



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**YÜKSEK HIZLI DWDM
SİSTEMLERİNDE OPTİK FİBERDEKİ
FWM VE ASE ETKİSİ ALTINDA
İLETİM PERFORMANSININ
ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Bahadır HİÇDURMAZ

Doktora Tezi

**YÜKSEK HIZLI DWDM
SİSTEMLERİNDE OPTİK FİBERDEKİ
FWM VE ASE ETKİSİ ALTINDA
İLETİM PERFORMANSININ
ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Bahadır HİÇDURMAZ



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI DWDM SİSTEMLERİNDE OPTİK FİBERDEKİ
FWM VE ASE ETKİSİ ALTINDA İLETİM PERFORMANSININ
ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Bahadır HİÇDURMAZ

Prof.Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2013

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

BAHADIR HIÇDURMAZ tarafından hazırlanan “YÜKSEK HIZLI DWDM SİSTEMLERİNDE OPTİK FİBERDEKİ FWM VE ASE ETKİSİ ALTINDA İLETİM PERFORMANSININ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Başkan:	Prof. Dr. Güneş YILMAZ Uludağ Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye:	Prof. Dr. Erdoğan DİLAVEROĞLU Uludağ Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye:	Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU Dumlupınar Ü. Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye:	Prof. Dr. Naim DEREBAŞI Uludağ Ü. Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı	İmza
Üye:	Doç. Dr. Ali Rıza YILDIZ Bursa Teknik Ü. Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım / ONAY

Prof. Dr. Kadri ARSLAN
Enstitü Müdürü
... / ... / 2013

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

14 / 03 / 2013

İmza

Bahadır HİÇDURMAZ

ÖZET

Doktora Tezi

YÜKSEK HIZLI DWDM SİSTEMLERİNDE OPTİK FİBERDEKİ FWM VE ASE ETKİSİ ALTINDA İLETİM PERFORMANSININ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Bahadır HIÇDURMAZ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Güneş YILMAZ

Optik fiberli haberleşme sistemlerinde kapasiteyi arttırmak için veri iletim hızının ya da iletim uzaklığının artırılması gerekmektedir. Ancak kapasiteyi artırma girişimleri sistem performansını sınırlayan bazı olumsuz etkileri de beraberinde getirmektedir. Günümüzde, optik fiberli haberleşme sistemlerinin veri iletim kapasitesini sınırlayan en önemli unsurlardan biri optik fiberde ortaya çıkan doğrusal olmayan etkilerdir.

Bu çalışmada, yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM) sistemindeki optik fiberde meydana gelen öz-faz modülasyonu (SPM), çapraz-faz modülasyonu (XPM) ve dört-dalga karışımı (FWM) gibi doğrusal olmayan olayların iletim performansına etkileri araştırılmış ve bu etkilerden özellikle FWM etkisinin azaltılmasına yönelik önerilerde bulunulmuştur. Çalışmada FWM doğrusalsızlığının bozucu etkisi, kanal işaretlerinin optik fiberin çıkışındaki optik işaret-gürültü oranı (OSNR) değerleri göz önüne alınarak, azaltılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, FWM ve yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (ASE) gürültüsünün birleşik etkisini OSNR açısından azaltmaya yönelik olarak, her bir kanal işaretinin optik fibere en uygun giriş gücü belirli sınır değerleri içerisinde belirlenmiştir. Bu sayede optik kanalların karakterize edilmesi sağlanmıştır. Buradan yola çıkarak bir optimizasyon problemi tanımlanmış ve Matlab™ programı kullanılarak diferansiyel gelişim algoritması (DEA) ile çözülmüştür. Ayrıca, aynı kanal giriş güçlerine sahip işaretler için Matlab™ tabanlı yazılımla gerçekleştirilen benzetimlerde elde edilen sonuçların, OptiSim™ benzetim programı ile elde edilen değerlerle karakteriksel uyumluluğu gösterilmiştir.

Yazılan benzetim programı sayesinde, sistem performansını en üst düzeye getirecek en uygun kanal giriş güçleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Böylece, optimize edilmiş giriş güçlerinde optik kanallara sahip bir DWDM sisteminin OSNR performansı önemli derecede arttırılır.

Anahtar Kelimeler: FWM, ASE gürültüsü, DEA, OSNR, DWDM

2013, xiii + 94 sayfa.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

ANALYSIS AND OPTIMISATION OF TRANSMISSION PERFORMANCE IN HIGH-SPEED DWDM OPTICAL FIBER SYSTEMS REGARDING FWM AND ASE EFFECTS

Bahadır HİÇDURMAZ

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Güneş YILMAZ

In order to increase capacity of communication systems, data transmission rate or transmission length must be increased. However, many attempts to increase the capacity were carried out some detractive effects which limit system performance. Today, one of the most important factors limiting the data transmission capacity of optical fiber communication systems is nonlinear effects which arise from optical fiber.

In this thesis, the effects of nonlinear phenomena, such as self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM), occurring in optical fiber of dense wavelength division multiplexing (DWDM) transmission system are investigated for transmission performance and some recommendations are made to reduce especially FWM effect from these effects. In optical signal-to-noise ratio (OSNR) values of each channel output signal from the optical fiber, the disruptive effect of FWM nonlinearity is minimized. For this purpose, in order to degrade the combined effect of FWM and amplified spontaneous emission (ASE) noise in terms of OSNR, the optimum input powers for each channel signal within a certain bound values are determined. In this way, the characterization of each optical channel is provided. Based on this, an optimization problem is determined and solved by using a differential evolution algorithm (DEA) in Matlab™ programme. Furthermore, the simulation results obtained in our Matlab™ based software for channel input signals each of which has the same power are characteristically compatible with those provided by OptiSim™ simulation programme.

Using our simulation programme, the most appropriate channel input powers regarding the highest system performance can easily be determined as a function of different system parameters. Thus, the OSNR performance of a DWDM link having the optical channels with optimised input powers is significantly increased.

Key words: FWM, ASE noise, DEA, OSNR, DWDM

2013, xiii + 94 pages.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca sağladığı tım katkılardan ötürü tez danıőmanım Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalıőmasına UAP(M)-2011/31 nolu proje ile destek sağlayan Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (BAP'a) teşekkür ederim.

Her zaman desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Bahadır HİÇDURMAZ
14 / 03 / 2013

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kaynak Araştırması	6
1.2 Sebep ve Tezin Düzeni	16
2. KURAMSAL TEMELLER.....	17
2.1 Öz-Faz Modülasyonu (SPM)	30
2.2 Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)	32
2.3 Dört Dalga Karışımı (FWM).....	35
2.4 Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS).....	43
2.5 Uyarılmış Raman Saçılması (SRS).....	44
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
3.1 OptiSim Benzetim Programı	46
3.2 OptiSim Benzetimi ile Analizi Gerçekleştirilecek Sistem Modeli.....	49
3.3 Hat-İçi Optik Yükselticili WDM Sistemlerinde FWM ve ASE Gürültüsünün Birleşik Etkisinin Analizi.....	52
3.3.1 Diferansiyel Gelişim Algoritması (DEA).....	53
3.3.1.1 Başlangıç kromozomlarının oluşturulması	55
3.3.1.2 Mutasyon ve yeniden oluşum	55
3.3.1.3 Çaprazlama.....	55
3.3.1.4 Seçim ve algoritmanın sonlandırılması	56
3.3.2 DEA'nın Probleme Uygulanması	56
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	58
4.1 OptiSim Benzetimi ile Analizi Gerçekleştirilen Sistemin Sonuçları	58
4.2 Hat-İçi Optik Yükselticili WDM Sistemlerinde FWM ve ASE Gürültüsünün Birleşik Etkisinin Matlab Analizi Sonuçları.....	72
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	83
KAYNAKLAR.....	86

ÖZGEÇMİŞ.....	94
---------------	----

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ϵ_0	Boşluğun elektrik geçirgenliği
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
α	Fiber zayıflama katsayısı
β	Yayıma sabiti
β_0	ω_0 açısal frekansındaki yayılma sabiti
β_1	Grup hızının tersi
β_2	İkinci derece GVD değişkeni
β_3	Üçüncü derece GVD değişkeni
η_{aijk}	Yükselticili sistemde FWM bileşenlerinin etkinliği
η_{ijk}	Yükselticisiz sistemde FWM bileşenlerinin etkinliği
$\delta\omega$	Cıvıltı
$\delta\omega_{\max}$	En büyük cıvıltı
$\delta\omega_{SPM}$	SPM kaynaklı frekans cıvıldaması
$\delta\omega_{XPM_j}$	j . kanalın XPM kaynaklı frekans cıvıldaması
$\Delta\beta$	Yayıma sabitleri farkı ya da faz uyumsuzluk değişkeni
$\Delta\beta_{ijk}$	Doğrusal faz uyumsuzluk değişkeni
$\Delta\beta_{ijk_NL}$	Doğrusal olmayan faz uyumsuzluk değişkeni
Δv_B	Brillouin çizgi genişliği
Δv_s	Optik kaynağın çizgi genişliği
$\Delta\omega_0$	Optik darbenin ilk tayf genişliği
$\Delta\lambda_{jk}$	λ_j ve λ_k dalgaboyları arasındaki dalgaboyu boşluğu
ϕ	İşaretin fazı
ϕ_{\max}	En büyük faz kayması
ϕ_{NL}	Doğrusal olmayan faz kayması
γ	Fiberin doğrusalsızlık katsayısı
$\bar{\gamma}$	Ortalama doğrusalsızlık katsayısı
λ	Çalışma dalgaboyu
λ_{ijk}	FWM işleminden üretilen işaretlerin dalgaboyları
$\bar{\lambda}$	Ortalama dalgaboyu
τ	Normalizeli zaman
$\chi^{(i)}$	j . derece doğrusal olmayan elektrik alınganlığı
$\chi_{1111}^{(3)}$	Üçüncü derece elektrik alınganlığının bir skaler bileşeni
σ_0	$L = 0$ konumundaki Gauss darbesinin RMS darbe genişliği
σ_{SPM}	Gauss darbesinin L konumundaki RMS genişliği
ω	Açısal frekans
ω_0	Optik darbenin merkez açısal frekansı
A_{eff}	Fiberin etkin öz alanı
$A(z,t)$	Optik alanın yavaş değişen zarfı
$B(z,\tau)$	Optik alanın normalize genliği
B_o	Optik kanal bant genişliği
c	Işığın boşluktaki hızı
CR	Çaprazlama oranı

d	Bozulmuşluk etkeni
d_{jk}	Uzaklaşma (walk-off) değişkeni
D	Gen (değişken) sayısı
D_c	Kromatik dispersiyon değişkeni
E	Elektrik alan vektörü
f_i, f_j, f_k	FWM bileşenlerini meydana getiren işaretlerin frekansları
f_{ijk}	FWM işleminden üretilen işaretlerin frekansları
f_0	Optik işaretin merkez frekansı
$f(x)$	Amaç fonksiyonu
F	Ölçekleme etkeni
g	Nesil
g_B	Brillouin kazanç katsayısı
G	Optik yükselticinin kazancı
h	Plank sabiti
I	Optik yoğunluk
i	Sanal birim
l_i	Ardışık yükselticiler arası uzaklık
l_o	Yükselticiler arası eşit uzunluk
l_{oeff}	l_o için etkin uzunluk
L	Sistemin toplam fiber uzunluğu
L_{coh}	Faz uyum uzunluğu
L_D	Dispersiyon uzunluğu
L_{eff}	Etkin fiber uzunluğu
L_{NL}	Doğrusalsızlık uzunluğu
L_W	Uzaklaşma (walk-off) ya da etkileşim uzunluğu
m	Hat-ıçi yükseltici sayısı
M	WDM kanal sayısı
n	Fiberin toplam kırılma indisi
n_0	Fiberin doğrusal kırılma indisi
n_2	Fiberin ikinci dereceden doğrusal olmayan kırılma indisi
$n_{j,i,g}$	g neslindeki i .deneme kromozomun j . geni
n_{sp}	Nüfus dönüşüm etkeni
N	M kanal için oluşan FWM bileşenlerinin sayısı
N_a	Yükselticili sistemde yükselticiler arası aralık sayısı
NF	Yükseltici gürültü etkeni
NP	Nüfus büyüklüğü
OSNR _i	Her bir kanalın optik fiberin çıkışındaki OSNR değeri
P	Kutuplanma vektörü
P_L	İndüklenen P kutuplanmasının doğrusal kısmı
P_{NL}	İndüklenen P kutuplanmasının doğrusal olmayan kısmı
P^0	Başlangıç nüfusu
P	Optik darbenin güç yoğunluğu
P_{ASE}	ASE gürültü gücü
P_0	Optik işaretin tepe gücü
P_{aijk}	Yükselticili sistemde FWM bileşenlerinin güçleri
P_B^{th}	SBS eşik gücü
P_{ijk}	Yükselticisiz sistemde FWM bileşenlerinin güçleri
$P_{j,i}^{max}$	Kanal giriş gücünün en büyük sınır değeri

$P_{j,i}^{\min}$	Kanal giriş gücünün en küçük sınır değeri
$P_{in}/kanal$	Kanal başına giriş gücü
P_{\max}	Fiberin girişine gönderilebilecek en büyük güç
$P_{out,i}$	Her bir kanalın optik fiberin çıkışındaki işaret gücü
r_0	Hedef kromozom
R	İletim hızı
$S(\omega)$	Optik darbenin tayfi
$S(\lambda_k) = dD_c(\lambda_k)/d\lambda$	λ_k dalgaboyundaki kromatik dispersiyon eğimi
t	Zaman
T	Grup hızında ilerlemenin referans alındığı dönüşüm zamanı
T_{FWHM}	Tepe gücün yarıya düştüğü noktalar arası genişlik
T_0	Optik darbenin fiberin girişindeki $1/e$ yoğunluk yarı genişliği
T_1	Optik darbenin yayılma esnasındaki $1/e$ yoğunluk yarı genişliği
T_R	Raman kazanç değişkeni ile bağıntılı zaman değişkeni
v_g	Grup hızı
$v_{j,i,g}$	g neslindeki i . ara kromozomun j . geni
w	Fiberin mod alan yarıçapı
$x_{j,i,g}$	g neslindeki i . kromozomun j . geni
$x_j^{(l)}$	Genlerin alt sınırı
$x_j^{(u)}$	Genlerin üst sınırı
z	Yayılma uzaklığı

Kısaltmalar

Açıklama

ASE	Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayılma (Amplified Spontaneous Emission)
BER	Bit-Hata Oranı (Bit-Error Rate)
CS-RZ	Taşıyıcısı Bastırılmış Sıfıra Dönen (Carrier Suppressed- Return Zero)
CW	Sürekli Dalga (Continuous Wave)
DCF	Dispersiyon Dengeleyici Fiber (Dispersion Compensated Fiber)
DEA	Diferansiyel Gelişim Algoritması (Differential Evolution Algorithm)
DSF	Dispersiyonu Kaydırılmış Fiber (Dispersion Shifted Fiber)
DWDM	Yoğun WDM (Dense WDM)
EDFA	Erbiyum Katkılı Fiber Yükseltici (Erbium Doped Fiber Amplifier)
FSK	Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency Shift Keying)
FWHM	En Büyüğün Yarıya Düştüğü Noktalar Arası Genişlik (Full Width at Half Maximum)
FWM	Dört Dalga Karışımı (Four Wave Mixing)
GA	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
GVD	Grup Hızı Dispersiyonu (Group Velocity Dispersion)
IDF	Zıt Dispersiyonlu Fiber (Inverse Dispersion Fiber)
IFWM	Kanal-İçi Dört Dalga Karışımı (Intra-FWM)
IM-DD	Yoğunluk Modülasyonu-Doğrudan Algılama (Intensity Modulation- Direct Detect)

ITU-T	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği-Telekomünikasyon Standardı (International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector)
IXPM	Kanal-İçi Çapraz Faz Modülasyonu (Intra-XPM)
LAN	Yerel Alan Ağ (Local Area Network)
NLS	Doğrusal Olmayan Schrödinger (Nonlinear Schrödinger)
NRZ	Sıfıra Dönmeyen (Non-Return Zero)
NZ-DSF	Dispersiyonu Sıfır Olmayan DSF (Non-zero DSF)
OOK	Açma-Kapama Anahtarlama (On-Off keying)
OSNR	Optik SNR (Optical SNR)
OTDM	Optik Zaman Bölmeli Çoğullama (Optical Time Division Multiplexing)
PDM-16QAM	Kutuplanma Bölmeli Çoğullama-16 Kuadratur Genlik Modülasyonu (Polarization Division Multiplexing-16 Quadrature Amplitude Modulation)
PDM-36QAM	Kutuplanma Bölmeli Çoğullama-36 Kuadratur Genlik Modülasyonu (Polarization Division Multiplexing-36 Quadrature Amplitude Modulation)
PIN	Pozitif-İç-Negatif Fotodiyot (Positive-Intrinsic-Negative)
PMD	Kutuplanma Mod Dispersiyonu (Polarization Mode Dispersion)
PRBS	Sözde Rassal Bit Dizileri (Pseudo-Random Binary Sequence)
PSK	Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
Q	Kalite Etkeni (Quality Factor)
RZ	Sıfıra Dönen (Return Zero)
RZ-DPSK	Sıfıra Dönen Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Return Zero- Differential Phase Shift Keying)
SBS	Uyarılmış Brillouin Saçılması (Stimulated Brillouin Scattering)
SMF	Tek Modlu Fiber (Single Mode Fiber)
SNR	İşaret-Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
SPM	Öz-Faz Modülasyonu (Self-Phase Modulation)
SRS	Uyarılmış Raman Saçılması (Stimulated Raman Scattering)
SSB-RZ	Tek Yan bant RZ (Single Side Band-RZ)
SSF	Ayrık Adım Fourier (Split Step Fourier)
SSMF	Standart SMF (Standart SMF)
UDWDM	Aşırı DWDM (Ultra DWDM)
VSTF	Volterra Serileri Transfer Fonksiyonu (Volterra Series Transfer Function)
WDM	Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (Wavelength Division Multiplexing)
WSK	Dalgaboyu Kaydırmalı Anahtarlama (Wavelength Shifted Keying)
XPM	Çapraz Faz Modülasyonu (Cross Phase Modulation)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. 1550 nm'de $\gamma = 1.3$ (1/W.km) ve $D_c=21.89$ ps/(km.nm) olan bir standart tek modlu fiber için dispersiyon ve doğrusalsızlık uzunluklarının sırasıyla, darbe genişliği ve darbe tepe gücü ile değişimi.	22
Şekil 2.2. Optik fiberin girişindeki cıvıtsız bir darbenin pozitif ve negatif GVD bölgeleri için optik fiberin çıkışındaki örüntüleri.....	25
Şekil 2.3. Dispersif bölgede darbe şeklinin ve tayfının mesafe ile değişimi.	26
Şekil 2.4. Gausiyen bir darbe için SPM'in indüklediği faz kayması ϕ_{NL} 'nin ve frekans cıvıdaması $\delta\omega$ 'nin zamansal değişimi (Agrawal, G.P., 2007).	28
Şekil 2.5. Fiberin girişinde cıvıtsız gausiyen bir darbe için tayfının fiber uzaklığı ile değişimi (Agrawal 2007).	29
Şekil 2.6. Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler.	30
Şekil 2.7. Kanallar arası boşlukların eşit olduğu üç DWDM kanalı için optik fiberde meydana gelen FWM bileşenleri.....	36
Şekil 2.8. Kanallar arası boşlukların eşit olmadığı üç DWDM kanalı için optik fiberde meydana gelen FWM bileşenleri.	39
Şekil 2.9. Farklı uzunluk ve kromatik dispersiyon değerlerine sahip fiberler için FWM etkinliğinin kanallar arası boşluk ile değişimi.	41
Şekil 2.10. FWM'i öngörececek hat-içi optik yükselticilere sahip bir fiber hattı.....	42
Şekil 2.11. Yükselticili ve yükselticisiz optik fiber hattı için FWM etkinliklerinin kanallar arası boşlukla değişimi (Inoue 1992).....	43
Şekil 3.1. SPM'in etkilerini incelemeye kullanılan örnek bir topoloji (OptSim).	48
Şekil 3.2. Optik fibere giren gücün (x-ekseni) optik fiberin çıkışındaki güçle (y-ekseni) değişimi.	48
Şekil 3.3. Verilen gücün 10 dBm olduğu durumda optik fibere girmeden önceki göz diyagramı (back-to-back eye) (sol taraftaki), çıkışta alınan göz diyagramı (sağ taraftaki).....	49
Şekil 3.4. Verilen gücün 17.5 dBm olduğu durumda optik fibere girmeden önceki göz diyagramı (back-to-back eye) (sol taraftaki), alınan göz diyagramı (sağ taraftaki).	49
Şekil 3.5. Üç Kanallı WDM Sistemin Benzetim Modeli (Hiçdurmaz ve ark. 2012).	50
Şekil 3.6. DEA'nın genel akış şeması (Hiçdurmaz ve ark. 2013).	54
Şekil 3.7. DEA'nın ayrıntılı akış şeması (Qing 2009).	54
Şekil 4.1. Çeşitli veri hızları için BER'in A_{eff} ile değişimi.	58

Şekil 4.2. Çeşitli veri hızları için BER'in optik fiber uzunluğu ile değişimi.	59
Şekil 4.3. Çeşitli veri hızları için BER'in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.	60
Şekil 4.4. 10 Gb/s veri hızında -20 dBm ile 20 dBm arası $P_{in}/kanal$ değerleri için merkez kanalın optik fiberin girişindeki ve çıkışındaki göz diyagramları.	64
Şekil 4.5. 10 Gb/s veri hızı için yükseltici gürültüsünün ihmal edildiği durumda BER'in $P_{in}/kanal$ ile değişimi.	67
Şekil 4.6. $P_{in}/kanal$ değerlerinin sırasıyla 0 dBm ve 5 dBm olduğu durumda optik fiberin girişindeki ve çıkışındaki tayflar.....	68
Şekil 4.7. Farklı kanallar arası boşluk değerleri için BER'in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.....	69
Şekil 4.8. Farklı kromatik dispersiyon değerleri için BER'in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.....	70
Şekil 4.9. Farklı kanal sayıları için BER'in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.	71
Şekil 4.10. $P_{in}/kanal$ 0.2 mW olan 5 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.....	72
Şekil 4.11. Kanal giriş güçleri 1. ve 5. kanal için 0.2 mW, diğer kanallar için 0.3 mW olan 5 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.....	73
Şekil 4.12. $P_{in}/kanal$ 0.2 mW olan 9 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.....	73
Şekil 4.13. Kanal giriş güçleri 1. ve 9. kanal için 0.2 mW, diğer kanallar için 0.3 mW olan 9 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.....	74
Şekil 4.14. 5 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen çıkış OSNR değerleri.	76
Şekil 4.15. 5 kanallı sistemde $P_{in}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.	76
Şekil 4.16. 9 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.	77
Şekil 4.17. 9 kanallı sistemde $P_{in}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.	77
Şekil 4.18. 15 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.	78
Şekil 4.19. 15 kanallı sistemde $P_{in}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.	78

Şekil 4.20. 21 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.	79
Şekil 4.21. 21 kanallı sistemde $P_{ir}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.	79
Şekil 4.22. 3 kanallı sistem için merkez kanalın çıkış OSNR'ının $P_{ir}/kanal$ ile değişimi.	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. DWDM sistemlerinde yapılan deneysel başarımlar.....	3
Çizelge 2.1. 3-kanallı bir sistemde 25 dB'lik bir FWM çapraz karışımı elde etmek için fibere gönderilecek en büyük işaret giriş gücü.....	38
Çizelge 3.1. Benzetimlerde kullanılacak DSF değişkenleri.....	51
Çizelge 4.1. Göz diyagramlarının performans değişken değerleri.....	64
Çizelge 4.2. 5 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları.....	75
Çizelge 4.3. 9 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları.....	75
Çizelge 4.4. 15 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları.....	75
Çizelge 4.5. 21 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları.....	75
Çizelge 4.6. 5 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması.....	80
Çizelge 4.7. 9 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması.....	80
Çizelge 4.8. 15 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması.....	80
Çizelge 4.9. 21 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması.....	81

1. GİRİŞ

Optik fiberli haberleşme sistemleri 1975 yılından günümüze kadar olan süreçteki gelişmelerle birlikte iletim kapasitesini büyük oranda arttırmıştır (Gnauck ve ark. 2008). Böylece yaklaşık 1 Gb/s hızındaki tek bilgi işaretinin tek bir optik fiber üzerinden iletiildiği sistemlerden, farklı dalgaboylarına sahip her biri yaklaşık olarak 550 Gb/s hızındaki 224 adet bilgi işaretinin yine tek bir optik fiberden iletilebildiği günümüz iletim teknolojisine ulaşılmıştır (Sano ve ark. 2012).

Optik fiberli haberleşme sistemlerinin verimini arttıran; dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM), erbiyum-katkılı fiber yükselticiler (EDFA'lar) ve çeşitli özellikteki optik fiberler öncelikli araştırma konuları olmuştur. WDM'ler farklı dalgaboylarındaki birden çok sayıdaki bilgi işaretlerinin tek bir optik fiber üzerinden iletilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede optik fiberin sağladığı çok büyük bant genişliği kullanılabilir. Bu sayede optik fiberin sağladığı çok büyük bant genişliği kullanılabilir.

EDFA'lar işaretin ya da işaretlerin uzun mesafelere iletilmesinde optoelektronik/elektrooptik dönüşümlerini kullanmaksızın işaret zayıflamasını dengelemektedir. Uzun mesafede ve yüksek veri hızında iletim sağlamak için uygun tasarımdaki optik fiberler kullanılmaktadır.

Çalışmaların bir bölümü, bir taraftan fiberin kapasitesini tam olarak kullanabilmek ve yüksek bit hızında uzun mesafe iletimi elde edebilmek için yapılırken, diğer taraftan da arzu edilmeyen doğrusal olmayan etkileşimlerin bastırılması amaçlanmaktadır. Doğrusal olmayan etkileşimler çoğullanan optik işaretin fiber boyunca yol alması sırasında bozucu etki göstermektedir. Bu doğrusal olmayan etkilerden kaynaklanan sistem kısıtlamaları önemli bir çalışma alanı ortaya çıkarmıştır.

1980'li yıllarda, tek optik fiber üzerinden iletimde hem bit hızı hem de iletim uzaklığı, özellikle fiber kayıpları ve grup hızı dispersiyonundan (GVD) dolayı sınırlıydı ve sistem tasarımında doğrusal olmayan etkiler göz önünde bulundurulmuyordu. 1990'lı yıllarda optik kuvvetlendirmenin, dispersiyon yönetiminin ve WDM teknolojisinin ortaya çıkışıyla bu durum tamamen değişmiştir.

Bu gelişmeler sayesinde, 1000 km'yi aşan fiber hattı uzunluklarına ve tek kanal kapasitesinin 10 Gb/s'yi aştığı bit hızlarına ulaşılmıştır. Bu hızlarda optik fiberde ortaya çıkan doğrusal olmayan etkiler önemli hale gelmiştir (Agrawal 2007).

Son yıllarda yüksek kaliteli ses, görüntü ve veri haberleşme sistemlerine olan talepler de hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu talepler gelişen optik ağlardaki WDM kullanımında büyük bir artış meydana getirmiştir. WDM, her biri ayrı bir vericide olan farklı dalgaboylu optik işaretleri, tek bir optik fiber üzerinden taşınmalarına imkan verecek şekilde çoğullayarak toplam veri hızında önemli artış sağlayan bir teknolojidir. WDM kullanımı, her bir kanalın bit hızını toplayarak optik fiber başına düşen toplam bant genişliğini etkin şekilde artırır. Böylece bir WDM sistemi birim saniyede terabit kapasitede bilgi (Tb/s) iletebilmektedir.

Kullanıcıların çok daha fazla kapasite talebine cevap verebilmesi için kanal işaretlerinin dalgaboylarının çok daha sık aralıklarla yerleştirildiği WDM tasarımları geliştirilmiştir. Bu uygulamalardan biri yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamadır (DWDM). Bu yöntem birçok işareti iletmek için her bir işarete farklı ışık dalgaboylarının tahsis edilmesi temeline dayanır. DWDM tekniği veri kanallarını birbirine yakın bir şekilde paketleyebilmekte ve bu sayede aynı optik fiber üzerine çok daha fazla kanal yerleştirilmesi sağlanabilmektedir.

DWDM'in çalışma koşulu olarak genellikle sekiz ya da daha fazla kanalın gerekli olduğu kabul edilir. DWDM, optik fiberin kapasitesini arttırmak için ilk önce gelen optik işaretlerin frekanslarını bir frekans (ya da dalgaboyu) bandı içerisine tahsis eder. Daha sonra oluşan işaretleri tek bir optik fiber üzerine çoğullar. Çoğullanmış bu işaretler fiberde iletdikten sonra alıcı bölümde ayrıştırılırlar. DWDM teknolojisinde kanallar arası boşluk 1000 GHz'e (~ 8 nm) eşit veya daha azdır. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği-Telekomünikasyon Standardı (ITU-T), 200, 100, 50, 25 ve 12.5 GHz kanallar arası boşluklara sahip DWDM sistemleri için kanal merkez frekanslarını standartlaştırmıştır. DWDM teknolojisi, kanallar arası boşluğun 25 GHz ve aşağısında olduğu durumda aşırı-DWDM (UDWDM) olarak adlandırılmaktadır. ITU-T'nin standartlaştırdığı frekansların referans merkezi 193.1 THz'dir. Pratikte 200 ve 100 GHz kanallar arası boşlukların kullanımı oldukça yaygındır. C bandında 200 GHz kanallar arası boşlukla en çok 22 kanal iletmek mümkün iken 100 GHz için bu

değer 44 kanaldır. Her bir kanalın tayf genişliği kanallar arası boşlukların belirlenmesinde önemlidir. Günümüzde 16, 40, 80 ve 128 kanallı ticari DWDM sistemleri mevcuttur (Kartalopoulos 2000) ve her bir kanalın bit hızı 10 Gb/s (ya da 40 Gb/s)'dir. Böylece toplam kapasite sırasıyla 160 Gb/s, 400 Gb/s, 800 Gb/s ve 1.28 Tb/s hızlarında olur. Bir ansiklopedinin ortalama olarak 1.25 GB'lık bilgi içerdiği düşünülürse, 1 Tb/s'lik iletim hızı ile, bir saniyede 100 ansiklopedi gönderilebilir. Son yıllarda DWDM sistemlerinde yapılan deneysel başarımlar Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. DWDM sistemlerinde yapılan deneysel başarımlar

Yıl	Bit Hızı / Kanal (Gb/s)	Kanal Sayısı	İletim Uzaklığı (km)	Kanallar Arası Boşluk (GHz)	Yükselticiler Arası Uzaklık (km)	İşaret Şekli	Kaynak
1996	20	3	10.000	125 ve 200	50	Soliton	(Nagazawa ve ark. 1996)
1999	40	8	367	200	120	CS-RZ	(Miyamoto ve ark. 1999)
1999	10	34	6380	50	50	RZ	(Vareille ve ark. 1999)
1999	10	64	7200	30	50	Cıvıltılı RZ	(Bergano ve ark. 1999)
2002	42.7	64	4000	100	100	RZ-DPSK	(Gnauck ve ark. 2002)
2002	2.5	512	320	12.5	80	NRZ	(Suzuki ve ark. 2002)
2003	10	110	1040	25	80	NRZ	(Takara ve ark. 2003)
2003	10	313	160	50	80	NRZ	(Takara ve ark. 2003)
2006	2.67	1024	126	6.25	63	NRZ	(Ohara ve ark. 2006)
2010	107	640	320	12.5	80	PDM-36QAM	(Zhou ve ark. 2010)
2010	171	432	240	25	80	PDM-16QAM	(Sano ve ark. 2010)
2012	128	6	1200	16	1200	PDM-16QAM	(Dong ve ark. 2012)
2012	548	224	240	50	80	PDM-64QAM	(Sano ve ark. 2012)

DWDM teknolojisi işaretlerin uzun mesafe iletiminde optik haberleşme trafiğini hafifletmenin bir yolu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu teknoloji, büyük bant genişliğine sahip optik yükselticilerin kullanımını da mümkün kılmaktadır. Optik yükselticilerde işaretleri yeniden şekillendirip zamanlayarak iletmeye gerek yoktur. Yani bu işlem optik işaretleri elektrik işaretlerine ve daha sonra da elektrik işaretlerini optik işaretlere dönüştürmeyi gerektirmemektedir. Ayrıca işaret, daima ışık biçiminde iletiildiği için bu yükselticiler gecikme vermemektedirler.

EDFA'ların icadı DWDM sistemlerinin gelişmesini de sağlamıştır. Bu optik yükseltme, özel bir fiberin özünün içerisine erbiyum iyonlarının (Er^{3+}) katılmasıyla elde edilir. Bundan sonra optik pompa lazerleri ile erbiyum iyonlarının enerjilendirmesi ve bunların da optik işareti yükseltmesiyle, yüksek enerji seviyeleri fiberden geçirilir. Ayrıca bu optik yükselticiler geniş bantlı olduklarından bütün optik işaretleri aynı zamanda yükseltebilmektedirler. EDFA'da pompalama için genellikle 980 nm ya da 1480 nm dalgaboylarına sahip yarı iletken lazerler kullanılmaktadır. Pompalama fiberin her iki tarafından da yapılabilmektedir.

EDFA'lar hem tekrarlayıcılara göre hem de diğer yükseltme sistemlerine göre üstünlüğe sahiptirler. Tekrarlayıcılar, bit hızları artarken karmaşıklığı artan yüksek hızlı elektronik aygıtlara ihtiyaç duyarlar. Birkaç zincirden oluşan tekrarlayıcılara sahip sistemler için gerekli güvenilirlik çok fazladır. EDFA'lar yüksek hızlı elektronik cihazlara ihtiyaç duymazlar ve yükselticinin optik kazancı bit hızıyla değişmez. EDFA'nın basit tasarımı ve yüksek güvenilirliği sayesinde elektronik tekrarlayıcıların kullanımına kıyasla sistem maliyeti oldukça azaltılabilmektedir. Örneğin, 100 kanallı bir DWDM sistemde kullanılan bir adet optik yükseltici 100 ayrı elektronik tekrarlayıcının yerini alabilmektedir. Ayrıca her bir optik yükseltici arasındaki uzaklık, elektronik tekrarlayıcıların her biri arasında gerekli uzaklıktan çok daha fazla olduğu için verim daha da arttırılabilmektedir. Bir EDFA DWDM'le birlikte kullanıldığında, optik haberleşme şebekeleri büyük miktardaki bilgiyi çok uzak mesafelere çok yüksek güvenilirlikte iletebilmektedir.

Ancak bir optik yükseltici, işarete gürültü eklemektedir. Bu yüzden, iletim uzaklığının, bit hızının ve yükseltici sayısının artmasıyla sistemdeki gürültü ile beraber bit-hata oranı (BER) da artacaktır. BER işaretin-gürültüye-oranı (SNR) ile ters orantılı olduğundan

BER'i azaltmak için işaret gücünün gürültüyü bastırarak düzeyde artırılması ya da gürültünün azaltılması gerekir. Yani, iletim kapasitesi artarken SNR'ı yükseltme gereksinimi de artmaktadır. Büyük SNR elde etmek için gerekli bu yüksek güç, optik fiberdeki doğrusalsızlıklardan ortaya çıkan aksaklıkların artmasına neden olmaktadır.

Optik haberleşme sistemlerindeki doğrusalsızlık kavramı, optik fiberin kırılma indisi ve elastik olmayan saçılma etkisi gibi özelliklerinin kendisine gönderilen optik ışın veya ışınların gücüne bağlılığını ifade etmektedir. Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler optik fiber tabanlı sistemlerde büyük önem arz etmiş ve akademik araştırma konusu olmuştur. Geçmişte yapılan çoğu deneyde, optik yükselticilerle beraber yüksek-bit-hızına sahip çok dalgaboylu sistem düzeneklerinde; öz-faz modülasyonu (SPM), çapraz-faz modülasyonu (XPM), dört-dalga karışımı (FWM), uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) ve uyarılmış Raman saçılması (SRS) gibi temel doğrusal olmayan etkilerin ortaya çıktığı görülmüştür (Agrawal 2007, Toulouse 2005). Bu etkiler haberleşme hattında farklı etkiler sergilemektedirler. Örneğin; SPM, yüksek-bit-hızlı iletim sistemlerinde dispersiyon davranışında bir değişime neden olmakta; XPM, SRS ve SBS ise SNR'ın azalmasını sağlamakta; FWM de, özellikle DSF'lerde komşu kanallar arasındaki çapraz karışımı arttırarak SNR'ın azalmasına neden olmaktadır (Schneider 2004).

Sistem tasarım mühendisleri yüksek-bit-hızlı (kanal başına 10 Gbit/s veya üzeri) çok dalgaboylu sistemlerde doğrusal olmayan etkileri ve tesirini araştırmaktadırlar. Adı geçen etkiler sistem için olumsuzluk oluşturmasının yanında üstünlükler de (Agrawal 2001) meydana getirmektedir. Üstünlüklerin bazıları şu şekilde verilebilir; SPM sayesinde, optik darbelerin oldukça büyük uzaklıklara bozulmasız olarak iletilebildiği soliton oluşumu meydana gelebilmekte; XPM ile, aşırı-hızlı tümüyle-optik anahtarlama elde edilebilmekte; FWM, SRS ve SBS gibi doğrusal olmayan etkiler sayesinde ise EDFA'lar tarafından ulaşılamayan tayf bölgelerinde optik kazanç sağlanabilmektedir (Agrawal 2007).

1.1 Kaynak Araştırması

1970 yılından beri optik fiberin doğrusal olmayan etkileri bir çok bilim adamı tarafından çalışılmıştır. Stolen, tek-modlu fiber iletim sistemlerinde SPM, SRS ve SBS doğrusal olmayan etkileri için kritik güç seviyelerinin bir öngörüsünü sunmuştur (Stolen 1980). Buna göre, SRS etkisi için tipik eşik güç seviyeleri birkaç Watt derecesinde iken SPM ve SBS etkileri 100 mW civarlarındaki güçler için görülebilmektedir. Ayrıca Chraplyvy de çeşitli sistem değişkenleri için fiber doğrusalsızlıklarının etkilerini araştırmıştır (Chraplyvy 1990). Çalışmada; SRS etkisinin diğer etkilere göre sistem performansını daha az sınırladığı, SPM ve XPM etkilerinin harici faz modülatörleri kullanan faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) sistemlerinde önemli olmadıkları, SBS'nin kanal sayısından bağımsız olduğu ve yüksek hızlı uzun mesafe iletim sistemleri için 10 mW'ı aşmayan kanal başına optik fibere giriş güçleri için sistem performansını pek etkilemeyeceği, FWM'in optik fiberin uzunluğuna, etkin öz alanına, kanallar arası frekans boşluğuna ve fiber dispersiyonuna bağlı olduğu gösterilmiştir. FWM etkisini azaltmak için kanallar arası boşlukların 50 GHz'den daha büyük olması ve çalışma dalgaboyunun da en küçük dispersiyon bölgesinde olmaması gerektiği vurgulanmıştır.

Waarts ve arkadaşları, 825 nm dalgaboylu pompa lazeri kullanarak SRS kaynaklı çapraz karışımı deneysel olarak çalışmışlardır (Waarts ve ark. 1985). Burada pompa lazerinin gücünün artmasıyla verici lazerin gücünün arttığı görülmüştür. Ayrıca pompa lazerinin modüle edilmesinin kazancı düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yine Waarts ve arkadaşları diğer bir çalışmalarında (Waarts ve ark. 1986) çok kanallı bir optik fiber hattında eşit kanal güçleri için FWM'in sınırladığı en büyük kanal başına düşen optik fibere giriş gücünü elde etmişlerdir. Çalışmalarında 100 kanallı bir sistem için, kanallar arası boşluğun 5 GHz ve merkez kanala düşen çapraz karışımın -20 dB olduğu bir dispersiyonu-kaydırılmış fiber (DSF) hattında, kanal başına düşen giriş gücünün 5 km'lik uzaklık için 0 ila -5 dBm arası, 10 km'lik uzaklık için ise -10 dBm olması gerektiği kuramsal olarak gösterilmiştir.

Marcuse ve arkadaşları, WDM sistemindeki kanal sayısının XPM' ile olan bağımlılığını kuramsal olarak araştırmışlardır (Marcuse ve ark. 1994). Çalışmalarında kanallar arası dalgaboyu boşluğunun yaklaşık olarak 2 nm olması durumunda kanal sayısındaki artışın

XPM kaynaklı işaret bozulmasını meydana getirmeyeceği görülmüştür. Bu durumda XPM'in kanal sayısını sınırlamadığı sonucuna varılmıştır.

Shtaif ve Eiselt, dispersif optik fiberlerde XPM kaynaklı yoğunluk girişimini tanımlayan basit analitik ifadeler türetmişlerdir (Shtaif ve Eiselt 1998). Türetilen bu ifadelerle göre, sistem değişkenlerinin pratik açıdan gerçekleştirilebilir değerleri içerisinde XPM kaynaklı güç cezasının bozucu işaretlerin gücüne doğrusal olarak bağlı olduğu gösterilmiştir.

Hui ve arkadaşları, birden fazla hat-içi yükselticili, yoğunluk modülasyonu- doğrudan algılama (IM-DD) optik sistemlerinde XPM'in tayf karakteristiklerini hem kuramsal hem de deneysel olarak araştırmışlardır (Hui ve ark. 1999). XPM'in dispersiyona ve kanallar arası boşluğa son derece bağlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca farklı bit hızlarındaki kanallar arasında XPM kaynaklı çapraz karışım da değerlendirilerek XPM'in bit hızına bağlı olmadığı görülmüştür.

Killey ve arkadaşları, sıfıra-dönmeyen (NRZ) işaret şekillerinde XPM kaynaklı cezaları öngörmek için pompa-prob tekniği geliştirmişlerdir (Killey ve ark. 2000). Bu basitleştirilmiş teknik ile XPM kaynaklı cezaları küçültecek en uygun hat tasarımının hızlı bir şekilde yapılabileceğini göstermişlerdir. Killey ve arkadaşları bir başka çalışmalarında (Killey ve ark. 2000) hem kanal-içi çapraz-faz modülasyonunu (IXPM) hem de kanal-içi dört-dalga karışımını (IFWM) azaltacak yeni analitik tasarım kuralları türetmişlerdir.

Elbers ve arkadaşları, dispersiyon-yönetiminin yapıldığı optik fiberli haberleşme sistemlerinde SPM'in sınırladığı fiber iletimini tanımlayacak basit bir yöntem sunmuşlardır (Elbers ve ark. 2000). Ayrıca bu yöntem, WDM sistemlerindeki diğer doğrusal olmayan etkilerin kısıtlamalarını öngörmede kullanılmıştır.

Betti ve Giaconi, WDM sistemlerindeki XPM etkisini değerlendirmek için çeşitli analizler gerçekleştirmişlerdir (Betti ve Giaconi 2001). Çalışmalarında XPM'in alışılmışın dışında bir "filtre etkisi" ile modellenebileceğini göstermişlerdir. Önerilen modelden elde edilen sonuçlar ile daha önce elde edilen benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

Lyubomirsky ve arkadaşları, UDWDM sistemlerinde, SPM ve XPM kaynaklı tayf bozulması ile optik filtreleme arasındaki ilişkiyi deneysel olarak araştırmışlardır (Lyubomirsky ve ark. 2003). Özellikle kanallar arası boşluğun 25 GHz olması durumunda 10 Gb/s hızındaki işaretlerin doğrusal olmayan etkiler kaynaklı tayf bozulmasının, optik yalınlaştırma (demultiplexing) filtrelerinin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca bu etkileşim karakteristiklerinin SPM ve XPM için ayrı ayrı bakıldığında birbirlerinden farklı oldukları gözlenmiştir.

Kumar ve Yang, sıfıra dönen (RZ) şekilli bir iletim sisteminde SPM ve XPM etkileri için ikinci-derece düzensizlik (pertürbasyon) tekniği geliştirmişlerdir (Kumar ve Yang 2005). Dispersiyon uzunluğunun doğrusalsızlık uzunluğundan daha büyük olması durumunda bile bu teknikten elde edilen sonuçların sayısal benzetimlerle elde edilen sonuçlarla örtüştüğü gösterilmiştir.

Lee ve Park, dispersiyonu sıfır olmayan, dispersiyonu-kaydırılmış fiber (NZ-DSF) kullanan uzun mesafe DWDM sistemlerinde SPM ve XPM kaynaklı cıvıltıyı (chirp) azaltıcı bir cıvıltı yok etme yöntemi önermişlerdir (Lee and Park 2006). Çalışmalarında SPM ve XPM kaynaklı cıvıltıların birbirlerini yok edebilecekleri gösterilmiştir.

Sheetal ve arkadaşları, çeşitli veri şekilleri için 10 Gb/s ve 40 Gb/s veri hızlarındaki optik sistemlerde SPM'den kaynaklanan kısıtlamaları araştırmışlardır (Sheetal ve ark. 2010). 10 Gb/s veri hızında taşıyıcısı-bastırılmış sıfıra dönen (CS-RZ) modülasyon şeklinin en iyi sistem performansını sergilediği buna karşı 40 Gb/s veri hızında ise sıfıra-döner diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama (RZ-DPSK) modülasyon şeklinin diğer modülasyon şekillerine göre daha uygun olduğu gösterilmiştir.

Shibata ve arkadaşları, tek-modlu bir fiberde FWM sayesinde üretilen dalganın etkinliğinin faz-uyumsuzluğuna olan bağlılığını hem kuramsal hem de deneysel olarak incelemişlerdir (Shibata ve ark. 1987). Kuramsal ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Shibata ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada ise (Shibata ve ark. 1990) standart tek-modlu fiberler (SSMF-ITU-T G652) ve DSF'ler için WDM sistemlerindeki SBS ve FWM etkilerinin sınırladığı, en küçük kanallar arası frekans boşluğu, en büyük WDM kanal sayısı, en büyük kanal giriş gücü ve en büyük iletim uzaklığı, alıcı duyarlılığındaki bozulma dikkate alınarak araştırılmıştır. Çalışmalarında,

kromatik dispersiyondan kaynaklanan işaret bozulmasının giderildiği durumda büyük uzunluğa sahip SSMF'li WDM sistemlerinde 1550 nm dalgaboyunda çalışılmasının DSF'li WDM sistemlerine göre daha uygun olduğu görülmüştür.

Inoue 1990'lı yıllarda FWM etkisini çeşitli fiber değişkenlerine göre araştırmıştır. Inoue, Toba ile yaptığı bir çalışmada (Inoue ve Toba 1991); dört kanallı bir frekans kaydırmalı anahtarlamalı (FSK) doğrudan algılama sistemindeki FWM kaynaklı BER kötüleşmesini, DSF'nin kullanıldığı ve her bir kanalın eşit güçte olduğu durum için deneysel olarak incelemiştir. Burada performans değerlendirmesi açısından kanallardan biri seçilerek diğer kanalların modülasyonlu ve modülasyonsuz olması durumuna göre güç cezası değerlendirmesi yapılmıştır. Inoue bir başka çalışmada (Inoue 1992, 1994) sıfır dispersiyon dalgaboyu bölgesinde optik fiberdeki FWM etkisini kuramsal ve deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada, sıfır-dispersiyon dalgaboyu bölgesi için geçerli yeni bir faz-uyumsuzluğu değişkeni türetilmiştir. Inoue diğer bir makalesinde (Inoue 1992) tek-modlu fiberdeki FWM etkisini, giriş ışığının genel kutuplanma durumları için incelemiş ve ışığın farklı kutuplanması durumlarında FWM için kuram geliştirmiştir. Inoue yine bir makalesinde, çok kanallı IM/DD iletiminde FWM etkisini bir frekans modülasyonu tekniği kullanarak azaltmıştır (Inoue 1992). Diğer bir çalışmada ise (Inoue 1992) hat-içi optik yükselticilere sahip fiber hatlarındaki FWM için FWM etkinliğini türetmiştir. 1993 yılında yaptığı çalışmalarında FWM etkisini bastırarak yöntemler sunmuştur (Inoue 1993). Inoue ve Toba ayrıca farklı sıfır dispersiyon dalgaboylarına sahip kısa fiberlerden oluşan birden çok yükselticili WDM sisteminde FWM için analitik ifade türetmişlerdir (Inoue ve Toba 1995).

Maeda ve arkadaşları, FWM'in çeşitli sistem değişkenlerine olan bağımlılığını tek yönlü ve çift yönlü iletim için araştırmışlardır (Maeda ve ark. 1990). Çalışmalarında, 16 kanallı bir sistemde 8. kanal için FWM kaynaklı alıcı duyarlılığındaki azalma deneysel olarak incelenmiştir. Yine her biri -3 dBm olan kanal giriş güçlerinin 12 km'lik bir DSF'den geçirilmesi durumunda 0.4 dB'lik bir ceza elde edilmiştir.

Forghieri ve arkadaşları, DSF kullanan sistemlerde FWM'in neden olduğu çapraz karışımı azaltmak için kanal frekanslarının yerlerini tasarlayacak bir teknik önermişlerdir (Forghieri ve ark. 1994). Çalışmalarında kanallar arası boşluklar uygun ve eşit olmayacak bir şekilde seçildiğinde FWM bileşenlerinin iletilen kanalların hiçbirine

eklenmeyeceği kuramsal olarak gösterilmiştir. Ancak bu teknik sayesinde sistemin bant genişliğinde biraz genişleme olmuştur. Forghieri ve arkadaşları bir önceki çalışmanın devamı niteliğindeki diğer bir çalışmalarında ise (Forghieri ve ark. 1995) önerdikleri tekniğin etkinliğini deneysel olarak kanıtlamışlardır.

Schadt ve Stephens, ideal hat-içi optik yükselticilere sahip uzun karasal sistemlerde FWM'in faz-modüleli işaretleri nasıl etkilediğini farklı kanallar arası boşluk değerleri için araştırmışlardır (Schadt ve Stephens 1992). Araştırmada, kanallar arası frekans boşluğunun 12.5 GHz'den 37.5 GHz'e artırılmasıyla hem SSMF hem de DSF kullanan sistemler için sistem performansının iyileştiği ancak bu iyileşmenin SSMF kullanan sistemlerdekine kıyasla DSF kullanan sistemlerde daha fazla olduğu görülmüştür.

Wang ve arkadaşları, EDFA ve DSF kullanan WDM sistemlerinde kanallar arası frekans boşluklarının ve yükselticiler arası boşlukların uygun bir şekilde seçilmesi ile FWM işlemi tarafından üretilen dalgaların yok edilebileceğini kuramsal olarak önermişlerdir (Wang ve ark. 1996). Ayrıca önerilen bu teknik fazladan cihaz kullanımını gerektirmemektedir.

Yamamoto ve arkadaşları, optik fiberde oluşan FWM işlemi sayesinde elde edilen dalgaboyu dönüşümünü pompa dalgasının yoğunluğuna bağlı faz-uyum koşulu altında araştırmışlardır (Yamamoto ve ark. 1997). Çalışmalarında etkin bir dönüşüm kazancı elde etmek için küçük mod alan çaplı (4.2 μm) ve düşük dispersiyon eğimli (0.0307 ps/km/nm²) bir fiber kullanmışlardır.

Boskovic ve arkadaşları, FWM'in kanallardaki etkisini azaltmak için ITU-T'nin kanallar arası boşluk çerçevesinde kanalların frekans yerleşimine bir plan önermişlerdir (Boskovic ve ark. 1998). Bu plana göre, optik fiber tarafından ortaya çıkarılan FWM bileşenlerinden her hangi biri gerçek kanal frekanslarının üzerine düşmeyecektir. Bu sayede optik fiberin çıkışındaki kanal işaretlerinin duyarlılığı artırılır.

Hwang ve Tonguz, FWM kaynaklı çapraz karışımı azaltmak için en uygun şekilde eşit olmayan bir kanal frekans yerleşimi önermişlerdir (Hwang ve Tonguz 1998). Önerdikleri tekniğin performansının alışıldık eşit kanallar arası frekans boşluklu

kanallara sahip bir WDM sistemiyle karşılaştırıldığında çok daha iyi olduğu görülmüştür.

Madani ve Kikuchi, büyük uzunlukta, dispersiyon yönetimli WDM iletim sistemlerine yeni bir tasarım kuramı geliştirmişlerdir (Madani ve Kikuchi 1999). Çalışmalarında, bilinen bazı sistem değişkenleri için en küçük kanallar arası frekans boşluğu elde ettirecek en uygun dispersiyon tahsisi ve her bir kanalın giriş güçleri araştırılmıştır.

Song ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada (Song ve ark. 1999), FWM etkisi için optik fiberdeki SPM ve XPM etkilerinin de dahil olduğu yeni bir faz-uyum etkeni (yoğunluk bağımlı faz-uyum etkeni) türetmişlerdir. Kanal giriş güçlerinin büyük ve fiber dispersiyonunun ya da kanallar arası boşluğun küçük olduğu durumda SPM ve XPM'in FWM üzerindeki etkisinin önemli olduğunu göstermişlerdir. Song ayrıca WDM sistemlerinde yüksek-derece FWM etkilerini kuramsal ve deneysel olarak değerlendirmiş (Song 2000) ve bu etkilerin birinci derece FWM etkilerine kıyasla küçük olmasına rağmen birinci derece FWM etkilerinin önemli olmadığı eşit olmayan kanallar arası boşluklu WDM sistemlerinde önemli olabileceği sonucunu çıkarmıştır. Song diğer bir çalışmasında da (Song 2001) WDM sistemlerindeki her bir kanala düşen FWM ürünlerinin sayısını hesaplamak için birkaç analitik formül türetmiştir.

Song ve Premaratne, L-bant EDFA'larda oluşan SPM ve XPM'in önemini 20 Gb/s hızındaki NZDSF iletim hatlarında sayısal benzetimlerle araştırmışlardır (Song ve Premaratne 2000). Buradan elde ettikleri sonuç, SPM ve XPM'in bozucu etkilerinin NZDSF'de olana kıyasla L-bant EDFA'larda önemsiz olmasıdır. Ayrıca bu çalışmada birden çok sayıda yükseltici aralıklarının olduğu bir fiber hattında FWM'i ifade eden analitik kuram (Inoue 1992) EDFA'lardaki FWM etkisinin dahil edilmesiyle geliştirilmiştir.

Chang ve arkadaşları, kanallar arası frekans boşluklarının eşit olmadığı WDM sistemlerinde çalışma bandına ve her bir kanala düşen FWM işaretlerinin toplam sayısını belirleyebilmek için Frekans Fark Üçgenlerini ve Frekans Fark Karelerini kullanan iki algoritma geliştirmişlerdir (Chang ve ark. 2000, Kwong ve ark. 2001). Bu sayede FWM'in olumsuz etkisiyle kanallar arası girişim arasında iyi bir denge kurmak ya da en ciddi çapraz karışıma sebebiyet verecek kanal yerlerinin atanmasından

kaçınmak için kanallar arası boşluk gibi sistem değişkenlerinin en uygun değerleri ayarlanabilmektedir. Kwong ve arkadaşları da aynı amaç için farklı iki algoritma geliştirmişlerdir.

Sharping ve arkadaşları, mikroyapılı bir fiberde bozulmamış (dejenere olmayan) FWM'in ilk deneysel gösterimini yapmışlardır (Sharping ve ark. 2001). Çalışmalarında sadece 6 W'lık pompa tepe gücü ile 6.1 m'lik fiberden 13 dB'den daha fazla parametrik kazanç elde etmişlerdir.

Elbers ve Glingener, yaptıkları çalışmada sadece, optik fiberdeki doğrusal olmayan etkilerden ve optik yükselticilerden kaynaklanan yükseltilmiş kendiliğinden yayılmadan (ASE) dolayı optik işaret-gürültü oranı (OSNR) kötüleşmesiyle sınırlı, yüksek kapasiteli DWDM sistemleri için etkin bir tasarım yöntemi sunmuşlardır (Elbers ve Glingener 2001). Çalışmalarında bazı sistem modellerinin veri hızlarına, modülasyon şekillerine, fiber türlerine ve dispersiyon dengeleme düzenlerine bağımlılıkları belirlenmiştir.

Mutafungwa ve Halme, FWM çapraz karışımını azaltmak için kanalların frekans yerlerinin bir optik genişleme kodu ile belirlendiği yeni bir kanal frekans tahsis yöntemi önermişlerdir (Mutafungwa ve Halme 2001). Önerilen bu yöntemin diğer önerilen frekans tahsis yöntemlerine göre optik bant genişliği gereksinimlerinde azalma, hesaplama kolaylığı, kanal sayısında sınırsızlık ve kanal üzerine düşen FWM çapraz karışımından tam anlamıyla kaçınılması gibi çeşitli üstünlükleri vardır. Önerilen bu yöntem 50 GHz kanallar arası boşluklu 16 x 2.5 Gbit/s'lik bir DWDM sisteminde analiz edilmiş ve aynı eşit kanallar arası boşluklu DWDM sistemlerine göre Q etkeninde 2 dB'in üzerinde iyileşme gerçekleşmiştir.

Suzuki ve arkadaşları, 512 kanallı bir süper-DWDM iletimi gerçekleştirmişlerdir (Suzuki ve ark. 2002). Sistem C ve L bantlarını kapsamaktadır ve kanallar arası frekans boşluğu 12.5 GHz'dir. İletim 320 km'lik (80 km x 4) bir SSMF üzerinden sağlanmaktadır. Çok dalgaboyu üretim tekniği sayesinde gerçekleştirilen bu iletim deneyinin kapasitesi 12.5 Tb/s (512 kanal x 2.5 Gb/s)'dir. Oluşturulan sistem 10^{-12} BER'lik hatasız çalışma koşulunu dispersiyonu dengeleme yapmadan sağlamıştır. Ortalama kanal başına düşen fibere giriş gücü -10 dBm/kanal'a azaltıldığında FWM, SPM, XPM ve SRS gibi fiber doğrusalsızlıklarının etkisi önemsiz hale gelmiştir.

Thing ve arkadaşları, WDM sistemlerinde FWM ve kanallar arası girişim etkisini azaltıcı kanal tahsisi için Optimal Golomb Kuralı temelli yeni bir algoritma önermişlerdir (Thing ve ark. 2003). Önerilen bu yöntemin performansı eşit kanallar arası boşluklu sistemin performansı ile kıyaslandığında dispersiyonu 3 ps/nm.km değerine sahip bir WDM sistemi için 1.75'lik bir BER gelişim etkeni (sistem uzunluğunda 3.8 km'lik bir artış ya da izin verilebilir giriş gücünde 0.76 dB'lik bir artış), dispersiyonu 6 ps/nm.km değerine sahip bir WDM sistemi için ise 0.97'lik bir BER gelişim etkeni (sistem uzunluğunda 2.2 km'lik bir artış ya da izin verilebilir giriş gücünde 0.44 dB'lik bir artış) elde edilmiştir. Bu yöntemin literatürdeki diğer çalışmalarda önerilen kanal tahsis yöntemlerine göre üstünlüğü ek bant genişliği maliyeti getirmemesidir.

Tokle ve arkadaşları NRZ, duobinary, RZ, CS-RZ ve tek-yanbant RZ (SSB-RZ) modülasyon şekillerini uzun fiber aralıklarını kullanarak 40 Gbit/s hızındaki tek kanallı ve WDM sistemleri için sayısal olarak hesaplamışlardır (Tokle ve ark. 2003). Tek kanallı sistem için alışıldık RZ şeklinin performans açısından en uygun olduğu buna karşı CS-RZ şeklinin ise WDM sistemleri için en iyi olduğu görülmüştür. SMF + zıt dispersiyonlu fiber (IDF) x 2 aralığının kullanılması aralık kaybını azalttığından dolayı SMF + dispersiyon kompenze edici fiber (DCF) aralığına göre daha büyük iletim uzaklığı elde edilmiştir.

Xu ve Pearce, Volterra serileri transfer fonksiyonu (VSTF) yöntemini kullanarak XPM ve FWM kaynaklı işaret bozulması için yeni analitik ifadeler türetmişlerdir (Xu ve Pearce 2003). Bu ifadeler sayesinde elde edilen sonuçlarla, aynı sistem koşulları altında XPM ve FWM etkileri doğru bir şekilde kıyaslanabilmektedir. Ayrıca literatürdeki diğer analitik ifadelerle kıyaslandığında bu yeni türetilen analitik ifadelerle, WDM kanallarının daha geniş kapsamlı analizi daha kolay ve doğru bir şekilde yapılabilmektedir.

Wu ve Way, UDWDM sistemlerini (25 GHz kanallar arası boşlukla 10 Gb/s hızında ve 6.25 GHz kanallar arası boşlukla 2.5 Gb/s) çeşitli tek-modlu fiberler için araştırmışlardır (Wu ve Way 2004). Çalışmada, bu sistemleri sınırlayan temel etkenler ve bunları önlemek için en uygun dispersiyon dengeleyicileri tanıtılmıştır.

Bogoni ve Poti, DWDM sistemlerindeki FWM etkisini farklı fiber tipleri için analiz etmişlerdir ve ITU'nun önerdiği kanal yerlerinde özel kanal tahsisi yaparak IFWM çapraz karışımını azaltmaya yönelik öneride bulunmuşlardır (Bogoni ve Poti 2004). Önerdikleri kanal tahsis planı literatürdeki diğer kanal tahsis önerilerine göre bant genişliğinin genişlemesi gereksinimi ile en büyük kanal üzerine düşen FWM çapraz karışımı arasında bir ödün verme (trade-off) sağlamaktadır. Çalışmalarında önerdikleri üç kanal kodu temelli yeni kanallar arası eşit olmayan boşluklu kanal frekans tahsisi, kanallar arası boşlukların eşit olduğu sistemlerle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün fiber tipleri için aynı bant genişliğinin kullanımıyla eşit kanallar arası boşluklu sistemlere kıyasla en az 3 dB'lik bir SNR iyileşmesi gerçekleşmiştir.

Kawanami ve arkadaşları, DSF kullanan sistemlerde oluşan FWM ışığının dalgaboyu dönüşüm verimini ve verimin kutuplanma bağımlılığını araştırmışlardır (Kawanami ve ark. 2004). Elde ettikleri sonuçlara göre, FWM ışığının dalgaboyu dönüşüm veriminin; iki giren dalganın doğrusal kutuplu olması durumunda en küçük olduğu, paralel kutuplu olması durumunda ise en büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, FWM'in kutuplanma bağımlılığını kullanarak, optik fiberin doğrusal olmayan kırılma indisini ve sıfır dispersiyon dalgaboyunu ölçmüşlerdir.

Paradiso ve arkadaşları, fiber doğrusalsızlıklarının sebep olduğu Q cezalarını 2000 km'lik bir DWDM sisteminde farklı kanallar arası boşluk değerleri (33 GHz, 66 GHz ve 100 GHz) için deneysel olarak çalışmışlardır (Paradiso ve ark. 2004). Çalışmalarında SPM, XPM ve FWM doğrusalsızlıkları ayrı ayrı olarak ölçülmüş ve 33 GHz kanallar arası boşluklu sistem için XPM'in temel sınırlayıcı etken olduğu görülmüştür. 66 GHz ve 100 GHz'lik kanallar arası boşluklu sistemler için ise SPM'in baskın olduğu görülmüştür. Çalışmalarında FWM etkisinin diğerlerine göre az olmasının sebebi adım indisli SSMF kullanılmasıdır.

Faisal ve arkadaşları, dalgaboyu kaydırmalı anahtarlama (WSK) WDM sisteminin performansı ile klasik açma-kapama anahtarlama (OOK) WDM sisteminin performansını FWM etkisi göz önüne alınarak karşılaştırmışlardır (Faisal ve ark. 2006). WSK-WDM sisteminin bütün işaret seviyeleri için klasik OOK-WDM sisteminden üstün olduğu görülmüştür.

Kaur ve arkadaşları, fiber doğrusalsızlıklarının WDM sistemleri üzerindeki etkilerini çeşitli sistem değişkenleri için kuramsal olarak araştırmışlardır (Kaur ve ark 2009, 2010). Yaptıkları çalışmalarda sistemlerin yüksek iletim performansı sergilemesi için en uygun sistem değişkenleri belirlenmiştir.

Noshad ve Rostami, asimetrik dispersiyon-yönetimli optik fiber hattı kullanan WDM sistemlerinde FWM çapraz karışımını azaltıcı yöntem önermişlerdir (Noshad ve Rostami 2012). Bu yönteme göre, farklı uzunluktaki ve zıt dispersiyon değerli iki fiber kısmından oluşan WDM sisteminde FWM kaynaklı güç cezasının azaltılabileceği gösterilmiştir.

Yapılan literatür araştırmasına göre optik fiberlerdeki doğrusal olmayan olaylar konusundaki çalışmaların daha çok aşağıda belirtilen konularda yoğunlaştığı görülmüştür.

- Sistem performansını sınırlayan her bir doğrusal olmayan olayın etkisini azaltıcı yöntemler geliştirmek.
- Sistem değişkenlerinin doğrusal olmayan olaylar üzerindeki etkilerini belirlemek.
- Sistemin hangi değişken değerlerinde doğrusal olmayan olaylardan hangisinin sistemi daha fazla sınırladığını yani hangisinin sistem için daha baskın olduğunu tespit etmek.
- Doğrusal olmayan olayları karakterize eden doğrusal olmayan Schrödinger (NLS) denklemini çözmek için literatürde var olan yöntemlerden daha üstün analitik ya da sayısal yöntemler geliştirmek.
- Doğrusal olmayan olayların uygulama alanlarını ortaya çıkarmak.
- Doğrusal olmayan olayların uygulama alanlarını geliştirmek.
- Doğrusal olmayan olayların yüksek dereceden etkilerini analiz etmek.
- Doğrusal olmayan olayların birleşik etkilerini analiz etmek.
- Doğrusal olmayan etkileri karakterize eden ifadeler türetmek.

1.2 Sebep ve Tezin Düzeni

Günümüzün bilgi taşıma kapasitesi en yüksek haberleşme sistemi olan optik fiberli haberleşme sistemlerinin iletim uzaklığı optik yükselticilerin özellikle de EDFA'ların ortaya çıkışıyla oldukça artmıştır. Ancak bu sefer de optik fiberdeki doğrusal olmayan olaylar optik yükselticilerin sağladığı yüksek optik güç seviyeleri nedeniyle sistem için ciddi bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Bu yüzden çok kanallı sistemlerde optik fiberlerdeki doğrusal olmayan olayların hem kanal içi hem de kanallar arası etkilerini çeşitli sistem değişkenleri için analiz etmek oldukça önemlidir.

Optik fiberin doğrusal olmayan etkileri konusunda literatürde ciddi çalışmalar yapılmasına rağmen özellikle bu etkilerin sınırladığı optik giriş gücü değerleri için yeteri kadar analiz yapılmamıştır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, *doğrusal olmayan etkiler altındaki bir WDM sistemi için en uygun kanal giriş güçlerini belirlemektir*. Bu amaçla ilk olarak OptiSim™ yazılım programı ile çeşitli sistem değişkenleri için performans açısından en uygun değişken değerleri ve kanal giriş güçleri tespit edilmektedir. Ancak, bu yazılım ile en uygun kanal giriş güçlerinin belirlenmesi mümkün olmadığından, analizlerde kanal giriş güçleri eşit olarak alınmaktadır. Bu yazılım sayesinde fiberdeki doğrusalsızlık etkenlerinin birleşik etkisi analiz edilebilmektedir. İkinci olarak, DWDM sistemlerinde genellikle diğerlerine göre baskın etkiye sahip olan FWM'in, optik yükselticinin ASE gürültüsünü de hesaba katarak, etkisinin azaltıldığı en uygun kanal giriş gücü değerlerini belirlemek için geliştirilen Matlab™ tabanlı yazılım tanıtılacaktır.

Tezin bölümleri şu şekildedir. Bölüm 2'de doğrusal olmayan olayların kuramı açıklanmıştır. Bu bölümde özellikle Kerr etkisinin sebep olduğu SPM, XPM ve FWM olaylarının kuramı üzerinde durulmuştur. Bölüm 3'te analiz için gerekli materyal ve yöntemler tanıtılmıştır. Bölüm 4'te araştırmanın sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise tezden elde edilen sonuçlar verilerek tezin bilime katkısı sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

Elektromanyetik olaylarda olduğu gibi, optik dalgaların tek-modlu bir fiberde yayılması (propagasyonu) Maxwell denklemleri ile ifade edilebilir. Maxwell denklemleri ile türetilen dalga denklemi

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \left(\frac{\partial^2 \mathbf{P}_L}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2} \right) \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada \mathbf{E} elektrik alan vektörü, $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ ışığın boşluktaki hızı, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, \mathbf{P}_L ve \mathbf{P}_{NL} ise sırasıyla indüklenen \mathbf{P} kutuplanmasının doğrusal ve doğrusal olmayan bölümleridir. İndüklenen \mathbf{P} kutuplanma vektörü, \mathbf{E} elektrik alan vektörü ile $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$ şeklinde doğrusal bir ilişkiye sahiptir. Burada ϵ_0 boşluğun elektrik geçirgenliği, χ ise elektrik alınganlığıdır.

Yoğun elektromanyetik alanın etkisinde kalan herhangi bir dielektrik malzemenin cevabı doğrusal değildir. Bu durumla optik fiberlerde de karşılaşılır ve optik fiberin yoğun ışığa karşı tepkisi doğrusal olmamaktadır. Bu durumda bağlı elektronlar uyumsuz bir şekilde hareket edeceklerdir. Bu uyumsuz hareketten dolayı elektrik çift kutuplarının indüklediği toplam kutuplanma vektörü

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \right) = \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{NL}^{(2)} + \mathbf{P}_{NL}^{(3)} + \dots \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $\chi^{(j)}$, ($j = 1, 2, 3, \dots$), j . dereceden malzemenin elektrik alınganlığıdır. Genelde $\chi^{(j)}$, $j+1$ rankına sahip bir tensördür. $\chi^{(1)}$ doğrusal elektrik alınganlığıdır ve \mathbf{P} 'ye baskın katkıyı sağlamaktadır. $\chi^{(2)}$ ise ikinci harmonik oluşumu ve toplam frekans oluşumu gibi doğrusal olmayan olaylardan sorumludur. $\chi^{(2)}$ sadece moleküler düzeyde simetriden yoksun ortam için sıfır değildir. Bu durumda SiO_2 simetrik bir molekül olduğundan bundan meydana gelen silika fiberlerde normalde ikinci derece $\chi^{(2)}$ yoktur. Ancak yine de elektrik dört kutup ve manyetik çift kutup momentleri zayıf ikinci dereceden doğrusalsızlık oluşturabilir. Fiber özü içerisindeki kusurlar ve renk merkezleri belli koşullar altında ikinci harmonik oluşumuna katkı

sağlayabilir. Optik fiberlerdeki üçüncü-harmonik oluşumu, SPM, XPM ve FWM gibi doğrusal olmayan olayların temeli üçüncü-derece elektrik alinganlığı $\chi^{(3)}$ 'dir (Agrawal 2007).

(2.1) denklemini çözmek için birkaç basitleştirici varsayım yapmak gereklidir (Agrawal 2007). ω açısal frekansına bağlı yayılma sabiti $\beta(\omega)$, ω_0 merkez taşıyıcı açısal frekansına göre Taylor serisine açılırsa

$$\beta(\omega) = \beta_0 + (\omega - \omega_0)\beta_1 + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2\beta_2 + \frac{1}{6}(\omega - \omega_0)^3\beta_3 + \dots \quad (2.3)$$

elde edilir. Burada

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.4)$$

olarak tanımlıdır. β_0 , ω_0 açısal frekansındaki yayılma sabiti ve β_1 , $1/v_g$ (v_g grup hızı) olarak tanımlıdır. β_2 grup hızı dispersiyonu (GVD) değişkeni olarak da adlandırılan ikinci derece yayılma sabitidir ve optik fiberli haberleşme sistemlerindeki dispersiyon etkilerinden sorumludur. β_2 'nin işaretine bağlı olarak dispersiyon bölgesi pozitif ($\beta_2 > 0$) ve negatif ($\beta_2 < 0$) dispersiyon bölgesi olmak üzere iki bölgeye ayrılır. Pozitif dispersiyon bölgesinde bir optik işaretin yüksek frekans bileşenleri düşük frekans bileşenlerinden daha yavaş yol alır. Negatif dispersiyon bölgesinde ise bu durumun tersi olur. Fiber dispersiyonu genellikle kromatik dispersiyon değişkeni olarak adlandırılan D_c değişkeni ile ifade edilir. β_2 ile D_c değişkeni arasındaki ilişki

$$D_c = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.5)$$

şeklindedir. Burada λ dalgaboyudur.

Dalganın merkez frekansının, tayf genişliğinden çok daha büyük olduğu tek renkli (monokromatik) dalga varsayımı altında, (2.3) denklemindeki üçüncü ve daha yüksek dereceli terimler genellikle ihmal edilmektedir. Ancak optik işaretin merkez dalgaboyu

sıfır dispersiyon dalgaboyu civarında ise (yani, $\beta_2 \approx 0$) β_3 terimi dahil edilmelidir. Çünkü bu durumda D_c değişkeninin dalgaboyu bağımlılığı önemli olmaktadır. Dispersiyonun dalgaboyuna göre değişim eğrisinin *dispersiyon eğimi* (S)

$$S = \frac{dD_c}{d\lambda} = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right)^2 \beta_3 + \left(\frac{4\pi c}{\lambda^3} \right) \beta_2 \quad (2.6)$$

ifadesi ile verilir ve yüksek dereceli dispersif etkilerden sorumludur. Eğer giriş elektrik alanının +z doğrultusunda hareket ettiği ve x doğrultusunda da kutuplu olduğu varsayılırsa, (2.1) denklemi

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} A(z,t) &= -\frac{\alpha}{2} A(z,t) && \text{(zayıflama)} \\ &+ \beta_1 \frac{\partial}{\partial t} A(z,t) && \text{(grup hızı)} \\ &+ i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z,t) && \text{(ikinci derece dispersiyon} \\ &&& \text{ya da kromatik dispersiyon)} \\ &+ \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} A(z,t) && \text{(üçüncü derece dispersiyon} \\ &&& \text{ya da kromatik dispersiyonun eğimi)} \\ &- i\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t) && \text{(Kerr etkisi)} \\ &+ i\gamma T_R \frac{\partial}{\partial t} |A(z,t)|^2 A(z,t) && \text{(SRS)} \\ &- \frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} |A(z,t)|^2 A(z,t) && \text{(Öz - dikleşme etkisi)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$A(z, t)$: elektrik alanın yavaş değişen zarfı

z : yayılma uzaklığı

t : zaman

α : fiber zayıflama katsayısı

γ : doğrusalsızlık katsayısı ($\gamma = 2\pi n_2 / (\lambda A_{eff})$)

T_R : Raman kazanç eğimi ile bağıntılı olan zaman değişkeni

n_2 : ikinci-dereceden doğrusal olmayan kırılma indisi

λ : çalışma dalgaboyu

A_{eff} : fiberin etkin öz alanı (Gaussiyen dağılımı yaklaşımıyla $A_{eff}=\pi w^2$)

w : fiber mod alan yarıçapı

i : sanal birim

(2.7) denklemi kuantum mekaniğindeki Schrödinger denklemiyle benzer olduğundan genel doğrusal olmayan Schrödinger (NLS) denklemi olarak adlandırılır ve yaklaşık olarak 50 fs genişlikli darbelerin yayılması için uygulanabilir olduğu bilinir. Darbe genişliği T_0 (burada T_0 , $1/e$ yoğunluk noktasındaki yarı genişliktir) 5 ps'den daha büyük olduğu zaman Raman etkisi ve öz-dikleşme etkisi, Kerr etkisine kıyasla ihmal edilebilir. Ayrıca çalışma dalgaboyunun sıfır dispersiyon dalgaboyu civarında olmadığı varsayılırsa β_3 terimi de ihmal edilebilir. Bu durumda denklem

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\beta_1 \frac{\partial}{\partial t} A - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} A - \frac{\alpha}{2} A + i\gamma |A|^2 A \quad (2.8)$$

denklemine indirgenir. Son olarak darbenin grup hızında ilerlemesi referans alınarak $T = t - (z / v_g) = t - \beta_1 z$ dönüşümü yapıp fiber kaybı ihmal edilirse denklem

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} A + i\gamma |A|^2 A \quad (2.9)$$

halini alır. Bu denklem basitleştirilmiş NLS denklemdir. Denklemin sağ tarafındaki ilk terim dalga kılavuzundaki dispersiyonun doğrusal etkilerini gösterirken, denklemin sağındaki ikinci terim darbe üzerindeki doğrusalsızlıkların etkisini ifade eder. Sözü edilen doğrusal olmayan etkilerin matematiksel ifadeleri NLS denkleminde yararlanılarak türetilir.

Optik darbenin fiberin girişindeki genişliği T_0 'a ve tepe gücü P_0 'a bağlı olarak, fiber boyunca dispersif etkilerin mi yoksa doğrusal olmayan etkilerin mi baskın olabileceği dispersiyon uzunluğu L_D ve doğrusalsızlık uzunluğu L_{NL} tanımlanarak bulunabilir. L_D , L_{NL} ve fiber uzunluğu L 'nin birbirlerine olan büyüklük oranlarına göre optik darbeler fiber içerisinde oldukça farklı değişim sergileyebilirler. Bunu değerlendirmek için ilk önce zaman

$$\tau = \frac{T}{T_0} = \frac{t - z/v_g}{T_0} \quad (2.10)$$

gibi giriş darbe genişliği T_0 ile normalize edilir. Bununla beraber normalize genlik B

$$A(z, \tau) = \sqrt{P_0} B(z, \tau) \quad (2.11)$$

şeklinde tanımlanır. Bu ifadelerden

$$\frac{\partial B}{\partial z} = -i \frac{\text{sgn}(\beta_2)}{2L_D} \frac{\partial^2 B}{\partial \tau^2} + \frac{i}{L_{NL}} |B|^2 B \quad (2.12)$$

elde edilir. Burada β_2 'nin işareti $\text{sgn}(\beta_2) = \pm 1$ olarak gösterilebilir. L_D ve L_{NL} ise

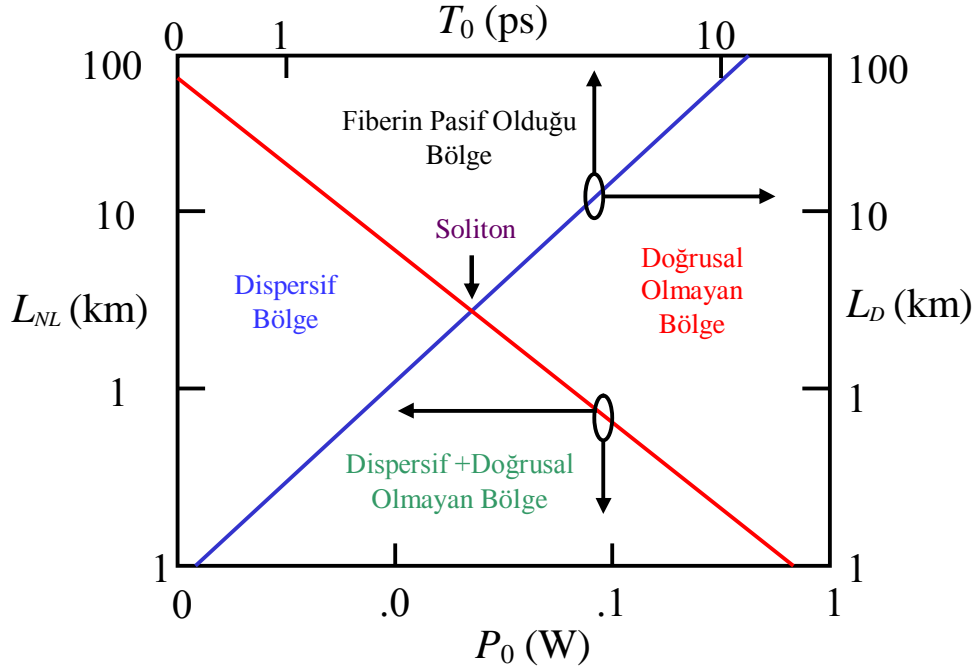
$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (2.13)$$

şeklinde tanımlıdır. Buna göre L , L_D ve L_{NL} 'nin bağıl büyüklüklerine göre yayılmanın dört farklı durumu tanımlanabilir;

- $L \ll L_D$ ve $L \ll L_{NL}$ için ne dispersif ne de doğrusal olmayan etkiler darbe yayılması sırasında önemli bir rol oynamazlar ve darbe fiber boyunca şeklini korur.
- $L \geq L_D$ ve $L \ll L_{NL}$ için optik fiber dispersif bir ortamdır ve doğrusal olmayan etkiler nispeten önemsizdir. Optik darbe fiber içerisinde yol alırken zamanda yayvanlaşır. Ancak tayfı aynı kalır. L_D darbe genişliğinin karesi ile orantılı olduğundan daha dar darbeler için L_D daha küçüktür ve dolayısıyla dispersif etki daha önemli hale gelir.
- $L \ll L_D$ ve $L \geq L_{NL}$ için optik fiber doğrusal olmayan etkilerin önemli olduğu bir ortamdır ve dispersiyon nispeten önemsizdir. Bu durumda öz-faz modülasyonu (SPM) sayesinde darbenin tayfı genişler. Fakat darbenin zaman aralığındaki şekli değişmez. L_{NL} darbenin gücü ile ters orantılı olduğu için yüksek güce sahip dar genişlikli darbelerde bu durum geçerlidir.
- $L \geq L_D$ ve $L \geq L_{NL}$ için hem dispersif hem de doğrusal olmayan etkiler darbe yayılması esnasında önemlidir. Bu durumda iki etkinin birbirini yok ederek soliton

olarak adlandırılan özel darbeleri oluşturma olasılığı vardır. Burada GVD ve SPM etkilerinin etkileşimi, GVD ya da SPM'in tek başlarına oluşturdukları etkilerden beklenen davranışa kıyasla nitelik olarak farklı bir davranışa yol açabilir. Negatif dispersiyon bölgesinde ($\beta_2 < 0$) optik fiber, solitonları destekleyebilir. Pozitif dispersiyon bölgesinde ($\beta_2 > 0$) GVD ve SPM etkileri darbe sıkıştırması için kullanılabilir.

Şekil 2.1'de, 1550 nm'de $\gamma = 1.3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ve $D_c = 21.89 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ olan bir standart tek modlu fiber için dispersiyon ve doğrusalsızlık uzunluklarının sırasıyla darbe genişliği ve darbe tepe gücü ile değişimi gösterilmiştir. Buradaki grafik, sistem değişkenleri ile fiber uzunluğuna bağlı olarak dört bölgeye ayrılmıştır (Schneider 2004).



Şekil 2.1. 1550 nm'de $\gamma = 1.3$ (1/W.km) ve $D_c=21.89$ ps/(km.nm) olan bir standart tek modlu fiber için dispersiyon ve doğrusalsızlık uzunluklarının sırasıyla, darbe genişliği ve darbe tepe gücü ile değişimi.

Dispersiyon bölgesinde NLS denklemi

$$\frac{\partial B}{\partial z} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 B}{\partial T^2} \quad (2.14)$$

şeklinde sadece dispersiyon terimine sahiptir. Burada $B(z,T)$, (2.11) ifadesine göre normalize genliktir.

Giriş optik darbesinin bir Gaussiyen darbesi olduğu düşünülürse, giriş darbesinin normalize genliği

$$B(0,T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right) \quad (2.15)$$

şeklindedir. Pratikte T_0 genişliğinin yerine en büyüğün yarıya düştüğü noktalar arası genişlik (FWHM) kullanılır. Bu durumda Gaussiyen bir darbe için bu iki genişlik arasındaki bağıntı

$$T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2}T_0 \approx 1.665T_0 \quad (2.16)$$

ile verilir. Daha sonra Fourier dönüşümlerinden yararlanılarak (2.14) denklemi çözümlerse, fiberin herhangi z noktasındaki genliği

$$B(z,T) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)^{1/2}} \exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right) \quad (2.17)$$

ile verilir. (2.17)'ye göre Gaussiyen darbe, yayılma esnasında şeklini korurken, T_1 genişliği z yayılma uzaklığı ile

$$T_1(z) = T_0 \left[1 + (z/L_D)^2\right]^{1/2} \quad (2.18)$$

şeklinde artar. (2.18) denklemi Gaussiyen bir darbenin genişliğinin GVD sayesinde fiber boyunca nasıl genişleyeceğini göstermektedir. Bu ifadeden, genişlemenin büyüklüğünün β_2 'nin (ya da D_c 'nin) işaretine bağlı olmadığı ve L_D ile denetlenebileceği görülmektedir. Buna göre verilen bir fiber uzunluğu için kısa darbeler daha kısa bir L_D meydana getireceğinden daha fazla genişlemektedir. Gaussiyen bir darbe $z=L_D$ uzaklığında giriş genişliğinin $\sqrt{2}$ katına genişlemektedir.

İletilen işaretin faz değişimini görmek için (2.17) denklemi fazör şeklinde

$$B(z,T) = |B(z,T)| \exp[i\phi(z,T)]$$

$$= \frac{T_0}{\sqrt[4]{T_0^2 + \beta_2^2 z^2}} \exp\left(-\frac{T^2 T_0^2}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right) \exp\left[i\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\beta_2 z}{T_0^2} - \frac{T^2 \beta_2 z}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}\right)\right] \quad (2.19)$$

şeklinde yazılır. Bu durumda işaretin faz ifadesi $\phi(z,T)$

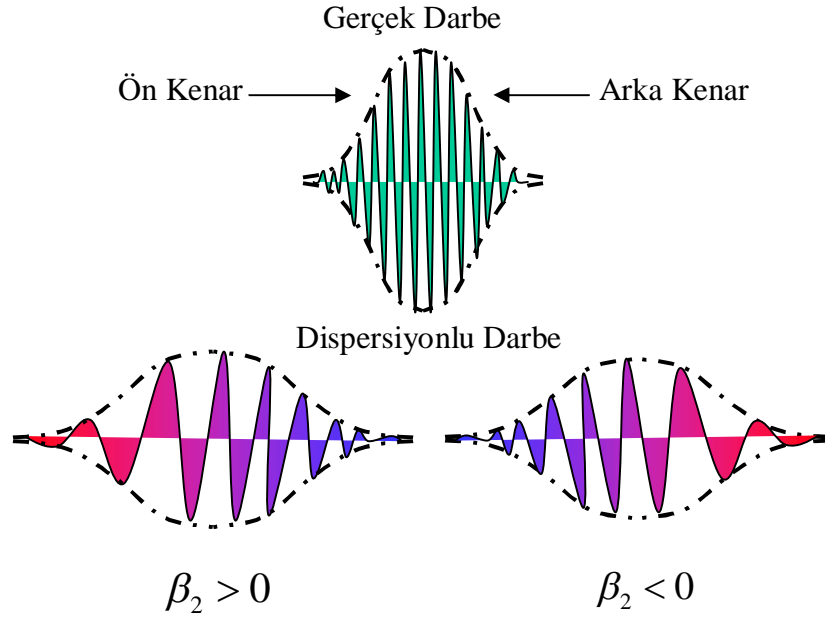
$$\phi(z,T) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2} \right) - \frac{T^2 \beta_2 z}{2(T_0^4 + \beta_2^2 z^2)}$$

$$= \operatorname{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{z}{L_D} \right) - \frac{\operatorname{sgn}(\beta_2)}{2T_0^2} \frac{z}{L_D \left(1 + \left(\frac{z}{L_D} \right)^2 \right)} T^2 \quad (2.20)$$

şeklinindedir. $\phi(z,T)$ 'nin zaman bağımlı oluşu iletilen darbenin anlık frekansının darbe boyunca ω_0 merkez frekansından farklı olacağını gösterir. Yani, fibere giren darbe cıvıltısız (unchirped) olmasına rağmen fiberin çıkışında cıvıltılı olur. Eğer zamana bağıllık $\exp(-i\omega_0 t)$ seçilirse, cıvıltı olarak adlandırılan darbenin anlık frekans farkı

$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial\phi}{\partial T} = \frac{\operatorname{sgn}(\beta_2)}{T_0^2} \frac{z}{L_D \left(1 + \left(\frac{z}{L_D} \right)^2 \right)} T \quad (2.21)$$

ile tanımlanır. Bu durumda fiber dispersiyonu sayesinde darbe üzerinde doğrusal bir frekans cıvıltısı meydana gelir. Cıvıltı β_2 'nin işaretine bağlı olduğundan dolayı pozitif GVD bölgesi için ($\beta_2 > 0$) darbenin ön kenarında ($T < 0$) negatiftir ve darbe boyunca artar. Negatif GVD bölgesi için ise bu durumun tersi olur. Şekil 2.2'de fiberin girişindeki cıvıltısız bir darbenin pozitif ve negatif GVD bölgeleri için fiberin çıkışındaki örüntüleri gösterilmiştir.

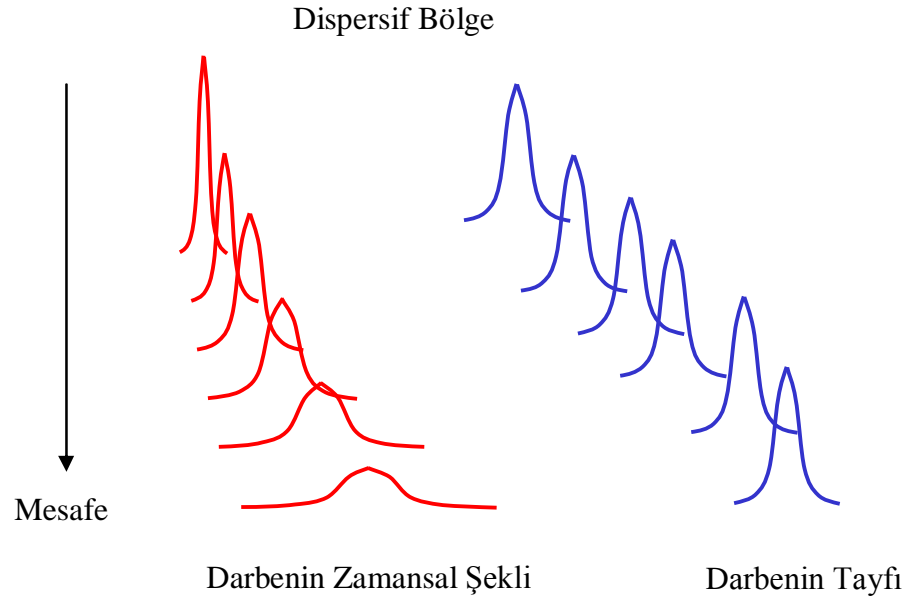


Şekil 2.2. Optik fiberin girişindeki cıvıltısız bir darbenin pozitif ve negatif GVD bölgeleri için optik fiberin çıkışındaki örüntüleri.

Optik darbenin fiberin çıkışındaki tayfı için (2.14) ifadesinin Fourier dönüşümü alınırsa

$$\tilde{B}(z, \omega) = \tilde{B}(0, \omega) \exp\left(\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 z\right) \quad (2.22)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\tilde{B}(0, \omega)$ optik fiberin girişindeki darbenin Fourier dönüşümüdür. Bu ifadeden GVD sayesinde yayılma esnasında yeni frekans bileşenlerinin oluşmayacağı ancak darbenin her bir tayfsal bileşeninin fazının hem frekansa hem de yayılma uzaklığına bağlı olarak değişeceği görülür. Bu faz değişimleri darbenin tayfını değiştirmemesine rağmen darbe şeklini değiştirebilir. Şekil 2.3'te dispersif bölgede bir darbenin fiber boyunca değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Dispersif bölgede darbe şeklinin ve tayfının mesafe ile değişimi.

Doğrusal olmayan bölgede hem $\beta_2 = 0$ olacak şekilde doğrusal etki hem de fiber zayıflaması ihmal edilirse NLS denklemi

$$\frac{\partial B}{\partial z} = i\gamma |B|^2 B \quad \text{veya} \quad \frac{\partial B}{\partial z} = \frac{i}{L_{NL}} |B|^2 B \quad (2.23)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemin çözümü aşağıdaki gibidir.

$$B(z, T) = B(0, T) \exp\left(i\gamma |B(0, T)|^2 z\right) \quad \text{veya} \quad B(z, T) = B(0, T) \exp\left(i \frac{|B(0, T)|^2 z}{L_{NL}}\right) \quad (2.24)$$

Burada $B(0, T)$ darbenin fiberin girişindeki zarfıdır. Bu durumda darbenin faz ifadesi

$$\phi_{NL}(z, T) = |B(0, T)|^2 \left(\frac{z}{L_{NL}} \right) \quad (2.25)$$

şeklinde olur. L uzunluğundaki bir fiber için fiber zayıflamasının hesaba alındığı doğrusal olmayan faz kayması ϕ_{NL}

$$\phi_{NL}(L, T) = |B(0, T)|^2 \left(\frac{L_{eff}}{L_{NL}} \right) \quad (2.26)$$

ile verilir. Burada L_{eff} etkin fiber uzunluğudur ve

$$L_{eff} = \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]}{\alpha} \quad (2.27)$$

şeklinde tanımlıdır. (2.25)'e göre darbenin fazı, yayılma boyunca değişecektir ve ayrıca bu faz değişimi $|B(0, T)|^2$ ile yani optik darbenin P güç yoğunluğu ile doğrudan orantılı olduğundan, fazın zamansal değişimi optik güç yoğunluğunun zamansal değişimi ile benzerdir. Optik darbenin güç yoğunluğunun kendi fazını değiştirmesinden dolayı bu olay öz-faz modülasyonu (SPM) olarak adlandırılır.

Darbe merkezinin $T = 0$ 'da konumlandığı durumda B normalize genliği $|B(0, 0)| = 1$ olacağından $T = 0$ 'da en büyük faz kayması ϕ_{max} oluşacaktır. En büyük faz kayması

$$\phi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \gamma P_0 L_{eff} \quad (2.28)$$

şeklinde elde edilir. SPM'in indüklediği tayf genişlemesi, ϕ_{NL} 'nin zaman bağımlı olmasının sonucudur. Zamanla değişen faz, anlık optik frekansın darbe boyunca merkez ω_0 değerinden farklı olacağını gösterir. Bu zamanla değişen frekans değişimi (frekans cıvıdaması)

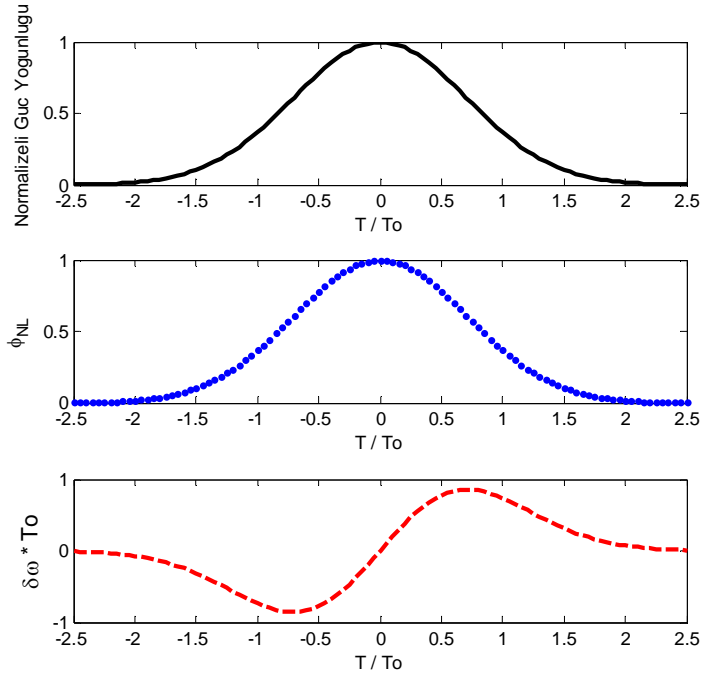
$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial\phi_{NL}}{\partial T} = -\left(\frac{L_{eff}}{L_{NL}} \right) \frac{\partial}{\partial T} |B(0, T)|^2 \quad (2.29)$$

ile verilir. SPM tarafından indüklenen bu cıvıtlı iletim uzaklığı boyunca artar ve bu sayede darbenin yol alması esnasında sürekli olarak yeni frekanslar üretir. Fiberin girişindeki cıvıtsız bir darbe için SPM'in ürettiği bu yeni frekans bileşenleri darbenin ilk tayf genişliğini genişletir.

SPM'in neden olduğu bu frekans cıvıltısı (2.29)'da görüldüğü gibi darbenin şekline bağlıdır. Gaussiyen bir darbe için SPM-indüklü frekans cıvıldaması

$$\delta\omega(T) = \frac{2L_{eff}}{L_{NL}} \frac{T}{T_0^2} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \quad (2.30)$$

ile verilir. Şekil 2.4'te, $L_{eff} = L_{NL}$ olan uzaklıkta Gaussiyen bir darbeye karşı düşen doğrusal olmayan faz kayması ϕ_{NL} 'nin ve indüklenen frekans cıvıldaması $\delta\omega$ 'nin değişimi gösterilmiştir. Buna göre indüklenen cıvıltının zamansal değişimi çeşitli ilginç özelliklere sahiptir. Burada cıvıltı, darbenin ön kenar kısmında negatif iken (yani kırmızıya kayma mevcut), arka kenar kısmında pozitifdir (yani maviye kayma mevcut). Ayrıca cıvıltı darbenin merkez bölgesi civarındaki bölgede yukarı yönde doğrusaldır.



Şekil 2.4. Gaussiyen bir darbe için SPM'in indüklediği faz kayması ϕ_{NL} 'nin ve frekans cıvıldaması $\delta\omega$ 'nin zamansal değişimi (Agrawal, G.P., 2007).

SPM kaynaklı tayf genişlemesinin büyüklüğünün bir öngörüsü Şekil 2.4'te cıvıltının tepe değerinden elde edilebilir. Tepe değeri ayrıca (2.30) denkleminde $\delta\omega(T)$ 'yi maksimize ederek hesaplanabilir. Buna göre tayf genişleme etkeni

$$\delta\omega_{\max} = \sqrt{2} \frac{L_{\text{eff}}}{T_0 L_{\text{NL}}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = 0.8578 \Delta\omega_0 \phi_{\max} \quad (2.31)$$

ile verilir. Burada darbenin ilk tayfsal genişliği $\Delta\omega_0 = T_0^{-1}$ 'dir.

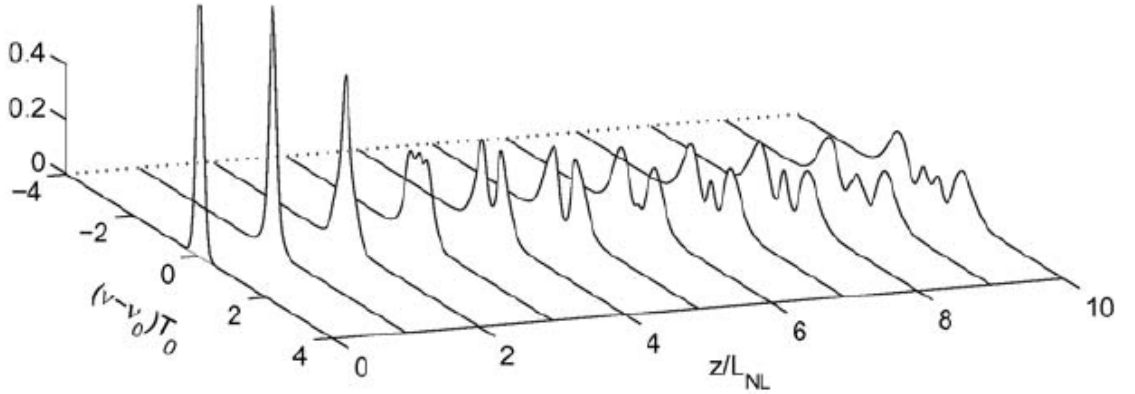
Darbenin gerçek tayfı $S(\omega)$, (2.24) ifadesinin Fourier dönüşümü alınarak bulunur.

Öyleyse $S(\omega) = |\tilde{B}(L, \omega)|^2$ ifadesini kullanarak

$$S(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} B(0, T) \exp[i\phi_{\text{NL}}(L, T) + i(\omega - \omega_0)T] dT \right|^2 \quad (2.32)$$

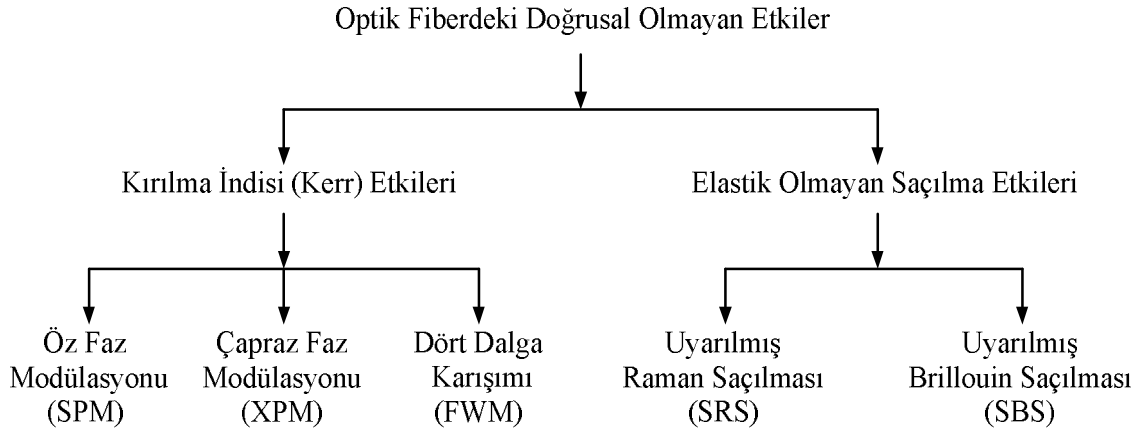
denklemini elde edilir. Bu ifadeye göre tayf hem darbe şekline hem de darbeye empoze edilen ilk civıltıya bağlıdır.

Eğer (2.32) ifadesi girişte civıltısız gausiyen bir darbe için $10L_{\text{NL}}$ uzaklığa kadar sayısal olarak hesaplanırsa Şekil 2.5'teki darbenin tayf değişim grafiği elde edilir.



Şekil 2.5. Fiberin girişinde civıltısız gausiyen bir darbe için tayfının fiber uzaklığı ile değişimi (Agrawal 2007).

Optikte doğrusallık ve doğrusalsızlık terimleri sırasıyla ışık yoğunluğundan bağımsızlık ve ışık yoğunluğuna bağımlılık anlamına gelir. Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler ortamın kırılma indisinin ışık yoğunluğu ile değişmesinden ve elastik olmayan saçılmadan meydana çıkar. Bu etkiler Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler.

Optik Kerr etkisi, kırılma indisinin ışık yoğunluğu ile orantılı olarak değişmesidir. Optik Kerr etkisi göz önüne alındığında, kırılma indisi

$$n(\omega, I) = n_0(\omega) + n_2(\omega)I = n_0(\omega) + n_2(\omega) \left(\frac{P}{A_{eff}} \right) \quad (2.33)$$

ile ifade edilir. Burada $n_0(\omega)$ doğrusal kırılma indisidir ve toplam kırılma indisi $n(\omega, I)$ 'nin doğrusal kısmını oluşturur. Denklemin sağındaki diğer terimler doğrusal olmayan kısmı meydana getirir. I optik yoğunluktur. $n_2(\omega)$ ikinci-dereceden doğrusal olmayan kırılma indisidir ve

$$n_2(\omega) = \frac{3\chi^{(3)}}{4\varepsilon_0 c n_0^2(\omega)} \quad (2.34)$$

ile tanımlıdır. Hem $\chi^{(3)}$ hem de n_0 'ın frekansa bağımlı olmasından dolayı n_2 de frekansa bağımlıdır. Dolayısıyla tam anlamıyla sabit değildir. Optik fiberli haberleşme bölgesinde n_2 'nin standart değeri $2.35 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 'tır.

2.1 Öz-Faz Modülasyonu (SPM)

Daha önce bahsedildiği gibi SPM darbenin kendi yoğunluğundan dolayı tayfını genişletmesi durumudur. Bu tayf genişlemesi malzeme dispersiyonuyla beraber

darbenin zamansal genişliğinde bir değişime yol açar. Bu doğrusal olmayan tayf genişlemesi, fiberin kromatik dispersiyonu sayesinde ya dengelenir ya da değeri daha da büyür.

SPM nedeniyle fiber sonunda oluşan frekans cıvıldaması (2.29) denkleminde yararlanılarak

$$\delta\omega_{SPM} = -\frac{d\phi_{SPM}}{dt} = -\gamma L_{eff} \frac{dP}{dt} \quad (2.35)$$

şeklinde elde edilir. Sadece Kerr doğrusalsızlığının içerildiği ve cıvıldamasız Gauss darbesinin kullanıldığı NLS denkleminin çözümünden, SPM ve kromatik dispersiyon kaynaklı darbe genişleme etkeni

$$\frac{\sigma_{SPM}}{\sigma_0} = \left[1 + \frac{\sqrt{2}L_{eff}L\beta_2}{2L_{NL}\sigma_0^2} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{L_{eff}^2}{L_{NL}^2} \right) \frac{L^2\beta_2^2}{4\sigma_0^4} \right]^{1/2} \quad (2.36)$$

ile verilir (Chomycz 2009). Burada σ_{SPM} , L konumundaki Gauss darbesi şeklindeki işaretin RMS darbe genişliği, σ_0 fiberin başlangıcındaki ($L = 0$) Gauss darbesi şeklindeki işaretin RMS darbe genişliği, σ_{SPM}/σ_0 SPM'den kaynaklanan darbe genişleme etkenidir.

Gauss darbelerinde optik darbe gücünün en az % 95'ini zaman dilimine yerleştirmek için iletim hızı R ile σ_0 arasındaki ilişki

$$\sigma_0 = \frac{1}{4R} \quad (2.37)$$

şeklinde olmalıdır. Bir darbenin L konumundaki genişliği σ_{SPM} fiberin girişindeki genişliğinden farklıdır. Bu yüzden darbe enerjisi zaman diliminin dışına genişler ve bir miktar optik güç cezası oluşur. SPM genişleme etkeni σ_{SPM}/σ_0 'dan dolayı oluşan bu güç cezasının dB cinsinden değeri

$$\delta_{SPM} \approx 10 \log \left\{ \frac{\sigma_{SPM}}{\sigma_0} \right\} \quad (2.38)$$

ile elde edilir. Fiberin girişine gönderilebilecek en büyük güç (P_{\max}) için (2.28)'de verilen en büyük darbe faz kaymasının 1 radyandan daha az olması gerekliliği düşünülürse sınırlayıcı koşul

$$P_{\max} < \frac{1}{\gamma L_{eff}} \quad (2.39)$$

$$P_{\max} < \frac{\alpha \lambda A_{eff}}{2\pi n_2 [1 - \exp(-\alpha L)]} \quad (2.40)$$

denklemleriyle verilir (Chomycz 2009).

2.2 Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)

XPM de SPM'ye benzer bir etkiye sahiptir. Fakat XPM durumunda bir yerine en az iki adet optik dalgaya ihtiyaç vardır. XPM'de, dalgalardan birinin yoğunluk modülasyonu diğerinde faz modülasyonu meydana getirir. Yani XPM, WDM tekniği kullanılmasıyla bir optik fiber içerisinde iki ya da daha fazla kanalın eş zamanlı iletiminde oluşur. Bu tür sistemlerde bir kanalın doğrusal olmayan faz kayması sadece ilgili kanalın gücüne bağlı olmayıp aynı zamanda diğer kanalların gücüne de bağlıdır.

Modern WDM sistemleri farklı taşıyıcı dalga boylarında çok sayıda kanaldan oluşur. Eğer sadece SPM ve XPM etkisi düşünüldüğünde M adet WDM kanalı arasındaki etkileşimin matematiksel modeli için M adet diferansiyel denklem

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \underbrace{\beta_{11} \frac{\partial A_1}{\partial t}}_{\text{Grup Hızı Etkisi}} + i \underbrace{\frac{\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Etkisi}} - \underbrace{\frac{\beta_{31}}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Eğimi}} + \underbrace{\frac{\alpha_1}{2} A_1}_{\text{Zayıflama}} = i \gamma_1 \left(\underbrace{|A_1|^2}_{\text{SPM}} + 2 \underbrace{\sum_{m=2}^M |A_m|^2}_{\text{XPM}} \right) A_1$$

⋮

(2.41)

$$\frac{\partial A_M}{\partial z} + \underbrace{\beta_{1M} \frac{\partial A_M}{\partial t}}_{\text{Grup Hızı Etkisi}} + i \underbrace{\frac{\beta_{2M}}{2} \frac{\partial^2 A_M}{\partial t^2}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Etkisi}} - \underbrace{\frac{\beta_{3M}}{6} \frac{\partial^3 A_M}{\partial t^3}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Eğimi}} + \underbrace{\frac{\alpha_M}{2} A_M}_{\text{Zayıflama}} = i \gamma_M \left(\underbrace{|A_M|^2}_{\text{SPM}} + 2 \underbrace{\sum_{m=1}^{M-1} |A_m|^2}_{\text{XPM}} \right) A_M$$

ile verilir. Bu durumda, eğer tüm kanallar zamansal olarak çakışılırsa M kanallı bir WDM sisteminde j . kanal için toplam kırılma indisi n_{top} , (2.42) ile verilir.

$$n_{top,j} = n_{0,j} + n_{2,j} I_j + 2 \sum_{m \neq j} n_{2,m} I_m \quad (2.42)$$

Fiber içerisinde etkileşen bütün optik ışınlar aynı kutuplanma durumuna sahip ise j . kanalın faz kayması

$$\phi_{NL,j} = \bar{\gamma} L_{eff} \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right) \quad (2.43)$$

ile verilir (Agrawal 2007). Burada $\bar{\gamma}$ ortalama doğrusalsızlık katsayısı ve

$$\bar{\gamma} = \frac{2\pi n_2}{\bar{\lambda} A_{eff}} \quad (2.44)$$

ile tanımlanır. $\bar{\lambda}$ ortalama dalgaboyudur.

(2.43) eşitliğinin sağ tarafındaki $\bar{\gamma} L_{eff} P_j$ ifadesi SPM etkisini, $2\bar{\gamma} L_{eff} \sum_{m \neq j} P_m$ ifadesi de

XPM etkisini tanımlar. Buna göre, j . kanalın XPM'den dolayı oluşan frekans cıvıldaması

$$\delta\omega_{XPM,j} = -2\bar{\gamma}L_{eff} \frac{d\left(\sum_{m \neq j} P_m\right)}{dt} \quad (2.45)$$

şeklinde olur. Eğer bütün kanal güçlerinin P 'ye eşit ve fiberin sıfır dispersiyona sahip olduğu düşünülürse j . kanalın toplam doğrusal olmayan faz kayması

$$\phi_{NL,j} = \bar{\gamma}PL_{eff}(2M-1) \quad (2.46)$$

ile ifade edilir. j . kanalın fiberin girişine gönderilebileceği en büyük güç (P_{max}) için yine darbedeki en büyük faz kaymasının 1 radyandan daha az olması gerektiği düşünülürse sınırlayıcı koşul (Hiçdurmaz ve ark. 2010)

$$P_{max,j} < \frac{\alpha}{\bar{\gamma}[1 - \exp(-\alpha L)](2M-1)} \quad (2.47)$$

şeklinde olacaktır. (2.47)'de bütün kanal güçlerinin eşit olduğu, fiberin sıfır dispersiyona sahip olduğu, farklı kanallardan çıkan optik darbelerin aynı hızlarda ilerledikleri ve uzaklaşma (walk-off) etkisinin olmadığı en kötü senaryo göz önüne alınmıştır. Ancak kromatik dispersiyondan dolayı optik darbeler arasındaki doğrusal olmayan etkileşim hızlı yol alan darbe, yavaş yol alan darbeyi geçtikten sonra sona ermektedir. Bu özellik uzaklaşma değişkeni d_{jk} ile ifade edilir ve

$$d_{jk} = v_g^{-1}(\lambda_j) - v_g^{-1}(\lambda_k) \quad (2.48)$$

ile tanımlanır. Burada λ_j ve λ_k sırasıyla, j . ve k . darbelerin merkez dalgaboylarıdır. $v_g(\lambda_j)$ ve $v_g(\lambda_k)$ ise sırasıyla, λ_j ve λ_k dalgaboylarındaki darbelerin grup hızlarıdır. Yüksek derece dispersiyon etkilerinin ihmal edildiği doğrusal bir yaklaşım kullanılarak $d_{jk} = D_c \Delta\lambda_{jk}$ şeklinde ifade edilebilir. Burada $\Delta\lambda_{jk}$ ise λ_j ve λ_k dalgaboyları arasındaki boşluktur. XPM etkisini değerlendirmek için T_0 genişlikli bozucu darbelerin uzaklaşma ya da etkileşim uzunluğu L_W

$$L_w = \frac{T_0}{|d_{jk}|} \quad (2.49)$$

ile tanımlanır. Buradan en küçük dispersiyon durumunda, darbeler arasındaki uzaklaşma değişkeninin çok düşük olduğu ve dolayısıyla etkileşim uzunluğunun büyük ve XPM etkisinin daha güçlü olduğu söylenebilir.

2.3 Dört Dalga Karışımı (FWM)

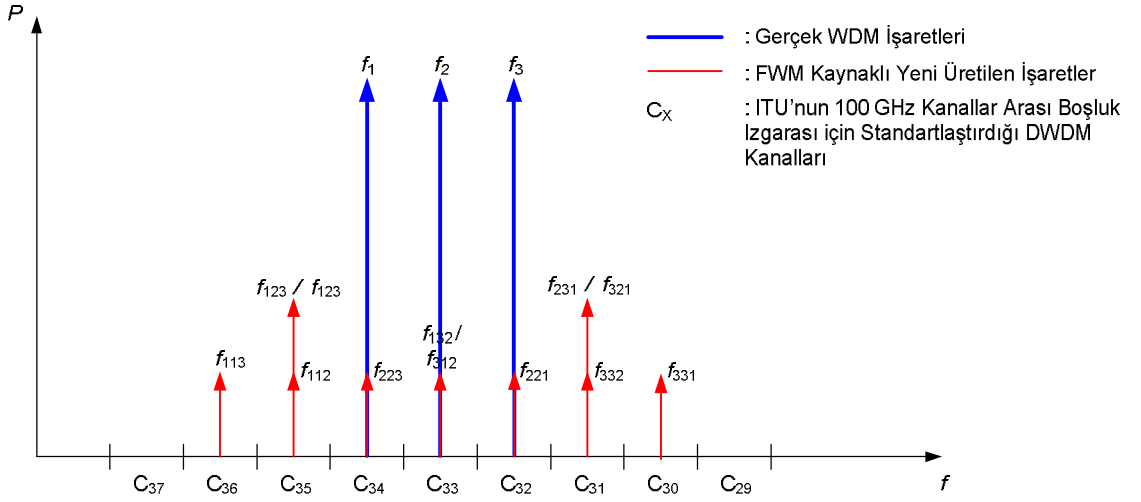
FWM, dört dalganın (veya fotonun) malzemenin üçüncü derece doğrusalsızlığı $\chi^{(3)}$ 'den dolayı birbirleriyle etkileşime girdiği bir optik doğrusal olmayan etkidir. Bu etki ile yayılma esnasında gerçek işaret frekanslarının toplam ve farkı şeklinde frekanslara sahip yeni işaretler üretilir. FWM komşu kanallarda gürültüye sebep olarak sistem performansını azaltır. FWM etkisi DWDM sistemlerin kanal kapasitesini sınırlayan en ciddi doğrusal olmayan etkilerden biridir.

Optik fiber içerisinde f_i, f_j ve f_k frekanslı üç optik işaret yol aldığında bu işaretler fiberin $\chi^{(3)}$ alınganlığı nedeniyle etkileşebilir ve FWM işlemi ile frekansları

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (2.50)$$

ile verilen yeni işaretler üretilebilir. Yeni üretilen dalgaların etkin bir şekilde oluşması bu üç optik işaretin aralarındaki faz uyumuna son derece bağlıdır. Bu yüzden DSF kullanan WDM sistemlerinde FWM önemli bir doğrusal olmayan etkidir.

Eğer gerçek işaretler eşit frekans boşluklarına sahipse yeni üretilen işaretler de aynı frekans boşluklarına sahip olacaklardır. Aynı zamanda bu yeni üretilen işaretlerin büyük bir kısmı bu gerçek işaretlerin üzerine tam olarak düşecektir. Şekil 2.7'de kanallar arası boşluğun 100 GHz olduğu üç kanallı bir DWDM sistemi için FWM kaynaklı yeni oluşan işaretler gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kanallar arası boşlukların eşit olduğu üç DWDM kanalı için optik fiberde meydana gelen FWM bileşenleri.

Oluşan FWM bileşenlerinin sayısı WDM kanal sayısına bağlıdır. M adet WDM kanalı için FWM sebebiyle oluşan yeni işaretlerin sayısı (Goebel ve Hanik 2008)

$$N = \frac{(M^3 - M^2)}{2} \quad (2.51)$$

ile verilir. Eğer yeni üretilen işaretlerin güçleri yeteri kadar güçlü olursa FWM nedeniyle hem birbirleriyle hem de gerçek işaretlerle yeniden etkileşebilirler ve yüksek derece FWM bileşenleri oluşturabilirler (Song, S, 2000).

FWM kaynaklı bileşenlerin etkin bir şekilde oluşumu WDM işaretleri arasındaki faz uyumuna son derece bağlıdır. Dispersif bir malzemede işaretler arasındaki frekans boşluğu ne kadar büyük olursa işaretler arasındaki kırılma indis farkı o denli büyük olur. Dolayısı ile kanallar arası faz uyumsuzluğu daha büyük olur. Böylece FWM'in etkinliği azalır. Sonuç olarak, dispersif fiberlerde sadece komşu kanallar etkin FWM bileşenleri meydana getirir ve optik işaret gürültü oranını (OSNR) azaltır.

FWM oluşumu için gerekli faz uyum koşulu

$$\Delta\beta = \beta_{ijk} + \beta_k - \beta_i - \beta_j \quad (2.52)$$

ile verilir (Shibata, 1987). Burada $\Delta\beta$ yayılma sabitleri farkıdır ve faz uyumsuzluk değişkeni olarak adlandırılır. $\Delta\beta = 0$ ise işaretlerin fazları uyumludur. İşaretler arasındaki faz uyumunu ne kadar uzunluktaki bir fiberin sağlayabildiğini belirlemek için faz uyum uzunluğu

$$L_{coh} = \frac{\pi}{|\Delta\beta|} \quad (2.53)$$

ile tanımlanır. Eğer fiber uzunluğu $L \leq L_{coh}$ ise önemli derecede FWM oluşabilir.

FWM etkisini azaltacak yöntemlerden birisi, standart tek-modlu fiber (SSMF-ITU-T G.652) gibi 1550 nm dalgaboyunda yüksek kromatik dispersiyon katsayısına sahip fiber kullanmaktır. SSMF'in tipik kromatik dispersiyon katsayısı 1550 nm dalgaboyunda 17 ps/nm.km'dir ve FWM oluşumunu önemli derecede azaltmaktadır. Bu değerden daha düşük kromatik dispersiyon değerlerine sahip dispersiyonu sıfır olmayan (NZ-DSF- ITU-T G.655) gibi fiberler bile FWM etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu fiber, özellikle iletim uzaklığını attırmak fakat FWM etkilerini yeteri kadar azaltmak için düşük kromatik dispersiyon değerli olarak tasarlanır. Bu fiber tiplerini kullanmak FWM etkilerini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Ancak bu etkileri tam olarak yok edememektedir. Çizelge 2.1'de fiber kromatik dispersiyonunun FWM'i nasıl etkilediği gösterilmiştir. Buna göre, dispersiyonu kaydırılmış fiber (DSF-ITU-T G.653) orta güçteki işaretler için bile yüksek FWM etkileri sergilemektedir. Bu fiberin sıfır dispersiyon dalgaboyu 1550 nm'dir ve bu yüzden bu dalgaboyundaki ya da civarındaki işaretler için yüksek FWM etkisi sergilenir. FWM'in sıfır dispersiyon dalgaboyu ile ilgili olduğu bilinmeden önce DSF'ler bazı hatlarda kullanılmaktaydı.

Bu etkiyi azaltacak diğer bir yöntem, fiberdeki işaret gücünü düşürmek ya da işaret güç yoğunluğunu azaltacak daha büyük kesit alanlı fiber kullanmaktır. Çizelge 2.1'de üç kanallı, kanallar arası boşlukların eşit olduğu, farklı fiber tiplerine sahip ve değişik kanal boşluklu DWDM sistemlerinde FWM çapraz karışımından kaçınmak için öngörülen en büyük giriş işaret güçleri gösterilmiştir. Çizelge 2.1'de, 0.21 dB/km'lik zayıflama, $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, bütün işaretlerin aynı kutuplanmaya sahip oldukları

(en kötü durum), optik yükselticilerin olmadığı ve en küçük karşılanabilir FWM çapraz karışımının 25 dB olduğu 100 km'lik bir hat ile iletim olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 2.1. 3-kanallı bir sistemde 25 dB'lik bir FWM çapraz karışımı elde etmek için fibere gönderilecek en büyük işaret giriş gücü (Chomycz 2009)

Fiber Tipi	SSMF G.652			NZ-DSF G.655			DSF G.653		
	$D_c = 18 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$			$D_c = 4 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ $A_{eff} = 72 \mu\text{m}^2$			$D_c = 0 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ $A_{eff} = 50 \mu\text{m}^2$		
DWDM Kanal Boşluğu (GHz)	100	50	25	100	50	25	200	100	50
İşaret Gücü (dBm/kanal)	17	11	5	13	8	2	3	-3	-4

FWM etkisini azaltacak üçüncü bir yöntem işaret kanalları arasındaki boşlukları düzgün olmayan bir biçimde ayarlamaktır. İşaretler eşit olmayan düzende yerleştirildikleri zaman bu etkileşimden bir derece kaçınılabılır. Örneğin, kanallar arası boşlukların eşit olmadığı üç DWDM işaret kanalı $\lambda_1 = 1549.32 \text{ nm}$ ($f_1 = 193.5 \text{ THz}$ -kanal 35), $\lambda_2 = 1550.92 \text{ nm}$ ($f_2 = 193.2 \text{ THz}$ -kanal 33) ve $\lambda_3 = 1551.72 \text{ nm}$ ($f_3 = 193.1 \text{ THz}$ -kanal 32)'de yerleştirilirse aşağıdaki dokuz parazit yapıcı FWM dalgaboyları üretilebilir ve bunlar hiçbirisi işaret kanallarının üzerine düşmeyecektir.

$$\lambda_{113} = 1546.92 \text{ nm} (f_{113} = 193.8 \text{ THz}) \quad 38. \text{ kanal}$$

$$\lambda_{112} = 1547.72 \text{ nm} (f_{112} = 193.7 \text{ THz}) \quad 37. \text{ kanal}$$

$$\lambda_{123} = 1548.52 \text{ nm} (f_{123} = 193.6 \text{ THz}) \quad 36. \text{ kanal}$$

$$\lambda_{312} = 1550.12 \text{ nm} (f_{312} = 193.4 \text{ THz}) \quad 34. \text{ kanal}$$

$$\lambda_{223} = 1550.12 \text{ nm} (f_{223} = 193.4 \text{ THz}) \quad 34. \text{ kanal}$$

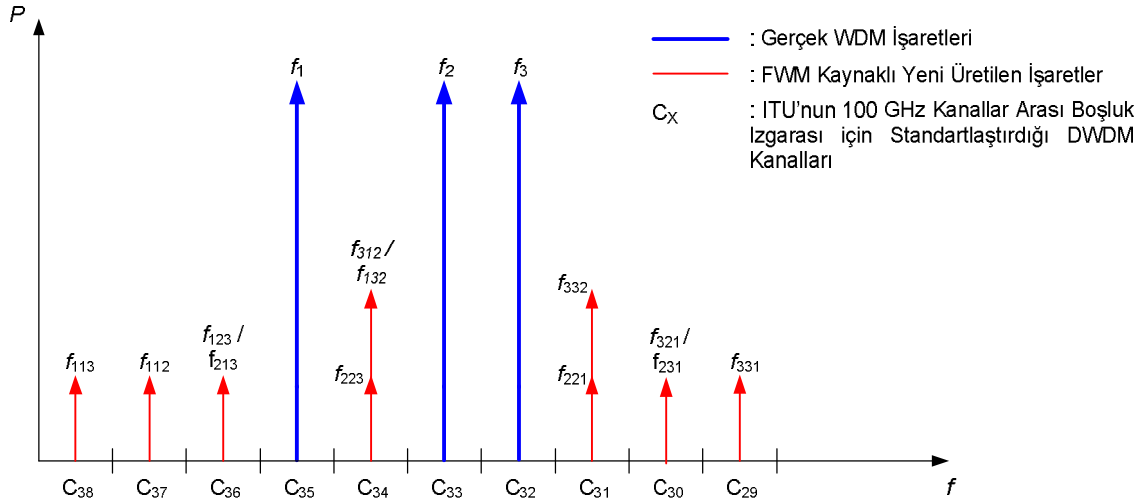
$$\lambda_{332} = 1552.52 \text{ nm} (f_{332} = 193.1 \text{ THz}) \quad 31. \text{ kanal}$$

$$\lambda_{221} = 1552.52 \text{ nm} (f_{221} = 193.1 \text{ THz}) \quad 31. \text{ kanal}$$

$$\lambda_{321} = 1553.32 \text{ nm} (f_{321} = 193 \text{ THz}) \quad 30. \text{ kanal}$$

$$\lambda_{331} = 1554.12 \text{ nm} (f_{331} = 192.8 \text{ THz}) \quad 29. \text{ kanal}$$

Bu yönteme ait kanal frekans tahsisi ve oluşan FWM bileşenleri Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Ancak kanallar arası boşlukların yoğun şekilde dar olduğu modern DWDM sistemlerinde bu yöntem etkisizdir. Çünkü kanal boşlukları israf edilmektedir.



Şekil 2.8. Kanallar arası boşlukların eşit olmadığı üç DWDM kanalı için optik fiberde meydana gelen FWM bileşenleri.

FWM etkilerini azaltacak dördüncü bir yöntem geniş kanallar arası boşluklu DWDM sistemler kullanmaktır. FWM etkisinin büyüklüğü kanallar arası boşluğa bağlıdır. Kanallar arası boşluk ne kadar geniş olursa üretilen FWM bileşenleri o denli zayıf olur. Kanallar arası boşlukların 2500 GHz (~ 20 nm) olduğu *kaba WDM (CWDM)* sistemlerinde bu etkiden söz etmek pek mümkün değildir.

FWM etkilerini azaltmaya yardımcı diğer yöntem, yüksek kutuplanma mod dispersiyon (PMD) değerine sahip fiber kullanmaktır. Pachnicke ve arkadaşları (Pachnicke ve ark. 2006) NZ-DSF ve DSF gibi düşük kromatik dispersiyonlu fiberlerde hat PMD’sini arttırmanın FWM etkisini azaltacağını göstermiştir. Fakat aşırı hat PMD’sinin işaretin elde edilebilirliğini azaltabilmesi ve BER’i arttırabilmesi dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Hansryd ve arkadaşları (Hansryd ve ark. 2000) kutuplanma-çoğullamalı DWDM kanalları kullanmanın FWM etkisini ve çapraz karışımı azaltabildiğini göstermişlerdir. Bu, her bir kanalın kutuplanma konumunun komşu kanalın kutuplanması ile dik olacak

şekilde DWDM kanallarını kutuplamayı gerektirmektedir. Bu teknik sayesinde FWM etkisini 4 kat bastırmak mümkün olabilmektedir.

FWM bileşeni güçleri fiberdeki bütün WDM işaret dalgaboyları için NLS dalga denklemlerinin çözülmesiyle doğru bir şekilde belirlenebilir. FWM'i öngörmek için kullanılan en bilinen formül Hill ve arkadaşları (Hill ve ark. 1978) tarafından türetilmiş, daha sonra ise Shibata ve arkadaşları tarafından FWM'in faz uyum bağımlılığı etkisi dahil edilerek yeniden formülize edilmiştir. Hat içi yükselticilerin olmadığı bir sistem için elde edilen bu formül

$$P_{ijk}(L) = \frac{1024\pi^6}{n_0^4 \lambda_{ijk}^2 c^2} \left(d \chi_{1111}^{(3)} \frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_i(0) P_j(0) P_k(0) \exp(-\alpha L) \eta_{ijk} \quad (2.54)$$

şeklinde verilmiştir. Burada $P_i(0)$, $P_j(0)$ ve $P_k(0)$ sırasıyla f_i , f_j ve f_k frekanslarındaki işaretler için optik fibere giriş güçleridir. λ_{ijk} FWM işleminden üretilen f_{ijk} frekanslı işaretin dalgaboyu ve $\chi_{1111}^{(3)}$ üçüncü derece elektrik alınganlığı $\chi^{(3)}$ 'ün bir skaler bileşenidir. Bozulmuşluk etkeni d , bozulmuş FWM ($f_i = f_j \neq f_k$) ve bozulmamış FWM ($f_i \neq f_j \neq f_k$) için sırasıyla 3 ve 6'dır. η_{ijk} FWM'in etkinliğidir ve

$$\eta_{ijk} = \frac{P_{ijk}(L, \Delta\beta_{ijk})}{P_{ijk}(L, \Delta\beta_{ijk} = 0)} = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 + \Delta\beta_{ijk}^2)} \left(1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2 \left(\Delta\beta_{ijk} \frac{L}{2} \right)}{(1 - \exp(-\alpha L))^2} \right) \quad (2.55)$$

ile ifade edilir. Bu ifadedeki $\Delta\beta_{ijk}$ doğrusal faz uyumsuzluk etkeni olup fiberin kromatik dispersiyonuna ve kanallar arası boşluğa bağlıdır ve

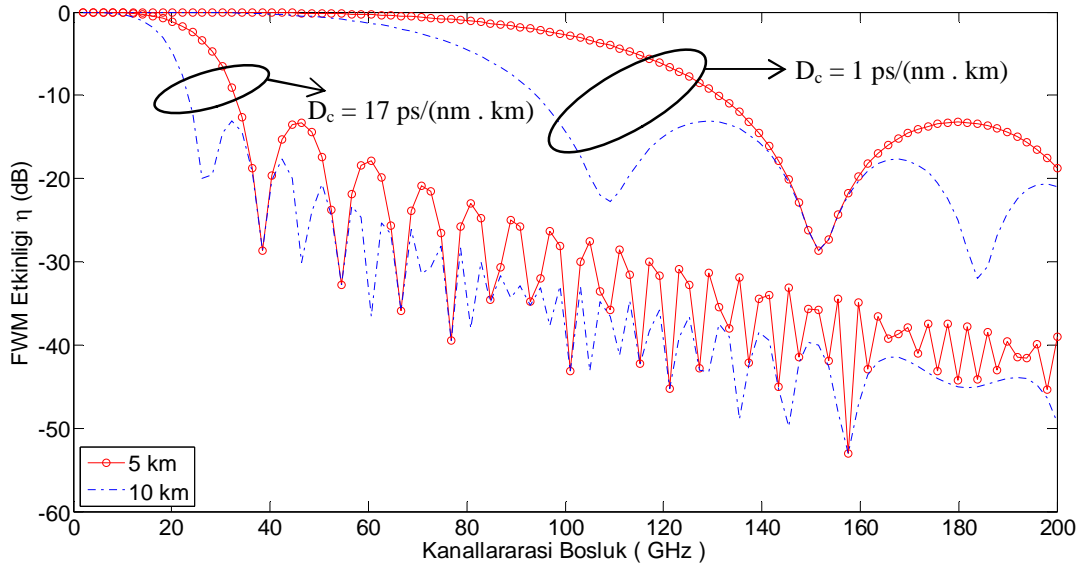
$$\Delta\beta_{ijk} = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \left(D_c + \frac{dD_c(\lambda_k)}{d\lambda} \frac{\lambda_k^2}{2c} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right) \quad (2.56)$$

ile ifade edilir. Burada, $dD_c(\lambda_k) / d\lambda$ kromatik dispersiyon eğimi ve λ_k ise f_k frekansındaki dalgaya karşılık gelen dalgaboyudur.

Song ve arkadaşları faz uyumsuzluk etkeninin ışığın yoğunluğuna da bağlı olduğunu göstermişler ve faz uyumsuzluk etkeninin doğrusal olmayan sürümünü üretmişlerdir (Song ve ark. 1999). Türetilen bu faz uyumsuzluk etkeni

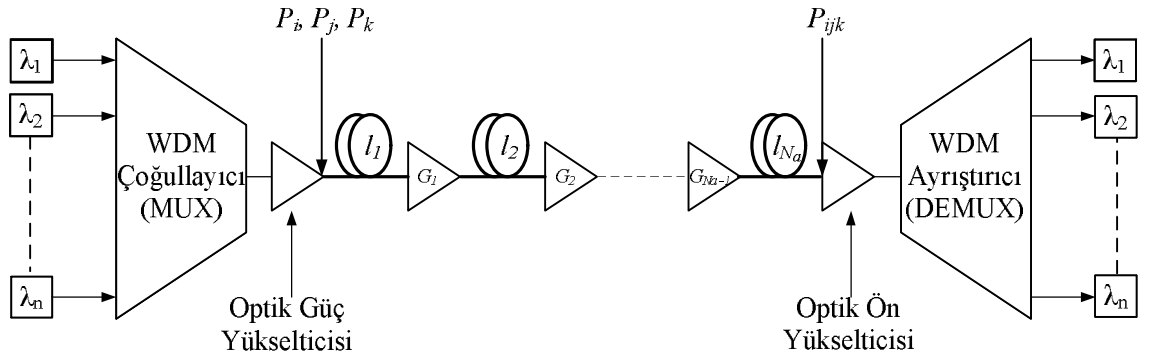
$$\Delta\beta_{ijk_NL} = \Delta\beta_{ijk} - \gamma(P_i + P_j - P_k) \left[\frac{1 - \exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}} \right] \quad (2.57)$$

ile verilir. Şekil 2.9'da, 1550 nm'de zayıflamanın 0.2 dB/km olduğu sırasıyla 5 km ve 10 km'lik bir fiberde farklı fiber dispersiyon katsayıları için, FWM etkinliğinin kanallar arası boşlukla değişimi gösterilmiştir. Burada, fiberin dispersiyon katsayısı artarken ya da kanallar arası boşluk artarken FWM etkinliğinin azaldığı, dolayısıyla da FWM bileşeni gücünün azaldığı belirgin şekilde görülmektedir. Ayrıca burada, fiberin işareti zayıflatma etkisinden dolayı daha kısa fiberdeki FWM etkisinin daha uzun fiberdeki FWM etkisine nispeten daha büyük olduğu açıktır.



Şekil 2.9. Farklı uzunluk ve kromatik dispersiyon değerlerine sahip fiberler için FWM etkinliğinin kanallar arası boşluk ile değişimi.

Eğer fiber hattında optik yükselticiler kullanılırsa (Şekil 2.10), N_a yükseltici aralıkları sayısı ve l_i aralık uzunlukları ($i = 1, 2, \dots, N_a$) olmak üzere FWM bileşeni gücü öngörülebilir.



Şekil 2.10. FWM’i öngörecek hat-içi optik yükselticilere sahip bir fiber hattı.

Eğer bütün işaretlerin aynı kutuplanmada oldukları FWM bileşenlerinin güçlerinin işaret güçlerinden çok daha az oldukları, fiber hattının N_a sayıda aralığa sahip olduğu, son aralık haricinde bir önceki aralık kaybını tam olarak dengeleyecek kazanç (G) sahip bir optik yükseltici ile her bir aralığın sonlandığı, bütün aralıkların aynı l_o uzunluğuna sahip oldukları ve her bir aralığa aynı fiber özelliklerinin uygulandığı varsayılırsa bu durumda FWM bileşenlerinin güçleri

$$P_{ijk}(L) = P_{ijk}(L) \left(\frac{l_{eff}}{L_{eff}} \right)^2 \frac{\exp(-\alpha l_o)}{\exp(-\alpha L)} N_a^2 \frac{\eta_{ijk}}{\eta_{ijk}} \quad (2.58)$$

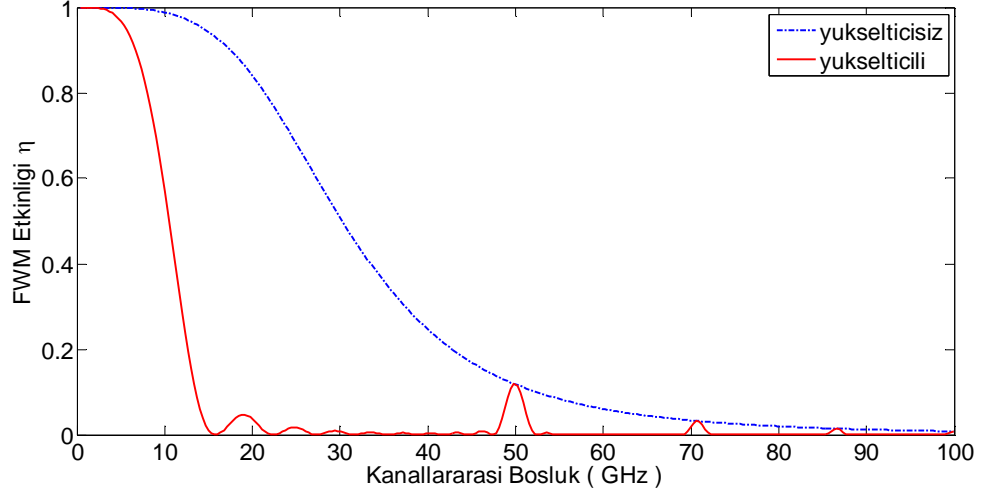
ile verilir. l_{eff} her bir aralığın etkin uzunluğudur. η_{ijk} , yükselticili bir hat için FWM etkinliğidir ve

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{N_a^2 (\alpha^2 + \Delta\beta_{ijk}^2)} \left[1 + \frac{4 \exp(-\alpha l_o) \sin^2(\Delta\beta_{ijk} l_o / 2)}{(1 - \exp(-\alpha l_o))^2} \right] \times \left[\frac{\sin^2(N_a \Delta\beta_{ijk} l_o / 2)}{\sin^2(\Delta\beta_{ijk} l_o / 2)} \right] \quad (2.59)$$

ile verilir. Bu denklemlerde faz uyum etkeninin doğrusal olduğu yani ışığın yoğunluğuna bağlı olmadığı varsayılmıştır.

Şekil 2.11’de yükselticisiz hat için FWM etkinliği η_{ijk} ’nin kanallar arası boşlukla değişimi ile yükselticili hat için FWM etkinliği η_{ijk} ’nin kanallar arası boşlukla değişiminin kıyaslaması yapılmıştır. Yükselticisiz hat için L 500 km’dir. Yükselticili hat ise 10 adet 50 km’lik aralıktan oluşmaktadır ($N_a = 10$) ve yine toplam fiber uzunluğu

500 km'dir. Her iki durumda da α 0.2 dB/km, D_c 1 ps/(nm.km), A_{eff} 50 μm^2 ve işaret dalgaboyu 1550 nm'dir.



Şekil 2.11. Yükselticili ve yükselticisiz optik fiber hattı için FWM etkinliklerinin kanallar arası boşlukla değişimi (Inoue 1992).

Bir kanalda üretilen toplam FWM çapraz karışım gücü bu kanalda üretilen bütün FWM bileşeni güçlerinin toplamına eşittir. Kanallar arası boşlukların eşit olduğu bir WDM sisteminde, sistemdeki belirli bir f_m frekanslı kanaldaki kanal işaretlerinin çeşitli kombinasyonlarından üretilen FWM dalgalarının toplam gücü

$$P_{tot}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P(f_i + f_j - f_k) \quad (2.60)$$

ile ifade edilir (Maeda ve ark. 1990).

2.4 Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS)

Optik fiberdeki elastik olmayan saçılmalardan birisi olan SBS, optik dalgalarla akustik dalgaların fiber içerisinde etkileşiminden kaynaklanır. SBS'de optik fiber içerisinde bir yönde yol alan güçlü optik dalga, kendisine zıt yönde yol alan kendisinden daha düşük frekanstaki ışık dalgasına dar bantta (100 MHz'den daha düşük) kazanç sağlayabilmektedir. Yani SBS sadece geri yönde meydana gelmektedir. Eğer güçlü

dalga SBS işlemi için gerekli eşik güç değerini bir kez aştı mı kendisinden ters doğrultuda saçılan ışığın şiddeti eksponensiyel olarak büyümektedir. Bu durumda dalganın gücünde azalma olur. SBS işlemi için gerekli eşik gücü tükenmesiz pompa yaklaşımında, saçılan gücün giriş gücü kadar büyük olması için gerekli güç olarak tanımlanmaktadır (Forghieri ve ark. 1997). Bu tanıma göre SBS eşik gücü P_B^{th}

$$P_B^{th} \sim \frac{1}{g_B} \left(1 + \frac{\Delta v_s}{\Delta v_B} \right) \quad (2.61)$$

ile orantılıdır. Burada g_B Brillouin kazanç katsayısı, Δv_s kaynağın çizgi genişliği ve Δv_B Brillouin çizgi genişliğidir.

(2.65)'e göre kaynağın çizgi genişliği Brillouin çizgi genişliğine göre daha fazla artarsa SBS eşik gücünün de artacağı anlaşılmaktadır. 1550 nm dalgaboyunda çalışan optik fiberler için tipik Brillouin genişliği 20 MHz'dir.

SBS'nin nispeten dar bant kazanç tayfı WDM sistemlerinde kanallar arası etkileşimi engellemektedir. SBS kanal sayısından da bağımsızdır. SBS'nin oluşmaması için gerekli koşul sadece her bir kanal işaretin gücünün eşik gücünden daha az olmasıdır. SBS'nin bir diğer önemli özelliği diğer doğrusal olmayan etkilere göre fazla sorun teşkil etmemesidir. SBS nispeten düşük eşik gücü seviyelerinde oluşabilmesine rağmen (Agrawal 2010), optik yükselticilere sahip uzun mesafe iletiminde de sorun olmamaktadır. Çünkü optik yükselticiler pratik olarak bir ya da daha fazla optik izolatöre sahiptir. Dolayısıyla SBS sayesinde geri saçılan ışığın artışı optik izolatörler sayesinde engellenir.

SBS, optik fiberli haberleşme sistemlerinin performansını azaltabilmesine rağmen sistem kısıtlamaları genellikle diğer doğrusal olmayan etkiler tarafından belirlenir.

2.5 Uyarılmış Raman Saçılması (SRS)

SRS, fiberin moleküler titreşimi ile fotonların etkileşiminden meydana gelir. SBS'nin aksine SRS her iki yönde de oluşabilmektedir. Fakat geri yönde saçılan ışık, optik

izolatörler sayesinde yok edilebilir. Bu yüzden ileri yönde saçılan ışık önemlidir. Raman kazanç katsayısı Brillouin kazanç katsayısından 10^3 kat daha küçüktür ve tek-kanallı bir sistem için Raman eşiği 1 W civarındadır. Böylece tek kanallı sistemlerde büyük eşik seviyesinden dolayı SRS etkisi ihmal edilebilmektedir. Ancak SRS'nin kazanç bant genişliği 12 THz derecesindedir (Forghieri ve ark. 1997). SRS'nin bu büyük bant genişliği bir WDM sisteminde farklı kanalların etkileşime girmesini sağlayarak çapraz karışıma neden olabilir. Ancak yine de SRS eşiğinin yeterince yüksek oluşu Kerr etkisinin neden olduğu doğrusal olmayan etkilere kıyasla optik fiberli iletimi daha az sınırlamaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Önceden bahsedildiği gibi fiberin girişindeki bütün işaretler fiber doğrusalsızlığı sayesinde etkileşime girerek sistemin performansını azaltmaktadır. Fiberin girişindeki işaretlerin optik fiberin çıkışındaki dalga şekilleri NLS denklemi çözülerek elde edilmektedir. Genelde bu denklemi bazı varsayımlar yapmadan analitik olarak çözmek pek mümkün olmamasına rağmen literatürde, VSTF yaklaşımı, düzensizlik (pertürbasyon) yaklaşımı gibi analitik yöntemlerle çözmek mümkündür. Günümüzde halen bu denklemi daha verimli bir şekilde çözmek için çalışmalar devam etmektedir.

Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkileri anlamak için bir çok sayısal çözüm yöntemi mevcuttur. Bu problemi çözmek için kullanılan en yaygın sayısal yöntem, ayrık-adım Fourier (SSF) yöntemidir. Optik fiberli haberleşme sistemlerini benzetimsel olarak gerçekleştirmek için piyasada çeşitli ticari yazılım programları mevcuttur ve bu programların çoğu SSF yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntemi kullanan programlardan birisi OptiSim benzetim programıdır.

3.1 OptiSim Benzetim Programı

Optik fiberli haberleşme sistemlerinin tasarımında ve iletim performanslarının değerlendirilmesinde güçlü bir modelleme ve benzetim ortamı olan Optisim yazılım programı; tümüyle-optik ağları, EDFA, çok-pompa Raman ve hibrit yükselticiler gibi yükselticilere sahip DWDM ya da optik zaman bölmeli çoğullama (OTDM) sistemleri, uzun mesafe karasal ve denizaltı sistemleri, sayısal/analog sistemleri, optik fiberli yerel alan ağları (LAN) ve diğer deneysel araştırılacak sistemleri tasarlamak için oldukça uygundur.

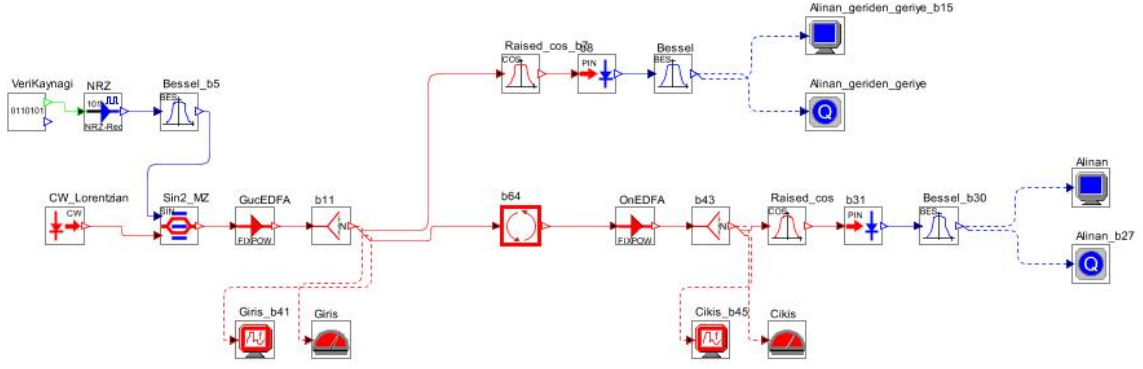
OptiSim programı bir haberleşme sistemini birbirine bağlanmış model blokların ya da simgelerin bir birikimi şeklinde ifade etmektedir. Her bir simge sistemde bulunan bir lazer, bir fiber ya da bir ölçüm aleti gibi fiziksel bir bileşeni ya da fonksiyonu göstermektedir. Simgeler işaret veri akışının bir elemandan bir diğerine olduğunu göstermek için birbirine bağlanırlar. Örneğin, lazeri ifade eden simge ile fiberi ifade eden simge arasındaki bağlantı lazerden fibere optik dalganın iletimini gösterecektir.

OptSim benzetim programı ölçüm aletlerinin geniş tercih olanakları sayesinde sistemin kalite etkeni (Q değeri), BER, güç tayfı, OSNR ve göz diyagramları gibi performans analizlerini yapabilmektedir. Bu yazılım programının optik hattı en uygun yapabilme yeteneği sayesinde güç bütçesi, dispersiyon haritası, darbe şeklinin ve cıvıltının uyarlanması, verici ön-vurgusu, yükselticiyi konumlandırma, iletim aksaklık analizi ile tüm derecesiyle PMD, SPM, XPM, FWM ve SRS ve SBS etkilerinin değerlendirmeleri yapılabilmektedir.

Programdaki bütün elemanlar, kullanıcı değişkenleri ve istatistiksel değerleri içine alan esnek ifadeler şeklinde gösterilebilirler. Daha sonra bu değişkenler, değişimlerin istatistiksel etkisini belirlemek ve sistem performansına göre tasarımı optimize etmek amacı ile taranabilmektedirler (OptSim).

Bu program sayesinde sistem tasarımcıları karmaşık proje ve tasarımları hızlı ve doğru bir biçimde test edebilmekte ve böylece maliyet açısından tasarruf elde etmektedirler.

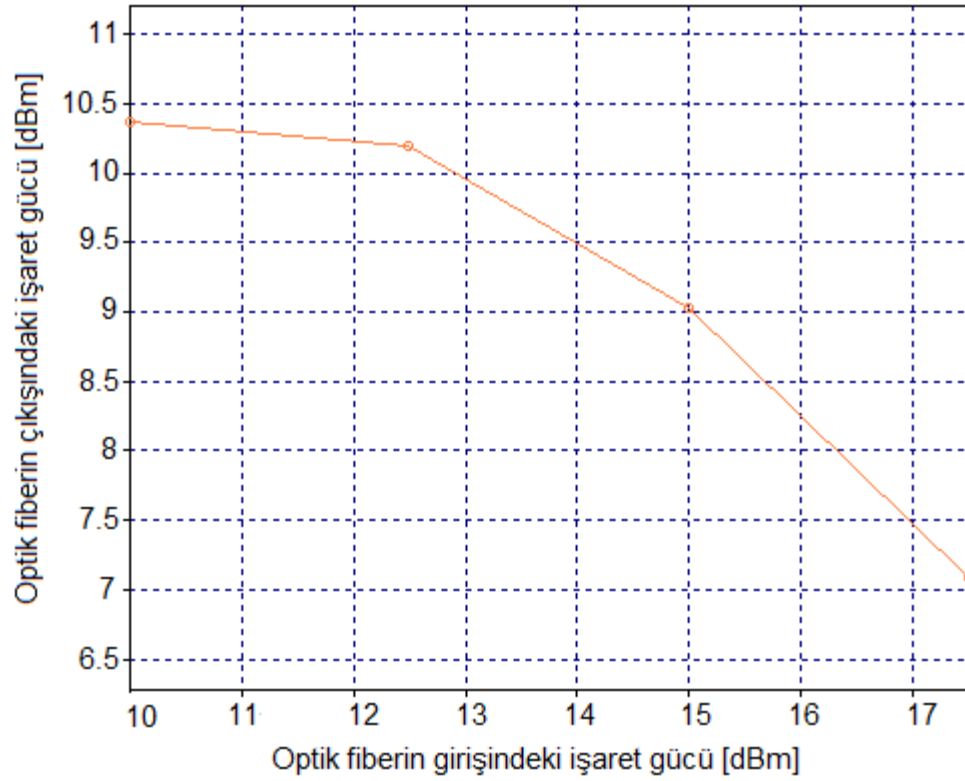
OptiSim benzetim programıyla yapılan örnek bir çalışmanın topolojisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu örnekte SPM'nin optik güce göre davranışı incelenmiştir. Burada 10 Gb/s hızındaki bir NRZ şeklindeki işaret, her biri 50 km'lik iki parça DSF'ye ($D_c = 0.4$ ps/nm/km) uygulanmıştır. Her bir parçaya giren güç OptSim'deki parametrik çalışma özelliği kullanılarak 10 dBm'den 17.5 dBm'e değiştirilmiştir. SPM analizini basitleştirmek maksadı ile EDFA gürültüsü sisteme dahil edilmemiştir. Burada gücün artışıyla SPM etkisinin büyüdüğü ve işaretin fiberin çıkışındaki tayfının genişlediği görülmüştür. Böylece alıcı bölümdeki filtrenin bant genişliğinin işaretin tamamını filtrelemek için yeterli olmamasından dolayı çıkışta alınan güç azalmıştır (bkz. Şekil 3.2). Ayrıca bu devre topolojisinde kanal demodüle edilmiş ve göz diyagramı incelenmiştir (bkz. Şekil 3.3, 3.4). Burada göz açıklığının verilen gücün artışıyla azaldığı gözlenmiştir. Bu örnekte gürültü ihmal edildiği için Q değerlerinin hesabı konu dışında tutulmuştur.



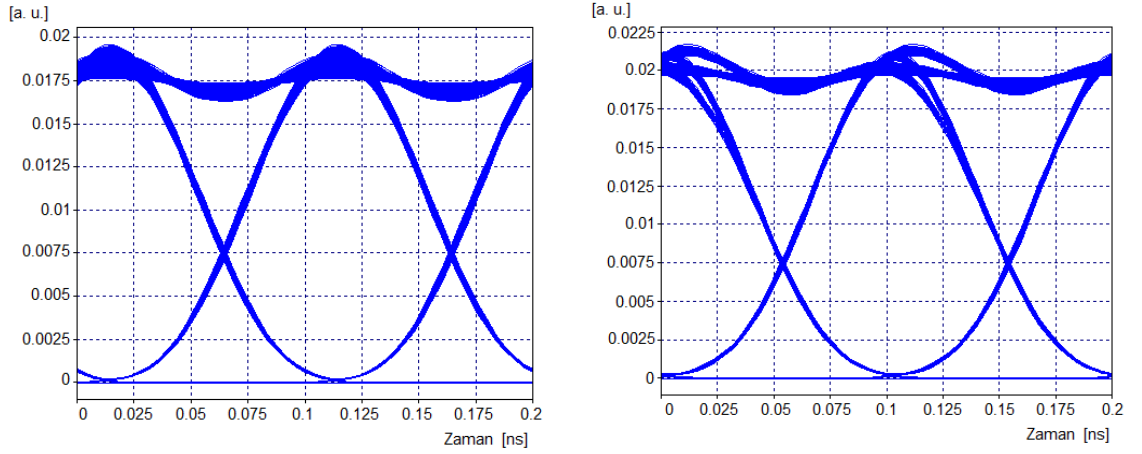
Optik fiber hattında bir adet EDFA yükseltici olup hattı 50 km'lik iki aralığa bölmektedir.
 1550 nm'de fiber kaybı 0.25 dB/km,
 dispersiyon 0.4 ps/(nm.km),
 dispersiyon eğimi 0.066 ps/(nm².km)
 İşaretin çalışma dalgaboyu 1553.3288 nm

Optik fibere giriş gücü 10 dBm'den 17.5 dBm'e değiştiriliyor.

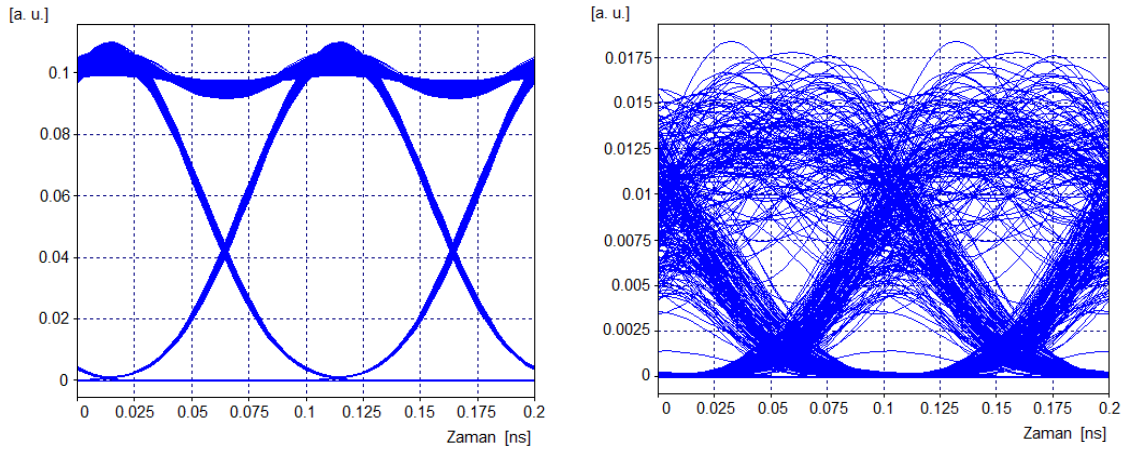
Şekil 3.1. SPM'in etkilerini incelemeye kullanılan örnek bir topoloji (OptSim).



Şekil 3.2. Optik fibere giren gücün (x-ekseni) optik fiberin çıkışındaki güçle (y-ekseni) değişimi.



Şekil 3.3. Verilen gücün 10 dBm olduğu durumda optik fibere girmeden önceki göz diyagramı (back-to-back eye) (sol taraftaki), çıkışta alınan göz diyagramı (sağ taraftaki).



Şekil 3.4. Verilen gücün 17.5 dBm olduğu durumda optik fibere girmeden önceki göz diyagramı (back-to-back eye) (sol taraftaki), alınan göz diyagramı (sağ taraftaki).

3.2 OptiSim Benzetimi ile Analizi Gerçekleştirilecek Sistem Modeli

WDM sistemlerinde iletim kapasitesini arttırmak için her bir WDM kanalında daha yüksek bit hızları kullanılmalıdır. Ancak bu durumda yüksek hızlarda çalışan pahalı elektronik devrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Elektronik sistemlerin anahtarlama hızı fiziksel etkenler nedeniyle sınırlıdır. Yüksek bit hızlarında kısa süreli darbeler kullanıldığı için ışık şiddetindeki ani değişimden dolayı sözü edilen doğrusal olmayan etkilerin şiddeti artmaktadır. WDM sistemlerindeki kanallar arası frekans boşluğu

Sistemde üç kanal olduğu için üç adet verici bulunmaktadır. Her bir verici çeşitli bit hızlarında sözde rassal bit dizileri (PRBS) üretebilen bir PRBS üretici içermektedir. Üretilen bit dizisi NRZ kodlanmış işaret üretmek için NRZ kodlayıcıya gönderilir. Kodlayıcıdan elde edilen işaret yüksek frekans bileşenlerinin süzülmesi amacıyla bir alçak geçiren filtreden geçirilir. Filtre çıkışındaki elektriksel darbeleri optik darbelerle dönüştürmek için CW lazeri bir modülatör vasıtasıyla elektriksel darbeler ile modüle edilir. Elde edilen işaretler bir çoğullayıcı kullanılarak çoğullanır. Çoğullanmış işaret, kuvvetlendiriciden geçirilip fibere verilir.

Belirtildiği gibi benzetim modelinde kullanılan fiber DSF'dir. BER analizi için L ve A_{eff} değiştirilmiştir. Fiberin diğer sabit değişkenleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Benzetimlerde kullanılacak DSF değişkenleri

Değişken	DSF
1550 nm'de D_c (ps/nm.km)	0
1550 nm'de S (ps/nm ² .km)	0.07
1550 nm'de n_2 (m ² /W)	2.6×10^{-20}
1550 nm'de α (dB/km)	0.2

Alıcı bölümde fiberin çıkışından alınan çoğullanmış işaret kuvvetlendiriciden geçirilir. Kuvvetlendirilmiş işaretten merkez kanalı süzen optik bant geçiren filtrenin çıkışı pozitif-iç-negatif (PIN) fotodiyota bağlanır. Fotodiyot optik işareti elektriksel işarete dönüştürür. Elektriksel işaret yüksek frekanslı gürültü bileşenlerini süzmek amacıyla alçak geçiren filtreden geçirilir. Alıcı kısmın çıkışından ölçüm almak için osiloskop ve BER kestirici kullanılmıştır.

Daha sonra yapılan analizlerde kanal sayısı da dahil olmak üzere çeşitli değişkenlerin sistem üzerine etkisi araştırılmıştır. Analiz edilen sistemlerin sonuçları Bölüm 4'te verilmiştir.

3.3 Hat-İçi Optik Yükselticili WDM Sistemlerinde FWM ve ASE Gürültüsünün Birleşik Etkisinin Analizi

FWM, WDM sistemlerinde doğrusal olmayan çapraz karışımın en önemli nedenlerinden biridir. WDM sistemlerinde iletim uzaklığını arttırmak için kullanılan kuvvetlendiriciler, sistem gürültüsünün yanısıra FWM etkisini de arttırmaktadırlar. Dolayısıyla büyük uzaklığa sahip haberleşme sistemlerinin performansı bu etkiden olumsuz yönde etkilenmektedir.

FWM özellikle, kanallar arası boşlukların eşit ve dar olduğu WDM tabanlı DSF kullanan sistemlerde çapraz karışıma sebep olan temel sınırlayıcı etkilerden biridir. Ayrıca WDM sistemleri için hem yüksek giriş gücü hem de düşük dispersiyon ihtiyacı FWM sayesinde yeni frekanslı işaretlerin üretilmesine de neden olur. Forghieri ve arkadaşları (Forghieri ve ark. 1995) FWM etkisini azaltmak için eşit olmayan kanallar arası boşluk kullanımını önermişler ve bu sayede fiber giriş gücünün 7 dB kadar arttırılabileceğini göstermişlerdir. Aynı şekilde Tkach ve arkadaşları da yüksek hızlı WDM sistemlerinde FWM'in neden olduğu performans kötüleşmesini değerlendirmişler ve bu etkiyi azaltmak için karışan FWM ürünlerinin çalışma kanallarının her hangi birine düşmemesini sağlayacak şekilde eşit olmayan kanallar arası boşlukların kullanımının ya da toplam kromatik dispersiyonu düşük yapacak şekilde dispersiyon yönetiminin kullanımının FWM'i azalttığını göstermişlerdir (Tkach ve ark. 1995). Singh ve arkadaşları ise yine bu etkiyi azaltmak için eşit olmayan kanallar arası boşluk kullanımına bir modifikasyon getirerek tekrarlı baz yapıda periyodik eşit olmayan kanallar arası boşluk kullanımını önermişlerdir (Singh ve ark. 2004). Bu sayede daha az sayıda FWM bileşeniyle en uygun bant genişliği elde edilmiştir. Bogoni ve Poti (Bogoni ve Poti 2004) kanal yerlerini etkin bir şekilde ayarlayarak FWM'in azaltılabileceğini göstermişlerdir. Hiçdurmaz ve arkadaşları (Hiçdurmaz ve ark. 2013) kanal giriş güçlerini denetleyerek FWM ve ASE gürültüsünün birleşik etkisini her bir işaretin optik fiberin çıkışındaki OSNR'ını dikkate alarak azaltacak bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde her bir kanalın optik fibere giriş güçleri değiştirilerek çıkıştaki OSNR değerleri değerlendirilmiş ve OSNR değeri en küçük olan kanalın OSNR değerini en büyük yapmak için tüm kanalların optik fibere giriş güçleri optimize edilmiştir. Hiçdurmaz ve arkadaşlarının önermiş

oldukları yöntemde FWM gücünün hesaplanması için gerekli denklemler Bölüm 2’de verilmiştir. Analiz için gerekli ASE gürültüsünün gücü (Keiser 2000)

$$P_{ASE} = 2n_{sp} h f_0 B_o (G - 1) \quad (3.1)$$

ile hesaplanabilir. Burada n_{sp} nüfus dönüşüm etkeni, h Plank sabiti (6.63×10^{-34} J.s), f_0 optik işaretin merkez frekansı (Hz), B_o optik kanal bant genişliği (Hz), G yükseltici kazancıdır. Eğer sistemde kullanılan her bir yükselticiyi özdeş ve her bir fiber bölümünün fiber kaybını tam olarak giderdiğini kabul edersek, m yükselticiye sahip bir sistemin fiberin çıkışındaki toplam ASE gürültüsü $m.P_{ASE} \cdot e^{-\alpha l_o}$ olur.

OSNR’ın hesabında

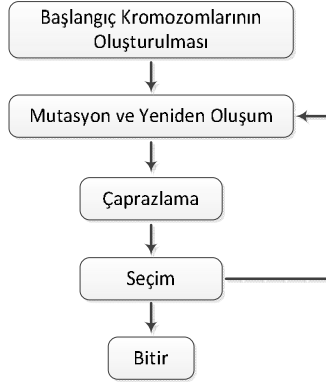
$$OSNR_i = \frac{P_{out_i}}{P_{FWM_i} + m \cdot P_{ASE_i} \cdot \exp(-\alpha l_o)} \quad (3.2)$$

ifadesi kullanılır. Burada $i = 1, 2, \dots, M$, olmak üzere $OSNR_i$ her bir kanalın optik fiberin çıkışındaki OSNR değeridir. P_{out_i} her bir kanalın optik fiberin çıkışındaki işaret gücü, P_{FWM_i} her bir kanalın optik fiberin çıkışındaki FWM gücü ve P_{ASE_i} ise her bir kanalın optik fiberin çıkışındaki ASE gürültüsüdür. Kullanılan optimizasyon yöntemi diferansiyel gelişim algoritması (DEA)’dır. DEA, Bölüm 3.3.1’de anlatılmıştır.

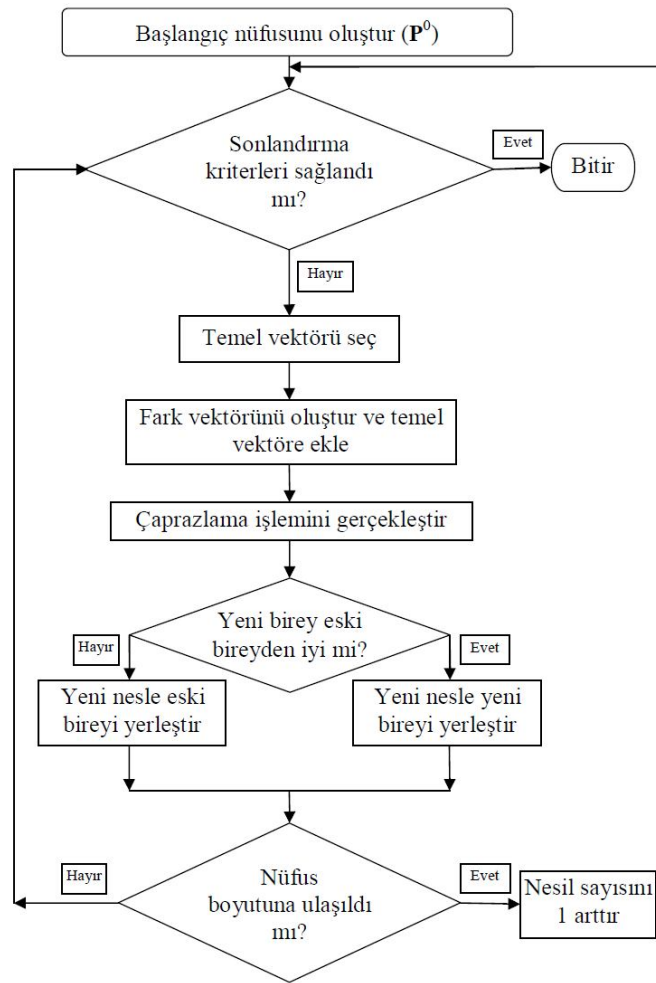
3.3.1 Diferansiyel Gelişim Algoritması (DEA)

Price ve Storn tarafından 1995 yılında geliştirilen DEA işleyiş bakımından genetik almıtmaya dayanan sezgisel bir optimizasyon tekniğidir (Price 2005). DEA genetik algoritma (GA) ile aynı operatörlere sahip olmasına rağmen yapısı ve uygulanışı itibari ile GA’dan farklılıklar gösterir. DEA basit olmasının yanında güvenilir bir nüfus tabanlı algoritmadır. Özellikle sürekli değişkenlere sahip problemlerin çözümü için geliştirilmiştir. GA’da olduğu gibi çaprazlama, mutasyon ve seçim burada da söz konusudur. GA’dan farklı olarak tüm operatörler kromozomlara tek tek uygulanıp yeni bireyin uygunluğu eskisinden daha iyi ise yeni birey aksi takdirde de eski birey bir

sonraki nesle aktarılmaktadır. DEA'nın genel akış şeması Şekil 3.6'da, ayrıntılı akış şeması ise Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. DEA'nın genel akış şeması (Hiçdurmaz ve ark. 2013).



Şekil 3.7. DEA'nın ayrıntılı akış şeması (Qing 2009).

DEA değişkenleri; nüfus büyüklüğü NP , gen sayısı D , nesil g , çaprazlama oranı CR ve ölçekleme etkeni F 'dir.

3.3.1.1 Başlangıç kromozomlarının oluşturulması

DEA'da yeni kromozomların oluşturulmasını sağlayacak mevcut kromozom dışında üç adet kromozoma daha ihtiyaç vardır. Bu nedenle nüfus büyüklüğü $NP > 3$ olmalıdır. NP adet D boyutlu kromozomdan meydana gelen başlangıç nüfusu

$$\forall i \leq NP \cap \forall j \leq D : x_{j,i,g=0} = x_j^{(l)} + rand_j[0,1] \times (x_j^{(u)} - x_j^{(l)}) \quad (3.3)$$

ile verilir. Buradaki $x_{j,i,g}$ değişkeni, g neslindeki i . kromozomun j . genini, $x_j^{(l)}$ ve $x_j^{(u)}$ değişkenleri ise sırasıyla genlere ait alt ve üst sınırı ifade etmektedir. $rand_j[0,1]$, 0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı rasgele bir sayıdır.

3.3.1.2 Mutasyon ve yeniden oluşum

Mutasyon, kromozomun genleri üzerinde rasgele değişiklikler yapmaktır. DEA'da mutasyona tabi tutulacak olan hedef kromozomun haricinde bir baz kromozom (r_0) ve birbirlerinden farklı iki kromozom daha seçilir (r_1 ve r_2). Mutasyon için ilk önce seçilen r_1 ve r_2 kromozomlarının farkı alınır ve belirli bir F katsayısı ile çarpılır. Daha sonra buradan elde edilen ağırlıklandırılmış fark kromozomu seçilen r_0 kromozomu ile toplanır. Mutasyon işlemi ile oluşan ara kromozom $v_{j,i,g}$ 'nin ifadesi

$$\forall j \leq D : v_{j,i,g} = x_{j,r_0,g} + F \cdot (x_{j,r_1,g} - x_{j,r_2,g}) \quad (3.4)$$

şeklindedir. Buradaki ölçeklendirme etkeni F , nüfusun evrim geçirme hızını denetleyen bir sayıdır ve literatürde genellikle (0,1) aralığında bir değer alınmaktadır (Price 2005).

3.3.1.3 Çaprazlama

Çaprazlamada, mutasyon sonucunda elde edilen $v_{j,i,g}$ ile hedef kromozom $x_{j,i,g}$ kullanılarak deneme kromozomu $u_{j,i,g}$ üretilir. Bu yeni üretilen kromozomun genleri CR

olasılıkla ara kromozomdan, $I-CR$ olasılıkla da hedef kromozomundan seçilir. En az bir tane genin ara kromozomdan alınmasını garanti etmek için, $j = j_{rand}$ koşulu kullanılır. Çaprazlama sonucu oluşan yeni kromozom

$$\forall j \leq D : u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g}, & \text{eğer } rand[0,1] \leq CR \cup j = j_{rand} \\ x_{j,i,g}, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (3.5)$$

ile elde edilir. Hedef kromozomun mu yoksa deneme kromozomun mu yeni nesle geçeceğini belirlemede kriter, uygunluktur. Hedef kromozomun uygunluk değeri bilinmektedir. Ancak oluşturulan deneme kromozomuna ait uygunluk değeri hesaplanmalıdır.

3.3.1.4 Seçim ve algoritmanın sonlandırılması

Kromozomlardan uygunluğu yüksek olan kromozom yeni nesle atanır. Eğer optimizasyonda amaç en büyüğü elde etmekse seçim işlemine ait ifade

$$\forall i \leq NP : x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g}, & \text{eğer } f_i(u_{i,g}) \geq f_i(x_{i,g}) \\ x_{i,g}, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (3.6)$$

ile verilir. Buradaki $f(x)$ optimize etmek istediğimiz amaç fonksiyonudur. Bu işlem döngüsü $g = g_{max}$ olana kadar devam etmektedir. g_{max} olduğunda mevcut en iyi birey çözüm olarak alınır. g_{max} algoritmayı bitirmek için belirlenen tekrar sayısıdır.

3.3.2 DEA'nın Probleme Uygulanması

Bu bölümde optik fiberin çıkışında en kötü OSNR değerine sahip olan kanalın OSNR değerini en büyük yapmak için sistemdeki her bir kanalın giriş güçlerinin DEA ile optimizasyonu anlatılmıştır.

Başlangıçta birey kümesi rasgele oluşturulur. Bunun için NP nüfus boyutu kadar M adet kanal giriş gücü

$$\forall i \leq NP \cap \forall j \leq M : P_{j,i,g=0} = P_{j,i}^{\min} + rand[0,1] \times (P_{j,i}^{\max} - P_{j,i}^{\min}) \quad (3.7)$$

denklemine göre rasgele seçilir. Buradaki $P_{j,i}^{\min}$ ve $P_{j,i}^{\max}$ sırasıyla kanal giriş güçlerinin en küçük ve en büyük sınır değerleridir.

Daha sonra rasgele oluşturulan kanal giriş güçleri için her bir kanalın optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri hesaplatılıp nüfusun her bir bireyi için en küçük OSNR değerleri bulunur. Ve mutasyon işlemine geçilir. Mutasyon işlemi (3.4) ile tanımlanan bir ara kromozom üretir. Üretilen kromozomun genlerinden kanal giriş güçlerinin en küçük ve en büyük sınır değerlerini aşanlar

$$v_{j,i} = \begin{cases} P_{j,i}^{\min}, & \text{eğer } P_{j,i} < P_{j,i}^{\min} \\ P_{j,i}^{\max}, & \text{eğer } P_{j,i} > P_{j,i}^{\max} \end{cases} \quad (3.8)$$

ifadesine göre değiştirilir. Mutasyon işleminden sonra çaprazlama işlemine geçilir. Çaprazlama işleminde oluşacak deneme kromozomunun her bir geni, ara kromozomun geni ile hedef kromozomun geninden (3.5)'e göre seçilir. Daha sonra oluşan deneme kromozomunun genleriyle yeniden her bir kanalın OSNR değeri hesaplatılarak en küçük OSNR değeri bulunur.

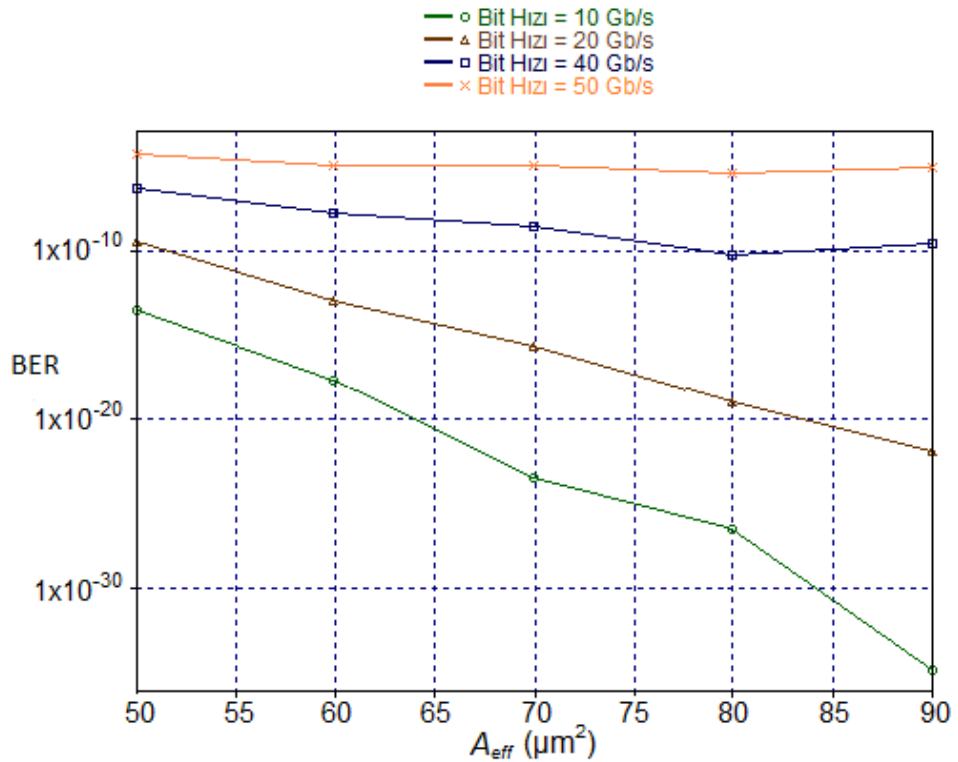
Seçim bölümünde, eğer deneme kromozomundan elde edilen en küçük OSNR değeri hedef kromozomundan elde edilen en küçük OSNR değerinden büyük ise deneme kromozomu, aksi takdirde hedef kromozomu yeni nesle aktarılacaktır. Bu işlem nüfus boyutuna ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Nüfus boyutuna ulaşıncaya yeni bir nesil ortaya çıkmış olur. Buradaki bu döngü belirlenen bir tekrar sayısı kadar devam ettirilir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1 OptiSim Benzetimi ile Analizi Gerçekleştirilen Sistemin Sonuçları

Bu bölümde, OptSim ile analizi gerçekleştirilen sistemlerin sonuçları verilmiştir. Benzetimler özellikle SPM, XPM ve FWM'in birleşik etkileri altında gerçekleştirilmiştir. Buradaki benzetimlerde SRS ve SBS etkileri ihmal edilmiştir (bkz. Bölüm 2.4 ve 2.5).

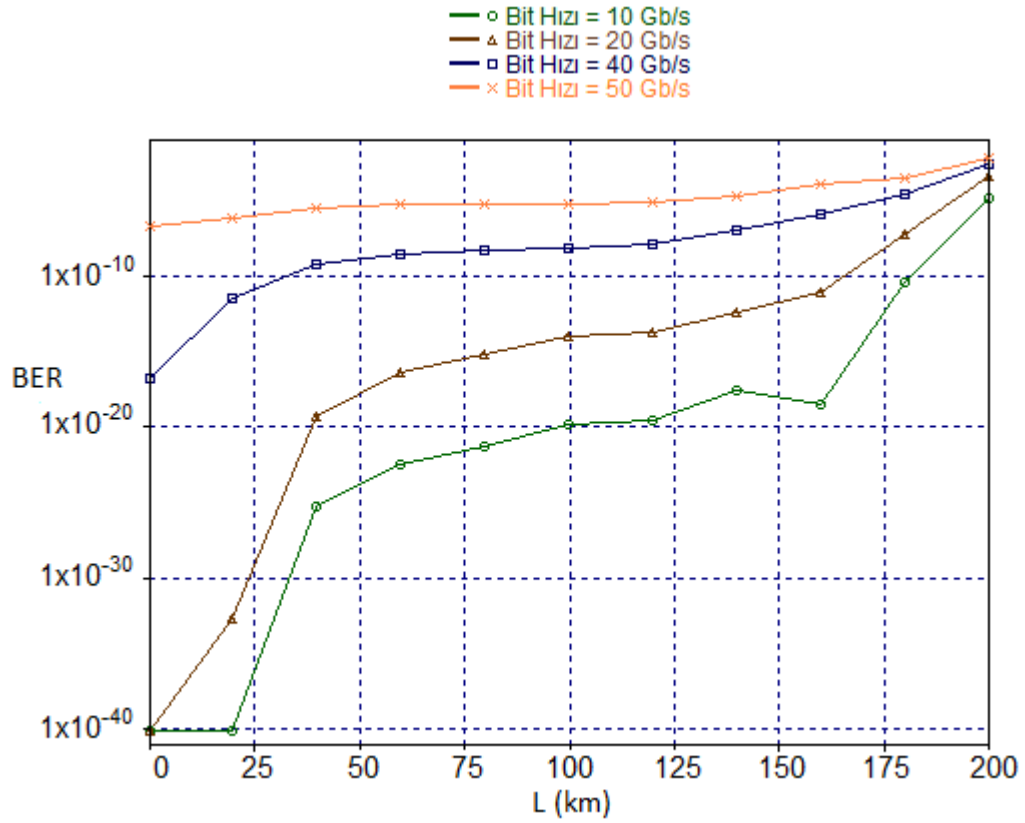
Üç kanallı WDM sistemi benzetim modelinde (bkz. Şekil 3.5), $P_{in}/kanal$ 1 mW, DSF uzunluğu L 100 km, fiber çıkışında kullanılan alıcı ön EDFA yükselticinin kazancı her bir DWDM kanalı için G 20 dB ve gürültü etkeni NF 4.5 dB seçildiğinde farklı bit hızları için elde edilen BER'in A_{eff} ile değişimini gösteren benzetim sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Burada ayrıca alıcı bölümdeki bant geçiren filtrenin 3 dB bant genişliği yaklaşık olarak 37 GHz'dir. Bu benzetimde doğrusal olmayan olayların etkili olduğu durumu görmek için DSF kullanılmıştır ve DSF değişkenleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çeşitli veri hızları için BER'in A_{eff} ile değişimi.

Beklenildiği gibi kanal bit hızları arttıkça BER değerlerinde artış meydana gelmiştir. 50 Gb/s veri hızında uygulama açısından gerekli olan en büyük 10^{-9} 'luk BER değerine hiçbir A_{eff} değeri için ulaşamamaktadır. 40 Gb/s'lik veri hızı için pratik açıdan en uygun A_{eff} değerinin 75-90 μm^2 arasında olduğu açıktır. 10 Gb/s ve 20 Gb/s veri hızlarında ise 50-90 μm^2 arasındaki A_{eff} değerlerinin pratik açıdan uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 4.2'de farklı bit hızları için BER'in L ile değişimi verilmiştir. Bu benzetimde $P_{in}/kanal$ 1 mW, A_{eff} 70 μm^2 seçilmiş ve fiber çıkışındaki yükselticinin kazancı fiber zayıflamasını giderecek şekilde ayarlanmıştır. Yükselticinin gürültü etkisi yine 4.5 dB'dir.

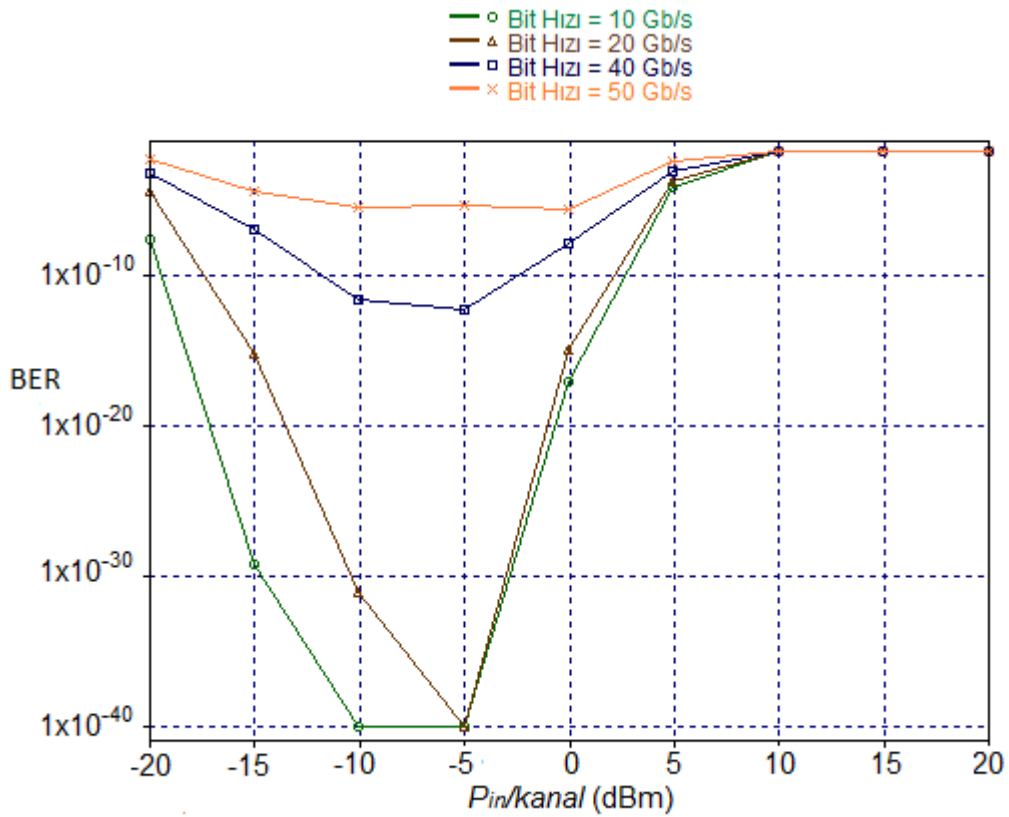


Şekil 4.2. Çeşitli veri hızları için BER'in optik fiber uzunluğu ile değişimi.

Şekil 4.2'ye göre sistem 50 Gb/s'lik veri hızında çalışması için uygun değildir. Çünkü fiber olmadan bile bu veri hızı için 10^{-9} 'luk BER sınır değerinin çok üzerinde değerler elde edilmiştir. Bu durumun gösterdiği başka bir önemli sonuç, sistemdeki diğer

elemanların da 50 Gb/s'lik iletme uygun olmadığıdır. 50 Gb/s'den daha düşük diğer veri hızları için elde edilen sonuçlar iletim uzaklığının sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sınır değerleri 40 Gb/s veri hızı için yaklaşık 50 km, 20 Gb/s veri hızı için yaklaşık 170 km ve 10 Gb/s veri hızı için de yaklaşık 185 km'dir.

L 100 km, A_{eff} $70 \mu m^2$, alıcı ön-yükseltici EDFA kazancının 20 dB, yükseltici NF'si 4.5 dB ve kanal giriş güçlerinin de eşit olduğu sistemde, farklı veri hızları için, BER'in kanal başına giriş gücüyle değişiminin incelendiği benzetim sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir.

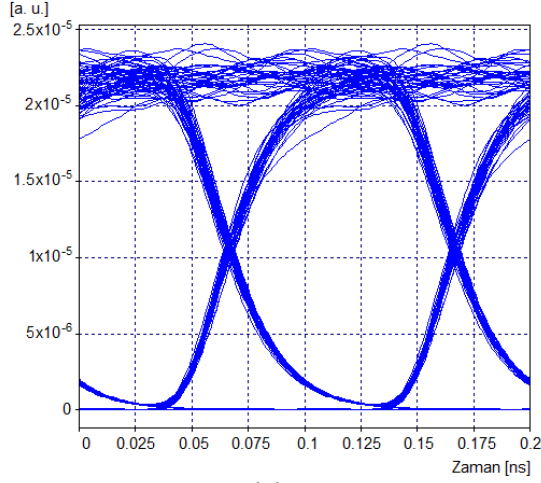


Şekil 4.3. Çeşitli veri hızları için BER'in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.

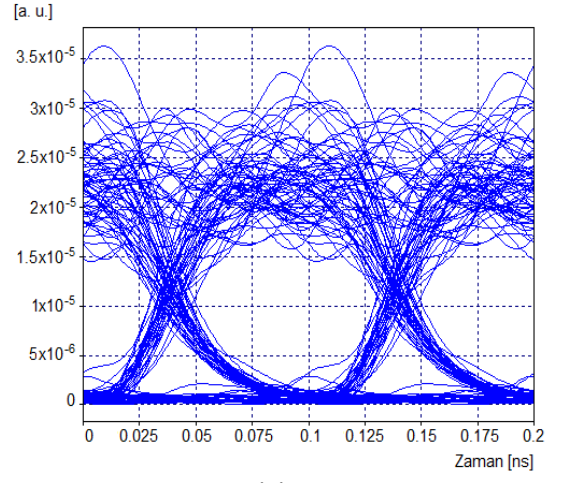
Şekilde, 50 Gb/s veri hızı için pratik açıdan uygun bir kanal başına giriş gücü görülmemektedir. 40 Gb/s'lik hızda -13 dBm ile -3 dBm arası kanal başına giriş güçlerinin seçilebileceği, ancak en uygun $P_{in}/kanal$ değerinin -5 dBm olduğu anlaşılmaktadır. 20 Gb/s için, uygun $P_{in}/kanal$ değerinin -18.5 dBm ile 3 dBm aralığında bulunduğu, ancak performans açısından en uygun $P_{in}/kanal$ değerinin -5 dBm olduğu

görülmektedir. 10 Gb/s'lik iletimde ise $P_{in}/kanal$ değerinin -19.5 dBm ile 3.5 dBm aralığında seçilebileceği, BER açısından en uygun $P_{in}/kanal$ değer aralığının ise -10 dBm – -5 dBm olduğu açıktır.

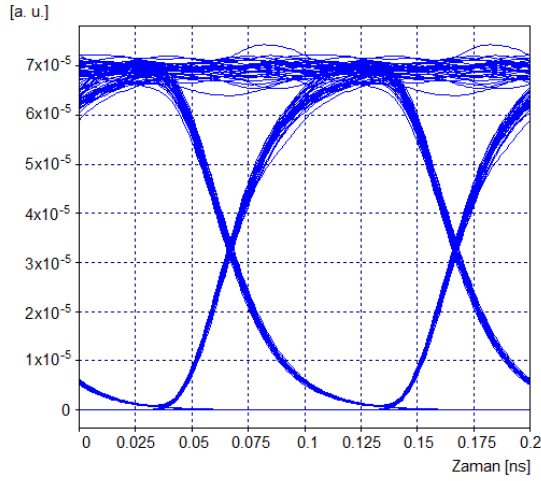
10 Gb/s veri hızında -20 dBm ile 20 dBm arası $P_{in}/kanal$ değerleri için merkez kanalın optik fiberin girişindeki ve çıkışındaki göz diyagramları Şekil 4.4'te verilmiştir.



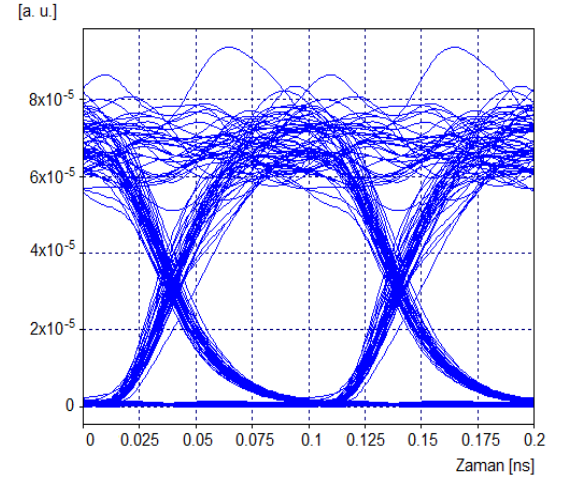
a) -20 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



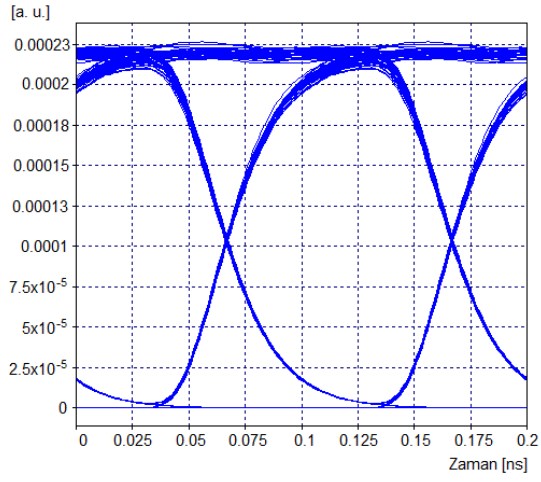
b) -20 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



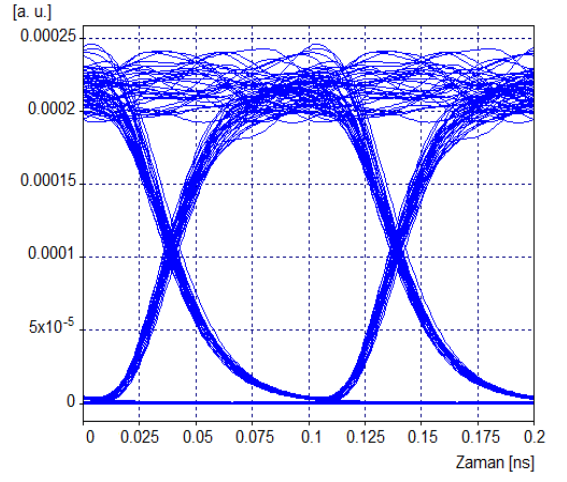
c) -15 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



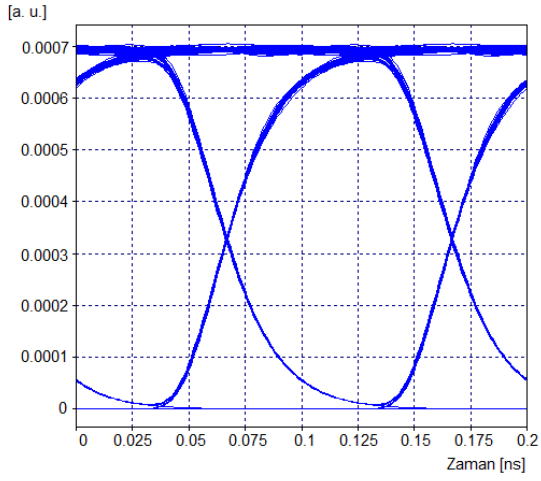
d) -15 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



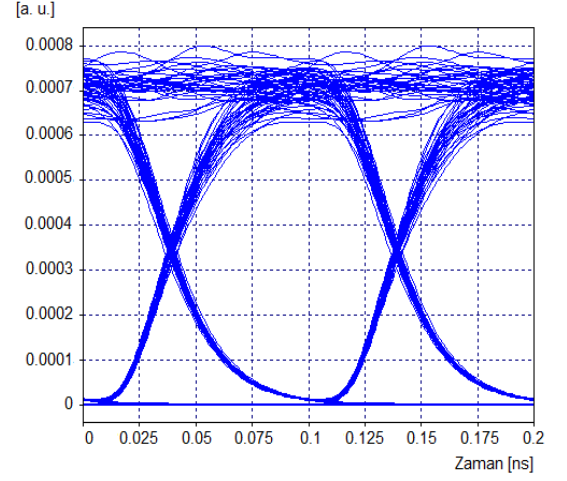
e) -10 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



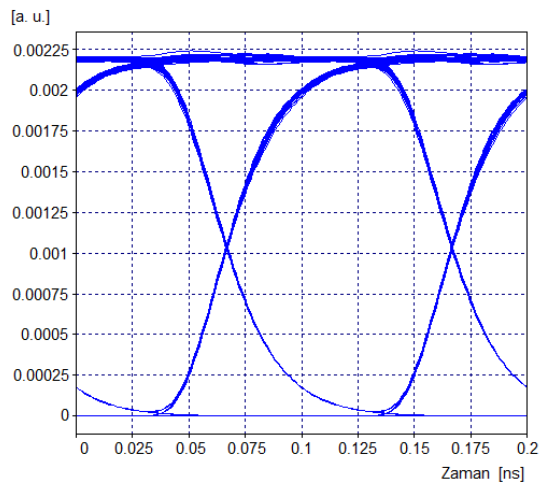
f) -10 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



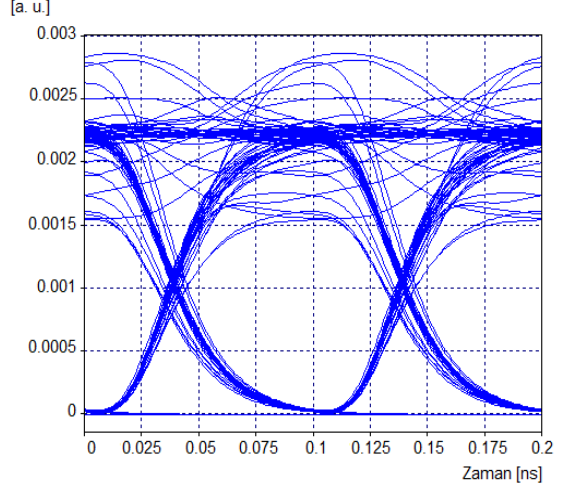
g) -5 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



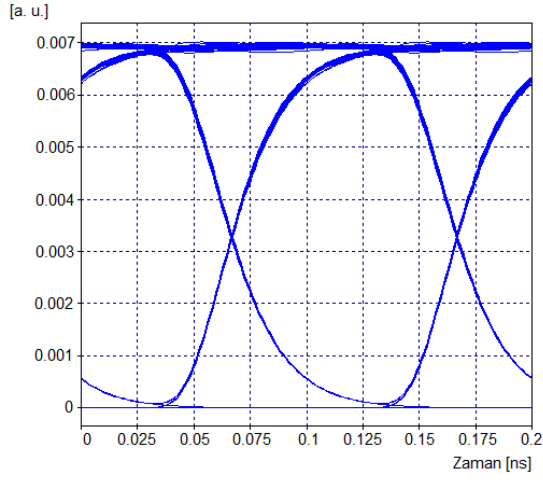
h) -5 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



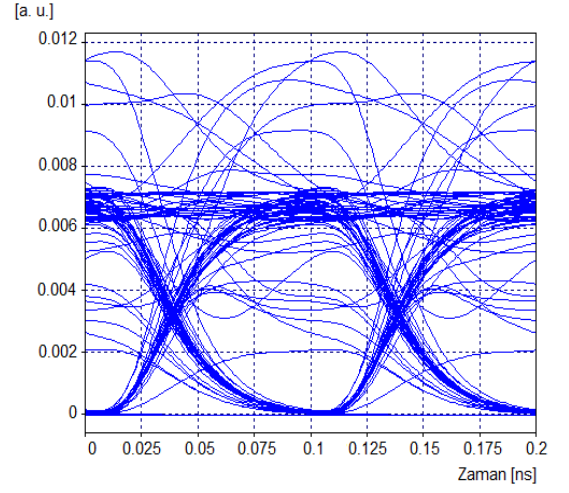
i) 0 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



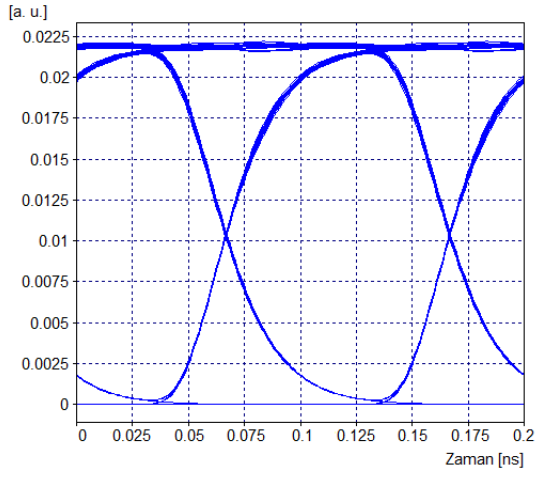
j) 0 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



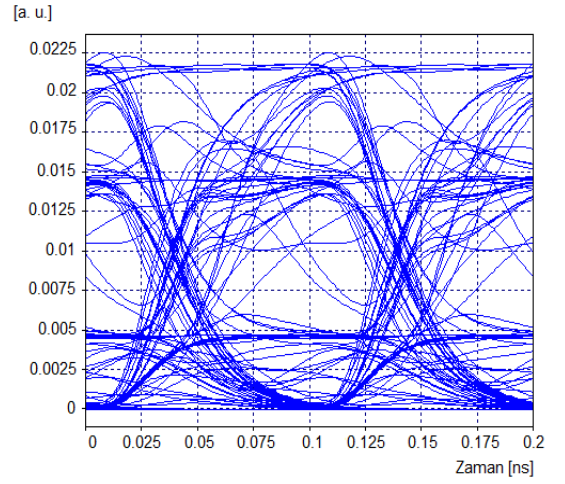
k) 5 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



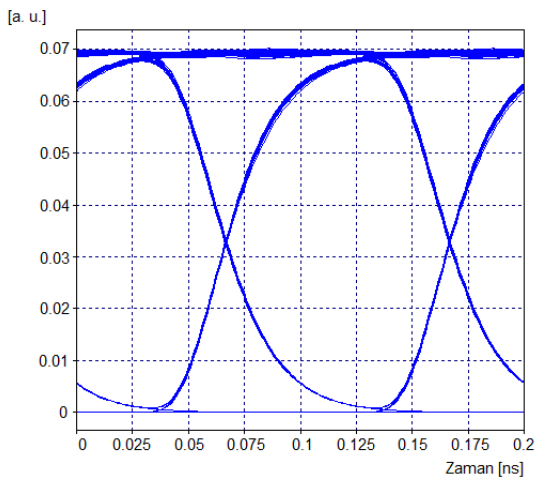
l) 5 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



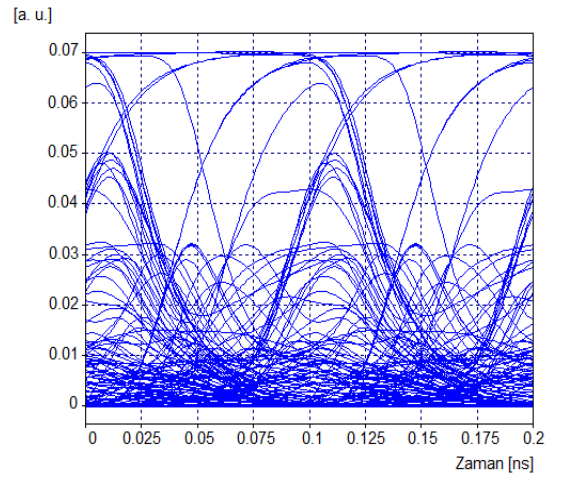
m) 10 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



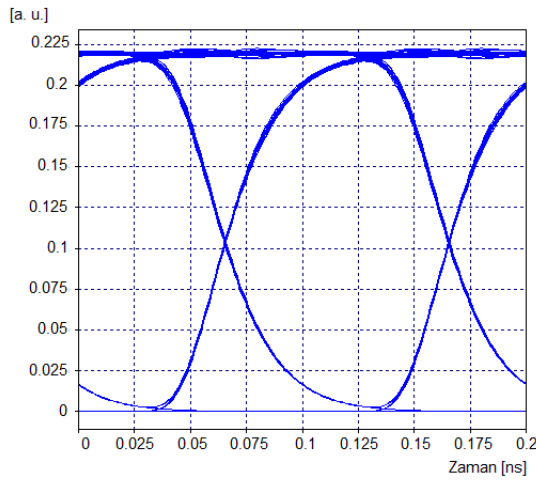
n) 10 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



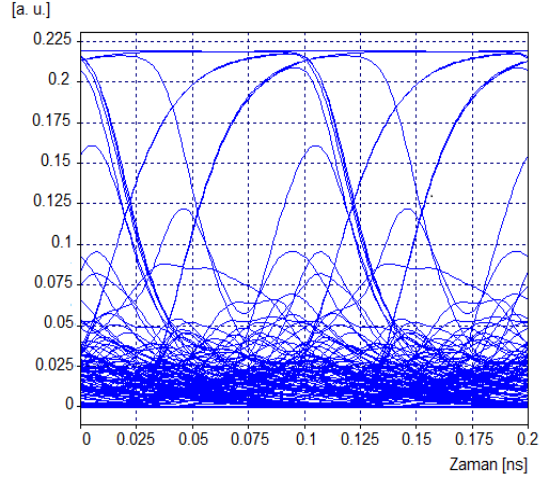
o) 15 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



p) 15 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz



r) 20 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz



s) 20 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz

Şekil 4.4. 10 Gb/s veri hızında -20 dBm ile 20 dBm arası $P_{in}/kanal$ değerleri için merkez kanalın optik fiberin girişindeki ve çıkışındaki göz diyagramları.

Göz diyagramlarından elde edilen performans değişken değerleri Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Çizelge 4.1. Göz diyagramlarının performans değişken değerleri

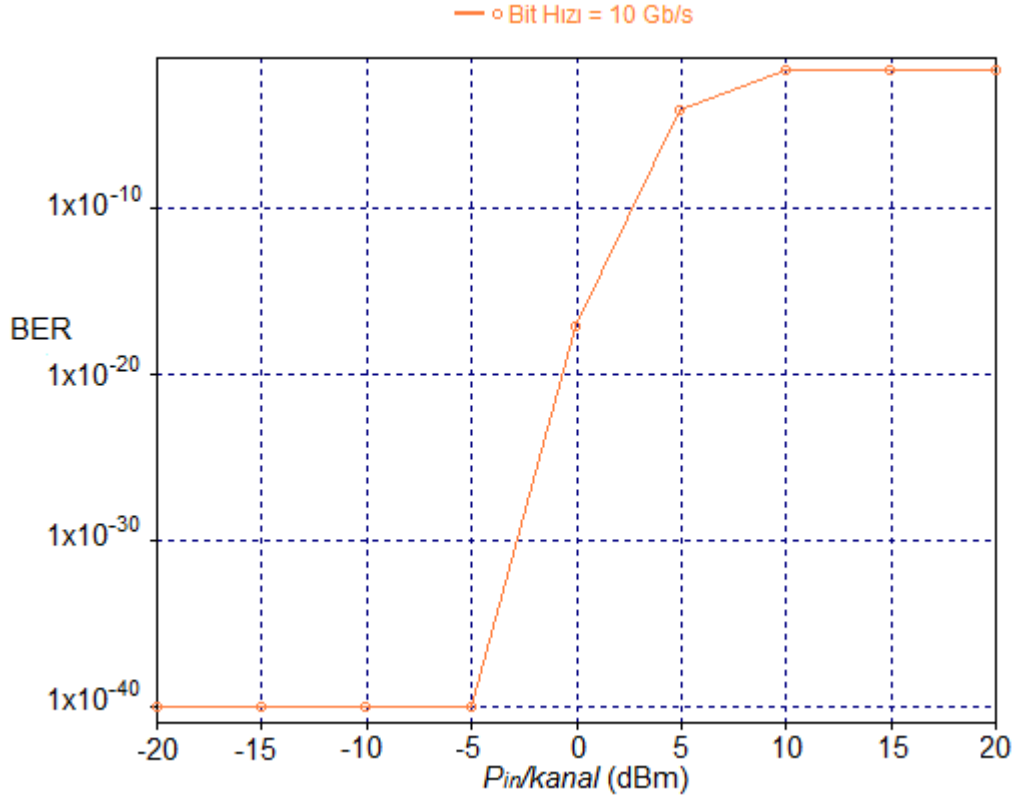
-20 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
1.97003×10^{-5}	2.15497×10^{-5}	0.38969	28.115373	0.0208757
-20 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
1.3767×10^{-5}	2.14451×10^{-5}	1.924891	15.037834	0.0203931
-15 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
6.43477×10^{-5}	6.84968×10^{-5}	0.271371	32.217476	0.0189621

-15 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
5.02111×10^{-5}	6.7334×10^{-5}	1.27435	20.106219	0.0182681
-10 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
20.6862×10^{-5}	21.6249×10^{-5}	0.192733	33.656868	0.0176072
-10 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
18.8257×10^{-5}	21.2864×10^{-5}	0.533509	24.384231	0.0200326
-5 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
66.2385×10^{-5}	68.386×10^{-5}	0.138563	35.755534	0.0207556
-5 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
61.8234×10^{-5}	70.1877×10^{-5}	0.551078	26.023710	0.0205669
0 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
211.518×10^{-5}	216.108×10^{-5}	0.093216	37.100811	0.0232469
0 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
151.248×10^{-5}	216.515×10^{-5}	1.55799	18.710085	0.0225406

5 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
667.537x10 ⁻⁵	682.065x10 ⁻⁵	0.093502	37.283012	0.0236323
5 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
197.567x10 ⁻⁵	654.781x10 ⁻⁵	5.203818	11.769549	0.0231965
10 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
2112.25x10 ⁻⁵	2157.49x10 ⁻⁵	9204.1 x10 ⁻⁵	37.688745	0.0228935
10 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
22.7973x10 ⁻⁵	1331.94x10 ⁻⁵	17.66602	6.525014	0.021372
15 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
6666.23x10 ⁻⁵	6821.88x10 ⁻⁵	0.0100238	37.455172	0.0231913
15 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
29.6279x10 ⁻⁵	2034.95x10 ⁻⁵	18.368521	6.0206	0.0226948
20 dBm giriş gücü için fiberin girişindeki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
21176.1x10 ⁻⁵	21606.8x10 ⁻⁵	0.087442	37.562156	0.0232432
20 dBm giriş gücü için fiberin çıkışındaki göz				
Göz Açıklığı (a.u.)	Ortalama açıklık (a.u.)	Göz kapanıklığı (dB)	Q değeri (dB)	Zaman Seyirmesi (ns)
37.6841x10 ⁻⁵	4897.56x10 ⁻⁵	21.138214	6.0206	0.0196557

Görölmektedir ki hem Şekil 4.4'teki sonuçlar hem de Çizelge 4.1'deki sonuçlar Şekil 4.3'ü desteklemektedir.

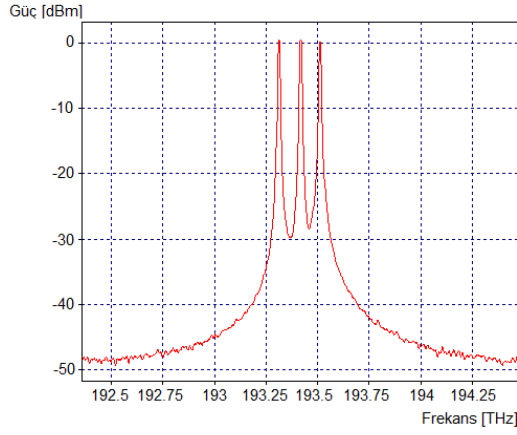
10 Gbps veri hızında yükseltici gürültüsünün etkisini görmek için NF ihmal edildiğinde Şekil 4.5 elde edilmiştir.



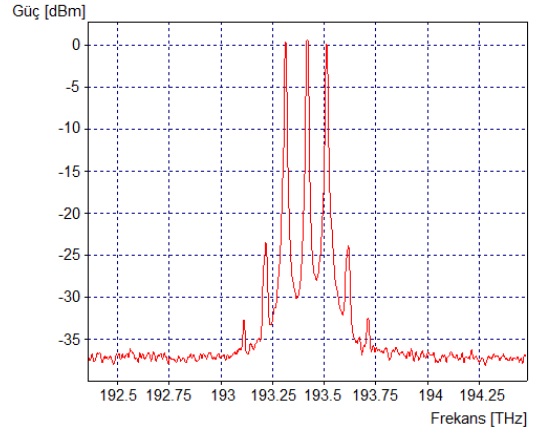
Şekil 4.5. 10 Gbps veri hızı için yükseltici gürültüsünün ihmal edildiği durumda BER'in $P_{in}/kanal$ ile değişimi.

Şekil 4.3 ile Şekil 4.5'i kıyasladığımızda, -10 dBm'lik giriş gücünün altındaki güç değerleri için yükseltici gürültüsünün etkili olmaya başladığı görölmektedir. Çünkü düşük işaret gücü seviyeleri için ASE gürültüsü işaret gücüne oranla daha baskın olmakta ve SNR kötüleşmektedir.

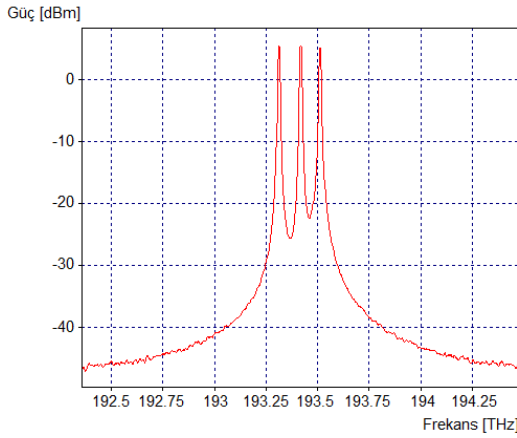
Şekil 3.5'teki sistem düzeneği ve tanımlanan sistem değişkenleri için, sırasıyla her bir kanal işaretinin 0 dBm ve 5 dBm gücünde olduğu durumda optik fiberin girişindeki ve çıkışındaki tayflar Şekil 4.6' da gösterilmiştir.



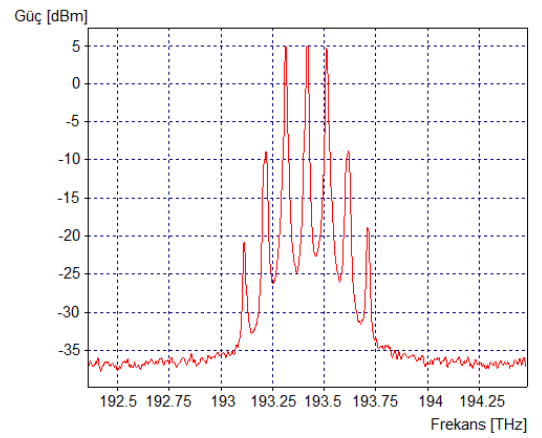
a) Giriş işareti tayfı (0 dBm)



b) Çıkış işareti tayfı (0 dBm)



c) Giriş işareti tayfı (5 dBm)

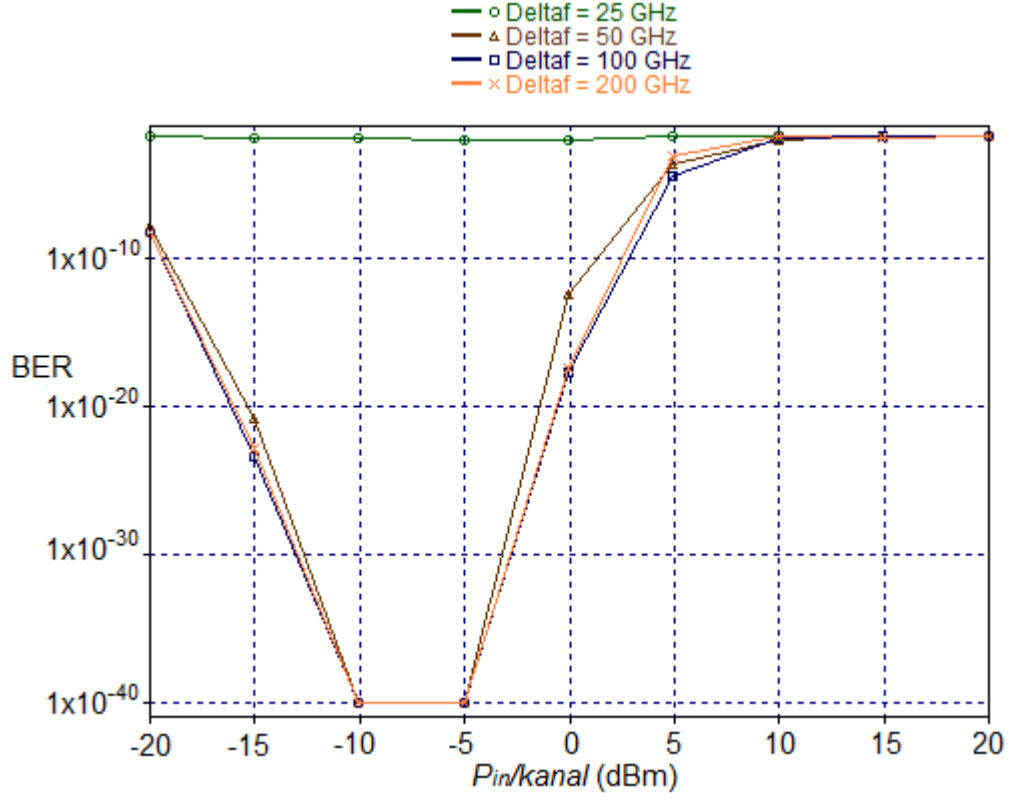


d) Çıkış işareti tayfı (5 dBm)

Şekil 4.6. $P_{in}/kanal$ değerlerinin sırasıyla 0 dBm ve 5 dBm olduğu durumda optik fiberin girişindeki ve çıkışındaki tayflar.

Grafiklerde, çıkış tayfında FWM kaynaklı yeni frekans bileşenleri göze çarpar. Bu bileşenlerden bazıları daha önce bahsedildiği gibi gerçek kanal işaretlerinin üzerine düşerek kanal işaretlerinde gürültüye neden olmaktadır. Gerçek kanalların arasındaki frekans boşlukları eşit olduğu için yeni oluşan işaretlerin frekansları da bu boşluğun katları şeklinde gerçek işaretlerin ötesinde olup güçleri de gerçek işaretlerden uzaklaştıkça azalmaktadır. Ayrıca bu FWM bileşenlerin güçleri kanal işaretlerinin gücüyle artmaktadır.

Şekil 4.7’de farklı kanallar arası boşluk değerleri (25 GHz, 50 GHz, 100 GHz, 200 GHz) için her bir kanalın -20 dBm – 20 dBm arası $P_{in}/kanal$ değerlerine göre BER’in değişimi gösterilmiştir.

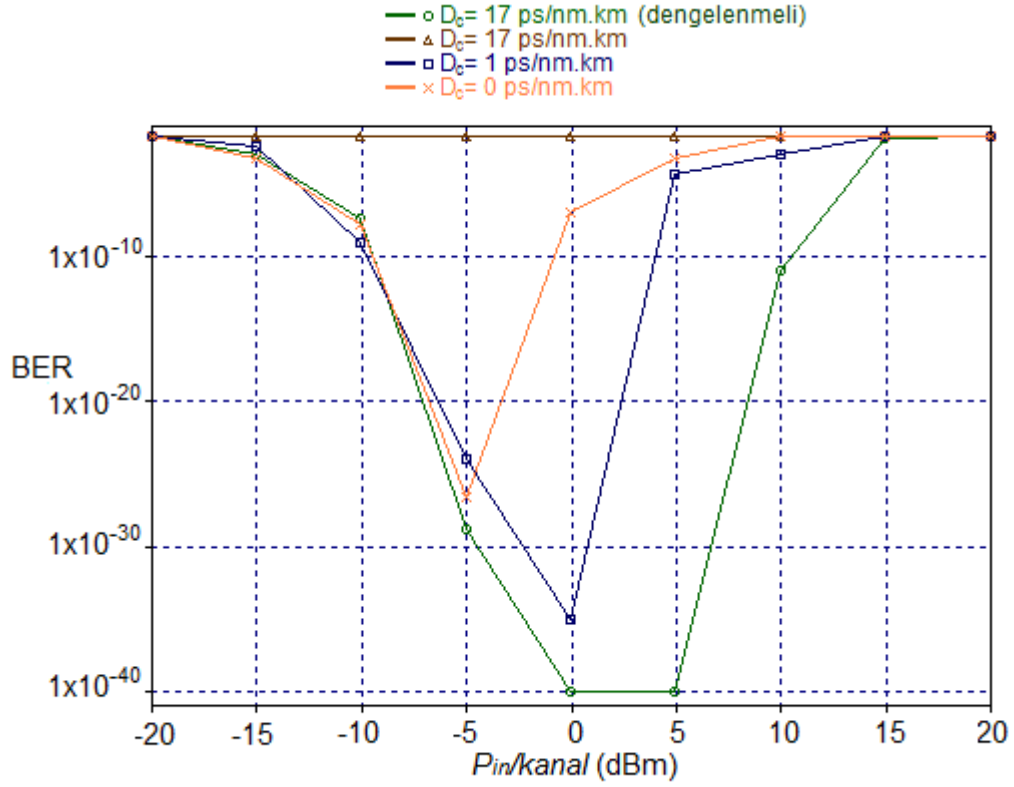


Şekil 4.7. Farklı kanallar arası boşluk değerleri için BER'in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.

200 GHz, 100 GHz ve 50 GHz şeklinde kanallar arası frekans boşluklarının azalmasıyla sistem için çalışılabilir güç değerlerinin dBm cinsinden az da olsa azaldığı ortadadır. Ancak kanallar arası boşluğun 25 GHz'e düşürülmesi durumunda BER oldukça artmakta ve taranan güç değerlerinde çalışmanın sistem için uygun olmadığı görülmektedir. BER'deki bu muazzam kötüleşmenin başlıca nedeni alıcı bölümdeki bant geçiren filtrenin bant genişliğinin büyük olması ve frekans seçiciliğinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Şu ana kadarki analizler L 'nin 100 km, A_{eff} değerinin $70 \mu m^2$ ve D_c 'nin de 0 ps/nm.km olması durumunda yapıldı. $L=150$ km, alıcı bölümdeki yükselticinin kazancı 30 dB ve D_c 'nin de sırasıyla 0, 1, 17 ps/nm.km değerleri için BER'in kanal giriş güçleri ile değişimi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekilde ayrıca 17 ps/nm.km sahip fiberin ardından fiber Bragg ızgarası ile dispersiyon dengelemesi yapılarak dispersiyon etkisinin yok edildiği durum da gösterilmiştir. Burada veri hızı 10 Gb/s, A_{eff} değeri $50 \mu m^2$ ve kanallar

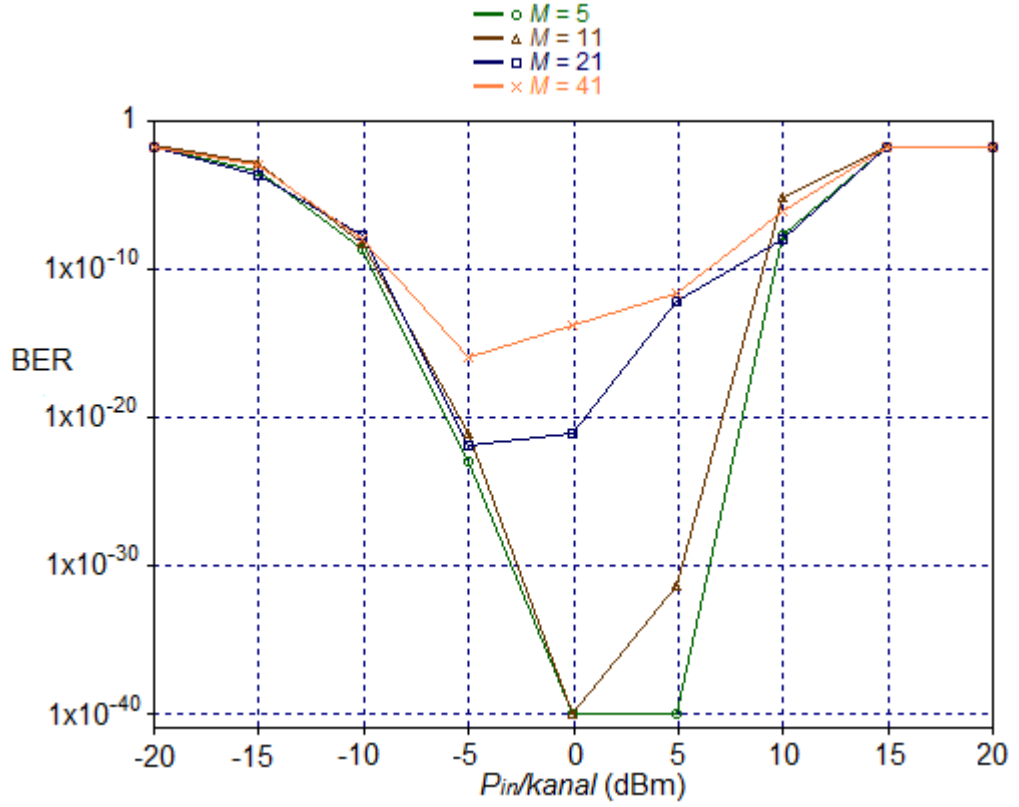
arası boşluk değeri 50 GHz olarak alınmıştır. Diğer değişken değerleri önceki grafiklerdeki ile aynı tutulmuştur.



Şekil 4.8. Farklı kromatik dispersiyon değerleri için BER'in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.

Şekil 4.8'e göre dispersiyon değerinin 17 ps/nm.km olduğu ve daha sonra dispersiyon dengelemesinin yapıldığı durumun sistemin çalışılabilir güç değerleri için en uygun olduğu görülmektedir. Dispersiyon dengelemesi yapılmamış ve D_c 17 ps/nm.km olan durumda aşırı dispersiyondan dolayı sistemin çalışması uygun gözükmemektedir. Yine 10^{-9} 'luk BER kriteri göz önünde bulundurulduğunda D_c değerlerinin 0, 1 ve dengelenmeli olarak 17 ps/nm.km olduğu durumlarda sınırlanan çalışılabilir $P_{in}/kanal$ değer aralıkları sırasıyla -9.5 dBm - -1 dBm, -10 dBm - 4 dBm ve -9.8 dBm - 11.5 dBm'dir.

Şekil 4.9’da farklı kanal sayıları için $P_{in}/kanal$ değerlerine göre BER değişimi gösterilmiştir. Burada D_c 17 ps/nm.km (dengelenmeli) olarak seçilmiştir. Kullanılan diğer değişkenler, Şekil 4.8 için kullanılan değişkenlerle aynıdır.



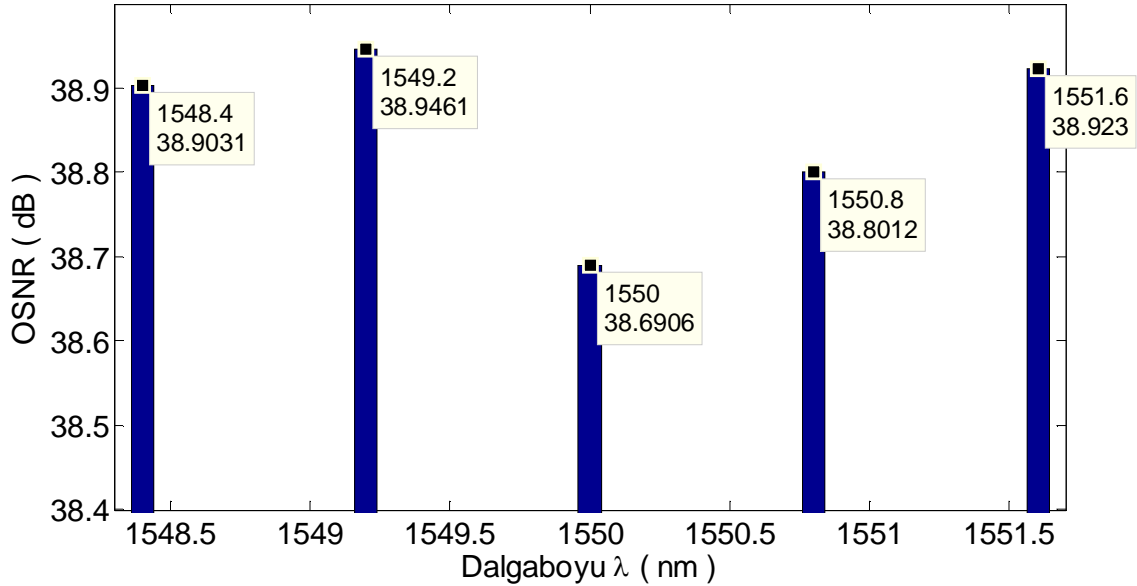
Şekil 4.9. Farklı kanal sayıları için BER’in kanal başına optik fibere giriş gücü ile değişimi.

Burada kritik BER değeri için kanal sayısının artmasıyla performans için sınırlanan güç değer aralığında azalma olduğu görülmektedir. Bununla beraber bu değer aralıklarında kanal sayısının artmasıyla BER artmaktadır. Buradan çıkan sonuç, yüksek dispersiyonun sağladığı kanallar arası faz uyumsuzluğuna rağmen, kanal sayısındaki artışın optik fibere girecek gücü sınırlamasıdır.

4.2 Hat-İçi Optik Yükselticili WDM Sistemlerinde FWM ve ASE Gürültüsünün Birleşik Etkisinin Matlab Analizi Sonuçları

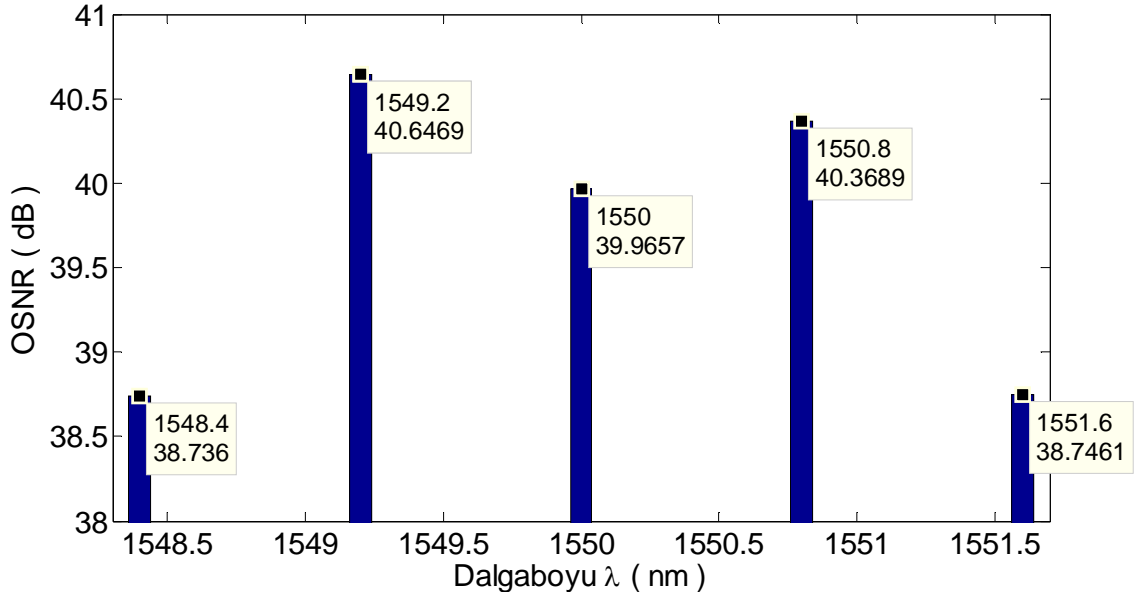
Bu bölümde Şekil 2.10'da verilen sistem için fiberin çıkışındaki OSNR değerleri Matlab™ yazılımı ile analiz edilmiştir. Yapılan benzetimde, özdeş hat-İçi optik yükselticilere sahip, 1550 nm iletim penceresinde çalışan, NZDSF kullanan bir fiber optik sistemi varsayılmıştır. Buradaki hat-İçi optik yükselticiler, her bir fiber uzunluğundaki işaret zayıflamasını dengeleyecek şekilde ayarlanmıştır. L 100 km olup, her 20 km' de bir yükseltici yerleştirilmiştir. Ayrıca bütün benzetimlerde merkez kanalın dalgaboyu 1550 nm olarak seçilmiştir. Çalışmamızda seçilen önemli değişken değerleri şu şekildedir: n_0 1.45, A_{eff} $50 \mu\text{m}^2$, $\chi_{1111}^{(3)}$ $3.15 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{W}$, α 0.2 dB/km, 1550 nm'de D_c 1 ps/(nm.km), $dD_c(1550\text{nm})/d\lambda$ 0.07 ps/(nm².km), n_{sp} 1.3, B_o 12.5 GHz ve kanallar arası boşluklar eşit olup 100 GHz'dir.

İlk olarak 5 kanallı sistemde giriş güçlerinin her bir kanalın OSNR değerine etkisini görmek için $P_{in}/kanal$ 0.2 mW seçilmiştir. Bu sistemin benzetim sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir.



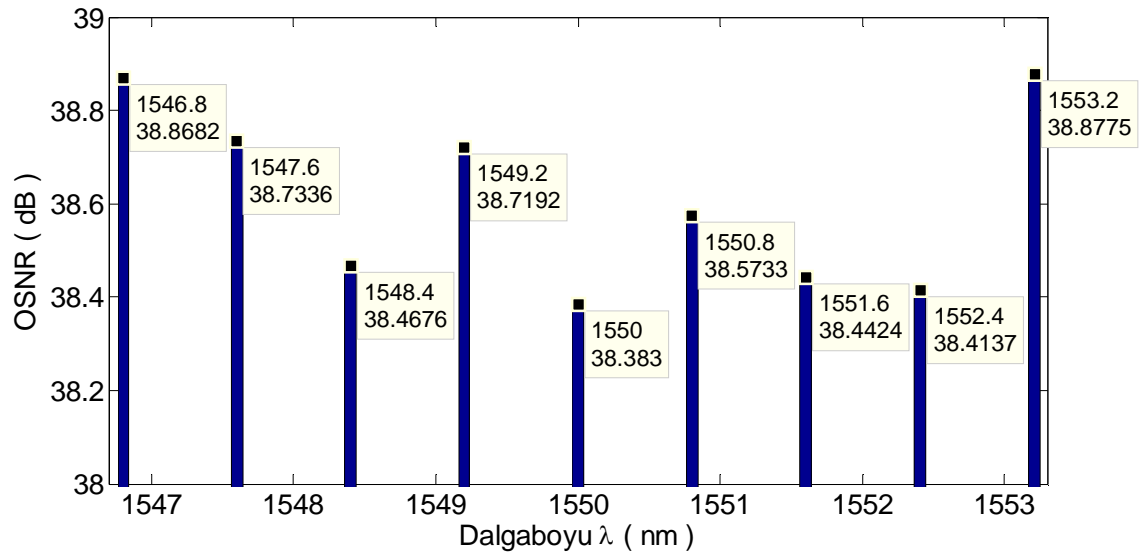
Şekil 4.10. $P_{in}/kanal$ 0.2 mW olan 5 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.

Daha sonra bütün kanallar en küçük dalgaboylu kanaldan başlayarak numaralandırılmıştır. Aynı 5 kanallı sistem için bu sefer 1. ve 5. kanalın giriş gücü değerleri 0.2 mW'a diğer kanalların güçleri 0.3 mW'a ayarlanmış olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

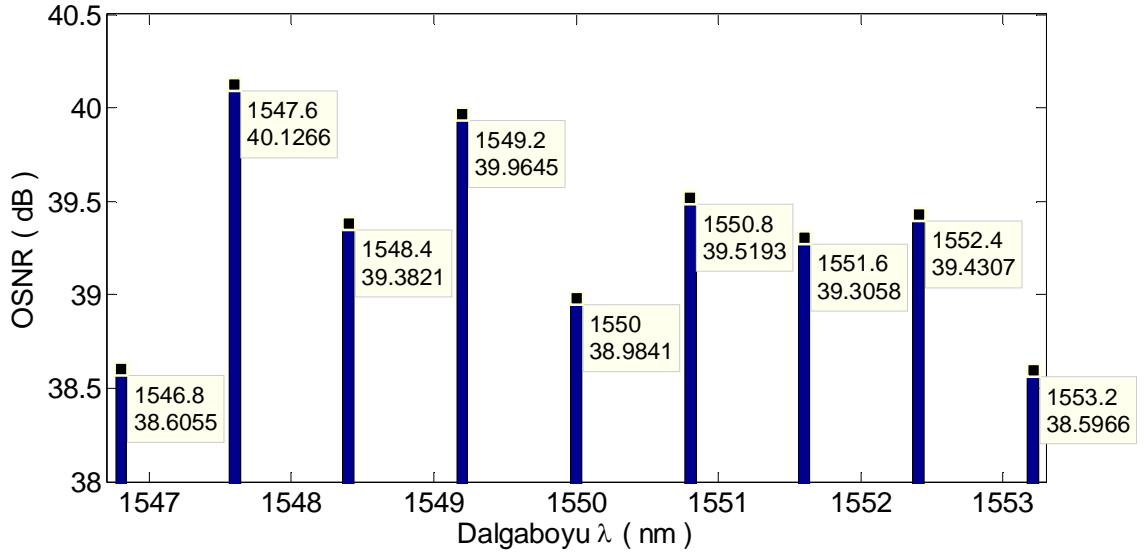


Şekil 4.11. Kanal giriş güçleri 1. ve 5. kanal için 0.2 mW, diğer kanallar için 0.3 mW olan 5 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.

5 kanallı sistem için gerçekleştirilen analizin aynısı 9 kanallı sistem için de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.12 ve 4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. $P_{in}/kanal$ 0.2 mW olan 9 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.



Şekil 4.13. Kanal giriş güçleri 1. ve 9. kanal için 0.2 mW, diğer kanallar için 0.3 mW olan 9 kanallı sistemde optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.

Şekil 4.10 - 4.13'deki sonuçlara göre her bir kanalın çıkış OSNR değeri her bir kanalın fibere giriş güçleri ile oldukça ilişkili olduğu görülmektedir. Bütün kanal giriş güçlerinin eşit ve 0.2 mW olduğu 5 kanallı sistemde her bir kanalın çıkış OSNR değerleri birbirinden farklıdır. Burada OSNR değeri en yüksek (38.9461 dB) olan kanal 2. kanal iken OSNR değeri en düşük (38.6906 dB) kanal 3.(merkez) kanaldır. Aynı şekilde kanal güçlerinin eşit ve 0.2 mW olduğu 9 kanallı sistemde en yüksek OSNR değerli (38.8775 dB) kanal 9. kanal iken en düşük OSNR değerli (38.383 dB) kanal 5. (merkez) kanaldır. 1. ve 5. kanalın giriş güçlerinin 0.2 mW diğer kanal güçlerinin 0.3 mW olduğu 5 kanallı sistemde ise OSNR değeri en yüksek (40.6469 dB) olan kanal 2. kanal iken OSNR değeri en düşük (38.736 dB) kanal 1. kanaldır. Aynı şekilde 1. ve 9. kanalın giriş güçlerinin 0.2 mW diğer kanal güçlerinin 0.3 mW olduğu 9 kanallı sistemde OSNR değeri en yüksek (40.1266 dB) olan kanal 2. kanal iken OSNR değeri en düşük (38.5966 dB) kanal 9. kanaldır. Elde edilen sonuçlardan, her bir kanalın giriş güçleri denetlenerek her bir kanalın fiberin çıkışındaki OSNR değerinin en büyük seviyeye çekilebileceği açıktır (Hiçdurmaz ve ark.). Bu amaçla tez kapsamında OSNR değeri en küçük olan kanalın OSNR değerini en büyük seviyeye getirecek sistemdeki her bir kanalın giriş güçlerinin optimizasyonu Bölüm 3.3.2'de anlatılan DEA ile yapılmıştır.

5, 9, 15 ve 21 kanallı sistemler için elde edilen optimizasyon sonuçları sırasıyla Çizelge 4.2 – 4.5 ‘de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 5 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları

1. Kanal	2. Kanal	3. Kanal	4. Kanal	5. Kanal
-3.7482 dBm (0.421871 mW)	-4.00119 dBm (0.397998 mW)	-1.66353 dBm (0.681784 mW)	-2.77367 dBm (0.527999 mW)	-3.49232 dBm (0.447475 mW)

Çizelge 4.3. 9 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları

1. Kanal	2. Kanal	3. Kanal	4. Kanal	5. Kanal	6. Kanal	7. Kanal	8. Kanal	9. Kanal
-6.04819 dBm (0.248417 mW)	-5.63024 dBm (0.273512 mW)	-4.99143 dBm (0.316852 mW)	-5.41331 dBm (0.287521 mW)	-4.23681 dBm (0.376981 mW)	-4.65438 dBm (0.342422 mW)	-4.14462 dBm (0.385069 mW)	-4.17135 dBm (0.382706 mW)	-5.76773 dBm (0.264989 mW)

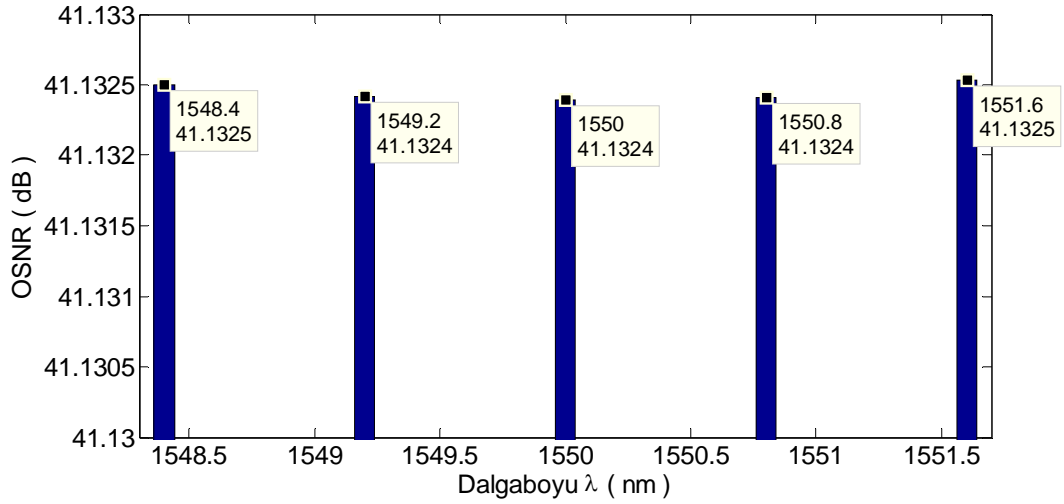
Çizelge 4.4. 15 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları

1. Kanal	2. Kanal	3. Kanal	4. Kanal	5. Kanal	6. Kanal	7. Kanal	8. Kanal
-6.38776 dBm (0.229733 mW)	-5.47971 dBm (0.283158 mW)	-5.31468 dBm (0.294125 mW)	-5.31588 dBm (0.294044 mW)	-5.552 dBm (0.278484 mW)	-5.28259 dBm (0.296306 mW)	-5.61699 dBm (0.274348 mW)	-5.18032 dBm (0.303367 mW)
9. Kanal	10. Kanal	11. Kanal	12. Kanal	13. Kanal	14. Kanal	15. Kanal	
-5.40957 dBm (0.287768 mW)	-5.07023 dBm (0.311155 mW)	-4.96403 dBm (0.318858 mW)	-5.00596 dBm (0.315794 mW)	-5.893 dBm (0.257454 mW)	-5.83055 dBm (0.261183 mW)	-4.15854 dBm (0.383836 mW)	

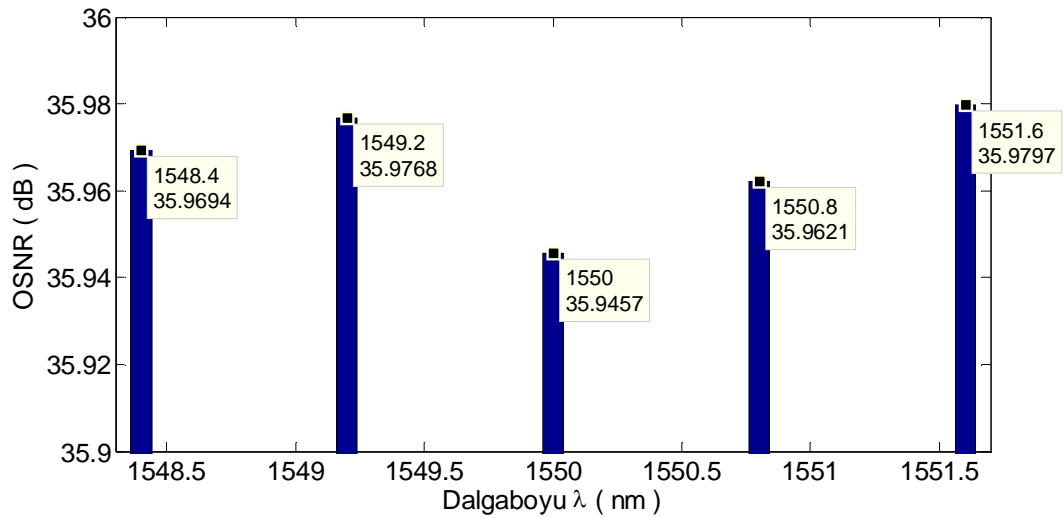
Çizelge 4.5. 21 kanallı sistemin optik fibere giriş güçleri için optimizasyon sonuçları

1. Kanal	2. Kanal	3. Kanal	4. Kanal	5. Kanal	6. Kanal	7. Kanal
-8.03172 dBm (0.157336 mW)	-7.02589 dBm (0.19834 mW)	-6.6506 dBm (0.216242 mW)	-6.50324 dBm (0.223705 mW)	-7.36023 dBm (0.183644 mW)	-7.46125 dBm (0.179422 mW)	-7.93172 dBm (0.161001 mW)
8. Kanal	9. Kanal	10. Kanal	11. Kanal	12. Kanal	13. Kanal	14. Kanal
-7.37716 dBm (0.18293 mW)	-7.72474 dBm (0.16886 mW)	-8.07296 dBm (0.155849 mW)	-8.09496 dBm (0.155061 mW)	-7.49388 dBm (0.178079 mW)	-7.66888 dBm (0.171046 mW)	-6.67866 dBm (0.214849 mW)
15. Kanal	16. Kanal	17. Kanal	18. Kanal	19. Kanal	20. Kanal	21. Kanal
-6.53872 dBm (0.221885 mW)	-4.97455 dBm (0.318087 mW)	-7.54702 dBm (0.175913 mW)	-7.23223 dBm (0.189137 mW)	-2.86208 dBm (0.517358 mW)	-6.27027 dBm (0.236033 mW)	-7.14855 dBm (0.192817 mW)

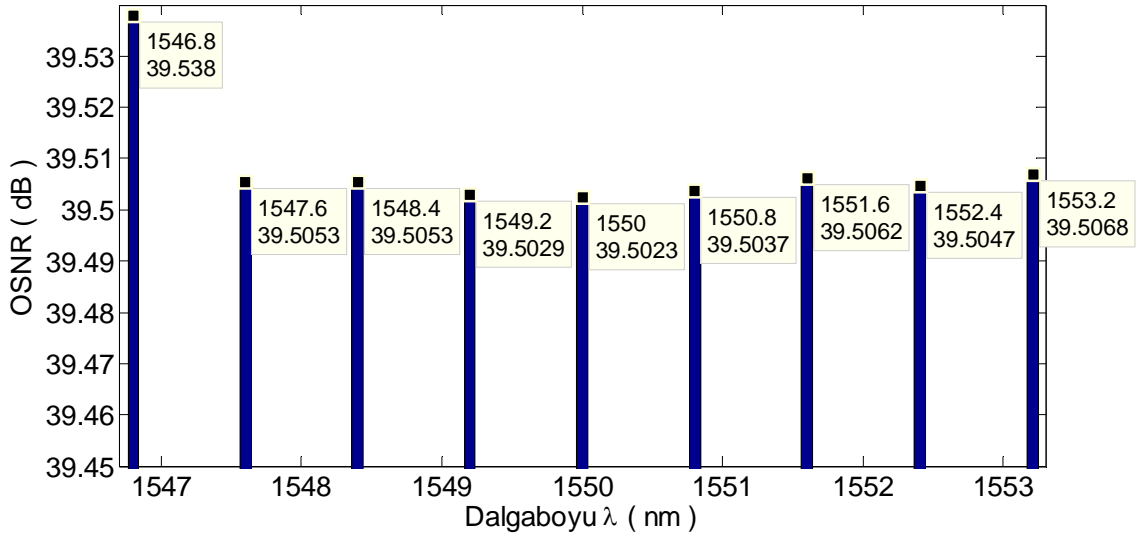
Optimizasyonlarda kanal giriş güçlerinin en küçük ve en büyük sınır değerleri sırasıyla -10 dBm ve 0 dBm olarak belirlendi. FWM etkisinin düşük güç seviyeleri için daha düşük olacağı düşünülürse her bir kanalın giriş gücünün en küçük sınır değerinde (-10 dBm) olması durumunda bu etki en az olacaktır. Bu yüzden optimize edilen giriş güçleri ile elde edilen OSNR değerleri her biri -10 dBm olan kanal giriş güçleri ile elde edilen OSNR değerleri ile karşılaştırılmıştır. 5 kanallı sistem için optimize edilen giriş güçleri ile elde edilen bütün kanalların OSNR değerleri ile her bir kanalın giriş gücünün -10 dBm olması durumunda elde edilen OSNR değerleri sırasıyla Şekil 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. Aynı şekilde elde edilen sonuçlar 9 kanallı için Şekil 4.16 ve 4.17'de, 15 kanallı için Şekil 4.18 ve 4.19'da, 21 kanallı için Şekil 4.20 ve 4.21'de gösterilmiştir.



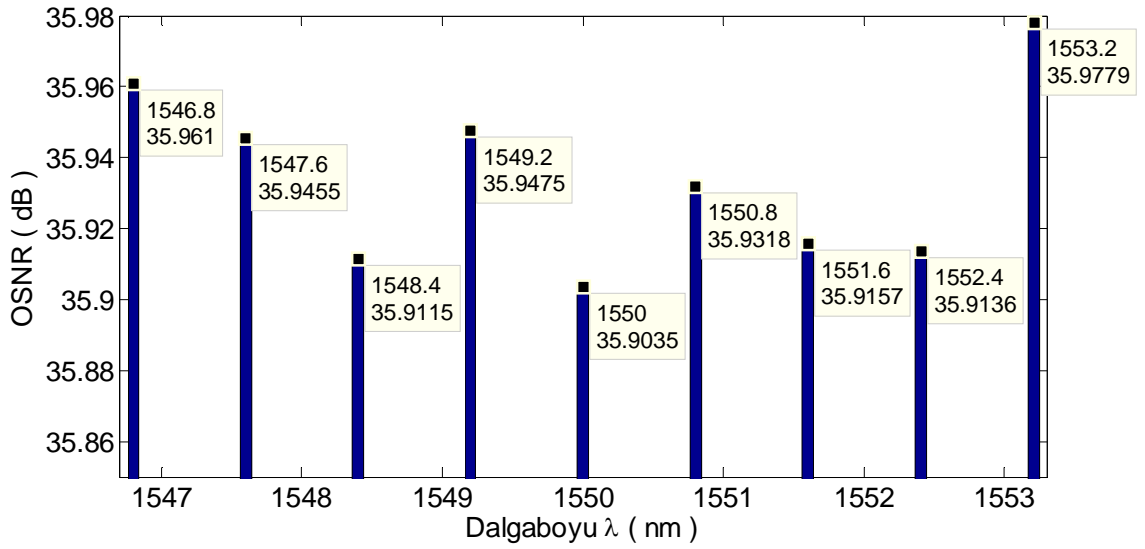
Şekil 4.14. 5 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen çıkış OSNR değerleri.



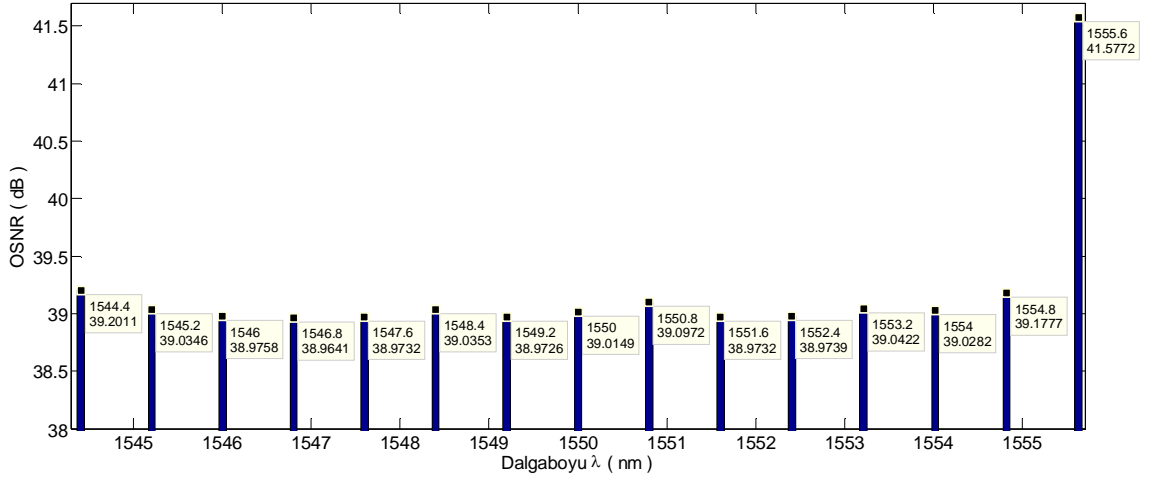
Şekil 4.15. 5 kanallı sistemde $P_{in}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.



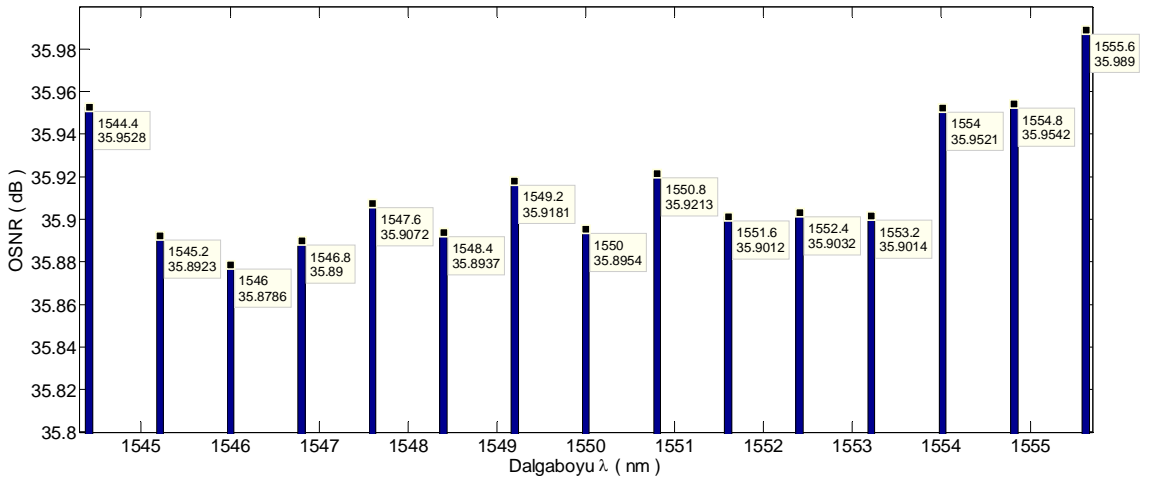
Şekil 4.16. 9 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.



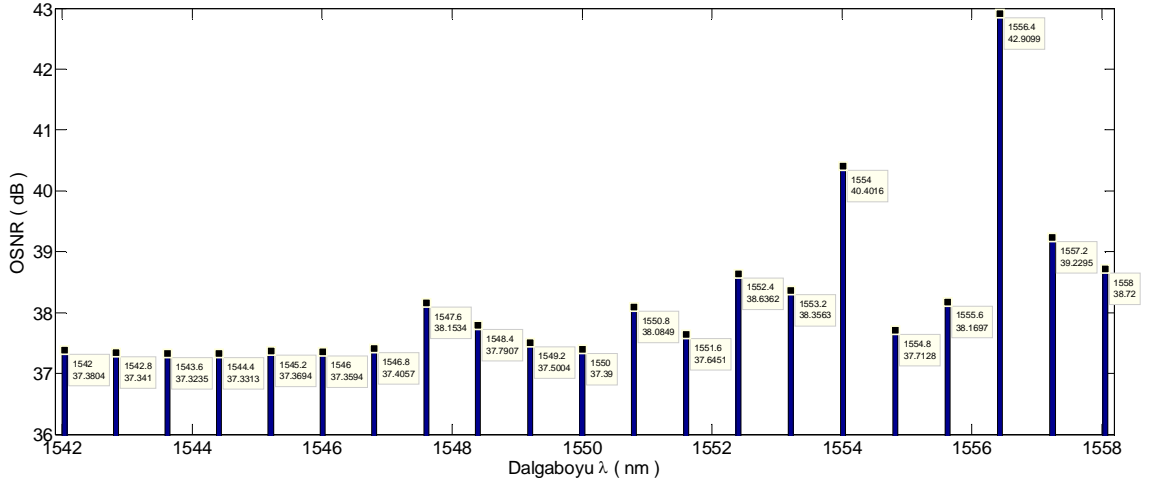
Şekil 4.17. 9 kanallı sistemde $P_{in}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.



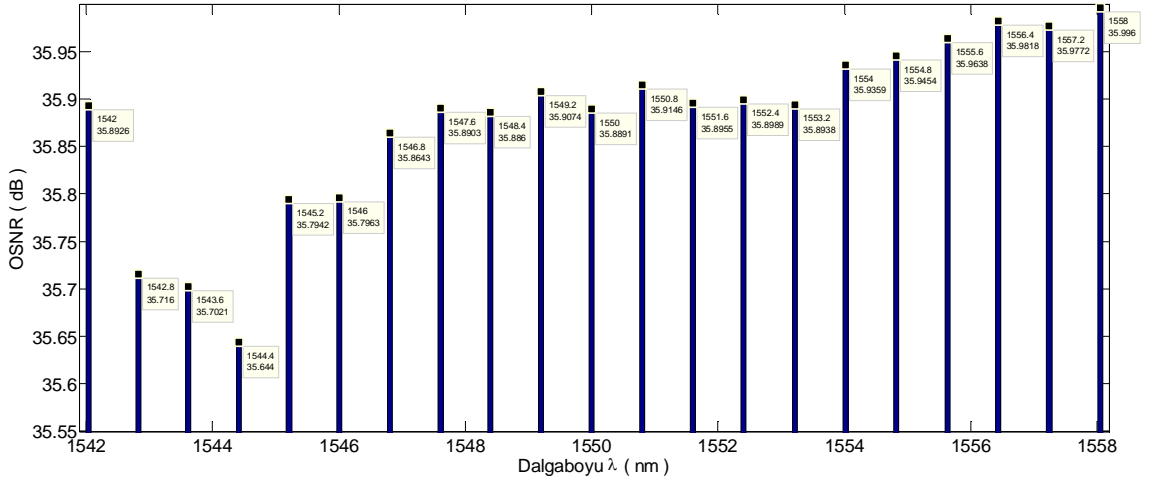
Şekil 4.18. 15 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.



Şekil 4.19. 15 kanallı sistemde $P_{in}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.



Şekil 4.20. 21 kanallı sistemde optimize edilen kanal giriş güçleri için elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.



Şekil 4.21. 21 kanallı sistemde $P_{in}/kanal$ -10 dBm olduğu durumda elde edilen optik fiberin çıkışındaki OSNR değerleri.

Elde edilen sonuçların karşılaştırılması Çizelge 4.6 - 4.9'da verilmiştir. Çizelgelerde koyu olarak yazılan değerler kanallar arasındaki en düşük OSNR değerini göstermektedir. $j = 1, 2, 3, \dots, M$ olmak üzere her biri -10 dBm olan kanal giriş güçleri ile elde edilen OSNR değerleri $OSNR_j^{(Pmin)}$, optimize kanal giriş güçleri ile elde edilen OSNR değerleri de $OSNR_j^{(Popt)}$ şeklinde tanımlanırsa *değişim*

$$değişim = OSNR_j^{(Popt)} - OSNR_j^{(Pmin)} \quad (4.1)$$

olarak verilebilir. Ve değişimin yüzdesi de

$$\% değişim = \left| 100 \times değişim / OSNR_j^{(Pmin)} \right| \quad (4.2)$$

olarak tanımlanabilir.

Çizelge 4.6. 5 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması

Kanal Numarası	$P_{in}/kanal = -10$ dBm için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	Optimize edilen kanal giriş güçleri için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	değişim (dB)	% değişim
1. Kanal	35.9694	41.1325	+ 5.1631	14.35
2. Kanal	35.9768	41.1324	+ 5.1556	14.33
3. Kanal	35.9457	41.1324	+ 5.1867	14.42
4. Kanal	35.9621	41.1324	+ 5.1703	14.37
5. Kanal	35.9797	41.1325	+ 5.1528	14.32

Çizelge 4.7. 9 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması

Kanal Numarası	$P_{in}/kanal = -10$ dBm için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	Optimize edilen kanal giriş güçleri için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	değişim (dB)	% değişim
1. Kanal	35.961	39.538	+ 3.577	9.94
2. Kanal	35.9455	39.5053	+ 3.5598	9.9
3. Kanal	35.9115	39.5053	+ 3.5938	10
4. Kanal	35.9475	39.5029	+ 3.5554	9.89
5. Kanal	35.9035	39.5023	+ 3.5988	10.02
6. Kanal	35.9318	39.5037	+ 3.5719	9.94
7. Kanal	35.9157	39.5062	+ 3.5905	9.99
8. Kanal	35.9136	39.5047	+ 3.5911	9.99
9. Kanal	35.9779	39.5068	+ 3.5289	9.8

Çizelge 4.8. 15 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması

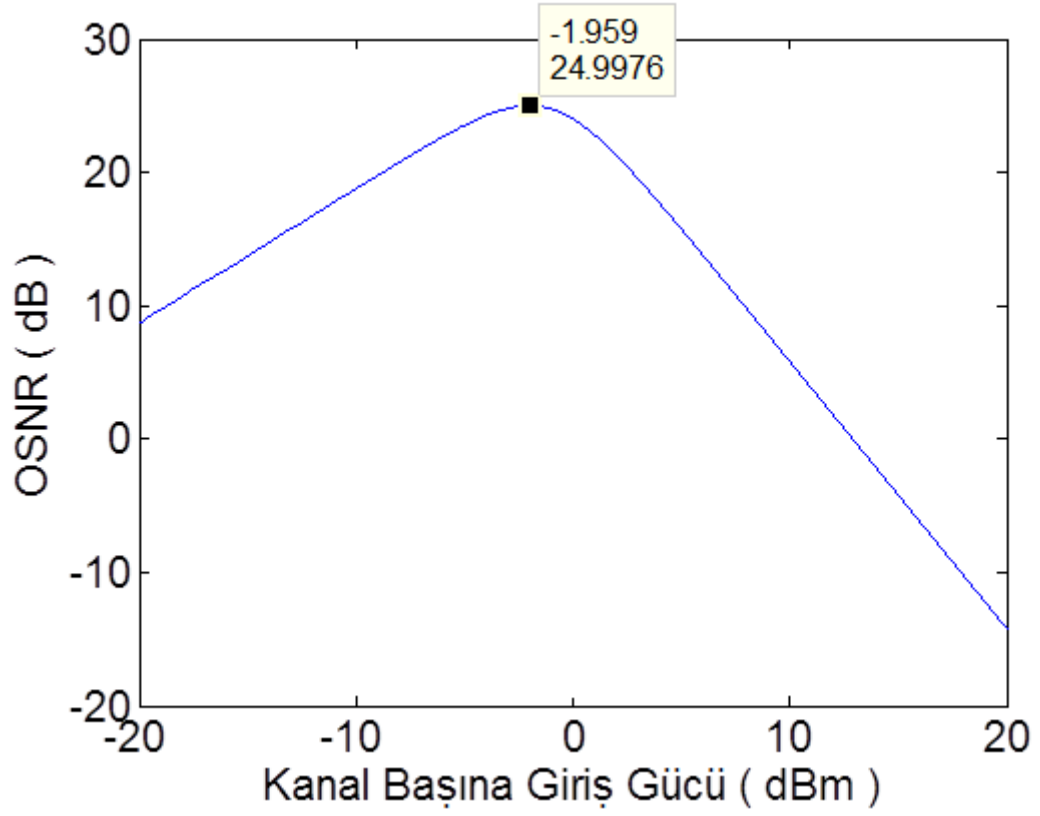
Kanal Numarası	$P_{in}/kanal = -10$ dBm için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	Optimize edilen kanal giriş güçleri için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	değişim (dB)	% değişim
1. Kanal	35.9528	39.2011	+ 3.2483	9.03
2. Kanal	35.8923	39.0346	+ 3.1423	8.75
3. Kanal	35.8786	38.9758	+ 3.0972	8.63
4. Kanal	35.89	38.9641	+ 3.0741	8.56
5. Kanal	35.9072	38.9732	+ 3.066	8.53
6. Kanal	35.8937	39.0353	+ 3.1416	8.75
7. Kanal	35.9181	38.9726	+ 3.0545	8.5
8. Kanal	35.8954	39.0149	+ 3.1195	8.69
9. Kanal	35.9213	39.0972	+ 3.1759	8.84
10. Kanal	35.9012	38.9732	+ 3.072	8.55
11. Kanal	35.9032	38.9739	+ 3.0707	8.55
12. Kanal	35.9014	39.0422	+ 3.1408	8.74
13. Kanal	35.9521	39.0282	+ 3.0761	8.55
14. Kanal	35.9542	39.1777	+ 3.2235	8.96
15. Kanal	35.989	41.5772	+ 5.5882	15.52

Çizelge 4.9. 21 kanallı sistem için OSNR değerlerinin karşılaştırılması

Kanal Numarası	$P_{in}/kanal = -10$ dBm için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	Optimize edilen kanal giriş güçleri için çıkışta elde edilen OSNR değerleri (dB)	değişim (dB)	% değişim
1. Kanal	35.8926	37.3804	+ 1.4878	4.14
2. Kanal	35.716	37.341	+ 1.625	4.54
3. Kanal	35.7021	37.3235	+ 1.6214	4.54
4. Kanal	35.644	37.3313	+ 1.6873	4.73
5. Kanal	35.7942	37.3694	+ 1.5752	4.4
6. Kanal	35.7963	37.3594	+ 1.5631	4.36
7. Kanal	35.8643	37.4057	+ 1.5414	4.29
8. Kanal	35.8903	38.1534	+ 2.2631	6.3
9. Kanal	35.886	37.7907	+ 1.9047	5.3
10. Kanal	35.9074	37.5004	+ 1.593	4.43
11. Kanal	35.8891	37.39	+ 1.5009	4.18
12. Kanal	35.9146	38.0849	+ 2.1703	6.04
13. Kanal	35.8955	37.6451	+ 1.7496	4.87
14. Kanal	35.8989	38.6362	+ 2.7373	7.62
15. Kanal	35.8938	38.3563	+ 2.4625	6.86
16. Kanal	35.9359	40.4016	+ 4.4657	12.42
17. Kanal	35.9454	37.7128	+ 1.7674	4.91
18. Kanal	35.9638	38.1697	+ 2.2059	6.13
19. Kanal	35.9818	42.9099	+ 6.9281	19.25
20. Kanal	35.9772	39.2295	+ 3.2523	9.03
21. Kanal	35.996	38.72	+ 2.724	7.56

5 kanallı sistem için Çizelge 4.6’da verilen değerlere göre optimize edilen kanal giriş güçleri için 2., 3. ve 4. kanallar bütün kanallar içerisinde en düşük OSNR değerine (41.1324 dB) sahip iken $P_{in}/kanal = -10$ dBm için en düşük OSNR değerli (35.9457 dB) kanal 3. (merkez) kanaldır. Burada OSNR değişimi 5.1867 dB yada % 14.42’dir. Çizelgelerden, önerilen yöntem ile her bir kanal için çıkış OSNR değerlerinde oldukça önemli bir artış sağlandığı söylenebilir. Benzer sonuçlar 9, 15 ve 21 kanallı sistemler için de geçerlidir. Ancak kanal sayısı arttıkça OSNR değerlerindeki artış oranları da azalmaktadır.

Yazılan yazılımı OptSim™ ile karşılaştırmak için, Şekil 4.3’ü elde etmekte kullanılan sistem değişken değerlerine göre, merkez kanalın çıkış OSNR’sinin $P_{in}/kanal$ ile değişimi Şekil 4.22’de elde edilmiştir.



Şekil 4.22. 3 kanallı sistem için merkez kanalın çıkış OSNR'ının $P_{in}/kanal$ ile değişimi.

BER ile OSNR'in ters orantılı olmasını göz önünde bulundurursak, yazılan Matlab™ tabanlı yazılımla elde edilen bu sonuçların, OptSim™ ile elde edilen Şekil 4.3'teki sonuçlarla karakteristik olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Şekilde ayrıca, merkez kanal için en uygun kanal başına giriş gücünün -1.959 dBm olduğu ve bu değer için merkez kanalın OSNR değerinin de 24.9976 dB olduğu gözükmemektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, DWDM sistemlerindeki fiber doğrusalsızlıklarını (özellikle SPM, XPM ve FWM) karakterize eden sistem değişkenleri araştırılıp sistem performansı için en uygun değişken değerleri tespit edilmiştir. Özellikle WDM teknolojisinin ve EDFA'ların kullanıma geçmesiyle sistem performansını sınırlayan en önemli etkenlerden biri olan fiber doğrusalsızlıklarını karakterize etmenin, optik fiberli iletimin performansını daha yüksek seviyeye çekmek için, önemli olduğu görülmüştür.

Optik yükselticili (EDFA'lı) büyük uzaklığa sahip WDM sistemlerinde her bir kanalın optik fibere verdiği işaret gücü önemli bir tasarım değişkenidir. Fibere gönderilen işaret gücü ne kadar büyük olursa yükselticiler arası uzaklık arttırılabilmekte ve dolayısıyla işaret ASE gürültüsünden daha az etkilenmektedir. Böylece OSNR artmaktadır. Ancak bu durum sadece ASE gürültüsü söz konusu olduğunda geçerlidir. Optik fiber doğrusalsızlıkları hesaba katıldığında kanal giriş güçlerinin ne kadar arttırılabileceği sınırlıdır. Bu sınırı belirleyen doğrusal olmayan olaylardan en önemlisi FWM'dir. Kanallar arası boşlukların eşit olduğu WDM sistemlerinde FWM nedeniyle kanallar üzerine düşen bozucu güç kanal işaretlerinin güçlerinin çarpımı ile doğru orantılıdır ve kanal işaret güçleri azalırca FWM'in etkisi de azalacaktır. Ancak optik fiberli iletimde amaç, gürültüyü en az yapmak değil OSNR'ı olabildiğince en yükseğe getirmektir. Bu amaca yönelik yapılan tez çalışmasında, FWM etkisi mevcut olan bir WDM sisteminde kanalların birbirini en az etkilemesi için gereken en uygun giriş kanal gücü değerleri belirlenmiştir. Tanıtılan bu mühendislik problemi bir optimizasyon yöntemi ile Matlab™ ortamında çözülmüştür. Optimizasyon yöntemi olarak diğer yöntemlere kıyasla daha basit, kararlı ve güvenilir olan DEA kullanılmıştır.

Tezin bilime katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Tez kapsamında, OptiSim™ yazılım programı ile veri hızları, kanallar arası boşluk, dispersiyon değişkeni ve kanal sayısı gibi çeşitli sistem değişkenleri için 10^{-9} 'luk BER kriterine göre performans açısından en uygun kanal giriş güçleri tespit edilmiştir. Programda ayrıca belirlenmiş sistem değişkenleri için BER açısından en uygun fiberin etkin öz alanı A_{eff} ve fiberin toplam uzunluğu L değerleri de

belirlenmiştir. Bununla beraber göz diyagramı performans değerlendirmesi de yapılmıştır.

- Bu çalışmada güç tahsis problemi literatürde ilk defa olarak optik fiberli haberleşme sistemlerine uygulanmıştır.
- WDM haberleşmesinde tanıtılan bu güç tahsis problemi ışığında Matlab™ tabanlı bir yazılım yazılmıştır. Yazılan yazılım ile çeşitli optik fiber değişkenleri için en uygun kanal giriş güçleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Ayrıca, bu program hiçbir ek cihaz kullanmadan sadece kanal giriş güçlerinin denetimiyle FWM ve ASE'nin birleşik etkisinin azaltılabileceğini göstermiştir.
- Bir WDM sisteminde doğrusal olmayan etkileri bastırmak için en etkin yöntem kanal giriş güçlerini olabildiğince en küçüğe çekmektir. Ancak bu sefer yükselticinin ASE gürültüsü baskın olabilmekte ve çıkıştaki OSNR'ı kötüleştirmektedir. Bu durumda FWM ve ASE arasında bir ödün vermeden söz etmek mümkündür. Çalışmada, belirlediğimiz en küçük güç sınır değerleri için FWM'in gücü en azdır. Fakat OSNR açısından bakıldığında yazılan yazılımın sağladığı en uygun giriş güçlerinden elde edilen her bir kanalın fiberin çıkışındaki OSNR değerinin, her bir kanalın en küçük giriş gücü sınır değerleri için elde edilenden çok daha iyi olduğu belirlenmiştir (Hiçdurmaz ve ark. 2013).
- Şu an mevcut ticari yazılım programlarında her bir kanal için optik fiberin girişine uygulanabilecek en uygun gücü belirleme özelliklerinin bulunmaması, yazılan yazılımı ticari anlamda da değerli kılmaktadır.

Bu tez araştırmasında elde edilen tecrübeler ışığında yazılan yazılımın yeteneklerini daha da geliştirmek için aşağıdaki çalışmaların sürdürülmesi planlanmaktadır.

- Bu çalışmada yazılan yazılım optik işaretlerin fiberde yol aldığı süre zarfında sadece FWM ve ASE gürültülerinden etkilendiği varsayılarak gerçekleştirilmiştir. Optik fiberden kaynaklanan diğer doğrusal ve doğrusal olmayan etkiler ihmal edilmiştir. Sonraki çalışmalarda hem bu etkiler hem de bu etkilerin yüksek dereceden etkileri yazılıma dahil edilecek ve yazılan yazılım pratik açıdan daha da güvenilir olacaktır.
- Optik fiberli haberleşme sistemlerinde ilk defa tanıtılan güç tahsis probleminin deneysel olarak da araştırılabilmesinin temeli oluşturulmuştur. Mesela, kurulu bir WDM sisteminde fiberin girişindeki kanal güçlerini ve fiberin çıkışındaki her bir kanalın OSNR'ını denetleyen bir elektronik kart sayesinde her bir kanal için fiberin

girişine verilebilecek güç seviyeleri performans açısından en uygun şekilde belirlenebilecektir. Bu sayede reel bir uygulama gerçekleştirilmiş olacaktır.

- Bu çalışmada literatüre yeni bir optimizasyon problemi tanımlandığından, bu problem için mevcut optimizasyon algoritmalarından hangisinin daha güvenilir ve en iyi sonucu vereceği araştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G.P., 2001.** Application of Nonlinear Fiber Optics. Academic Press, USA.
- Agrawal, G.P., 2007.** Nonlinear Fiber Optics. Fourth Edition. Academic Press, USA.
- Agrawal, G. P., 2010.** Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley&Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Bergano, N. S., et al., 1999.** 640 Gb/s transmission of sixty-four 10 Gb/s WDM channels over 7200 km with 0.33 (bits/s)/Hz spectral efficiency. *Proceedings of optical Fiber Communications Conferences*. Paper PD2.
- Betti, S. and Giaconi, M., 2001.** Analysis of the cross-phase modulation effect in WDM optical systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.13, no.1.
- Betti, S. and Giaconi, M., 2001.** Effect of the cross-phase modulation on WDM optical systems: Analysis of fiber propagation. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.13, no.4.
- Betti, S. and Giaconi, M., 2001.** Analysis of the cross-phase modulation in dispersion compensated WDM optical fiber systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.13, no.12.
- Bogoni, A. and Poti, L., 2004.** Effective channel allocation to reduce inband FWM crosstalk in DWDM transmission systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.10, no.2.
- Boskovic, A., Ten, S. and Da Silva, V.L., 1998.** FWM penalty reduction in dense WDM systems through channel detuning. *ECOC98*, Madrid, Spain.
- Chang, K. D., Yang, G. C. and Kwong, W. C., 2000.** Determination of FWM products in unequal-spaced-channel WDM lightwave systems. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no.12.
- Chraplyvy, A.R., 1990.** Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, no.10.
- Chomycz, B., 2009.** Planning Fiber Optic Networks.-Mc Graw Hill, USA.
- Dong, Z., Li, X., Yu, J. and Chi, N., 2012.** 6 x 128 Gb/s Nyquist-WDM PDM-16QAM generation and transmission over 1200 km SMF-28 with SE of 7.47 b/s/Hz. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no.24.

Elbers, J. P., Farbert, A., Scheerer, C., Glingener, C. and Fischer, G., 2001. Reduced model to describe SPM-limited fiber transmission in dispersion-managed lightwave systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no.2.

Elbers, J. P. and Glingener, C., 2001. Efficient design of high-capacity dense wavelength-division multiplex systems. *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, 55, no.5, 295-304.

Faisal, M., Islam M. N. and S. P. Majumder, 2006. Performance comparison of wavelength shift keying WDM system and conventional on-off WDM system in presence of four-wave mixing, *Optik 117*.

Forghieri, F., Tkach, R.W., Chraplyvy, A.R., and Marcuse, D., 1994. Reduction of Four-Wave Mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.6, no.6.

Forghieri, F., Tkach, R.W. and Chraplyvy, A.R., 1995. WDM systems with unequally spaced channels. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no.5.

Forghieri, F., Tkach, R.W. and Chraplyvy, A.R., 1997. Fiber nonlinearities and their impact on transmission systems. In *Optical Fiber Telecommunications IIIA*, Academic Press, USA.

Goebel, B. and Hanik, N., 2008. Analytical calculation of the number of four-wave mixing products in optical multichannel communication systems. *Technische Universität München*, Technical Report.

Gnauck, A.H., et al., 2002. 2.5 Tb/s (64 x 42.7 Gb/s) transmission over 40 x 100 km NZDSF using RZ-DPSK format and all Raman amplified spans. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*.

Gnauck, A.H., Tkach, R.W., Chraplyvy, A.R. and Li, T., 2008. High-capacity optical transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no.9.

Hansryd, J., Sunnerud, H., Andrekson, P. A. and Karlsson, M., 2000. Impact of PMD on four-wave mixing induced crosstalk in WDM systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.12, no.9: 1261-1263.

Hiçdurmaz, B., Karlık, S. E., Yılmaz, G., 2010. Optik Fiberli Haberleşme Sistemlerinde SPM ve XPM Olaylarının Analizi. *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2010 Bildiriler CD'si*.

Hiçdurmaz, B., Karlık, S.E., Yılmaz, G., 2012. Doğrusal olmayan etkiler altındaki bir WDM sistemin farklı veri iletim hızları için performans analizi. *ELECO2012, Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*.

- Hiçdurmaz, B., Temurtaş, H., Karlık, S.E., Yılmaz, G., 2013.** A novel method degrading the combined effect of FWM and ASE noise in WDM systems containing in-line optical amplifiers. *Optik*. (Kabul edildi)
- Hill, K.O., Johnson, D.C., Kawasaki, B.S. and MacDonald, R.I., 1978.** CW three-wave mixing in single mode optical fibers. *J. Appl. Phys*, vol. 49, no.10:5098-5106.
- Hui, R., Demarest, K.R., Allen, C.T., 1999.** Cross-phase modulation in multispan WDM optical fiber systems. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no.6.
- Hwang, B., and Tonguz, O.K., 1998.** A generalized suboptimum unequally spaced channel allocation technique-Part I: In IM/DD WDM systems. *IEEE transactions on communications*, vol. 46, no.8.
- Inoue, K and Toba, H., 1991.** Error-rate degradation due to fiber four-wave mixing in four-channel FSK direct-detection transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, no.1.
- Inoue, K.,1992.** Four-Wave-Mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no.11.
- Inoue, K.,1992.** Polarization effect on four-wave mixing efficiency in a single mode fiber. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.28, no.4.
- Inoue, K., 1992.** Reduction of fiber four-wave mixing influence using frequency modulation in multichannel IM/DD transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 12.
- Inoue, K., 1992.** Phase-mismatching characteristic of Four-Wave-Mixing in fiber lines with multistage optical amplifiers. *Optics Letters*, vol.17, no.11.
- Inoue, K., 1993.** Suppression technique for fiber four-wave mixing using optical multi-/demultiplexers and a delay line. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no. 3.
- Inoue, K., 1993.** Fiber four-wave mixing suppression using two incoherent polarized lights. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no. 12.
- Inoue, K., 1994.** Experimental study on channel crosstalk due to fiber four-wave mixing around the zero-dispersion wavelength. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 6:1023-1028.
- Inoue, K and Toba, H., 1995.** Fiber four-wave mixing in multi-amplifier systems with nonuniform chromatic dispersion. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 1:88-93.
- Kartalopoulos, S. V., 2000.** Introduction to DWDM Technology. Wiley-IEEE Press, USA.

- Kaur, G., Singh, M.L. and Patterh, M.S., 2009.** Theoretical investigations of the combined effect of fibre nonlinearities, amplifier and receiver noise in a DWDM transmission system. *J. Opt. Fiber Comm. Res.*
- Kaur, G., Singh, M.L. and Patterh, M.S., 2009.** Effect of fibre nonlinearities in a WDM transmission system. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics.*
- Kaur, G. and Singh, M.L., 2009.** Effect of four-wave mixing in a WDM optical fibre systems. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics.*
- Kaur, G., Singh, M.L., Patterh, M.S., 2010.** Impact of fiber nonlinearities in optical DWDM transmission systems at different data rates. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics.*
- Kaur, G., Singh, M.L. and Patterh, M.S., 2010.** Analysis of significant factors in DWDM optical communication systems. *Journal of Engineering Design and Technology*, vol.8, no.1.
- Kawanami, K., Ishizawa, Y., Imai, M., Kawabata, K. and Namihira, Y., 2004.** Polarization dependence of four-wave mixing in dispersion-shifted fibers and its application to nonlinear refractive index measurements using maximum mixing efficiency. *Electronics and Communications in Japan, Part 2*, vol. 87, no.3: 130-138.
- Keiser, G., 2000.** Optical Fiber Communications. McGraw-Hill Co, Singapore.
- Killey, R.I., Thiele, H.J., Mikhailov, V. and Bayvel, P., 2000.** Prediction of transmission penalties due to cross-phase modulation in WDM systems using a simplified technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.12, no.7.
- Killey, R.I., Thiele, H.J., Mikhailov, V. and Bayvel, P., 2000.** Reduction of intrachannel nonlinear distortion in 40 Gb/s-based WDM transmission over standart fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.12, no.12.
- Kwong, W. C., Yang, G. C. And Chang, K. D., 2001.** Locating FWM crosstalks in high-capacity WDM lightwave systems. *Communications, IEEE International Conference.*
- Kumar, S., and Yang, D., 2005.** Second order theory for self phase modulation and cross-phase modulation in optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no.6.
- Lee, Y., Park, J., 2006.** Nonlinear distortion reduction by SPM and XPM chirp cancellation in NZ-DSF based DWDM transmissions. *Photon. Netw. Commun.*, vol.12, 219-226.
- Lyubomirsky, I., Qui, T., Roman, J., Nayfeh, M., Frankel, M.Y. and Taylor, M.G., 2003.** Interplay of fiber nonlinearity and optical filtering in ultradense WDM. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.15, no.1.

Madani, F.M., and Kikuchi, K., 1999. Design theory of long-distance WDM dispersion-managed transmission system. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no.8.

Maeda, M.W., Sessa, W.B., Way, W.I., Yi-Yan,A., Curtis, L., Spicer, R. and Laming, R.I., 1990. The effect of Four-Wave Mixing in fibers on optical frequency-division multiplexed systems. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, no.9.

Marcuse, D, Chraplyvy, A.R. and Tkach, R.W., 1994. Dependence of cross-phase modulation on channel number in fiber WDM systems. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no.5.

Miyamoto, Y., et al.,1999. 320 Gbit/s (8 x 40 Gbit/s) WDM transmission over 367 km with 120 km repeater spacing using carrier-suppressed return to zero format. *Electronics Letters*, vol. 35, no.23, pp. 2041-2042.

Mutafungwa, E. and Halme, S. J., 2001. On the use of optical spreading codes to design DWDM systems with reduced FWM crosstalk, *Optics Communications* 198.

Nagazawa M., Suzuki, S., Kubota H. and Yamada, E., 1996. 60 Gbit/s (20 Gbit/s x 3) unequally spaced channels soliton transmission over 10,000 km using in-line synchronous modulation and optical filtering. *Electronics Letters*, vol.3, no.18, pp. 1686-1688.

Noshad, M. and Rostami, A., 2012. FWM minimization in WDM optical communication systems using the asymmetrical dispersion-managed fibers, *Optik* 123.

Ohara T., et al., 2006. Over 1000 channel ultradense WDM transmission with supercontinuum multicarrier source. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no.6.

OptSim, Application Notes and Examples, Rsoft Design Group,Inc.

Pachnicke, S., Reichert, J. and Voges, E., 2006. Impact of polarization mode dispersion and fiber nonlinearities on four-wave mixing efficiency. *Opto-Electronics and Communication Conference*.

Paradiso, L., Boffi, P., Marazzi, L., Vecchia, N. D., Artiglia, M. and Martinelli, M., 2004. Separate evaluation of nonlinearity-due Q penalties in long-haul very dense WDM optical systems. *Optical Networks and Technologies*, vol. 164:313-318.

Price, K. V., Storn, R. M. and Lampinen, J. A., 2005. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Qing, A., 2009. Differential Evolution: Fundamentals and Applications in Electrical Engineering. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.

Sano, A., et al, 2010. 69.1-Tb/s (432 x 171-Gb/s) C- and extended L-band transmission over 240 km using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection. *Optical Fiber Communication Conference*, Paper PDPB7.

Sano, A., et al, 2012. 102.3-Tb/s (224 x 548-Gb/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone. *Optical Fiber Communication Conference*, Paper PDP5C.

Schadt, D.G., and Stephens, T.D. 1992. Power limitations due to Four Wave Mixing effects in frequency division multiplexed coherent systems using cascaded optical amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no.11.

Schneider, T., 2004. Nonlinear Optics in Telecommunications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.

Sharping, J. E., Fiorentino, M., Coker, A., Kumar, P. and Windeler, R.S. 2001. Four-wave mixing in microstructure fiber. *Optics Letters*, vol. 26, no.14.

Sheetal, A., Sharma A.K., Kaler, R.S., 2010. Impact of optical modulation formats on SPM limited fiber transmission in 10 and 40 Gb/s optimum dispersion-managed lightwave systems. *Optik 121*.

Shibata, N., Braun, R.P. and Waarts, R.G., 1987. Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through Four-Wave Mixing in a single mode optical fiber. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-23, no.7.

Shibata, N., Nosu, K., Iwashita, K. and Azuma, Y., 1990. Transmission limitations due to fiber nonlinearities in optical FDM systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no.6.

Shtaif, M. and Eiselt, M., 1998. Analysis of intensity interference caused by cross-phase modulation in dispersive optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no.7.

Singh, A., Sharma, A. K. and Kamal, T.S., 2008. Four-wave mixing analysis in WDM optical communication systems with higher-order dispersion. *Optik 119*.

Singh, A, Sharma, A.K. and Kamal, T.S., 2009. Investigation on modified FWM suppression methods in DWDM optical communication system. *Optics Communications*.

Singh, A., Sharma, A. K., Kamal, T.S. and Sharma, M., 2009. Simulative investigations of power penalty for DWDM link in the presence of FWM. *Optik 120*.

Singh, M. L., 2010. Effect of pulse walk off and data formats on stimulated Raman scattering in fiber optic communication systems. *Optik 121*.

- Singh, G., Singh, M. and Singh, H., 2011.** RWA scheme minimizing FWM effect in a wide area optical network. *Optik* 122.
- Song, K. and Premaratne, M., 2000.** Effects of SPM, XPM, and Four-Wave-Mixing in L-band EDFAs on fiber-optic signal transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.12, no.12.
- Song, S., Allen, C. T., Demarest, K. R. and Hui, R., 1999.** Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no.11: 2285-2290.
- Song, S., 2000.** Higher-order four-wave mixing and its effect in WDM systems. *Optics Express* 166, vol.7, no.4.
- Song, S., 2001.** The number of Four-Wave Mixing (FWM) waves in WDM systems and its applications. *Lasers and Electro-Optics Society (LEOS)*.
- Stolen, R.H., 1980.** Nonlinearity in fiber transmission. *Proceedings of the IEEE*, vol.68, no.10.
- Suzuki, H., Fujiwara, M., Takachio, N., Iwatsuki, K., Kitoh, T. and Shibata, T., 2002.** 12.5 GHz spaced 1.28 Tb/s (512-channel x 2.5 Gb/s) super-dense WDM transmission over 320-km SMF using multiwavelength generation technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 3.
- Takara, H., Ohara, T. and Sato K., 2003.** Over 1000 km DWDM transmission with supercontinuum multi-carrier source. *Electronics Letters*, vol. 39, no.14.
- Takara, H., et al., 2003.** 124 nm seamless bandwidth, 313 x 10 Gb/s DWDM transmission. *Electronics Letters*, vol. 39, no.4, pp. 382-383.
- Thing, V., L., L., Shum, P. and Rao, M. K., 2003.** Channel allocation algorithm for WDM systems. *Optics Express*, vol. 11, no.11.
- Tokle, T, Peucheret, C. and Jeppesen, P., 2003.** Advanced modulation formats in 40 Gbit/s optical communication systems with 80 km fibre spans. *Optics Communications*.
- Toulouse, J., 2005.** Optical nonlinearities in fibers: review, recent examples, and systems applications. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no.11.
- Vareille, G., et al., 1999.** 340 Gb/s (34 x 10 Gb/s, 50 GHz spacing DWDM) straight line transmission over 6380 km with full system implementation assessment. *Proceedings of Optical Fiber Communications Conferences*. Paper PD18.
- Waarts, R.G. and Braun, R.P., 1985.** Crosstalk due to stimulated Brillouin scattering in monomode fibre. *Electronics Letters*, vol.21, no.23.

- Waarts, R.G., Braun, R.P., 1986.** System limitations due to four-wave mixing in single-mode optical fibers. *Electronic Letters*, vol.22, no16.
- Wang, J., Tang, W. and Zhou, W., 1996.** Cancellation of waves generated by four-wave mixing in amplified fibre line. *Optics Communications* 135, 238-240.
- Wu, Mingchia and Way, W.I., 2004.** Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no.6.
- Xu, B. and Pearce M.B., 2003.** Comparison of FWM and XPM-induced crosstalk using the volterra series transfer function method. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no.1.
- Yamamoto, T. and Nakazawa, M., 1997.** Highly efficient four-wave mixing in an optical fiber with intensity dependent phase matching. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9. no. 3.
- Zhou, X., et al, 2010.** 64 Tb/s (640 x 107-Gb/s) PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post- transmission digital equalization. *Proc. Opt. Fiber Comm. Conf. Paper PDPB9*.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Bahadır Hiçdurmaz
Doğum Yeri ve Tarihi : Kütahya, 17.04.1978
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kütahya Lisesi, 1995
Lisans : Osmangazi Üniversitesi, 2001
Yüksek Lisans : Dumlupınar Üniversitesi, 2006

Çalıştığı Kurumlar ve Yılları : Dumlupınar Üniversitesi 2002-2007,
Uludağ Üniversitesi, 2007-...

İletişim (e-posta) : bhicdurmaz@uludag.edu.tr

Yayımları (SCI ve diğer) :

Hiçdurmaz, B., Temurtaş, H., Karlık, S.E., Yılmaz, G., 2013. A novel method degrading the combined effect of FWM and ASE noise in WDM systems containing in-line optical amplifiers. *Optik*. (Kabul edildi).

Hiçdurmaz, B., Karlık, S.E., Yılmaz, G., 2012. Doğrusal olmayan etkiler altındaki bir WDM sistemin farklı veri iletim hızları için performans analizi. *ELECO2012, Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*.

Hiçdurmaz B., Özzaim C, 2011. Dağılmış parametrelili kuvvetlendiricinin bilgisayar destekli tasarımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 16, Sayı 2*.

Ergüney, N., **Hiçdurmaz, B.**, Karlık, S.E., Yılmaz, G., 2011. Dalga boyu bölmeli çoğullama sistemlerinde dört dalga karışımı olayının iletim performansına etkisinin analizi. *Çankaya University Journal of Science and Engineering*, vol. 8, No. 2, pp. 263-275.

Hiçdurmaz, B., Karlık, S. E., Yılmaz, G., 2010. Optik fiberli haberleşme sistemlerinde SPM ve XPM olaylarının analizi. *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2010 Bildiriler CD'si*.

Ergüney N., **Hiçdurmaz, B.**, Karlık, S. E., Yılmaz, G., 2010. WDM haberleşme sistemlerinde dört dalga karışımı olayını tetikleyen etkenlerin analizi. *Çankaya Üniversitesi 3. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, pp. 447-452.