 0$  olduğu durumda enine elektrik ya da TE modu,  $H_z = 0$  olduğu durumda enine manyetik ya da TM modu adını alır.  $H_z$  ve  $E_z$  'in hiçbirinin sıfır olmadığı durumda ise hibrit mod adını alır. Bu durumda  $H_z$  ya da  $E_z$  'nin hangisinin enine alana daha fazla katkı yaptığına bakılarak sırasıyla HE ya da EH mod olarak isimlendirilir [2–7].

Silindirik dalga kılavuzu iki boyuta bağlıdır. Bundan dolayı modu tanımlamak için iki tam sayı  $l$  ve  $m$  gereklidir. Böylece  $TE_{lm}$  ve  $TM_{lm}$  modları ortaya çıkacaktır. Bu modlar meridyonal mod olarak ifade edilirler. Burada  $l$ , elektrik alanının duran bir gözlemciye göre  $\phi$  azimut açısı boyunca çekirdek çapı etrafında dönme sayısının  $2\pi$  ile çarpımını ifade eder. Diğer tam sayı  $m$  ise çekirdek merkezinden çekirdek kaplama ara yüzüne kadar yarıçap boyunca oluşan yarı sinüs dalga saykılıının sayısını göstermektedir

Haberleşmede kullanılacak olan fiber optik kabloların  $\Delta \ll 1$  (genelde  $\Delta \ll 0.03$ ) şartını sağlaması yapılacak analizi kolaylaştırmaktadır. Şöyle ki optik fiberler zayıf kılavuzlanmış olarak düşünülebilir. Bu durumda HE-EH modu ortaya çıkar ve hemen hemen  $TE_{lm}$  ve  $TM_{lm}$  molarıyla aynı yayılma sabitine sahip olup dejenere mod olarak adlandırılırlar. Dejenere modlar süper pozisyon yapılarak ortak yayılma sabitine sahip olup HE, EH, TE, TM konfigürasyonundan bağımsız olarak doğrusal kutuplamalı olarak düşünülürler. Bu modların oluşturduğu alan dağılımının ( $E_x$  ya da  $E_y$ ) doğrusal kutuplamalı alan dağılımıyla hemen hemen aynı olduğu gözlemlenmiştir [2-7].

Tablo1.1 Geleneksel TE, TM, EH, HE modları ile karşılığı olan  $LP_{lm}$  modları

Doğrusal kutuplamalı mod	Geleneksel mod
$LP_{01}$	$HE_{11}$
$LP_{11}$	$HE_{21}, TE_{01}, TM_{01}$
$LP_{21}$	$HE_{31}, EH_{11}$
$LP_{02}$	$HE_{12}$
$LP_{31}$	$HE_{41}, EH_{21}$
$LP_{12}$	$HE_{22}, TE_{02}, TM_{02}$
$LP_{lm}$	$HE_{2m}, TE_{0m}, TM_{0m}$
$LP_{lm} (l \neq 0 \text{ yada } 1)$	$HE_{l+1,m}, EH_{l-1,m}$

(1.22) ve (1.23) denklemlerinde  $z$  yönünde yayılan ve yayılma sabiti  $\beta$  olan bir elektromanyetik dalganın matematiksel ifadesi verilmiştir. Ancak bu dalganın periyodik olması gerektiğinden  $\phi$ 'ye olan bağıllığının da ifade edilmesi gerekmektedir.

$$H_z(r, \phi, z) = H_z(r).e^{(-jl\phi)}.e^{[-j(\omega t - \beta z)]} \quad (1.26)$$

$$E_z(r, \phi, z) = E_z(r).e^{(-jl\phi)}.e^{[-j(\omega t - \beta z)]} \quad (1.27)$$

$l = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  olduğu bilinmektedir. Yukarıdaki iki denklem birleştirilirse aşağıdaki Bessel diferansiyel denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left( \frac{n^2 \omega^2}{c^2} - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) E_z(r) = 0 \quad (1.28)$$

SI fiberlerde kırılma indisi değiştiğinde  $n$ ,  $n_1$ 'den  $n_2$ 'ye doğru değişir. Bundan dolayı çekirdek için (1.29), kaplama için de (1.30) tanımlanır.

$$\beta_1 = n_1 \frac{\omega}{c} \quad (1.29)$$

$$\beta_2 = n_2 \frac{\omega}{c} \quad (1.30)$$

Dalganın kılavuzlu kalma koşulu ise  $\beta_1 < \beta_{lm} < \beta_2$  olarak belirlenir.  $\beta_{lm}$  dalganın yayılma sabiti olarak adlandırılır.

$$u_{lm}^2 = \beta_1^2 - \beta_{lm}^2 \quad (1.31)$$

$$\omega_{lm}^2 = \beta_{lm}^2 - \beta_2^2 \quad (1.32)$$

(1.31) ve (1.32) tanımları sırasıyla çekirdek ve kaplama için yapıldığında eğer denklemlerin sağ tarafları pozitif oluyorsa  $u_{lm}$  ve  $\omega_{lm}$  gerçel demektir. Böylece Bessel diferansiyel denklemi çekirdek bölgesi ve kaplama bölgesi için ayrı ayrı yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left( u_{lm}^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) E_z(r) = 0 \quad r < a \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left( \omega_{lm}^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) E_z(r) = 0 \quad r > a \quad (1.34)$$

Yukarıdaki denklemler  $r = 0$  'da sonsuza gitmekte olup  $J_{(x)}$  ve  $K_{(x)}$  ile ifade edilen Bessel fonksiyonları cinsinden çözümleri yapılabilir.

$$E_z(r, \phi) \approx \begin{cases} J_1(u_{lm}r) \cos(l\phi) \dots \dots r < a \dots \dots \text{çekirdek} \\ K_1(\omega_{lm}r) \cos(l\phi) \dots \dots r > a \dots \dots \text{kaplama} \end{cases} \quad (1.35)$$

Aynı yaklaşımla  $H_z(r, \phi)$  'de elde edilebilir.  $E_z$  ve  $H_z$  bileşenleri bilindiğinde ise Maxwell denklemlerinden  $E_r(r, \phi), H_r(r, \phi), E_\phi(r, \phi), H_\phi(r, \phi)$  bileşenleri de elde edilebilir [2-7].

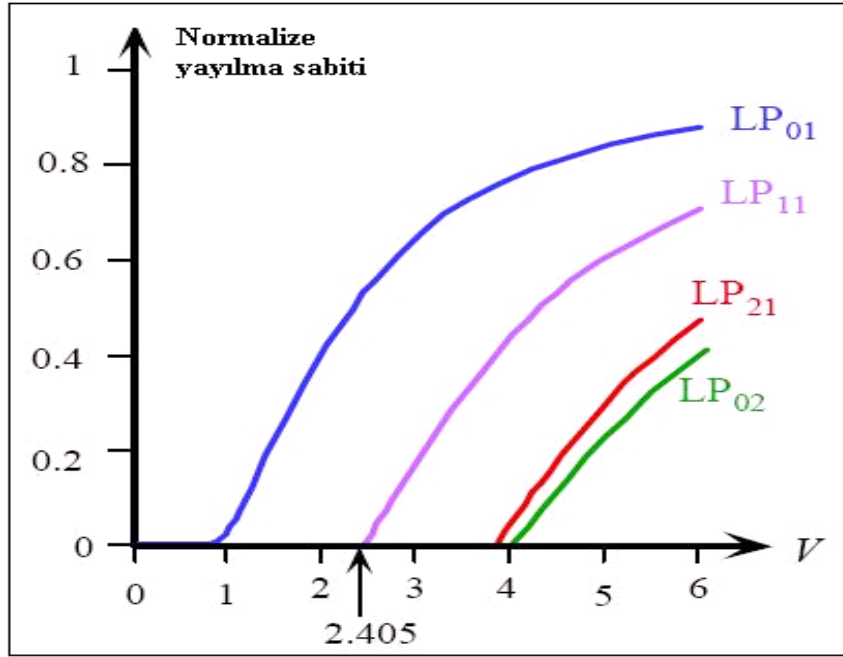
Şekil.12'de normalize yayılma sabitine karşılık  $V$  sayısı grafiği verilmiştir. Bu grafikten de anlaşılacağı gibi her mod sadece  $V$  sayısı belli bir değeri aşınca ortaya çıkmaktadır. Ayrıca  $V$  sayısı 2.405 sayısının altına indiğinde sadece tek modlu yayılım gerçekleşmektedir. Bundan dolayı tek modlu yayılım için (1.36)'deki denklemler yazılabilir. Burada  $\lambda_c$ , kesim dalga boyunu ifade etmektedir.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2.405$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.36)$$

$$a = \frac{2.4\lambda}{2\pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}$$

(1.36)'daki denklemlerde fiber içerisindeki ışığın yayılımının tek modlu olabilmesi için olması gereken maksimum çekirdek yarıçapı görülmektedir.



Şekil 1.13. Normalize yayılma sabitinin V sayısına göre değişimi

Yaklaşık bir ifadeyle çok modlu bir fiberde yayılabilecek mod miktarı (1.37) ve (1.38) denklemleriyle belirlenebilir. [2-7].

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (1.37)$$

$$\frac{P_{clad}}{P_{total}} = \frac{2\sqrt{2}}{3V} \quad (1.38)$$

### 1.5. Optik Fiberlerde Dispersiyon

İletişim ortamı olarak fiber kullanıldığında, uzak mesafelere ve yüksek veri hızlarına ulaşıldığında sınırlayıcı etkilerden birinin dispersiyon olduğu rahatlıkla söylenebilir. Çünkü dispersiyon, alıcı tarafta yüksek hızlarda sinyaller arası girişime sebep olmakta ve sinyallerin tekrar ayrıştırılmasına olanak vermemektedir. Değişik dispersiyon çeşitleri ve bunların birbirinden farklı oluşum sebepleri vardır. Farklı modlarda yayılım olduğunda ışık farklı yolları alarak alıcıya ulaşır ve bu da sinyalin fiber çıkışında zaman domeninde yayılmasına neden olur. Bu modlar arası (*intermodal*) dispersiyon olarak bilinir. Tek modlu fiberlerde mod içi (*intramodal*) dispersiyon oluşur. Fiber yapısının taşıyıcı frekansa bağlı olmasından dolayı ve kırılma indisinin çok az da olsa değişim göstermesinden

kaynaklanır. Genel olarak materyal (*material*) kromatik dispersiyon ve dalga kılavuzu (*waveguide*) kromatik dispersiyon olmak üzere 2 çeşidi vardır. Çok modlu fiberlerde de kromatik dispersiyon vardır ancak modlar arası dispersiyon etkisi çok daha fazla olduğundan ihmal edilebilir.

Açıklayıcı olması açısından bir örnek verilirse  $t$  süreli bir dijital sinyalin verici tarafından gönderildiği varsayalım. Alıcıdaki sinyal her iki taraftan  $t/2$  olmak üzere kromatik dispersiyona uğrayacak ve toplam sinyal süresi  $2t$  olacaktır. Böylece yaklaşık olarak veri hızı (1.39) bağıntısıyla belirlenebilir [2-7].

$$R_t = \frac{1}{2t} \quad (1.39)$$

Daha kesin bir sonuç ise alıcıdaki işareti  $\sigma_T$  genişlikli gauss dağılımına benzetilerek elde edilir. Bu durumda toplam çıkış gücü (1.40) ile ifade edilir.

$$P_0(t) = e^{\left[ \frac{-t^2}{2\sigma_T^2} \right]} \quad (1.40)$$

(1.40) ifadesinin Fourier dönüşümü alınırsa (1.41) denklemi elde edilir.

$$P(w) = \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_T \cdot e^{\left[ -\frac{w^2 \cdot \sigma_T^2}{2} \right]} \quad (1.41)$$

Tek yan bant 3 dB bant genişliği gücün yarıya düştüğü frekans olarak bilinmektedir. Böylece,  $\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_T$  değerinin yarıya düştüğü değeri bulmak için (1.42) bağıntısı yazılıp tek yan bant 3 dB bant genişliği bulunabilir. Bu değer  $B_{opt}$  ile ifade edilmiştir.

$$e^{\left[ -\frac{w^2 \cdot \sigma_T^2}{2} \right]} = 0.5 \quad (1.42)$$

$$2\pi B_{opt} = \frac{\sqrt{2}}{\sigma_T} [\ln 2]^{\frac{1}{2}}$$

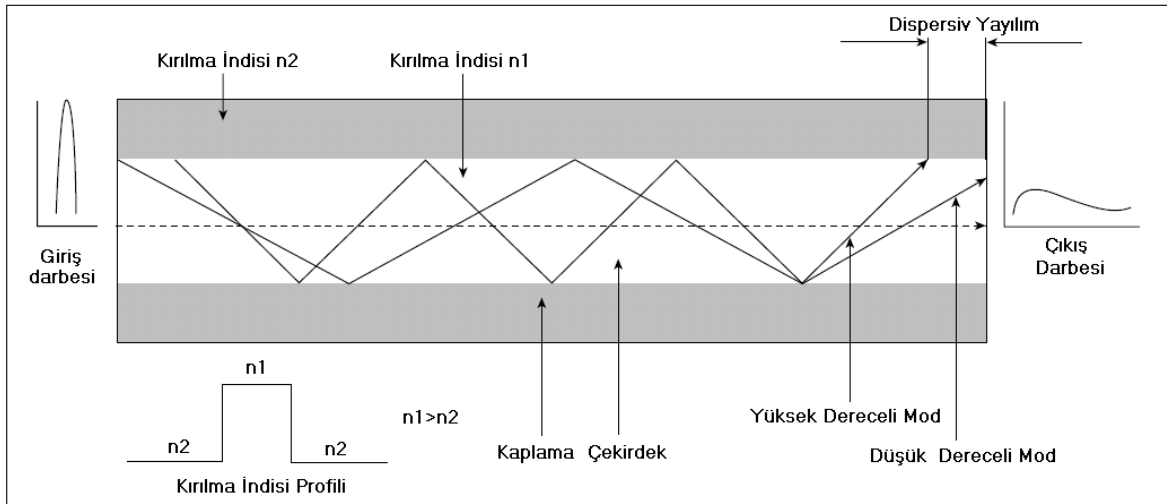
$$B_{opt} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{2}}{\sigma_T} [\ln 2]^{\frac{1}{2}} = \frac{0.187}{\sigma_T} \quad (1.43)$$

Eğer URZ (*unipolar return to zero*) modülasyonu yapılmışsa yaklaşık olarak veri hızı (1.44)'deki gibi olur.  $\sigma_T$ 'nin yani dispersiyon büyüklüğünün veri hızıyla ters orantılı olduğu buradan da açıkça görülmektedir [2-7].

$$R_T = \frac{0.2}{\sigma_T} \quad (1.44)$$

### 1.5.1. Modlar Arası (Intermodal) Dispersiyon

Modlar arası dispersiyon, ışığın farklı modlarının farklı zamanlarda alıcıya ulaşması sonucu oluşan darbe genişlemesi olarak ifade edilebilir. Özellikle çok modlu basamak indisli fiberlerde geniş darbe yayılımlarına sebep olmaktadır. Bu etkiyi azaltmak için çok modlu dereceli indisli fiberler üretilmiştir. Tek modlu fiber kullanıldığında ise tek bir mod iletilecek ve modlar arası dispersiyon tamamen ortadan kalkacaktır. Değişik fiber türlerine farklı tepkiler verdiği için değişik fiberler için ayrı ayrı incelenmesi gerekir.



Şekil 1.14. Modlar arası dispersiyondan dolayı fiber sonunda oluşan yayılma

#### 1.5.1.1. Çok Modlu Basamak İndisli Fiberlerde Modlar Arası Dispersiyon

Geometrik optik yaklaşımında ışın teorisi modeli kullanıldığından fiber sonuna ulaşan ışınlar arasında zaman farkı oluşmaktadır. Hızlı gelen ışınlar aldıkları yol en az olup

çekirdek eksenine boyunca en az kırılmaya uğrayan ışınlar olacaktır. Tam tersi durumda, en fazla kırılmaya uğrayan ışınlar ise en çok yol alıp alıcı kısma en geç ulaşan ışınlar olacaktır. Boşluktaki ışık hızı  $c$ , fiber çekirdeğinin kırılma indisi  $n_1$  ve fiber boyu  $L$  olmak üzere (1.12) denkleminde yararlanılarak maksimum süre  $T_{max}$  ve minimum süre  $T_{min}$  elde edilir [2-7].

$$T_{max} = \frac{L}{\frac{c}{n_1} \cos\theta} = \frac{L.n_1}{c.\cos\theta} = \frac{L.n_1^2}{c.n_2} \quad (1.45)$$

$$T_{min} = \frac{L}{\left(\frac{c}{n_1}\right)} = \frac{L.n_1}{c} \quad (1.46)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.47)$$

$$\delta T_s = T_{max} - T_{min} \approx \frac{L.n_1.\Delta}{c} \quad (1.48)$$

$$\delta T_s = \frac{L(NA)^2}{2n_1.c} \quad (1.49)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_i(t) dt = 1 \quad (1.50)$$

$P_i(t)$  genliği  $1/\delta T_s$  ve aralığı  $-\delta T_s/2 \leq t \leq \delta T_s/2$  olan bir işaretir. Modlar arası dispersiyon sebebiyle fiber çıkışında oluşan etkin darbe yayılımı  $\sigma_s$  (1.51) denklemindeki gibi ifade edilir [2-7].

$$\sigma_s = M_2 - M_1^2 \quad (1.51)$$

$$M_1 = \int_{-\infty}^{\infty} t P_i(t) dt \quad (1.52)$$

$$M_2 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 P_i(t) dt \quad (1.53)$$

$M_1$  değerinin ortalama değeri sıfır kabul edilirse (1.54) formülü elde edilir.

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{3} \left( \frac{\delta T_s}{2} \right)^2 \quad (1.54)$$

Bilinen değerler yerine yazılırsa (1.55) formülü elde edilir.

$$\sigma_s = \frac{Ln_1\Delta}{2\sqrt{3}c} = \frac{L(NA)^2}{4\sqrt{3}n_1c} \quad (1.55)$$

Darbe yayılımının  $\Delta$ 'nın azalmasıyla azaldığı (1.55) denklemine göre gayet açıktır. Bunun yanında  $\Delta$ 'nın azalmasıyla kabul açısı  $\alpha$  azalacaktır.

### 1.5.1.2. Çok Modlu Dereceli İndisli Fiberde Modlar Arası Dispersiyon

Daha önce de bahsedildiği gibi çok modlu dereceli indisli fiberler modlar arası dispersiyon etkisini azaltmak amacıyla tasarlanmış fiberlerdir. Çekirdekten itibaren sabit olmayıp değişiklik gösteren bir kırılma indisi sayesinde bütün modların hemen hemen aynı zamanda fiber sonuna ulaşmasını sağlayan fiziksel bir yöntemdir. Tabi ki belirli bir yere kadar fayda sağlamakta olup modlar arası dispersiyonu tamamıyla yok ettiği söylenemez. Bu tip fiberlerde ise minimum etkin darbe yayılımı (1.56) denklemi ile hesaplanır.

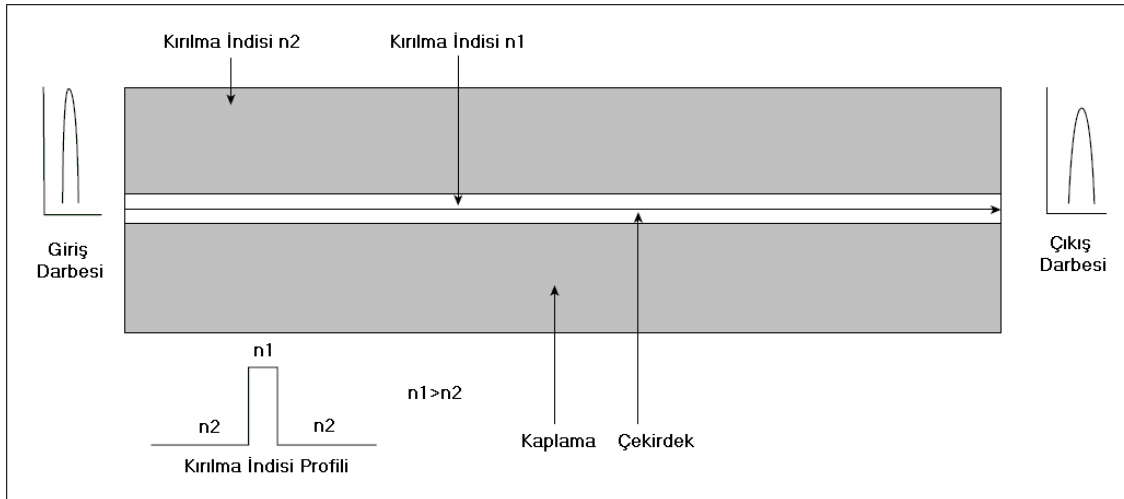
$$\sigma_s = \frac{Ln_1\Delta^2}{20\sqrt{3}c} \quad (1.56)$$

Yukarıdaki formül basamak indisli fiberlerle kıyaslanırsa yaklaşık 10 katlık bir dispersiyon azalması olduğu görülür. Ancak bu tip fiberlerde profil yapısındaki hassasiyet her zaman bu oranın sağlanmasını engellemektedir [2-7].



### 1.5.2. Kromatik Dispersiyon

Mod içi dispersiyon olarak da bilinen kromatik dispersiyon daha çok tek modlu fiberler için önemli bir faktör olup Şekil 1.14'de yayılım grafiği gösterilmektedir. Kromatik dispersiyonun iki önemli sebebi vardır. Bunlardan birincisi çekirdeğin ham maddesinin kırılma indisinin frekansa bağımlı olmasıdır. Bunun sonucunda farklı frekans bileşenleri farklı hızlarda fiber içerisinde hareket edeceklerdir. Bu tip kromatik dispersiyon materyal kromatik dispersiyon olarak bilinir. İkinci sebebi ise dalga boyu kromatik dispersiyonudur. Dalga boyu kromatik dispersiyonun oluşum sebebini açıklamadan önce şunu bilmek gerekir ki, ışığın çekirdek içerisinde ilerlemesinde çekirdeğin ve kaplamanın kırılma indisi etkilidir. Bu iki parametrenin oluşturduğu etkin kırılma indisinin gerçek değeri kaplamanın ve çekirdeğin girişteki ışık gücünü hangi oranlarda paylaştıklarına bağlıdır. Eğer gücün çoğu çekirdekte ise etkin kırılma indisi çekirdeğin kırılma indisine yakın olacaktır. Ya da tersi olarak gücün çoğu kaplamada ise etkin kırılma indisi kaplamanın kırılma indisine daha yakın olacaktır.



Şekil 1.15. Kromatik dispersiyondan dolayı fiber sonunda oluşan yayılma

Bir modda ışık ilerlerken çekirdek ile kaplama arasındaki güç dağılım oranı dalga boyunun bir fonksiyonudur. Yani kısaca ne kadar uzun dalga boyu kullanılırsa o kadar güç kaplamada bulunur. Materyal kromatik dispersiyon olmasa dahi dalga boyunun değişimi fiberde yayılan güç dağılımının değişmesine ve sonuç olarak etkin kırılma indisinin ya da yayılım sabitinin değişmesine neden olup darbe yayılımına neden olacaktır.

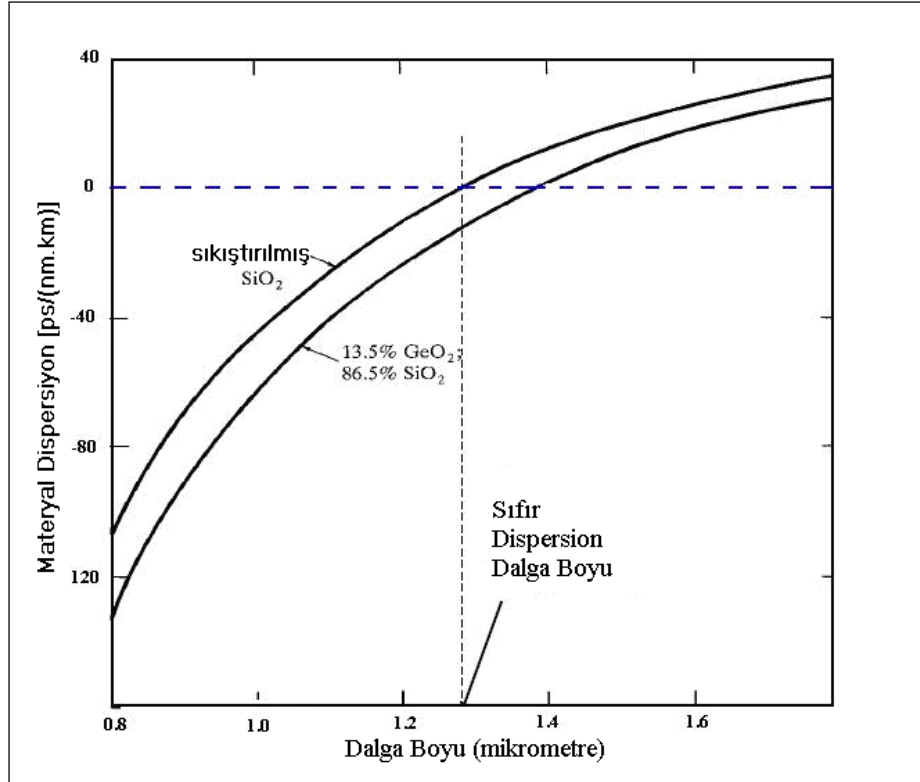
### 1.5.2.1. Materyal Kromatik Dispersiyon

Materyal kromatik dispersiyon kromatik dispersiyonun sebeplerinden birisidir. Fiber profilinin dalga boyuna bağımlı olması materyal kromatik dispersiyona neden olmaktadır.

Şekil 1.16'dan da anlaşılacağı gibi yaklaşık 1310 nm de materyal kromatik dispersiyon sıfır noktasına gelmektedir. Materyal kromatik dispersiyon kaynaklı oluşan etkin darbe yayılımı (1.57) ile hesaplanabilir.

$$\sigma_m = -\frac{\sigma_\lambda L}{c} \lambda \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \quad (1.57)$$

Burada  $\sigma_\lambda$ , kaynağın etkin spektral genişliğini ifade etmektedir. Bazı kaynaklarda materyal kromatik dispersiyon  $D_t$  ile ifade edilip (1.58)'deki denklemlerle hesaplanır.



Şekil 1.16. Materyal kromatik dispersiyonun kullanılan dalga boyuyla değişimi

$$D_t = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \quad (1.58)$$

Ya da kataloglarda karşılaşılan biçimi ile (1.59) denklemindeki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_m = \sigma_\lambda L D_t \quad ps \, nm^{-1} \, km^{-1} \quad (1.59)$$

Fiber girişindeki sinyalin periyodu  $\Delta t_1$  olmak üzere, fiber çıkışındaki sinyalin periyodu  $\Delta t_2$ , (1.60) formülü ile hesaplanır.

$$\Delta t_2 = \sqrt{(\Delta t_1)^2 + (D_t \Delta \lambda_L L)^2} \quad (1.60)$$

(1.60) formülünde  $\Delta \lambda_L$  lazerin spektral genişliğini,  $L$  fiber boyunu ve  $D_t$  ise fiber kromatik dispersiyonu ifade etmektedir. Girişteki sinyalin periyodu sıfıra gittiğinde fiberin birim vuruş cevabı elde edilir.

$$\Delta t_C = \Delta t_2 \big|_{\Delta t_1 \rightarrow 0} = D_t \Delta \lambda_L L = D_t \frac{\lambda_L^2}{v} \Delta f_L L = D_t \frac{v}{f_{LD}^2} \Delta f_L L \quad (1.61)$$

(1.61) formülünde  $f_L$  ve  $\lambda_L$  sırasıyla lazer frekansını ve dalga boyu ifade etmektedir. Ayrıca bu formül,  $\Delta f_L / f_L \ll 1$  şartı altında geçerlidir. Piyasadaki lazerler bu şartı rahatlıkla sağlamaktadırlar. Sistem teorisinden bilindiği gibi  $\Delta f \Delta t = 1$ 'dir. Buradan fiber bant genişliği hesabı yapılabilir.

$$B_C = \frac{\Delta f_C}{2} = \frac{1}{2t_C} = \frac{1}{2D_t \Delta \lambda_L L} \approx \frac{v}{2D_t \lambda_L^2 \Delta f_L L} \quad (1.62)$$

(1.62) formülü fiber boyu ile çarpıldığında fiber kataloglarında sıklıkla bahsedilen bant genişliği uzunluk çarpımı elde edilir.

İdeal durumda modüle edilmiş lazer işaretini bant genişliği bildiri işaretinin bant genişliğine eşittir. (Tek yan bant genlik modülasyonu gibi) .

$$\Delta f_L = B = \frac{1}{2T} = \frac{f_b}{2} \quad (1.63)$$

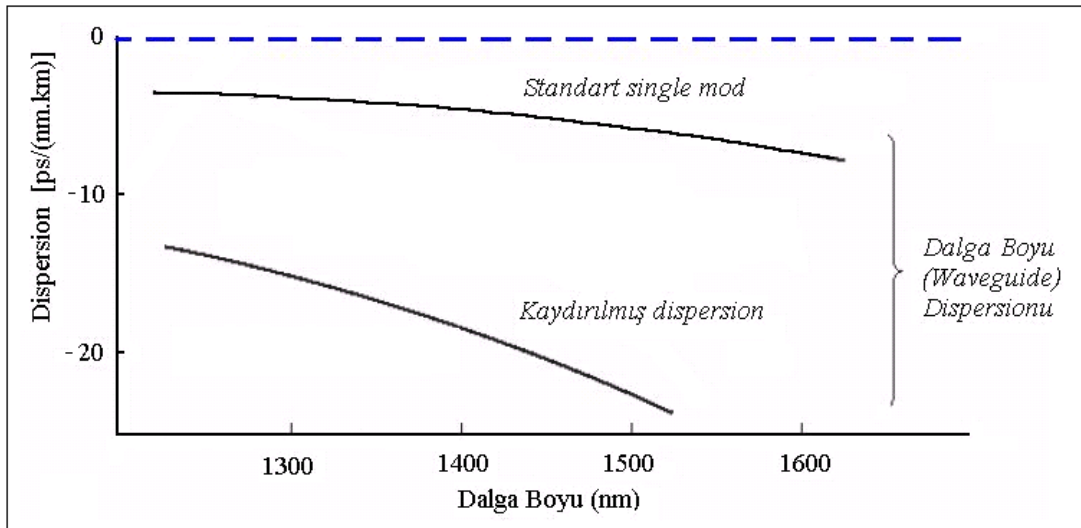
$$L_{\max} = \frac{1}{D_t \Delta \lambda_L f_b} \approx \frac{v}{D_t \lambda_L^2 \Delta f_L f_b} = 2 \frac{v}{D_t \lambda_L^2 f_b^2} \quad (1.64)$$

(1.62) ve (1.63) formüllerinden fiber boyunca kromatik dispersiyon nedeniyle ulaşılabilecek maksimum uzaklık (1.64) formülü ile verilmiştir. (1.64) formülüne göre  $\lambda_L = 1550 \text{ nm}$ ,  $D_t = 17 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ,  $v = 2.10^8 \text{ m/s}$  değerlerine göre elde edilen teorik kromatik dispersiyon limitleri tabloda verilmiştir.

Tablo 1.2. Optik haberleşme standartlarının kromatik dispersiyon limitleri

Bit hızı $R$	155 Mbps (STM1)	622 Mbps (STM-4)	2488 Mbps (STM16)	5 Gbps	8 Gbps	10 Gbps	16 Gbps	40 Gbps
Kromatik dispersiyon Limiti ( $L_{\max}$ )	404.925 km	25.307 km	1.581 km	392 km	153 km	97 km	38 km	6 km

### 1.5.2.2. Dalga Boyu Kromatik Dispersiyon

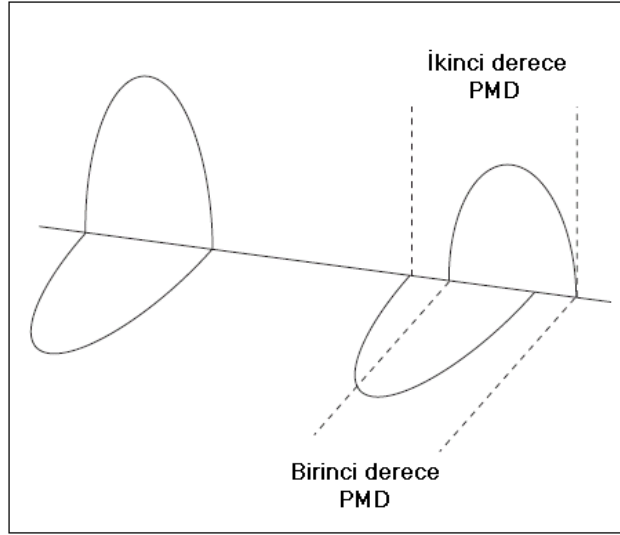


Şekil 1.17. Dalga boyu kromatik dispersiyonun dalga boyuna göre değişimi

Etkin kırılma indisinin dalga boyuna bağımlı olması, değişik dalga boylarında değişik kırılma indislerinin oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu da ışığın spektrumunda kromatik dispersiyona neden olmaktadır. Dalga boyu kromatik dispersiyonun değişim grafiği 1.17'deki gibidir.

### 1.5.2.3. PMD (Polarizasyon Mod Kromatik Dispersiyon)

Fiber mod kavramı, çekirdek ile kaplama arasında sınır koşullarını sağlayan dalga denklemlerinin çözümü olarak tanımlanmıştır. Kutuplanmış bir elektrik alan vektörü düşünüldüğünde zamanla alan vektörünün, genliği ve yönü de zamanla değişecektir. Bu yönün sabit olması polarizasyonun doğrusal olduğu anlamına gelmektedir [7].



Şekil 1.18. Polarizasyon mod dispersiyon

Baskın ya da temel modda yayılım yapılırken  $E_z$  bileşeni diğer  $E_x$  ve  $E_y$  bileşenine göre çok küçüktür. Yani enine dalgalar şeklinde bir yayılım yapılıır. Bu varsayım ile elektrik alan dalga denklemlerinin çözümü, x ve y boyunca doğrusal kutuplanmışdır denilebilir. Kutuplanma biçimi ışık enerjisinin iki polarizasyon modu arasındaki dağılımını belirtir. Bu durumda fiberin hala tek modlu olarak bilinmesi bu modların dejenere olmasından kaynaklanır. Mükemmel dairesel simetrik fiberlerde yayılma sabiti bu iki dejenere modda da sabit kalır. Böylece enerji, bu iki polarizasyon moduna bölünse de aynı yayılma sabitine sahip olduklarından bir darbe yayılımı olmaz. Pratikte fiberler mükemmel

dairesel simetriye sahip değillerdir. Yani bu iki ortogonal polarizeli modda farklı yayılma sabitleri oluşur. Bu da çift kırınımına sebep olup sonucunda kromatik dispersiyon oluşur. Oluşan dispersiyon ise polarizasyon mod kromatik dispersiyon (*PMD*) olarak bilinir. Çok modlu fiberlerde de *PMD* görülebilir ancak etkisi modlar arası dispersiyon yanında ihmal edilmektedir.

Polarizasyon mod dispersiyona sebep olan ortalama zaman gecikme farkı (1.65) ile hesaplanabilir.

$$\Delta_t = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (1.65)$$

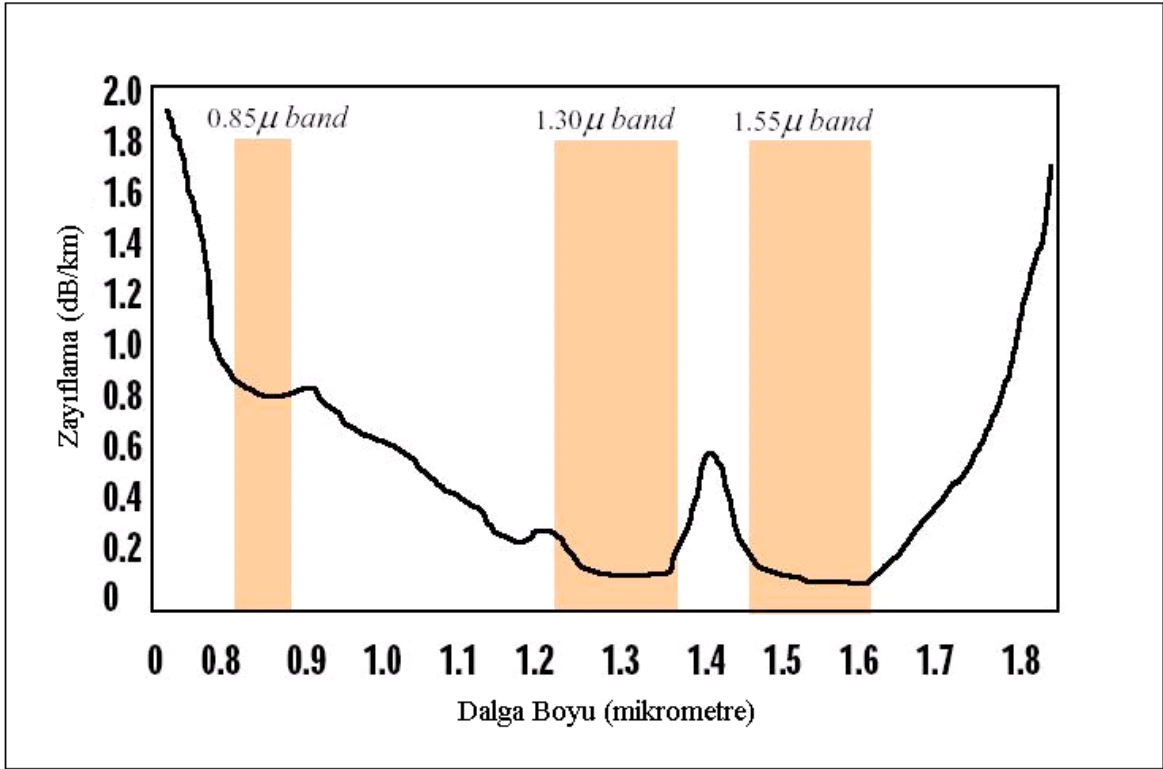
Burada  $\Delta_t$  grup gecikme farkı,  $L$  link boyu ve  $D_{PMD}$  de  $ps/\sqrt{km}$  cinsinden bir *PMD* fiber parametresidir. *PMD*'nin tipik değeri 0.5 ile 2  $ps/\sqrt{km}$  arasındadır. Ancak dikkatlice yapılandırılmış yeni linklerde 0.1  $ps/\sqrt{km}$  değerine kadar düşmektedir [2-7].

## 1.6. Optik Fiberlerde Sinyal Zayıflaması

Zayıflama ya da transmisyon kayıpları fiber optik haberleşmede üzerinde durulması gereken önemli parametrelerden biridir. Maksimum transmisyon mesafesini belirleyen parametreler içerisinde önemli bir yeri vardır. Fiberlerin metalik kablolarla tercih edilmeye başlandığı zamanlarda kilometre başına düşen fiber zayıflaması hemen hemen metalik kablolarla aynı seviyelerdeydi ( $5dB/km$ ). Günümüzde bu oran ( $0.1dB/km$ ) seviyelerindedir.

$$\alpha_{dB} L = 10 \log \left( \frac{P_i}{P_o} \right) \quad (1.66)$$

(1.66) ifadesinde  $\alpha_{dB}$ ,  $dB$  cinsinden zayıflamayı ve  $L$  de fiber uzunluğunu ifade etmektedir. Çok sayıda etki, fiberlerde zayıflatmaya sebep olabilir. Madde soğurması kayıpları, doğrusal ya da doğrusal olmayan madde saçınımı kayıpları, az büküm (*mikro bükülme*) kayıpları, mod birleşme kayıpları, ışınma kayıpları gibi fiber kaynaklı kayıpların yanı sıra konnektör ve ek yeri kayıpları da etkili olmaktadır.



Şekil 1.19. Fiber içinde ışığın zayıflamasının dalga boyuna göre değişimi

### 1.6.1. Madde Soğurması Kayıpları

Madde soğurması fiberlerin üretimi esnasında kullanılan maddenin safsızlığından ya da madde içerisindeki değişik oluşumlardan kaynaklanmaktadır. Fiber içerisinde yayılan ışık bu tip maddelerle karşılaştığında farklı dalga boylarında enerji olarak yayılmakta ve böylece sinyalden ayrılan enerji farklı formlarda doğaya yayılmaktadır.  $Fe^{+2}$ ,  $Cr^{+2}$ ,  $Co^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$  ağırlıkta olmak üzere çeşitli metal iyonları haberleşme bandında madde soğurmasına neden olmaktadır. Bunun yanında  $OH^-$  iyonları da cam fiberlerde uzun dalga boylarında titreşimler yapmakta ve bu titreşimlerin harmonikleri haberleşme bandına denk düşmektedir.

### 1.6.2. Doğrusal Saçınım Kayıpları

Optik fiberlerdeki geometrik kusurlar ışığın fiber dışına doğru yönlenmesine neden olmaktadır. Doğrusal saçınım sonucunda bir modda yayılan optik gücün bir kısmı ya da tamamı doğrusal olarak başka bir moda transfer edilir. Bu transfer sonucu fiber içerisinde

ilerlemeyen ancak yayılım yapan sızıntı ve ışımaya modlarını oluşturur. Yayılması gereken mod yerine bu modların oluşumu ana modda ilerleyen ışığın zayıflamasına neden olur. Bu mekanizmanın doğrusal olması, fiberde ilerleyen ışığın frekansında bir değişiklik olmasını engeller. Doğrusal saçınım Rayleigh saçınım ve Mie saçınım olmak üzere iki alanda incelenebilir. Rayleigh saçınım ve Mie saçınım birbirine benzer sebeplerden ötürü ortaya çıkmıştır. Ancak kusurlu fiber boyunun  $\lambda/10$  'u aşması durumunda Rayleigh saçınım Mie saçınımına dönüşüp daha önemli zayıflatmalara sebep olmaktadır. Bu durumda saçınım genliğinin açılma bağımlılığı çok büyük olmaktadır.

### 1.6.3. Doğrusal Olmayan Saçınım Kayıpları

Optik dalga kılavuzları her zaman doğrusal kanallar gibi davranmaz. Saçınım kaynaklı doğrusal olmayan kayıplar sonucu orantısız zayıflamalar ortaya çıkmaktadır. Bunun en büyük sebebi yüksek optik güç kullanımınıdır.

Doğrusal olmayan optik saçınım sonucu bir modda ilerleyen optik güç farklı bir frekansta, aynı ya da farklı bir modda, hatta farklı bir yönde optik güç oluşturabilir. Doğrusal olmayan saçınımın en önemli tipleri Brillouin ve Raman saçınımlarıdır. Tek modlu fiberlerde ortaya çıkarlar. Bu saçınım mekanizmaları optik kazancı artırırsa da farklı frekanslarda ortaya çıktıklarından istenen dalga boylarında zayıflamalara neden olmaktadır. Raman saçınımı ileri yönde gerçekleşip bu konuda Brillouin'den farklıdır. Bu tip saçınımlar belirli bir güçten sonra etkili olurlar. Bu güce eşik gücü adı verilir ve Raman ile Brillouin için farklı değerdedirler [2-7].

$$P_B = 4.4 \times 10^{-3} a^2 \lambda^2 \alpha_{dB} B_{source} \text{ Watt} \quad (1.67)$$

$$P_R = 5.9 \times 10^{-2} a^2 \lambda \alpha_{dB} \text{ Watt} \quad (1.68)$$

(1.67) ve (1.68) ifadelerinde  $a$ ,  $\mu m$  cinsinden fiber çekirdek çapını,  $\lambda$   $\mu m$  cinsinden dalga boyunu;  $\alpha_{dB}$ ,  $dB$  cinsinden  $km$  başına fiber zayıflatmasını;  $B_{source}$  ise gigahertz cinsinden kaynak bant genişliğini ifade etmektedir [7]. Elde edilen bu eşik güç değerlerinin altında çalışmak, doğrusal olmayan saçınım etkisini ortadan kaldıracaktır.



#### 1.6.4. Işıma Kayıpları

Işıma kayıpları, fiberlerde bükülmeler sonucu oluşan kıvrımlarda ortaya çıkar. Az büküm (*mikrobend*) ya da çok büküm (*makrobend*) ışımaya kayıpları olarak adlandırılabilirler. Az büküm kayıpları genellikle dışarıdan fiber üzerine basınç uygulandığında ortaya çıkar. Çok büküm kayıpları ise daha geniş bükümler oluştuğunda dikkate alınır. Dalga cephesinin dalganın yayılma yönüne dik olması gerektiğinden yayılan modun bükümün dış tarafında olan kısmının iç tarafındakinden daha hızlı ilerlemesi beklenir. Bu da imkansız olduğundan buradaki enerji, büküm olunan bölgede ışımaya şeklinde açığa çıkar. Bu kayıp genelde aşağıdaki gibi bir ışımaya zayıflama sabiti ile gösterilir. Burada  $c_1$  ve  $c_2$  bağımsız sabit,  $Rb$  de bükümün eğrilik yarıçapını göstermektedir

$$\alpha_r = c_1 e^{-c_2 Rb} \quad (1.69)$$

Buna rağmen büyük büküm kayıpları kritik büküm eğrilik yarıçaplarında ortaya çıkmaktadır. (1.70) ifadesinde yaklaşık değeri verilmiştir.

$$R_c \approx \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} \quad (1.70)$$

(1.70) ifadesine göre büküm kayıplarını azaltmak için ya daha düşük dalga boyunda haberleşmek gerekir ya da kırılma indisi farkı fazla olan fiberlerle tasarım yapmak gerekir. Işıma kayıplarının tek modlu fiberlerde daha fazla etkili olacağı aşikârdır [2-7].

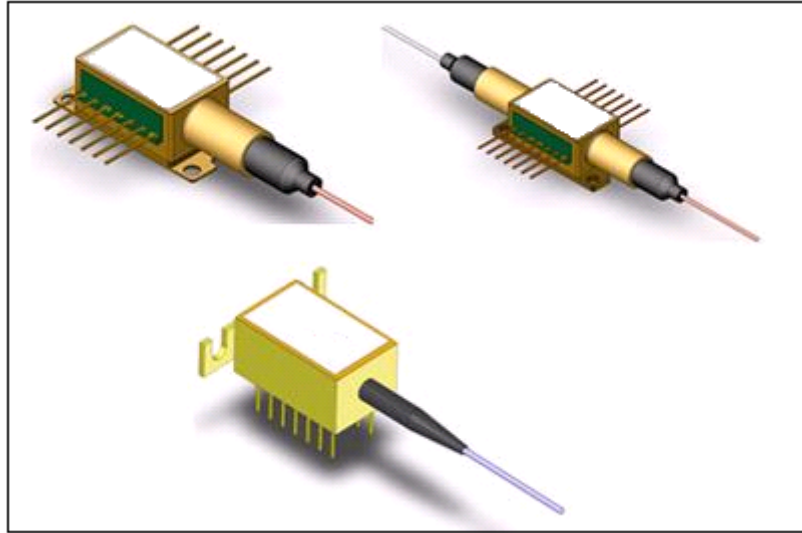
#### 1.7. Optik Modülasyon

Yapılacak modülasyon türüne ve iletilecek bilgiye göre verici lazerin optik taşıyıcı dalgası  $E_c(t)$  'nin genliği fazı ya da frekansı değiştirilir. Böylece modüle edilmiş elektriksel sinyal, optik frekanslara kaydırılır.

$$\vec{E}_t(t) = K_m \cdot s(t) \cdot E_c(t) \cdot \vec{e}_c = E_t(t) \cdot \vec{e}_t \quad (1.71)$$

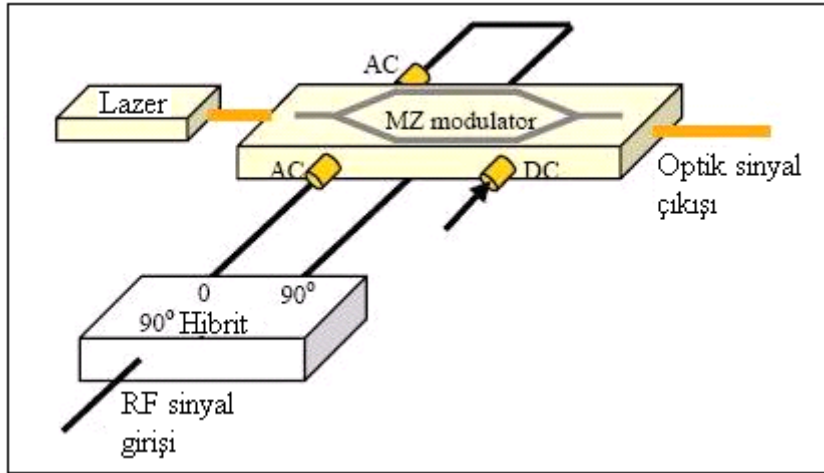
(1.71) denkleminde  $K_m$  modülasyon sabitini,  $s(t)$  modüle edilecek elektriksel sinyali,  $E_c(t)$  ise optik taşıyıcı dalgayı ifade etmektedir. Burada polarizasyon birim vektörleri  $\vec{e}_c = \vec{e}_t$  olarak kabul edilmiş ve optik modülasyon işlemi basitçe elektriksel sinyal ile lazer sinyalinin çarpımı şeklinde gösterilmiştir.

Aşağıda görülen direk modülatörler verinin durumuna göre lazeri açıp kapatarak verinin değişimini optik frekanslarda değiştirmektedirler. Elektriksel modülasyon tipi OOK (RZ ya da NRZ) olduğunda direk modülatörler daha fazla tercih edilirler [2-7].



Şekil 1.20. Optik doğrudan modülatör

Şekil 1.21’de ise daha gelişmiş ve direk modülatörlere göre çok daha yüksek hızlarda kullanılabilen Mach-Zehnder modülatör görülmektedir. Burada *pockels etkisi* olarak bilinen elektro-optik maddelerin içinden geçen ışığın hızının üzerlerine uygulanan gerilime göre değişmesi, Mach-Zehnder modülatörlerinin çalışma prensibinin temelini oluşturmaktadır [2-7].

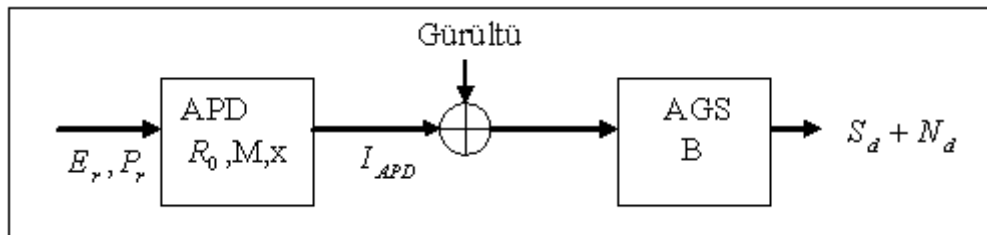


Şekil 1.21. Mach-Zehnder modülatör

## 1.8. Optik Demodülasyon

Vericiden gönderilen optik sinyallerin alıcı tarafta alınıp temel banda düşürülmesi için evre uyumlu ya da evre uyumsuz (*incoherent*) sistemler kullanılmaktadır. Evre uyumlu sistemler homodin ve heterodin olmak üzere iki değişik yapıda incelenmektedirler. Evre uyumlu ve evre uyumsuz sistemlerin performansları, hassasiyetleri ve seçicilikleri ön plana çıkarılarak karşılaştırmaları yapılacaktır. Evre uyumsuz ya da optik doğrudan algılamalı sistemlerde alıcı girişindeki gelen optik ışık dalgasının elektrik alanı  $E_r$ , PIN fotodiyotlar vasıtası ile direk olarak elektrik akımına dönüştürülür. Alanın zayıf olduğu durumlarda ise PIN fotodiyot yerine APD tercih edilir. İki durumda da fotodiyot akımı alanın karesiyle ve böylece alınan optik güç ( $P_r$ ) ile doğrudan orantılıdır [2-7].

### 1.8.1. Optik Doğrudan Algılamalı Alıcı



Şekil 1.22. Optik doğrudan algılamalı alıcı

$$I_{APD} \sim E_r^2 \sim P_r \quad (1.72)$$

$$S_d = R^2 M^2 P_r^2 \quad (1.73)$$

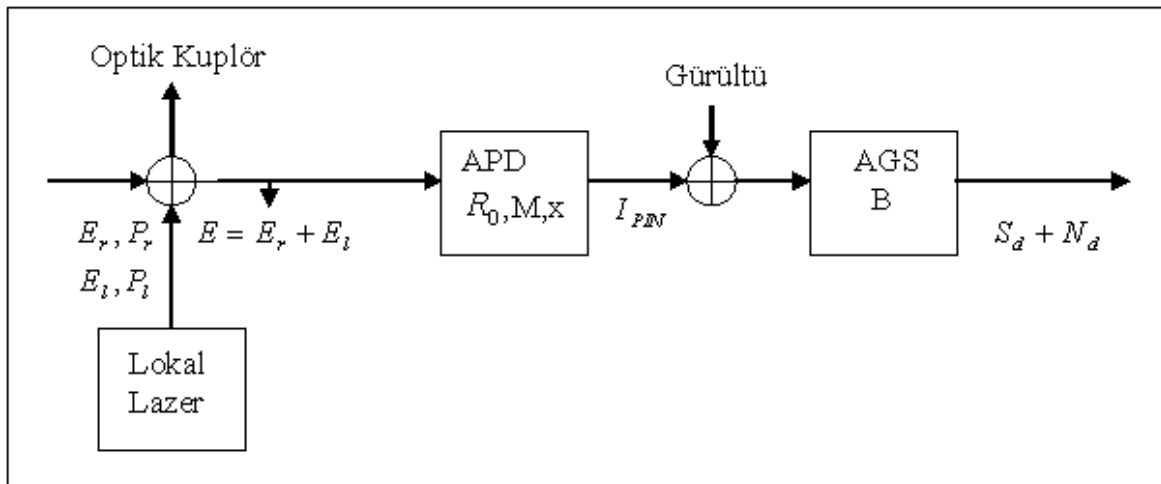
$$N_d = (G_{ds} + G_{dark} + G_{th}) \cdot BW = e \cdot M^{2+x} (R \cdot P_r + I_{dark}) B + G_{th} \cdot BW \quad (1.74)$$

Fotodiyot akımına eklenen sabit spektral gürültü bileşenleri; fotodiyot kuantum (*shot*) gürültüsü ( $G_{ds}$ ), yükselteçler ve dirençlerden oluşan termal gürültü ( $G_{th}$ ), fotodiyotun karanlık akımıyla ve alınan optik güç seviyesiyle doğru orantılı  $G_{dark}$  olarak sıralanabilir. Gürültü bileşenlerindeki  $d$  indisi, evre uyumlu alıcılardaki değerinden farklı olduğunu belirtmektedir. Uygulamaların çoğunda aşırı gürültü faktörü (*excess noise factor*)  $F(M)$ , (1.75) bağıntısı ile hesaplanır. Ayrıca burada  $x$ , fotodiyot yarı iletken maddesine bağlı bir katsayıdır. Eğer  $BW$  alçak geçiren filtrenin çift yan bant genişliği olarak düşünülürse işaret gürültü oranı (1.76) denklemiyle hesaplanır [2-7].

$$F(M) = M^x \quad (1.75)$$

$$SNR = \frac{(R \cdot M \cdot P_r)^2}{e \cdot M^{2+x} (R \cdot P_r + I_{dark}) B + G_{th} \cdot BW} \quad (1.76)$$

### 1.8.2. Optik Evre Uyumlu Alıcı



Şekil 1.23. Evre uyumlu alıcı

$$I_{PIN} \sim E^2 \sim (E_r + E_l)^2 \sim P_r + P_l + 2\sqrt{P_r.P_l} \quad (1.77)$$

$$S_c = 4.R^2.P_r.P_l \quad (1.78)$$

Şekil 1.22'deki blok diyagramda da görüldüğü gibi evre uyumlu alıcılarda farklı olarak alıcı tarafta da bir lazer bulunur. Burada gelen optik sinyal ile alıcıdaki lazerin ürettiği optik sinyal bir optik kuplör vasıtası ile birleştirilir ve karıştırılır. Alınan optik sinyalin frekansı alıcıdaki optik sinyal ile aynı ise bu durumda alıcı homodin evre uyumlu alıcı, farklı ise heterodin evre uyumlu alıcı olarak adlandırılır.

$$I_{PIN} = R(P_r + P_l + 2\sqrt{P_r.P_l}) \quad (1.79)$$

Fotodiyot akımını oluşturan 3 bileşen olmasına rağmen oluşan sinyalin frekansı açısından bakıldığında 3. bileşenin önemi daha büyüktür. Eğer alıcı homodin evre uyumlu ise bu çarpım bileşeninin sonucunda oluşan sinyal temel bant işareti olur. Eğer heterodin evre uyumlu alıcı kullanıldıysa IF frekansında bir sinyal oluşur. IF frekansı alınan optik sinyalin frekansı ile alıcıdaki lazerin ürettiği optik frekans arasındaki farka eşittir. PIN fotodiyotun ürettiği 1. ve 2. bileşenler filtreleme ya da dengeli alıcı yapısıyla yok edilir.

Optik doğrudan algılamalı alıcıda olduğu gibi sabit gürültü gücü spektral yoğunluğu homodin ya da heterodin evre uyumlu alıcılarda (1.80) bağıntısıyla hesaplanır.

$$N_c = (G_{cs} + G_{dark} + G_{th}).B = e.(R.P_l + I_{dark})B + G_{th}.BW \quad (1.80)$$

Alınan sinyal optik zayıflamadan ötürü alıcıda üretilenden çok daha zayıftır. Bundan dolayı gürültü gücü hesaplamalarında sadece alıcıdaki lazerin ürettiği sinyalin gürültüsü dikkate alınır. Bundan dolayı evre uyumlu optik sistemler alıcıdaki güçten bağımsız gürültü seviyesine sahip olduklarından doğrudan algılamalı optik sistemlere göre bu konuda avantajlıdır. Ancak lazer faz gürültüsünün varlığı bu avantajın yanında bir dezavantaj olarak bulunmaktadır [2-7].

$$SNR = \frac{4.R^2.P_r.P_l}{e.(R_0.P_l + I_{dark})BW + G_{th}.BW} \quad (1.81)$$

## 1.9. OFDM

OFDM tekniği, veriyi kendisine ait frekans bandını verimli kullanabilmek için birbirleriyle örtüşmesine izin verilen sınırlı sayıda farklı alt kanaldan paralel olarak gönderme ilkesine dayanmaktadır. Her bir alt taşıyıcı diğeriyle dikgen olduğundan birbirleriyle girişim yapmamakta ve böylece frekans bandı daha verimli kullanılmaktadır. OFDM kullanılması durumunda kullanılacak frekans bandı,  $R$  istenen veri hızını,  $N_{SC}$  alt taşıyıcı sayısını ifade etmek üzere (1.82) denklemi ile ifade edilebilir [8,9].

$$W = \frac{(N_{SC} + 1)}{N_{SC}} R \quad (1.82)$$

Bu durumda OFDM kullanılması halinde sağlanacak frekans bandı tasarrufu ise (1.83) ile denkleminde ifade edilmiştir. (1.84) denkleminde görüldüğü gibi taşıyıcı sayısının limiti sonsuza gittiğinde ise sağlanabilecek maksimum bant tasarrufu %50 olabilmektedir

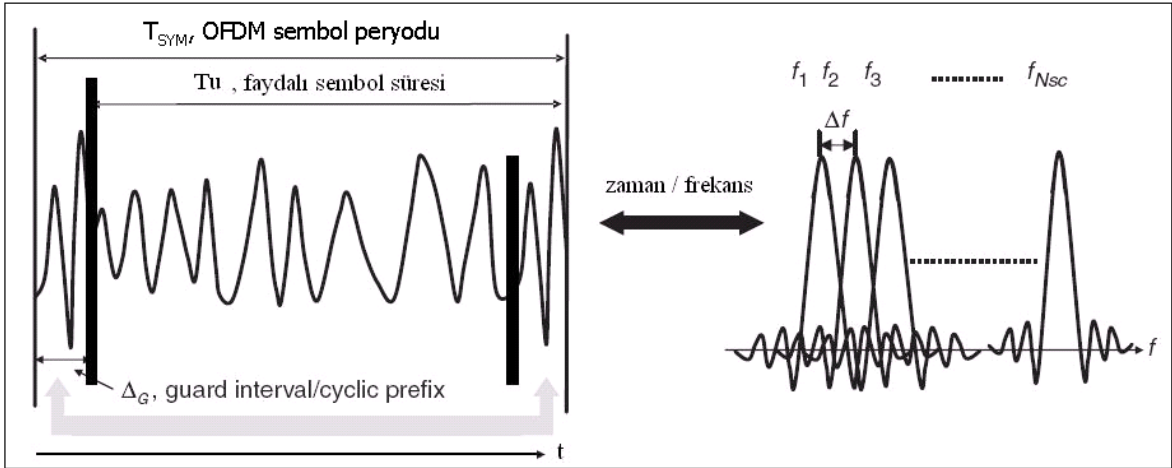
$$\Delta W = 2R - \frac{(N_{SC} + 1)}{N_{SC}} R, \quad \Delta W = \frac{(N_{SC} - 1)}{N_{SC}} R \quad (1.83)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \Delta W = \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{N_{SC} - 1}{N_{SC}} R \right) = R \quad (1.84)$$

İki işaretin birbirine dikgen olabilmesi için bir periyot boyunca (1.85) şartının sağlanması gerekmektedir. Bir başka deyişle her bir alt taşıyıcının frekansının OFDM sembol periyodunun tersinin tam katlarından oluşması gerekmektedir [8,9].

$$\int_{t=0}^{t=T} f_1(t) f_2(t) dt = 0 \quad (1.85)$$

OFDM işareti  $N$  adet alt taşıyıcıdan oluşmaktadır. Her iki adet alt taşıyıcı arasındaki frekans bandı aralığı  $\Delta f$  olmak üzere OFDM işaretinin kaplayacağı toplam bant genişliği (1.86) ile hesaplanabilir.



Şekil 1.24. OFDM zaman ve frekans bölgesi gösterimi

OFDM alt taşıyıcıları arasında dikgenlik şartının sağlanabilmesi için alt taşıyıcıların başlangıç fazlarının aynı olması yanında frekanslarının da birbirlerinin tam katları olması gerekmektedir. Her bir alt taşıyıcı için diğer alt taşıyıcıyla eş fazlı ve hassas bir osilatör gereksinimi düşünüldüğünde verici ve alıcı tasarımının karmaşıklıkları ve boyutları artmaktadır. Bunlardan kurtulmak için ayrık Fourier dönüşümü kullanılmaktadır. Uygulamada DFT yerine algoritmadaki toplam ve çarpım sayısını azaltıp hızlı çalışmasını sağlayan FFT kullanılmaktadır [8,9].

### 1.9.1. Dikgenlik Şartı

OFDM veriyi birbirleriyle örtüşebilen ve düşük hızda veri taşıyan taşıyıcılar kullanarak alt kanallara bölmektedir. Her bir alt taşıyıcı diğeriyle dikgen olduğundan birbirleriyle girişim yapmamakta ve böylece frekans bandı daha verimli kullanılmaktadır.

$$T_{SYM} = N_{SC} T_s \quad (1.86)$$

$$f_k = k / T_{SYM} \quad (1.87)$$

Alt taşıyıcı frekansını  $f_k$  belirtmek üzere taşıyıcılar arasındaki dikgenlik şartı (1.86) ve (1.87) şartları sağlandığında (1.88) ile ifade edilen denklemlerle belirlenir.

$$\delta_{nm} = \begin{cases} 0, n \neq m \\ 1, n = m \end{cases} \quad (1.88)$$

$$\int_{t=0}^{T_s} f_n(t) f_m^*(t) dt = \begin{cases} 0, n \neq m \\ 1, n = m \end{cases} = A_n \delta_{nm}$$

### 1.9.2. OFDM İşaretinin Matematiksel İfadesi

OFDM işareti birçok sinüzoidal işaretin toplamından oluşmaktadır. Her bir sinüzoidal işaret bir alt taşıyıcıya karşı gelmektedir. Dolayısıyla her bir alt taşıyıcı (1.89) ifadesindeki gibi gösterilebilir.

$$S_c(t) = A_c(t).e^{j(2\pi f_c t + \phi_c(t))} \quad (1.89)$$

(1.89) denkleminde  $f_c$  alt taşıyıcının frekansını,  $A_c(t)$  alt taşıyıcının zamanla değişen genliğini,  $\phi_c(t)$  alt taşıyıcının zamanla değişen fazını göstermektedir.

OFDM işareti  $N_{SC}$  adet alt taşıyıcıdan oluşmakta ve (1.90) denklemi bunu ifade etmektedir.

$$S_s(t) = \frac{1}{N_{SC}} \sum_{n=0}^{N_{SC}-1} A_n(t).e^{j(2\pi f_n t + \phi_n(t))} \quad (1.90)$$

$$f_n = f_0 + n\Delta f \quad (1.91)$$

Elde edilen her bir alt taşıyıcının genliğinin ve fazının bir sembol süresince değişmediği varsayılırsa (1.92) denklemleri yazılabilir [8,9].

$$A_n(t) = A_n$$

$$\phi_n(t) = \phi_n \quad (1.92)$$

Elde edilen sürekli işaret  $f_s = 1/T_s$  ile örneklendiğinde ( $k, 0$  dan  $N_{SC} - 1$  e kadar tamsayıları göstermek üzere ), (1.93) denklemi elde edilir.



$$S_s(kT_s) = \frac{1}{N_{SC}} \sum_{n=0}^{N_{SC}-1} A_n e^{j(2\pi(f_0+n\Delta f)kT_s+\phi_n)} \quad (1.93)$$

Bir sembol süresince işareti ifade etmek için sürekli işaretten  $N_{SC}$  adet örnek alınmaktadır. Dolayısıyla simge süresi (1.94) denkleminde ifade edilir.

$$T_{SYM} = N_{SC}T_s \quad (1.94)$$

Eğer  $f_0 = 0$  alınırsa örneklenmiş işaret (1.95) denkleminde ifade edildiği gibi olacaktır.

$$S_s(kT_s) = \frac{1}{N_{SC}} \sum_{n=0}^{N_{SC}-1} A_n e^{j2\pi n\Delta f kT_s} e^{j\phi_n} \quad (1.95)$$

$$\Delta f = \frac{1}{N_{SC}T_s} \quad (1.96)$$

(1.96) şartı sağlandığında OFDM sembolünü oluşturan işaret (1.97) ile ifade edilir.

$$S_s(kT_s) = \frac{1}{N_{SC}} \sum_{n=0}^{N_{SC}-1} A_n e^{j2\pi n \frac{k}{N_{SC}}} e^{j\phi_n} \quad (1.97)$$

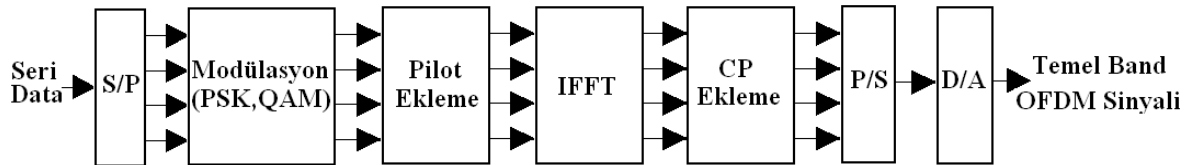
(1.97) denklemi  $N_{SC}$  elemanlı ve elemanları  $A_n e^{j\phi_n}$  olan bir dizinin ters ayrık Fourier dönüşümüne karşılık gelmektedir. Bu durumda modülasyon ve demodülasyon için sırasıyla IDFT ve DFT kullanılabilen hatta DFT için daha hızlı çalışabilen FFT tercih edilebilmektedir. OFDM sisteminde gönderilecek işaret frekans bölgesinde tanımlanmaktadır. Seri olarak gelen veri seri paralel dönüştürücüden geçtikten sonra veri alt taşıyıcısı kadar paralel hatta ayrılır. Modülasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra alıcıda evre uyumlu işaret algılamayı ve kanal takibini sağlamak amacıyla OFDM sembolüne pilot taşıyıcılar eklenir. Daha sonra IFFT alınarak modülasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur. Taşıyıcılar arasındaki girişimi önlemek için de çevrimsel önek eklenir. Son aşama olarak paralel veri seri hale getirilip dijital analog çeviriciden geçirilerek kanala gönderilir [8,9].

Tablo 1.3. IEEE 802.11a için zamana bağlı temel parametreler

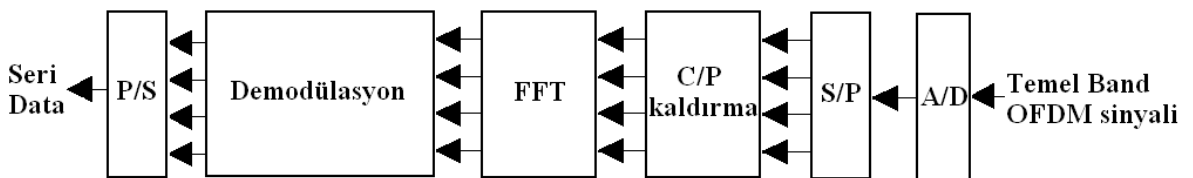
Parametre	Değer
Örnekleme hızı, $f_s$	20 Mhz
Örnekleme Periyodu, $T_s$	50 ns
Faydalı sembol süresi $T_{FFT}$	3.2 $\mu s$
Çevrimsel önek süresi, $T_{CP} = T_{GI}$	0.8 $\mu s$
Sembol süresi $T_{SYM} = T_U + T_{CP}$	4 $\mu s$
Veri alt taşıyıcı sayısı $N_{SD}$	48
Pilot alt taşıyıcı sayısı $N_{SP}$	4
Toplam alt taşıyıcı sayısı $N_{SC} = N_{SD} + N_{SP}$	52
Alt taşıyıcı aralığı $\Delta f$	0.3125 Mhz

OFDM sisteminde kullanılan taşıyıcı sayısı, pilot sayısı, çevrimsel önek süresi, örnekleme frekansı gibi sistem başarımını önemli ölçüde etkileyecek parametreler 802.11a kablosuz haberleşme standardı için Tablo 1.3' de verilmiştir [10].

OFDM işaretinin üretilmesi ve alıcıda tekrar elde edilebilmesi için gerekli donanımlar blok diyagram halinde Şekil 1.25. ve Şekil 1.26 ile gösterilmiştir.



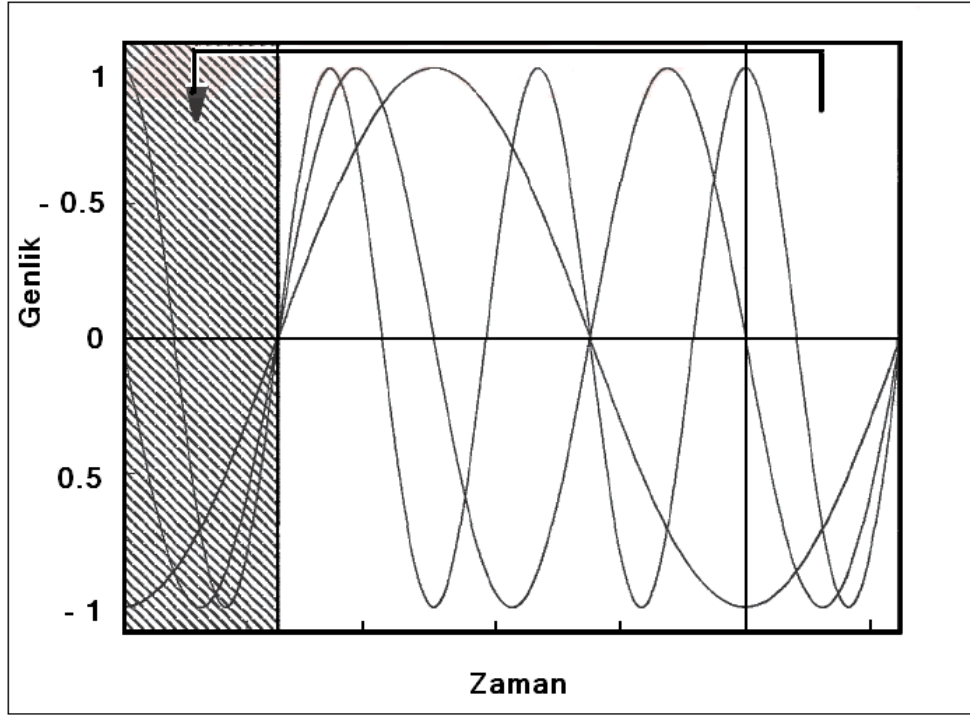
Şekil 1.25. OFDM verici blok diyagram



Şekil 1.26. OFDM alıcı blok diyagram

### 1.9.3. Çevrimsel Önek

Çok yollu yayılımın olduğu kanallarda alıcıya ilk ulaşan semboller ile gecikerek ulaşan semboller birbirine karışmakta ve semboller arası girişim ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak sistem başarımı düşmektedir. OFDM tekniğinde, semboller arası girişimi ortadan kaldırmak için en az kanalın gecikme yayılması süresi kadar bir süreye sahip çevrimsel önek (*cyclic prefix*) ya da diğer bir ifadeyle koruma aralığı (*guard interval*) kullanılmaktadır. Çevrimsel önek, OFDM sembolünün sonundaki faydalı bir kısım örnek kopyalanıp sembolün başına getirilerek oluşturulur. Bu sayede alt taşıyıcılar arasındaki girişim önlenip aralarındaki dikgenlik korunmuş olur. Böylece ICI ve ISI oluşumu önlenir. Alıcı tarafta ise oluşabilecek girişim miktarı çevrimsel önek süresini geçmediği için çevrimsel önek atıldığında veri kaybı olmadan girişimi ortadan kaldırmak mümkün olmaktadır [8,9].



Şekil 1.27. OFDM taşıyıcılarından oluşturulan çevrimsel önek

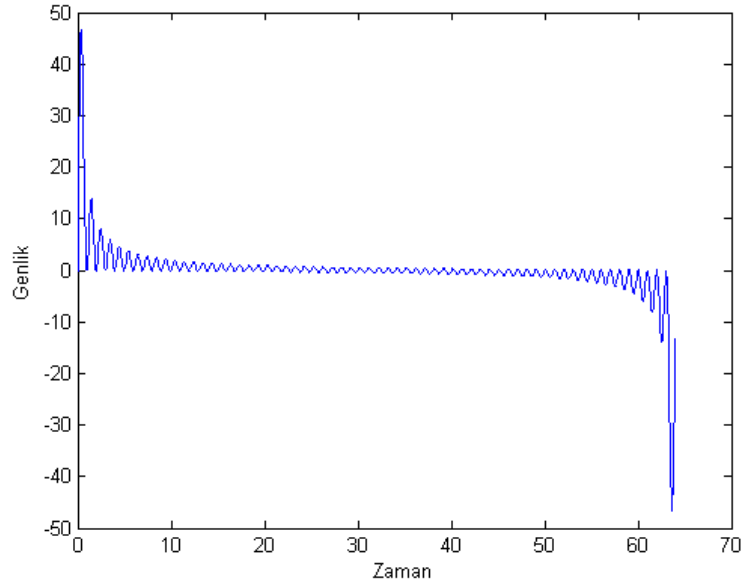
## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Giriş

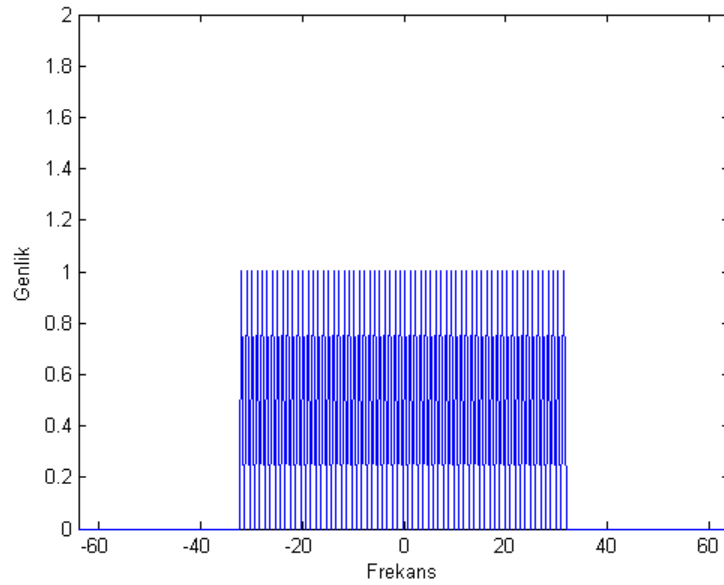
Haberleşme sistemlerinde alıcının kendisine ulaşan sinyalden gönderilen sinyali elde edebilmesi için, bu işareti bilgiye dönüştürecek bir dizi işlem yapılır. Alıcı öncelikle işaretin geldiğini anlamalıdır. Daha sonra gönderilen işaretin başlangıcını belirlemeli ve eşlemeyi sağlamalıdır. Bu bağlamda en iyi örnekleme anlarının belirlenmesi, eğer varsa taşıyıcı frekansındaki kaymaların tespit edilip düzeltilmesi ve kanalın denkleştirilmesi gerekmektedir. Bu düzeltmeler yapılmazsa sistem başarımı oldukça kötü sonuçlar verecektir. Nitekim elde edilen sonuçlar bu bilgileri doğrulamaktadır. Bu tezde yapılan çalışmalar için en iyi örnekleme anlarının belirlenmiş ve kanalın kestirilmiş olduğu varsayılmıştır. Fiber optik haberleşmede doğrusal linklerin uzun mesafelere yüksek veri hızlarında ulaşmasını engelleyen en önemli engelin sinyal zayıflaması ve sinyal kromatik dispersiyonu olduğu bilinmektedir. Doğrusal yükselteçler sinyal zayıflamasına çözüm olarak düşünülse bile sinyal kromatik dispersiyonu için optik domende kromatik dispersiyon kompanseasyonu yapılması gerekmektedir. Bu ise link mesafesinin çok uzun olduğu durumlarda maliyeti artırıp kullanılabilirliği zorlaştırmaktadır. Yapılan çalışmada kablosuz ağ standartlarında (802.11a/g, WiFi, HiperLAN2, 802.16 WIMAX ) son zamanlarda sıklıkla tercih edilen OFDM tekniği kullanılarak, değişik uzunluktaki link mesafelerinde ve değişik haberleşme hızlarında, optik kromatik dispersiyon kompanseasyonu olmaksızın gerçekleştirilen fiber optik haberleşme için bilgisayar benzetim sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca 6 ps/(nm.km) ve 17 ps/(nm.km) değerinde iki değişik kromatik dispersiyon parametresine sahip tek modlu fiber kablo kullanılarak dispersiyon parametresinin sistem performansına olan etkisi de incelenmiştir. Bu şartlar altında belirli BER değerlerine göre ulaşılacak maksimum link mesafeleri ile tablolar halinde bilgisayar benzetiminde kullanılan optik ve elektriksel parametreler de ayrıca sunulmuştur. Tasarlanan modelin optik alıcı yapısı doğrudan algılamalı sistemlerin nonlineerlik etkisinin fazla ve hassasiyetinin az olmasından dolayı, coherent (*evre uyumlu*) olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada modellenen fiber kanala ait parametrelerin piyasada bulunabilecek değerlerde olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Sistem başarımının belirlenmesinde yıldız kümesi diyagramları ve BER/SNR grafikleri tercih edilmiştir.

## 2.2. OFDM İşaretinin Oluşturulması

Şekil 2.1’de 64 adet dikgen sinüzoidal işaretin toplamının zaman bölgesindeki değişimi görülmektedir. Aynı taşıyıcılar bir spektrum analizörde incelendiğinde OFDM sembolünü oluşturan her bir alt taşıyıcı için frekans ekseninde bir bileşen görülmektedir. Şekil 2.2’de ise bu alt taşıyıcıların simgesel gösterimi verilmiştir.

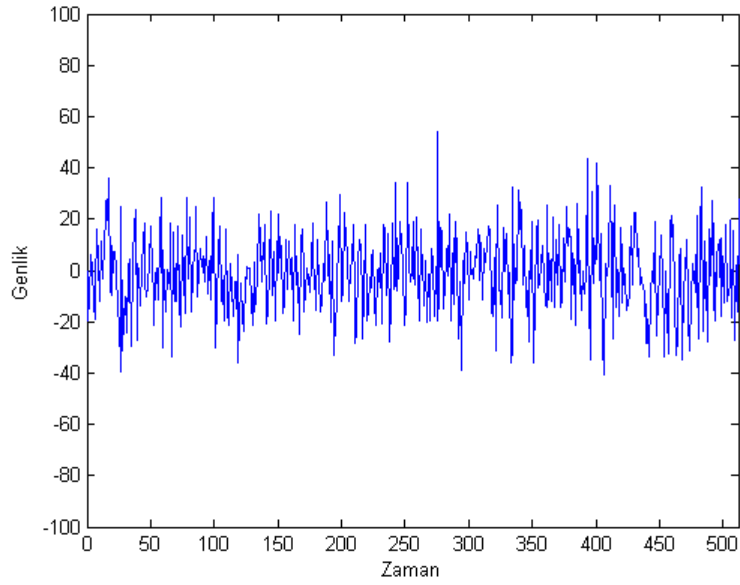


Şekil 2.1. Birim genlikli 64 adet dikgen sinüzoidal işaretin toplamı

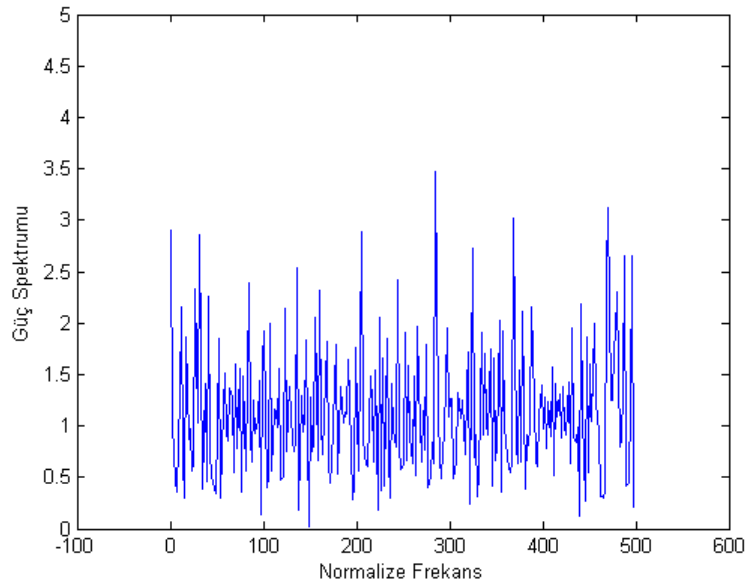


Şekil 2.2. 64 adet alt taşıyıcının frekans bölgesinde simgesel gösterimi

Yapılan çalışmada vericiden gönderilen bitler rasgele seçildiği durumda 512 alt taşıyıcılı OFDM işaretinin zaman bölgesindeki değişimi Şekil 2.3’de görülmektedir. Ayrıca bu işaretin frekans bölgesindeki spektrumu da Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.3. 512 adet OFDM alt taşıyıcısının zaman bölgesi gösterimi

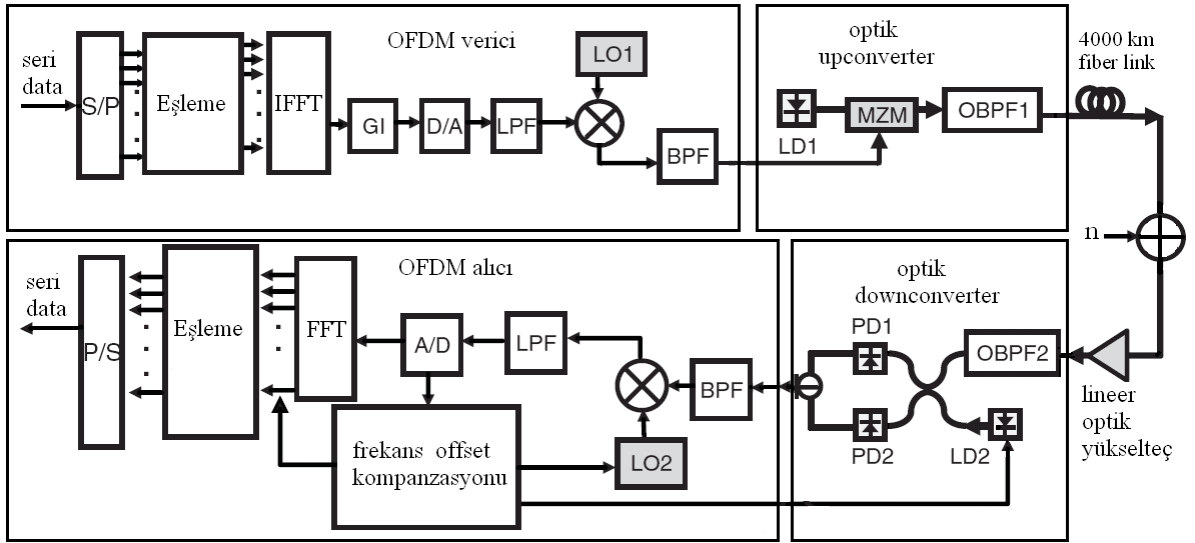


Şekil 2.4. 512 adet OFDM alt taşıyıcısının frekans bölgesi gösterimi

### 2.3. CO-OFDM

Kanal kromatik dispersiyonuna karşı gösterdiği direnç, CO-OFDM tekniğinin optik frekanslarda yapılan çalışmalarda da kullanılabilmesi fikrini doğurmaktadır. Ancak bu çalışmalarda en kritik varsayım CO-OFDM tekniğinde modülasyonun, transmisyonun ve demodülasyonun doğrusal olduğu kabulüdür.

CO-OFDM sistemi 5 blok halinde incelenirse Şekil 2.1'deki gibi RF-OFDM verici, RF-Optik dönüştürücü (*RTO*), optik kanal, optik-RF dönüştürücü (*OTR*) ve RF-OFDM alıcı olarak sıralanabilir. Doğrusallığın sağlanabilmesi için optik modülatörler de buna uygun olarak belirlenmelidir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar sonucu MZM modülatörlerin sıfır noktasında (*null point*) çalıştırıldığında RF sinyali ile optik alan dönüşümünün doğrusal olarak yapıldığı rapor edilmiştir.



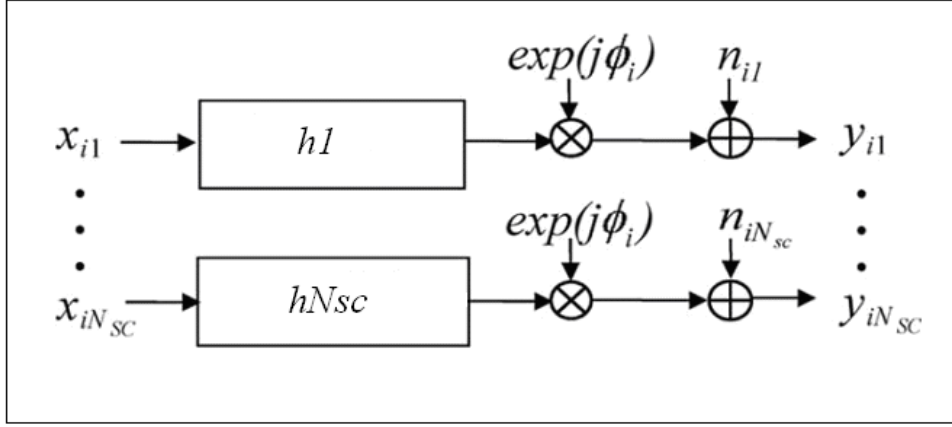
Şekil 2.5. CO-OFDM blok diyagramı

#### 2.3.1. CO-OFDM İçin Optik Kanal Modeli

Uzun mesafeler arası yapılan fiber optik haberleşmede, modlar arası kromatik dispersiyonu ortadan kaldırmak amacıyla tek modlu fiberler tercih edilmektedir. OFDM sinyali Mach-Zehnder modülatörü ile doğrusal olarak RF bölgeden optik bölgeye ve optik bölgeden tekrar RF bölgesine kaydırılmaktadır. Bu aşamadan sonra optik işaret

Şekil 2.1'deki gibi tek modlu fiber kabloya aktarılıp modellenen kanalda iletim sağlanmaktadır.

Kanal modelinde;  $x_{ik}$  verici çıkışındaki  $i$ . OFDM sembolünün  $k$ . alt taşıyıcısını,  $h_k$  kromatik dispersiyon kaynaklı grup hız gecikmesini (*group velocity delay*),  $\phi_i$  lazer faz sürüklenmesini (*laser phase drift*),  $n$  ise sabit spektral gürültü bileşenlerinin toplamını (lazer faz gürültüsü ile alıcı kaynaklı rasgele oluşan gürültüler),  $\tau_0$  ilk alt taşıyıcının gecikmesiyle orantılı doğrusal bir terimi,  $y_{ik}$  ise alıcı girişindeki OFDM sinyalini ifade etmektedir.



Şekil 2.6. Tek modlu fiber optik kablo için kanal modeli

$$y_{ik} = x_{ik} \cdot h_k \cdot e^{j\phi_i} + n_{ik} \quad (2.1)$$

$$h_k = e^{j(\phi_0 + 2\pi\tau_0 f_k + \phi_{D(k)})} \quad (2.2)$$

$$\phi_{D(k)} = \frac{1}{2} \beta_2 \omega^2 L \quad (2.3)$$

$$\beta_2 = \frac{\lambda^2}{2\pi c} D_t, \quad \phi_{D(k)} = \frac{c \cdot \pi}{f_L^2} D_t f_k^2 \quad (2.4)$$

(2.1) denkleminde lazer faz sürüklenmesini belirten  $\phi_i$  değişkeni tek parametre almaktadır [38]. Bu lazerin faz sürüklenmesinin bir OFDM sembolü boyunca sabit olarak kabul edildiğini göstermektedir. Oysa eklenen spektral gürültü bileşenleri toplamında her bir OFDM alt taşıyıcısı için farklı bir gürültü bileşenin varlığı söz konusudur. (2.4)



denkleminde  $f_k$  alt taşıyıcıyı,  $c$  m/s cinsinden ışık hızını,  $f_L$  optik taşıyıcı frekansını,  $D_t$  ise ps/pm cinsinden 1000 km için toplam kromatik dispersiyonu ifade etmektedir.  $\beta_2$  ise grup hız kromatik dispersiyon parametresini ifade etmektedir [11-34].

### 2.3.2. Semboller Arası Girişim (ISI) Etkisi

CO-OFDM sisteminde ISI oluşması alt taşıyıcılar arasında girişime sebep olur ve taşıyıcılar arasındaki dikgenlik bozulur. Bunun önlenmesi için OFDM sembolünün sonundan bir kopya alınıp sembolün başına eklenir. Bu sayede (2.5) denklemindeki şart sağlandığı sürece ISI etkisi oluşmaz. Açıkça görülmektedir ki eğer kanalın gecikme yayılmasından daha uzun bir çevrimsel önek CO-OFDM sembolünün önüne eklenirse kanalda kromatik dispersiyondan dolayı oluşan gecikme yayılması semboller arası girişime neden olmayacaktır.

$$\frac{c}{f_L^2} |D_t| N_{sc} \Delta_f \leq \Delta_G \quad (2.5)$$

### 2.3.3. Lazer Faz Sürüklenmesi ve Kestirimi

Lazer faz sürüklenmesi etkisi CO-OFDM sistemlerde doğrudan algılamalı sistemlere göre daha etkilidir. Alıcı tarafta ise verinin elde edilmesi için lazer faz sürüklenmesi etkisinin kestirilip, alınan sinyal üzerindeki etkisinin giderilmesi gerekmektedir. Bunun için (2.6) denkleminde de görüldüğü gibi, oluşturulan OFDM sinyali içerisine yerleştirilen pilot taşıyıcılardan yararlanılır [11-34].

$$\hat{\phi}_i = \frac{1}{N_P} \sum_{k=1}^{N_{SP}} [\arg(y_{ik}) - \arg(x_{ik})] \quad (2.6)$$

Gönderilen ve alınan bütün pilot alt taşıyıcıların fazları arasındaki farkın ortalaması, lazer faz sürüklenmesinin sonucu oluşan faz kaymasına yakın bir değer olacaktır. Lazer faz sürüklenmesi kestirildikten sonra faz düzeltme işlemi yapılır. (2.7) ve (2.8) denklemlerinde faz düzeltme işleminden sonra elde edilen veri ve gürültü bileşenleri görülmektedir.

$$x_{ik}^{fs} = y_{ik} e^{-j\phi_i} \quad (2.7)$$

$$n_{ik}^{fs} = n_{ik} e^{-j\phi_i} \quad (2.8)$$

Önemli bir veri olarak bahsetmek gerekir ki optik kanalda iletilen 512 OFDM sembolü süresi boyunca (262144 bit) kanalın transfer fonksiyonunun değişmediği varsayılmıştır. Bundan dolayı kanalın transfer fonksiyonu ifadesinde sembol için bir indis bulunmamaktadır.

$$x_{ik}^- = x_{ik}^{fs} \frac{h_k^*}{|h_k|^2} \quad (2.9)$$

Her 512 sembol sonunda ya alınan veri üzerinden ya da alıcıda bilinen bir öğrenme dizisinin yardımıyla kanal kestirilip denkleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan OFDM taşıyıcılarının sayısının fazla olması taşıyıcı başına düşen saniyedeki bit miktarı azalmakta ve böylelikle kromatik dispersiyon kompanze edilmektedir. Ancak kromatik dispersiyon parametresi  $D_t$ 'nin kestirimi elde edilmek istenirse bunun için gönderilen tüm sembollerin faz ortalaması gerekmektedir.

$$\phi_D^-(f_k) = \frac{1}{N_{SEMBOL}} \sum_{i=1}^{N_{SEMBOL}} [\arg(x_{ik}^{fs}) - \arg(x_{ik}^-)] \quad (2.10)$$

$\phi_D^-(f_k)$  elde edildikten sonra kromatik dispersiyon parametresi  $D_t$ , onun ikinci dereceden türevlenebilen bir fonksiyonu ile ifade edilip değeri belirlenebilir [11-34].

#### 2.3.4. CO-OFDM Yönteminin Tek Modlu Fiber Üzerinde Başarımı

Yapılan çalışmanın sonuçlarının elde edilebilmesi için bir Monte Carlo bilgisayar benzetimi oluşturulmuştur. Benzetim programında kromatik dispersiyondan dolayı oluşan ve alt taşıyıcı frekansına göre değişen bir bileşen, lazerin faz gürültüsü etkisini içeren bir bileşen ve optik gürültü bileşenlerinin toplamını Gauss dağılımıyla ifade edip modelleyen

bir bileşen fiber optik kanala etkiyen parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca fiberde ilerleyen ışığın zayıflamasını içeren bir zayıflama parametresi ile bu zayıflamayı tolere edecek yükselteç için bir kazanç parametresi de bilgisayar benzetiminde dikkate alınmıştır. Sıfır ortalamalı Gauss dağılımını oluşturabilmek için rasgele sayı üreten fonksiyonlardan yararlanılmıştır [35,36]. Yapılan çalışmanın sadece kromatik dispersiyon için değil PMD'nin kompanzasyonu için de kullanılabileceği bilinmektedir [34].

OFDM sinyalinin oluşum aşamasında faz kaydırmalı anahtarlama (*Phase shift keying, PSK*) tercih edilmiştir. Bunun nedeni sönmülemeli kanallarda faz kaydırmalı anahtarlama modülasyonunun performansının, kanalın genlik değişimlerine karşı hassasiyetinin olmaması ve böylece sistem başarımının artmasıdır [37-39]. Ayrıca lazer faz sürüklenmesinin kestirimi, OFDM sembolünün içerisine yerleştirilen pilot alt taşıyıcılarla gerçekleştirilmiştir. Bu fazın denkleştirilmesi ve denkleştirilmemesi sonucu oluşan fark, değişik veri hızlarında ve link mesafelerinde Şekil 2.7 ile Şekil 2.41 arasındaki grafiklerde görülmektedir. Bilgisayar benzetim programında, programlama dili olarak C dili tercih edilmiş olup grafik çizimleri için MATLAB kullanılmıştır. [40,41].

Yapılan çalışmada elde edilen SNR/BER, yıldız kümesi diyagramları; 100km, 1000 km, 3000 km link mesafesinde; 5 Gbps, 8 Gbps ve 16 Gbps veri hızında; tablo 2.2 ile verilen optik parametreler baz alınarak elde edilmiştir. Ayrıca lazer faz gürültüsünün kestirilip alıcıda düzeltildiği durumlardaki yıldız kümesi diyagramları verilmiştir. Yıldız kümesi diyagramlarında, kanala gönderilen BPSK modülasyonuna tabi tutulmuş +1 ve -1 değerlerinin alıcıdaki genliklerinin ve fazlarının değişik SNR değerlerinde ne kadar değişime uğradığı görülmektedir. SNR/BER grafiklerinde bahsedilen ideal durumdan kasıt, kanalın dispersiyon etkisinin sıfır olduğudur.

Tablo 2.1 Bilgisayar benzetiminde kullanılan temel optik fiber parametreleri

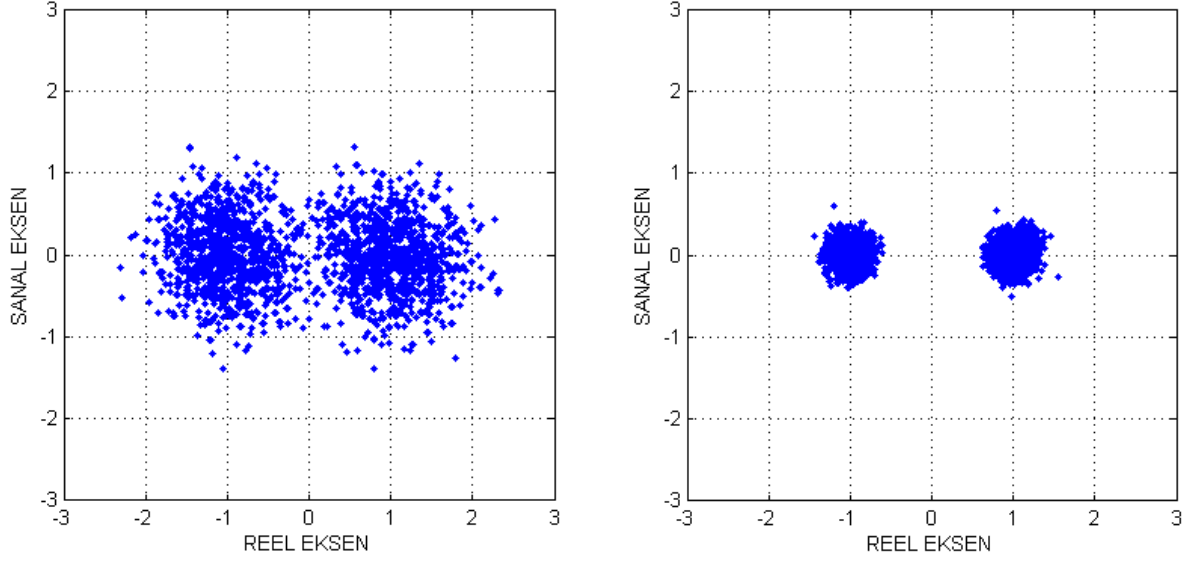
Parametre	Değeri
<i>Dalga boyu</i>	<i>1550 nm</i>
<i>Işık hızı</i>	<i>200000 km/s</i>
<i>Fiber optik kablo uzunluğu</i>	<i>100 km, 1000 km, 3000 km</i>
<i>Kromatik dispersiyon parametresi (<math>D_c</math>)</i>	<i>6 ps/pm, 17 ps/pm</i>

### 2.3.4.1. 5 Gbps Sabit Veri Hızı İçin Elde Edilen Bulgular

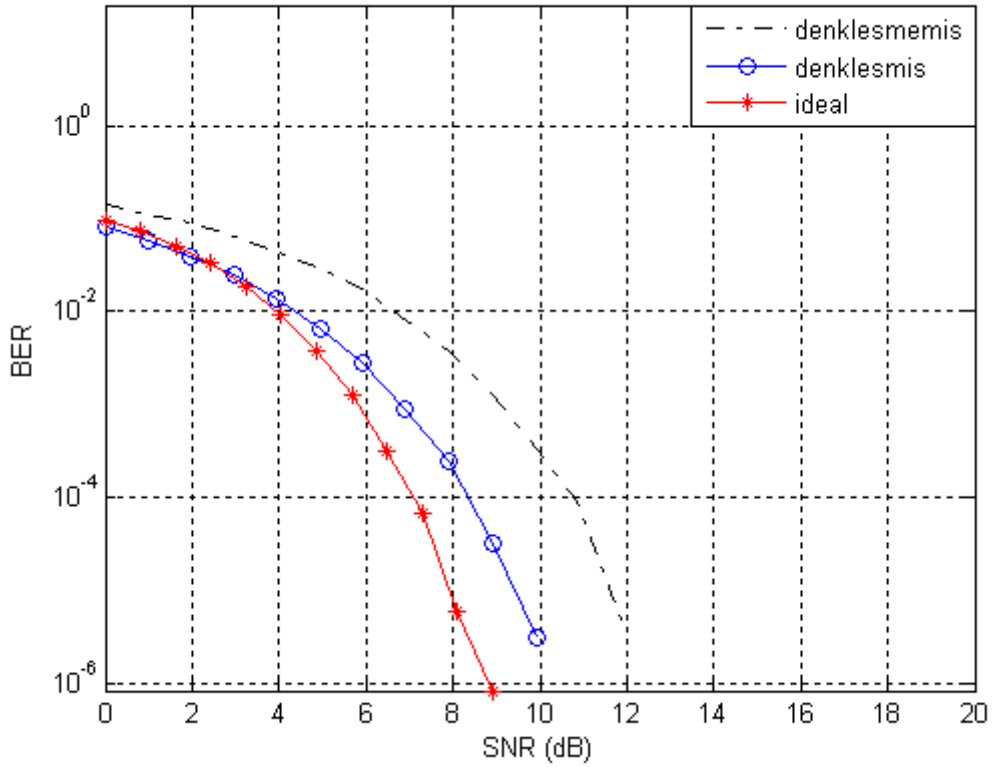
Tablo 2.2 Bilgisayar benzetiminde 5 Gbps için kullanılan temel OFDM parametreleri

Parametre	Değeri
Örnekleme frekansı, $f_s$	6 Ghz
Örnekleme periyodu, $T_s$	166.667 ps
Faydalı sembol süresi $T_U$	85.334 ns
Çevrimsel önek süresi, $T_{CP}$	10.667 ns, 21.334 ns
Sembol süresi $T_{SYM} = T_U + T_{CP}$	96 ns, 106.668 ns
Veri alt taşıyıcı sayısı $N_{SD}$	448
Pilot alt taşıyıcı sayısı $N_{SP}$	64
Toplam alt taşıyıcı sayısı $N_{SC} = N_{SD} + N_{SP}$	512
Alt taşıyıcı frekans aralığı $\Delta f$	11.71875Mhz

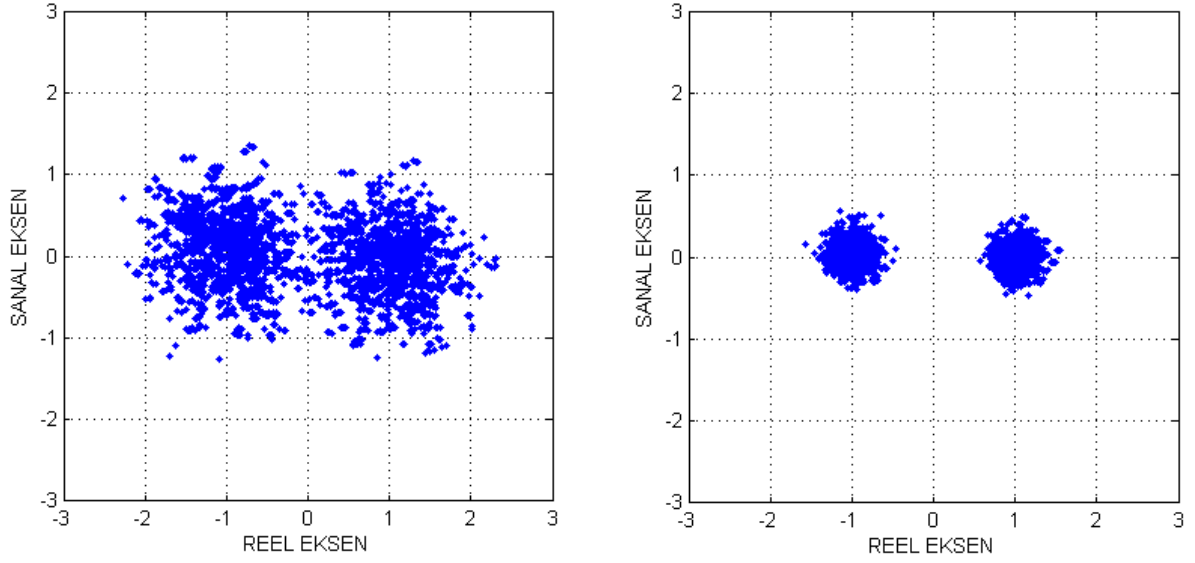
5 Gbps data hızı için Tablo 2.2 'deki OFDM parametreleri kullanılmıştır. Buna göre 4096 bitlik bir paketin CO-OFDM yöntemiyle 1000 kanal üzerinden gerçekleştirilen bilgisayar benzetiminde 100 km link mesafesi ve 6 ps/(nm.km) değerindeki dispersiyon parametresi için, SNR değerinin 4 dB'den 14 dB'ye çıkarılması durumunda, gönderilen BPSK modülasyonlu +1 ve -1 değerlerinin genliğinde ve fazındaki değişimin azaldığı, yani +1 ve -1 genlik değerleri etrafında kümeleşmenin arttığı Şekil 2.7'de görülmektedir. Bu durumda artan SNR değerine karşılık alıcı tarafta elde edilen hatalı bit miktarı azalmıştır. Şekil 2.8'de bu durum açıkça görülmektedir. Şekil 2.8'de ayrıca, alıcıda kestirilen lazer faz gürültüsünün denkleştirilmiş ve denkleştirilmemiş olduğu durumdaki sistem başarımının farkı da açıkça görülmektedir. Bu fark dispersiyon parametresinin değeri ve link mesafesi arttıkça daha da belirgin olarak SNR/BER grafiklerinde görülmektedir. Şekil 2.10 ve Şekil 2.12'deki grafiklerde dispersiyon parametresinin ve hızın yüksek olmamasından dolayı link mesafesi artmış olmasına rağmen sonuçlarda belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Şekil 2.14 ve Şekil 2.16'daki grafiklerde ise dispersiyon parametresi 17 ps(nm.km) değerine çıksa da yine veri hızının düşük olmasından dolayı grafiklerde belirgin bir farklılık yoktur. Ancak link mesafesi 1000'den 3000 km'ye çıkarıldığında Şekil 1.16'da görüldüğü gibi aynı BER değerini sağlamak için yaklaşık 3 dB daha fazla SNR ihtiyacı oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 2.17'deki yıldız kümesi diyagramında artan dispersiyon ve link mesafesinden dolayı vericiden gönderilen +1 ve -1 genlikli işaretlerin reel ve sanal eksende yayılımı dikkat çekmektedir.



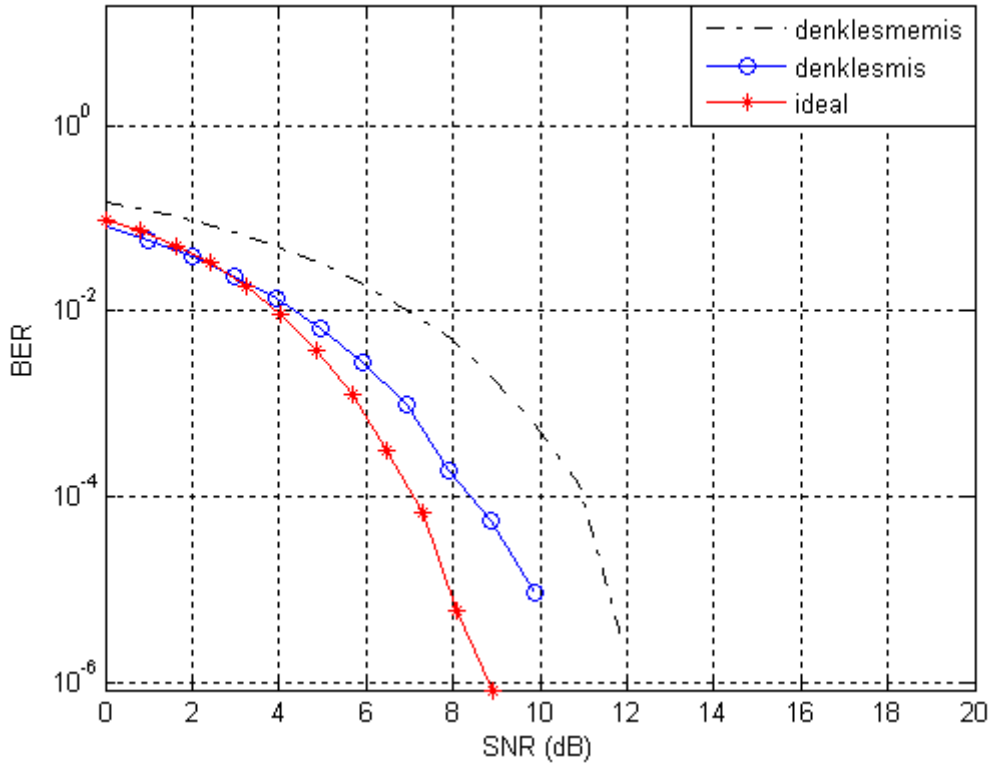
Şekil 2.7. Veri hızı:5 Gbps, Dt:6 ps/(nm.km) ve L:100 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



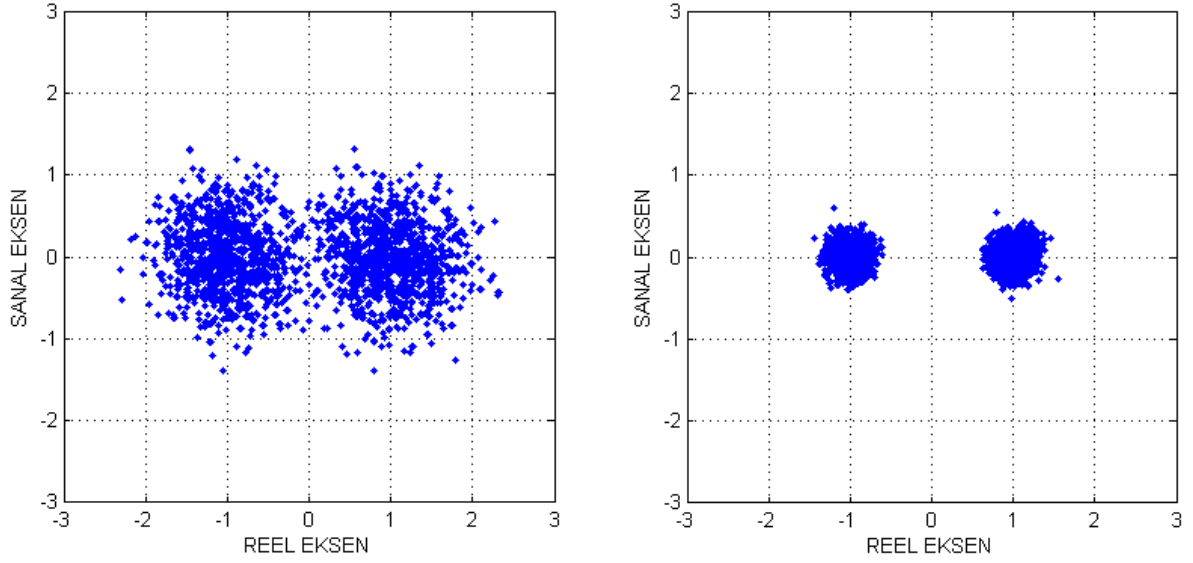
Şekil 2.8. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği



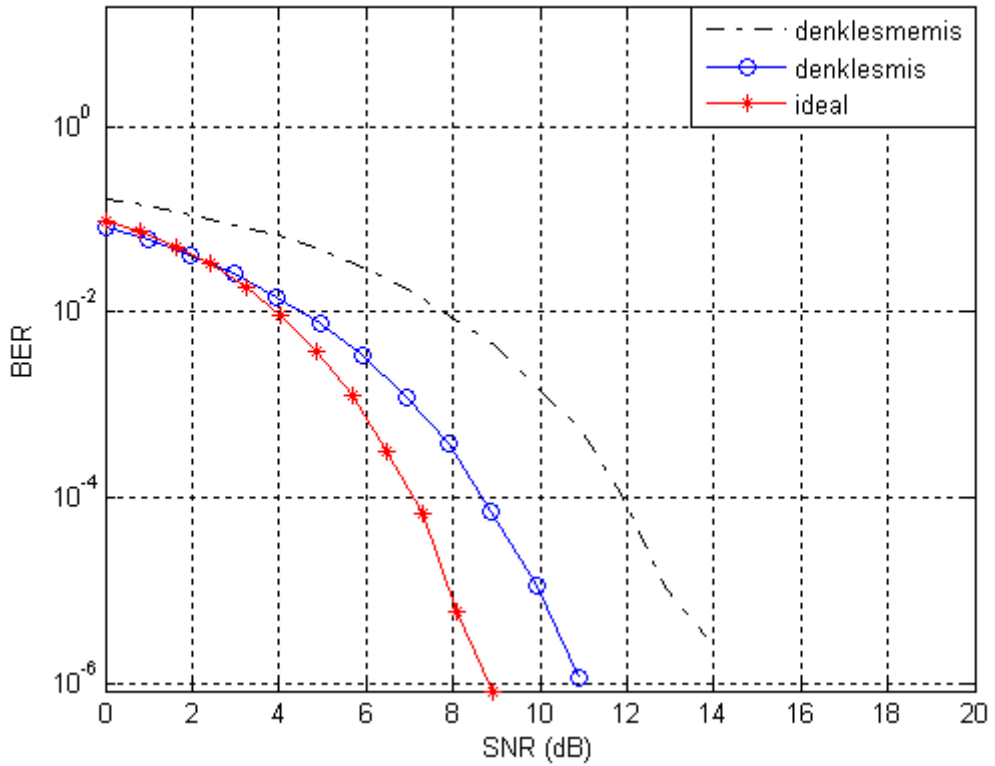
Şekil 2.9. Veri hızı:5 Gbps, Dt:6 ps/(nm.km) ve L:1000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



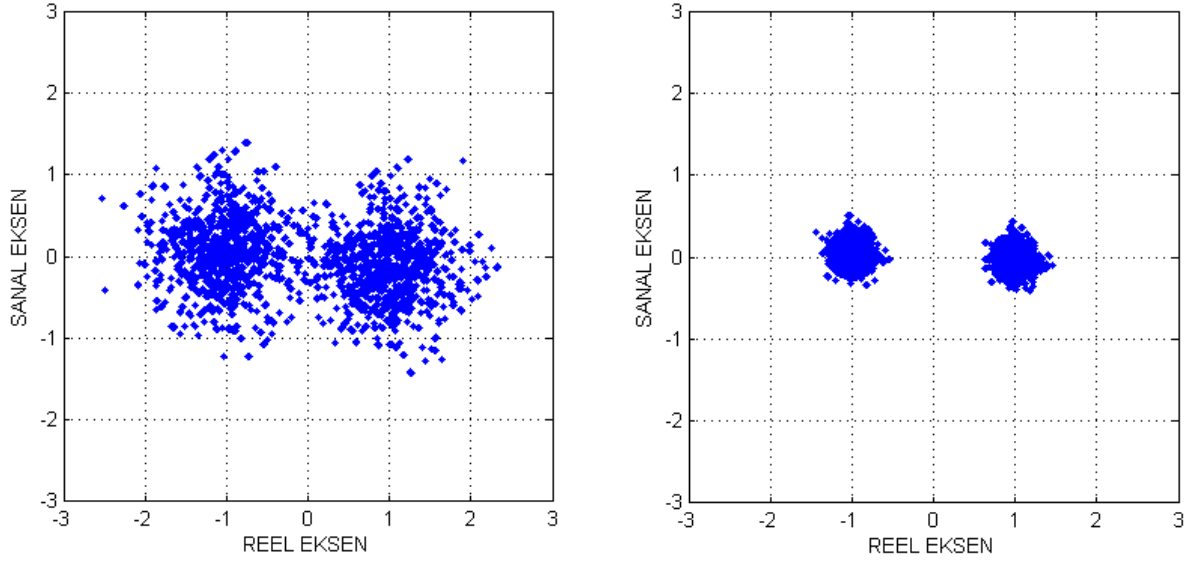
Şekil 2.10. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği



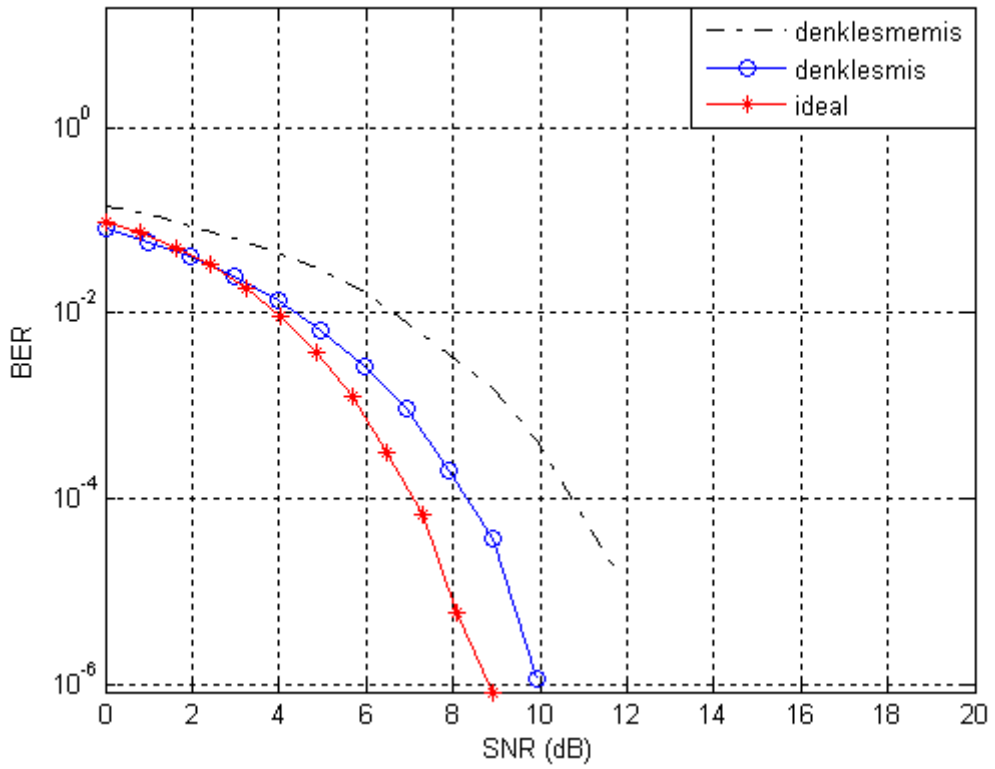
Şekil 2.11. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



Şekil 2.12. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği

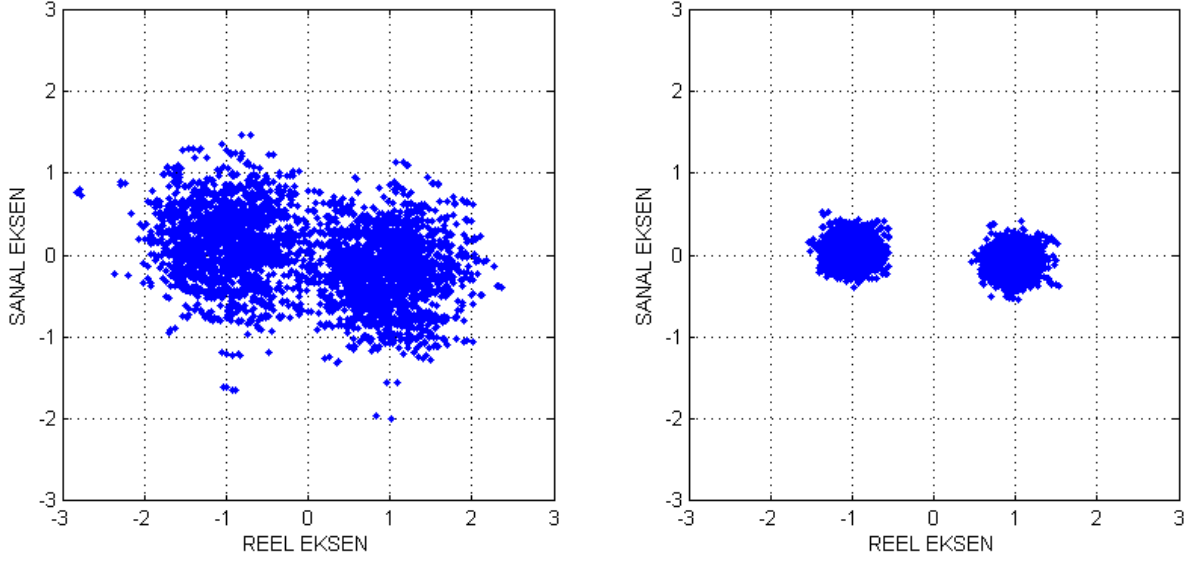


Şekil 2.13. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları

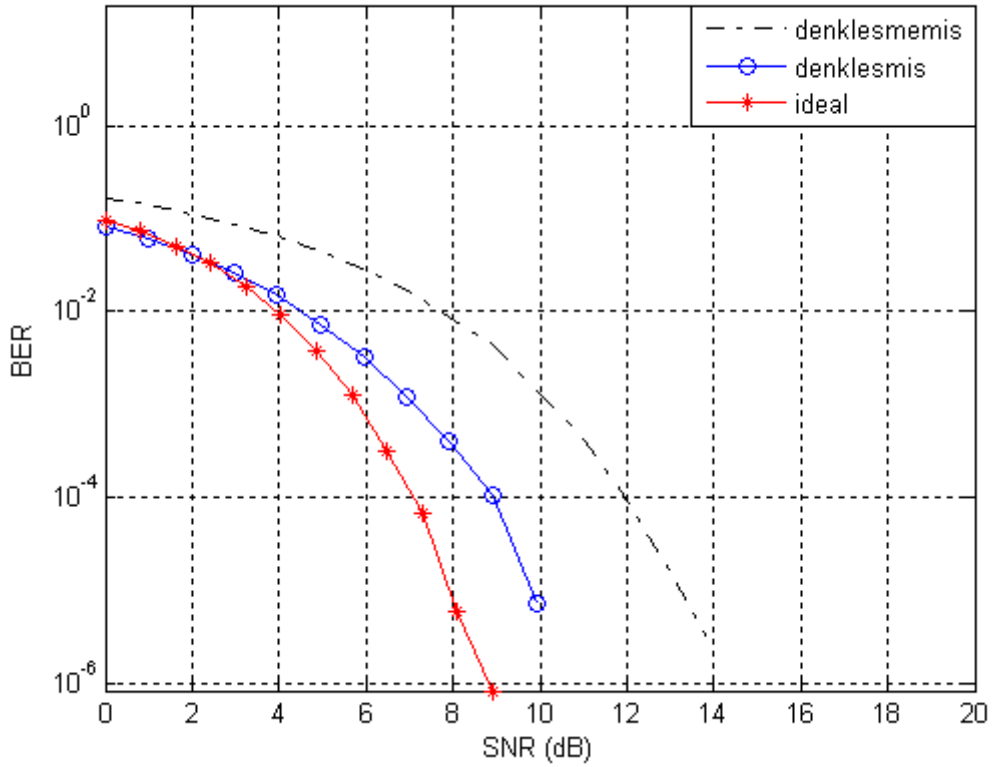


Şekil 2.14. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği

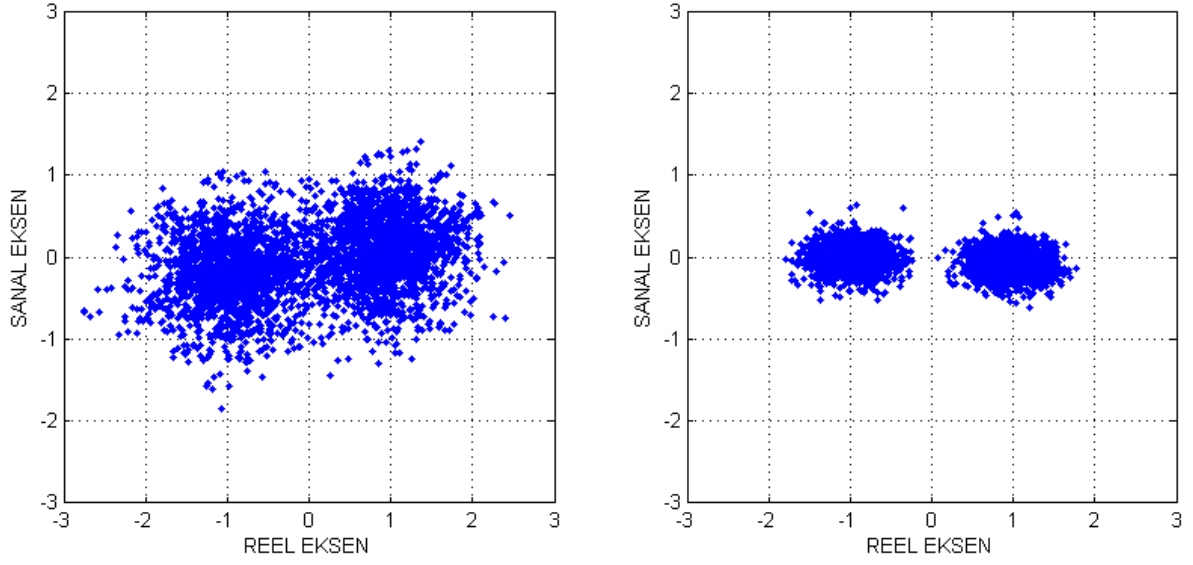




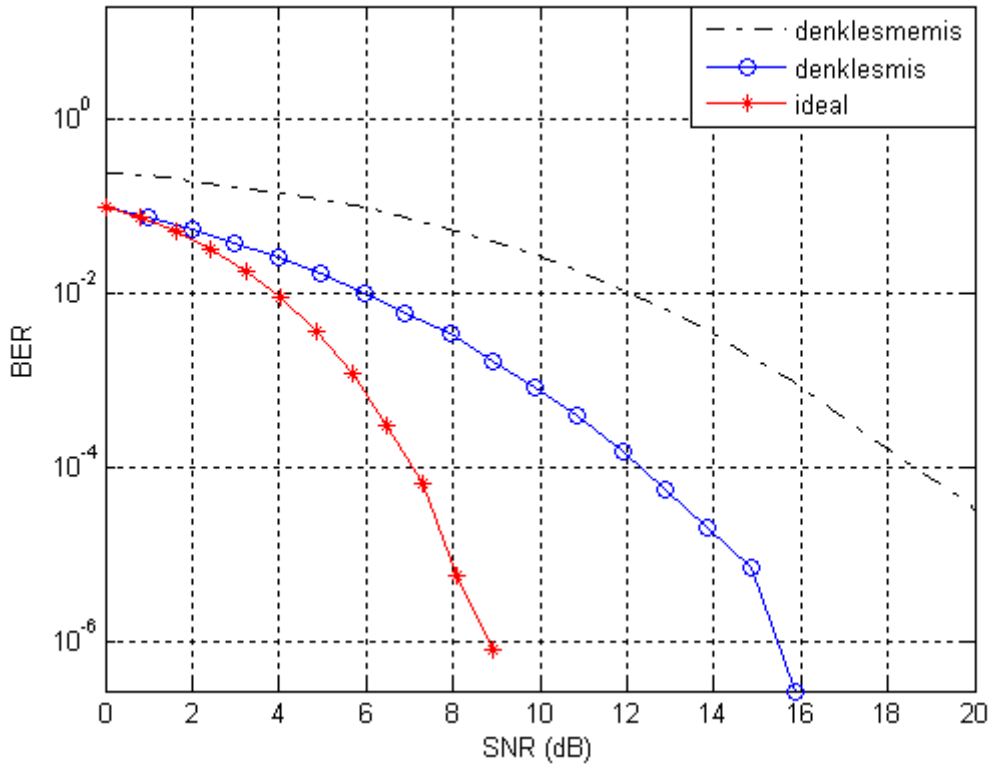
Şekil 2.15. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



Şekil 2.16. Veri hızı:5 Gbps,Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği



Şekil 2.17. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



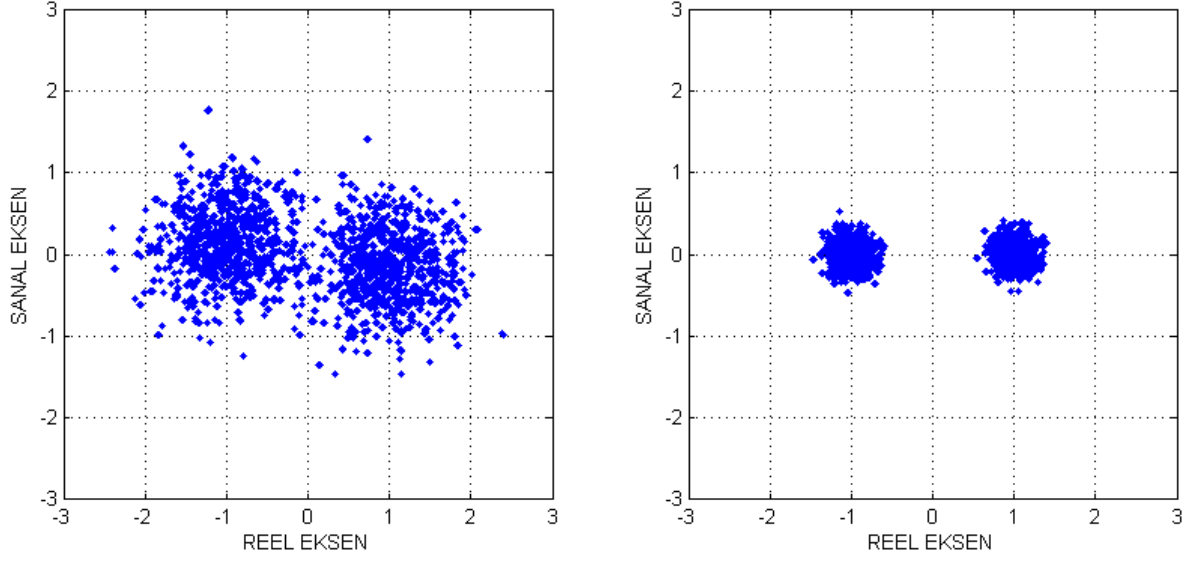
Şekil 2.18. Veri hızı:5 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği

### 2.3.4.2. 8 Gbps Sabit Veri Hızı İçin Elde Edilen Bulgular

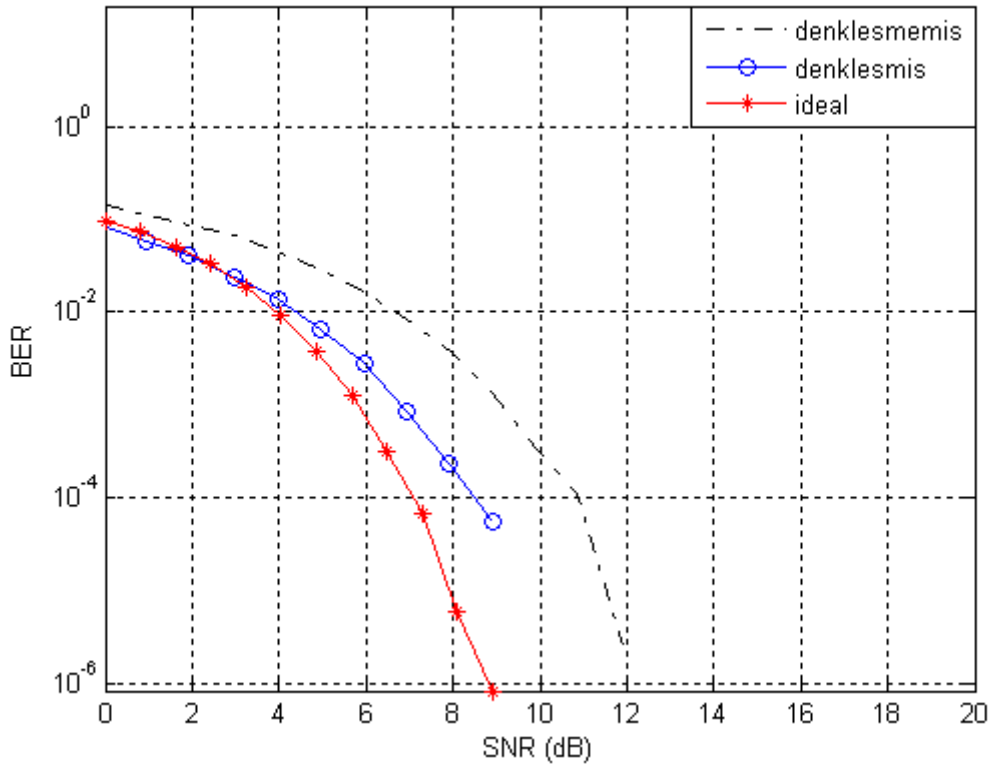
Tablo 2.3 Bilgisayar benzetiminde 8 Gbps için kullanılan temel OFDM parametreleri

Parametre	Değeri
Örnekleme frekansı, $f_s$	10 Ghz
Örnekleme periyodu, $T_s$	100 ps
Faydalı sembol süresi $T_U$	51.2 ns
Çevrimsel önek süresi, $T_{CP}$	6.4 ns, 12.8 ns
Sembol süresi $T_{SYM} = T_U + T_{CP}$	57.6 ns, 64 ns
Veri alt taşıyıcı sayısı $N_{SD}$	448
Pilot alt taşıyıcı sayısı $N_{SP}$	64
Toplam alt taşıyıcı sayısı $N_{SC} = N_{SD} + N_{SP}$	512
Alt taşıyıcı frekans aralığı $\Delta f$	19.53125 Mhz

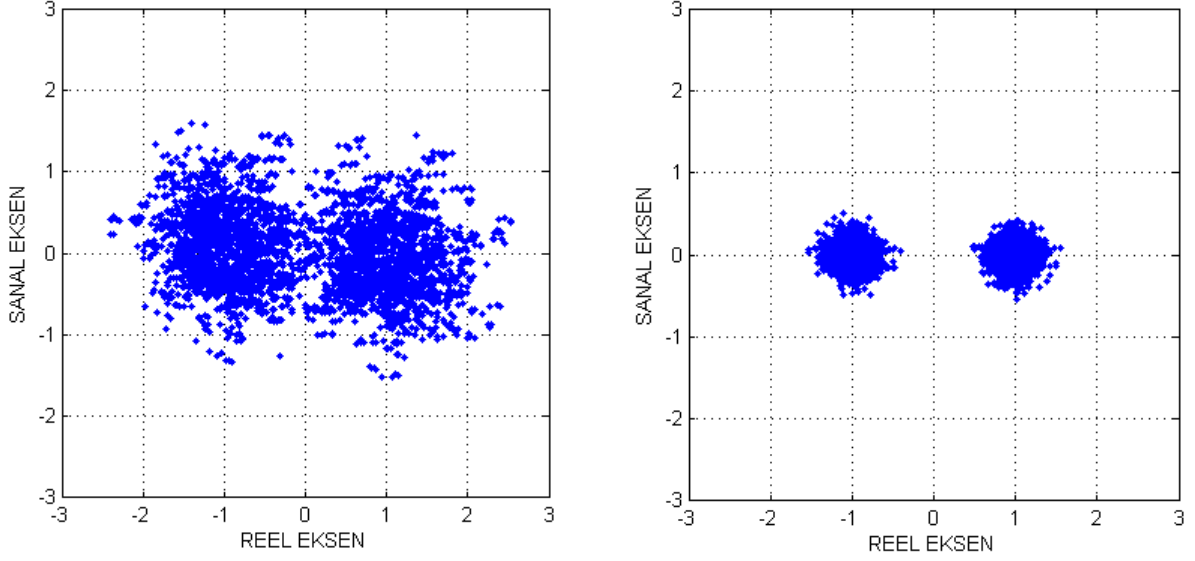
8 Gbps data hızı için Tablo 2.3 'deki OFDM parametreleri kullanılmıştır. Buna göre 4096 bitlik bir paketin CO-OFDM yöntemiyle 1000 kanal üzerinden gerçekleştirilen bilgisayar benzetiminde 100 km link mesafesi ve 6 ps/(nm.km) değerindeki dispersiyon parametresi için, SNR değerinin 4 dB'den 14 dB'ye çıkarılması durumunda, gönderilen BPSK modülasyonlu +1 ve -1 değerlerinin genliğinde ve fazındaki değişimin azaldığı şekil 2.19'da görülmektedir. Bu durumda 5 Gbps veri hızındakine benzer şekilde artan SNR değerine karşılık alıcı tarafta elde edilen hatalı bit miktarı azalmıştır. Şekil 2.20'de bu durum açıkça görülmektedir. Ancak artan veri hızının etkisi Şekil 2.24 ile Şekil 2.12'nin karşılaştırılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu grafiklerde aynı dispersiyon parametresi ve aynı link mesafesi olmasına karşın elde edilen SNR/BER grafikleri arasındaki fark aynı BER değeri için yaklaşık 4 dB seviyelerindedir. Lazer faz gürültüsünün denkleşmemiş olduğu durumda ise bu fark daha da artmaktadır. 8 Gbps veri hızında dispersiyon parametresi 17 ps/(nm.km) değerine çıktığında ve link mesafesi de 3000 km olduğunda sistem performansı oldukça düşük seviyelere gerilemiştir. Şekil 2.29 ve Şekil 2.30'daki grafiklerde bu durum açıkça görülmektedir. Şekil 2.29'daki yıldız kümesi diyagramlarında da görüldüğü gibi vericiden gönderilen +1 ve -1 genlikli sinyallerin genlik ve fazlarındaki değişim oldukça fazla olmaktadır. Ayrıca alıcı tarafta denkleştirmenin getirdiği olumlu etki oldukça azalmaktadır.



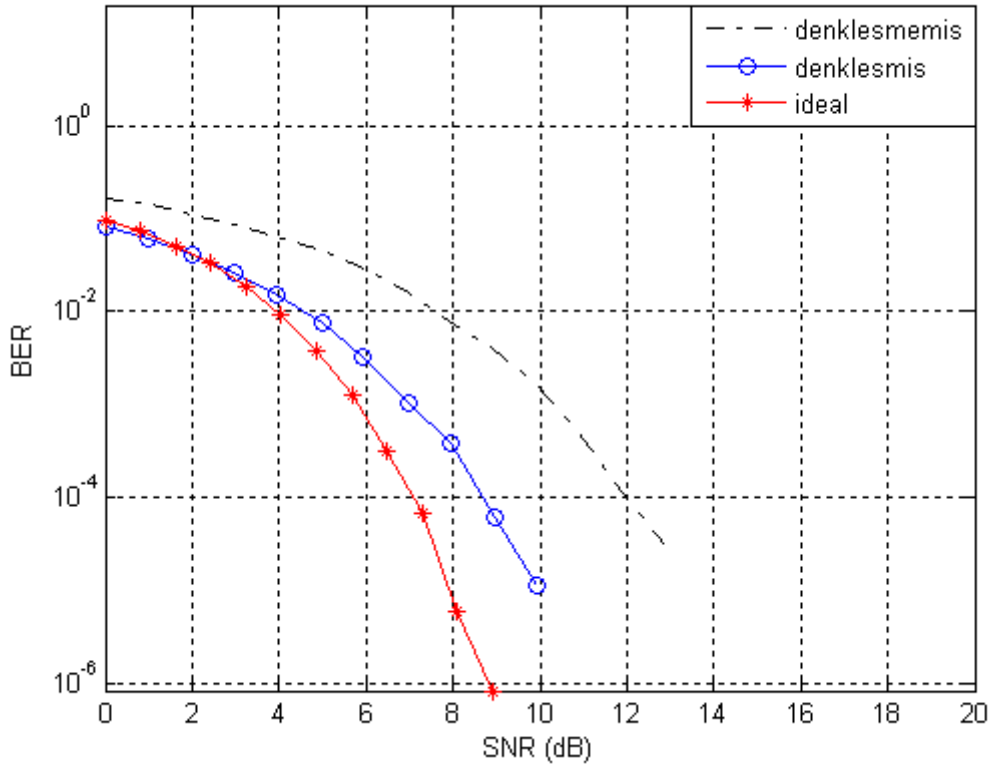
Şekil 2.19. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



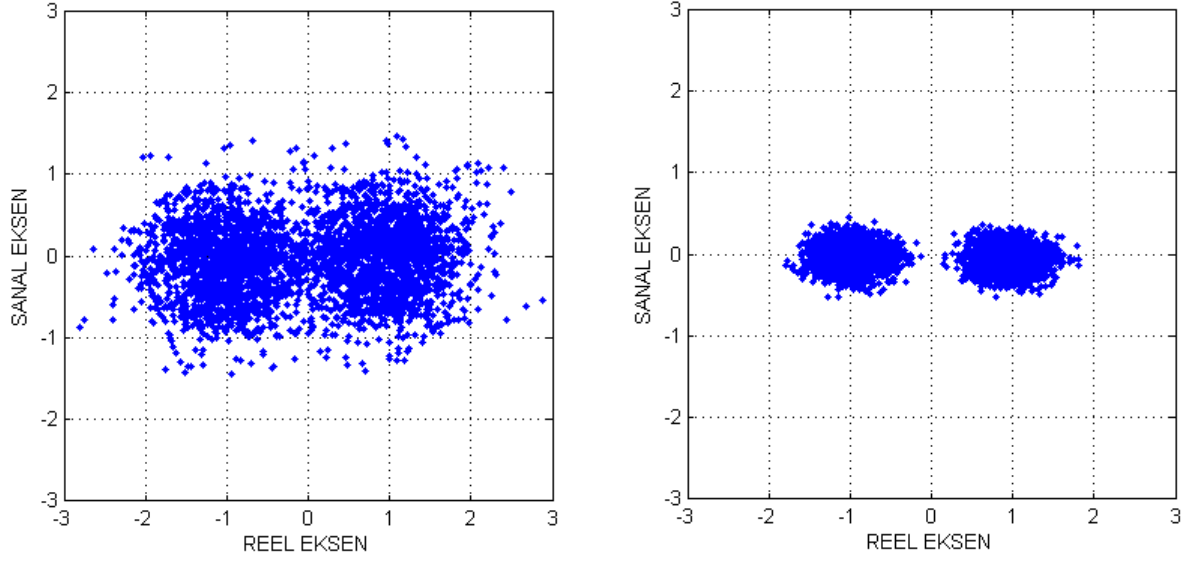
Şekil 2.20. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği



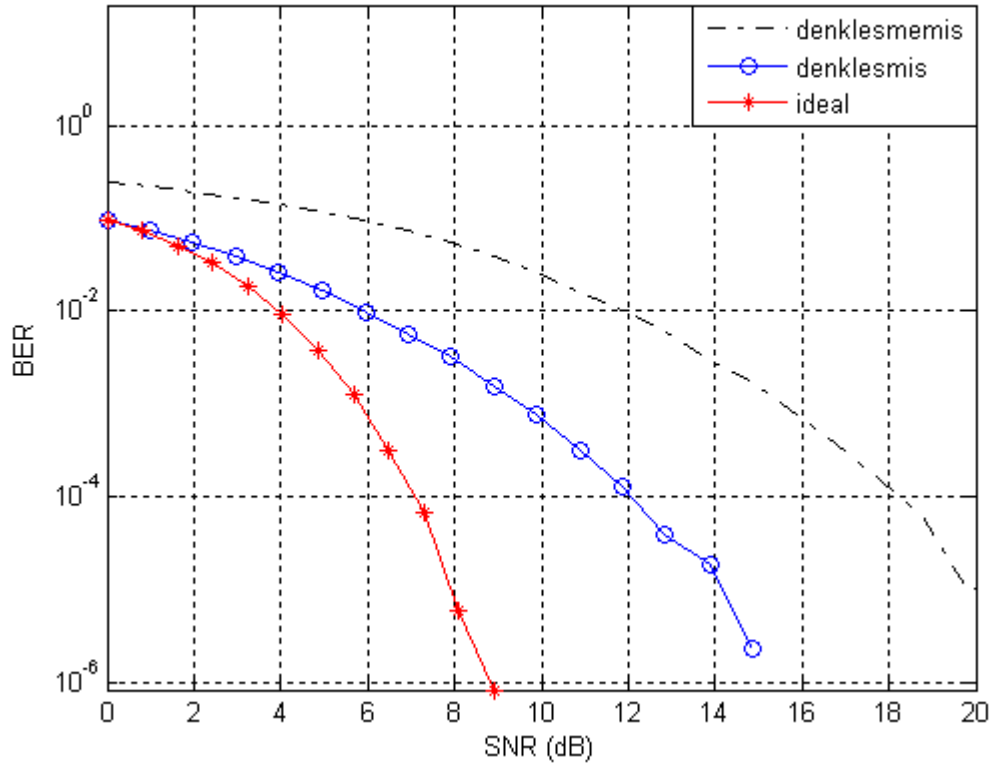
Şekil 2.21. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



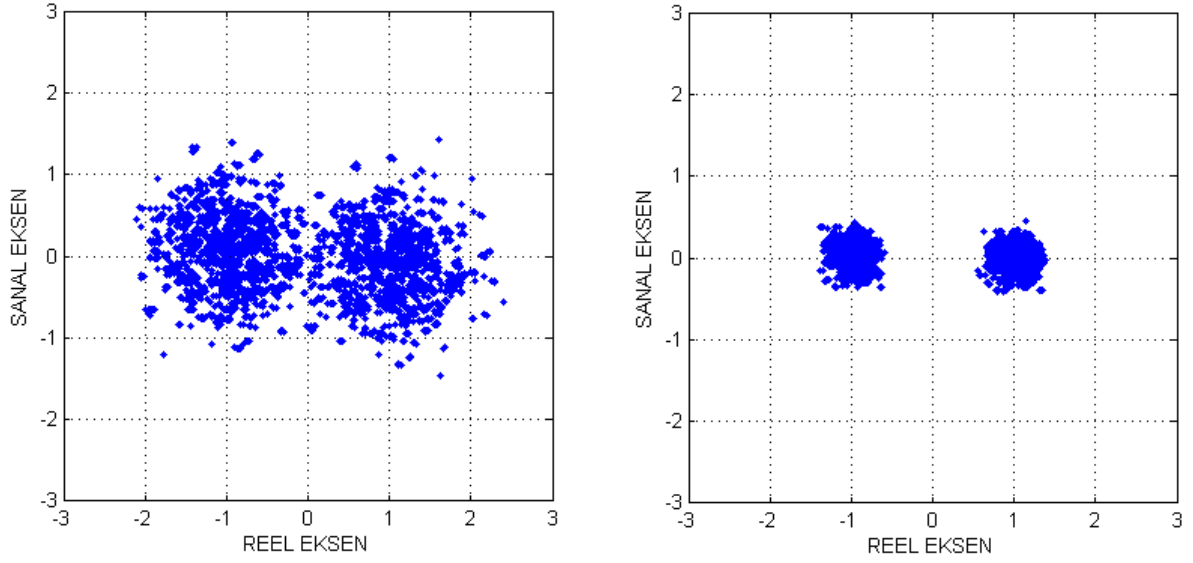
Şekil 2.22. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği



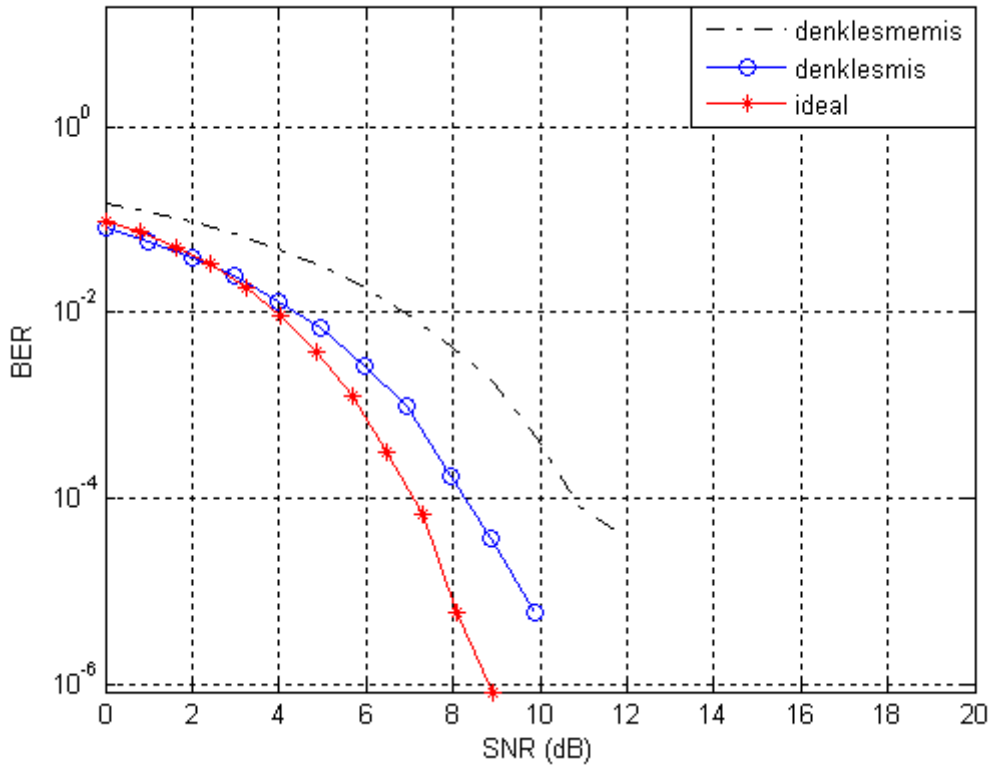
Şekil 2.23. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



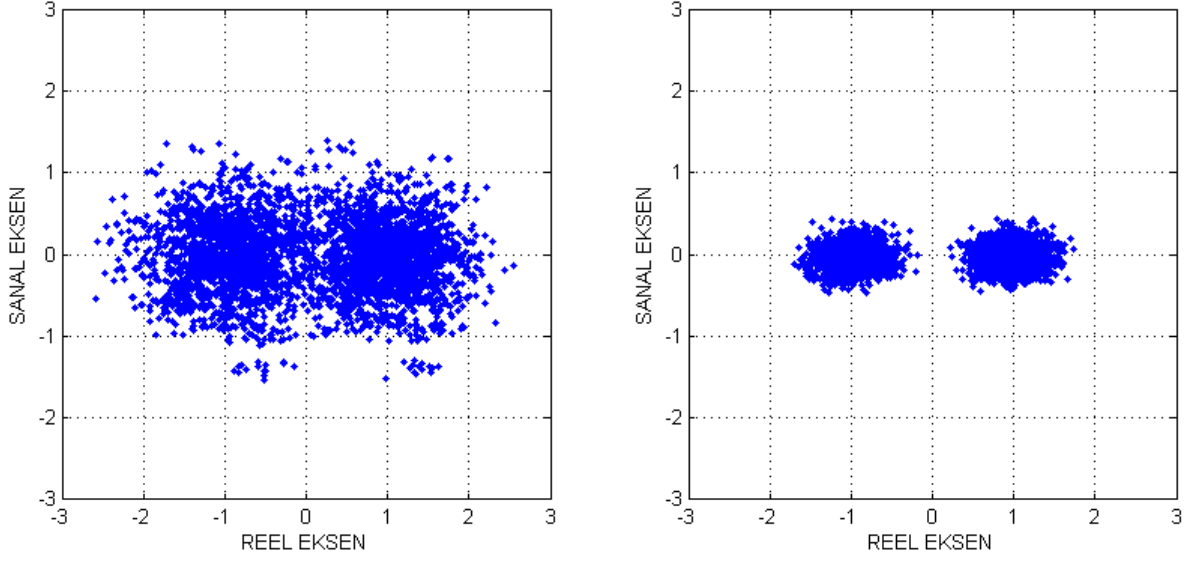
Şekil 2.24. Veri hızı:8 Gbps,Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği



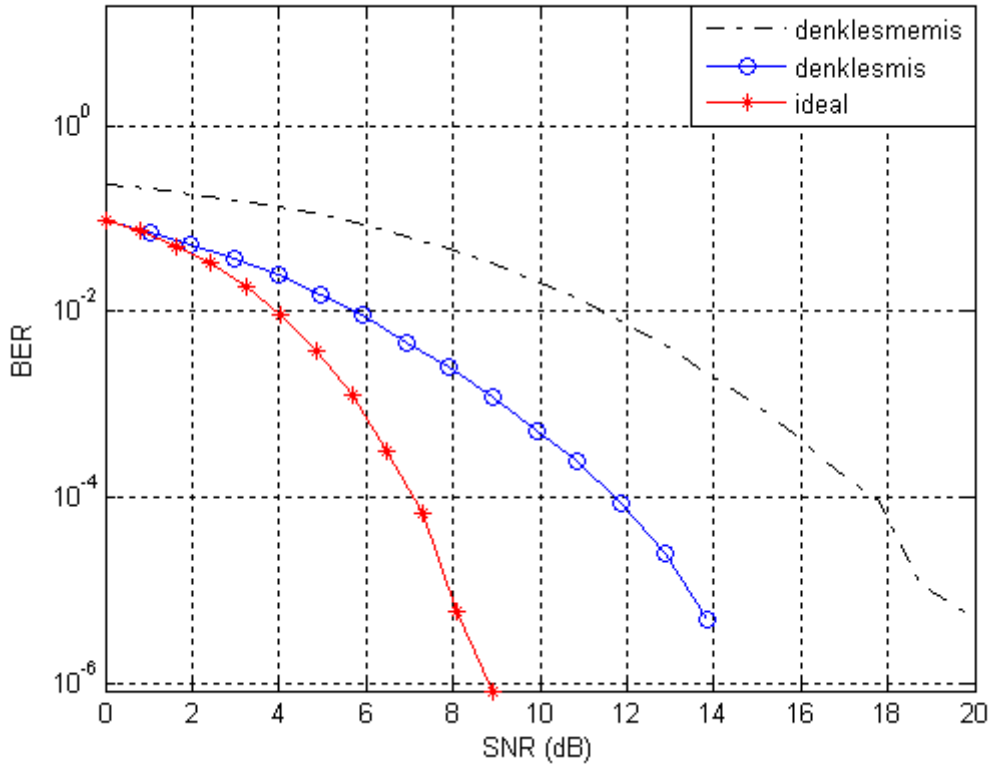
Şekil 2.25. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



Şekil 2.26. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği

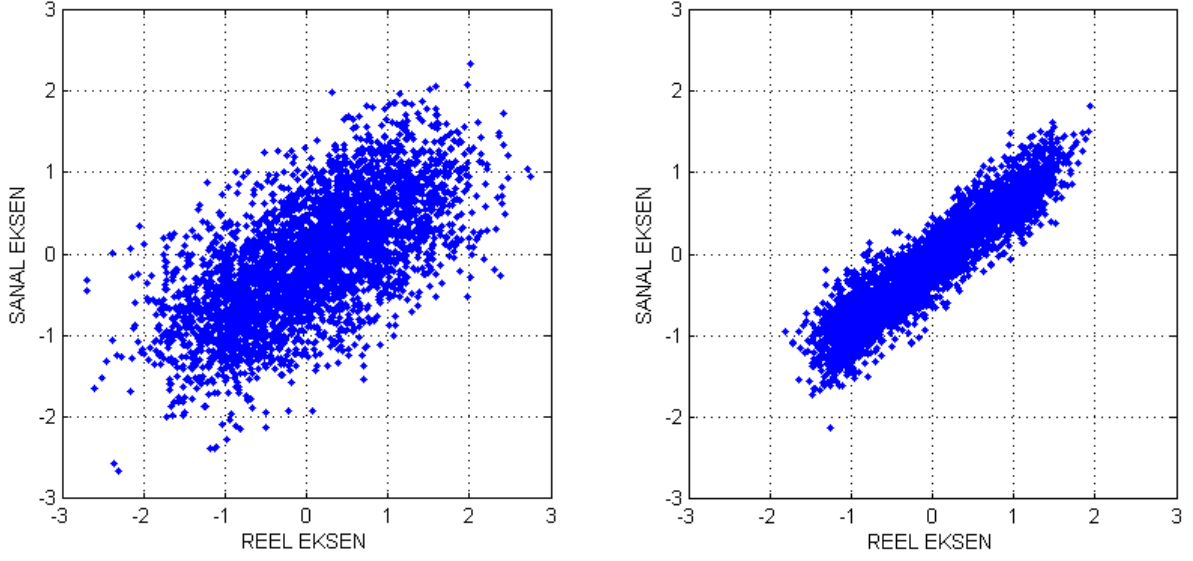


Şekil 2.27. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları

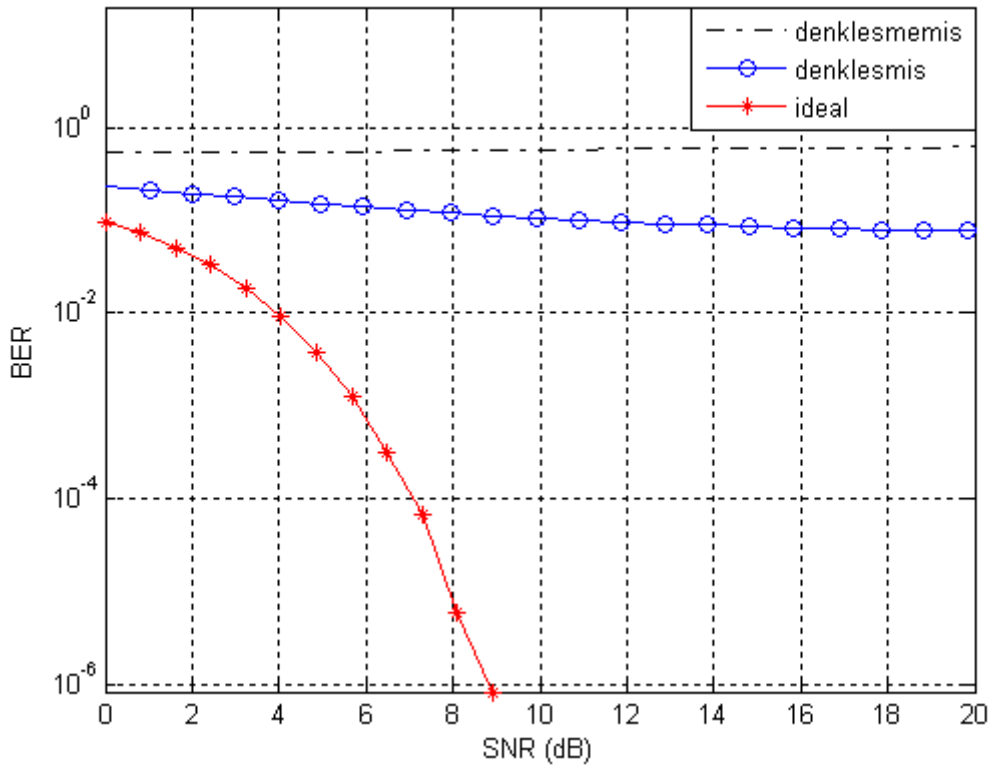


Şekil 2.28. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği





Şekil 2.29. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



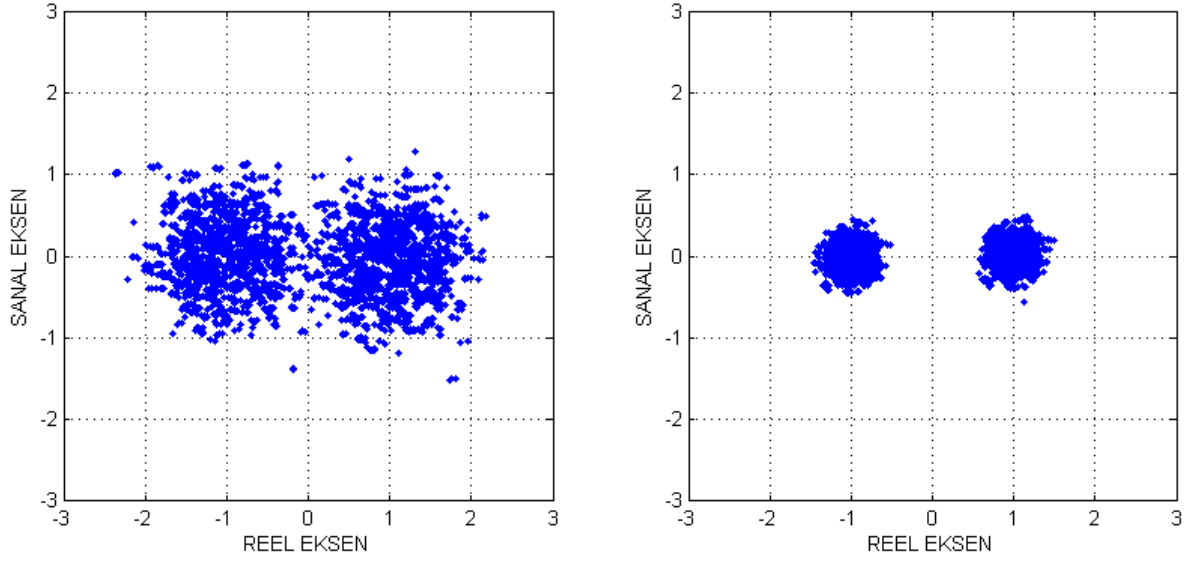
Şekil 2.30. Veri hızı:8 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği

### 2.3.4.3. 16 Gbps Sabit Veri Hızı İçin Elde Edilen Bulgular

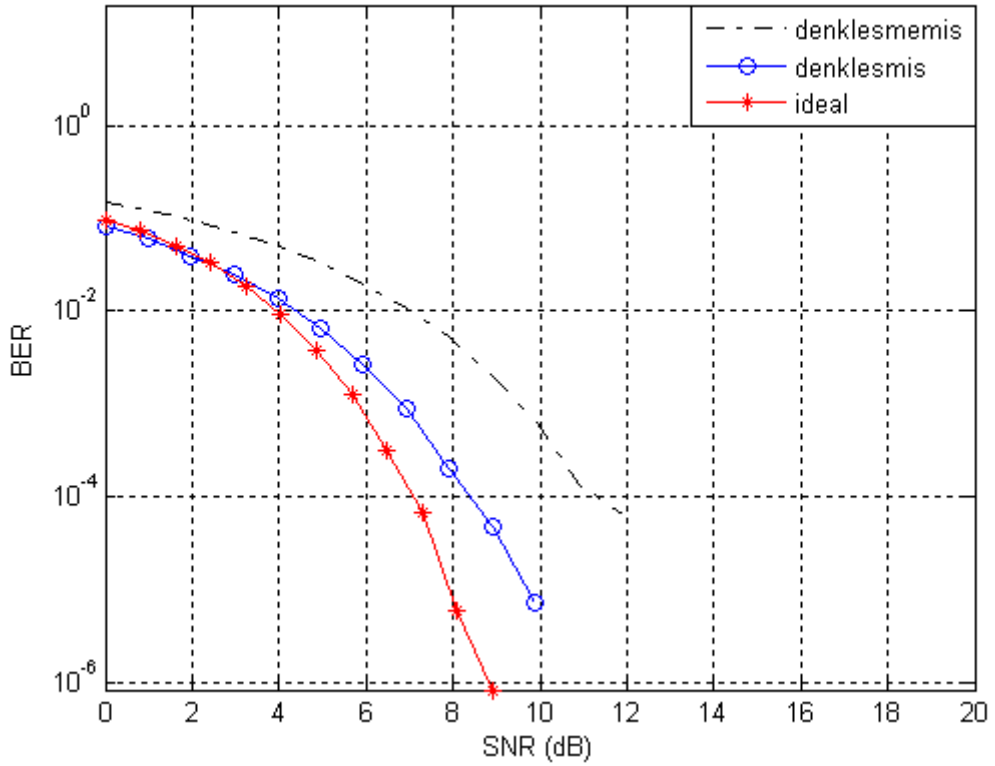
Tablo 2.4 Bilgisayar benzetiminde 16 Gbps için kullanılan temel OFDM parametreleri

Parametre	Değeri
Örnekleme frekansı, $f_s$	20 Ghz
Örnekleme periyodu, $T_s$	50 ps
Faydalı sembol süresi $T_U$	25.6 ns
Çevrimsel önek süresi, $T_{CP}$	3.2ns, 6.4 ns
Sembol süresi $T_{SYM} = T_U + T_{CP}$	28.8 ns, 32ns
Veri alt taşıyıcı sayısı $N_{SD}$	448
Pilot alt taşıyıcı sayısı $N_{SP}$	64
Toplam alt taşıyıcı sayısı $N_{SC} = N_{SD} + N_{SP}$	512
Alt taşıyıcı frekans aralığı $\Delta f$	39.0625 Mhz

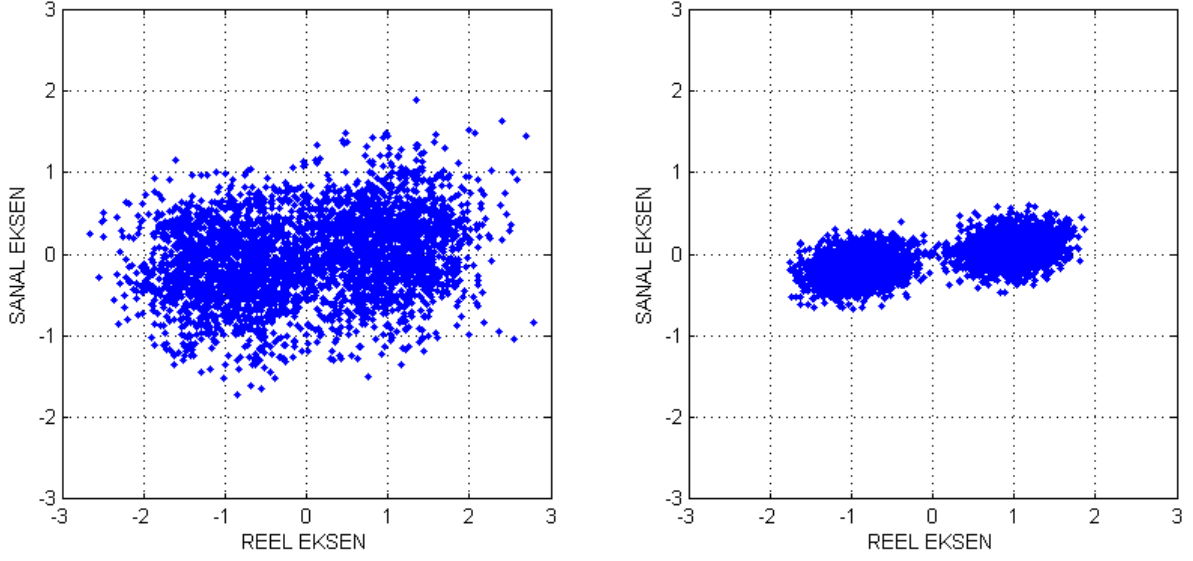
16 Gbps data hızı için Tablo 2.4 'deki OFDM parametreleri kullanılmıştır. Buna göre yine 4096 bitlik bir paketin CO-OFDM yöntemiyle 1000 kanal üzerinden gerçekleştirilen bilgisayar benzetiminde önce 100 km link mesafesi ve 6 ps/(nm.km) değerindeki dispersiyon parametresi için, SNR değerinin 4 dB'den 14 dB'ye çıkarılması durumunda, gönderilen BPSK modülasyonlu +1 ve -1 değerlerinin genliğinde ve fazındaki değişimin azaldığı Şekil 2.31'de görülmektedir. Mesafenin ve dispersiyon parametresinin değerinin düşük olması elde edilen sonucun 5 Gbps ve 8 Gbps veri hızlarında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermesini sağlamıştır. Ancak 16 Gbps veri hızında yine 6 ps/(nm.km) değerindeki dispersiyon parametresinde mesafe 1000 km'ye çıkarıldığında, 5 Gbps ve 8 Gbps veri hızlarıyla elde edilen sonuçlar ile belirgin farklar olduğu gözlemlenmektedir. Bu fark dispersiyon parametresinin değeri ve link mesafesi arttıkça daha da belirgin olarak SNR/BER grafiklerinde görülmektedir. Ayrıca mesafe 1000 km'den 3000 km'ye çıkarıldığında ise dispersiyon parametresinin değerinin 6 ps/(nm.km) olmasına rağmen sistem performansı oldukça düşmüştür. Bu durumda dispersiyon parametresi 17 ps/(nm.km) değerine çıkarıldığında ise alıcı taraftaki denkleştirilmiş ve denkleştirilmemiş sonuçlar arasında bir fark oluşmamaktadır.



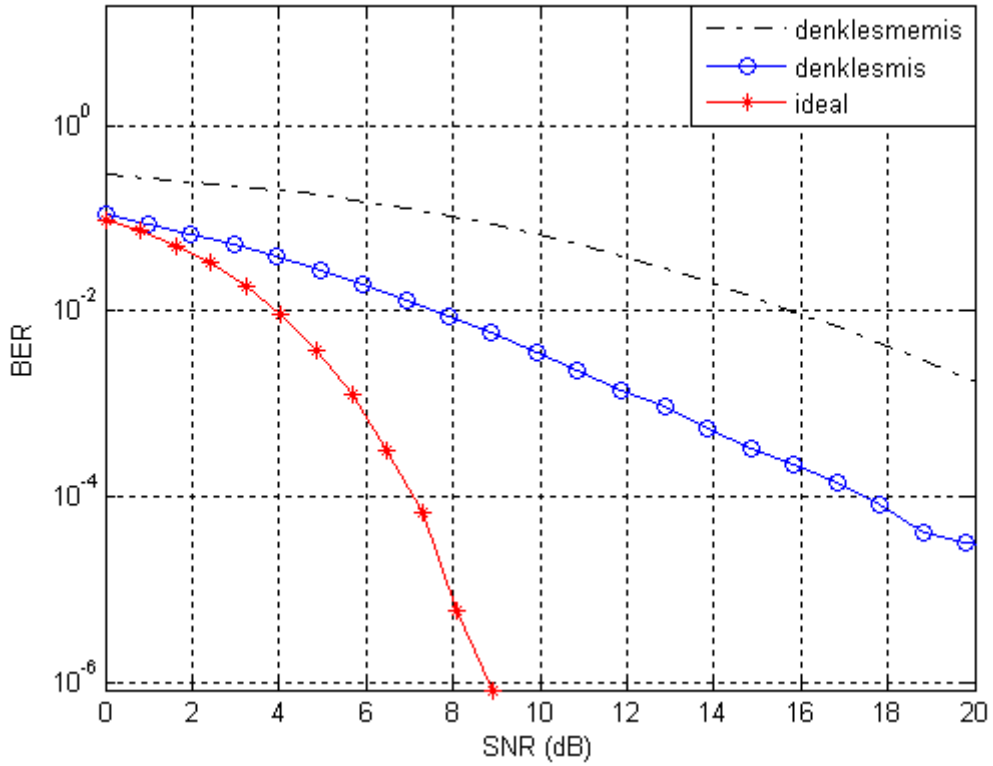
Şekil 2.31. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



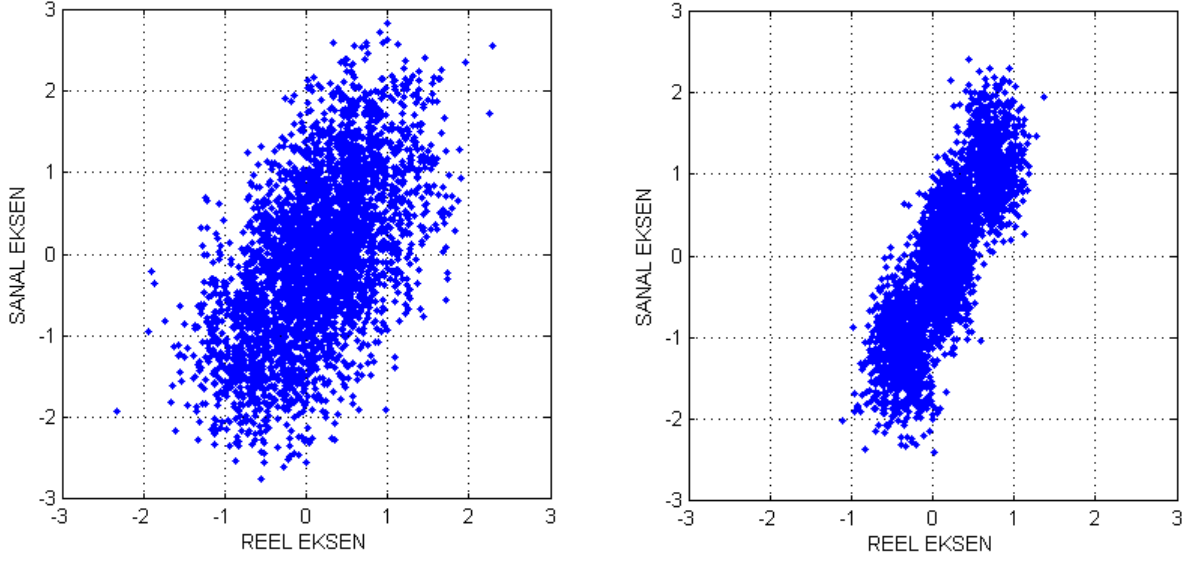
Şekil 2.32. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği



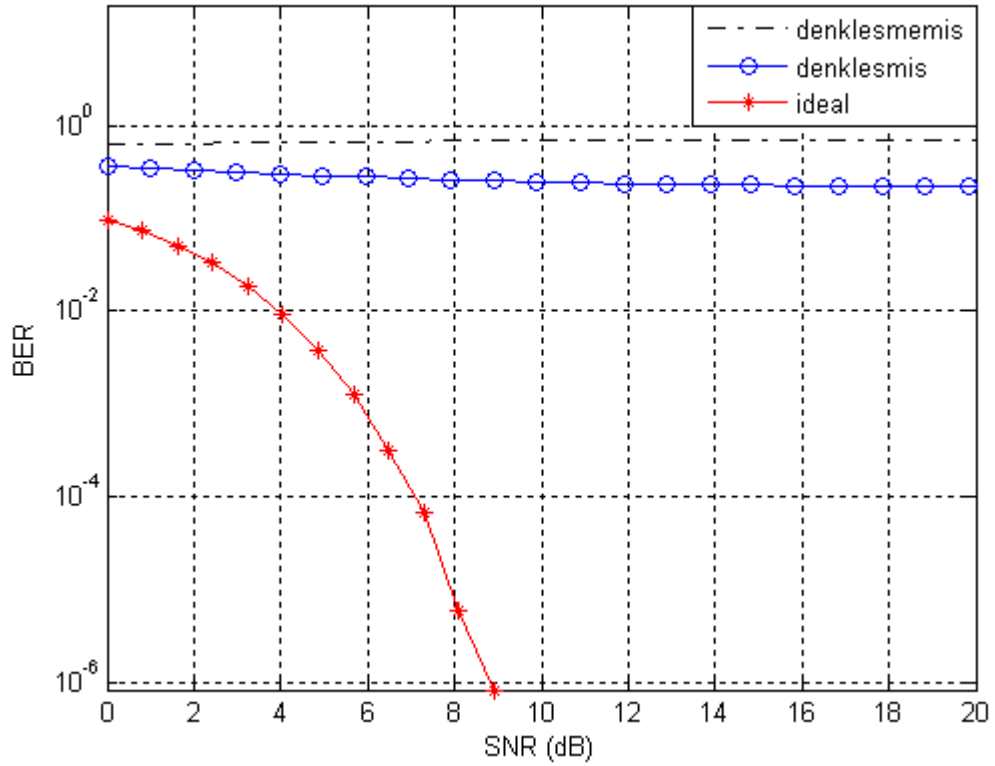
Şekil 2.33. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



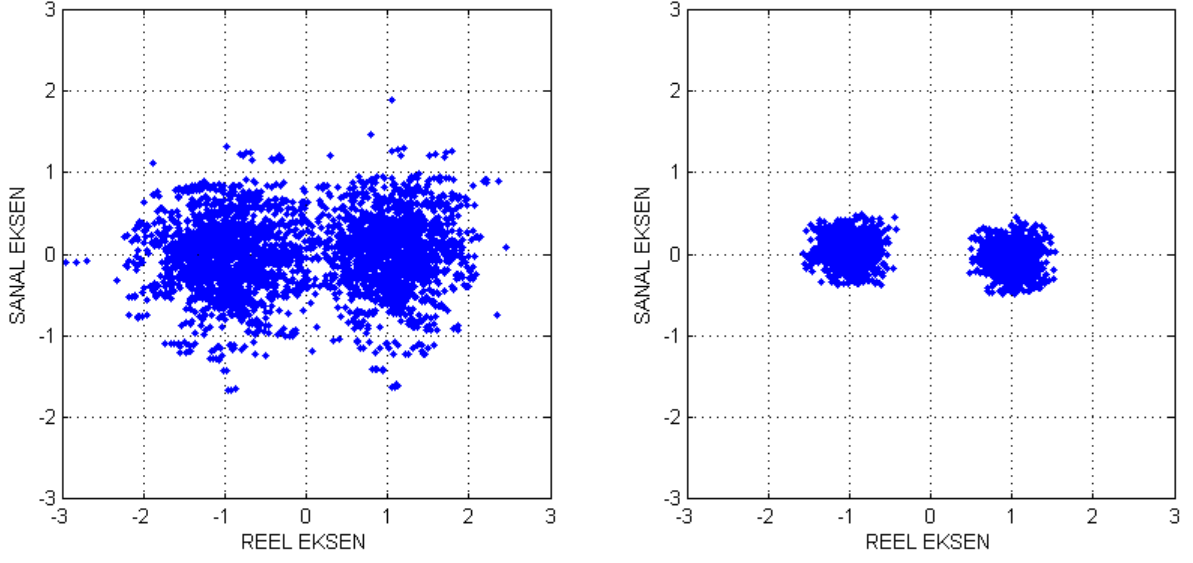
Şekil 2.34. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği



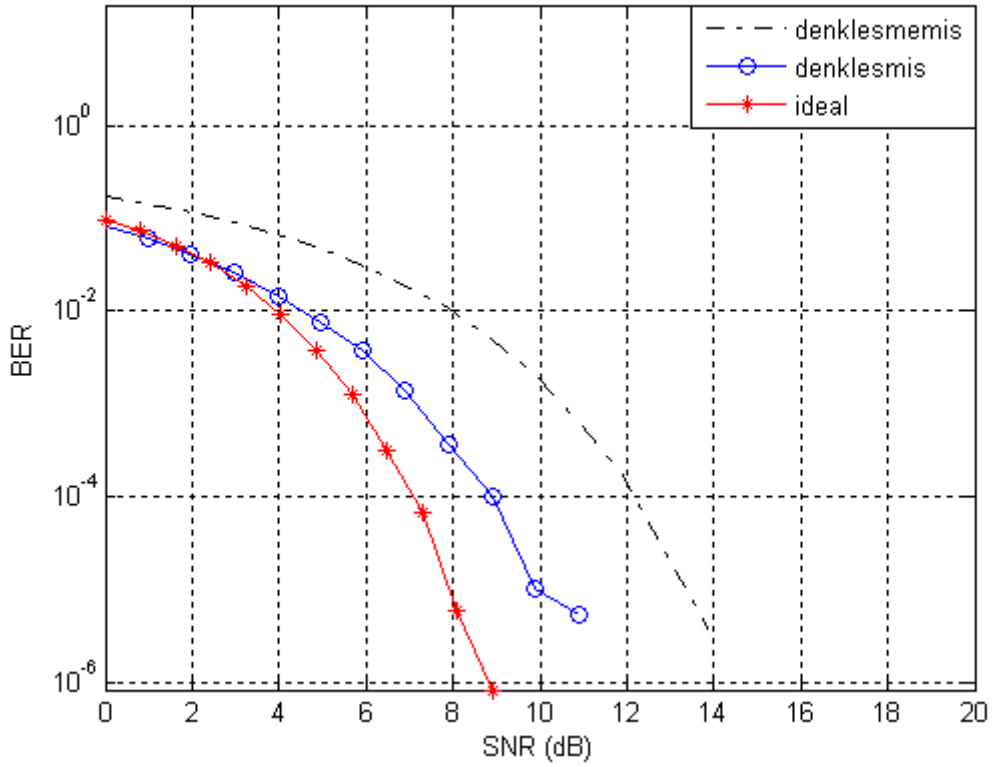
Şekil 2.35. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 6 ps/(nm.km) ve L: 3000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



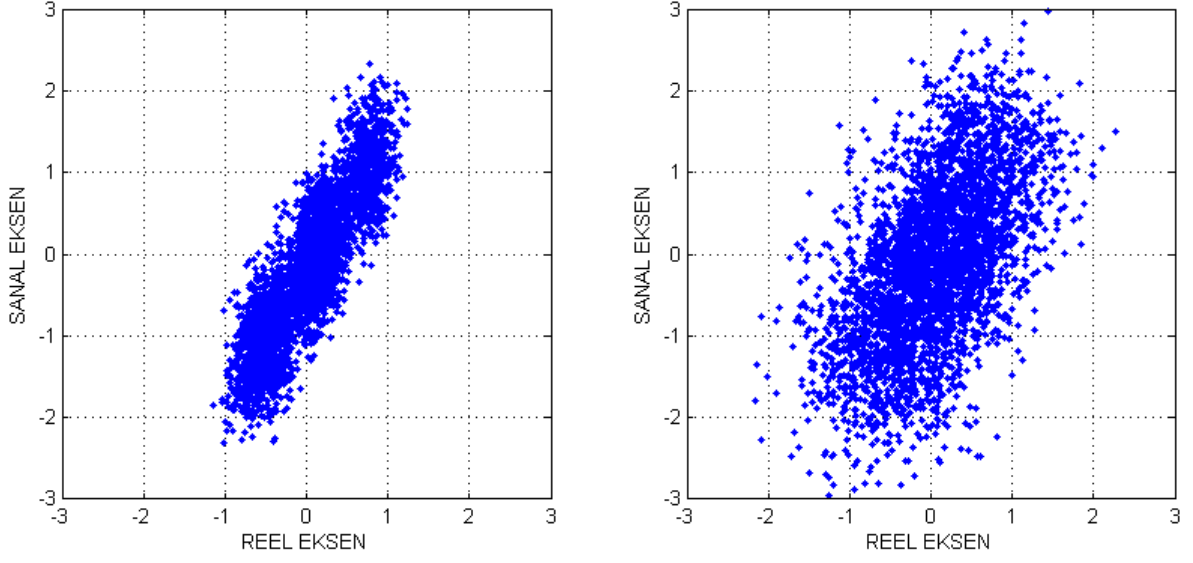
Şekil 2.36. Veri hızı:16 Gbps,Dt:6 ps/(nm.km) ve L:3000 km için BER/SNR grafiği



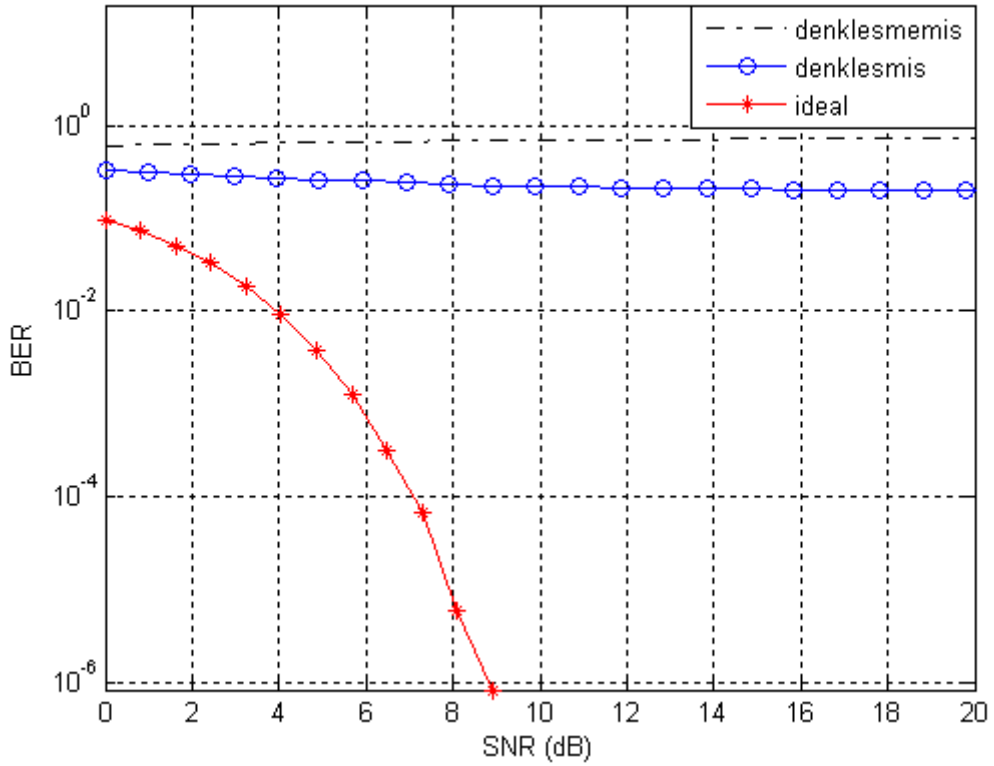
Şekil 2.37. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



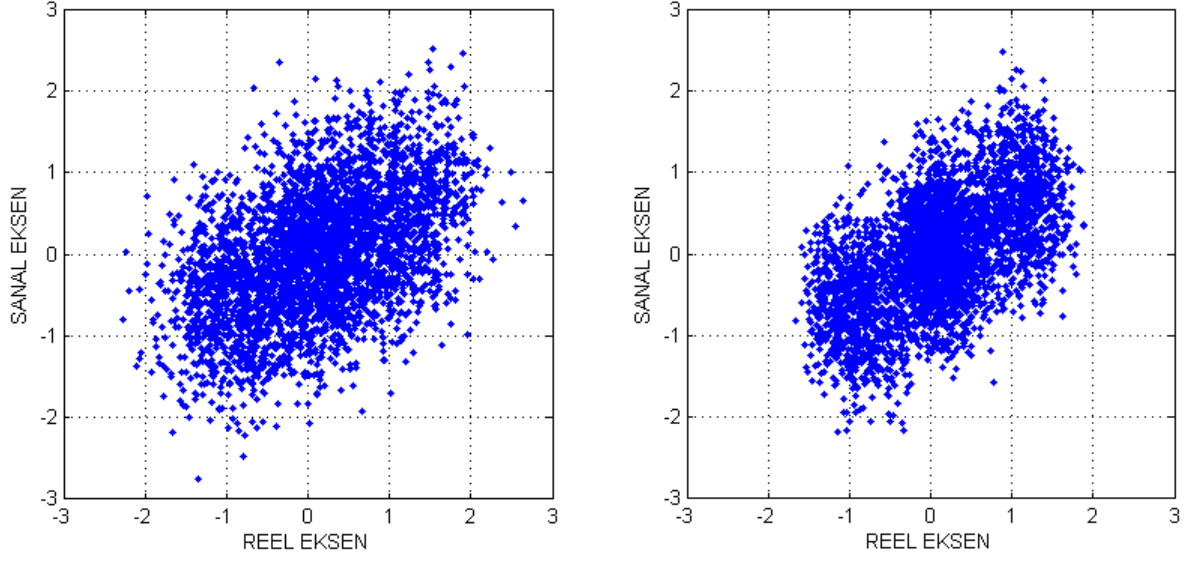
Şekil 2.38. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 100 km için BER/SNR grafiği



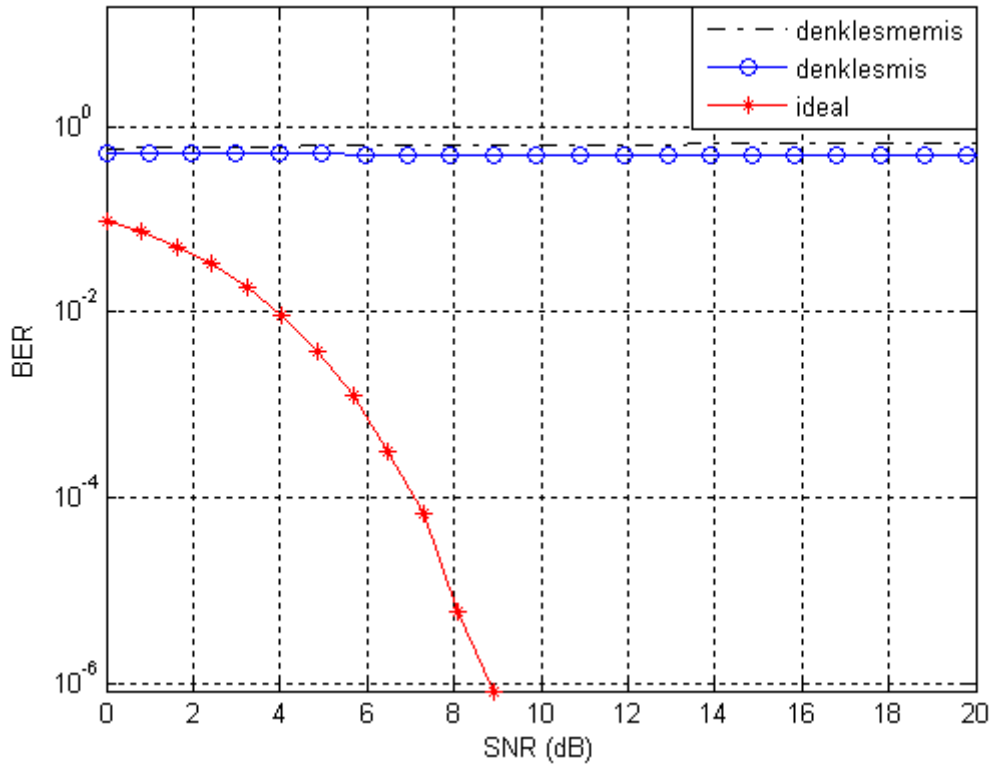
Şekil 2.39. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları



Şekil 2.40. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 1000 km için BER/SNR grafiği



Şekil 2.41. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km durumunda SNR:4 dB (solda) ve SNR:14 dB (sağda) için yıldız kümesi diyagramları

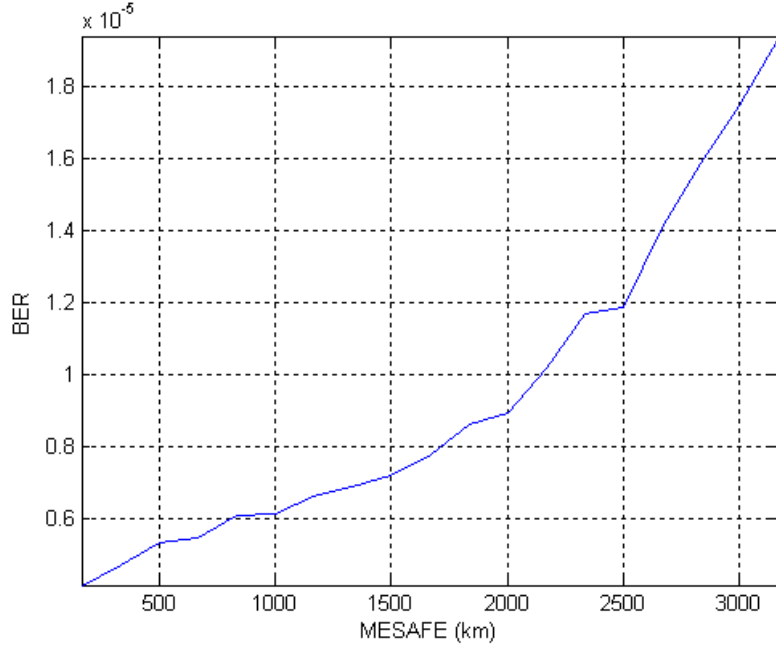


Şekil 2.42. Veri hızı:16 Gbps, Dt: 17 ps/(nm.km) ve L: 3000 km için BER/SNR grafiği

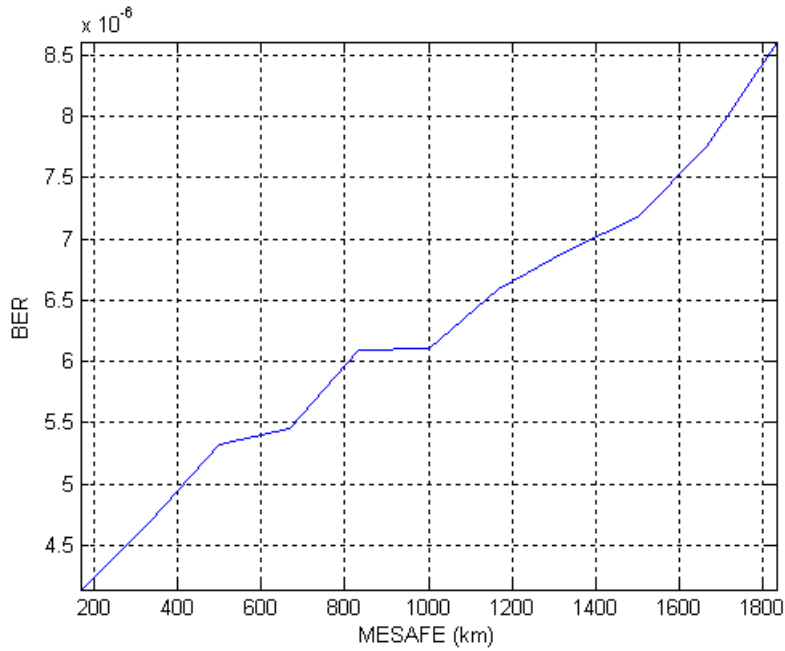


### 2.3.4.4. 10 dB Sabit SNR İçin Elde Edilen Bulgular

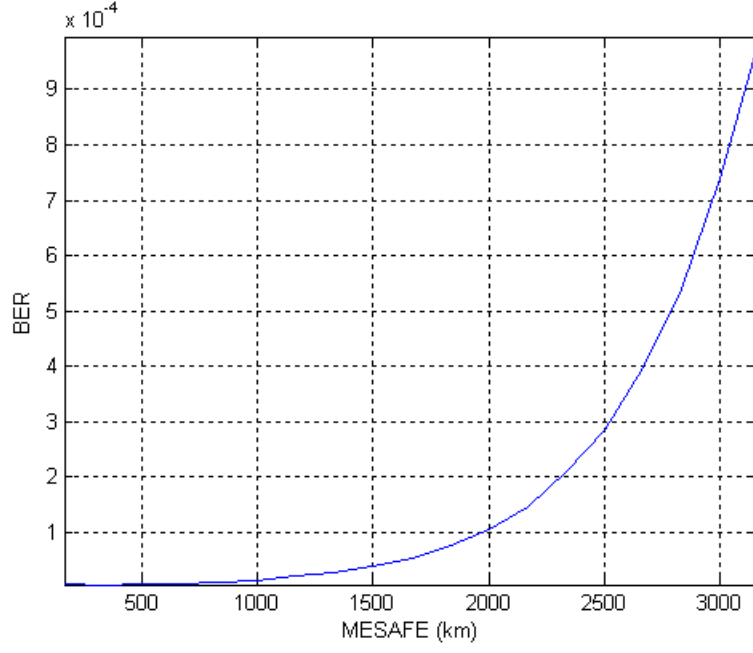
Bu kısımda yapılan çalışmalarda, işaret gürültü oranı 10 dB ve dispersiyon parametresi 6 ps/(nm.km) seçilip değişik veri hızlarında artan link mesafesine göre BER değerinin değişim grafikleri elde edilmiştir.



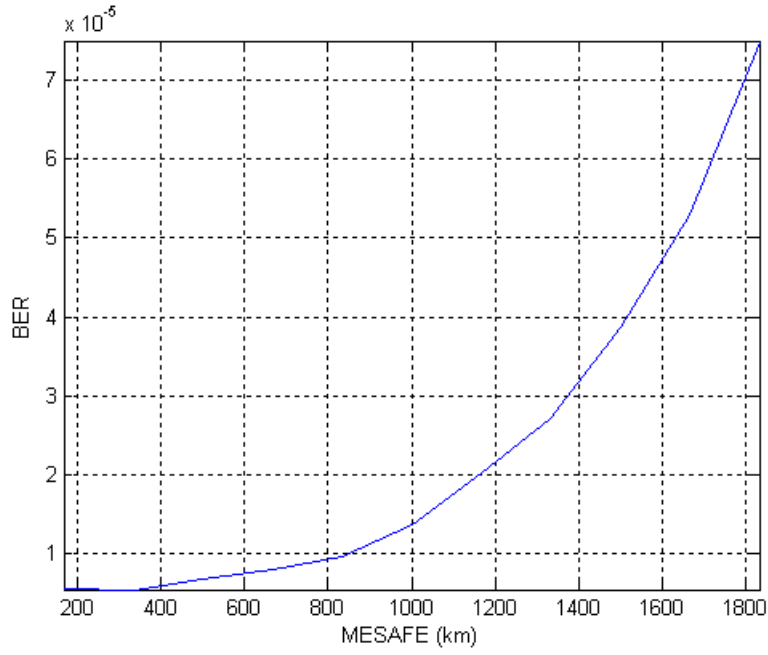
Şekil 2.43. 5 Gbps hızda, 0-3100 km arası mesafeye göre BER değişimi



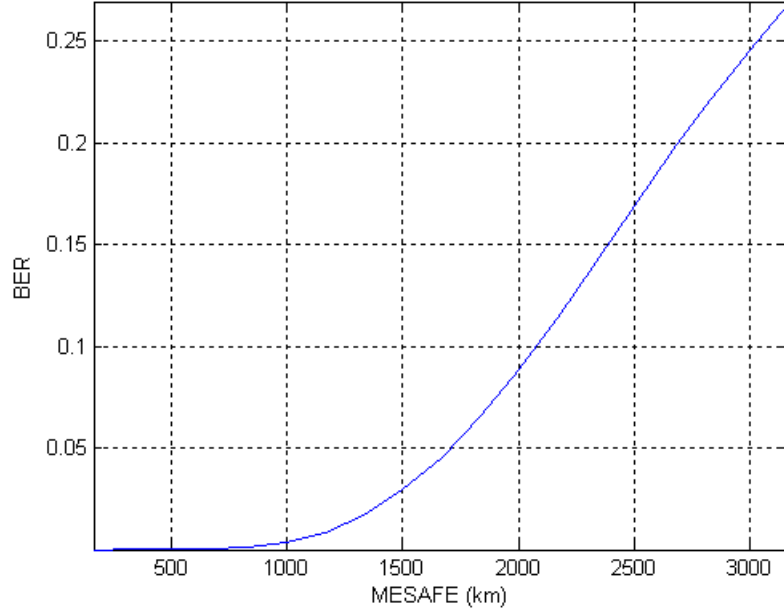
Şekil 2.44. 5 Gbps hızda, 0-1800 km arası mesafeye göre BER değişimi



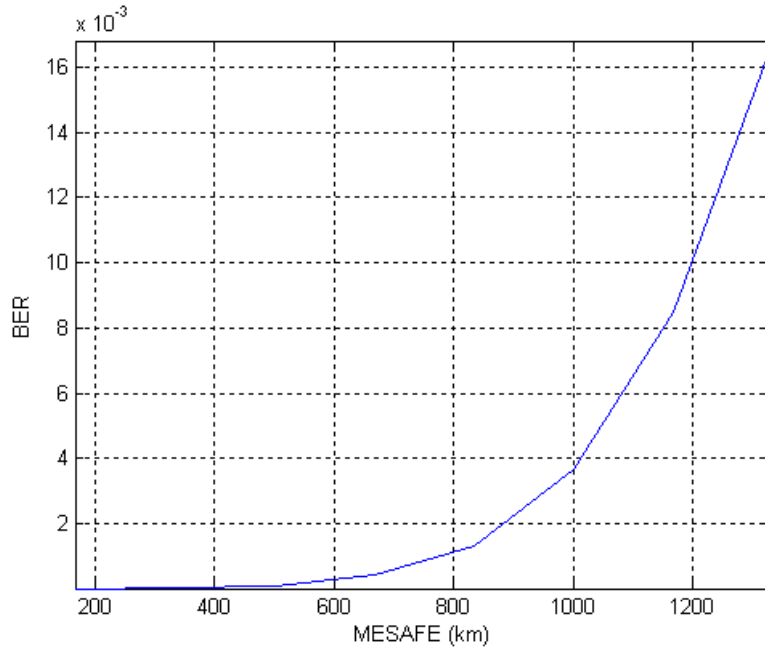
Şekil 2.45. 8 Gbps hızda, 0-3100 km arası mesafeye göre BER değişimi



Şekil 2.46. 8 Gbps hızda, 0-1800 km arası mesafeye göre BER değişimi



Şekil 2.47. 16 Gbps hızda, 0-3100 km arası mesafeye göre BER değişimi



Şekil 2.48. 16 Gbps hızda, 0-1300 km arası mesafeye göre BER değişimi

Grafiklere göre artan veri hızı ve mesafeyle BER değerinin arttığı görülmektedir. Ancak 0-300 km arasında belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Bunun nedeni kromatik dispersiyonun, yüksek hızlarda ve uzak mesafelerde daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır. Fiber optik haberleşmede kısa mesafelerde zayıflamanın, uzak mesafelerde ise dispersiyonun daha etkin olduğu bilinmektedir.

### 3. SONUÇLAR

Fiber optik haberleşme sisteminin bilgisayar benzetimi için bir Monte Carlo bilgisayar benzetim programı geliştirilmiştir.

Yapılan çalışmada; 100km, 1000 km, 3000 km gibi değişik link mesafelerinde; ayrıca 5 Gbps, 8 Gbps ve 16 Gbps gibi değişik veri hızlarında CO-OFDM tekniğinin performansı incelenmiştir. 5 Gbps veri hızında 4096 bitlik bir paketin CO-OFDM yöntemiyle 1000 kanal üzerinden gerçekleştirilen bilgisayar benzetiminde 100 km link mesafesi ve 6 ps/(nm.km) değerindeki dispersiyon parametresi için alıcıda gerçekleştirilen denkleştirmenin SNR değerine ancak 2 dB seviyelerinde katkı yaptığı gözlenmiştir. Ancak mesafe ve dispersiyon parametresi arttığına bu etkinin 4 dB seviyelerine kadar arttığı elde edilen BER/SNR grafiklerinde görülmüştür.

300 km link mesafesinde, CO-OFDM yöntemi kullanıldığında kromatik dispersiyonun sistem performansı üzerindeki etkisinin kompanzasyonu, çok daha belirgin olumlu sonuçlar oluşturmuştur. Veri hızı yine 8 Gbps ve 16 Gbps değerlerindeyken link mesafesi 1000 km ve üzeri değerlere ulaştığında kromatik dispersiyon etkisinden dolayı sistem başarımının azaldığı tespit edilmiştir. Ancak bu mesafeler OOK kullanan sistemlerde maksimum teorik link mesafesinin 20 katı seviyelerindedir.

Optik kromatik dispersiyon kompanzasyonu yapılmadan, 8 Gbps veri hızında, 300 km link mesafesinde, 6 ps/(nm.km) ve 17 ps/(nm.km) dispersiyon parametresine sahip tek modlu fiber kabloda yapılan haberleşme için, 10 dB SNR değerinde CO-OFDM yöntemiyle  $10^{-6}$  seviyelerinde BER değeri elde edilmiştir. OOK sistemlerde, aynı dispersiyon parametresine sahip tek modlu bir fiber optik kablo üzerinden, 1550 nm dalga boyunda 1 optik taşıyıcı kullanarak, 8 Gbps veri hızında elde edilebilecek maksimum teorik link mesafesinin ise 153 km olduğu standart matematiksel ifadeler yardımıyla hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, günümüzde kullanılan OOK modülasyonlu sistemlerle karşılaştırıldığında, optik sistemlerde dispersiyon kompanzasyonu için gerekli olan tekrarlayıcı aralığının, CO-OFDM yöntemiyle artırılabilceği tezini doğrulamaktadır. Ayrıca elde edilen mesafeye göre BER değişim grafikleri de bu sonuçları desteklemektedir.

#### 4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada nonlinearlik etkisinin olmayacağı varsayıp benzetim programına konulmamıştır. Donanımsal bir uygulama yapıp hangi güç seviyelerinde nonlinearlik etkisinin olduğu araştırılabilir.

Optik domende yapılan kromatik dispersiyon kompanzasyonları araştırılıp bu çalışma ile kıyaslanabilir. Ayrıca elde edilen sonuçlar dalga boyu 1550 nm alınarak hesaplanmıştır. Değişik dalga boylarında çalışmalar yapıp sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılabilir.

Günümüzde yüksek bant genişliği istenen yerlerde WDM kullanılmaktadır. Son zamanlarda literatürde yapılan çalışmalarda WDM tekniği kullanılıp Tbps seviyelerinde haberleşme gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerde WDM tekniği kullanıldığında kullanılan taşıyıcı frekans (optik) sayısı ile orantılı olarak veri hızı artmaktadır. Bu sayede çok yüksek veri hızlarına erişilirken bunun getireceği dezavantajlar araştırılabilir.

OFDM tekniğinde faz kaymasının kestirimi için kullanılan pilot taşıyıcıların sayısı değiştirilerek veri hızının artırılmasının sistem başarımını nasıl etkileyeceği araştırılabilir.

BER hesabı yapılırken BPSK modülasyonu kullanıldığından bitlerin +1 ya da -1 değerini kestirebilmek için 0 eşliğine göre hesaplama yapılmıştır. Bu kestirim Maksimum benzerlik (*Maximum-Likelihood*) algoritması kullanılarak sonuçlar sıfır eşliğine göre yapılan BER hesabı ile kıyaslanabilir.

Yapılan çalışmanın PMD üzerine olan etkileri araştırılıp klasik sistemlerle karşılaştırılması yapılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Matthew, N. ve Sadiku, O., Optical and Wireless Communications Next Generation Networks, CRC Pres, 2002.
2. Franz, J. H. ve Jain, V. K., Optical Communications Components and Systems, Alpha Science International Ltd, 2000.
3. Alwayn, V. Optical Network Design and Implementation, Cisco Press, 2004.
4. Rajiv, R. ve Kumar N. S., Optical Networks A practical perspective İkinci Baskı, Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
5. Kenneth, R. D. Engineering Electromagnetics Prentice Hall,1997.
6. Pollack, G. L. ve Stump, D. R., Elektromanyetik Teori Gazi Kitabevi Ankara, 2004.
7. Senior, J. M. Optical fiber Communications Prenciples and Practice, Prentice Hall, London, 1985.
8. Ye (Geoffrey) L. ve Gordon L.S., Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications, Springer, 2006.
9. Soysal B., OFDM Tabanlı Kablosuz İletişim Sistemleri için Yüksek başarılı Alıcı Tasarımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.
10. Broadband radio access HIPERLAN Type 2; Physical Layer Sophia antipolis Cedex., 1999.
11. Shieh, W., Bao H. ve Tang, Y., Coherent Optical OFDM theory and design, Optical Society of America , Optics Express, 16,2 (2008) 841.
12. Yi, X., Shieh, W. ve Tang Y., Phase Estimation for Coherent Optical OFDM, IEEE Photonics Technology Letters, 19,12 (2007).
13. Shieh, W., Tucker, R. S., Chen, W., Yi, X., ve Pendock, G., Optical performance monitoring in coherent optical OFDM systems, Optical Society of America, Optics Express, 16,2 (2007) 350.
14. Bao, H. ve Shieh, W., Transmission Simulation of Coherent Optical OFDM Signals in WDM Systems, Optical Society of America, Optics Express, 15,8 (2007) 4410.
15. Shieh, W. ve Athaudage, C., Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, IEE Electronic Letters, 42,10 (2006).

16. Shieh, W. PMD Supported Coherent optical OFDM Systems, IEEE Photonics Technology Letters, 19,3 (2007).
17. Bülow, H., Buchali, F. ve Klekamp, A., Electronic Dispersion Compensation, Journal of Lightwave Technology, 26,1 (2008).
18. Laude, J. P., DWDM Fundamentals, Components and Applications Artech house, London 2002.
19. Cheng, D. K., Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri, Palme Yayıncılık, Ankara, 2006.
20. Shieh, W., Yi, X., Ma, Y. ve Tang Y., Theoretical and Experimental Study on PMD Supported Transmission Using Polarization Diversity in Coherent Optical OFDM Systems, Optical Society of America, Optics Express, 15,16 (2007) 9936.
21. Djordjevic, I. B. ve Vasic, B., Orthogonal Frequency Division Multiplexing for High-speed Optical Transmission, Optical Society of America, Optics Express, 14,9 (2006) 3767.
22. Tang, J. M., Lane P. M. ve Shore K. A., Transmission Performance of Adaptively Modulated Optical OFDM Signals in Multimode Fiber Links IEEE Photonic Technology letters, 18,1 (2006).
23. Tang, J. M. ve Shore K. A., 30 Gbps Signal Transmission Over 40 km Directly Modulated DFB Laser Based Single Mode Fiber links Without Optical Amplification and Dispersion Compansation, IEEE Journal of Lightwave Technology, 24,6 (2006).
24. Lowery, A. J. Amplified Spontaneous noise limit of optical OFDM lightwave systems, Optical Society of America, Optics Express, 16,2 (2008) 860.
25. Lowery, A. J. Fiber nonlinearity pre and post compenzation for Long optical links using OFDM, Optical Society of America, Optics Express, 15,20 (2007) 12965.
26. Lowery, A. J. ve Armstrong, J., 10 Gbps Multimode Fiber Link Using Power Efficient Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Optical Society of America, Optics Express, 13,25 (2005) 10003.
27. Lowery, A. J. ve Armstrong, J., Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Dispersion Compensation of long Haul Optical Systems, Optical Society of America, Optics Express, 14,6 (2006) 2079.
28. Lowery, A. J., Du L. ve Armstrong, J., Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Adaptive Dispersion Compensation in long Haul WDM Systems Optical Society of America, 2006.
29. Singh, G. ve Alphones, A., OFDM Modulation Study for a Radio Over Fiber System for Wireless Lan (IEEE 802.11.a), Singapore, IEEE 2003.

30. Hacısalıhoğlu, H. ve Balcı, M., Temel ve Genel Matematik Altıncı Baskı, Ertem Basım Yayım dağıtım Ltd. Ankara, 1996.
31. Yaşar, İ. B., Diferansiyel Denklemler ve uygulamaları, İkinci Baskı, Siyasal Kitabevi Ankara, 1999.
32. Yu, C., Dispersive and Nonlinear Effects in Highspeed Reconfigurable WDM Optical Fiber Communication, Doktora Tezi, Faculty of Graduate School of Southern California, California, 2005.
33. Franceschini, M., Ferrari, G., Raheli, R. ve Bongiorni, G., Fundamental Limits of Electronic Dispersion Compensation in Optical Communications with Direct Photodetection, IEE Electronic letters, 42,15 (2006).
34. Jansen, S. L., Morita, I., Takeda N. ve Tanaka, H., 20-Gbps OFDM Transmission over 4,160-km SSMF Enabled by RF-Pilot Tone Phase Noise Compensation, Optical Society of America, 2007.
35. NabiyeV, V. V., Teoriden Uygulamalara Algoritmalar, Birinci Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2007.
36. Rodger,E.Z., Elements of Engineering Probablity and Statistics,Prentice Hall, 1997
37. Ertürk,S., Sayısal Haberleşme, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005
38. Kayran, A.H., Panayırcı, E. ve Aygölu, Ü., Sayısal Haberleşme, Altıncı Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2004.
39. McClellan, J.H., Schafer, R.W. ve Yoder, M.A., Signal Processing First, Pearson Prentice Hall, 2003.
40. Lafore, R., Uzmanlar İçin Nesne Yönelimli C++ Programlama Klavuzu, Üçüncü Baskı, İstanbul, 2002.
41. Erdun, H. ve Durak, M., Uzman C/C++ Programlama, İkinci Baskı, Beta Yayınları, İstanbul, 2003.



## ÖZGEÇMİŞ

13.01.1981 tarihinde Trabzon'da doğdu. Lise öğrenimini Trabzon Lisesi'nde tamamladı. 2 yıl Fransa'da (Collège Max Jacob, Quimper) dil öğrenimi gördükten sonra 2000 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2005 yılında bu bölümden mezun oldu. 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine kabul edildi. Aynı yıl İstanbul'da özel bir firmada elektronik mühendisi olarak iş hayatına başladı. Yarım dönem sonra 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve kendi isteği ile Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden ayrılarak yüksek lisans öğrenimine Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde devam etti. Halen bu görevine devam etmektedir. Fransızca ve İngilizce bilmektedir.