



**OPTİK FİBERLERDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN OLAYLARIN
TEK VE ÇOK SEGMENTLİ DWDM UZAK MESAFE
İLETİŞİM SİSTEMLERİNİN PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ
BİRLEŞİK ETKİLERİNİN MODELLENMESİ VE
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Abbas YILDIRIM (Abbas Yuldurum SALEH)



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OPTİK FİBERLERDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN OLAYLARIN TEK VE
ÇOK SEGMENTLİ DWDM UZAK MESAFE İLETİŞİM SİSTEMLERİNİN
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ BİRLEŞİK ETKİLERİNİN MODELLENMESİ
VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Abbas YILDIRIM (Abbas Yuldurum SALEH)
0009-0006-5106-9210

Doç. Dr. Sait Eser KARLIK
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

OPTİK FİBERLERDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN OLAYLARIN TEK VE ÇOK SEGMENTLİ DWDM UZAK MESAFE İLETİŞİM SİSTEMLERİNİN PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ BİRLEŞİK ETKİLERİNİN MODELLENMESİ VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Abbas YILDIRIM (Abbas Yuldurum SALEH)

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

Doğrusal olmayan olayların etkisi optik haberleşme sistemlerinin performansını kısıtlamaktadır. Yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM) sistemlerde öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM) ve dört dalga karışımının (FWM) birleşik etkisi, doğrusal olmayarak optik olayların karmaşık hali, test ekipmanlarının sınırlı olması ve uzak mesafe ölçümlerindeki zorluklar nedeniyle, modelleme ve benzetimlerle incelenebilmektedir. Ayrıca, literatürdeki WDM tabanlı sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisini inceleyen makale ve yayın sayısı sınırlıdır. Genellikle, yayınlarda birleşik etki, SPM, XPM ve FWM'nin tekli etkilerinden elde edilen sonuçların toplanmasıyla belirlenmektedir. Bu nedenle SPM, XPM ve FWM arasındaki etkileşim genel olarak ihmal edilmektedir. Bu tezde, uzak mesafeli DWDM sistemlerinde segment açısından iki tür sistem incelenmiştir. Tek segmentli DWDM sistemlerde, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi ile FWM yalın etkisi modellenmiş olup elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İşaret çaprazkarışım oranının (SXR), 15, 31 ve 63 kanallı sistemlerde kanalların giriş gücü ve kanal aralıklarındaki değişime göre değişimi gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre SPM+XPM+FWM etkisi, FWM yalın etkisine göre baskın biçimde SXR değerini daha fazla etkilemektedir. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici (EDFA) kullanan çok segmentli sistemlerde, birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında ve birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında modellemelerden elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. 63 kanallı DWDM sistemlerde merkez kanalları etkileyen doğrusal olmayan olayların birleşik etkisi altında optik işaret gürültü oranının (OSNR), kanalların giriş gücü, kanal aralıkları ve kullanılan EDFA sayısı kriterlerine göre değişimi gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisine göre baskın biçimde OSNR değerini daha fazla etkilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: SPM, XPM, FWM, SRS, ASE gürültüsü, DWDM, EDFA, Optik fiber.

2024, xvi + 120 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

MODELING AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COMBINED IMPACTS OF NONLINEAR PHENOMENA IN OPTICAL FIBERS ON THE PERFORMANCE OF SINGLE-SPAN AND MULTI-SPAN DWDM LONG-HAUL COMMUNICATION SYSTEMS

Abbas YILDIRIM (Abbas Yuldurum SALEH)

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sait Eser KARLIK

The impact of nonlinear phenomena limits the performance of optical communication systems. The combined impact of self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM) in dense wavelength division multiplexed (DWDM) systems has generally been analyzed with modelling and simulations in the literature because of the complexity of nonlinear optical phenomena, limitations in test equipments and difficulties encountered in long-distance measurements. Furthermore, the number of researches investigating the combined impact of SPM+XPM+FWM in WDM-based systems is rather limited. The combined impact focused on at those researches is generally determined by summing results obtained from the single effects of SPM, XPM and FWM. Therefore, the interaction among SPM, XPM and FWM has generally been neglected. In this thesis, two types of systems have been considered in long-distance DWDM systems, i.e. single-span and multi-span systems. In single-span DWDM systems, the combined impact of SPM+XPM+FWM and the single FWM impact have been modelled and simulation results have been compared. The signal-to-crosstalk ratio (SXR) variations according to varying channel input powers and channel spacings in 15-, 31- and 63-channel systems under the combined impact of nonlinearities have been observed. The combined impact of SPM+XPM+FWM has been found to be more dominant and significantly affecting the SXR with respect to the single impact of FWM. In multi-span systems using erbium doped fiber amplifiers (EDFAs), the combined impact of SPM+XPM+FWM+SRS+ASE noise and the combined impact of FWM+SRS+ASE noise have been compared using simulation results. In 63-channel DWDM systems, under the combined impact of nonlinearities affecting center channels, the variation of optical signal-to-noise ratio (OSNR) with variations in input powers of channels, channel spacings and numbers of EDFAs has been observed. The combined impact of SPM+XPM+FWM+SRS+ASE noise has been found to be more dominant and significantly affecting the OSNR with respect to the combined impact of FWM+SRS+ASE noise.

Key words: SPM, XPM, FWM, SRS, ASE noise, DWDM, EDFA, Optical fiber.

2024, xvi + 120 pages.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince her konuda desteğini eksik etmeyen ve akademik çalışmalarımda bugüne erişmemde emeği geçen saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Sait Eser KARLIK’a minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez dönemine başladığım günden itibaren, bu çalışmaya başlangıcından bitimine kadar yardımcı olan ve değerli katkılarıyla çalışmama yön veren saygıdeğer tez izleme komitesi heyetindeki kıymetli hocalarım Doç. Dr. Ömer ZOR ve Doç. Dr. Abdurrahman GÜNDAY’a minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Türkiyede bulunduğum 11 yıl boyunca tüm zor günlerimde desteğini eksik etmeyen, çok değerli fikirleriyle doğru kararlar almamı sağlayan, her daim başarının yollarını bize gösteren çok kıymetli hocam Prof. Dr. Güneş YILMAZ’a ayrıyeten minnet ve şükranlarımı sunarım.

Abbas YILDIRIM (Abbas Yuldurum SALEH)
24/06/2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Kaynak Araştırması.....	5
2.2. Kuramsal Temeller.....	13
2.2.1. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS).....	13
2.2.2. Öz Faz Modülasyonu (SPM).....	16
2.2.3. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)	18
2.2.4. Optik Kuvvetlendirici İçermeyen Tek Segmentli WDM Haberleşme Sistemlerinde Dört Dalga Karışımı (FWM).....	21
2.2.5. Optik Kuvvetlendirici İçermeyen Tek Segmentli WDM Haberleşme Sistemlerinde SPM ve XPM'in Birleşik Etkisi Altında FWM.....	25
2.2.6. Erbium Katkılı Fiber Kuvvetlendirici (EDFA).....	26
2.2.7. Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım (ASE) Gürültüsü.....	27
2.2.8. EDFA Kullanan Çok Segmentli DWDM Sistemlerinde FWM	30
2.2.9. EDFA Kullanan Çok Segmentli DWDM Sistemlerinde SPM+XPM+FWM +SRS+ASE Gürültüsü ve FWM+SRS+ASE Gürültüsü Birleşik Etkileri.....	31
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	33
3.1. Benzetim Modeli.....	33
3.2. SXR-Giriş Gücü Benzetim Koşulları.....	36
3.3. SXR-Kanal Aralığı Benzetim Koşulları.....	37
3.4. OSNR-Giriş Gücü Benzetim Koşulları.....	37
3.5. OSNR-Kanal Aralığı Benzetim Koşulları.....	38
3.6. OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Koşulları.....	39
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	40
4.1. SXR-Giriş Gücü Benzetim Sonuçları	40
4.2. SXR-Kanal Aralığı Benzetim Sonuçları	48
4.3. OSNR-Giriş Gücü Benzetim Sonuçları	60
4.4. OSNR-Kanal Aralığı Benzetim Sonuçları	77
4.5. OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Sonuçları	87
5. SONUÇ	107
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	120

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

$\lambda_{i,j,k}$	i., j., k. kanalın dalgaboyu
$f_{i,j,k}$	i., j., k. kanalın frekansı
d_{ijk}	Dejenerasyon faktörü
f_{ijk}	Dört dalga karışımından üretilen dalganın frekansı
g_{Rmax}	Maksimum Raman kazancı
L_{eff}	Fiberin etkin uzunluğu
A_{eff}	Fiberin etkin alanı
α	Optik fiberin zayıflama katsayısı
L	Optik fiber uzunluğu
$\sigma_{SPM}^{(L)}$	L konumundaki Gauss darbesinin etkin (RMS) darbe genişliği
σ_0	Fiberin başlangıcındaki darbe genişliği
$\bar{\lambda}$	Ortalama dalgaboyu
$\bar{\gamma}$	Ortalama doğrusalsızlık katsayısı
γ	Doğrusalsızlık katsayısı
$P_{i,j,k}$	i., j., k. kanalın giriş gücü
η_{ijk}	FWM etkinliği
ΔB_{ijk}	Faz uyumsuzluğu faktörü
c	Işığın boşluktaki hızı
λ_c	Merkez kanalın dalgaboyu
D_c	Fiberin kromatik dispersiyon katsayısı
$dD_c(\lambda_c)/d\lambda$	Fiberin kromatik dispersiyon eğimi
$\Delta\beta'$	SPM ve XPM etkisi altındaki faz uyumsuzluk faktörü
η'	SPM ve XPM etkisi altında FWM etkinliği
P_{FWM}	FWM gücü
P_{ASE}	ASE gürültü gücü
n_{sp}	Popülasyon ters birikim faktörü
G	Kuvvetlendirici kazancı
h	Planck sabiti
ℓ	Segment uzunluğu
$\Delta\phi_m$	Modülasyon faz farkı

Kısaltmalar

Açıklama

ASE	Amplified Spontaneous Emission
BER	Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım
DRZ	Bit Error Rate
DP-QPSK	Bit Hata Oranı
	Duobinary Return to Zero
	İkili Sıfıra Dönüştürme
	Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying
	İkili Polarizasyon-Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama

DSP	Digital Signal Processing Sayısal İşaret İşleme
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici
FWM	Four Wave Mixing Dört Dalga Karışımı
ITU-T	Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union Uluslararası Haberleşme Birliği-Haberleşme Standardizasyon Birimi
NLS	Nonlinear Schrödinger Doğrusal Olmayan Schrödinger
NRZ	Non Return to Zero Sıfıra Dönüşsüz
NZDSF	Non-Zero Dispersion Shifted Fiber Sıfır Olmayan Dispersiyonu Kaydırılmış Fiber
OPM	Optical Performance Monitoring Optik Performans Gözleme
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio Optik İşaret-Gürültü Oranı
PON	Passive Optical Network Pasif Optik Ağ
RWA	Routing and Wavelength Assignment Yönlendirme ve Dalgaboyu Atama
RZ	Return to Zero Sıfıra Dönüslü
SBS	Stimulated Brillouin Scattering Uyarılmış Brillouin Saçılması
SPM	Self Phase Modulation Öz Faz Modülasyonu
SRS	Stimulated Raman Scattering Uyarılmış Raman Saçılması
SSMF	Standard Single Mode Fiber Standart Tek Modlu Fiber
SXR	Signal-to-Crosstalk Ratio İşaret Çaprazkarışım Oranı
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing Aşırı Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
WDM	Wavelength Division Multiplexing Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
XPM	Cross Phase Modulation Çapraz Faz Modülasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	SRS etkisi kaynaklı optik güç transferi..... 14
Şekil 2.2.	Stokes ve Anti-Stokes Raman saçılması..... 15
Şekil 2.3.	Dalgaboyu aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin dalgaboyları..... 22
Şekil 2.4.	Frekans aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin frekansları..... 22
Şekil 2.5.	Optik iletimde son kuvvetlendirici, hat içi kuvvetlendirici, ön kuvvetlendirici olarak EDFA kullanımı..... 27
Şekil 2.6.	ASE fotonlarının oluşumu..... 28
Şekil 2.7.	ASE gürültü spektrumu..... 29
Şekil 3.1.	Benzetim modelleri için dikkate alınan N kanallı DWDM sisteminin blok şeması..... 36
Şekil 4.1.	12,5 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P _{giriş} benzetim eğrileri..... 40
Şekil 4.2.	25 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P _{giriş} benzetim eğrileri..... 41
Şekil 4.3.	50 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P _{giriş} benzetim eğrileri..... 41
Şekil 4.4.	100 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P _{giriş} benzetim eğrileri..... 42
Şekil 4.5.	12,5 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P _{giriş} benzetim eğrileri..... 42
Şekil 4.6.	25 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P _{giriş} benzetim eğrileri..... 43
Şekil 4.7.	50 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P _{giriş} benzetim eğrileri..... 43

Şekil 4.8.	100 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	44
Şekil 4.9.	12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	44
Şekil 4.10.	25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	45
Şekil 4.11.	50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	45
Şekil 4.12.	100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	46
Şekil 4.13.	$P_{giriş} = 0.1$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	48
Şekil 4.14.	$P_{giriş} = 0.5$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	49
Şekil 4.15.	$P_{giriş} = 1$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	49
Şekil 4.16.	$P_{giriş} = 3$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	50
Şekil 4.17.	$P_{giriş} = 5$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	50
Şekil 4.18.	$P_{giriş} = 0.1$ mW için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	51

Şekil 4.19.	$P_{giriş} = 0.5$ mW için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	51
Şekil 4.20.	$P_{giriş} = 1$ mW için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	52
Şekil 4.21.	$P_{giriş} = 1$ mW için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	52
Şekil 4.22.	$P_{giriş} = 5$ mW için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	53
Şekil 4.23.	$P_{giriş} = 0.1$ mW için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	53
Şekil 4.24.	$P_{giriş} = 0.5$ mW için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	54
Şekil 4.25.	$P_{giriş} = 1$ mW için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	54
Şekil 4.26.	$P_{giriş} = 3$ mW için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	55
Şekil 4.27.	$P_{giriş} = 5$ mW için 63 kanallı DWDM tek segment uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, $SXR-\Delta f$ benzetim eğrileri.....	55
Şekil 4.28.	12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, $OSNR-P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	61

Şekil 4.29.	12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	61
Şekil 4.30.	12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	62
Şekil 4.31.	12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	62
Şekil 4.32.	12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	63
Şekil 4.33.	25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	63
Şekil 4.34.	25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	64
Şekil 4.35.	25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	64
Şekil 4.36.	25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	65

Şekil 4.37.	25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	65
Şekil 4.38.	50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	66
Şekil 4.39.	50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	66
Şekil 4.40.	50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	67
Şekil 4.41.	50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	67
Şekil 4.42.	50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	68
Şekil 4.43.	100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	68
Şekil 4.44.	100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	69

Şekil 4.45.	100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	69
Şekil 4.46.	100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	70
Şekil 4.47.	100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri.....	70
Şekil 4.48.	12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	87
Şekil 4.49.	25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	88
Şekil 4.50.	50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	88
Şekil 4.51.	100 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	89
Şekil 4.52.	12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	89

Şekil 4.53.	25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	90
Şekil 4.54.	50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	90
Şekil 4.55.	100 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	91
Şekil 4.56.	12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	91
Şekil 4.57.	25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	92
Şekil 4.58.	50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	92
Şekil 4.59.	100 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	93
Şekil 4.60.	12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 3$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri.....	93

- Şekil 4.61. 25 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 3 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri..... 94
- Şekil 4.62. 50 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 3 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri..... 94
- Şekil 4.63. 100 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 3 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri..... 95
- Şekil 4.64. 12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri..... 95
- Şekil 4.65. 25 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri..... 96
- Şekil 4.66. 50 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri..... 96
- Şekil 4.67. 100 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri..... 97

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Doktora tez konusu ile ilgili yapılan literetür taramasının özeti...	11
Çizelge 3.1. 1550 nm dalgaboyunda SSMF parametrelerinin değerleri.....	33
Çizelge 3.2. 15 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri.....	34
Çizelge 3.3. 31 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri.....	34
Çizelge 3.4. 63 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri.....	35
Çizelge 4.1a. $P_{giriş} = 0,1$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	58
Çizelge 4.1b. $P_{giriş} = 0,1$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	58
Çizelge 4.2a. $P_{giriş} = 0,5$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	58
Çizelge 4.2b. $P_{giriş} = 0,5$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	59
Çizelge 4.3a. $P_{giriş} = 1$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	59
Çizelge 4.3b. $P_{giriş} = 1$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM,+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	59
Çizelge 4.4a. $P_{giriş} = 3$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	59
Çizelge 4.4b. $P_{giriş} = 3$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	60
Çizelge 4.5a. $P_{giriş} = 5$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	60
Çizelge 4.5b. $P_{giriş} = 5$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri.....	60
Çizelge 4.6. 1 EDFA'lı (2 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri.....	77
Çizelge 4.7. 2 EDFA'lı (3 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri.....	78

Çizelge 4.8.	3 EDFA'lı (4 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri.....	78
Çizelge 4.9.	4 EDFA'lı (5 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri.....	79
Çizelge 4.10.	5 EDFA'lı (6 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri.....	79

1. GİRİŞ

Kullanıcı sayısında sürekli artış ve yeni uygulamalarda yüksek bant genişliğine duyulan ihtiyaç, optik fiberli ağların önemini her geçen gün arttırmaktadır. Bakır iletkenli kablolar yerine optik fiberli kablolarla yönelimin en önemli nedenleri; optik fiberdeki yüksek bant genişliği, düşük zayıflama değerleri ile uzun mesafelere işaret iletebilme yeteneği, elektromanyetik girişime karşı bağımsızlık ve yüksek kanal/ortam kapasitesi değerleridir. Tek modlu fiberler, deniz altı kabloları ve ülkeler arası optik fiber bağlantılar gibi uzun mesafeli telekomünikasyon ağlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek modlu fiberlerdeki küçük çekirdek boyutu, dağılımı (dispersiyon) azaltarak, işaretlerin çok modlu fiberlerle erişilmesi mümkün olmayan mesafelere iletilmesine olanak tanımaktadır (Iizuka, 2019).

Yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (dense wavelength division multiplexing, DWDM) teknolojsi, hem teknik hem de ekonomik açıdan bakıldığında, potansiyel olarak yüksek iletim kapasitesi sağlamaktadır. DWDM teknolojisinde, fiber kurulumuna yapılmış mevcut yatırım sadece korunmakla kalmayıp iletim ortamı N adet kanala bölündüğünden, toplam iletim kapasitesi de N kat arttırılabilmektedir. Ayrıca, taleplerdeki artışa paralel olarak, basit cihaz güncellemeleri yapılarak ve fiber üzerinde iletilen kanal sayısı arttırılarak, yüksek maliyet gerekmeksizin daha fazla iletim kapasitesi elde edilebilmektedir. 1990'ların başında, dar bant WDM olarak da adlandırılan ve iki ila sekiz kanalın kullanıldığı ikinci nesil WDM kullanılmaya başlanmıştır. 1990'ların sonlarında, DWDM sistemleri, 1550 nm penceresinde, 25 GHz ve 50 GHz aralıklarla yoğun bir şekilde paketlenmiş 64 paralel kanal kapasitesine ulaşmıştır (Kartalopoulos, 2000).

DWDM'de, iletilen işaretlerin dalgaboyları arasındaki koruma bantları WDM'dekinden daha yakın olduğundan, daha büyük bir toplam iletim kapasitesi mevcuttur. DWDM sistemlerde, yakın zamanlarda, 128 dalgaboylu iletim kapasitesi bildirilmiştir (Róka ve Mokráň, 2022).

DWDM tekniği, mevcut uzun mesafeli optik fiberli iletişim sistemlerinde yaygınlaşmaya başlamıştır. DWDM cihazı, ITU-T Uluslararası Haberleşme Birliği-Haberleşme Standardizasyon Birimi tarafından, kanallar arası ayrımı 1000 GHz'e eşit veya daha az olan yoğun WDM cihazları sınıfına verilen tanımdır. ITU-T'ye göre DWDM için tanımlanan genel kanal aralığı değerleri, 12,5 GHz; 25 GHz; 50 GHz ve 100 GHz'dir (ITU-T, 2020).

Ultra yoğun WDM (UDWDM) sistemleri, ITU-T tarafından henüz standardı resmi olarak yayınlanmamasına rağmen, akademik literatürde sıklıkla bahsedilen, kanal aralığı değerleri 12,5 GHz'den küçük olan DWDM sistemleridir (Ferreira vd., 2016).

Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA'lar), işaret iletimi sırasında optoelektronik/elektrooptik dönüşümlerin gerekliliğini ortadan kaldırarak, uzak mesafe optik fiberli iletişim sistemlerinde iletilen zayıflatılmış işareti kuvvetlendirme kapasitesine sahiptir. Bu doktora tezinde EDFA kuvvetlendiricilere odaklanılmasının sebebi, çalışma dalgaboyu aralıklarından kaynaklanmaktadır. EDFA, optik iletişim spektrumunun C bandındaki (1530-1565 nm) ve L bandındaki (1565-1625 nm) işaretlerin kuvvetlendirilmesinde özellikle etkilidir. Bu dalgaboyu aralıkları, uzak mesafe optik fiberli iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılır (Hiçdurmaz vd., 2013).

Optik işaretlerin fiberin malzeme özellikleriyle etkileşiminden doğrusal olmayan olaylar meydana gelmektedir. Bu doğrusal olmayan olayları ortaya çıkaran temel faktörler, ışın yoğunluğuna bağlı kırılma indisi değerışimi (optik Kerr etkisi) ve saçılma etkileridir. Doğrusal olmayan olayların haberleşme sistemleri üzerindeki etkilerini arttıran faktörler, yüksek optik giriş gücü, küçük çekirdek boyutu, fiber tipi, fiber uzunluğu, çalışma dalgaboyu ve farklı kanallarda iletilen işaretlerin birbiriyle etkileşimi şeklinde sıralanabilir. Bu faktörlerin anlaşılması ve yönetilmesi, optik iletişim sistemlerinin tasarımında doğrusal olmayan olayların etkisini azaltmak için çok önemlidir. Yüksek kapasiteli ve uzun mesafeli optik fiberli iletişim sistemlerinde, doğrusalsızlıkların etkisini kontrol etmek ve en azı indirmek için, tasarım parametrelerinin optimizasyonu, farklı modülasyon formatları ve özel fiber tasarımları gibi teknikler kullanılmaktadır (Schneider, 2004).

Bu tezde ilk olarak, tek segmentli optik iletişim sistemlerinde doğrusal olmayan olayların birleşik etkisinin kapsamlı bir analizi verilmiştir. Dört dalga karışımının (FWM), öz faz modülasyonundan (SPM) ve çapraz faz modülasyonundan (XPM) nasıl etkilendiği incelenmiştir. Ayrıca birleşik SPM+XPM+FWM etkisini incelemek için, benzetimler (simülasyonlar) kullanılmıştır. Birleşik üçlü etki (SPM+XPM+FWM) altında elde edilen sonuçlar, aynı sistemlerde sadece FWM yalın etkisi göz önüne alındığında elde edilen sonuçlarla da kıyaslanmıştır. Bu kısımdaki benzetimlerde kullanılan merkez kanal dalgaboyu 1550 nm; kanal aralığı değerleri, güncel DWDM sistemlere odaklanması nedeniyle, 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz; kanal giriş güçleri, 0,1 mW 0,5 mW, 1 mW, 3 mW ve 5 mW; toplam kanal uzunluğu 150 km olarak belirlenmiştir. İletim ortamı G.652 standart tek modlu optik fiberdir. DWDM sistemlerdeki kanal sayıları 15, 31 ve 63 olarak seçilmiştir.

Daha sonra, çok segmentli optik fiberli sistemlerin performansı, uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım (ASE) gürültüsü de dikkate alınarak, birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında (beşli etki) incelenmiştir. EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe optik fiberli iletişim sistemlerinde birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (beşli etki) altında elde edilen benzetim sonuçları, çok segmentli sistemlerde FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (üçlü etki) altında elde edilen benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu benzetimlerde, tek segmentli sistemler için göz önüne alınan ve daha önce bahsedilen parametre değerlerine ek olarak, EDFA sayısı 1 ile 5 arasında değiştirilmiştir. İletim ortamı ve DWDM sistemler için seçilen kanal sayıları, tek segmentli sistemler için kullanılanlarla aynıdır.

Bu tez, beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan giriş kısmında tez konusu ve önemi hakkında genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölüm, kaynak araştırması ve kuramsal temelleri içermektedir. Bu bölümde, tez konusu ile ilgili gerekli teorik altyapı sunulmuş; kaynak araştırması sırasında yapılan incelemeler sonucunda, tez konusunun belirlenmesini sağlayan ve önemini vurgulayan literatürdeki çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölüm, materyal ve yöntemler kısmıdır. Bu bölümde, tezde kullanılan sistem modeli, sistem parametreleri, standartlar ve benzetim koşulları açıklanmıştır. Dördüncü bölüm olan bulgular ve tartışma

bölümünde, benzetimler sonucunda elde edilen grafikler verilmiş ve yorumlanmıştır. Son olarak beşinci bölümde ise tezde elde edilen önemli sonuçlar ve doktora tezinin bilime katkısı vurgulanmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kaynak Araştırması

Dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM), optik fiber ağlarının tasarımında esneklik sağlamanın yanı sıra toplam veri iletim kapasitesini ve bit hızlarını artırır. İletilen işaretler, hat içi dalgaboyu seçici bağlaştırmacılar ve optik ekle-çıkar çoğullayıcılar tarafından çoğullanabilir (Agrawal, 2019). Ayrıca optik kuvvetlendiricilerin kullanılması iletim uzunluğunun yüzlerce kilometreye kadar erişmesine olanak sağlar. Bu nedenle WDM, hem uzak mesafe hem de erişim ağlarında optik işaret iletimi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Agrawal, 2019; Keiser, 2010; Schneider, 2004). Artan kullanıcı sayısı ve optik fiberlerin yüksek veri iletim kapasitesi nedeniyle, WDM tabanlı geliştirilen yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM) tekniği, mevcut uzun mesafeli optik fiber iletişim sistemlerinde yaygınlaşmaya başlamıştır. 100 GHz'in altındaki kanal aralıklarıyla çalışan DWDM sistemlerinin geliştirilmesi, bit hızlarında, kanal sayısında ve giriş güçlerinde artışa ve ayrıca kanal aralıklarında daralmaya yol açarak; bu sistemlerde doğrusal olmayan optik etkilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur (Kaur vd., 2010; Nain vd., 2016; Rasheed vd., 2012; Sabapathi ve Sundaravadivelu, 2011). Güvenilir bir optik iletim sağlamak için bu doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki etkilerini belirlemek ve gerekirse bunları kompanze etmek önemlidir. Bu nedenle, doğrusal olmayan olayların WDM tabanlı sistem performansı üzerindeki tekil veya birleşik etkileri, özellikle son yirmi yılda araştırmacıların ilgisini çekmiş ve literatürde çok sayıda makalenin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

DWDM, farklı dalgaboylarındaki ışığı kullanarak tek bir optik fiber üzerinden birden fazla optik işareti iletmek için uzun mesafeli iletişim sistemlerinde kullanılan bir teknolojidir. Fiber üzerinden iletilen her işarete tek bir ışık dalgaboyu atanır. Bu dalgaboyları tipik olarak kızılötesi aralığındadır ve tipik olarak birbirlerinden nanometre mertebesinde küçük aralıklarla ayrılır. DWDM teknolojisi, yüksek kapasiteli, uzak mesafeli iletişim ağlarının etkinleştirilmesinde önemli bir rol oynar ve minimum işaret bozulmasıyla verilerin uzun mesafeler üzerinden verimli bir şekilde iletilmesini kolaylaştırır. Dolayısıyla, uzun mesafeli

DWDM sistemler konusunu inceleyen çeşitli makaleler bulunmaktadır (Ahmad vd., 2023; Ali vd., 2022; Durak vd., 2020; Elsayed vd., 2022; Guo vd., 2022; Huszaník vd., 2019; Irfan vd., 2021; Kaur vd., 2010; Moscoso-Martir vd., 2022; Mousa vd., 2020; Róka ve Mokrán, 2022; Sharma ve Kaur, 2013; G. Singh vd., 2023; Suresh vd., 2021; Wang vd., 2021; Yang vd., 2022). Mousa vd. (2020)'de uzak mesafeli iletimler için saniyede terabit veri hızlarına ulaşmayı amaçlayan yüksek hızlı bir DWDM sistemi tasarlamaya ve uygulamaya odaklanılmıştır. Çeşitli kanal konfigürasyonları (4, 8, 16 ve 25 kanal) ve veri kodlama teknikleri sıfıra dönüşlü (RZ) ve sıfıra dönüşsüz (NRZ) incelenerek, doğrusal olmayan bozulmalara karşı bağışıklıkları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen sistemin, özellikle optik iletim sistemi bozukluklarının giderilmesinde üstün performansını vurgulamıştır. Ancak ilgili araştırmada, sistemin performansını ve verimliliğini daha da artırma konusunda, özellikle de optik iletim sistemindeki bozulmalarla daha etkili bir şekilde başa çıkma ve muhtemelen sistemin kapasitesini daha yüksek veri hızlarına ve daha uzun iletim mesafelerine ulaşacak şekilde genişletme konusunda devam eden zorluklar olduğu vurgulanmıştır.

FWM, DWDM sistemlerinde meydana gelen doğrusal olmayan bir optik etkidir. FWM, temel olarak, bir fiber içinde ilerleyen farklı dalgaboylu üç ışık dalgasının etkileşerek yeni dalgaboylu bir ışık dalgasının üretilmesine yol açması olayıdır. Bu olay, yüksek kapasiteli ve uzun mesafeli iletişim için tasarlanmış DWDM sistemlerinin performansını etkileyerek işaret bozulmasına ve gürültüye neden olabilir. FWM'nin etkin yönetimi ve azaltılması, sistem bütünlüğünü korumak ve uzun mesafelerde veri iletim yeteneklerini en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir. Dolayısıyla, FWM'nin uzun mesafeli DWDM sistem performansı üzerindeki tekil etkisini analiz eden çeşitli makaleler bulunmaktadır (Abd vd., 2014; Durak vd., 2020; Hiçdurmaz vd., 2013; Karlık, 2016; Lovkesh ve Kaur, 2021; Róka ve Mokrán, 2022; Sharma ve Kaur, 2013; Souza ve Harboe, 2011). Lovkesh ve Kaur (2021)'de, çeşitli EDFA konfigürasyonlarının kullanıldığı 1,28 Tbps WDM sistemi üzerindeki FWM etkileri araştırılmıştır. Hem ileri hem de geri pompalama teknikleri kullanılarak, ön kuvvetlendirici, son kuvvetlendirici ve hat içi kuvvetlendirici kurulumlarının etkisi incelenmiştir. Benzetimler aracılığıyla, EDFA konfigürasyonları ve modülasyon formatlarının FWM gücü

ve işaret kalitesi üzerindeki etkisi karşılaştırılmış ve hat içi kuvvetlendirmenin üstün performans sağladığı, ancak son kuvvetlendirmenin FWM'yi en etkili şekilde en aza indirdiği belirtilmiştir.

SRS, gelen ışığın malzemenin moleküler titreşimleriyle etkileşime girerek yeni dalgaboylu foton saçılımına yol açtığı doğrusal olmayan bir optik etkidir. Bu saçılma, ışığı daha uzun dalgaboylarına (Stokes kayması) veya daha az yaygın olarak daha kısa dalgaboylarına (anti-Stokes kayması) kaydırır. Optik fiberli iletişimde SRS, enerjiyi daha kısa dalgaboylu kanallardan daha uzun dalgaboylu olanlara aktararak işaret kalitesini etkileyebilir. Bu özelliği nedeniyle yüksek güçlü, uzun mesafeli uygulamalarda önemlidir. DWDM sistemlerinde, sistem performansını korumak için SRS'yi yönetmek çok önemlidir. Bazı makaleler, SRS'nin yalın etkilerine dikkat çekmiştir (Das ve Sarkar, 2011; Guo vd., 2022; Muthuraman ve Sivanantharaja, 2011; Shirmohammad vd., 2023; M. L. Singh ve Hudiara, 2000, 2004; Tan ve Abbou, 2012). Tan ve Abbou (2012)'de, SRS'nin örgü ve halka topolojili ağlarda yönlendirme ve dalgaboyu atanmasını (RWA) nasıl etkilediği araştırılırken, 8 düğümlü konfigürasyonlardaki çeşitli atlama sayıları üzerindeki etkisi özellikle incelenmiştir. SRS'nin etkisinin ağ topolojisine ve atlama sayısına bağlı olarak değiştiği keşfedilmiştir. SRS etkilerinin, daha yüksek atlama sayılarına sahip halka topolojilerinde daha belirgin olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bununla birlikte, SRS etkisini dikkate alan etkin bir yönlendirme ve dalgaboyu atamasının atlama sayılarını, ağ topolojisini ve optik kanal sayılarını hesaba katması gerektiği belirtilmiştir.

SPM, optik fiber gibi bir ortamda yayılan ışık dalgasının yoğunluğu, kendi fazını değiştirdiğinde ortaya çıkan doğrusal olmayan bir optik etkidir. Bu etki ortamın kırılma indisindeki ışın yoğunluğuna bağlı değişimden kaynaklanmaktadır. SPM, özellikle yüksek güçlü ve uzun mesafeli iletimlerde, optik iletişim sistemlerindeki darbe şeklini ve kalitesini etkileyerek ışık dalgasının spektral genişlemesine yol açabilir. Optik iletişim ağlarının tasarımında ve işleyişinde dikkate alınması gereken çok önemli bir faktördür. SPM konusunu ele alan çalışmalar literatürde mevcuttur (Singh vd., 2007; Udalcovs vd., 2012; Zhang vd., 2023). Singh vd. (2007)'de, dispersiyonu dengelenmiş fiber (DCF) kullanımı yoluyla, WDM

sistemleri için fiberdeki SPM etkilerinin azaltılması incelenmiştir. İlgili çalışmada, EDFA kullanılarak 280 km uzunluklu ve 40 Gb/s hızında çalışan sekiz kanallı WDM sistem gerçekleştirilmiştir. Tatmin edici kalite faktörleriyle 280 km'ye kadar iletim başarılmıştır. Fiber konfigürasyonu ve EDFA parametreleri optimize edilerek uzun mesafeli optik fiberli iletişim için kalite faktöründe daha fazla iyileştirme önerilmiştir.

XPM, bir ışık dalgasının yoğunluğunun, bir ortamda (tipik olarak optik fiberlerde), birlikte yayılan başka bir ışık dalgasının fazını değiştirdiği doğrusal olmayan bir optik etkidir. Bu etkileşim, SPM'de olduğu gibi, ortamın kırılma indisinin ışın yoğunluğuna bağlı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır. XPM, DWDM sistemler gibi birden fazla dalgaboyunda işaret taşıyan sistemlerde, çaprazkarşıma (crosstalk) ve işaret bozulmasına neden olabileceği için önemlidir. XPM'yi yönetmek, yüksek kapasiteli optik iletişim ağlarının kalitesini ve güvenilirliğini korumak için çok önemlidir. XPM üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Abbagari vd., 2022; Kikuchi vd., 1997; Leibrich ve Rosenkranz, 2003; Secondini ve Forestieri, 2014; Karfaa vd., 2008; Yongpeng ve Peida, 2002). Karfaa vd. (2008)'de, çeşitli fiber türleri için, WDM ağlarındaki kanal aralıklarının, XPM kaynaklı çaprazkarşıma üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. XPM'nin WDM sistem performansı üzerindeki etkisi, bit hata oranı (BER) sınırlamalarına ve bunların kanal aralığı ve güç seviyelerinden nasıl etkilendiğine odaklanılarak teorik analiz yoluyla değerlendirilmiştir. Artan gücün BER'i şiddetlendirdiği, daha geniş kanal aralığının ise XPM gürültüsünü azalttığı gözlenmiş ve WDM ağ performansını artırmak için özellikle daha dar kanal aralıklarında XPM'yi yönetmenin önemi vurgulanmıştır.

Diğer bazı çalışmalarda, SRS ve FWM'nin, DWDM sistemler üzerindeki birleşik veya yalın etkileri incelenmiştir (Cheng vd., 2022; Kaur vd., 2009, 2010; Kılınçarslan ve Karlık, 2023; Sabapathi ve Poovitha, 2019; Sabapathi ve Sundaravadivelu, 2011). Sabapathi ve Poovitha (2019)'da, FWM ve SRS üzerine yoğunlaşarak, DWDM sistemler üzerindeki etkileri, yüksek giriş güçleri ve dar kanal aralıkları durumlarında değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan etkileri azaltma stratejileri olarak rastgele güç tahsisi ile birlikte dairesel polarizatörler önerilmiştir. Bu yaklaşımların FWM'yi önemli ölçüde azalttığı ve SRS

etkilerini hafifleterek sistem performansının artmasına yol açtığı tespit edilmiştir. İlgili çalışma, DWDM sistem verimliliğini artırmak için doğrusal olmayan etki azaltma tekniklerinin daha fazla araştırılmasının önemini vurgulamaktadır.

Literatürde, hem FWM hem de XPM'ye odaklanan araştırma sonuçlarının sunulduğu yayınlar da mevcuttur (Guesmi ve Menif, 2016; Guo vd., 2022; Wegener vd., 2004; Xu ve Brandt-Pearce, 2003). Guesmi ve Menif (2016)'da, XPM ve FWM doğrusalsızlıkları yardımıyla, yüksek hızlı WDM Nyquist sistemlerinde optik performans izleme (OPM) yönteminin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Kromatik dispersiyon (CD), polarizasyon mod dispersiyonu (PMD), optik işaret-gürültü oranı (OSNR) ve kalite faktörü (Q-factor) parametrelerinin izlenmesinde kanal girişindeki optik işaret ile sürekli dalga prob işaretinin arasındaki XPM ve FWM etkilerinin kullanılabilme potansiyeli araştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları, eşit aralıklı WDM Nyquist kanalları mevcutken, önerilen yöntemin ilgili parametrelerin izlenmesinde kullanılabileceğini, ancak daha etkin bir izleme için giriş işaret güçlerinin 20 dBm'in üzerinde olması ve kanal sayılarının arttırılması gerektiğini göstermiştir.

DWDM temelli iletişim sistemleri üzerindeki SPM ve XPM etkisini inceleyen bazı çalışmalar literatürde bulunmaktadır (Filho vd., 2007; Huszaník vd., 2019; Lotsmanov vd., 2019; Norimatsu ve Akai, 2007; Rajeev ve Kumar, 2022; Sugumaran vd., 2012). Lotsmanov vd. (2019)'da, optik fiberli iletişim sistemlerinde SPM ve XPM kaynaklı distorsiyonların işaret üzerindeki etkisini belirlemek için, split step Fourier (SSF) yöntemini temel alan bir teknik tanıtılmıştır. Sunulan teknik belirli bir optik fiber hattına başarıyla uygulanmış ve etkinliği kanıtlanmıştır.

Kassegne vd. (2019)'da SRS, SPM ve XPM'nin optik fiberli iletişim sistemleri üzerindeki birleşik etkileri BER ve kalite faktörü üzerinden incelenmiştir. İlgili çalışmada, 110 km segment uzunluklu, DP-QPSK modülasyonu kullanan, 6,4 Tb/s DWDM sistemindeki doğrusal olmayan etkiler araştırılmış, XPM'nin iletişim sisteminin performansını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Doğrusal olmayan etkileri incelemek için kanal başına

200 Gbps hızında çalışan 32 kanallı bir DWDM sisteminde benzetimler yapılmış ve XPM baskın etki olarak belirlenmiştir. Yüksek kapasiteli optik sistemlerde doğrusal olmayan etkileri azaltmak için kapsamlı stratejilere olan kritik ihtiyaç vurgulanmıştır.

Önemli miktarda makalede, SRS etkisinin dahil ya da hariç olduğu durumlarda, uzun mesafe DWDM sistem performansı üzerindeki SPM, XPM ve FWM etkileri birleşik veya ayrı ayrı incelenmiştir (Irfan vd., 2021; Judy, 1997; Paradiso, Boffi, Marazzi, Dalla Vecchia, vd., 2005; Paradiso, Boffi, Marazzi, Vecchia, vd., 2005; Rajeev ve Kumar, 2024; Wu ve Way, 2004; Zhu vd., 2014). Zhu vd. (2014)'te, SPM, XPM ve FWM'ye odaklanılarak, yüksek hızlı WDM sistemlerinde kırılma indisindeki dalgalanmalardan kaynaklanan doğrusal olmayan olayların meydana getirdiği çaprazkarışımın sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu etkileri, farklı giriş güçleri ve kanal aralıkları için değerlendirmek amacıyla modeller oluşturulmuştur. Benzetim sonuçları, kanal giriş güçleri 50 mW'ı aştığında, sistem performansı üzerindeki etkisi belirginleşmeye başlayan SPM ve XPM'nin, kanal giriş gücü 300 mW'ın üzerine çıktığında FWM'den daha baskın hale geldiğini göstermektedir. Çalışmada, kanal aralığının ve giriş gücünün sistem performansı üzerindeki etkisinin altını çizilmiştir. Ayrıca, bu doğrusal olmayan etkileri azaltacak stratejiler önerilmiştir.

Ayrıca, Song tarafından sunulan doktora tezinde, optik fiberli iletişim sistemlerini de içeren, yüksek bit hızlı ve uzak mesafe haberleşme sistemleri üzerindeki doğrusal olmayan durumların etkisine değinen kapsamlı bir benzetim paketi geliştirilmiştir (Song, 1998). Benzetimlerde, fiber kaybı, dispersiyon, doğrusal olmayan etkiler ve PMD ele alınmıştır. Song, doğrusal olmayan Schrödinger denkleminin (NLSE) analitik çözümünden yararlanarak geliştirdiği modeli kullanarak elde ettiği benzetim sonuçlarını, deneysel sonuçlarla da karşılaştırarak doğrulamıştır. Ancak deneylerde, o zamanlardaki teknolojik imkanlar ve sınırlamalar nedeniyle, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı, 2 kanallı WDM sistemleri ve dispersiyonu kaydırılmış fiber (DSF) kullanılmıştır.

Song vd. (1999)'da, optik fiberlerde, SPM, XPM ve FWM arasındaki üçlü etkileşimi dikkate alan yeni bir faz uyumsuzluk faktörü türetilmiştir. Benzetimler ve deneyler yoluyla, geleneksel faz uyumsuzluk faktörünün kullanıldığı FWM etkinliği ile türetilen faz uyumsuzluk faktörünün kullanıldığı FWM etkinliği arasındaki farklar vurgulanmıştır. Dolayısıyla, ilgili çalışma, sistem performansı üzerindeki tekil FWM etkisi yerine, SPM, XPM ve FWM birleşik üçlü etkisinin incelenebilmesinin yolunu açması açısından önemlidir.

Doktora tez konusu ile ilgili yapılan kapsamlı literatür taramasının özeti Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Doktora tez konusu ile ilgili yapılan literatür taramasının özeti

Referans	İncelenen Doğrusalsızlık	Kanal Aralığı	Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu
Song vd., 1999	SPM, XPM, FWM	50 GHz, 100 GHz	2	17,5 km, 20 km
Singh ve Hudiara, 2000	SRS	125 GHz	16	2000 km (toplam) 50 km (segment)
Yongpeng ve Peida, 2002	XPM	100 GHz	16	80 km
Paradiso vd., 2005a,b	SPM, XPM, FWM	33 GHz	18, 64	2000 km (toplam) 55 km (segment)
Singh vd., 2007	SPM	200 GHz	8	280 km
Kaur vd., 2010	SRS, FWM	100 GHz	32	1000 km-3000 km (toplam) 25 km-100 km (segment)
Souza ve Harboe, 2011	FWM	6,25 GHz-100 GHz	24, 48	40 km-80 km
Udalcovs vd., 2012	SPM	75 GHz-400 GHz	9	60 km
Hiçdurmaz vd., 2013	FWM	100 GHz	5, 9, 15, 21	100 km (toplam) 20 km (segment)
Sharma ve Kaur, 2013	FWM	0,25 nm – 0,27 nm	8	100 km

Abd vd., 2014	FWM	10 GHz-100 GHz	3	5 km– 65 km
Bhatia vd., 2016	FWM	100 GHz	2	2 km
Guesmi ve Menif, 2016	XPM, FWM	25 GHz-50 GHz	10	---
Karlık, 2016	FWM	6,25 GHz-100 GHz	9, 11, 13, 15	100 km
Huszaník vd., 2019	SPM, XPM	100 GHz	32	50 km-1000 km
Kassegne vd., 2019	SPM, XPM, SRS	50 GHz	32	220 km (toplam) 110 km (segment)
Lotsmanov vd., 2019	SPM, XPM	75 GHz	10, 20	1520 km (toplam) 80 km (segment)
Sabapathi ve Poovitha, 2019	SRS, FWM	----	4, 8, 16, 32, 64	100 km
Durak vd., 2020	FWM	12,5 GHz-300 GHz	2	10 km, 20 km, 30 km
Irfan vd., 2021	SPM, XPM, FWM	12,5 GHz-100 GHz	4, 8, 16, 32	500 km
Lovkesh ve Kaur, 2021	FWM	100 GHz-400 GHz	32	100 km
Suresh vd., 2021	FWM	100 GHz	16	60 km
Ali vd., 2022	SPM, XPM, FWM	200 GHz	16	610 km
Róka ve Mokrání, 2022	FWM	50 GHz (3 kanal kümesinin her birinde)	15 (5+4+6)	80 km
Kılınçarslan ve Karlık, 2023	SRS, FWM	3,125 GHz-100 GHz	7, 15, 31, 63	150 km (toplam) 25 km, 30 km, 50 km, 75 km (segment)
Singh vd., 2023	FWM	50 GHz	8, 16, 32, 64	100 km
Rajeev ve Kumar, 2024	SPM, XPM, FWM, SRS, SBS	12,5 GHz	450	1100 km

Bölüm 2.1’de detayları ve Çizelge 2.1’de özeti verilen kaynak araştırması sonucunda; doğrusal olmayan olayların DWDM sistem performansı üzerindeki etkilerinin analizinin,

literatürde, genellikle tekli etki analizi ya da birkaç doğrusal olmayan olayın tekli etki analizi sonuçlarının toplamı ya da bir grup doğrusal olmayan olayı ilgilendiren optik fiber parametresinin (fiber doğrusalsızlık katsayısı γ gibi) değişiminin analizi yoluyla gerçekleştirildiği anlaşılmıştır.

Bu doktora tezinde, kaynak araştırmasından elde edilen sonuçlara göre, bilindiği kadarıyla literatürde ilk defa olmak üzere, tek segmentli DWDM sistem performansı üzerindeki birleşik SPM+XPM+FWM etkisi (üçlü etki) ve çok segmentli DWDM sistem performansı üzerindeki birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (beşli etki) modellenmiş ve benzetimler yardımıyla incelenmiştir. Birleşik etki modellemelerinde, Song (1998) ve Song vd. (1999)'da verilen modifiye faz uyumsuzluk faktörü $\Delta\beta'$ kullanılmıştır. Tek segmentli DWDM sistem performansı üzerindeki doğrusal olmayan olayların birleşik etkileri incelenirken, SRS etkisinin analize katılmamasının sebebi, Kılınçarslan ve Karlık (2021)'de tek segmentli DWDM erişim ağları üzerinde FWM yalın etkisi ile FWM+SRS birleşik etkisi arasında, sadece 63 kanallı ve 100 GHz kanal aralıklı sistemlerde gözlenen küçük farklar haricinde, belirgin bir farkın bulunmadığının rapor edilmiş olmasıdır.

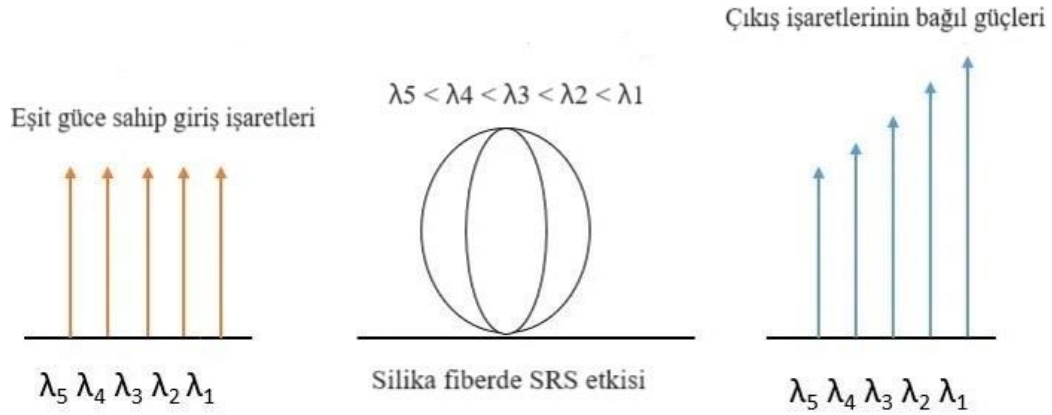
2.2. Kuramsal Temeller

Bu alt bölümde, tez konusu ile ilgili kuramsal temeller açıklanmıştır. Teorik altyapısı açıklanan konular, SRS, SPM, XPM, FWM, EDFA ve ASE gürültüsüdür.

2.2.1. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS)

SRS etkisi nedeniyle, WDM iletişim sistemlerde, daha kısa dalgaboyuna ve daha yüksek frekansa sahip kanallar, güçlerinin bir kısmını daha uzun dalgaboyuna ve daha düşük frekansa sahip kanallara aktarır (Schneider, 2004). Dolayısıyla, SRS, WDM iletişim sistemlerinin SXR'sini düşüren ve kanal karışması nedeniyle sistem performansını bozan önemli doğrusal olmayan etkilerden biridir.

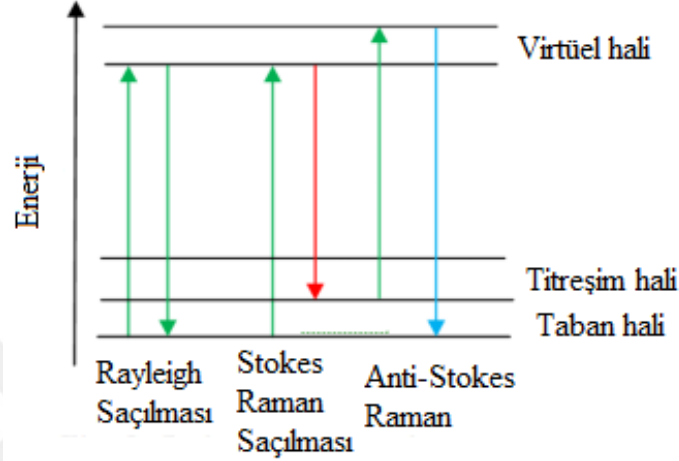
İlk kez 1928'de tanımlanan Raman etkisi, kuantum mekaniksel olarak, molekül titreşim durumuna geçerken; h Planck sabiti ($h=6,62607015 \times 10^{-34}$ J·s), ω_p pompa fotonun frekansı ve ω_s saçılan fotonun (Stokes) frekansı olmak üzere, $h\omega_p$ enerjili bir fotonun, $h\omega_s$ enerjili daha düşük frekanslı bir fotonun saçılmasına sebep olması şeklinde tanımlanabilir. Aynı zamanda gelen ışık taneciği olan yüksek enerjili foton, bir pompa gibi davranarak frekansı değişen yeni foton üretir. Düşük enerjili saçılan fotonların çarpışması sonrasında atom tarafından salınan dalga Stokes dalgası olarak bilinir. Stokes dalgasının enerjisi daha azdır çünkü atom enerjiyi emer. Pompa fotonları, $h\omega_a$ ile hesaplanan daha yüksek enerjiye ve yüksek genliğe sahip, Anti-Stokes adı verilen bazı dalgaların da üretilmesine sebep olur. Şekil 2.1'de SRS'nin WDM sistemler üzerindeki etkisi gösterilmiştir (Hanumante ve Bhosale, 2022).



Şekil 2.1. SRS etkisi kaynaklı optik güç transferi (Hanumante ve Bhosale, 2022)

1962'de yoğun pompa alanlarının, Stokes dalgasının ortam içinde hızlı bir şekilde büyüdüğü ve pompa enerjisinin çoğunluğunun ona aktarıldığı doğrusal olmayan SRS fenomenine yol açabileceği bulunmuştur. O zamandan bu yana, SRS'yi kapsamlı bir şekilde incelemek için çok çeşitli moleküler ortamlar kullanılmıştır. Optik fiberler, SRS kullanılarak geniş bantlı Raman kuvvetlendiricilerine ve ayarlanabilir Raman lazerlerine dönüştürülebilir. Herhangi bir moleküler ortamda, enerji bir kanaldan komşu kanallara aktarılarak çok kanallı ışık

dalgası sistemlerinin performansı da belirgin ölçüde etkilenebilir. Şekil 2.2’de Stokes ve Anti-Stokes Raman saçılması verilmiştir (Hanumante ve Bhosale, 2022).



Şekil 2.2. Stokes ve Anti-Stokes Raman saçılması (McGregor vd., 2016)

SRS, işaret bozulmasına ve güç kaybına yol açabildiğinden, DWDM sistemlerinde bu etkilerin azaltılması için önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu doğrusal olmayan etkiyi kompanze etmek ve bir DWDM sisteminde iletilen işaretlerin bütünlüğünü korumak için, uygun fiber tasarımı, işaret güç kontrolü ve optik kuvvetlendiricilerin kullanımı gibi tekniklere başvurulabilir.

N kanallı WDM sisteminde, k. kanalda SRS’ye bağlı olarak değişen işaret gücü

$$P_M[k] = P_T[k] - P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i] + \sum_{j=1}^{k-1} P_T[j].D[j, k], \quad k=1,2,\dots,N \quad (2.1)$$

ile hesaplanır. (2.1)’de, $P_T[k]$ k. kanalın girişindeki işaret gücü; $(P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i])$, k. kanaldan daha düşük enerjili kanallara aktarılan toplam güç; $(\sum_{j=1}^{k-1} P_T[j].D[j, k])$, daha yüksek enerjili kanallardan k. kanala aktarılan toplam güçtür. (2.1)’de $i > N$ için $D[k, i] = 0$ ve $k=1$ için $D[j, k] = 0$ olur (Singh ve Hudiara, 2004).

j. kanalın i. kanaldan tükettiği güç oranı, yani $D[i,j]$,

$$D[i,j] = \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i}\right) \cdot P_T[j] \left\{ \frac{(f_i - f_j)}{1.5 \times 10^{13}} \right\} g_{Rmax} \left\{ \frac{L_{eff} \times 10^5}{b \cdot A_{eff}} \right\}, \quad (f_i - f_j) \leq 1.5 \times 10^{13} \text{ Hz ve } j > i \quad (2.2)$$

ile bulunabilir. Burada kanal dalga boyları sırasıyla λ_i ve λ_j ile; kanalda iletilen optik güç $P_T[j]$ ile; kanal frekansları sırasıyla f_i ve f_j ile temsil edilir. Maksimum Raman kazancı g_{Rmax} ; L_{eff} fiberin etkin uzunluğu; A_{eff} fiberin etkin alanı; çeşitli dalga boylarına sahip kanalların polarizasyon durumuna bağlı olarak b, 1 ile 2 arasında değişen bir sabittir. (2.2)'de $(f_i - f_j) > 1.5 \times 10^{13} \text{ Hz}$ ve $j \leq i$ durumlarında $D[i,j] = 0$ olur (Singh ve Hudiara, 2004).

SRS etkisi altında, k. kanaldan alıcıya ulaşan optik güç

$$P_R[k] = P_M[k] \cdot e^{-\alpha L} \quad (2.3)$$

ile bulunur. Burada, α optik fiberin zayıflama katsayısı ve L optik fiber uzunluğudur.

2.2.2. Öz Faz Modülasyonu (SPM)

SPM, DWDM uzak mesafe iletişim sistemleri de dahil olmak üzere, optik fiberli iletişim sistemlerinde gözlemlenen doğrusal olmayan bir optik etkidir. Ortamın kırılma indisinin ışın yoğunluğuna bağlı olmasından kaynaklanır.

SPM, bir optik fiber kablodan geçen ışığın fazının, ışığın yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak değişmesi durumunda meydana gelir. Bu olay, fiberin kırılma indisinin, fiberin içinden geçen ışığın gücünün bir fonksiyonu haline geldiği, optik Kerr etkisinden kaynaklanmaktadır (Schneider, 2004).

Optik fiberli iletişim sistemlerinde, SPM'nin hem yararlı hem de zararlı etkileri olabilir. Bir yandan, ultra kısa darbeler üretmek için çok önemli olan optik darbe sıkıştırma gibi

uygulamalar için kullanılabilir. Öte yandan SPM, işaretin spektral genişlemesine yol açabilir, spektrumlarda kanallar arasında örtüşmeye neden olarak kanallar arası karışma ve işaret kalitesinin bozulmasına neden olabilir (Singh vd., 2007).

Uzun mesafelerde iletim kapasitesini artırmak için, birden fazla dalgaboyundaki ışığı birlikte ileten DWDM sistemlerinde SPM, sistem tasarımı ve performansında kritik bir rol oynar. İşaret uzak mesafelerde ilerledikçe, SPM'nin neden olduğu spektral genişleme, sistemi önemli ölçüde etkileyebilir. Bu etki, uzun mesafeli iletişimde yer alan yüksek güç seviyeleri ve büyük etkileşim uzunlukları nedeniyle daha belirgindir.

DWDM sistemlerinde SPM'yi yönetmek, spektral genişlemenin etkisini en aza indirmek ve uzak mesafelerde güvenilir veri iletimi sağlamak için özenli kanal aralığı seçimini ve güç seviyesi optimizasyonunu içerir. SPM ve diğer doğrusal olmayan olayların etkilerini azaltmak için gelişmiş modülasyon formatları ve sayısal işaret işleme (DSP) teknikleri de kullanılarak, mevcut spektral bantgenişliğinin etkili bir şekilde kullanılmasına ve yüksek veri hızlarının korunmasına olanak sağlanır (Hiçdurmaz vd., 2010).

SPM'nin önemi, optik işaretlerin fazı ve spektrumu üzerindeki etkisinde yatmaktadır. Işığın yoğunluğa bağlı faz değişimi, ışığın frekansında bir cıvıdamaya yol açarak spektral genişleme etkisine neden olur. Farklı kanallar arasında kesin bir dalgaboyu ve faz ilişkisinin korunmasının performans açısından kritik olduğu sistemlerde bunun yönetilmesi özellikle zor olabilir (Hiçdurmaz vd., 2010).

Denklem (2.4), optik fiberde SPM'nin neden olduğu frekans cıvıdamasını belirlemek için kullanılır.

$$\delta\omega_{\text{SPM}} = -\frac{d\phi_{\text{SPM}}}{dt} = -\gamma L_{\text{eff}} \frac{dP}{dt} \quad (2.4)$$

Burada, ϕ_{SPM} SPM kaynaklı faz kayması; P işaret gücü; γ doğrusalsızlık katsayısı; t zaman; L_{eff} fiberin etkin uzunluğudur.

Fiber girişinde izin verilebilecek en büyük darbe faz kayması (P_{max}) 1 radyanla sınırlıdır ve bu sınırı belirleyen formüller (2.5) ve (2.6)'daki gibidir (Chomycz, 2009).

$$P_{\text{max}} < \frac{1}{\gamma L_{\text{eff}}} \quad (2.5)$$

$$P_{\text{max}} < \frac{\alpha \lambda A_{\text{eff}}}{2\pi n_2 [1 - e^{(-\alpha L)}]} \quad (2.6)$$

Burada, λ dalga boyu; L kanalın uzunluğu; n_2 doğrusal olmayan kırılma indisidir.

2.2.3. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)

XPM, bir optik işaretin fazının, aynı ortamda yayılan başka bir işaretin yoğunluğu tarafından modüle edildiği bir olgudur. Bu etki tipik olarak WDM tabanlı optik fiberli iletişim sistemlerinde meydana gelir. XPM'de, optik ortamın kırılma indisi, Kerr etkisi nedeniyle, ortamın doğrusal olmayan kırılma indisi ve ortamda iletilen başka bir optik işaretin ışın yoğunluğunun fonksiyonu olarak değişir. Bu durum, birlikte yayılan işaretle faz kaymasına neden olur. Bu faz modülasyonu, doğrusal olmayan bir etkidir ve yüksek ışın yoğunluklarında daha belirgin hale gelir (Schneider, 2004).

XPM optik iletişim sistemlerinde hem faydalı hem de zararlı etkiler oluşturabilir. İşaret bozulmalarına, girişimlere ve bilgi aktarımında hatalara neden olabilir. Ancak XPM'den, dört dalga karışımı yoluyla yeni frekans bileşenlerinin üretilmesi gibi çeşitli uygulamalar için de yararlanılabilir (Agrawal, 2019).

XPM, özellikle birden fazla kanalın birbirine yakın dalgaboylarında çalıştığı DWDM sistemlerinde işaretlerin bozulmasına yol açabilir. XPM, işaretlerde faz kaymalarına neden olduğundan; farklı dalgaboylu kanallar arasında girişime yol açar ve işaret bozulmasına neden olur. Ayriyeten, işaretler arasındaki etkileşim, bilgilerin bir kanaldan diğerine sızdığı çaprazkarışıma da neden olabilir.

XPM'nin neden olduğu bozulmalar, işaret gücü arttıkça daha belirgin hale gelir ve yüksek güçlü veya uzun mesafeli optik iletişim sistemlerinde sınırlayıcı bir faktör haline gelir. XPM etkisini azaltmak için, dispersiyon yönetimi, doğrusal olmayan dengeleme ve sistem parametrelerini optimize etme gibi çeşitli teknikler kullanılır (Sato vd., 2004).

M kanallı WDM sistemlerde, sadece SPM ve XPM etkilerinin incelenmesi durumunda, M adet diferansiyel denklemin kümesi, WDM kanalları arasındaki etkileşimin matematiksel tanımını oluşturur (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A_1}{\partial z} + \underbrace{\beta_{11} \frac{\partial A_1}{\partial t}}_{\text{Grup Hızı Etkisi}} + i \underbrace{\frac{\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Etkisi}} - \underbrace{\frac{\beta_{31}}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Eğimi}} + \underbrace{\frac{\alpha_1}{2} A_1}_{\text{Zayıflama}} &= i \gamma_1 \left(\underbrace{|A_1|^2}_{\text{SPM}} + 2 \underbrace{\sum_{m=2}^M |A_m|^2}_{\text{XPM}} \right) A_1 \quad (2.7) \\
 &\vdots \\
 \frac{\partial A_M}{\partial z} + \underbrace{\beta_{1M} \frac{\partial A_M}{\partial t}}_{\text{Grup Hızı Etkisi}} + i \underbrace{\frac{\beta_{2M}}{2} \frac{\partial^2 A_M}{\partial t^2}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Etkisi}} - \underbrace{\frac{\beta_{3M}}{6} \frac{\partial^3 A_M}{\partial t^3}}_{\text{Kromatik Dispersiyon Eğimi}} + \underbrace{\frac{\alpha_M}{2} A_M}_{\text{Zayıflama}} &= i \gamma_M \left(\underbrace{|A_M|^2}_{\text{SPM}} + 2 \underbrace{\sum_{m=1}^{M-1} |A_m|^2}_{\text{XPM}} \right) A_M
 \end{aligned}$$

Bu durumda Denklem (2.8), M kanallı WDM sisteminde, j ile gösterilen bir kanal için toplam kırılma indisini (n_{top}) verir.

$$n_{\text{top},j} = n_{0,j} + n_{2,j}I_j + 2 \sum_{m \neq j} n_{2,m}I_m \quad (2.8)$$

Burada, $n_{0,j}$ j. kanalın doğrusal kırılma indisi; $n_{2,j}$ j. kanalın doğrusal olmayan kırılma indisi; I_j j. kanaldaki işaretin ışın yoğunluğu; $n_{2,m}$ j. kanal hariç diğer tüm kanalların her birinin doğrusal olmayan kırılma indisi; I_m j. kanal hariç diğer tüm kanalların her birindeki işaretin ışın yoğunluğudur.

Agrawal (2019)'de, j. kanaldaki toplam doğrusal olmayan faz kayması, fiberdeki etkileşime giren tüm kanalların katkısı göz önünde bulunarak (2.9)'daki gibi tanımlanmıştır.

$$\phi_{\text{NL},j} = \bar{\gamma} L_{\text{eff}} \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right) \quad (2.9)$$

Burada, $\bar{\lambda}$ ortalama dalgaboyu olmak üzere, $\bar{\gamma}$ ortalama doğrusalsızlık katsayısı

$$\bar{\gamma} = \frac{2\pi n_2}{\bar{\lambda} A_{\text{eff}}} \quad (2.10)$$

ile hesaplanır (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

Denklem (2.9)'da XPM etkisi $2\bar{\gamma} L_{\text{eff}} \sum_{m \neq j} P_m$ ifadesiyle karakterize edilirken; SPM etkisi $\bar{\gamma} L_{\text{eff}} P_j$ terimiyle gösterilir. Bu nedenle j. kanalın XPM kaynaklı frekans cıvıltısı

$$\delta\omega_{\text{XPM},j} = -2\bar{\gamma} L_{\text{eff}} \frac{d(\sum_{m \neq j} P_m)}{dt} \quad (2.11)$$

ile bulunabilir (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

j. kanalın toplam doğrusal olmayan faz kayması, tüm kanal giriş güçlerinin (P) eşit olduğu ve fiberin sıfır dispersiyon gösterdiği varsayılarak Denklem (2.12)'deki gibi hesaplanır (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

$$\Phi_{NL,j} = \bar{\gamma} P_{eff} (2M - 1) \quad (2.12)$$

Hiçdurmaz vd. (2010)'da belirtildiği gibi, j. kanalın fiber girişine uygulanacak maksimum güç (P_{max}) dikkate alındığında, darbedeki en büyük faz kayması 1 radyanı aşmamalıdır.

$$P_{max,j} < \frac{\alpha}{\bar{\gamma}[1 - e^{(-\alpha L)}](2M - 1)} \quad (2.13)$$

2.2.4. Optik Kuvvetlendirici İçermeyen Tek Segmentli WDM Haberleşme Sistemlerinde Dört Dalga Karışımı (FWM)

Fiberin içinde yayılan üç farklı frekanslı (f_i , f_j , ve f_k) optik dalga, FWM olayına neden olur. Malzemenin üçüncü dereceden doğrusal olmama özelliği bu etkileşimi tetikler. Bu etkileşim, f_{ijk} frekansına sahip yeni bir dalga'nın oluşmasıyla sonuçlanır.

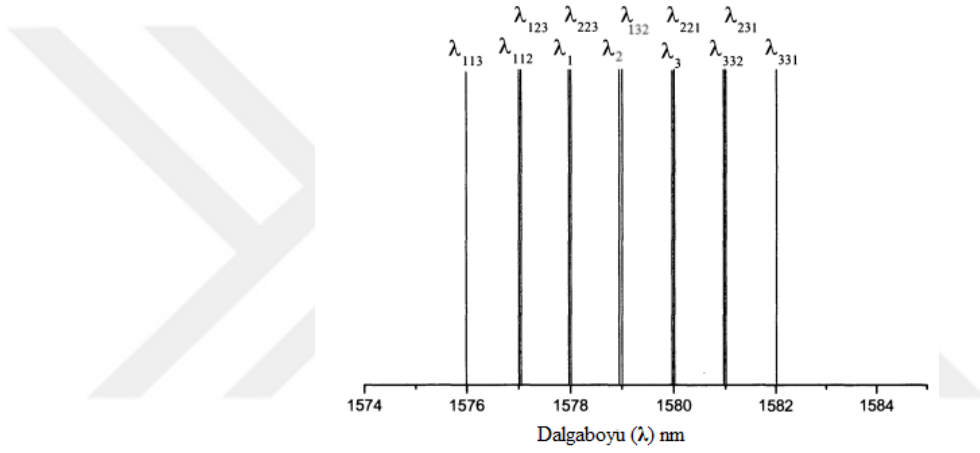
FWM etkisi,

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (2.14)$$

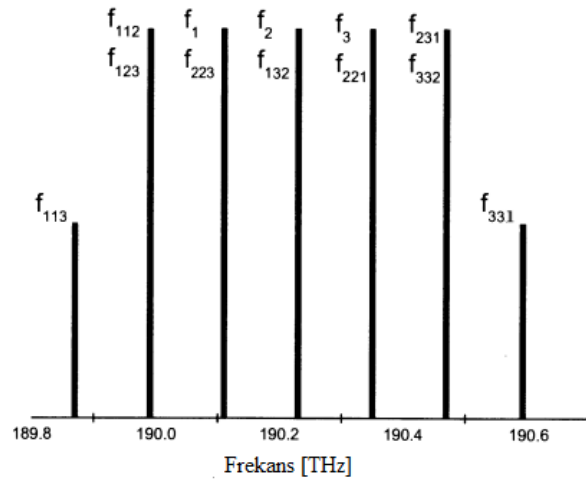
ile matematiksel olarak açıklanabilir. $k \neq i, j$ koşulu (2.14)'te yeni frekanslı bir işaret üretmek için gereken koşulu karakterize eder. Çok kanallı bir WDM sisteminde i, j ve k indisleri farklı kanalları temsil eder. Önemli doğrusal olmayan olaylar arasında FWM öne çıkmaktadır. Etkileşen üç optik işaretin faz uyumu, yeni oluşturulmuş dalgaların başarılı bir şekilde oluşturulması için kritik öneme sahiptir. WDM sistemleri faz uyumuna ihtiyaç duyduğundan, FWM'nin neden olduğu çaprazkarışımın SNR üzerinde önemli bir etkisi vardır (Ivaniga ve Ivaniga, 2020).

Bir WDM sistemindeki kanal aralıkları eşit olduğunda, FWM olayı tarafından üretilen yeni frekanslı işaretler, mevcut kanallardaki işaretlerle çakışabilir. Öte yandan, kanal aralıkları eşit değilse, çok sayıda FWM ürünü kanallar arasındaki boşluklara düşer ve bu da toplam gürültü seviyesini yükseltir.

Şekil 2.3 ve 2.4, kanalların aynı dalgaboyu ve frekans aralıklarına sahip olması durumunda oluşan FWM ürünlerinin dalgaboylarını ve frekanslarını göstermektedir.



Şekil 2.3. Dalgaboyu aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin dalgaboyları (Schneider, 2004).



Şekil 2.4. Frekans aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin frekansları (Schneider, 2004)

WDM sistemlerinde kanal sayısı ile FWM olayının ürettiği ürün miktarı ilişkilidir. N kanallı WDM sistemindeki toplam FWM ürün sayısı M

$$M = \frac{N^2(N - 1)}{2} \quad (2.15)$$

ile hesaplanır (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

Tek segmentli bir iletişim sisteminde, FWM ürününün gücü (2.16) ile belirlenebilir (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

$$P_{\text{FWM}}(f_{ijk}) = \left(\frac{d_{ijk} \gamma L_{\text{eff}}}{3} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (2.16)$$

(2.16)'da d_{ijk} dejenerasyon faktörü ($i = j \neq k$ ise $d_{ijk} = 3$ ve $i \neq j \neq k$ ise $d_{ijk} = 6$), P_i , P_j ve P_k kanalların giriş güçleri, η_{ijk} FWM etkinliği, L fiber uzunluğudur.

Doğrusalsızlık katsayısı γ

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (2.17)$$

ile tanımlanabilir. (2.17)'de n_2 doğrusal olmayan kırılma indisi (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

Fiberin etkin uzunluğu L_{eff}

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (2.18)$$

ile elde edilebilir.

FWM'in etkinliği η_{ijk}

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta_{ijk}^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta\beta_{ijk} L}{2} \right) \right] \quad (2.19)$$

ile tanımlanabilir (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

(2.19)'da $\Delta\beta_{ijk}$ faz uyumsuzluğu faktörü olup (2.20) ile hesaplanabilir (Agrawal, 2019; Schneider, 2004).

$$\Delta\beta_{ijk} = \frac{2\pi \lambda_c^2}{c} (|f_i - f_k| |f_j - f_k|) \left[D_c + \frac{\lambda_c^2}{2c} \frac{dD_c(\lambda_c)}{d\lambda} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (2.20)$$

Denklem (2.20)'de, merkez kanalın dalgaboyunu temsil etmek için λ_c ; ışığın boşluktaki hızını temsil etmek için c ; fiberin kromatik dispersiyon katsayısını temsil etmek için D_c ve dalgaboyuna göre kromatik dispersiyon eğimini göstermek için $dD_c(\lambda_c)/d\lambda$ kullanılmıştır. FWM olayının belirli bir WDM kanalındaki işaret iletimini nasıl etkilediğini gösteren önemli bir parametre, işaret çaprazkarışım oranıdır (SXR). SXR (2.21) kullanılarak hesaplanır.

$$SXR = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{FWM}}} \quad (2.21)$$

(2.21)'deki WDM kanalının çıkış gücü $P_{\text{çıkış}}$, $P_{\text{giriş}}$ giriş gücünden bulunur ($P_{\text{çıkış}} = P_{\text{giriş}} \cdot e^{-\alpha L}$). P_{FWM} , ilgili kanalda çaprazkarışımına neden olan tüm FWM ürünlerinin toplam gücüdür.

2.2.5. Optik Kuvvetlendirici İçermeyen Tek Segmentli WDM Haberleşme Sistemlerinde SPM ve XPM'in Birleşik Etkisi Altında FWM

Song vd. (1999)'da SPM ve XPM'in faz uyumsuzluk faktörü üzerindeki etkisi teorik hesaplamalar ve benzetimlerle incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, faz uyumsuzluk faktörünün matematiksel formülü geliştirilmiş; FWM çaprazkarışım güç formülü de revize edilmiştir. Song vd. (1999)'a göre SPM ve XPM etkisi altındaki faz uyumsuzluk faktörü

$$\Delta\beta' = \Delta\beta - \gamma(P_1 + P_2 - P_3) \left[\frac{\{1 - e^{(-\alpha L_{eff})}\}}{\alpha L_{eff}} \right] \quad (2.22)$$

ile hesaplanabilir. Bu denklemde $\Delta\beta$, SPM ve XPM etkisi ihmal edildiği durumdaki faz uyumsuzluk faktörü, γ doğrusalsızlık katsayısı, P_1 , P_2 ve P_3 giriş pompa güçleri. WDM sistemlerinde kanal giriş güçleri eşit alındığında, Denklem (2.22)

$$\Delta\beta' = \Delta\beta - \gamma P \left[\frac{\{1 - e^{(-\alpha L_{eff})}\}}{\alpha L_{eff}} \right] \quad (2.23)$$

halini alır. Bu durumda yeni FWM etkinliği,

$$\eta' = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta')^2} \left[1 + \frac{4e^{(-\alpha L)} \sin^2(\Delta\beta' L/2)}{(1 - e^{(-\alpha L)})^2} \right] \quad (2.24)$$

ile hesaplanabilir. Sonuç olarak, SPM ve XPM yoğunluk modülasyonlarının etkisi de göz önüne alınarak FWM çaprazkarışım gücü P'_{FWM} ,

$$P'_{FWM}(f_{ijk}) = \left(\frac{d_{ijk} \gamma L_{eff}}{3} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta'_{ijk} \quad (2.25)$$

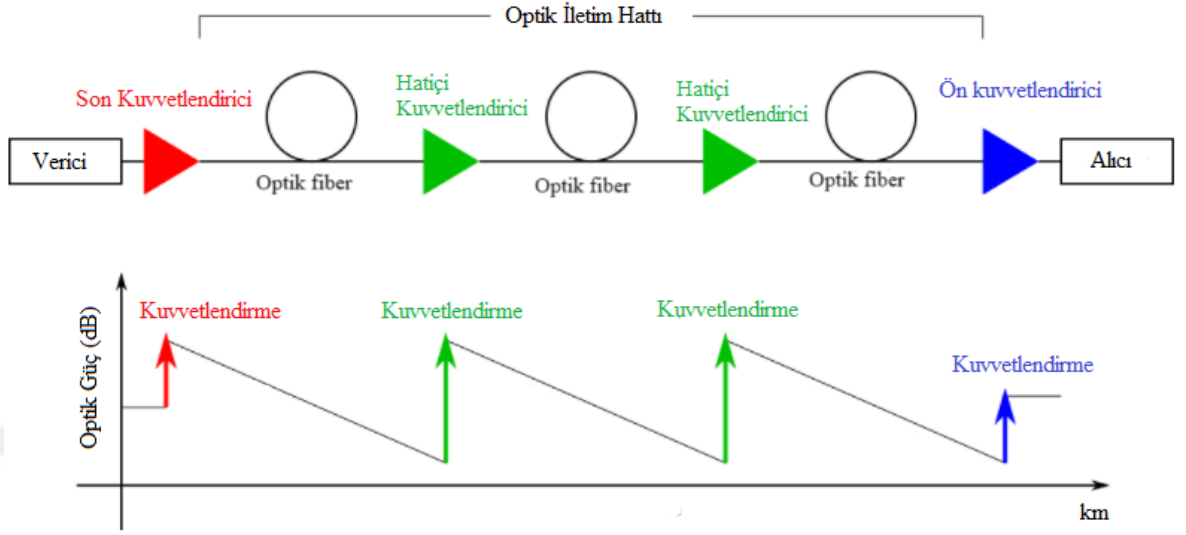
ile ifade edilebilir.

2.2.6. Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici (EDFA)

Optik fiber kuvvetlendiriciler, optik işaretleri elektriksel işarete dönüştürmeden doğrudan kuvvetlendiren cihazlar olup, işaretlerin optik fiberlerden geçerken zayıflama yaşayabileceği uzun mesafeli optik iletişim sistemleri için çok önemlidir. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricisi (EDFA) en yaygın optik fiber kuvvetlendirici türüdür.

EDFA kuvvetlendiriciler, silika fiberin çekirdeğine gömülü olan az miktarda erbiyum iyonunu kullanır. Erbiyum iyonları, bir pompa lazeri tarafından uyarıldığında, optik işaretleri belirli dalgaboylarında kuvvetlendirir. Çalışma prensibi, bir optik işaret erbiyum katkılı fiberden geçerken, erbiyum iyonlarının gelen işaretle aynı dalgaboyunda ek fotonlar salmaları için uyarılmasına dayanır. Bu süreç işaretin kuvvetlendirilmesine yol açar. EDFA'lar, erbiyum iyonlarını uyarmak için harici bir pompa lazer gerektirir. EDFA'lar için yaygın pompa dalgaboyları 980 nm ve 1480 nm civarındadır. Bu dalgaboyları, erbiyum iyonlarını etkili bir şekilde uyarabildikleri için seçilmiştir (Keiser, 2010).

Kuvvetlendirme aralığı, optik iletişimde yaygın olarak kullanılan C bandındaki (1530 nm-1565 nm dalgaboyu aralığı) ve bazen L bandındaki (1565 nm - 1625 nm dalgaboyu aralığındaki) işaretleri kuvvetlendirmek için tasarlanmıştır. EDFA'lar, uzun mesafeli optik fiberli iletişim, WDM sistemleri ve denizaltı iletişim kabloları dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılır. EDFA'lar, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, alıcının girişinde ön kuvvetlendirici, verici çıkışında son kuvvetlendirici ve iletim hattı boyunca hat içi kuvvetlendirici olarak kullanılabilir (Keiser, 2010).



Şekil 2.5. Optik iletimde son kuvvetlendirici, hat içi kuvvetlendirici, ön kuvvetlendirici olarak EDFA kullanımı (Keiser, 2010)

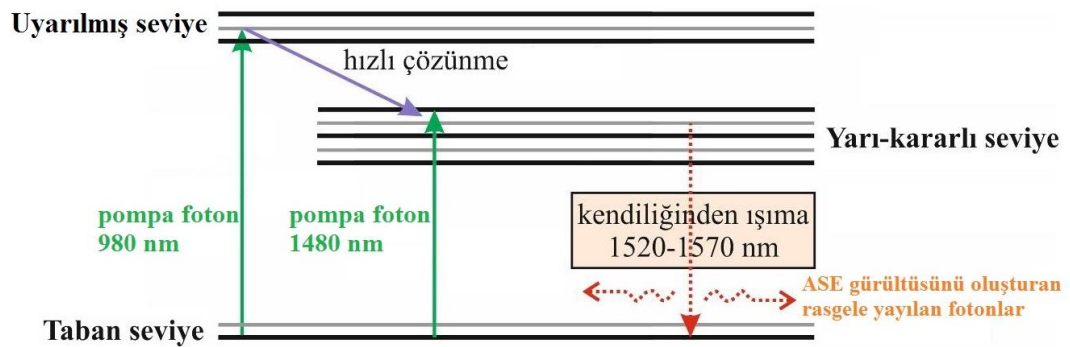
Optik fiber kuvvetlendiriciler, geleneksel elektronik kuvvetlendiricilere göre çeşitli avantajlar sunar. İşareti elektriksel forma dönüştürmeden kuvvetlendirme sağlayarak minimum işaret bozulmasıyla yüksek hızlı ve uzun mesafeli iletişime olanak tanırırlar. Rejenerasyon konusunda, optik fiber kuvvetlendiriciler işaretleri yeniden oluşturmak ve kuvvetlendirmek için optik fiber bağlantısı boyunca stratejik olarak yerleştirilebilir ve böylece pahalı ve karmaşık rejeneratörlere ihtiyaç duymadan daha uzun iletim mesafelerine olanak tanırırlar (Keiser, 2010).

2.2.7. Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım (ASE) Gürültüsü

Kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım (ASE) gürültüsü, EDFA'lar gibi optik kuvvetlendiricilerde, fotonların kendiliğinden emisyonu nedeniyle kuvvetlendirilmiş işarete eklenebilir. Fotonlar, uyarılmış Erbium iyonları tarafından serbest bırakılır ve temel seviyeye iner. Fiber boyunca kendiliğinden salınan fotonları kuvvetlendiren bu emisyon sürecinin bir sonucu olarak uyarılmış iyonlardan ek fotonlar salınır. Sistemin performansı, fotonların bu salınımları tarafından üretilen ASE gürültüsü nedeniyle sınırlanır (Keiser, 2010).

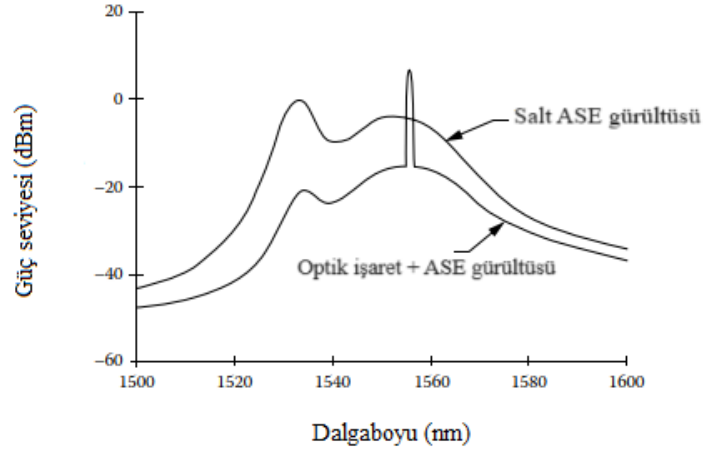
Optik işaretlerin kuvvetlendirilmesi sürecinde, kazanç ortamındaki atomlar veya iyonlar herhangi bir dış uyaran olmadan fotonları serbest bıraktığında kendiliğinden emisyon meydana gelir. EDFA'lar söz konusu olduğunda, fiberdeki erbiyum iyonları kendiliğinden fotonlar yayabilir. Bir optik işaret kuvvetlendiriciden geçtiğinde, hem işaret hem de kendiliğinden yayılan fotonlar güçlendirilir. Kendiliğinden emisyon güçlendirilmiş işaretteki gürültüye katkıda bulunabilir. ASE, işarete gürültü katarak optik işaret-gürültü oranını (OSNR) düşürür (Keiser, 2010).

Kuvvetlendiricinin kazancı arttıkça ASE gürültüsü daha önemli hale gelir. Yüksek ASE seviyeleri, özellikle uzun mesafeli veya yüksek kapasiteli iletişim bağlantıları gibi düşük gürültünün önemli olduğu senaryolarda, optik iletişim sisteminin genel performansını sınırlayabilir. Optik iletişim sistemlerinde ASE gürültüsünü azaltmak için çeşitli önlemler alınmaktadır. Bazı yaygın teknikler arasında, kuvvetlendirici tasarımının optimize edilmesi, istenmeyen dalga boylarını azaltmak için optik filtrelerin kullanılması ve gelişmiş işaret işleme tekniklerinin dahil edilmesi yer alır. ASE gürültüsü, optik iletişim sistemlerinin tasarımında ve işletiminde dikkate alınan bir husustur ve optik fiberli ağlarda bilginin uzun mesafeler üzerinden güvenilir şekilde iletilmesini sağlamak için etkin bir şekilde yönetilmesi esastır. ASE fotonlarının oluşumu Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Durak, 2017).



Şekil 2.6. ASE fotonlarının oluşumu (Durak,(2017)'den değiştirilerek alınmıştır.)

ASE gürültüsü, geniş bir spektral aralığa sahiptir; kuvvetlendiricinin kazanç spektrumu olan C ve L bantlarının neredeyse tamamını kapsar. ASE gürültüsünün olduğu ve olmadığı işaret gücü seviyeleri Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. ASE gürültü spektrumu (Binh, 2014)

ASE gürültü gücü, Denklem (2.26) ile hesaplanabilir (Keiser, 2010).

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G - 1)hfB_0m \quad (2.26)$$

Burada, n_{sp} popülasyon ters birikim faktörü; G kuvvetlendirici kazancı; h Planck sabiti ($6,63 \times 10^{-34}$ J.s); f optik işaretin merkez frekansı (Hertz cinsinden); B_0 optik filtre bantgenişliği (Hertz cinsinden) ve m toplam kuvvetlendirici sayısıdır. m ,

$$m = \frac{L}{\ell} - 1 \quad (2.27)$$

ile hesaplanır. Burada L optik fiber hattının uzunluğu; ℓ ise segment uzunluğu veya kuvvetlendiriciler arasındaki mesafedir. İletim sistemindeki tüm kuvvetlendiriciler için aynı karakteristikler ve segmentler arası iletim kayıpları için tam kompanzasyon yapıldığı varsayılarak, m adet optik kuvvetlendirici içeren sistemde, alıcı girişindeki ASE gürültüsü,

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G - 1)hfB_0me^{-\alpha\ell} \quad (2.28)$$

ile hesaplanır.

2.2.8. EDFA Kullanan Çok Segmentli DWDM Sistemlerinde FWM

Çok segmentli iletişim sistemlerinde, EDFA'lar kullanıldığında, kuvvetlendirici sayısı ve aralıkları FWM üzerinde etkiye sahiptir. Dolayısıyla, FWM etkisi altında işaret iletiminin verimliliği değerlendirilirken, sisteme dahil edilen EDFA'ların sayısı ve aralıkları matematiksel formülasyonlarda dikkate alınmalıdır.

Inoue (1992)'ye göre, EDFA kullanan çok segmentli iletişim sistemlerinde üretilen FWM işaretinin gücü,

$$P_{FWM}(f_{ijk}) = \left(\frac{d_{ijk}\gamma L_{eff}}{3} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} (m + 1)^2 \eta_{ijk} \quad (2.29)$$

ile hesaplanır.

Çok segmentli sistemlerde FWM etkinliği (η_{ijk})

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{(m+1)^2(\alpha^2 + \Delta B_{ijk}^2)} \left[\frac{\sin^2((m+1)\Delta B_{ijk}(l/2))}{\sin^2(\Delta B_{ijk}(l/2))} \right] \left[1 + \frac{4e^{-\alpha l}}{(1-e^{-\alpha l})^2} \sin^2\left(\frac{\Delta B_{ijk}l}{2}\right) \right] \quad (2.30)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Çok segmentli WDM tabanlı iletişim sisteminde FWM çaprazkarışımının belirli bir kanal üzerindeki etkisi, ASE gürültüsü etkisi de dikkate alınarak, OSNR

$$\text{OSNR} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{FWM}} + P_{\text{ASE}}} \quad (2.31)$$

şeklinde belirlenir. Çok segmentli sistemlerde EDFA kullanıldığında, $P_{\text{çıkış}}$ (kanalın çıkış gücü), segment uzunluklarının sabit olduğu ve tüm EDFA kuvvetlendirici kazançlarının eşit ve $G = e^{al}$ olduğu durumda, $P_{\text{çıkış}} = P_{\text{giriş}}^{-al}$ ile bulunabilir.

2.2.9. EDFA Kullanan Çok Segmentli DWDM Sistemlerinde SPM+XPM+FWM+SRS+ASE Gürültüsü ve FWM+SRS+ASE Gürültüsü Birleşik Etkileri

WDM tabanlı optik iletişim sistemlerinin performansı, kanal sayısı, kanal giriş gücü, toplam iletim mesafesi, kanal aralığı, kullanılan kuvvetlendirici sayısı ve segment uzunluğu gibi bir dizi tasarım parametresine bağlıdır. Sistemin performansı, optik fiberde oluşan SPM, XPM, FWM, SRS ve ASE gürültüsü gibi unsurlarla sınırlıdır. Agrawal (2019) ve Schneider (2004)'e göre, DWDM haberleşme sistemlerinde sistem kapasitesini sınırlayan ana doğrusalsızlıklar SRS ve FWM'dir. Literatürdeki çalışmalarda da genel eğilimin bu yönde olduğu görülmüştür. Bu eğilimin “genel geçerliliğini” incelemek amacıyla, Song (1998) ve Song vd. (1999)'da verilen modifiye faz uyumsuzluk faktörü yardımıyla, bu doktora tezinde, çok segmentli sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Çok segmentli DWDM iletişim sisteminin belirli bir kanalındaki birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisini gösteren OSNR değeri, Denklem (2.32)'de verilmiştir.

$$\text{OSNR} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{SRS}}}{P_{\text{FWM}} + P_{\text{ASE}}} \quad (2.32)$$

Burada P_{SRS} , SRS etkisi nedeniyle alıcıya ulaşan modifiye işaret gücü; P_{FWM} , kanallar arası etkileşimler tarafından üretilen toplam FWM çaprazkarışım gücü; P_{ASE} , EDFA kuvvetlendirici kaynaklı ASE gürültüsünü belirtir.

Çok segmentli DWDM iletişim sisteminin belirli bir kanalındaki birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisini gösteren OSNR değeri Denklem (2.33)'te verilmiştir.

$$\text{OSNR} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{SRS}}}{P''_{\text{FWM}} + P_{\text{ASE}}} \quad (2.33)$$

Burada P''_{FWM} çok segmentli sistem yapısındaki SPM ve XPM etkisinin dikkate alındığı FWM çaprazkarışım gücüdür.

Bu doktora tezinin amacı, güvenilir uzun mesafeli DWDM iletişim sistemlerinin geliştirilebilmesi için, doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki birleşik etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Doğrusal olmayan olayların birleşik etkilerinin en şiddetli olduğu durumdaki OSNR'yi incelemek ve dolayısıyla en kötü hal analizi yapabilmek için, 15, 31 ve 63 kanallı uzun mesafeli DWDM iletişim sistemlerinin merkez kanallarına özel önem verilerek modelleme ve benzetimler yapılmıştır. EDFA kullanan çok segmentli sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi benzetim sonuçları karşılaştırılarak incelenmiştir.

Benzetimlerde, ITU-T G.694.1 (ITU-T, 2020) ile belirtilen DWDM standartlarına uygun olarak, 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralığı değerleri kullanılmıştır. Sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiber (NZDSF) ve standart tek modlu fiber (SSMF) kullanan iletişim sistemlerinde FWM etkisinin en yoğun olduğu kanallar, merkez kanallardır (Karlík, 2016). Bu nedenle, benzetimlerde, merkez kanallardaki doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Benzetim Modeli

Doktora tezinde, MATLAB ortamında gerçekleştirilen benzetimlerde kullanılan benzetim modelleri, optik fiber parametreleri ve benzetim koşulları, bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. İki temel benzetim modeli kullanılmıştır. İlk modelde, tek segmentli DWDM sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ve birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında karşılaştırmalı sistem performansına odaklanılmıştır. İkinci modelde ise, çok segmentli DWDM sistemlerde, birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (beşli etki) altında ve birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (üçlü etki) altında karşılaştırmalı sistem performansı üzerinde durulmuştur.

Merkez kanalların dalgaboyu 1550 nm olarak seçilmiş ve G.652 standart tek modlu fiber (SSMF) parametreleri kullanılarak, 15, 31 ve 63 kanallı DWDM sistemleri için benzetimler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1’de kullanılan optik fiberin parametreleri açıklanmıştır. Ayrıca benzetimlerde, alıcıda merkez kanaldaki işareti elde etmek için kullanılan optik filtrenin sistemin kanal aralığı değeriyle eşleşen bir bant genişliğine sahip ve merkez dalgaboyunun 1550 nm olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 3.1. 1550 nm dalgaboyunda SSMF parametrelerinin değerleri

D_c [ps/(nm.km)]	S [ps/(nm ² .km)]	γ [1/(W.km)]	α [dB/km]
18	0,056	1,12	0,2

15, 31 ve 63 kanallı sistemlerin, sırasıyla 8., 16., ve 32. kanalları (merkez kanalları) dikkate alınarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. 15, 31 ve 63 kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında üretilen FWM ürünleri sırasıyla Çizelge 3.2–3.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. 15 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1									k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
2							k=1		k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9
3						k=1	k=2		k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
4					k=1	k=2	k=3		k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10	k=11
5					k=2	k=3	k=4		k=6	k=7	k=8	k=9	k=10	k=11	k=12
6						k=4	k=5		k=7	k=8	k=9	k=10	k=11	k=12	k=13
7							k=6		k=8	k=9	k=10	k=11	k=12	k=13	k=14
8															
9									k=10	k=11	k=12	k=13	k=14	k=15	
10										k=12	k=13	k=14	k=15		
11											k=14	k=15			
12															
13															
14															
15															

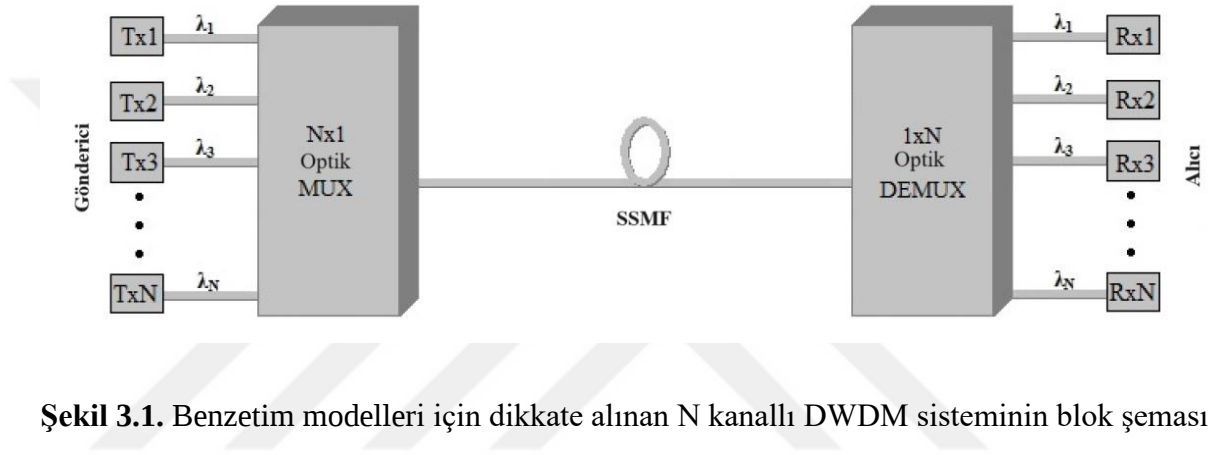
Çizelge 3.3. 31 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31						
1																	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16						
2															1		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17						
3														1	2		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
4												1	2	3			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19						
5												1	2	3	4		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						
6											1	2	3	4	5		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21						
7										1	2	3	4	5	6		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22						
8									1	2	3	4	5	6	7		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23						
9									2	3	4	5	6	7	8		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24						
10										4	5	6	7	8	9		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25						
11											6	7	8	9	10		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26						
12												8	9	10	11		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27						
13													10	11	12		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28						
14														12	13		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29						
15															14		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30						
16																																					
17																	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31							
18																		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31								
19																			22	23	24	25	26	27	28	29	30	31									
20																				24	25	26	27	28	29	30	31										
21																					26	27	28	29	30	31											
22																						28	29	30	31												
23																							30	31													
24																																					
25																																					
26																																					
27																																					
28																																					
29																																					
30																																					
31																																					

Çizelge 3.4. 63 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri

İlk	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63																										
1																	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32																										
2															1		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33																										
3														1	2		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34																										
4													1	2	3		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35																										
5												1	2	3	4		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																										
6												1	2	3	4	5		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37																									
7												1	2	3	4	5	6		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38																								
8												1	2	3	4	5	6	7		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39																							
9												1	2	3	4	5	6	7	8		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40																						
10												1	2	3	4	5	6	7	8	9		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41																					
11												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42																				
12												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43																			
13												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44																		
14												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																	
15												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46																
16												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47															
17												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47															
18												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48														
19												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50												
20												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51											
21												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52										
22												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53									
23												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54								
24												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55							
25												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56						
26												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57					
27												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58				
28												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59			
29												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
30												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	
31												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
32												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		33	34	35	36	37	38	39																							

Çizelge 3.2-3.4'teki i, j ve k sembolleri DWDM sisteminin merkez kanalına düşen FWM ürünlerini üretmek üzere etkileşime giren kanal numaralarını göstermektedir. Örneğin, 31 kanallı bir sistemde, 13 (i), 18 (j) ve 15 (k) numaralı kanallar, merkez kanal olan 16. kanalda, kanalın frekansına eşit frekanslı yeni bir dalga oluşturmak üzere etkileşime girer. Bu yeni dalgaların oluşumu sırasında $k \neq i, j$ koşulunun dikkate alınması şarttır.



Şekil 3.1. Benzetim modelleri için dikkate alınan N kanallı DWDM sisteminin blok şeması

3.2. SXR-Giriş Gücü Benzetim Koşulları

SXR-giriş gücü benzetimleri için dikkate alınan benzetim koşulları bu bölümde ele alınmaktadır. Tek segmentli optik fiberli DWDM sistemlerin benzetimlerinde, tüm kanal giriş güçlerinin eşit olduğu kabul edilmiş ve benzetimler kanal giriş güçlerinin 0,1 mW-5 mW aralığı için yapılmıştır. Tek segment benzetimlerinde, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alınarak benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tek segmentli DWDM iletişim sistemi için 150 km iletim uzunluğu belirlenmiştir. Uzak mesafe DWDM sistemi için kanal aralığı değerleri ITU-T G.694.1 tavsiyelerine uygun şekilde 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olarak seçilmiştir.

Bu tezde, DWDM optik iletişim sistemlerinin performansının FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında değerlendirilmesinde minimum SXR eşiği 23 dB olarak kabul edilmiştir. Literatürde minimum SXR değerleri 20-25 dB aralığında seçilmektedir

(Harboe vd., 2008; Yamada vd., 1997). Bölüm 4.1’de ilgili benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

3.3. SXR-Kanal Aralığı Benzetim Koşulları

SXR-kanal aralığı değerleri için gerçekleştirilen benzetim koşulları bu alt bölümde açıklanmıştır. Tek segmentli uzak mesafe DWDM iletişim sistemleri için kanal aralığı değerleri bu benzetimler kapsamında 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştirilmiştir.

Tüm kanalların giriş güçleri eşit kabul edilmiş ve benzetimler bu eşit kanal giriş güçlerinin 0,1 mW, 0,5 mW, 1mW, 3mW ve 5 mW değerleri için gerçekleştirilmiştir.

DWDM tek segmentli uzak mesafe iletişim sisteminin kanal uzunlukları 150 km olarak belirlenmiştir. FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında SXR performansları karşılaştırılmıştır. Bölüm 4.2’de benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

3.4. OSNR-Giriş Gücü Benzetim Koşulları

OSNR-giriş gücü benzetimleri için dikkate alınan benzetim koşulları bu bölümde açıklanmıştır. Bu benzetimler, 1550 nm dalgaboyu aralığında çalışan ve EDFA kullanan çok segmentli optik fiberli DWDM sistemler için gerçekleştirilmiştir. Kanal giriş güçlerinin eşit olduğu varsayılmıştır. Kanal giriş güçleri 0,1mW-5 mW aralığında değiştirilmiştir. Çok segmentli sistem benzetimlerinde, farklı kuvvetlendirici sayıları (1 EDFA, 2 EDFA, 3 EDFA, 4 EDFA ve 5 EDFA) kullanılarak birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında OSNR performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çok segmentli optik fiberli DWDM sisteminde toplam iletim uzunluğu 150 km seçilmiştir. EDFA kullanan çok segmentli sistem yapısındaki segment uzunlukları eşit ve 1 EDFA

(2 segment), 2 EDFA (3 segment), 3 EDFA (4 segment), 4 EDFA (5 segment), 5 EDFA (6 segment) sayısı için, sırasıyla, 75 km, 50 km, 37,5 km, 30 km ve 25 km olarak belirlenmiştir. EDFA kullanan çok segmentli uzak mesafe DWDM sistemi için kanal aralığı değerleri ITU-T G.694.1 standardına uygun olarak 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz seçilmiştir.

Bu tezde, optik kuvvetlendirici (EDFA) kullanan çok segmentli sistemlerde birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında DWDM optik haberleşme sistemlerinin performansını analiz etmek için minimum 23 dB OSNR değeri kullanılmıştır. Bölüm 4.3'te benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

3.5. OSNR-Kanal Aralığı Benzetim Koşulları

OSNR-kanal aralığı benzetimleri için oluşturulan benzetim koşulları bu bölümde açıklanmaktadır. EDFA'ların çalışma bölgesi ile örtüşmesi için operasyonel dalga boyu 1550 nm olarak seçilmiştir. EDFA kullanan çok segmentli uzak mesafeli DWDM iletişim sistemleri için kanal aralığı değerleri, bu benzetimlerde, 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştirilmiştir.

Kanal giriş güçleri eşit kabul edilmiş ve benzetimler eşit kanal giriş güçlerinin 0,1 mW, 0,5 mW, 1 mW, 3 mW ve 5 mW değerleri için gerçekleştirilmiştir.

DWDM çok segmentli uzak mesafe iletişim sisteminin MUX-DEMUX arasındaki toplam fiber uzunluğu 150 km olarak seçilmiştir. EDFA kullanan çok segmentli sistem yapısındaki segment uzunlukları eşit ve 1 EDFA (2 segment), 2 EDFA (3 segment), 3 EDFA (4 segment), 4 EDFA (5 segment), 5 EDFA (6 segment) sayısı için, sırasıyla, 75 km, 50 km, 37,5 km, 30 km ve 25 km olarak belirlenmiştir. Bölüm 4.4'te benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

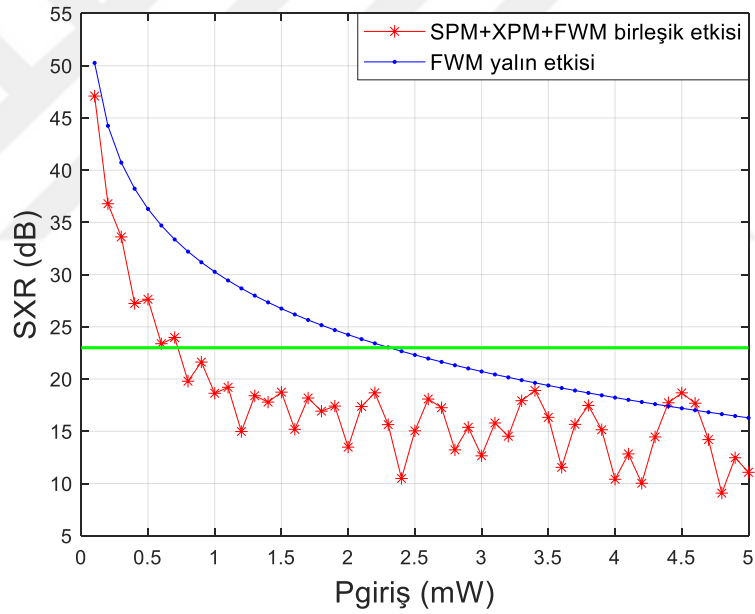
3.6. OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Koşulları

OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetimleri için belirlenen benzetim koşulları bu alt bölümde verilmektedir. EDFA'ların çalışma aralığına uygun operasyonel dalgaboyu 1550 nm olarak belirlenmiştir. Tüm kanalların, her biri 0,1 mW, 0,5 mW, 1mW, 3 mW ve 5 mW'a ayarlanmış eşit giriş güçlerine sahip olduğu varsayılmaktadır. DWDM standartlarına uygun olarak kanal aralığı değerleri 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz'dir. EDFA kullanan çok segmentli DWDM uzak mesafe iletişim sisteminde MUX-DEMUX arasındaki toplam fiber uzunluğu 150 km olarak belirlenmiştir. Benzetimlerde EDFA sayısı 1-5 aralığında değiştirilmiştir. Birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, Bölüm 4.5'te verilen OSNR benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

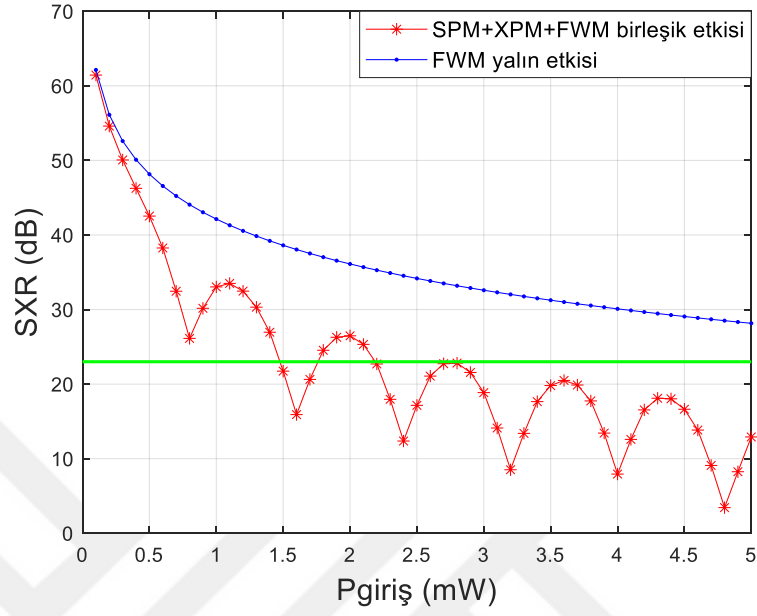
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. SXR-Giriş Gücü Benzetim Sonuçları

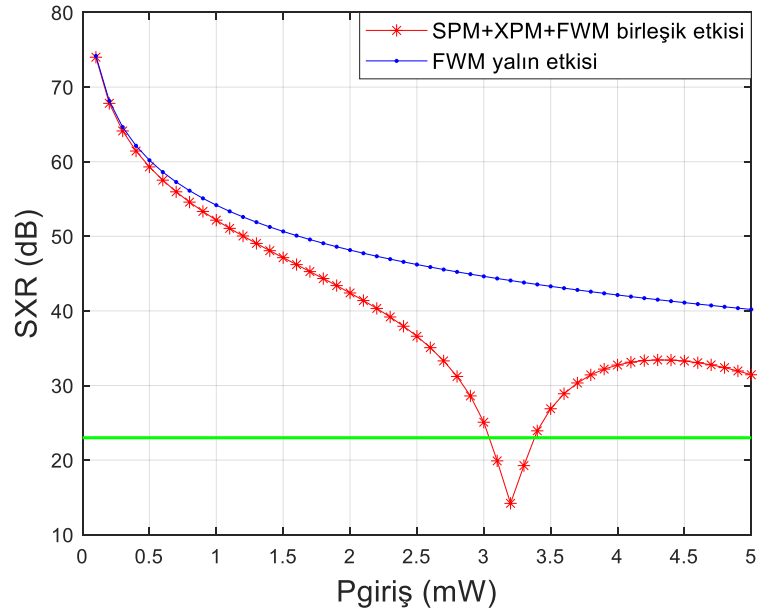
Bölüm 3.2’de açıklanan benzetim koşulları altında, tek segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıkları için giriş gücünün 0,1 mW-5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen SXR benzetim sonuçları, Şekil 4.1-4.12’de gösterilmiştir. Tüm şekillerdeki yeşil çizgi 3 dB’lik minimum SXR değerini temsil etmektedir.



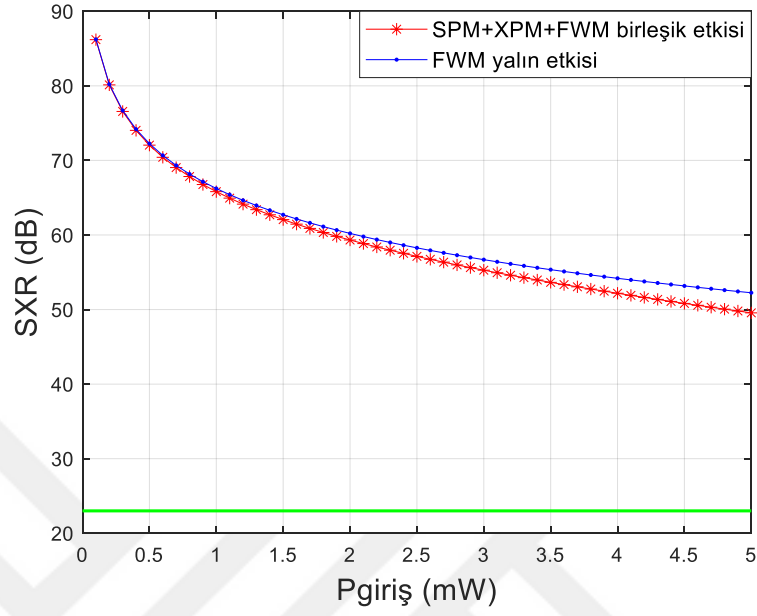
Şekil 4.1. 12,5 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR-P_{giriş} benzetim eğrileri



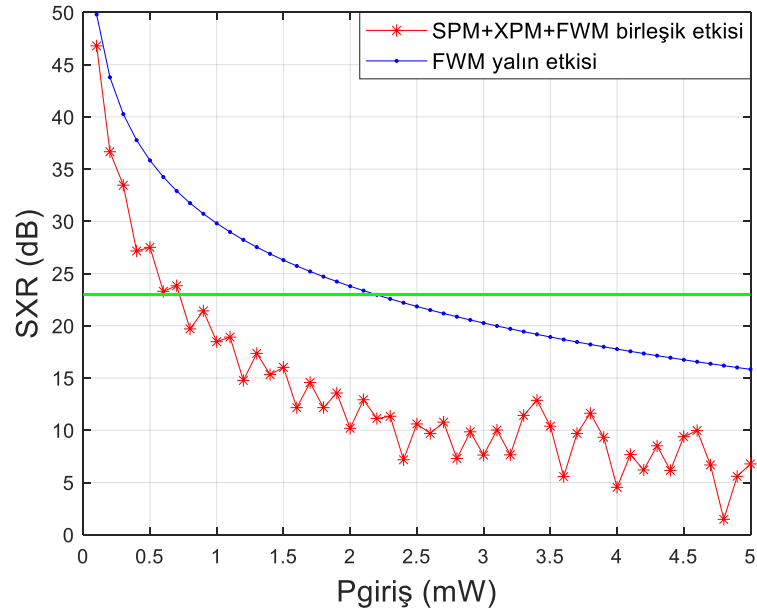
Şekil 4.2. 25 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



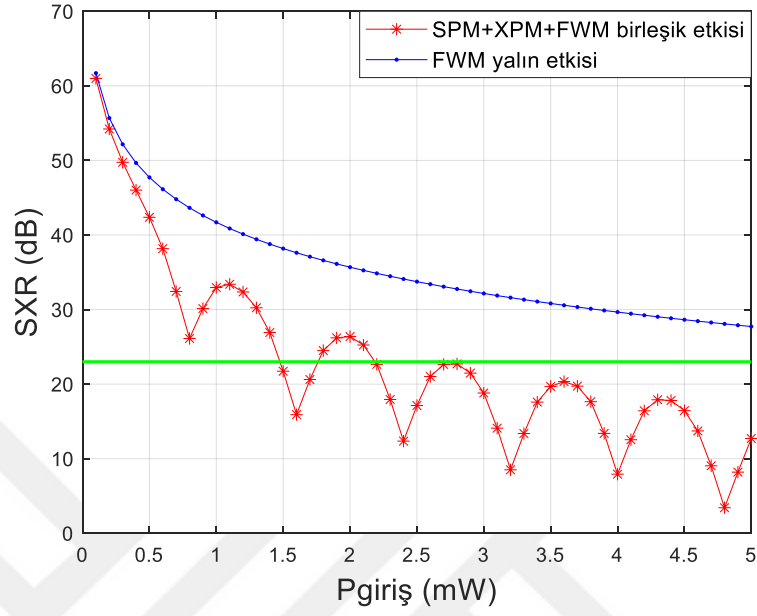
Şekil 4.3. 50 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



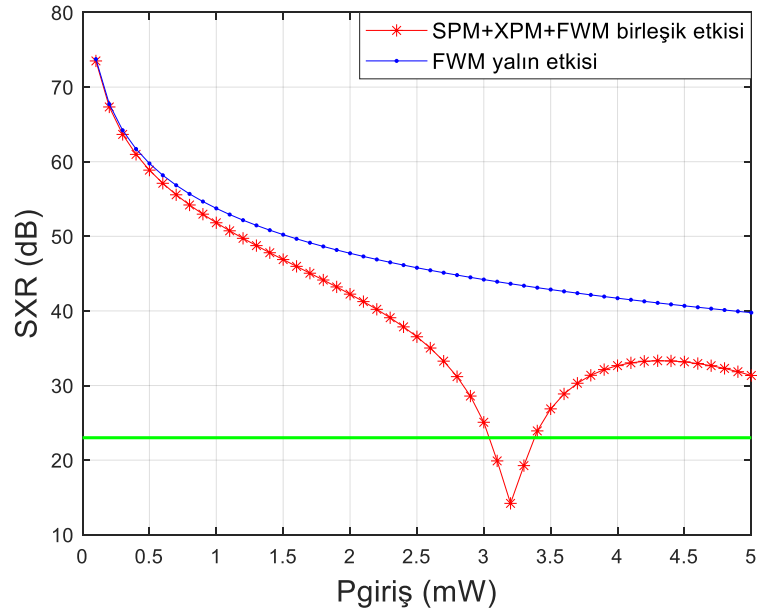
Şekil 4.4. 100 GHz kanal aralıklı 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



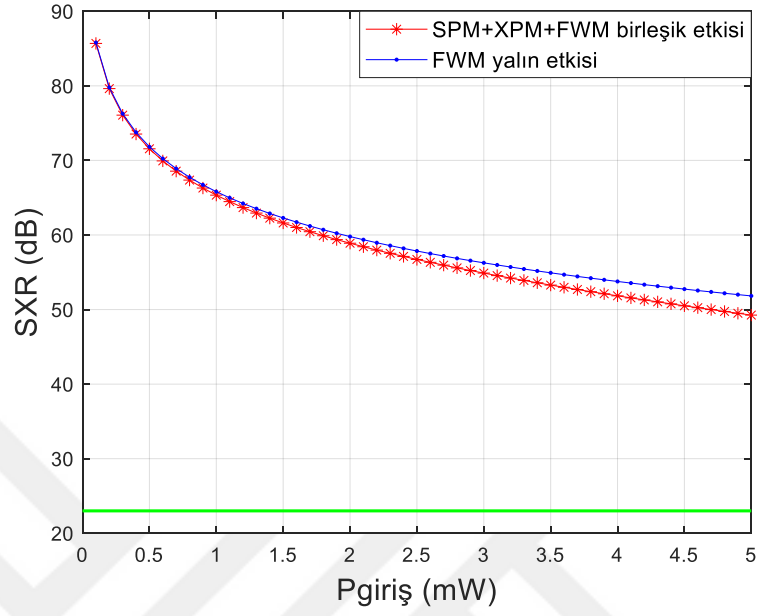
Şekil 4.5. 12,5 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



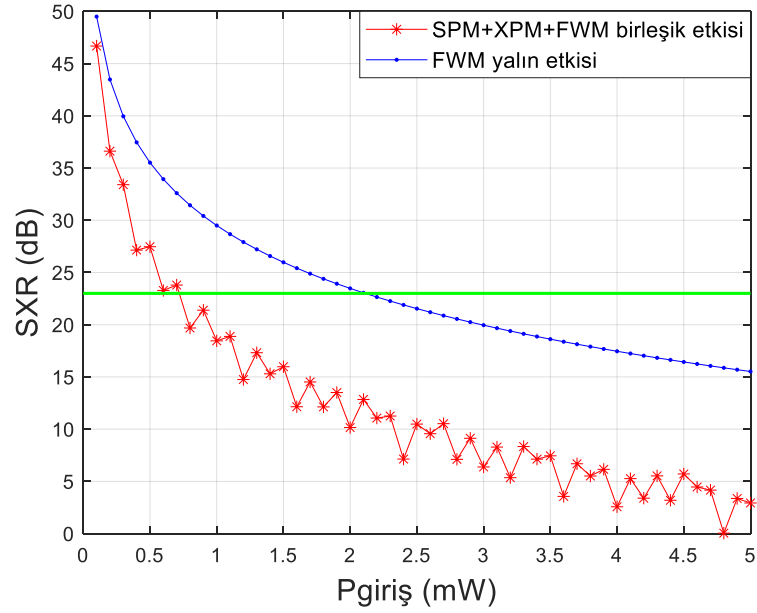
Şekil 4.6. 25 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



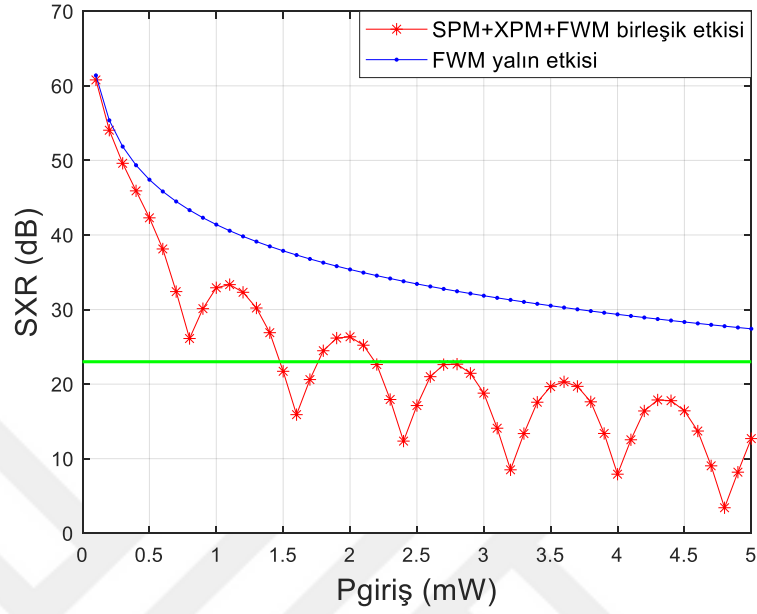
Şekil 4.7. 50 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



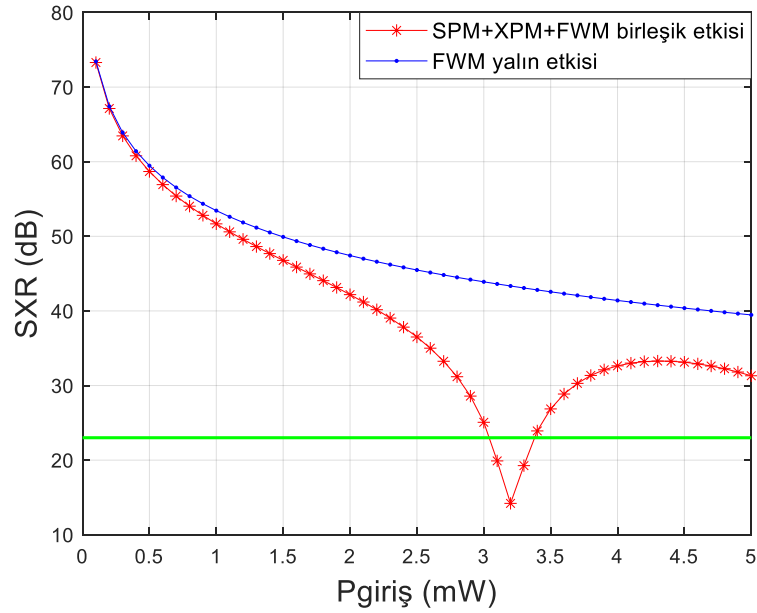
Şekil 4.8. 100 GHz kanal aralıklı 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



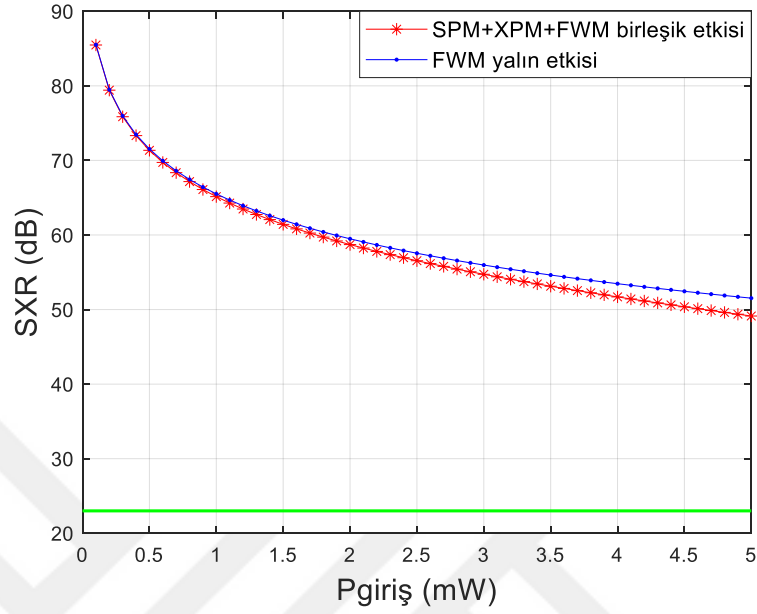
Şekil 4.9. 12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



Şekil 4.10. 25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



Şekil 4.11. 50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



Şekil 4.12. 100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri

Şekil 4.1-4.12'de FWM yalın etkisi dikkate alındığında, kanal giriş gücü arttıkça SXR'nin üstel olarak azaldığı açıktır. SXR'deki bu üstel azalma, merkez kanalda meydana gelen FWM çaprazkarışım gücünün, Denklem (2.16)'dan görüleceği üzere, eşit kanal giriş güçleri için, P^3 ile orantılı olarak artmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.4, 4.8 ve 4.12 hariç, bu altbölümde verilen tüm şekillerde, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alındığında, SXR değerleri artan kanal giriş güçleriyle birlikte osilasyonlu bir azalma davranışı göstermektedir. Bunun nedeni, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında Denklem (2.23) ile verilen faz uyumsuzluğu faktörünün ($\Delta\beta'$), kanal giriş güçlerinin artmasıyla birlikte azalmasıdır. Bu nedenle, Denklem (2.24)'ten açıkça görüldüğü gibi, kanal giriş güçlerinin artmasıyla $\Delta\beta'$ 'daki azalma, FWM etkinliği η' 'da osilasyonlu değişimlere neden olmaktadır. Dolayısıyla, bu da daha sonra SXR değerlerinde osilasyonlu azalmalara neden olmaktadır.

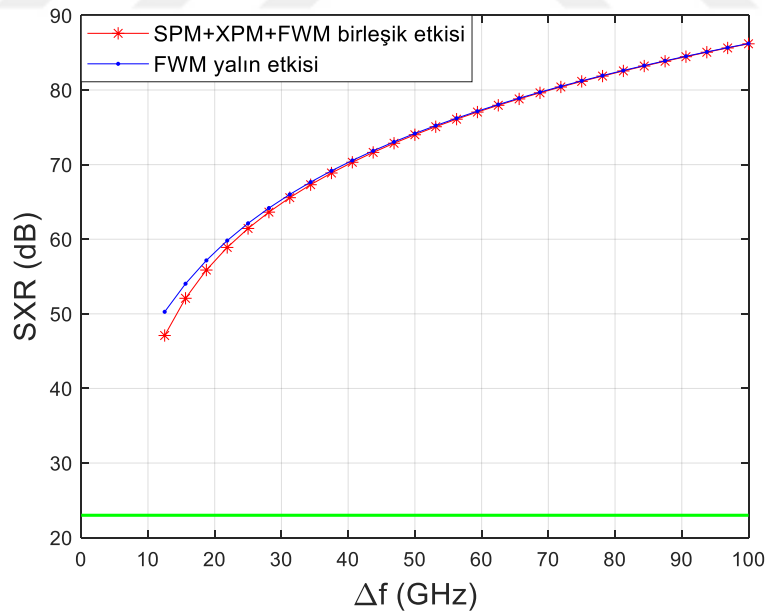
Ayrıca 0,1 mW-5 mW aralığında FWM yalın etkisi dikkate alınarak belirlenen SXR değerleri, genellikle birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alınarak elde edilen SXR değerlerinden daha yüksektir. FWM yalın etkisinin dikkate alındığı durumlarda kanal aralığı 12,5 GHz'in üzerinde olan tüm sistemlerde 0,1 mW ile 5 mW arasında değişen giriş güçleri için tüm SXR değerleri 23 dB sınırının üzerindedir. Ancak 12,5 GHz kanal aralıkları için, 15 kanallı sistemde 2,30 mW'ı, 31 kanallı sistemde 2,19 mW'ı ve 63 kanallı DWDM sistemde 2,11 mW'ı aşan kanal giriş güçleri için SXR değerleri 23 dB sınırının altındadır. Birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alındığında, kanal aralıkları 100 GHz olan sistemlerde 0,1 mW ile 5 mW arasında değişen giriş güçleri için tüm SXR değerleri 23 dB sınırının üzerindedir. Ancak kanal aralıkları 100 GHz'in altında olan tüm sistemlerde minimum 23 dB SXR değerinin elde edilebilmesini sağlayan giriş güçleri, SXR değerlerinin osilasyon davranışına göre değişmektedir.

Şekil 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.10 ve 4.11'de birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında belirlenen SXR değerlerinin osilasyon frekansı, tüm DWDM sistemleri için kanal aralıklarının artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.4, 4.8, ve 4.12'de, 0,1 mW-5 mW giriş güç aralığı için, 100 GHz kanal aralığına sahip tüm sistemlerde osilasyonlar kaybolmakta; FWM yalın etkisi ve birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında SXR eğrileri birbirini yakından takip etmektedir. İlgili eğrilerde, aynı giriş güçleri için SXR değerleri arasındaki fark, 15 kanallı sistem için 0,04 dB-2,7 dB; 31 kanallı sistem için 0,12 dB-2,57 dB; 63 kanallı sistem için 0,03 dB-2,39 dB aralığındadır. Bunun nedeni, kanal aralığı değeri arttıkça Denklem (2.20) tarafından verilen faz uyumsuzluğu faktörünün ($\Delta\beta$) artmasıdır. $\Delta\beta$ 'daki bu artış, Denklem (2.23) tarafından verilen $\Delta\beta'$ 'nin kanal giriş gücü değişimlerinden daha az etkilenmesini sağlar. Böylece, SXR değerlerinin osilasyon frekansı, kanal aralıklarındaki artışla birlikte azalır ve osilasyonlar, 100 GHz kanal aralığı için sonunda kaybolur. Burada, $\Delta\beta'$, küçük giriş gücü değerleri için yaklaşık olarak $\Delta\beta$ 'ya eşit olur ve büyük giriş gücü değerleri için $\Delta\beta$ 'dan farklılaşmaya başlar.

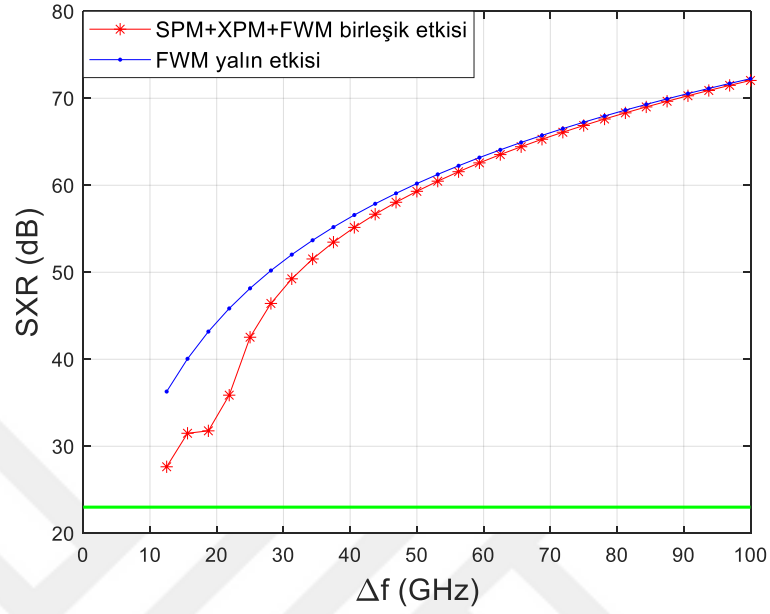
4.2. SXR-Kanal Aralığı Benzetim Sonuçları

Benzetimlerde, SXR'nin, kanal aralıklarının (Δf) 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği durumları dikkate alınmış ve tüm kanallar için eşit giriş güçleri varsayılmıştır. 15 kanallı, 31 kanallı, 63 kanallı sistemlerin merkez kanallarında 0,1 mW, 0,5 mW, 1 mW, 3 mW ve 5 mW kanal giriş güçleri ($P_{\text{giriş}}$) için FWM yalın etkisi ve birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında elde edilen karşılaştırmalı benzetim sonuçları, Şekil 4.13-4.27'de verilmiştir. Tüm şekillerdeki yeşil çizgi, 23 dB'lik minimum SXR değerini temsil etmektedir.

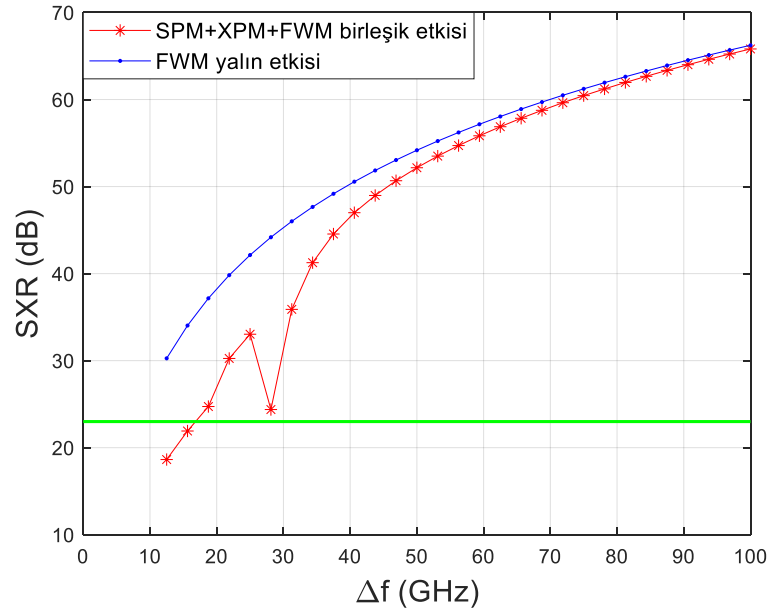
Ayrıca, 0,1 mW, 0,5 mW, 1 mW, 3 mW ve 5 mW kanal giriş güçlerine ve 12,5 GHz-100 GHz kanal aralıklarına sahip sistemlerin merkez kanallarında belirlenen karşılaştırmalı SXR değerleri, Çizelge 4.1a-4.5b'de verilmektedir. İlgili çizelgelerde, 23 dB'nin altındaki SXR değerleri koyu renkte yazılmıştır.



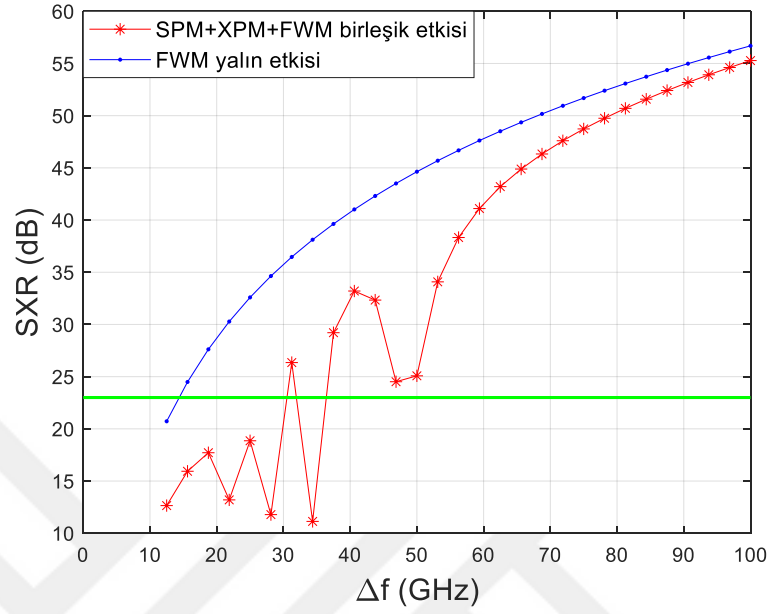
Şekil 4.13. $P_{\text{giriş}} = 0,1$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



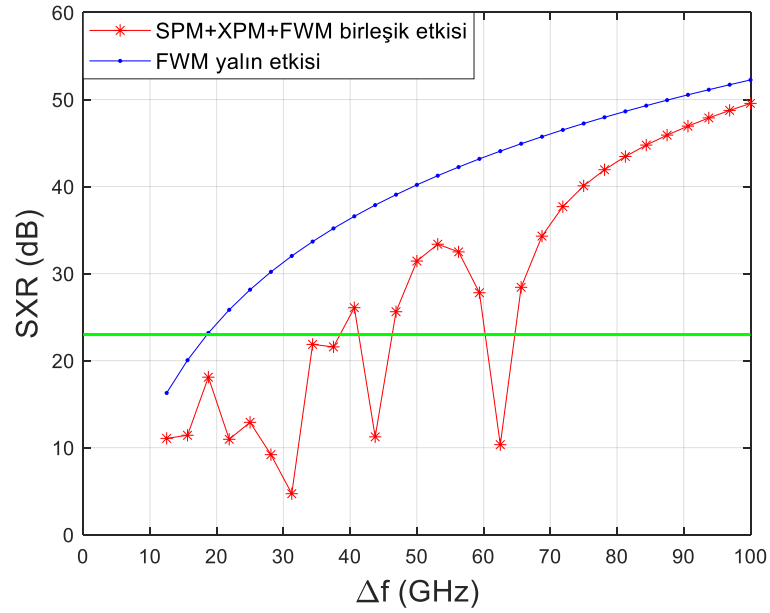
Şekil 4.14. $P_{\text{giriş}} = 0,5 \text{ mW}$ için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



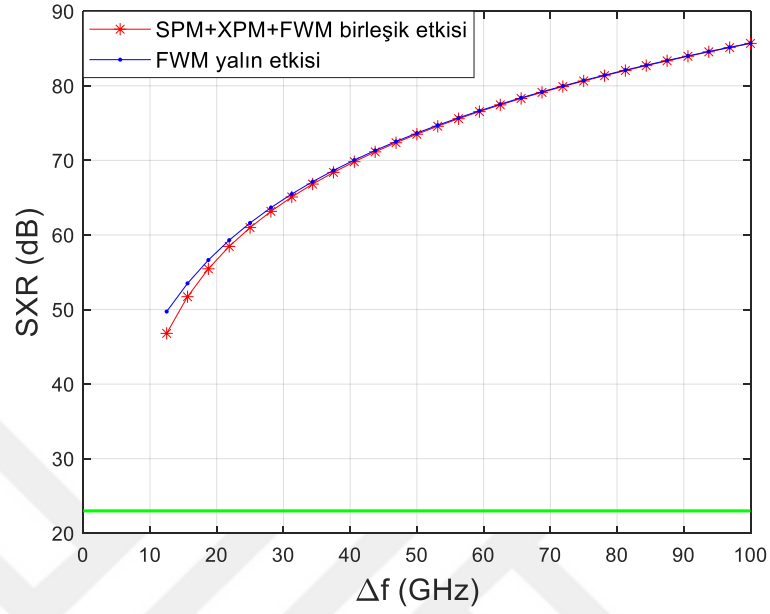
Şekil 4.15. $P_{\text{giriş}} = 1 \text{ mW}$ için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



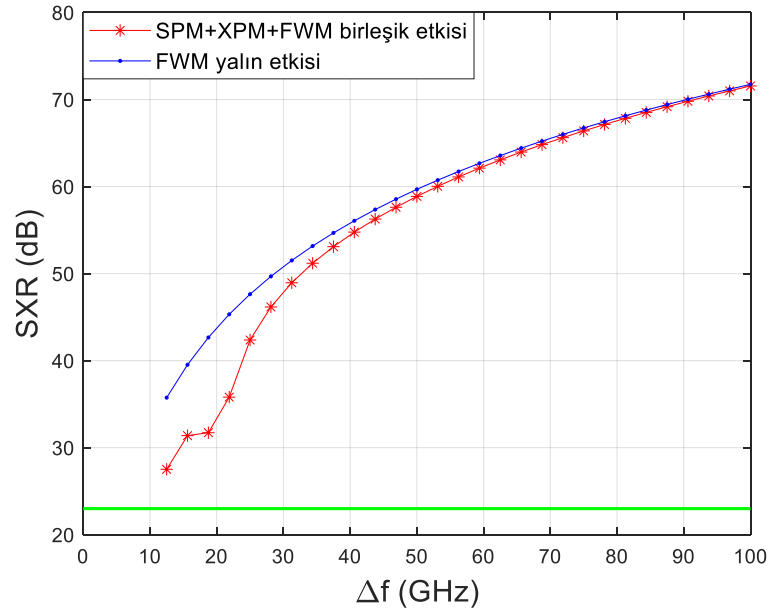
Şekil 4.16. $P_{\text{giriş}} = 3$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



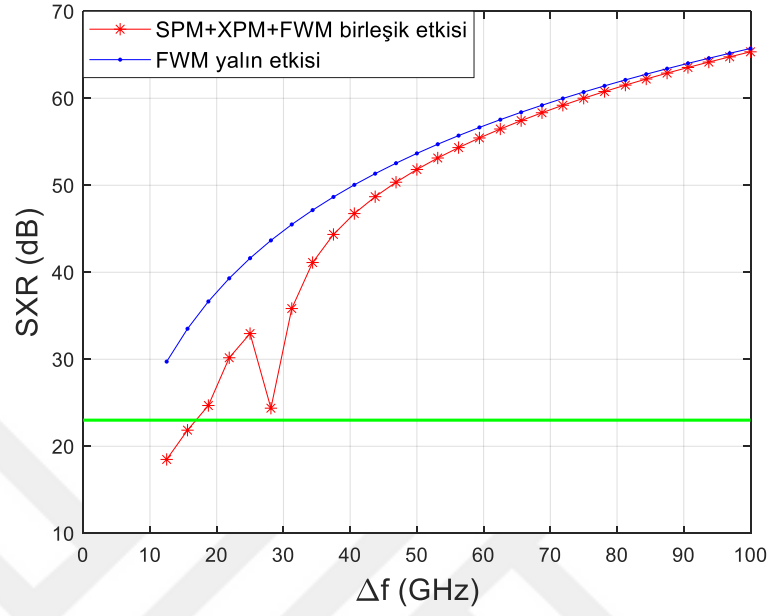
Şekil 4.17. $P_{\text{giriş}} = 5$ mW için 15 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



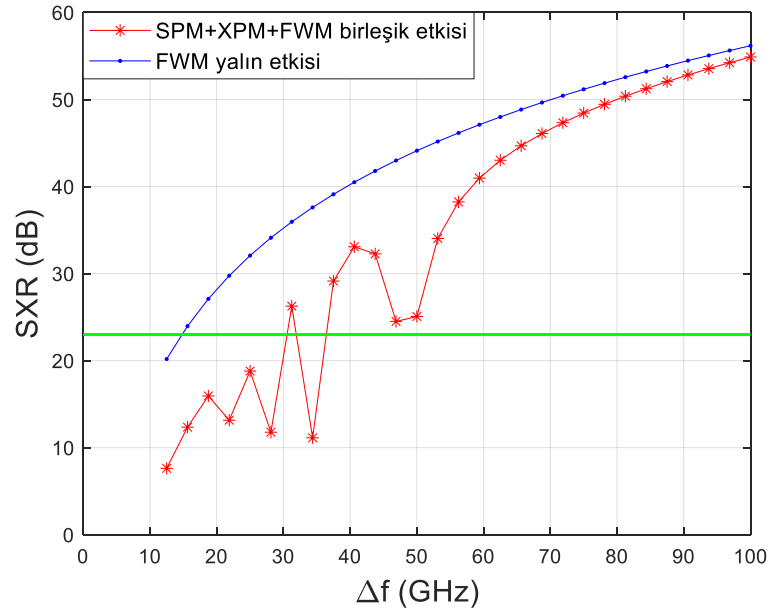
Şekil 4.18. $P_{\text{giriş}} = 0,1$ mW için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



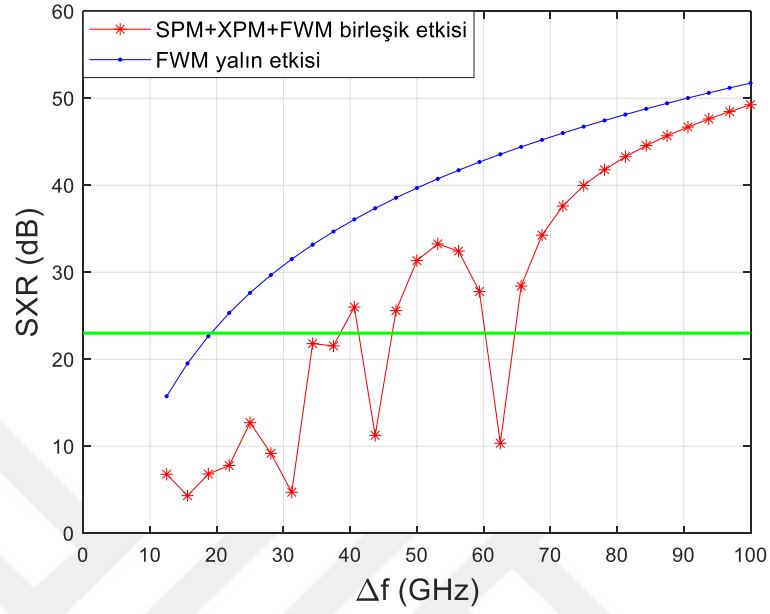
Şekil 4.19. $P_{\text{giriş}} = 0,5$ mW için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



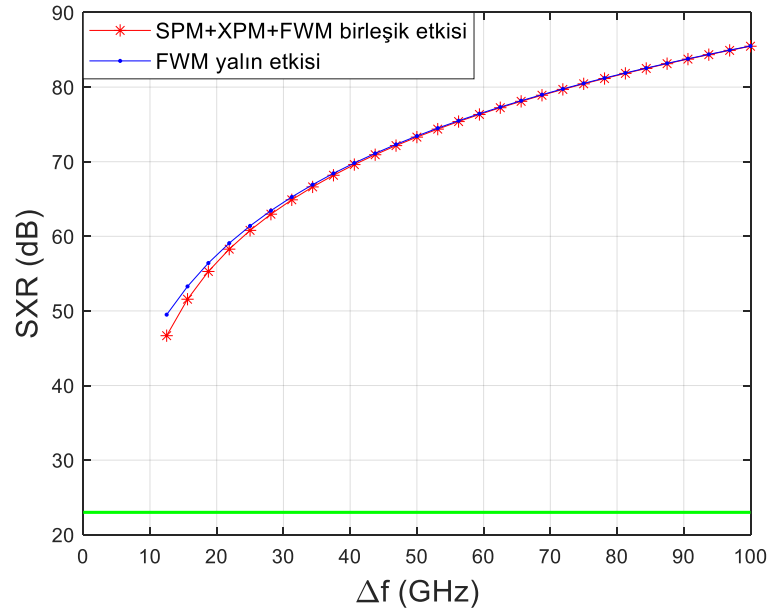
Şekil 4.20. $P_{\text{giriş}} = 1 \text{ mW}$ için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



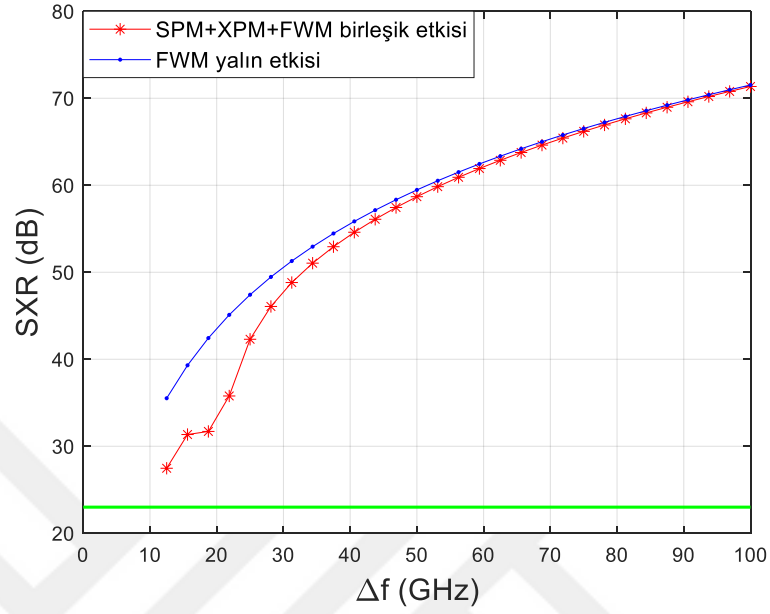
Şekil 4.21. $P_{\text{giriş}} = 3 \text{ mW}$ için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



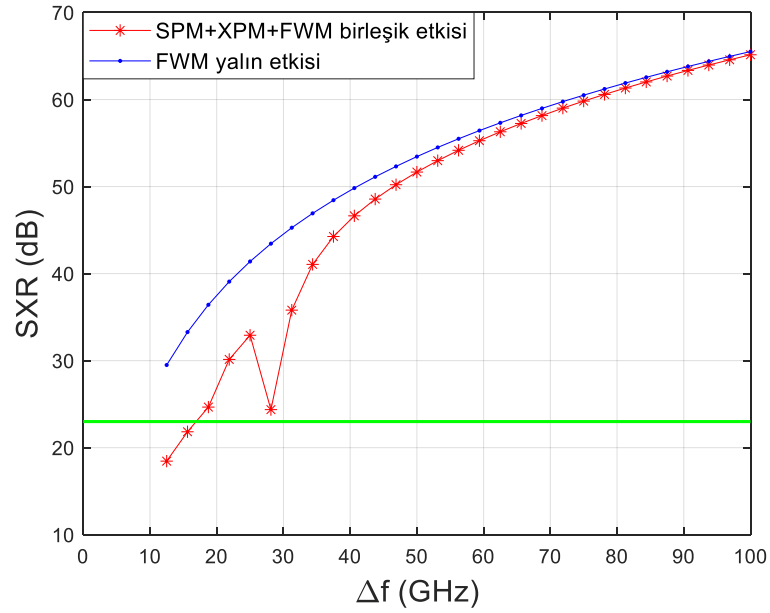
Şekil 4.22. $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için 31 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



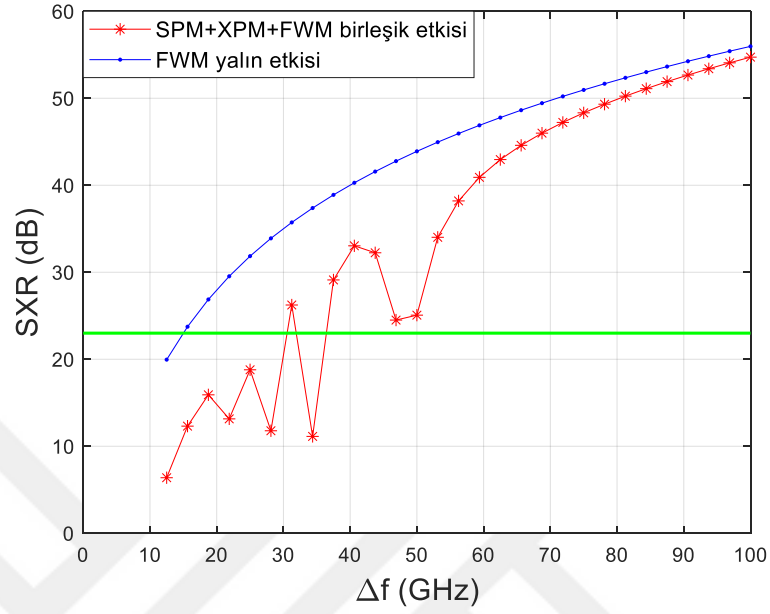
Şekil 4.23. $P_{\text{giriş}} = 0,1 \text{ mW}$ için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



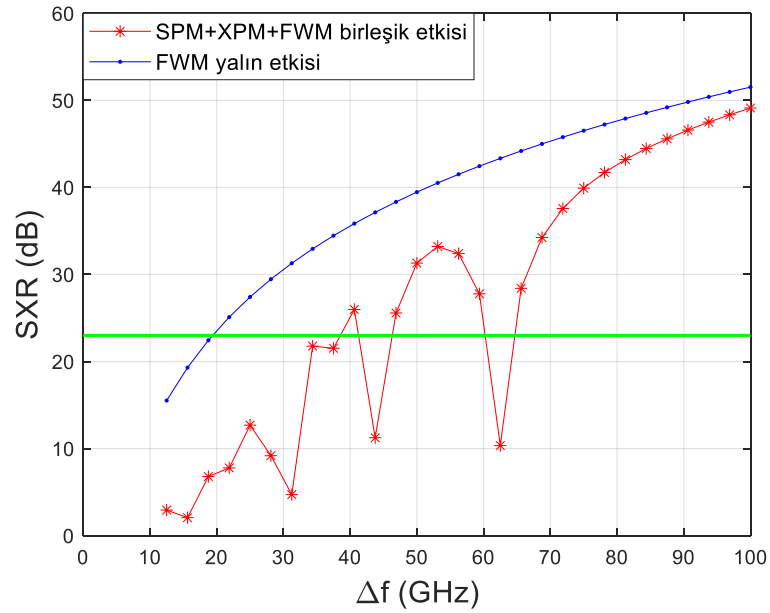
Şekil 4.24. $P_{\text{giriş}} = 0,5 \text{ mW}$ için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



Şekil 4.25. $P_{\text{giriş}} = 1 \text{ mW}$ için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



Şekil 4.26. $P_{\text{giriş}} = 3$ mW için 63 kanallı tek segment DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri



Şekil 4.27. $P_{\text{giriş}} = 5$ mW için 63 kanallı DWDM tek segment uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında, SXR- Δf benzetim eğrileri

Şekil 4.13, 4.18 ve 4.23'te verildiği gibi FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında ve her iki durumda da 0,1 mW giriş güçleri için sistemlerin merkez kanallarındaki kanal aralıklarının artmasıyla SXR değerleri artmaktadır. İlgili şekillerin yanısıra, Çizelge 4.1a ve 4.1b'de görüldüğü gibi, FWM yalın etkisi dikkate alınarak belirlenen SXR değerleri, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alınarak belirlenen SXR değerlerinden daha yüksektir. Ayrıca, FWM yalın etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alınarak belirlenen SXR değerleri arasındaki fark, kanal aralıklarının artmasıyla birlikte azalmaktadır.

Şekil 4.13-4.27'de FWM yalın etkisi dikkate alındığında kanal aralıklarının artmasıyla SXR değerleri artmaktadır. Kanal aralıklarındaki artış, Denklem (2.20)'de verilen $\Delta\beta_{ijk}$ 'yi artırır ve dolayısıyla Denklem (2.19)'da verilen η_{ijk} 'yi azaltır. Sonuç olarak toplam FWM çaprazkarışım gücü azalır ve dolayısıyla SXR değerleri artar.

Şekil 4.13, 4.18 ve 4.23 hariç, bu alt bölümde verilen tüm şekillerde, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında gözlenen SXR değerlerindeki osilasyonlu davranışın netliği ve gözlemlendiği kanal aralığı genişliği, giriş güçlerindeki artışla birlikte artmaktadır.

Şekil 4.14, 4.19 ve 4.24'te 22 GHz'in altındaki kanal aralıkları ve 0,5 mW kanal giriş güçleri için SXR değerlerinde hafif bir osilasyon meydana gelmektedir. Şekil 4.15, 4.20 ve 4.25'te 28 GHz'in altındaki kanal aralıkları ve 1 mW kanal giriş güçleri için SXR değerlerinde orta düzeyde bir osilasyon meydana gelmektedir. Şekil 4.16, 4.21 ve 4.26'da 50 GHz'in altındaki kanal aralıkları ve 3 mW kanal giriş güçleri için ve Şekil 4.17, 4.22 ve 4.27'de 62,5 GHz'in altındaki kanal aralıkları ve 5 mW kanal giriş güçleri için SXR değerlerinde belirgin osilasyonlar meydana gelmektedir.

0,5 mW ve 1 mW giriş güçleri için sırasıyla 12,5 GHz-22 GHz ve 12,5 GHz-28 GHz kanal aralığı bölgelerinde meydana gelen osilasyonlar, temel olarak bu nispeten düşük giriş gücü seviyelerinde, Denklem (2.23)'te verilen $\Delta\beta'$ 'nin, $\Delta\beta_{ijk}$ bu aralıklarda yeterince yüksek olmadığından, kanal aralıklarındaki değişikliklere güçlü bir bağımlılığının bulunmasıdır.

$\Delta\beta'$ 'nın kanal aralığı değişimlerine bağımlılığı, sırasıyla Denklemler (2.24) ve (2.25) ile verilen η'_{ijk} ve P'_{FWM} değerlerinde osilasyonlara neden olur. Dolayısıyla bu kanal aralığı bölgelerindeki SXR değerlerinde salınımlar meydana gelir. Bu aralıkların dışında, $\Delta\beta_{ijk}$ yeterince yüksek değerler aldığından, kanal aralıklarının artmasıyla hem FWM etkisi hem de SPM ve XPM'nin FWM üzerindeki etkisi azalmaya başlar ve dolayısıyla SXR değerleri artar.

12.5 GHz-50 GHz ve 12.5 GHz-62.5 GHz kanal aralıklarında meydana gelen belirgin salınımlar, sırasıyla 3 mW ve 5 mW giriş güçleri için, kanal giriş güçlerinin artmasıyla $\Delta\beta'$ 'nin azalmasından kaynaklanan η' ve SXR değerlerindeki salınımlardır.

Şekil 4.13, 4.14, 4.18, 4.19, 4.23, 4.24 ile Çizelge 4.1a, 4.1b, 4.2a ve 4.2b'de gösterildiği gibi, 0,1 mW ve 0,5 mW giriş güçleri için 12,5 GHz-100 GHz aralığındaki tüm kanal aralıkları için tüm SXR değerleri, hem FWM yalın etkisi hem de birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında 23 dB sınırının üzerindedir.

Şekil 4.15, 4.20, 4.25 ile Çizelge 4.3a ve 4.3b'de verildiği gibi, FWM yalın etkisi dikkate alındığında, 1 mW giriş güçleri için, 12,5 GHz-100 GHz aralığındaki tüm kanal aralıkları için tüm SXR değerleri 23 dB sınırının üzerindedir; ancak SXR değeri, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında dikkate alındığında, 15 kanallı sistemlerde 16,82 GHz, 31 kanallı sistemlerde 16,89 GHz, 63 kanallı sistemlerde 16,91 GHz üzerindeki kanal aralığı değerleri için 23 dB sınırının üzerindedir.

Şekil 4.16, 4.21, 4.26 ile Çizelge 4.4a ve 4.4b'de gösterildiği gibi, FWM yalın etkisi dikkate alındığında, 15 kanallı sistemlerde 14.38 GHz'den, 31 kanallı sistemlerde 14.82 GHz'den ve 63 kanallı sistemlerde 15 GHz'den daha geniş kanal aralıklarında, 3 mW giriş güçleri için, SXR değerleri 23 dB sınırının üzerindedir. Ancak SXR değerlerinin osilasyon davranışı nedeniyle, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alındığında, tüm sistemlerdeki SXR değerleri, 36,43 GHz'in altındaki kanal aralıkları için genellikle 23 dB sınırının altındadır.

Şekil 4.17, 4.22, 4.27 ile Çizelge 4.5a ve 4.5b'de gösterildiği gibi, FWM yalın etkisi dikkate alındığında, 5 mW giriş güçleri için 15 kanallı sistemlerde 18.57 GHz'den, 31 kanallı sistemlerde 19.14 GHz'den ve 63 kanallı sistemlerde 19.41 GHz'den daha geniş kanal aralıklarında, SXR değerleri 23 dB sınırının üzerindedir. Ancak SXR değerlerinin osilasyonlu davranışı nedeniyle, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi dikkate alındığında, tüm sistemlerde 64,68 GHz'in altındaki kanal aralıkları için SXR değerleri genellikle 23 dB sınırının altındadır.

Çizelge 4.1a. $P_{giriş} = 0,1$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	50,26	62,13	74,17	86,23
31 kanal		49,72	61,61	73,66	85,72
63 kanal		49,49	61,39	73,44	85,50

Çizelge 4.1b. $P_{giriş} = 0,1$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	47,09	61,44	74,00	86,19
31 kanal		46,82	60,99	73,50	85,68
63 kanal		46,68	61,39	73,29	85,47

Çizelge 4.2a. $P_{giriş} = 0,5$ mW için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	36,28	48,15	60,19	72,25
31 kanal		35,74	47,63	59,68	71,74
63 kanal		35,51	47,41	59,46	71,52

Çizelge 4.2b. $P_{\text{giriş}} = 0,5 \text{ mW}$ için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	27,64	42,53	59,30	72,04
31 kanal		27,51	42,36	59,86	71,55
63 kanal		27,46	42,29	58,68	71,35

Çizelge 4.3a. $P_{\text{giriş}} = 1 \text{ mW}$ için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	30,26	42,13	54,17	66,23
31 kanal		29,72	41,61	53,66	65,72
63 kanal		29,49	41,39	53,44	65,50

Çizelge 4.3b. $P_{\text{giriş}} = 1 \text{ mW}$ için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	18,63	33,03	52,16	65,80
31 kanal		18,48	32,95	51,81	65,34
63 kanal		18,45	32,91	51,66	65,14

Çizelge 4.4a. $P_{\text{giriş}} = 3 \text{ mW}$ için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	20,72	32,59	44,63	56,68
31 kanal		20,18	32,07	44,11	56,17
63 kanal		19,95	31,85	43,90	55,96

Çizelge 4.4b. $P_{\text{giriş}} = 3 \text{ mW}$ için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	12,64	18,85	25,07	55,27
31 kanal		7,62	18,80	25,07	54,89
63 kanal		6,38	18,78	25,06	54,72

Çizelge 4.5a. $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için tek segmentli DWDM sistemlerde FWM yalın etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

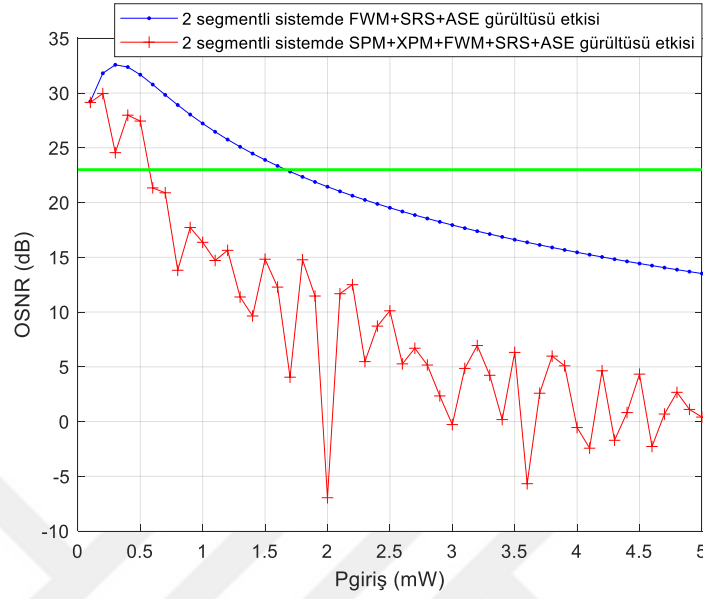
DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	16,28	28,15	40,19	52,25
31 kanal		15,74	27,63	39,68	51,74
63 kanal		15,51	27,41	39,46	51,52

Çizelge 4.5b. $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için tek segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM etkisi göz önüne alındığında belirlenen SXR değerleri

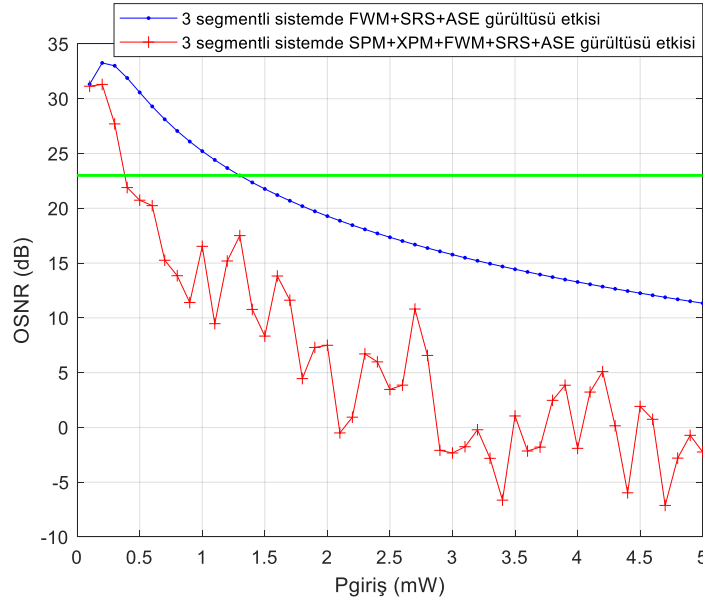
DWDM Sistemler	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanal	SXR (dB)	11,07	12,91	31,44	49,55
31 kanal		6,78	12,70	31,34	49,25
63 kanal		2,93	12,69	31,30	49,13

4.3. OSNR-Giriş Gücü Benzetim Sonuçları

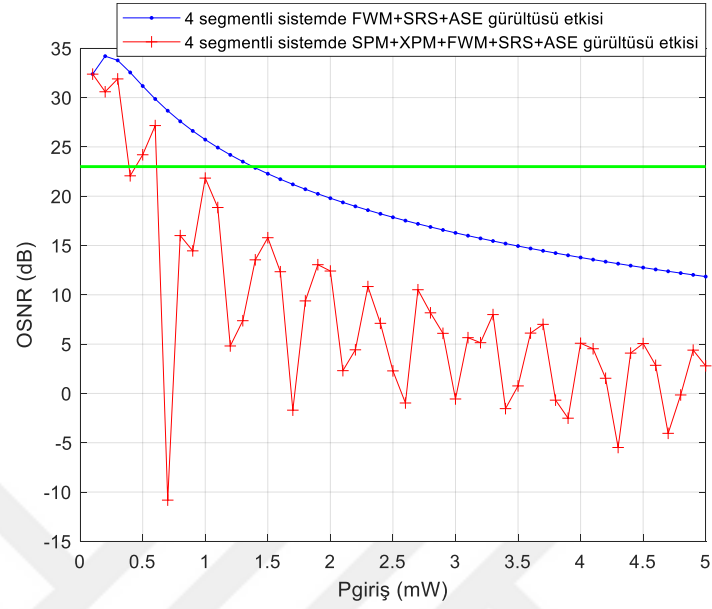
Bölüm 3.4'te açıklanan benzetim koşulları altında, EDFA kullanan çok segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralığı değerleri için giriş gücünün 0,1 mW-5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen OSNR benzetim sonuçları, Şekil 4.28-4.47'de gösterilmiştir. Tüm şekillerdeki yeşil çizgi 23 dB'lik minimum OSNR değerini temsil etmektedir.



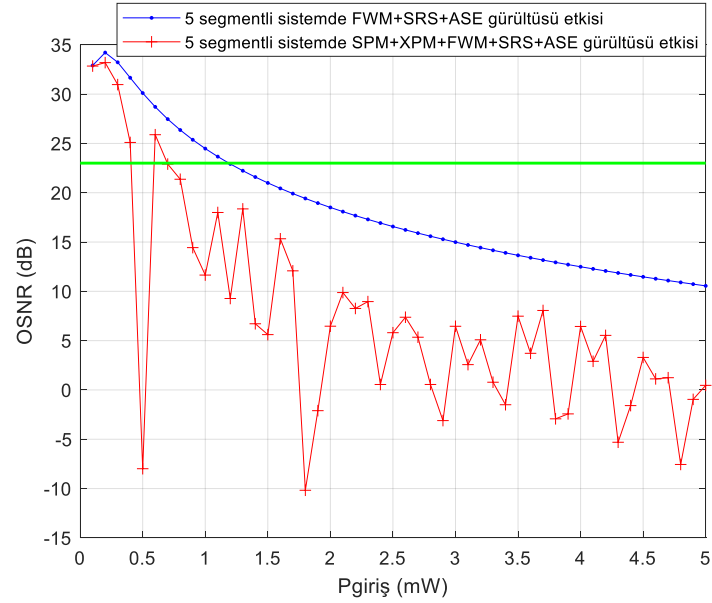
Şekil 4.28. 12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



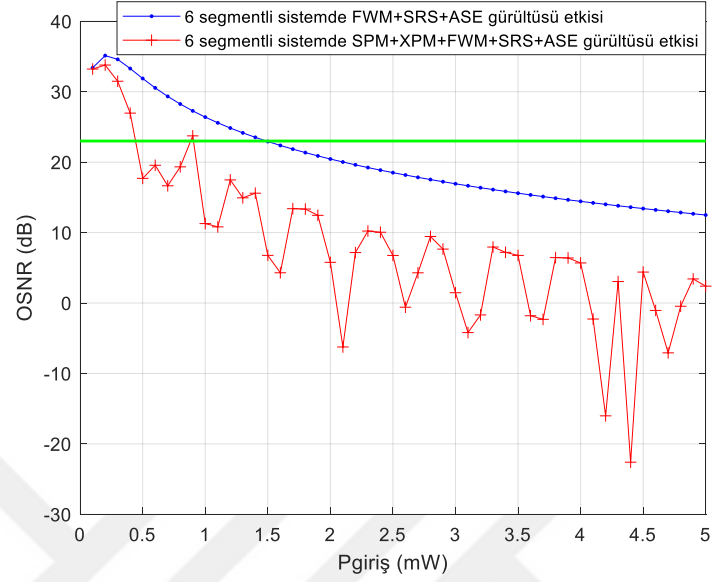
Şekil 4.29. 12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



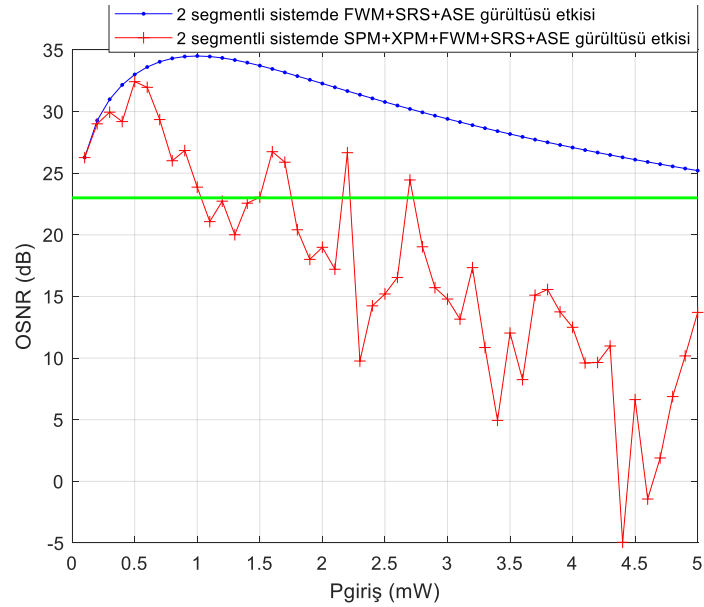
Şekil 4.30. 12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



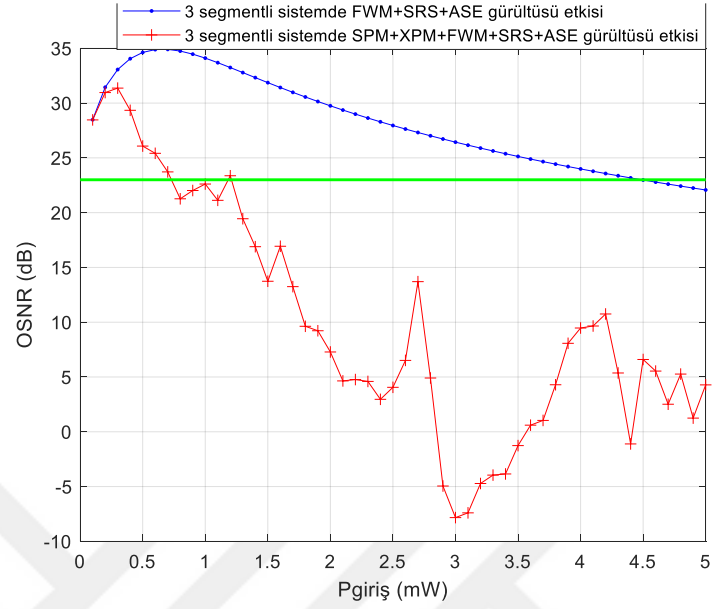
Şekil 4.31. 12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



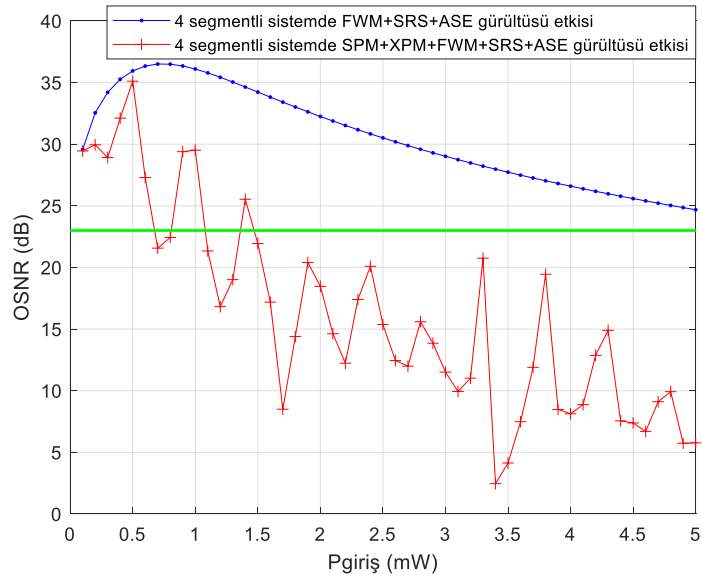
Şekil 4.32. 12,5 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



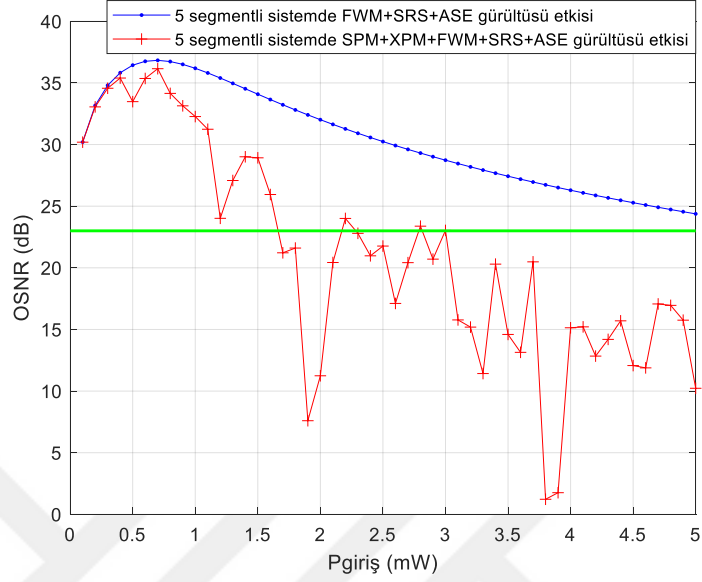
Şekil 4.33. 25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{\text{giriş}}$ benzetim eğrileri



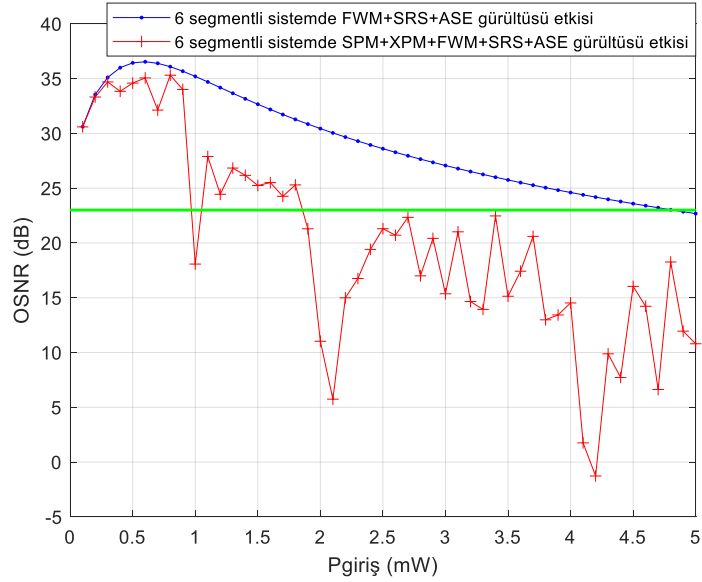
Şekil 4.34. 25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



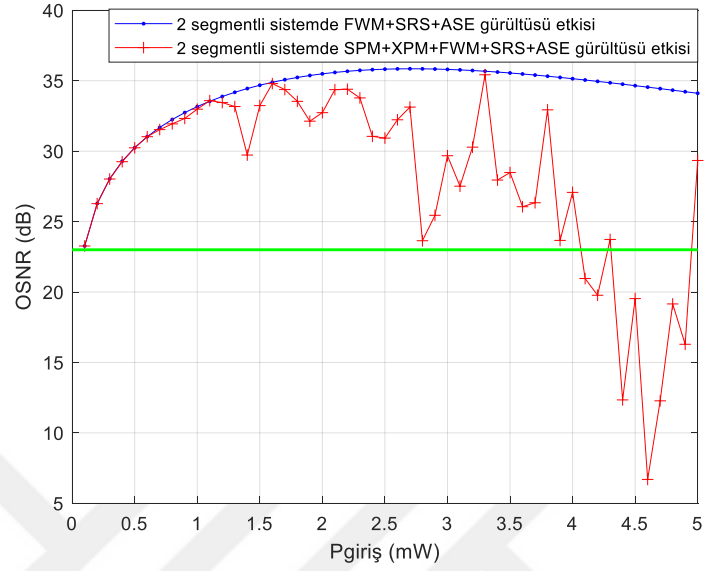
Şekil 4.35. 25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



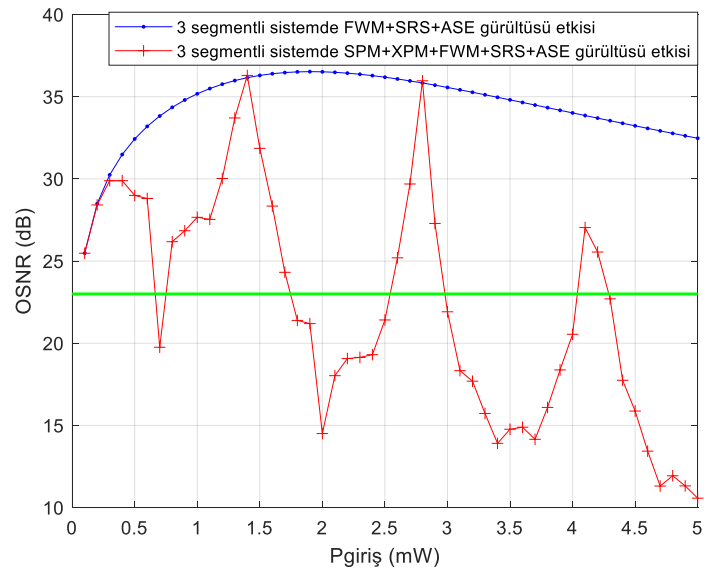
Şekil 4.36. 25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



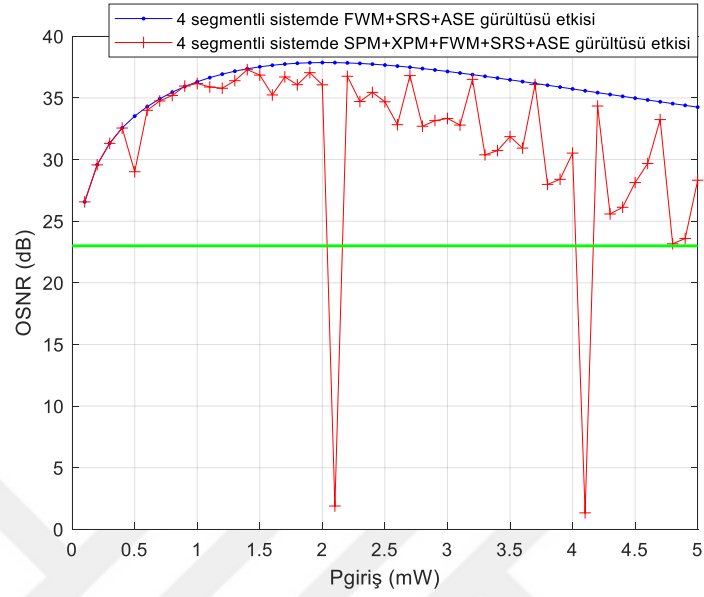
Şekil 4.37. 25 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



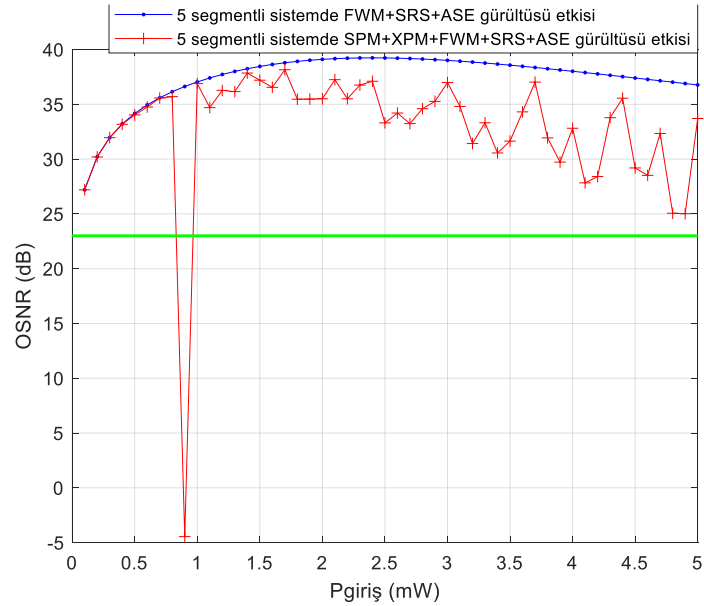
Şekil 4.38. 50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



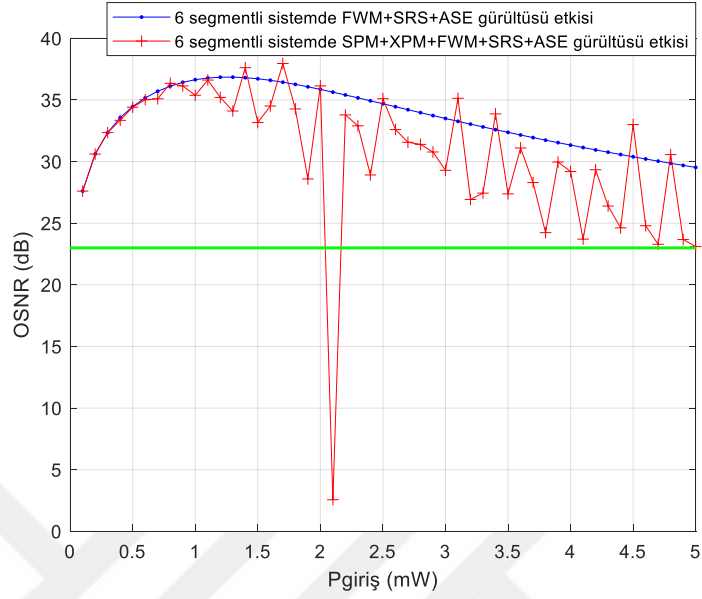
Şekil 4.39. 50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



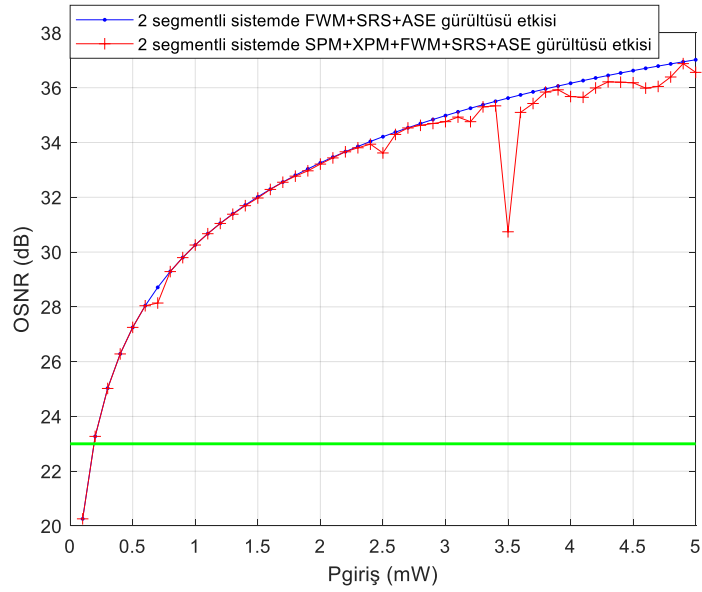
Şekil 4.40. 50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



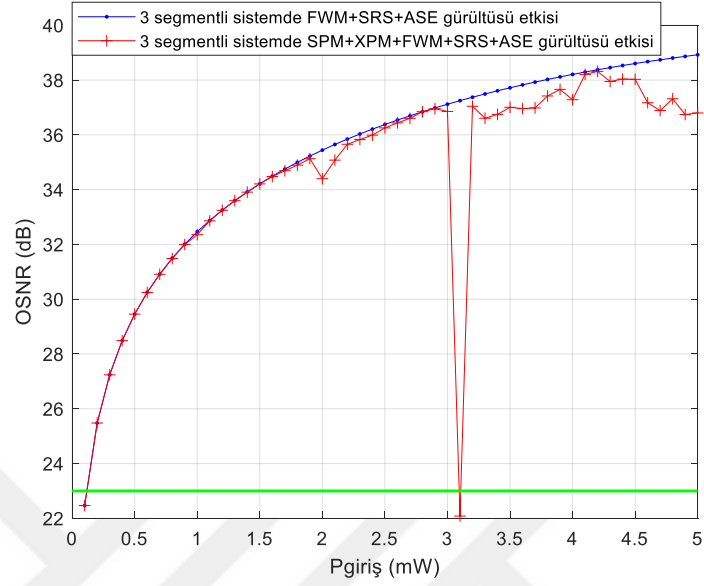
Şekil 4.41. 50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



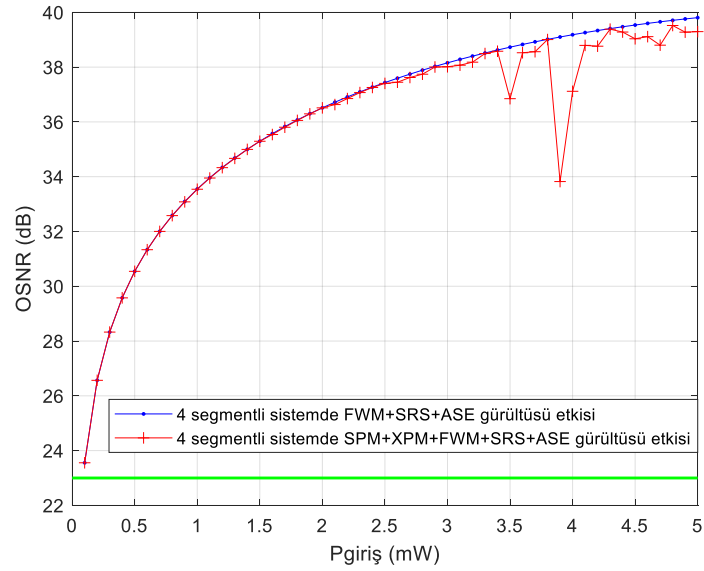
Şekil 4.42. 50 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



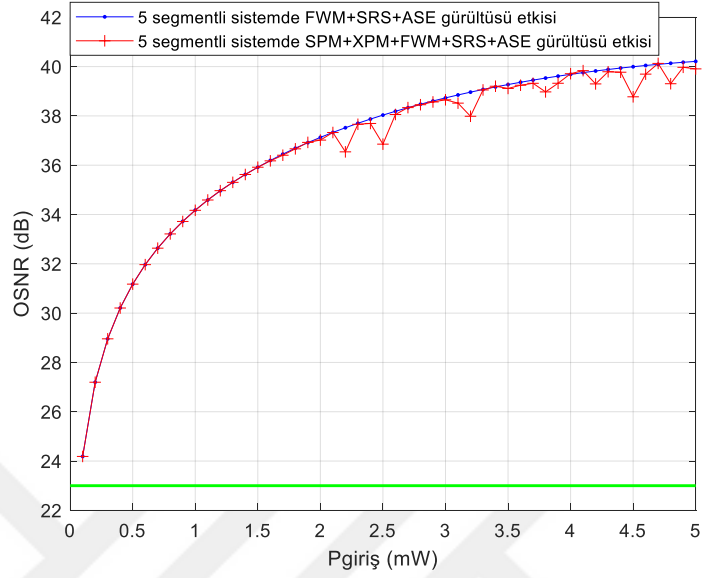
Şekil 4.43. 100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 1 adet EDFA kullanan 2 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



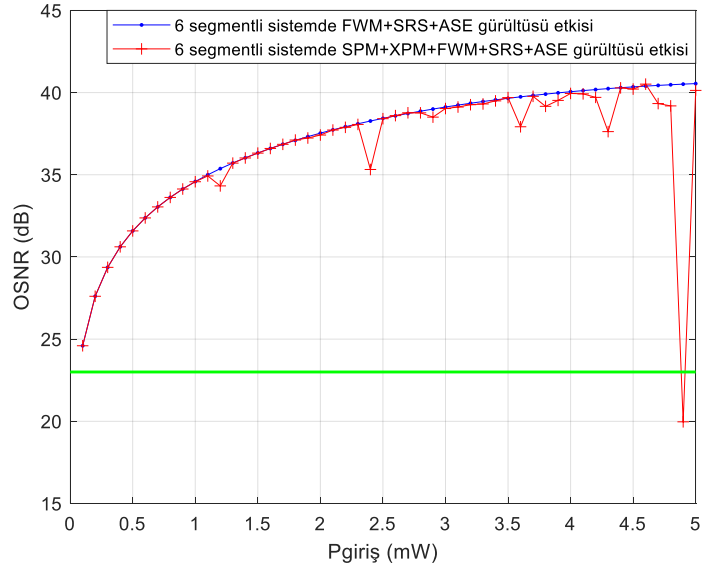
Şekil 4.44. 100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 2 adet EDFA kullanan 3 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



Şekil 4.45. 100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 3 adet EDFA kullanan 4 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



Şekil 4.46. 100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 4 adet EDFA kullanan 5 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri



Şekil 4.47. 100 GHz kanal aralıklı 63 kanallı 5 adet EDFA kullanan 6 segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, OSNR- $P_{giriş}$ benzetim eğrileri

Şekil 4.28-4.47’de verilen benzetimlerin yorumlamalarının daha anlaşılabilir olması açısından, üçlü etkinin (birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi) ve beşli etkinin (SPM+XPM+ FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi) göz önüne alındığı durumlar için elde edilen benzetim sonuçları, öncelikle ayrı ayrı yorumlanacak, daha sonra karşılaştırmalı yorumlar verilecektir.

a) Birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durum için elde edilen OSNR-giriş gücü benzetim sonuçlarında:

Kanal aralığının 12,5 GHz ve 25 GHz olduğu, Şekil 4.28-4.37’de gösterilen benzetim sonuçlarında, 63 kanallı, EDFA kullanan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW - 5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen OSNR eğrilerinde, OSNR değeri kanal giriş gücündeki artışla birlikte, öncelikle belirli bir kritik değere kadar artmakta, daha sonra üstel bir şekilde azalmaktadır. 63 kanallı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA kullanan çok segmentli sistemlerde, bu kritik giriş gücü değerleri, 12,5 GHz kanal aralığı için, sırasıyla 0,3 mW, 0,2 mW, 0,2 mW, 0,2 mW ve 0,2 mW; 25 GHz kanal aralığı için, 1 mW, 0,7 mW, 0,7 mW, 0,7 mW ve 0,6 mW’dir. 0,1 mW ile belirtilen kritik değerler arasında OSNR değerinin artmasının sebebi, ilgili aralıktaki giriş güçlerinin düşük değerli olması nedeniyle FWM çaprazkarışımının OSNR üzerindeki etkisinin zayıf olması; Denklem (2.28)’den anlaşılacağı üzere, alıcı girişindeki filtre bantgenişliğinin kanal aralığı değerine eşit ve 12,5 GHz ile 25 GHz gibi görece daha dar kanal aralıkları nedeniyle çıkış işareti üzerindeki ASE gürültüsü etkisinin düşük olmasının yanısıra ASE gürültü gücünün giriş işaret gücündeki değişimlerden etkilenmemesi nedeniyle OSNR üzerindeki etkisinin zayıf olması; dolayısıyla OSNR’yi belirleyen baskın faktörün işaret gücü üzerindeki SRS etkisi olması ve bu etkinin Raman kuvvetlendirmesi şeklinde ortaya çıkmasıdır. Kritik giriş gücü değeri aşıldıktan sonra OSNR değerinin üstel olarak azalmasının sebebi, OSNR üzerindeki ASE gürültü gücü etkisi aynı kalırken, artan giriş güçleriyle birlikte FWM çaprazkarışım gücünün P^3 ile orantılı şekilde artması nedeniyle OSNR üzerindeki baskın etki haline gelmesidir. Çok segmentli 63 kanallı sistemlerin merkez kanallarında, minimum 23 dB OSNR kriterini karşılayan maksimum giriş

gücü değerleri, kanal aralıklarının 12,5 GHz olduğu durumda, 1, 2, 3, 4 ve 5 adet EDFA kullanan sistemlerde, sırasıyla, 1,66 mW, 1,29 mW, 1,38 mW, 1,18 mW ve 1,48 mW'tır. 25 GHz kanal aralıklarına sahip sistemlerde ise, 2 ve 5 EDFA'lı konfigürasyonlarda, minimum 23 dB kriterini karşılayan maksimum giriş güçleri, sırasıyla, 4,48 mW ve 4,81 mW iken diğer tüm konfigürasyonlarda, 0,1 mW - 5 mW giriş gücü aralığı içinde minimum 23 dB'lik OSNR kriteri karşılanmaktadır.

Kanal aralığının 50 GHz olduğu, 63 kanallı, EDFA kullanan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW - 5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen ve Şekil 4.38-4.42'de gösterilen OSNR eğrilerinde, OSNR değeri kanal giriş gücündeki artışla birlikte, öncelikle belirli bir kritik değere kadar artmakta, daha sonra üstel bir şekilde azalmaktadır. Bu davranış, Şekil 4.28-4.37'dekine benzer gibi görünmekle beraber, hem OSNR artışının sona erdiği kritik giriş gücü değerleri öncekilere göre daha büyük hem de üstel azalmadaki eğim öncekilere göre daha düşüktür. Bu durumun sebebi, artan kanal aralığı değeriyle birlikte FWM çaprazkarışım etkisinin hafiflemesinden ve giriş gücünden bağımsız olan ama kanal aralığı değerine eşit optik filtre bantgenişliğinden dolayı etkisi artan ASE gürültü gücünden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, 0,1 mW ile kritik değer arasındaki giriş gücü değerleri için, ASE gürültü gücü FWM çaprazkarışım gücüne göre daha baskın ama sabit değerli olduğundan; artan giriş gücü ile OSNR üzerindeki SRS etkisi baskın olmakta ve Raman kazancından dolayı OSNR artmaktadır. Kritik giriş gücü değeri aşıldığında, artan giriş güçleri ile FWM çaprazkarışım gücünün OSNR üzerindeki etkisi artmakta; ancak bu etkinin, kanal aralıklarının 12,5 GHz ve 25 GHz olduğu sistemlere göre daha düşük olması nedeniyle OSNR'deki azalma eğimi de daha düşük olmaktadır. Kritik giriş gücü değerleri, 63 kanallı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA kullanan çok segmentli sistemlerde, 50 GHz kanal aralığı için, sırasıyla 2,7 mW, 1,9 mW, 2,1 mW, 2,4 mW ve 1,3 mW'tır. 50 GHz kanal aralığı için, tüm sistem konfigürasyonlarında, 0,1 mW - 5 mW giriş gücü aralığında, minimum 23 dB'lik OSNR kriteri karşılanmaktadır.

Kanal aralığının 100 GHz olduğu, 63 kanallı, EDFA kullanan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW - 5 mW

aralığında değiştirilmesiyle elde edilen ve Şekil 4.43-4.47'de gösterilen OSNR eğrilerinde, OSNR değerinin artan giriş güçleriyle arttığı görülmektedir. Kanal aralıklarının daha da genişlemesi ile FWM çaprazkarışım etkisinin daha da hafiflediği, buna karşın artan optik filtre bantgenişliği nedeniyle ASE gürültü gücünün etkisini arttırdığı bir konfigürasyon sözkonusudur. Dolayısıyla özellikle düşük giriş güçlerinde ASE gürültüsünün baskın etki haline gelmesiyle OSNR'nin düşük değerler aldığı; hatta 1 ve 2 EDFA'lı konfigürasyonlarda, bu nedenle, sırasıyla 0,19 mW ve 0,12 mW değerlerinden daha düşük giriş gücü değerlerinde minimum 23 dB OSNR kriterinin sağlanmadığı görülmektedir. Artan giriş güçleriyle birlikte, sabit ASE gürültü gücüne karşın SRS'nin OSNR üzerindeki etkisi artmakta ve Raman kazancı nedeniyle bu etki OSNR'yi de arttırmaktadır. 100 GHz kanal aralığı için, minimum 23 dB'lik OSNR kriteri, 1 ve 2 EDFA'lı konfigürasyonlarda, sırasıyla 0,19 mW – 5 mW ve 0,12 mW – 5 mW aralıklarında karşılanırken; diğer tüm konfigürasyonlarda, 0,1 mW - 5 mW giriş gücü aralığının tamamında karşılanmaktadır.

b) Birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durum için elde edilen OSNR-giriş gücü benzetim sonuçlarında:

Kanal aralığının 12,5 GHz olduğu, Şekil 4.28-4.32'de gösterilen benzetim sonuçlarında, 63 kanallı, EDFA kullanan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW- 5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen OSNR eğrilerinde, OSNR değeri kanal giriş gücündeki artışla birlikte, osilasyonlu bir şekilde azalmaktadır. Kanal aralıklarının dar olması ve optik filtre bantgenişliğinin kanal aralığına eşit olması nedeniyle, ilgili benzetimlerde OSNR üzerindeki FWM çaprazkarışım gücü etkisi, ASE gürültü gücü etkisine göre daha baskındır. Osilasyonlu davranışın ortaya çıkmasının nedeni, artan giriş güçleriyle birlikte SPM ve XPM'nin FWM üzerindeki etkisinin artması ve Denklem (2.23) ile verilen $\Delta\beta'$ 'in $\Delta\beta$ 'dan farklılaşarak, Denklem (2.24) ve (2.25) ile verilen η'_{ijk} ve P'_{FWM} değerlerinde osilasyonlara neden olmasıdır. Bu durum da OSNR'de osilasyonlar oluşturmaktadır. İlgili grafiklerde, monoton ve keskin OSNR düşüşlerinin görüldüğü giriş gücü aralıklarında yalın FWM etkisinin baskın olduğu, monoton ve keskin OSNR artışlarının görüldüğü giriş gücü aralıklarında ise SRS etkisinin baskın olduğu ve

Raman kazancı nedeniyle OSNR'nin arttığı değerlendirilmektedir. 63 kanallı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA kullanan çok segmentli sistemlerde, 12,5 GHz kanal aralığı için, giriş gücünün, sırasıyla, 0,57 mW, 0,38 mW, 0,61 mW, 0,70 mW ve 0,91 mW'tan büyük tüm değerlerinde, minimum 23 dB OSNR koşulu sağlanmamaktadır. İlaveten, osilasyonlar nedeniyle, 3, 4 ve 5 EDFA kullanan çok segmentli sistemlerde, giriş gücünün, sırasıyla, 0,39 mW – 0,44 mW, 0,41 mW – 0,59 mW, 0,44 mW – 0,88 mW aralıklarında kalan değerlerinde de minimum 23 dB OSNR koşulu sağlanmamaktadır.

Kanal aralığının 25 GHz olduğu, Şekil 4.33-4.37'de gösterilen benzetim sonuçlarında, 63 kanallı, EDFA kullanan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW - 5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen OSNR eğrilerinde, Şekil 4.28-4.32'de gösterilen benzetim sonuçlarına benzer şekilde, OSNR değeri kanal giriş gücündeki artışla birlikte, osilasyonlu bir şekilde azalmaktadır. Bu osilasyonlu davranışın nedeni, 12,5 GHz kanal aralıklarına sahip sistemlerdeki osilasyonlu davranışın nedeniyle aynıdır. İlgili grafiklerde, önceki grafiklere benzer şekilde, monoton ve keskin OSNR düşüşlerinin görüldüğü giriş gücü aralıklarında yalnız FWM etkisinin baskın olduğu, monoton ve keskin OSNR artışlarının görüldüğü giriş gücü aralıklarında ise SRS etkisinin baskın olduğu ve Raman kazancı nedeniyle OSNR'nin arttığı değerlendirilmektedir. 25 GHz kanal aralığı için, giriş gücünün, sırasıyla, 2,73 mW, 1,21 mW, 1,47 mW, 3 mW ve 1,87 mW'tan büyük tüm değerlerinde, minimum 23 dB OSNR koşulu sağlanmamaktadır. Ayrıca, ilgili tüm şekillerde, osilasyonlar nedeniyle, verilen bu değerlerden daha küçük bazı giriş gücü değeri aralıklarında da OSNR değeri 23 dB sınırının altına düşmektedir.

Kanal aralığının 50 GHz olduğu, Şekil 4.38-4.42'de gösterilen benzetim sonuçlarında, 63 kanallı, EDFA kullanan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW- 5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen OSNR eğrilerinde de osilasyonlar görülmekle beraber, kanal aralığı değerinin genişlemesiyle birlikte osilasyon davranışında, önceki benzetim sonuçlarına kıyasla farklılaşmalar görülmeye başlanmıştır. Kanal aralığının genişlemesiyle birlikte, $\Delta\beta$ artmaya ve dolayısıyla FWM çaprazkarışım gücü azalmaya başladığından; ilaveten optik filtre bantgenişliğindeki

artışla birlikte, kanal giriş gücünden bağımsız ASE gürültüsü etkisi de arttığından, OSNR üzerindeki baskın etkilerin SRS ve ASE gürültüsü olmaya başladığı, ancak yer yer SPM, XPM ve FWM üçlü etkisinin de bazı kanal giriş gücü aralıklarında etkisini göstererek osilasyonlara neden olduğu ilgili şekillerden görülmektedir. Şekil 4.39’da verilen benzetim sonuçları hariç, önceki şekillere göre, daha geniş kanal giriş gücü aralıklarında minimum 23 dB OSNR şartının sağlanmasının nedeni de budur. 50 GHz kanal aralığı için, giriş gücünün 0,1 mW – 5 mW aralığında değiştirildiği benzetimlerde, 1 EDFA’lı sistemde 4,07 mW’tan küçük tüm giriş gücü değerleri için; 3 EDFA’lı sistemde 2,04 mW – 2,16 mW ve 4,03 mW - 4,17 mW aralıkları haricinde kalan tüm giriş gücü değerleri için; 4 EDFA’lı sistemde 0,83 mW – 0,97 mW aralığı haricinde kalan tüm giriş gücü değerleri için; 5 EDFA’lı sistemde 2,04 mW – 2,17 mW aralığı haricinde kalan tüm giriş gücü değerleri için minimum 23 dB OSNR koşulu sağlanmaktadır.

Kanal aralığının 100 GHz olduğu, Şekil 4.43-4.47’de gösterilen benzetim sonuçlarında, 63 kanallı, EDFA kullanan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW- 5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen OSNR eğrilerinde, kanal aralığının belirgin biçimde genişlemesiyle birlikte ASE gürültüsü etkisinin SPM, XPM ve FWM üçlü etkisine göre daha baskın hale gelmesi nedeniyle osilasyonların azaldığı ancak yine de ilgili grafiklerde bazı giriş gücü aralıklarında küçük ya da yüksek genlikli osilasyonların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu osilasyonların, ilgili giriş gücü aralıklarında OSNR üzerindeki SPM, XPM ve FWM üçlü etkisinin kuvvetlenmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. 100 GHz kanal aralıklı sistemlerde, kanal aralığının genişlemesine ve OSNR üzerindeki SPM, XPM, FWM üçlü etkisinin azalmasına paralel olarak minimum 23 dB OSNR kriteri, çok geniş kanal giriş gücü aralıkları için sağlanmaktadır. İlgili benzetim sonuçlarına göre, 1 EDFA’lı sistemde 0,19 mW’tan büyük tüm giriş güçleri için; 2 EDFA’lı sistemde 0,12 mW’tan büyük ve 3,09 mW – 3,11 mW aralığı dışında kalan tüm giriş güçleri için; 3 ve 4 EDFA’lı sistemlerde 0,1 mW – 5 mW aralığındaki tüm giriş güçleri için; 5 EDFA’lı sistemde 4,88 mW– 4,91 mW aralığı dışında kalan tüm giriş güçleri için minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

c) Birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durumlar için elde edilen OSNR-giriş gücü benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde:

Her ne kadar Agrawal (2019) ve Schneider (2004)'te WDM tabanlı sistemlerde baskın doğrusal olmayan etkilerin SRS ve FWM olduğu belirtilmesine ve literatürde de çok segmentli DWDM sistemlerin doğrusal olmayan etkiler altındaki performans analizi, genellikle, FWM+ASE gürültüsü etkisi ya da birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (üçlü etki) göz önünde bulundurularak yapılmasına rağmen; doktora tezinin bu altbölümünde verilen karşılaştırmalı benzetim sonuçları, DWDM sistem performansı üzerindeki birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin (beşli etki), analizlerde gözönüne alınmasının önemini açıkça belirtmektedir. Özellikle kanal aralıklarının 100 GHz'in altında olduğu çok segmentli DWDM sistemlerde, beşli etki gözönüne alınarak yapılan analizlerde, üçlü etkide elde edilen OSNR değerlerine göre ağırlıklı olarak daha düşük OSNR değerleri bulunmuştur. Ayrıca osilasyonlar nedeniyle, giriş gücündeki ufak değişimlerle beraber bulunan bu OSNR değerlerinin büyük değişimler gösterebildiği; özellikle 12,5 GHz ve 25 GHz gibi dar kanal aralıkları için, üçlü etki analizinde belirlenenden çok daha geniş giriş gücü aralıklarında güvenilir iletişim için belirlenen minimum OSNR seviyesi olan 23 dB'nin altında OSNR değerlerinin elde edilebildiği görülmüştür. 50 GHz kanal aralıklı sistemlerde, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, giriş gücünün, sırasıyla, 1,2 mW, 0,3 mW, 0,4 mW, 0,8 mW ve 0,9 mW'tan düşük değerlerinde üçlü ve beşli etki gözönüne alınarak elde edilen benzetim sonuçları birbiriyle neredeyse aynı OSNR değerleri verse de; artan giriş gücü değerleri ile birlikte beşli etkinin göz önüne alındığı benzetimlerdeki osilasyonlar nedeniyle aynı giriş gücü değerlerinde üçlü ve beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri belirgin biçimde farklılaşmakta ve hatta bazı giriş gücü değerlerinde üçlü etki analizinde rastlanmamasına rağmen, beşli etki analizinde 23 dB sınırının altında kalan OSNR değerleri görülmektedir. 100 GHz kanal aralıklı sistemlerde elde edilen benzetim sonuçlarında, 50 GHz kanal aralıkları için elde edilen sonuçlara kıyasla daha geniş giriş gücü aralıklarında üçlü ve beşli etki analizi sonucunda elde edilen OSNR değerleri birbirine yakın olmasına

rağmen; yüksek giriş güçlerinde osilasyonlar nedeniyle OSNR değerleri arasında belirgin farklılaşmalar ve hatta bazı dar giriş gücü aralıklarında beşli etki analizinde 23 dB sınırının altında kalan OSNR değerleri tespit edilmiştir.

Tüm bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 63 kanal gibi yüksek kanal sayılarına sahip çok segmentli DWDM sistemlerde, hedeflenen minimum OSNR'nin üzerindeki değerlerle güvenilir haberleşme gerçekleştirebilmek için gereken maksimum kanal giriş güçleri belirlenirken, analizlerde göz önünde bulundurulması gereken etkinin, birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi olduğu açıktır.

4.4. OSNR-Kanal Aralığı Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.5'te açıklanan benzetim koşulları altında, EDFA kullanılan çok segmentli DWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında kanal aralığı değerlerinin 12.5 GHz-100 GHz aralığında değiştirilmesiyle, farklı giriş gücü değerlerinde elde edilen OSNR değerlerine ait benzetim sonuçları, Çizelge 4.6-4.10'da verilmiştir. İlgili çizelgelerde, 23 dB'nin altında kalan OSNR değerleri koyu renkte yazılmıştır.

Çizelge 4.6. 1 EDFA'lı (2 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri

P_{giriş} (mW)	Doğrusal Olmayan Birleşik Etki		Δf (GHz)			
			12,5	25	50	100
0,1	FWM+SRS+ASE	OSNR (dB)	29,22	26,27	23,27	20,26
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		29,14	26,26	23,27	20,26
0,5	FWM+SRS+ASE		31,67	33	30,24	27,25
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		27,44	32,42	30,23	27,25
1	FWM+SRS+ASE		27,21	34,50	33,16	30,25
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		16,36	23,86	32,98	30,25
3	FWM+SRS+ASE		17,94	29,40	35,80	34,98
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		-0,28	14,79	29,67	34,76
5	FWM+SRS+ASE		13,51	25,20	34,10	37,02
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		0,41	13,70	29,34	36,56

Çizelge 4.7. 2 EDFA'lı (3 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri

$P_{\text{giriş}}$ (mW)	Doğrusal Olmayan Birleşik Etki		Δf (GHz)			
			12,5	25	50	100
0,1	FWM+SRS+ASE	OSNR (dB)	31,32	28,48	25,47	22,46
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		31,14	28,46	25,47	22,46
0,5	FWM+SRS+ASE		30,57	34,62	32,43	29,45
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		20,73	26,07	28,99	29,45
1	FWM+SRS+ASE		25,21	34,10	35,31	32,46
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		16,52	22,61	27,66	32,35
3	FWM+SRS+ASE		15,77	26,43	35,56	37,11
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		-2,33	-7,83	21,91	36,85
5	FWM+SRS+ASE		11,33	22,06	32,47	38,92
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		-2,24	4,28	10,57	36,79

Çizelge 4.8. 3 EDFA'lı (4 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri

$P_{\text{giriş}}$ (mW)	Doğrusal Olmayan Birleşik Etki		Δf (GHz)			
			12,5	25	50	100
0,1	FWM+SRS+ASE	OSNR (dB)	32,38	29,57	26,56	23,55
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		32,37	29,44	26,56	23,55
0,5	FWM+SRS+ASE		31,17	35,94	33,52	30,54
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		24,20	35,11	29,01	30,54
1	FWM+SRS+ASE		25,73	36,10	36,31	33,54
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		21,83	29,51	36,16	33,54
3	FWM+SRS+ASE		16,28	29,01	37,14	38,15
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		-0,56	11,50	33,33	38,01
5	FWM+SRS+ASE		11,84	24,68	34,25	39,80
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		2,79	5,77	28,31	39,29

Çizelge 4.9. 4 EDFA’lı (5 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri

P_{giriş} (mW)	Doğrusal Olmayan Birleşik Etki		Δf (GHz)			
			12,5	25	50	100
0,1	FWM+SRS+ASE	OSNR (dB)	32,90	30,20	27,19	24,18
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		32,84	30,19	27,18	24,18
0,5	FWM+SRS+ASE		30,10	36,44	34,16	31,17
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		-7,98	33,48	34,03	31,17
1	FWM+SRS+ASE		24,47	36,18	37,04	34,17
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		11,64	32,26	36,89	34,17
3	FWM+SRS+ASE		14,98	28,73	39,00	38,72
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		6,45	23,02	36,98	38,65
5	FWM+SRS+ASE		10,55	24,37	36,76	40,21
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		0,46	10,22	33,70	39,90

Çizelge 4.10. 5 EDFA’lı (6 segmentli) 63 kanallı sistemde farklı giriş gücü ve kanal aralığı değerleri için birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkileri altında benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri

P_{giriş} (mW)	Doğrusal Olmayan Birleşik Etki		Δf (GHz)			
			12,5	25	50	100
0,1	FWM+SRS+ASE	OSNR (dB)	33,40	30,60	27,60	24,59
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		33,21	30,59	27,60	24,59
0,5	FWM+SRS+ASE		31,87	36,43	34,46	31,58
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		17,69	34,69	34,41	31,58
1	FWM+SRS+ASE		26,39	35,20	36,64	34,58
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		11,28	18,07	35,37	34,57
3	FWM+SRS+ASE		16,93	27,06	33,49	39,12
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		1,46	15,62	29,29	39,01
5	FWM+SRS+ASE		12,49	22,67	29,52	40,54
	SPM+XPM+FWM+SRS+ASE		2,39	10,79	23,10	40,13

Çizelge 4.6-4.10’da verilen benzetimlerin yorumlamalarının daha anlaşılabilir olması açısından, Altbölüm 4.3’te yapılane benzer şekilde, üçlü etkinin (birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi) ve beşli etkinin (SPM+XPM+ FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi) göz önüne alındığı durumlar için elde edilen benzetim sonuçları, öncelikle ayrı ayrı yorumlanacak, daha sonra karşılaştırmalı yorumlar verilecektir.

a) Birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durum için elde edilen OSNR-kanal aralığı benzetim sonuçlarında:

Yorumlamaları yapabilmek için daima gözönünde bulundurulması gereken noktalar; Denklemler (2.20), (2.29) ve (2.30)'dan görüleceği üzere FWM çaprazkarışım gücünün etkisinin daralan kanal aralıkları, artan giriş gücü değerleri ve artan EDFA sayısı ile arttığı; Denklemler (2.1) ve (2.2)'den görüleceği üzere modifiye işaret gücü üzerindeki SRS etkisinin genişleyen kanal aralıkları ve artan giriş güçleriyle arttığı, ancak bu etkinin, sistem parametrelerine bağlı olarak Raman kazancı ya da kaybı şeklinde olabileceği; Denklem (2.28)'den görüleceği üzere ASE gürültüsü etkisinin sistem giriş güçlerinden bağımsız olduğu ancak benzetimlerde alıcı filtre bantgenişliği kanal aralığına eşit seçildiğinden genişleyen kanal aralıkları ve artan EDFA sayısı ile birlikte artmıştır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 0,1 mW giriş gücü değerleri için, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerin hepsinde, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR sürekli olarak düşmüştür. Kanal aralıkları genişlerken FWM etkisinin azaldığı ve ASE gürültüsü etkisinin arttığı göz önünde bulundurulursa, artan kanal aralıklarıyla birlikte, ilgili giriş gücü değerlerinde ASE gürültüsü etkisinin baskın etki haline geldiği ve bu nedenle OSNR'nin düştüğü anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 0,5 mW giriş gücü değerleri için, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerin hepsinde, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR'nin 25 GHz kanal aralıklı sistemlerdeki değeri 12,5 GHz kanal aralıklı sistemlerdekine göre yükselmiş; ancak daha sonra kanal aralıkları 50 GHz ve 100 GHz'e doğru genişledikçe, OSNR düşmüştür. Kanal aralıkları genişlerken FWM etkisinin azaldığı ve ASE gürültüsü etkisinin arttığı göz önünde bulundurulursa; 25 GHz kanal aralıklı sistemlerdeki OSNR yükselişinin nedeninin, 0,5 mW giriş gücü ve ilgili kanal aralığı değerinde, OSNR üzerinde Raman kazancı formunda ve baskın etki şeklinde ortaya çıkan SRS etkisi olduğu değerlendirilmektedir. 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı sistemlerde ise, ASE gürültüsü etkisinin baskın etki haline geldiği ve bu nedenle OSNR'nin düştüğü anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 1 mW giriş gücü değerleri için, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, 1 EDFA'lı sistemde, 0,5 mW giriş gücü değerlerinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde ve aynı nedenle, OSNR'nin 25 GHz kanal aralıklı sistemdeki değeri 12,5 GHz kanal aralıklı sistemdekine göre yükselmiş; ancak daha sonra kanal aralıkları 50 GHz ve 100 GHz'e doğru genişledikçe, OSNR düşmüştür. Ancak, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerin hepsinde, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, 12,5 GHz – 50 GHz aralığında OSNR artmış; 100 GHz'de ise azalmıştır. Bu durumun nedeni, 25 GHz ve 50 GHz kanal aralıklı 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, 1 mW giriş gücü değerinde, SRS etkisinin OSNR üzerinde Raman kazancı formunda ve baskın etki olarak ortaya çıkması; 100 GHz kanal aralıklı 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde ise, ASE gürültüsü etkisinin baskın etki haline gelmesi ve bu nedenle OSNR'nin azalmasıdır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 3 mW giriş gücü değerleri için, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, 2, 3 ve 5 EDFA'lı sistemlerde OSNR sürekli artmıştır. Kanal aralıkları genişlerken FWM etkisinin azaldığı ve ASE gürültüsü etkisinin arttığı göz önünde bulundurulursa, ilgili giriş gücü değerlerinde artan kanal aralıklarıyla birlikte OSNR'deki sürekli artışın nedeninin, Raman kazancı formunda ve baskın etki şeklinde ortaya çıkan SRS etkisi olduğu değerlendirilmektedir. 1 ve 4 EDFA'lı sistemlerde ise, 1 mW giriş gücü değerinde 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde elde edilen sonuçlara benzer şekilde ve aynı nedenle, 12,5 GHz – 50 GHz aralığında OSNR artmış; 100 GHz'de ise azalmıştır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 5 mW giriş gücü değerleri için, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerin hepsinde, OSNR değerinin sürekli arttığı görülmektedir. Bu durum, 3 mW giriş gücü değerleri için 2, 3 ve 5 EDFA'lı sistemlerde elde edilen sonuçlara benzer olup nedeni de aynıdır.

OSNR, 0,1 mW giriş gücü değeri için, 100 GHz kanal aralıklı, 1 ve 2 EDFA'lı sistemlerde; 3 mW giriş gücü değeri için, 12,5 GHz kanal aralıklı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde; 5 mW giriş gücü değeri için, 12,5 GHz kanal aralıklı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemler ile 25 GHz kanal aralıklı, 2 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, 23 dB sınırının altında bir değere sahiptir.

b) Birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durum için elde edilen OSNR-kanal aralığı benzetim sonuçlarında:

Yorumlamaları yapabilmek için, bir önceki kısımda açıklanan ve daima gözönünde bulundurulması gereken durumlara ilaveten, Altbölüm 4.4'teki Şekil 4.28-4.47'den elde edilen benzetim sonuçları da dikkate alınmalıdır. İlgili sonuçlara göre, giriş gücünün 0,1 mW değeri için, 12,5 GHz - 100 GHz kanal aralıklı tüm sistemlerde; giriş gücünün 0,5 mW değeri için, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı tüm sistemlerde (50 GHz kanal aralıklı 3 EDFA'lı sistem hariç); giriş gücünün 1 mW değeri için, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı tüm sistemlerde (50 GHz kanal aralıklı 2 ve 5 EDFA'lı sistemler hariç); giriş gücünün 3 mW değeri için, 100 GHz kanal aralıklı tüm sistemlerde, üçlü ve beşli etki göz önünde bulundurularak yapılan benzetimlerde elde edilen OSNR değerleri arasında belirgin fark bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu belirtilenler haricindeki tüm diğer sistem konfigürasyonlarında, OSNR üzerindeki SPM+XPM+FWM üçlü etkisi yorumlamalarda dikkate alınmalıdır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 0,1 mW giriş gücü değerleri için, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerin hepsinde, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR sürekli olarak düşmüştür. Düşük kanal giriş gücü nedeniyle, SPM ve XPM'nin etkisinin ihmal edilebildiği, kanal aralıkları genişlerken FWM etkisinin azaldığı ve ASE gürültüsü etkisinin arttığı göz önünde bulundurulursa, artan kanal aralıklarıyla birlikte, ilgili giriş gücü değerinde ASE gürültüsü etkisinin baskın etki haline geldiği ve bu nedenle OSNR'nin düştüğü anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 0,5 mW giriş gücü değerleri için, 1 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR'nin 25 GHz kanal aralıklı sistemlerdeki değeri 12,5 GHz kanal aralıklı sistemlerdekine göre yükselmiş; ancak daha sonra kanal aralıkları 50 GHz ve 100 GHz'e doğru genişledikçe, OSNR düşmüştür. Bu durumun, ilgili giriş gücü değeri için 25 GHz kanal aralıklı 1 ve 5 EDFA'lı sistemlerde SPM+XPM+FWM'nin OSNR üzerinde etkisinin bulunmasına rağmen, baskın etkinin

Raman kazancı formundaki SRS etkisi olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı sistemlerde ise, ASE gürültüsü etkisinin baskın etki haline geldiği ve bu nedenle OSNR'nin düştüğü anlaşılmaktadır. 2 EDFA'lı sistemde, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR sürekli olarak artmıştır. Bu durum, 2 EDFA'lı sistemde, tüm kanal aralıkları değerlerinde, OSNR üzerindeki baskın etkinin Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu göstermektedir. 3 EDFA'lı sistemde, OSNR'nin değeri osilasyonlu bir davranış sergileyerek, 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda yükselmiş, 50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda düşmüş ve 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda tekrar yükselmiştir. Bu durum, 25 GHz ve 100 GHz kanal aralıklarında, baskın etkinin Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu, 50 GHz'de ise SPM+XPM+FWM+ASE gürültüsü etkisinin SRS etkisine göre baskın olduğunu göstermektedir. 4 EDFA'lı sistemde ise, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, 12,5 GHz – 50 GHz aralığında OSNR artmış; 100 GHz'de ise azalmıştır. Bu durumun nedeni, 25 GHz ve 50 GHz kanal aralıklı 4 EDFA'lı sistemde, 0,5 mW giriş gücü değerinde, SRS etkisinin OSNR üzerinde Raman kazancı formunda ve baskın etki olarak ortaya çıkması; 100 GHz kanal aralıklı 4 EDFA'lı sistemde ise, ASE gürültüsü etkisinin baskın etki haline gelmesi ve bu nedenle OSNR'nin azalmasıdır.

Çizelge 4.6-4.10'da, 1 mW giriş gücü değerleri için, 1, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde 12,5 GHz – 50 GHz aralığında OSNR artmış; 100 GHz'de ise azalmıştır. Bu durum, 0,5 mW giriş gücü değeri için 4 EDFA'lı sistemde karşılaşılan durum ile benzer ve nedeni de aynıdır. 2 EDFA'lı sistemde, 1 mW giriş gücü değeri için, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR sürekli olarak artmıştır. Bu durum, tüm kanal aralıkları değerlerinde OSNR üzerindeki baskın etkinin Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.6-4.10'da, 3 mW giriş gücü değerleri için, 1, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR sürekli olarak artmıştır. Bu durum, 1, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, tüm kanal aralıkları değerlerinde, OSNR üzerindeki baskın etkinin Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu göstermektedir.

2 EDFA'lı sistemde, 3 mW giriş gücü değeri için, kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR'nin 25 GHz kanal aralıklı sistemlerdeki değeri 12,5 GHz kanal aralıklı sistemlerdekine göre azalmış; ancak daha sonra kanal aralıkları 50 GHz ve 100 GHz'e doğru genişledikçe, OSNR artmıştır. Bu durum, 3 mW giriş gücü değeri için, 25 GHz kanal aralıklı 2 EDFA'lı sistemde, OSNR üzerindeki baskın etkinin birleşik SPM+XPM+FWM etkisi olduğunu; ancak 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklarında baskın etkinin Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.6-4.10'da, 5 mW giriş gücü değerleri için, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde kanal aralıkları 12,5 GHz'den 100 GHz'e doğru genişlerken, OSNR sürekli olarak artmıştır. Bu durum, 3 mW giriş gücü değerleri için, 1, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde karşılaşılan duruma benzer ve nedeni de aynıdır.

OSNR, 0,1 mW giriş gücü değeri için, 100 GHz kanal aralıklı, 1 ve 2 EDFA'lı sistemlerde; 0,5 mW giriş gücü değeri için, 12,5 GHz kanal aralıklı, 2, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde; 1 mW giriş gücü değeri için, 12,5 GHz kanal aralıklı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemler ile 25 GHz kanal aralıklı, 2 ve 5 EDFA'lı sistemlerde; 3 mW giriş gücü değeri için, 12,5 GHz kanal aralıklı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, 25 GHz kanal aralıklı, 1, 2, 3, ve 5 EDFA'lı sistemlerde ve 50 GHz kanal aralıklı 2 EDFA'lı sistemde; 5 mW giriş gücü değeri için, 12,5 GHz ve 25 GHz kanal aralıklı, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemler ile 50 GHz kanal aralıklı, 2 EDFA'lı sistemde, 23 dB sınırının altında bir değere sahiptir.

c) Birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durumlar için elde edilen OSNR-kanal aralığı benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde:

Çizelge 4.6-4.10'da verilen üçlü ve beşli etkinin göz önüne alındığı OSNR-kanal aralığı benzetim sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, kanal aralıkları daraldıkça ve giriş güçleri arttıkça, üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçlarında sapmaların arttığı;

beşli etki altında elde edilen OSNR sonuçlarının üçlü etki altında elde edilen sonuçlara göre genel olarak daha düşük olduğu gözlenmiştir.

100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki maksimum sapmalar, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, 5 mW giriş gücü değerlerinde sırasıyla, 0,46 dB; 2,13 dB; 0,51 dB; 0,31 dB; 0,41 dB olarak tespit edilmiştir. 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, diğer giriş gücü değerleri için, üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasında ya hiç sapma tespit edilmemiş ya da çok küçük sapmalar görülmüştür. Dolayısıyla, 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, düşük (0,1 mW ve 0,5 mW gibi), orta (1 mW gibi) ve hatta bazı yüksek (3 mW gibi) giriş güçlerinde beşli etki yerine üçlü etki analizlerinin yapılmasının, sistemin OSNR performansını gözlemlemede önemli sapmalara yol açmayacağı söylenebilir.

50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki sapmalar incelendiğinde, 1 EDFA'lı sistemde giriş gücünün 1 mW değerinden itibaren küçük sapmaların başladığı ve giriş gücünün daha yüksek değerlerinde sapmaların belirgin değerler aldığı; 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde ise giriş gücünün 0,5 mW değerinden itibaren belirginleşmeye başlayan sapma değerlerinin görüldüğü ve giriş gücü daha yüksek değerlere ulaştığında, çok yüksek sapma değerlerinin tespit edildiği açıktır. 50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki maksimum sapmalar, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, sırasıyla, 3 mW giriş gücü değerinde 6,13 dB; 5 mW giriş gücü değerinde 21,90 dB; 5 mW giriş gücü değerinde 5,94 dB; 5 mW giriş gücü değerinde 3,06 dB; 5 mW giriş gücü değerinde 6,42 dB olarak tespit edilmiştir. 50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, 2 EDFA'lı sistemde giriş gücünün 3 mW ve 5 mW değerleri için üçlü etki analizinde elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının üzerinde iken, beşli etki analizinde elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının altındadır. 50 GHz kanal aralıklı sistemlerde elde edilen sonuçlara göre, giriş gücünün 0,1 mW gibi küçük değerlerinde beşli etki analizi yerine üçlü etki analizi yapılmasının, sistemin OSNR performansını gözlemlemede önemli sapmalara yol

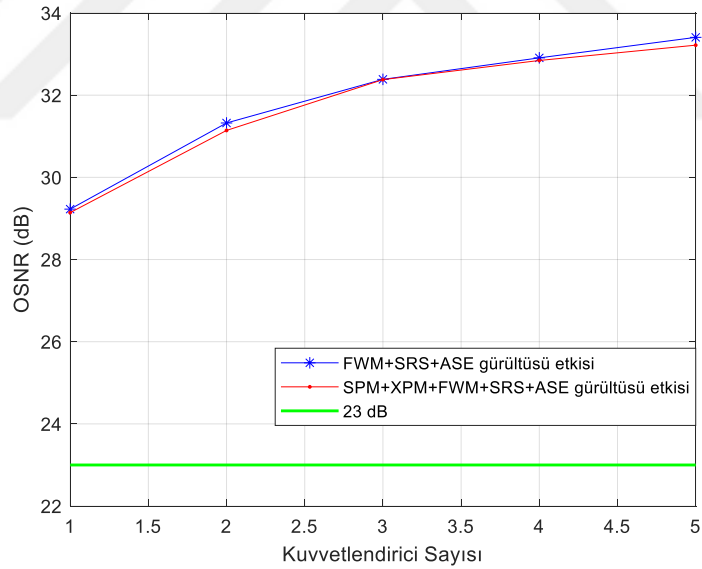
açmayacağı söylenebilir. Ancak daha yüksek giriş gücü değerlerinde, güvenilir iletişim için gerçekçi OSNR değerlerinin belirlenebilmesi açısından beşli etki analizinin önemi net bir şekilde görülmektedir.

12,5 GHz ve 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları incelendiğinde, 1, 2, 3, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde, 0,1 mW gibi düşük giriş güçlerinden itibaren sapmaların ortaya çıkabildiği ve artan giriş güçleriyle birlikte belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. 1 EDFA'lı sistemde, minimum 23 dB OSNR koşulu, beşli etki altında, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 1 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde, 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda ise 3 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde sağlanmazken; üçlü etki altında, sadece 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 3 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde sağlanmamaktadır. 2 EDFA'lı sistemde, minimum 23 dB OSNR koşulu, beşli etki altında, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 0,5 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde ve 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 1 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde sağlanmazken; üçlü etki altında, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 3 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde ve 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda sadece 5 mW giriş gücü değerinde sağlanmamaktadır. 3 EDFA'lı sistemde, minimum 23 dB OSNR koşulu, beşli etki altında, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 1 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde, 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda ise 3 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde sağlanmazken; üçlü etki altında, sadece 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 3 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde sağlanmamaktadır. 4 EDFA'lı sistemde, minimum 23 dB OSNR koşulu, beşli etki altında, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 0,5 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde ve 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda sadece 5 mW giriş gücü değerinde sağlanmazken; üçlü etki altında, sadece 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 3 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde sağlanmamaktadır. 5 EDFA'lı sistemde, minimum 23 dB OSNR koşulu, beşli etki altında, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 0,5 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde ve 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 1 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde sağlanmazken; üçlü etki altında, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda 3 mW ve üzeri giriş gücü değerlerinde ve 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda sadece 5 mW giriş

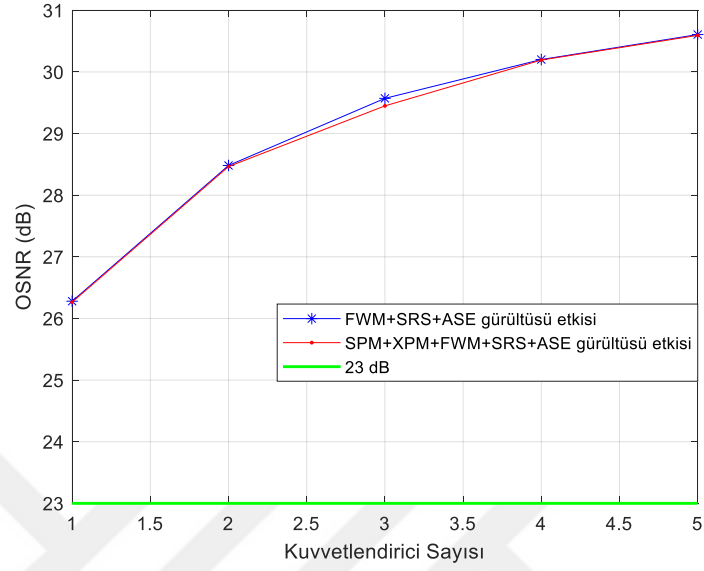
güç değerinde sağlanmamaktadır. 12,5 GHz ve 25 GHz kanal aralıklı sistemlerde elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar, giriş gücünün 0,1 mW'ın üzerindeki değerlerinden itibaren, güvenilir iletişim için gerçekçi OSNR değerlerinin belirlenebilmesi açısından beşli etki analizinin önemini net bir şekilde göstermektedir.

4.5. OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Sonuçları

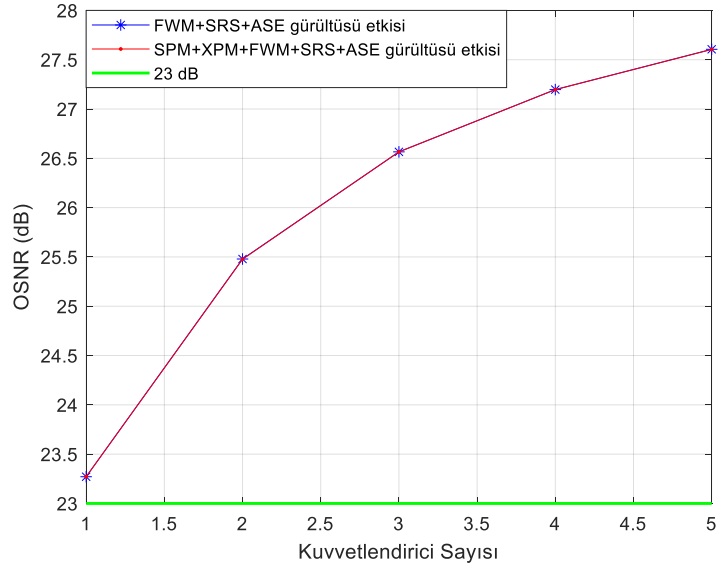
Bölüm 3.6'da açıklanan benzetim koşulları altında, EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe DWDM haberleşme sistemlerinde, kuvvetlendirici sayısının 1 ile 5 arasında değiştirilmesiyle, farklı giriş güçleri için elde edilen OSNR değişimlerini gösteren benzetim sonuçları Şekil 4.48-4.67'de sunulmuştur.



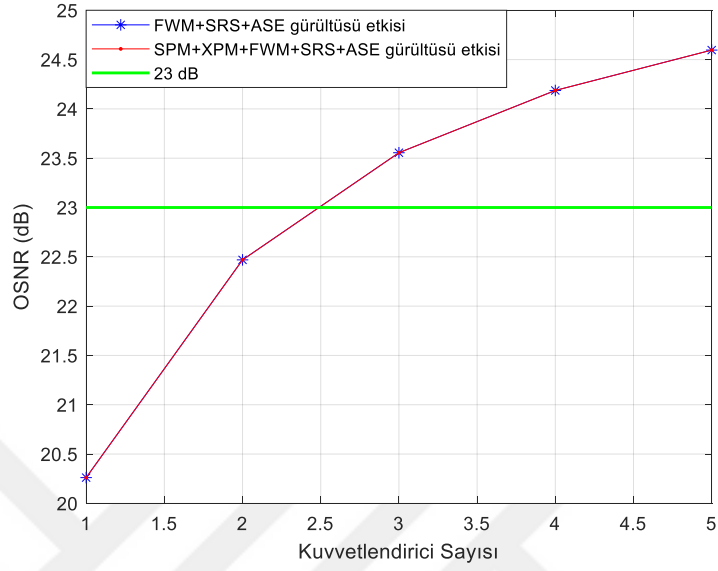
Şekil 4.48. 12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



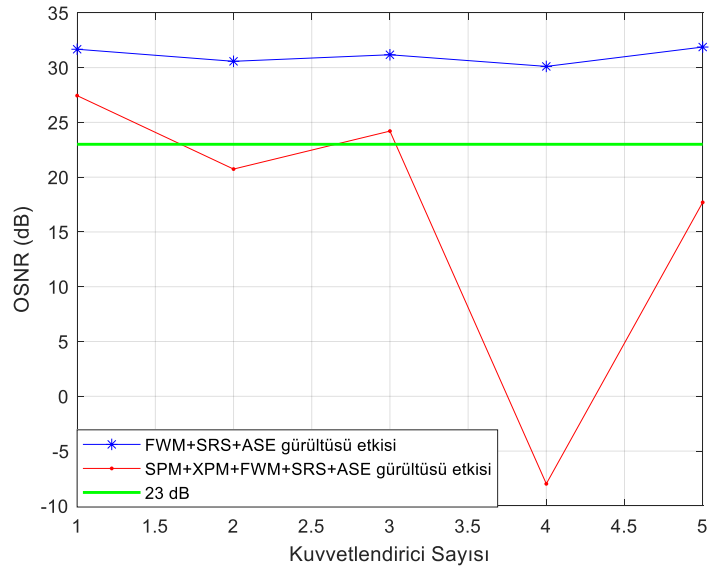
Şekil 4.49. 25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



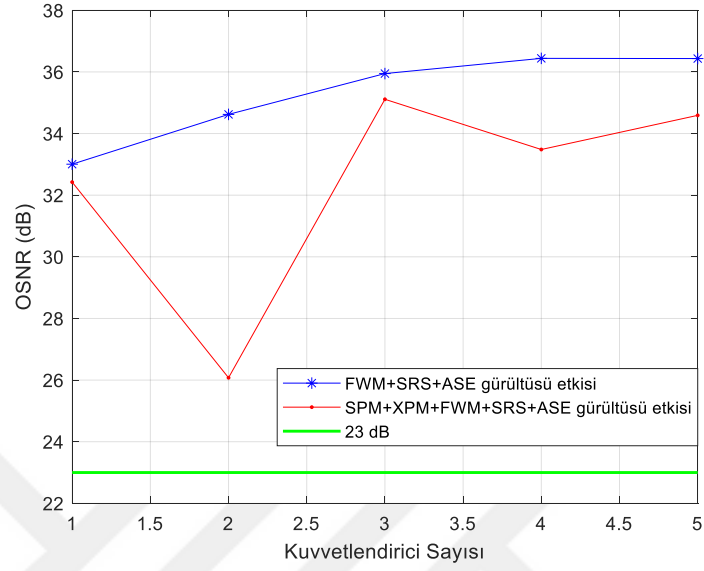
Şekil 4.50. 50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



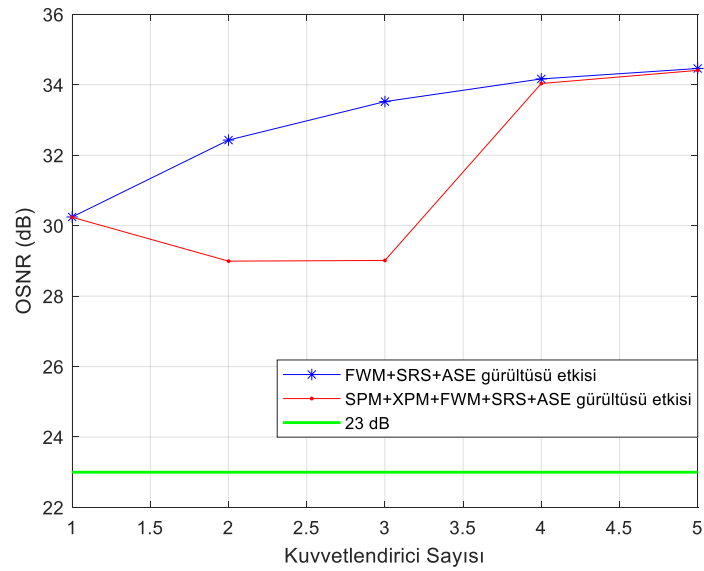
Şekil 4.51. 100 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



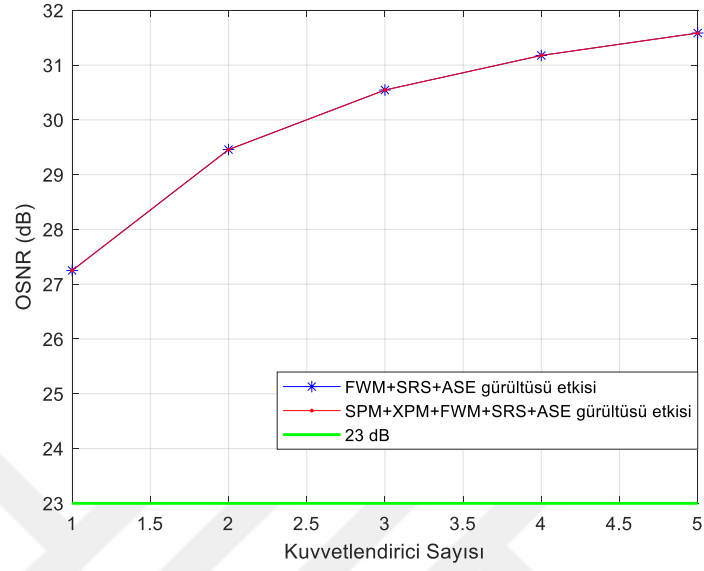
Şekil 4.52. 12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



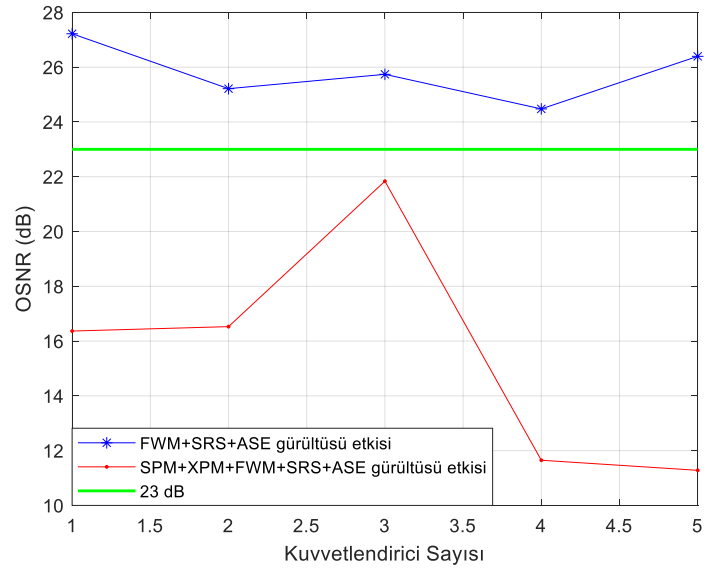
Şekil 4.53. 25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



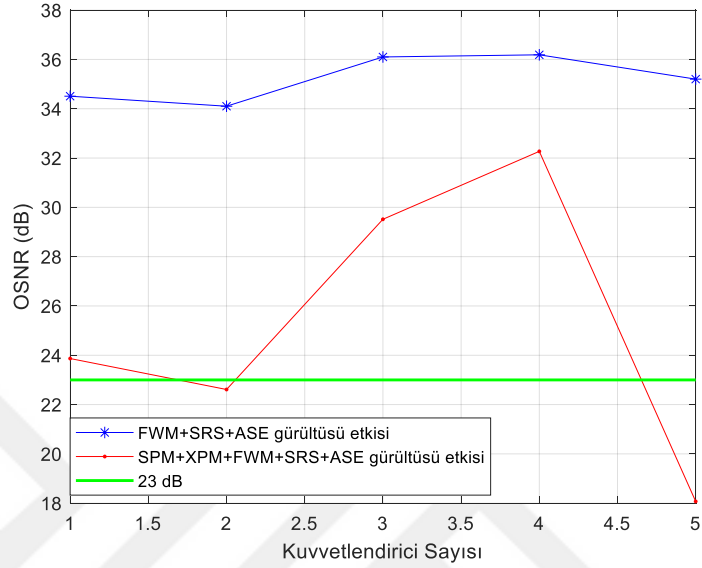
Şekil 4.54. 50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



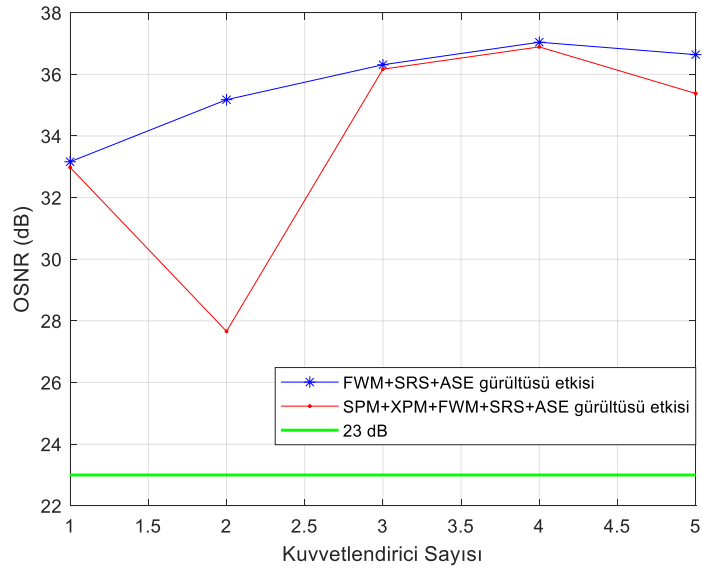
Şekil 4.55. 100 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 0,5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



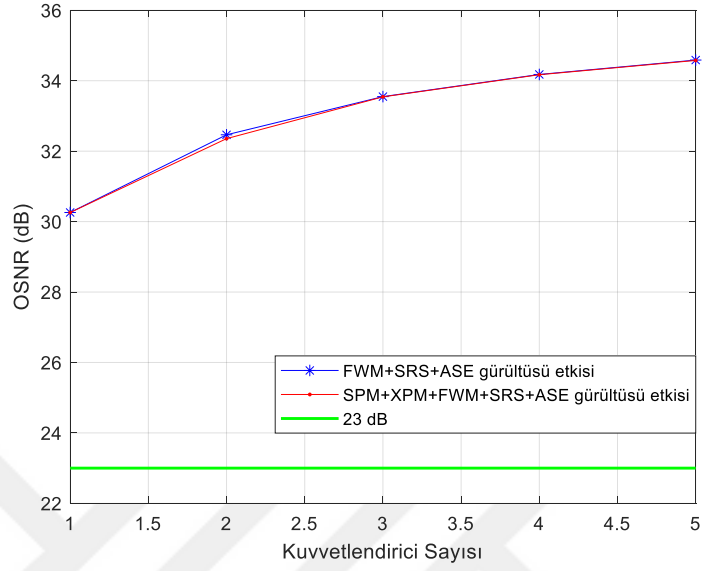
Şekil 4.56. 12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



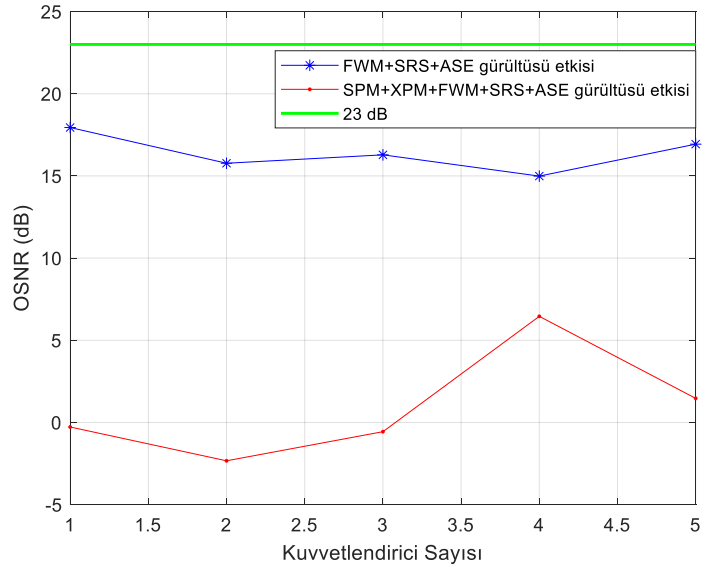
Şekil 4.57. 25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



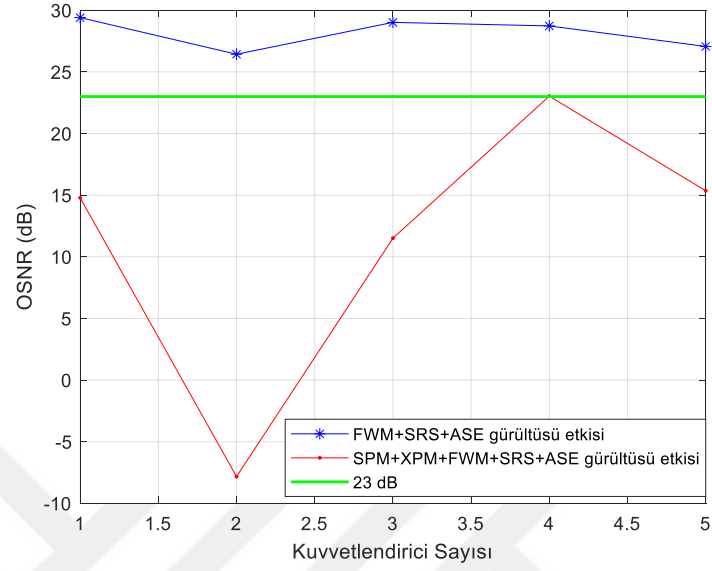
Şekil 4.58. 50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



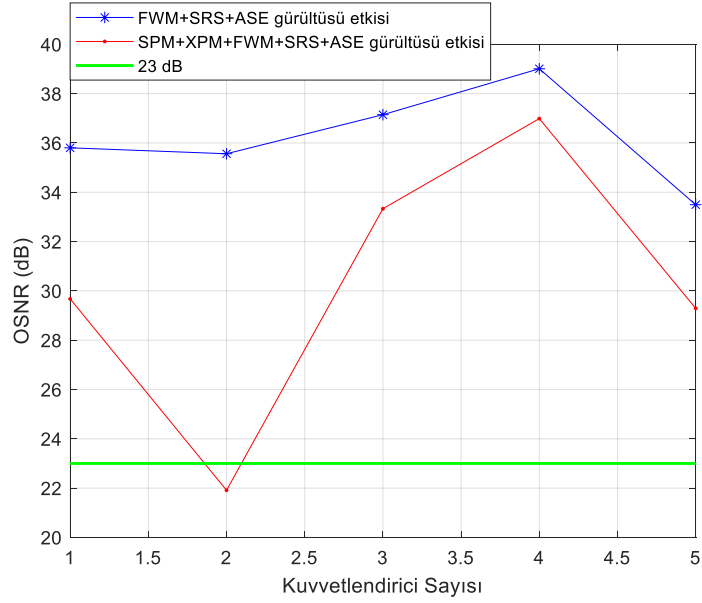
Şekil 4.59. 100 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 1$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



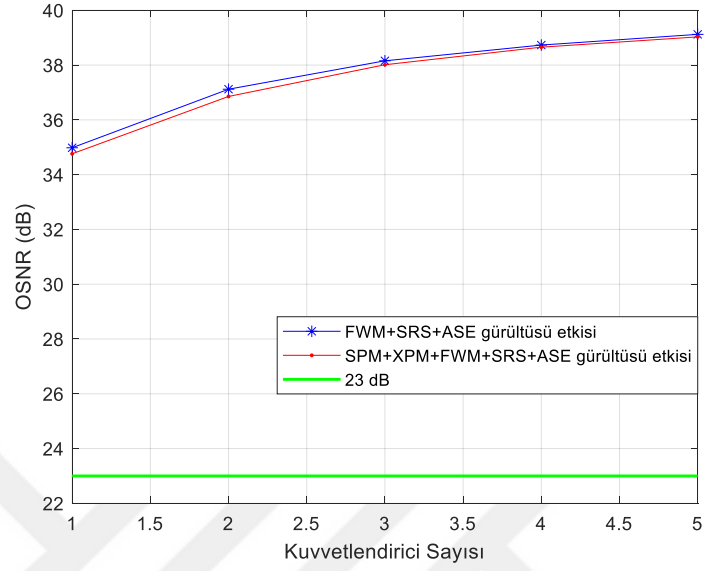
Şekil 4.60. 12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 3$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



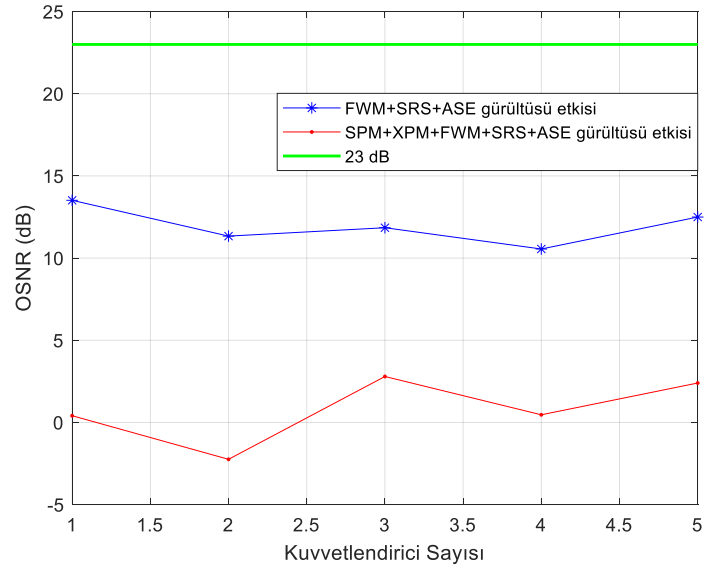
Şekil 4.61. 25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 3$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



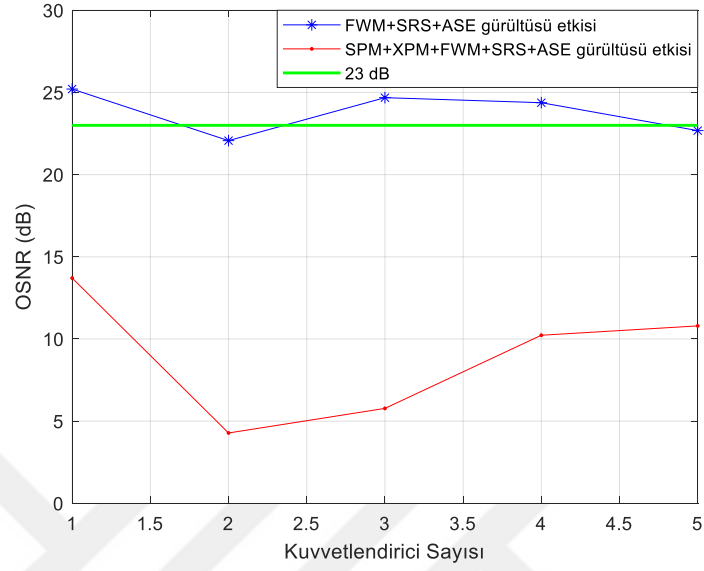
Şekil 4.62. 50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 3$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



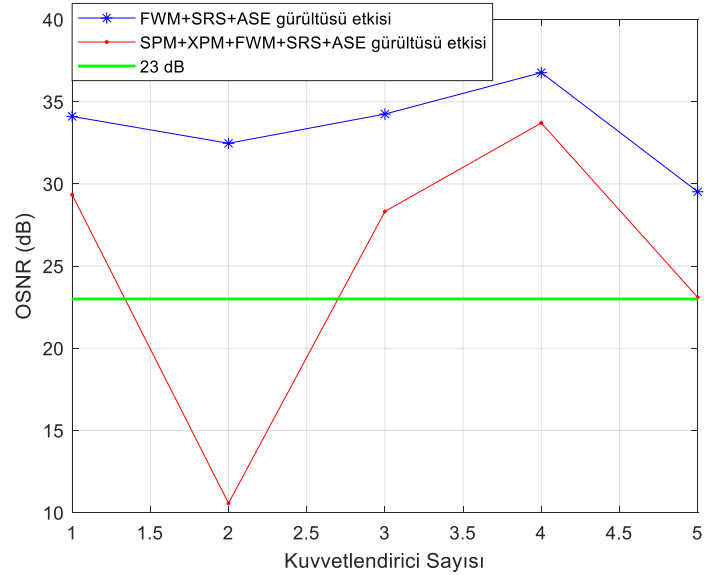
Şekil 4.63. 100 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 3 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



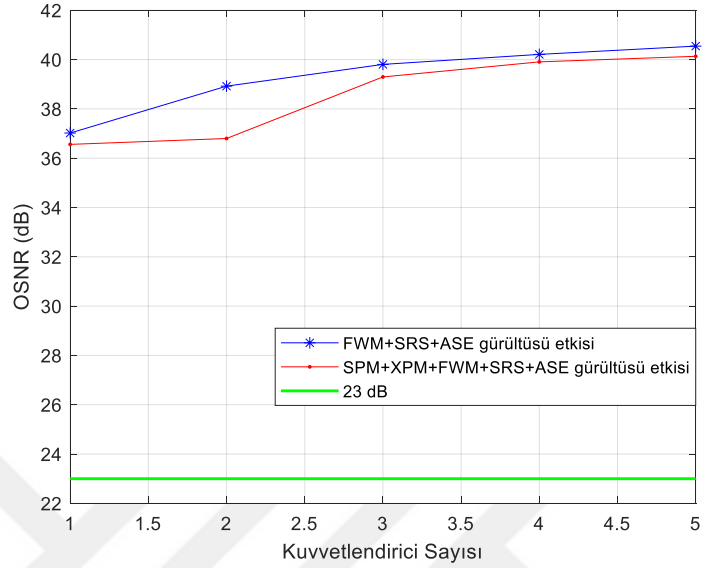
Şekil 4.64. 12,5 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



Şekil 4.65. 25 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



Şekil 4.66. 50 GHz kanal aralığı ve $P_{giriş} = 5$ mW için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri



Şekil 4.67. 100 GHz kanal aralığı ve $P_{\text{giriş}} = 5 \text{ mW}$ için, birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi ile birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında, 63 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında OSNR-EDFA sayısı benzetim eğrileri

Şekil 4.48-4.67’de verilen benzetimlerin yorumlamalarının daha anlaşılabilir olması açısından, Altbölüm 4.3 ve 4.4’te yapılabilen benzer şekilde, üçlü etkinin (birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi) ve beşli etkinin (SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi) göz önüne alındığı durumlar için elde edilen benzetim sonuçları, öncelikle ayrı ayrı yorumlanacak, daha sonra karşılaştırmalı yorumlar verilecektir.

a) Birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durum için elde edilen OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında:

Yorumlamaları yapabilmek için daima gözönünde bulundurulması gereken noktalar; Denklemler (2.20), (2.29) ve (2.30)’dan görüleceği üzere FWM çaprazkarışım gücünün etkisinin daralan kanal aralıkları, artan giriş gücü değerleri ve artan EDFA sayısı ile arttığı; Denklemler (2.1) ve (2.2)’den görüleceği üzere modifiye işaret gücü üzerindeki SRS etkisinin genişleyen kanal aralıkları ve artan giriş güçleriyle arttığı, ancak bu etkinin, sistem parametrelerine bağlı olarak Raman kazancı ya da kaybı şeklinde olabileceği;

Denklem (2.28)'den görüleceği üzere ASE gürültüsü etkisinin sistem giriş güçlerinden bağımsız olduğu ancak benzetimlerde alıcı filtre bantgenişliği kanal aralığına eşit seçildiğinden, genişleyen kanal aralıkları ve artan EDFA sayısı ile birlikte artmıştır.

0,1 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.48-4.51'de verilen birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarının hepsinde, OSNR değerinin artan kuvvetlendirici sayısı ile birlikte sürekli arttığı görülmektedir. Bu durum ilgili giriş gücü değeri için artan kanal aralıkları ve EDFA sayıları ile birlikte OSNR üzerindeki baskın etkinin daima Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu göstermektedir. Şekil 4.51'de, 100 GHz kanal aralıklı, 1 ve 2 EDFA'lı konfigürasyonlara sahip sistemlerde OSNR değerinin 23 dB sınırının altında olduğu görülmektedir. Artan kanal aralıklarıyla birlikte azalan FWM etkisine rağmen, ilgili konfigürasyonlarda karşılaşılan bu durumun sebebinin, optik filtre bantgenişliğinin artması nedeniyle 100 GHz kanal aralığı değerinde etkisini arttıran ASE gürültüsü olduğu açıktır.

0,5 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.52-4.55'te verilen birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında, Şekil 4.52'deki 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonda OSNR değeri artan EDFA sayıları ile birlikte osilasyonlu bir davranış sergileyerek azalma ve artmalar göstermiş; ilgili diğer şekillerde ise Şekil 4.48-4.51'dekine benzer davranışı aynı nedenlerle sergilemiştir. Şekil 4.52'de, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı ve 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR'deki düşüşün nedeni artan EDFA sayısı ile birlikte, 2 ve 4 EDFA'lı durumlarda FWM+ASE gürültü etkisinin SRS etkisine baskın olduğu; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR'deki artışın nedeni ise 3 ve 5 EDFA'lı durumlarda Raman kazancı formundaki SRS etkisinin FWM+ASE gürültü etkisine baskın olduğu şeklinde yorumlanabilir.

1 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.56-4.59'da verilen birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında, farklı OSNR davranışları görülmüştür. Şekil 4.56'da, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemde OSNR, Şekil 4.52'dekine benzer biçimde ve aynı nedenle artan EDFA sayıları ile birlikte osilasyonlu biçimde azalmakta ve artmaktadır. Şekil 4.57'de, 25 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR azalmakta; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı ve 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR artmaktadır. OSNR'ın azaldığı konfigürasyonlarda FWM+ASE gürültüsünün baskın; arttığı konfigürasyonlarda ise Raman kazancı formundaki SRS etkisinin baskın olduğu söylenebilir. Şekil 4.58'de, 50 GHz kanal aralıklı sistemde, EDFA sayıları 1-4 arasında artarken OSNR artmakta; 5 EDFA'lı konfigürasyonda ise azalmaktadır. Kanal aralığının genişlemesi nedeniyle azalan FWM etkisine karşın, 1-4 EDFA aralığında OSNR'daki artışın Raman kazancı formundaki SRS etkisinin baskın etki olmasından kaynaklandığı; 5 EDFA'lı konfigürasyonda ise ilgili EDFA sayısına sahip sistemde ASE gürültüsünün baskın etki haline gelmesi nedeniyle OSNR'de düşüşe neden olduğu söylenebilir. Şekil 4.59'da, 100 GHz kanal aralıklı sistemde, EDFA sayısı 1 - 5 aralığında artarken OSNR'daki sürekli artış, tüm konfigürasyonlarda OSNR üzerindeki baskın etkinin Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu göstermektedir.

3 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.60-4.63'te verilen birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında, Şekil 4.63'te 100 GHz kanal aralıklı sistemde, EDFA sayısı 1 - 5 aralığında arttığında OSNR'de görülen sürekli artışın dışında, diğer tüm şekillerde OSNR osilasyonlu davranış göstermektedir. Şekil 4.60'ta, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemde 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı ve 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR artmaktadır. Dar kanal aralıkları nedeniyle etkisini arttıran FWM dikkate alındığında, OSNR üzerindeki baskın etkinin 2 ve 4 EDFA'lı sistemlerde FWM+ASE gürültüsü olduğu; 3 ve 5 EDFA'lı sistemlerde ise Raman kazancı

formundaki SRS etkisi olduğu görülmektedir. İlgili grafikte, 1 - 5 EDFA'lı tüm sistemlerde OSNR değerinin 23 dB sınırının altında kalma sebebi, 3 mW gibi yüksek giriş gücüne sahip 12,5 GHz gibi dar kanal aralıklı sistemlerdeki yüksek FWM etkinliğidir. Şekil 4.61'de, 25 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı, 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı konfigürasyona geçişte OSNR artmaktadır. 2, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde OSNR düşüşünün nedeni, ilgili konfigürasyonlarda FWM+ASE gürültüsünün baskın etki olmasından; 3 EDFA'lı sistemdeki OSNR yükselişinin nedeni ise, ilgili konfigürasyonda Raman kazancı formundaki SRS etkisinin baskın etki olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.62'de, 50 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı ve 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR artmaktadır. OSNR'daki artışların nedenleri Şekil 4.61'de belirtilenlerle aynıdır. OSNR düşüşlerinin nedeni her ne kadar yine FWM+ASE gürültüsünün baskın etki olmasından kaynaklansa da, 50 GHz gibi geniş kanal aralıklarında FWM etkisi azalmaya başladığından, buradaki baskınlıkta, artan EDFA sayılarıyla değeri artan ASE gürültü gücü önemli rol oynamaktadır.

5 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.64-4.67'de verilen birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında, Şekil 4.67'de 100 GHz kanal aralıklı sistemde EDFA sayısı 1 - 5 aralığında arttığında OSNR'de görülen sürekli artışın dışında, diğer tüm şekillerde OSNR osilasyonlu davranış göstermektedir. Şekil 4.64'te, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemde 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı ve 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR artmaktadır. Dar kanal aralıkları nedeniyle etkisini arttıran FWM dikkate alındığında, OSNR üzerindeki baskın etkinin 2 ve 4 EDFA'lı sistemlerde FWM+ASE gürültüsü olduğu; 3 ve 5 EDFA'lı sistemlerde ise Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğu görülmektedir. İlgili grafikte, 1 - 5 EDFA'lı tüm sistemlerde OSNR değerinin 23 dB sınırının altında kalma sebebi, 5 mW gibi yüksek giriş gücüne sahip 12,5 GHz gibi dar kanal aralıklı sistemlerdeki yüksek FWM etkinliğidir. Şekil 4.65'te,

25 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı, 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı konfigürasyona geçişte OSNR artmaktadır. 2, 4 ve 5 EDFA'lı sistemlerde OSNR düşüşünün nedeni, ilgili konfigürasyonlarda FWM+ASE gürültüsünün baskın etki olmasından; 3 EDFA'lı sistemdeki OSNR yükselişinin nedeni ise, ilgili konfigürasyonda Raman kazancı formundaki SRS etkisinin baskın etki olmasından kaynaklanmaktadır. İlgili grafikte, 2 ve 5 EDFA'lı sistemlerde OSNR değeri 23 dB sınırının altına düşmektedir. Bu durum, Şekil 4.64'te 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonların tamamında görülen duruma benzer ve nedeni de aynıdır. Şekil 4.66'da, 50 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı ve 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR artmaktadır. OSNR'daki artışların nedenleri Şekil 4.65'te belirtilenlerle aynıdır. OSNR düşüşlerinin nedeni her ne kadar yine FWM+ASE gürültüsünün baskın etki olmasından kaynaklansa da, 50 GHz gibi geniş kanal aralıklarında FWM etkisi azalmaya başladığından, buradaki baskınlıkta, artan EDFA sayılarıyla değeri artan ASE gürültü gücü önemli rol oynamaktadır.

b) Birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durum için elde edilen OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında:

0,1 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.48-4.51'de verilen birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarının hepsinde, OSNR değerinin artan kuvvetlendirici sayısı ile birlikte sürekli arttığı görülmektedir. Bu durum ilgili giriş gücü değeri için artan kanal aralıkları ve EDFA sayıları ile birlikte OSNR üzerindeki baskın etkinin daima Raman kazancı formundaki SRS etkisi olduğunu göstermektedir. Şekil 4.51'de, 100 GHz kanal aralıklı, 1 ve 2 EDFA'lı konfigürasyonlara sahip sistemlerde OSNR değerinin 23 dB sınırının altında olduğu görülmektedir. Artan kanal aralıklarıyla birlikte azalan SPM+XPM+FWM etkisine rağmen, ilgili konfigürasyonlarda karşılaşılan bu durumun sebebinin, optik filtre bantgenişliğinin artması nedeniyle 100 GHz kanal aralığı değerinde etkisini arttıran ASE gürültüsü olduğu açıktır.

0,5 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.52-4.55'te verilen birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında, Şekil 4.55'teki 100 GHz kanal aralıklı sistemde, EDFA sayısı 1 - 5 aralığında arttıldığında OSNR'de görülen sürekli artışın dışında, diğer tüm şekillerde OSNR osilasyonlu davranış göstermektedir. Özellikle Şekil 4.52 ve 4.53'teki osilasyonlar çok belirgindir. Bu belirgin osilasyonların sebebi artmaya başlayan giriş güçleriyle birlikte Denklem (2.23) ile verilen $\Delta\beta'$ 'ın $\Delta\beta$ 'dan farklılaşmaya başlamasının bir sonucu olarak, birleşik SPM+XPM+FWM etkisinin OSNR üzerinde artan ve azalan etkiler göstermesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.52'de, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı ve 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR artmaktadır. 3 ve 5 EDFA'lı sistemlerde OSNR artışının nedeni, daha önce de belirtildiği gibi, Raman kazancı formundaki SRS etkisidir. 2 ve 4 EDFA'lı sistemdeki OSNR düşüşlerinin nedeni ise OSNR üzerindeki birleşik SPM+XPM+FWM etkisinin baskın olmasıdır. 2 ve 4 EDFA'lı sistemlerdeki baskın SPM+XPM+FWM etkisi nedeniyle, ilgili konfigürasyonlardaki OSNR değerleri 23 dB sınırının altındadır. 5 EDFA'lı sistemde de her ne kadar Raman kazancı formundaki SRS etkisi nedeniyle OSNR değeri artsa da 23 dB sınırının üzerine çıkamamıştır. Şekil 4.53'te, 25 GHz kanal aralıklı sistemde, OSNR davranışı, Şekil 4.52'dekine benzer olup nedeni de aynıdır. Ancak ilgili grafikte, Şekil 4.52'den farklı olarak, OSNR, 23 dB sınırının altına hiç düşmemektedir. Şekil 4.54'te, 50 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 EDFA'dan 2 EDFA'lı konfigürasyona geçişte OSNR düşmekte; 2 EDFA'dan 3 EDFA'lı, 3 EDFA'dan 4 EDFA'lı ve 4 EDFA'dan 5 EDFA'lı konfigürasyonlara geçişte OSNR artmaktadır. 2 EDFA'lı konfigürasyondaki OSNR düşüşünün sebebi birleşik SPM+XPM+FWM+ASE gürültüsü etkisinin baskın olması iken diğer konfigürasyonlardaki OSNR artışının sebebi Raman kazancı formundaki SRS etkisidir.

1 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.56-4.59'da verilen birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında,

Şekil 4.59'daki 100 GHz kanal aralıklı sistemde, EDFA sayısı 1 - 5 aralığında arttırıldığında OSNR'de görülen sürekli artışın dışında, diğer tüm şekillerde OSNR osilasyonlu davranış göstermektedir. Bu osilasyonlu davranışın nedeni, Şekil 4.52-4.54'tekine benzer şekilde, OSNR üzerindeki birleşik SPM+XPM+FWM etkisinin osilasyonlu yapısından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.56'da, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemde, 1 - 5 EDFA'lı tüm konfigürasyonlarda ve Şekil 4.57'de, 25 GHz kanal aralıklı sistemde, 2 ve 5 EDFA'lı konfigürasyonlarda, birleşik SPM+XPM+FWM etkisi nedeniyle OSNR 23 dB sınırının altında kalmıştır.

3 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.60-4.63'te verilen birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında, Şekil 4.63'teki 100 GHz kanal aralıklı sistemde, EDFA sayısı 1 - 5 aralığında arttırıldığında OSNR'de görülen sürekli artışın dışında, diğer tüm şekillerde OSNR yine osilasyonlu davranış göstermekte olup osilasyonlu davranışın nedeni, Şekil 4.52-4.54 ve Şekil 4.56-4.58'dekiyle aynıdır. OSNR üzerindeki birleşik SPM+XPM+FWM etkisi nedeniyle, Şekil 4.60'taki benzetimde 12,5 GHz kanal aralıklı sistemde 1 - 5 EDFA'lı tüm konfigürasyonlar için; Şekil 4.61'deki benzetimde 25 GHz kanal aralıklı sistemde 4 EDFA'lı konfigürasyon hariç diğer tüm konfigürasyonlar için; Şekil 4.62'deki benzetimde 50 GHz kanal aralıklı sistemde 2 EDFA'lı konfigürasyon için, OSNR 23 dB sınırının altında kalmaktadır.

5 mW giriş gücü değerleri ve kanal aralığının 12,5 GHz-100 GHz aralığında değiştiği konfigürasyonlar için, Şekil 4.64-4.67'te verilen birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altındaki OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçlarında, OSNR, önceki benzetim sonuçlarına benzer biçimde ve aynı nedenle yine osilasyonlu davranış göstermektedir. OSNR üzerindeki birleşik SPM+XPM+FWM etkisi nedeniyle, Şekil 4.64 ve 4.65'teki benzetimlerde, 12,5 GHz ve 25 GHz kanal aralıklı sistemlerde 1 - 5 EDFA'lı tüm konfigürasyonlar için; Şekil 4.66'daki benzetimde 50 GHz kanal aralıklı sistemde 2 EDFA'lı konfigürasyon için, OSNR 23 dB sınırının altında kalmaktadır.

c) Birleşik FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin ve birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin göz önüne alındığı durumlar için elde edilen OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde:

Şekil 4.48-4.67’de verilen üçlü ve beşli etkinin göz önüne alındığı OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, giriş güçleri artıp kanal aralıkları daraldıkça, üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçlarında sapmaların arttığı; beşli etki altında elde edilen OSNR sonuçlarının üçlü etki altında elde edilen sonuçlara göre genel olarak daha düşük olduğu gözlenmiştir.

0,1 mW giriş güçleri için, Şekil 4.48-4.51’de verilen üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki maksimum sapmalar, 12,5 GHz ve 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, sırasıyla, 5 EDFA’lı sistemde 0,19 dB; 3 EDFA’lı sistemde 0,13 dB olarak tespit edilmiştir. 0,1 mW giriş güçleri için, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı sistemlerde 1 - 5 EDFA’lı konfigürasyonların hiçbirinde üçlü ve beşli etki altındaki OSR değerleri arasında sapma görülmemiştir. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 0,1 mW gibi düşük giriş güçlerinde 12,5 GHz – 100 GHz kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA’lı konfigürasyonlarında, beşli etki yerine üçlü etki analizlerinin yapılmasının, sistemin OSNR performansını gözlemlemede önemli sapmalara yol açmayacağı söylenebilir.

0,5 mW giriş güçleri için, Şekil 4.52-4.55’te verilen üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki maksimum sapmalar, 12,5 GHz, 25 GHz ve 50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, sırasıyla, 4 EDFA’lı sistemde 38,08 dB; 2 EDFA’lı sistemde 8,55 dB; 3 EDFA’lı sistemde 4,51 dB olarak tespit edilmiştir. 0,5 mW giriş güçleri için, 100 GHz kanal aralıklı sistemlerde 1 - 5 EDFA’lı konfigürasyonların hiçbirinde üçlü ve beşli etki altındaki OSR değerleri arasında sapma görülmemiştir. Ayrıca, Şekil 4.52’den açıkça görüldüğü gibi, 0,5 mW giriş güçleri için, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemlerin 2, 4 ve 5 EDFA’lı konfigürasyonlarında üçlü etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB’nin üzerinde iken; beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının altında kalmıştır.

Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 0,5 mW gibi giriş güçlerinde, 100 GHz gibi geniş kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonlarında, beşli etki yerine üçlü etki analizlerinin yapılmasının, sistemin OSNR performansını gözlemlemede önemli sapmalara yol açmayacağı; ancak 100 GHz'in altındaki kanal aralıkları için, 1 - 5 EDFA'lı sistem konfigürasyonlarının hepsinde, güvenilir iletişim için gerçekçi OSNR değerlerinin belirlenebilmesi açısından beşli etki analizinin önemi net bir şekilde görülmektedir.

1 mW giriş güçleri için, Şekil 4.56-4.59'da verilen üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki maksimum sapmalar, 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, sırasıyla, 5 EDFA'lı sistemde 15,11 dB; 5 EDFA'lı sistemde 17,13 dB; 2 EDFA'lı sistemde 7,51 dB; 2 EDFA'lı sistemde 0,11 dB olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.56 ve 4.57'den açıkça görüldüğü gibi, 1 mW giriş güçleri için, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonlarının hepsinde ve 25 GHz kanal aralıklı sistemlerin 2 ve 5 EDFA'lı konfigürasyonlarında üçlü etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB'nin üzerinde iken; beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının altında kalmıştır. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 1 mW gibi orta büyüklükteki giriş güçlerinde, 100 GHz gibi geniş kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonlarında, beşli etki yerine üçlü etki analizlerinin yapılmasının, sistemin OSNR performansını gözlemlemede önemli sapmalara yol açmayacağı; ancak 100 GHz'in altındaki kanal aralıkları için, 1 - 5 EDFA'lı sistem konfigürasyonlarının hepsinde, güvenilir iletişim için gerçekçi OSNR değerlerinin belirlenebilmesi açısından beşli etki analizinin önemi net bir şekilde görülmektedir.

3 mW giriş güçleri için, Şekil 4.60-4.63'te verilen üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki maksimum sapmalar, 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, sırasıyla, 1 EDFA'lı sistemde 18,21 dB; 2 EDFA'lı sistemde 34,26 dB; 2 EDFA'lı sistemde 13,65 dB; 2 EDFA'lı sistemde 0,26 dB olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.60'ta görüldüğü gibi, 3 mW giriş güçleri için, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonlarının hepsinde, hem üçlü hem de beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının altında kalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.61 ve 4.62'den

açıkça görüldüğü gibi, 3 mW giriş güçleri için, 25 GHz kanal aralıklı sistemlerin 1, 2, 3 ve 5 EDFA'lı konfigürasyonlarında ve 50 GHz kanal aralıklı sistemlerin 2 EDFA'lı konfigürasyonunda üçlü etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB'in üzerinde iken; beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının altında kalmıştır. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 3 mW gibi yüksek giriş güçlerinde, 100 GHz gibi geniş kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonlarında, beşli etki yerine üçlü etki analizlerinin yapılmasının, sistemin OSNR performansını gözlemlemede önemli sapmalara yol açmayacağı; ancak 100 GHz'in altındaki kanal aralıkları için, 1 - 5 EDFA'lı sistem konfigürasyonlarının hepsinde, güvenilir iletişim için gerçekçi OSNR değerlerinin belirlenebilmesi açısından beşli etki analizinin önemi net bir şekilde görülmektedir.

5 mW giriş güçleri için, Şekil 4.64-4.67'de verilen üçlü ve beşli etki altındaki OSNR benzetim sonuçları arasındaki maksimum sapmalar, 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, sırasıyla, 2 EDFA'lı sistemde 13,57 dB; 3 EDFA'lı sistemde 18,91 dB; 4 EDFA'lı sistemde 21,90 dB; 5 EDFA'lı sistemde 2,13 dB olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.64'te görüldüğü gibi, 5 mW giriş güçleri için, 12,5 GHz kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonlarının hepsinde ve 25 GHz kanal aralıklı sistemlerin 2 ve 5 EDFA'lı konfigürasyonlarında, hem üçlü hem de beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının altında kalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.65 ve 4.66'dan açıkça görüldüğü gibi, 5 mW giriş güçleri için, 25 GHz kanal aralıklı sistemlerin 1, 3 ve 4 EDFA'lı konfigürasyonlarında ve 50 GHz kanal aralıklı sistemlerin 2 EDFA'lı konfigürasyonunda üçlü etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB'nin üzerinde iken; beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri 23 dB sınırının altında kalmıştır. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 5 mW gibi yüksek giriş güçlerinde, 100 GHz gibi geniş kanal aralıklı sistemlerin 1 - 5 EDFA'lı konfigürasyonlarında, beşli etki yerine üçlü etki analizlerinin yapılmasının, sistemin OSNR performansını gözlemlemede 0,31 dB – 2,13 dB aralığında sapmalara yol açacağı; ancak 100 GHz'in altındaki kanal aralıkları için, 1 - 5 EDFA'lı sistem konfigürasyonlarının hepsinde, güvenilir iletişim için gerçekçi OSNR değerlerinin belirlenebilmesi açısından beşli etki analizinin önemi net bir şekilde görülmektedir.

5. SONUÇ

Bu doktora tezinde, doğrusal olmayan optik olayların, yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM) optik fiberli uzak mesafe haberleşme sistemlerinin performansı üzerindeki birleşik etkileri, hem tek segmentli hem de Erbium katkılı fiber kuvvetlendiricilerin (EDFA) kullanıldığı çok segmentli sistemlerde, modelleme ve benzetimler yardımıyla kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Benzetimlerde kullanılan tek segmentli DWDM sistem modelleri 15, 31 ve 63 kanallı; 12,5 GHz – 100 GHz kanal aralıklı olup G.652 standart tek modlu optik fiber (SSMF) kullanmaktadır. Benzetimlerde kullanılan çok segmentli DWDM sistem modelleri, 63 kanallı, 12,5 GHz – 100 GHz kanal aralıklı olup G.652 standart tek modlu optik fiber (SSMF) ve 1 – 5 EDFA kullanmaktadır. Tezde, tek segmentli DWDM sistemlerde, öz faz modülasyonunun (SPM), çapraz faz modülasyonunun (XPM) ve dört dalga karışımının (FWM) birleşik etkisi (SPM+XPM+FWM etkisi) altında, işaret-çaprazkarışım oranının (SXR) kanal giriş güçleri ve kanal aralıklarındaki değişimlerden nasıl etkilendiği modelleme ve benzetimlerle gözlemlenmiştir. Sistem performansının, SPM+XPM+FWM etkisi altında gözlenmesinin önemini belirtmek amacıyla, SPM+XPM+FWM etkisi altında elde edilen benzetim sonuçları, literatürdeki çalışmalarda, tek segmentli sistemler üzerindeki doğrusal olmayan olayların etkilerini incelemeye en çok kullanılan etki olan yalnız FWM etkisi altında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, EDFA kullanan çok segmentli DWDM sistemlerinde, SPM, XPM, FWM, uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayılım (ASE) gürültüsünün birleşik etkisi (SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi) altında, optik işaret gürültü oranının (OSNR) kanal giriş güçleri, kanal aralıkları ve EDFA sayılarındaki değişimlerden nasıl etkilendiği modelleme ve benzetimlerle gözlemlenmiştir. Çok segmentli sistemlerin performansının, SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında gözlenmesinin önemini belirtmek amacıyla, SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında elde edilen benzetim sonuçları, literatürdeki çalışmalarda, çok segmentli sistemler üzerindeki doğrusal olmayan olayların etkilerini incelemeye en çok kullanılan birleşik etki olan FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tek ve çok segmentli sistemlerde yapılan bu karşılaştırmalı analizler sonucunda hangi tek segmentli sistem konfigürasyonları için

SPM+XPM+FWM etkisinin ve hangi çok segmentli sistem konfigürasyonları için SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin analizlerde kullanılmasının güvenilir bir haberleşmeyi sağlamak için önemli olduğu ortaya konmuştur.

Tek segmentli DWDM sistemlerde elde edilen benzetim sonuçları, kanal aralıkları daraldıkça ve kanal giriş güçleri arttıkça, SPM+XPM+FWM etkisinin, 15, 31 ve 63 kanallı DWDM sistemlerde daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Kanal aralıklarının 100 GHz'in altında olduğu 15, 31 ve 63 kanallı tüm tek segmentli DWDM sistem konfigürasyonlarında, SPM+XPM+FWM etkisi altında elde edilen SXR değerleri, yalnız FWM etkisi altında elde edilen değerlerden genel olarak daha düşük çıkmıştır. 15, 31 ve 63 kanallı tüm tek segmentli DWDM sistemlerde, 12,5 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda 0,1 mW ve üzeri kanal giriş güçlerinde; 25 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda 0,3 mW ve üzeri kanal giriş güçlerinde; 50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda ise 1 mW ve üzeri kanal giriş güçlerinde SPM+XPM+FWM etkisi altında elde edilen SXR değerleri ile yalnız FWM etkisi altında elde edilen SXR değerleri arasındaki sapmalar artan kanal giriş güçleriyle birlikte belirginleşmektedir. Ayrıca, bazı kanal giriş güçlerinde yalnız FWM etkisi altında elde edilen SXR değeri, güvenilir haberleşme için belirlenen minimum değer olan 23 dB'in üzerinde iken; aynı kanal giriş güçlerinde SPM+XPM+FWM etkisi altında elde edilen SXR değeri, 23 dB sınırının altına düşmektedir. Bu durum, tek segmentli uzak mesafe DWDM sistemlerde, 12,5 GHz - 50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, güvenilir bir haberleşmenin gerçekleştirilebilmesi için, performans analizlerinin, mutlaka, literatürde tercih edilen yalnız FWM etkisi yerine birleşik SPM+XPM+FWM etkisi altında yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. 15, 31 ve 63 kanallı tüm tek segmentli DWDM sistemlerde, 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda, kanal giriş güçlerinin 0,1 mW – 5 mW aralığındaki değerleri için, SPM+XPM+FWM etkisi altında elde edilen SXR değerlerinin, yalnız FWM etkisi altında elde edilen SXR değerlerinden ufak sapmalar gösterdiği ve bu nedenle 100 GHz kanal aralıklı tek segmentli uzak mesafe DWDM sistemlerde, performans analizlerinde SPM+XPM+FWM etkisi yerine yalnız FWM etkisinin dikkate alınabileceği tespit edilmiştir.

EDFA kullanan çok segmentli DWDM sistemlerde elde edilen karşılaştırmalı benzetim sonuçları, kanal giriş güçleri artıp kanal aralıkları daraldıkça, SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin belirgin hale geldiğini göstermektedir. Dolayısıyla, ilgili sistem konfigürasyonlarında, SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (birleşik beşli etki) altında elde edilen OSNR değerleriyle FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi (birleşik üçlü etki) altında elde edilen OSNR değerleri arasındaki sapma artmaktadır. Özellikle kanal aralıklarının 100 GHz'in altında olduğu, 63 kanallı ve 1 - 5 EDFA kullanan çok segmentli DWDM sistemlerde, birleşik beşli etki gözönüne alınarak yapılan analizler, birleşik üçlü etki altında elde edilen OSNR değerlerine göre, genellikle daha düşük OSNR değerleri vermektedir. Ayrıca osilasyonlar nedeniyle, giriş gücündeki çok ufak değişimlerde OSNR değerleri büyük değişimler gösterebilmektedir. Özellikle 12,5 GHz ve 25 GHz gibi dar kanal aralıklı sistem konfigürasyonlarında, birleşik beşli etki göz önüne alındığında, 23 dB seviyesinin altında OSNR değerlerinin elde edildiği giriş gücü aralıkları, birleşik üçlü etki göz önüne alındığında 23 dB seviyesinin altında OSNR değerlerinin elde edildiği giriş gücü aralığına göre daha geniştir. 50 GHz kanal aralıklı çok segmentli DWDM sistemlerde, artan giriş gücü değerleriyle birlikte, birleşik beşli etkinin göz önüne alındığı benzetimlerdeki osilasyonlar nedeniyle, aynı giriş gücü değerlerinde birleşik üçlü ve birleşik beşli etki altında elde edilen OSNR değerleri belirgin biçimde farklılaşmaktadır. Hatta bazı giriş gücü değerlerinde, birleşik üçlü etki analizinde rastlanmamasına rağmen, birleşik beşli etki analizinde 23 dB sınırının altında kalan OSNR değerleri görülmektedir. 100 GHz kanal aralıklı, 1 - 5 EDFA'lı DWDM sistem konfigürasyonlarında elde edilen benzetim sonuçlarında, 50 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlar için elde edilen sonuçlara kıyasla daha geniş giriş gücü aralıklarında birleşik üçlü ve birleşik beşli etki analizinde elde edilen OSNR değerleri birbirine yakındır. Ancak, 100 GHz kanal aralıklı konfigürasyonlarda bile, yüksek giriş güçlerinde, osilasyonlar nedeniyle OSNR değerleri arasında belirgin farklılaşmalar ve hatta bazı dar giriş gücü aralıklarında, birleşik beşli etki analizinde 23 dB sınırının altında kalan OSNR değerleri tespit edilmiştir. Bu durum, güvenilir bir iletişimin sağlanabilmesi için, EDFA kullanan çok segmentli uzak mesafe DWDM sistemlerin performans analizinde, SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisinin (birleşik beşli etki), göz önüne alınmasının önemini açıkça belirtmektedir.

Doktora tezinde elde edilen sonuçlar, kanal sayıları, kanal giriş güçleri, kanal aralıkları ve çok segmentli sistemlerdeki EDFA sayıları gibi sistem parametrelerinin, doğrusal olmayan olayların DWDM sistem performansı üzerinde azalan ve artan etkiler göstermesinde önemli rol oynadığını vurgulamaktadır. Dolayısıyla, sistem tasarımı ve gerçeklemesi sırasındaki konfigürasyon değişimlerinin sistem performansına etkisini analiz ederken, yüksek doğruluklu sonuçlar elde edebilmek için, modelleme karışıklığını arttırmasına rağmen, mutlaka doğrusal olmayan olayların birleşik etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Doktora tezinin, bilime katkı sağladığı noktalar aşağıda toplu olarak verilmiştir:

- Doğrusal olmayan etkiler altındaki uzak mesafe optik fiberli iletişim sistemlerinin performansı, ölçüm yapmanın zorlukları ve cihaz yetersizlikleri gibi nedenlerle ağırlıklı olarak modelleme ve benzetimlerle analiz edilmektedir. Ancak, doğrusal olmayan olayların karmaşık doğasından gelen zorluklar nedeniyle, modelleme ve programlamayı basitleştirmek için literatürdeki mevcut eğilim, doğrusal olmayan olayların tekli ya da ikili, nadiren de üçlü etkilerini göz önüne alarak analizler yapmaktır. Bazen de birleşik etki altındaki performans analizini gerçekleştirebilmek için, farklı doğrusal olmayan olayların tekli etkilerinden elde edilen sonuçlar toplanabilmektedir. Bu doktora çalışmasında, Song (1998) ve Song vd. (1999) çalışmalarında analitik ve deneysel olarak ortaya konan, SPM ve XPM'nin FWM üzerindeki etkisini belirten, modifiye faz uyumsuzluk faktöründen yararlanarak, literatürde ilk defa olarak, tek segmentli DWDM sistemlerin performansı SPM+XPM+FWM birleşik üçlü etkisi altında ve çok segmentli DWDM sistemlerin performansı SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü etkisi altında analiz edilmiştir.
- Yapılan çalışmanın önemini vurgulamak amacıyla, tek segmentli DWDM sistemlerde SPM+XPM+FWM birleşik üçlü etkisi altında yapılan performans analizleri, yalnız FWM etkisi altında yapılan performans analizleriyle; çok segmentli DWDM sistemlerde birleşik SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü birleşik beşli etkisi altında yapılan performans analizleri, FWM+SRS+ASE gürültüsü birleşik üçlü etkisi altında yapılan performans analizleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar

sonucunda, tek segmentli sistemlerin performans analizi yapılırken SPM+XPM+FWM birleşik üçlü etkisinin mutlaka göz önünde bulundurulması gereken sistem konfigürasyonları ile çok segmentli sistemlerin performans analizi yapılırken SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü birleşik beşli etkisinin mutlaka göz önünde bulundurulması gereken sistem konfigürasyonları belirlenmiştir. Ayrıca, tek segmentli sistemlerde SPM+XPM+FWM üçlü etkisi yerine yalnız FWM etkisinin ve çok segmentli sistemlerde SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü birleşik beşli etkisi yerine FWM+SRS+ASE gürültüsü birleşik üçlü etkisinin göz önüne alınabileceği sistem konfigürasyonları da belirlenmiştir.

- Yapılan benzetimler sonucunda, tek segmentli sistem analizinde, yalnız FWM etkisi altında ve çok segmentli sistemde FWM+SRS+ASE gürültüsü üçlü etkisi altında gerçekleştirilen performans analizlerine göre güvenilir iletişim için 23 dB olarak alınan SXR/OSNR sınırının üzerinde SXR/OSNR değerleri bulunurken; tek segmentli sistem analizinde SPM+XPM+FWM birleşik üçlü etkisi ve çok segmentli sistemde SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü birleşik beşli etkisi göz önüne alındığında, aynı kanal giriş gücü değerleri için, SXR/OSNR değerlerinin 23 dB sınırının altına düşebildiği gösterilmiştir. Dolayısıyla doktora tezi, tek segmentli sistem analizinde SPM+XPM+FWM birleşik üçlü etkisinin ve çok segmentli sistem analizinde SPM+XPM+FWM+SRS+ASE gürültüsü birleşik beşli etkisinin göz önüne alınmasının, güvenilir haberleşmenin sağlanabilmesi açısından önemini de vurgulamaktadır.

Bu tez, uzak mesafe DWDM sistemlerin tasarımı ve gerçeklemelerinde doğrusal olmayan olayların birleşik etkileri altında yüksek performans elde edebilmek için dikkat edilmesi gereken sistem parametreleri açısından fikir vermesinin yanı sıra, doğrusal olmayan etkilerin kompanzasyonu, performans optimizasyonu, mevcut uzak mesafe ve erişim ağlarında performans analizleri, 5G ve ötesi ağlarda kullanılabilecek fiber üzerinden radyo haberleşmesi (RoF) sistemleri konularında yapılacak çalışmalar için de referans değeri taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, var olan modelleme karmaşıklığını daha da arttırmamak için, kanal giriş gücü değerleri olarak modüleli işaret ortalama güçleri alınmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, doğrusal olmayan olayların birleşik etkileri altında farklı modülasyon tekniklerinin kullanıldığı DWDM sistemlerin karşılaştırmalı performans analizlerinin yapılması hedeflenmektedir. Bir diğer hedef, zaman-dalgaboyu bölmeli çoğullama (TWDM) gibi hibrit çoğullama yöntemlerinin kullanıldığı sistemlerin doğrusal olmayan etkiler altındaki performans analizlerini gerçekleştirmektir.



KAYNAKLAR

- Abbagari, S., Saliou, Y., Houwe, A., Akinyemi, L., Inc, M., & Bouetou, T. B. (2022). Modulated wave and modulation instability gain brought by the cross-phase modulation in birefringent fibers having anti-cubic nonlinearity. *Physics Letters A*, 442, 128191. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2022.128191>
- Abd, H. J., Al-Mansoori, M. H., Din, N. M., Abdullah, F., & Fadhil, H. A. (2014). Priority-based parameter optimization strategy for reducing the effects of four-wave mixing on WDM system. *Optik*, 125(1), 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.06.002>
- Agrawal, G. P. (2019). *Nonlinear Fiber Optics*, 6th Edn. Academic Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01168-8>
- Ahmad, H., Salleh, M. F., Zaini, M. K. A., Samion, M. Z., Ismail, M. F., & Reduan, S. A. (2023). Performance analysis of the four-wave mixing effect with various tapered fiber waist diameters. *Photonics*, 10(7), 745. <https://doi.org/10.3390/photonics10070745>
- Ali, F., Khan, Y., & Qureshi, S. S. (2022). Transmission performance comparison of 16*100 Gbps dense wavelength division multiplexed long haul optical networks at different advance modulation formats under the influence of nonlinear impairments. *Journal of Optical Communications*, 43(1), 63–72. <https://doi.org/10.1515/joc-2018-0185>
- Bhatia, R., Sharma, A. K., & Saxena, J. (2016). Improved analysis of four wave mixing with sub-plank higher-order dispersion parameters in optical communication systems. *Optik*, 127(20), 9474–9478. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.07.035>
- Binh, L. N. (2014). *Optical Fiber Communications Systems with Matlab and Simulink Models*, 2nd Edn. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York.
- Cheng, T. L., Chen, X. Y., Yan, X., Zhang, X. N., Wang, F., Suzuki, T., & Ohishi, Y. (2022). Mid-infrared stimulated Raman scattering and four-wave mixing in a tellurite microstructured optical fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 34(4), 239–242. <https://doi.org/10.1109/LPT.2022.3147768>
- Chomycz, B. (2009). *Planning Fiber Optics Networks*, 1st Edn. McGraw-Hill, New York.
- Das, N. R., & Sarkar, S. (2011). Probability of power depletion in SRS cross-talk and optimum detection threshold for minimum BER in a WDM receiver. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 47(4), 424–430. <https://doi.org/10.1109/JQE.2010.2090862>
- Durak, F. E. (2017). *FBG ile lazer kavite kontrolü yapılarak kazanç kenetlemeli ve kazanç spektrumu düzleştirilmiş L-band EDFA tasarımı*. Doktora Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye.
- Durak, F. E., Sadik, S. A., Boumediene, K., Khelladi, M., & Altuncu, A. (2020). Characterization of four wave mixing effect in dense wavelength division multiplexing systems. In *28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU'2020)*, 38–41. <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302452>
- Elsayed, E. E., Kakati, D., Singh, M., Grover, A., & Anand, G. (2022). Design and analysis of a dense wavelength-division multiplexed integrated PON-FSO system using modified OOK/DPPM modulation schemes over atmospheric turbulences. *Optical and Quantum Electronics*, 54(11), 768. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04142-4>

- Ferreira, R. M., Reis, J. D., Rossi, S. M., Amado, S. B., Guiomar, F. P., Shahpari, A., Oliveira, J. R. F., Pinto, A. N., & Teixeira, A. L. (2016). Coherent Nyquist UDWDM-PON with digital signal processing in real time. *Journal of Lightwave Technology*, 34(2), 826–833. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2493207>
- Filho, U. S. P., Ribeiro, M. R. N., Maioli, C. P., Freitas, M., & Fonseca, I. E. (2007). Cost functions for CAC/RWA in dynamic optical networks under GVD, SPM and XPM. *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, 6(1), 249–262.
- Guesmi, L., & Menif, M. (2016, April). Improved optical performance monitoring technique based on nonlinear optics for high-speed WDM Nyquist systems. In *Nonlinear Optics and its Applications IV*, 9894, 59–65, SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2227707>
- Guo, L., Huang, J., Chen, Y. X., Zhang, B. H., & Ji, M. B. (2022). Fiber-enhanced stimulated Raman scattering and sensitive detection of dilute solutions. *Biosensors*, 12(4), 243. <https://doi.org/10.3390/bios12040243>
- Hanumante, M. M., & Bhosale, S. J. (2022). Effect of stimulated Raman scattering (SRS) in WDM system using OptiSystem. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 9(12), 1088–1092.
- Harboe, P. B., da Silva, E., & Souza, J. R. (2008). Analysis of FWM penalties in DWDM systems based on G. 652, G. 653, and G. 655 optical fibers. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2(12), 2674–2680.
- Hiçdurmaz, B., Karlık, S. E., & Yılmaz, G. (2010). Analysis of SPM and XPM phenomena in optical fiber communication systems. In *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (ELECO'2010)*, 689–693.
- 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*, 124(19), 4064–4071. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.12.071>
- Huszaník, T., Turán, J., & Ovseník, Ľ. (2019). Mitigation of fiber nonlinear effects in 1.28 Tbps DQPSK modulated DWDM system. *Electronics*, 23(1), 3–10.
- Iizuka, K. (2019). Fiber optical communication. In: *Engineering Optics*, 365–417, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69251-7_13
- Irfan, M., Ali, F., Muhammad, F., Alwadie, A. S., Glowacz, A., Goldasz, I., Mielnik, R., Alkahtani, F. S., & Khan, H. (2021). An optimal framework for WDM systems using analytical characterization of refractive index-related nonlinear impairments *Electronics*, 10, 221. <https://doi.org/10.3390/electronics10030221>
- ITU-T. (2020). G.694.1: *Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid*. ITU. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I/en>
- Ivaniga, P., & Ivaniga, T. (2020). Mitigation of non-linear four-wave mixing phenomenon in a fully optical communication system. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(6), 2878–2885.
- Judy, A. F. (1997). Optimizing fiber dispersion for DWDM systems. In *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*, 272–273.

- Karfaa, Y. M., Ismail, M., Abbou, F. M., Shaari, S., & Majumder, S. P. (2008). Channel spacing effects on XPM crosstalk in WDM networks for various fiber types. In *6th National Conference on Telecommunication Technologies and 2nd Malaysia Conference on Photonics (NCTT'2008)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/NCTT.2008.4814224>
- Karlık, S. E. (2016). Analysis of the four-wave mixing impact on the most heavily affected channels of dense and ultra-dense wavelength division multiplexing systems using non-zero dispersion shifted fibers. *Optik*, 127(19), 7469–7486. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.077>
- Kartalopoulos, S. V. (2000). Introduction to DWDM Technology: *Data in a Rainbow*, 1st Edn. Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/9780470544990>
- Kassegne, D., Singh, S., Ouro-Djobo, S. S., & Mao, B. M. (2019). Influence of nonlinear effects on 6.4 Tb/s dual polarization quadrature phase shift keying modulated dense wavelength division multiplexed system. *International Journal of Communication Systems*, 32(12), e4021. <https://doi.org/10.1002/dac.4021>
- Kaur, G., Singh, M. L., & Patterh, M. S. (2009). Theoretical investigations to minimize bit error rate by optimizing system parameters in optical DWDM transmission systems at different data rates. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, 18(3), 501–519. <https://doi.org/10.1142/S0218863509004750>
- Kaur, G., Singh, M. L., & Patterh, M. S. (2010). Impact of fibre nonlinearities in optical DWDM transmission systems at different data rates. *Optik*, 121(23), 2166–2171. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2009.11.001>
- Keiser, G. (2010). *Optical Fiber Communications*, 4th Edn. McGraw-Hill, New York.
- Kikuchi, N., Sekine, K., & Sasaki, S. (1997). Analysis of cross-phase modulation (XPM) effect on WDM transmission performance. *Electronics Letters*, 33(8), 653–654.
- Kılınçarslan, K., & Karlık, S. E. (2021). Comparison of single FWM impact with combined impact of FWM and SRS on the performance of long-haul DWDM/UDWDM communication systems using SSMFs. In *13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'2021)*, 475-479. <https://doi.org/10.23919/ELECO54474.2021.9677742>
- Kılınçarslan, K., & Karlık, S. E. (2023). Combined impact of SRS, FWM and ASE noise in UDWDM/DWDM long-haul communication systems using EDFAs. *Optics and Laser Technology*, 157, 108695. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108695>
- Leibrich, J., & Rosenkranz, W. (2003). Efficient numerical simulation of multichannel WDM transmission systems limited by XPM. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(3), 395–397. <https://doi.org/10.1109/LPT.2003.807901>
- Lotsmanov, A., Neskorniuk, V., Sidelnikov, G., & Plotnikov, P. (2019). Estimation of Kerr nonlinearity distortion in coherent dense wavelength-division multiplexing fiber-optic communication lines. In *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, (BlackSeaCom'2019)*. <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2019.8812821>

- Lovkesh, & Kaur, R. (2021). Estimation of four wave mixing effect in pre-, post- and in-line configuration of EDFA using advanced modulation formats for 1.28 Tbps WDM system. *Optical and Quantum Electronics*, 53(4), 194. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02833-y>
- McGregor, H., Wang, W., Short, M., & Zeng, H. (2016). Clinical utility of Raman spectroscopy: current applications and ongoing developments. *Advanced Health Care Technologies*, 2, 13-29. <https://doi.org/10.2147/AHCT.S96486>
- Moscoso-Martir, A., Koch, J., Schulz, O., Müller, J., Mashayekh, A. T., Das, A. D., Merget, F., Pachnicke, S., & Witzens, J. (2022). Silicon photonic integrated circuits for soliton based long haul optical communication. *Journal of Lightwave Technology*, 40(10), 3210–3222. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3170250>
- Mousa, M. I., Cansevera, G., & Abd, T. H. (2020). Design and implementation DWDM toward terabit for long-haul transmission system. *International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA'2020)*. <https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152885>
- Muthuraman, V., & Sivanantharaja. (2011). Analysis of stimulated Raman scattering on DWDM system. In *AIP Conference Proceedings*, 1391(1), 400–402.
- Nain, H., Jadon, U., & Mishra, V. (2016). Performance investigation of Kerr effects on to WDM fiber optical networks. In *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology (RTEICT'2016)* 2018–2022. <https://doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7808193>
- Norimatsu, S., & Akai, S. (2007). Statistical evaluation of transmission performance degradation originating with cross-phase modulation. *Electronics and Communications in Japan Part I: Communications*, 90(1), 58–67. <https://doi.org/10.1002/ecja.20306>
- Paradiso, L., Boffi, P., Marazzi, L., Vecchia, N. D., Artiglia, M., & Martinelli, M. (2005). Experimental XPM, SPM, FWM penalty evaluation in very dense WDM optical systems. In *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'2005)*, 1339-1341. <https://doi.org/10.1109/CLEO.2005.202118>
- Paradiso, L., Boffi, P., Marazzi, L., Vecchia, N. D., Artiglia, M., & Martinelli, M. (2005). Separate evaluation of nonlinearity-due Q penalties in long-haul very dense WDM optical systems. In: Kitayama, KI., Masetti-Placci, F., Prati, G. (eds) *Optical Networks and Technologies*, 164, 313-318, Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-23178-1_38
- Rajeev, & Kumar, C. (2022). Performance investigation of DQPSK modulated ultra dense WDM system for different pulse shapes under the effect of various transmission impairments. *Optical and Quantum Electronics*, 54(10), 632. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04020-z>
- Rajeev, & Kumar, C. (2024). Effect of various fiber nonlinearities on MADPSK modulated 450×100 Gb/s ultra-dense WDM system for long haul communication. *Journal of Optics-India*, 53(1), 558–573. <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01196-9>
- Rasheed, I., Abdullah, M., Mehmood, S., & Chaudhary, M. (2012). Analyzing the non-linear effects at various power levels and channel counts on the performance of DWDM based optical fiber communication system. In *International Conference on Emerging Technologies (ICET'2012)*. <https://doi.org/10.1109/ICET.2012.6375446>

- Róka, R., & Mokráň, M. (2022). Performance analysis and selection of wavelength channels based on the FWM effect influence in optical DWDM systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 118, 102558. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102558>
- Sabapathi, T., & Poovitha, R. (2019). Mitigation of nonlinearities in fiber optic DWDM system. *Optik*, 185, 657–664. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.073>
- Sabapathi, T., & Sundaravadivelu, S. (2011). Analysis of bottlenecks in DWDM fiber optic communication system. *Optik*, 122(16), 1453–1457. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.08.023>
- Sato, R., Ito, T., Magari, K., Endo, J., Ogawa, I., Inoue, Y., Kasahara, R., Tohmori, Y., Suzuki, Y., & Tohno, S. (2004). Tuning technique to optimize input power of a cross-phase modulation wavelength converter. *Journal of Lightwave Technology*, 22(8), 1883–1892. <https://doi.org/10.1109/JLT.2004.832434>
- Schneider, T. (2004). *Nonlinear Optics in Telecommunications*. Springer, New York.
- Secondini, M., & Forestieri, E. (2014). On XPM mitigation in WDM fiber-optic systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(22), 2252–2255. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2353217>
- Sharma, V., & Kaur, R. (2013). Implementation of DWDM system in the presence of four wave mixing (FWM) under the impact of channel spacing. *Optik*, 124(17), 3112–3114. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.09.049>
- Shirmohammad, M., Short, M. A., & Zeng, H. (2023). A new gas analysis method based on single-beam excitation stimulated Raman scattering in hollow core photonic crystal fiber enhanced Raman spectroscopy. *Bioengineering*, 10(10), 1161. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10101161>
- Singh, G., Singh, M. L., Kaur, H., & Godara, S. K. (2023). Four-wave mixing estimation method for an optical communication system. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 104(1), 175–180. <https://doi.org/10.1007/s40031-022-00847-y>
- Singh, M. L., & Hudiara, I. S. (2000). Linear approximation method for minimising SRS effect in all-optical WDM fiber optic systems. *IETE Journal of Research*, 46(3), 129–132. <https://doi.org/10.1080/03772063.2000.11416147>
- Singh, M. L., & Hudiara, I. S. (2004). A piece wise linear solution for nonlinear SRS effect in DWDM fiber optic communication systems. *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, 3(4), 29–38.
- Singh, S., Kumar, S., Gupta, L., & Gupta, D. (2007). Reduction of self phase modulation in fiber for WDM system. In *Proc. SPIE 6775, Active and Passive Optical Components for Communications VII*, 67750U. <https://doi.org/10.1117/12.735516>
- Song, S. (1998). *The numerical simulation of optical fiber communication systems*. PhD. Dissertation, University of Kansas, Kansas, USA.
- Song, S., Allen, C. T., Demarest, K. R., & Hui, R. (1999). Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 17(11), 2285–2290. <https://doi.org/10.1109/50.803021>
- Souza, J. R., & Harboe, P. B. (2011). FWM: Effect of channel allocation with constant bandwidth, and ultra-fine grids in DWDM systems. *IEEE Latin America Transactions*, 9(1), 32–39. <https://doi.org/10.1109/TLA.2011.5876417>

- Sugumaran, S., Reddy, P. V. N., Reddy, S. V. S. M., & Arulmozhivarman, P. (2012). Design of WDM optical networks for the analysis of cross phase modulation and self phase modulation. In Krishna, P. V., Babu, M. R., Ariwa, E. (eds) *Global Trends in Computing and Communication Systems*, 370-379, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29219-4_43
- Suresh, H. R., Vinitha, V., Girinath, N., & Karthick, R. (2021). Suppression of four wave mixing effect in DWDM system. *Materials Today: Proceedings*, 45, 2707–2712. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.545>
- Tan, S. C., & Abbou, F. M. (2012). The effect of stimulated Raman scattering (SRS) in routing and wavelength assignment (RWA) in WDM mesh and ring topologies. *Optik*, 123(21), 1934–1937. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.09.023>
- Udalcovs, A., Bobrovs, V., & Porins, J. (2012). Evaluation of SPM-induced optical signal distortions in ultra-dense mixed-WDM system. In *1st International Conference on Future Generation Communication Technologies (FGCT'2012)*, 180–184. <https://doi.org/10.1109/FGCT.2012.6476590>
- Wang, J. J., Du, Y. T., Liang, C. H., Li, Z., & Fang, J. (2021). Performance evaluation of highly nonlinear fiber (HNLF) based optical phase conjugation (OPC) in long haul transmission of 640 Gbps 16-QAM CO-OFDM. *Photonics*, 8(2), 45. <https://doi.org/10.3390/photonics8020045>
- Wegener, L. G. L., Povinelli, M. L., Green, A. G., Mitra, P. P., Stark, J. B., & Littlewood, P. B. (2004). The effect of propagation nonlinearities on the information capacity of WDM optical fiber systems: Cross-phase modulation and four-wave mixing. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 189(1–2), 81–99. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2003.09.038>
- Wu, M. C., & Way, W. I. (2004). Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems. *Journal of Lightwave Technology*, 22(6), 1483-1498. <https://doi.org/10.1109/JLT.2004.829222>
- Xu, B., & Brandt-Pearce, M. (2003). Comparison of FWM- and XPM-induced crosstalk using the Volterra series transfer function method. *Journal of Lightwave Technology*, 21(1), 40–53. <https://doi.org/10.1109/JLT.2002.806360>
- Yamada, K., Nakamura, K., & Horikawa, H. (1997). Design of double-pass electroabsorption modulators with low-voltage, high-speed properties for 40 Gb/s modulation. *Journal of Lightwave Technology*, 15(12), 2287–2293. <https://doi.org/10.1109/50.643558>
- Yang, H., Niu, Z. K., Zhao, H. C., Xiao, S. L., Hu, W. S., & Yi, L. L. (2022). Fast and accurate waveform modeling of long-haul multi-channel optical fiber transmission using a hybrid model-data driven scheme. *Journal of Lightwave Technology*, 40(14), 4571–4580. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3168698>
- Yongpeng, Z., & Peida, Y. (2002). Influence of XPM effect on IP traffic-based WDM optical packet-switching networks. *Microwave and Optical Technology Letters*, 32(3), 170–174. <https://doi.org/10.1002/mop.10121>
- Zhang, Y. N., Wu, J. Y., Yang, Y. Y., Qu, Y., Dirani, H. E, Crochemore, R., Sciancalepore, C., Demongodin, P., Grillet, C., Monat, C., Jia, B. H., & Moss, D. J. (2023). Enhanced self-phase modulation in silicon nitride waveguides integrated with 2D graphene oxide films. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 29(1), 5100413. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2022.3177385>

Zhu, N., Wang, Y. X., Xu, Z., Chen, J. L., Qian, H. L., & Chen, Y. S. (2014). Crosstalk in high-speed WDM produced by refractive index fluctuation nonlinear effect. *Optik*, 125(17), 4850–4854. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.04.043>

