EDFA KUVVETLENDİRİCİLİ DWDM/UDWDM UZAK MESAFE HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE SRS, FWM VE ASE GÜRÜLTÜSÜ BİRLEŞİK ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Kübra KILINÇARSLAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EDFA KUVVETLENDİRİCİLİ DWDM/UDWDM UZAK MESAFE HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE SRS , FWM VE ASE GÜRÜLTÜSÜ BİRLEŞİK ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Kübra KILINÇARSLAN
0000-0003-4124-9921

Doç. Dr. Sait Eser KARLIK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EDFA KUVVETLENDİRİCİLİ DWDM/UDWDM UZAK MESAFE HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE SRS, FWM VE ASE GÜRÜLTÜSÜ BİRLEŞİK ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Kübra KILINÇARSLAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricili (EDFA) yoğun/aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM/UDWDM) uzak mesafe haberleşme sistemlerinin, modern optik haberleşme sistemlerindeki önemi artmaktadır. Bu sistemler, tasarımda esneklik ve uzak mesafelerde iletim olanağı sağlamaktadır. EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistemler, yüksek kazanç ve düşük gürültü ile optik işareti elektro-optik dönüşümler olmadan kuvvetlendirerek uzak mesafelere iletir. Giriş gücü, kanallar arası boşluk değerleri, kuvvetlendirici sayısı ve aralıkları, toplam iletim uzunluğu gibi sistem parametreleri, optik fiberde oluşan doğrusal olmayan olayları etkileyerek sistem performansını sınırlamaktadır. Optik fiberde meydana gelen doğrusal olmayan olaylar; öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM), dört dalga karışımı (FWM), uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve uyarılmış Brillouin saçılmasıdır (SBS). FWM ve SRS, fiber kuvvetlendiricilerdeki kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım (ASE) gürültüsü ile birlikte, sistem performansını sınırlayan en önemli doğrusal olmayan etkilerdir.

Bu tezde tek segmentli (single span) DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarında hem yalın FWM etkisi hem de FWM ve SRS birleşik etkisi altında işaret çapraz karışım (SXR) değişimleri; çok segmentli (multi span) DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altında optik işaret gürültü oranı (OSNR) değişimleri incelenmiştir. Böylece FWM, SRS ve ASE gürültüsünün uzak mesafe optik haberleşme sistemleri üzerindeki birleşik etkisi analiz edilmiştir. Benzetim sonuçları, tek segmentli DWDM/UDWDM sistemlerde, yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altında elde edilen SXR değişimleri karşılaştırıldığında, FWM'nin SRS'e kıyasla daha baskın bir etkiye neden olduğunu; kanallar arası boşluk değerlerinin dar olduğu çok segmentli UDWDM sistemlerde, FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altında elde edilen OSNR değişimlerinde, FWM gücünün artışı ve optik filtre bantgenişliğinin dar olmasına bağlı olarak, FWM'nin SRS ve ASE'e kıyasla daha baskın bir etkiye neden olduğunu; kanallar arası boşlukların nispeten geniş olduğu çok segmentli DWDM sistemlerde ise, artan optik filtre bantgenişliği ve azalan kanallar arası boşluk değerlerine bağlı olarak, ASE'nin FWM ve SRS'e kıyasla daha baskın bir etkiye neden olduğunu göstermektedir. Sonuçlar hem tek segmentli sistemlerin merkez kanallarında yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisini, hem de EDFA kullanan çok segmentli sistemlerin merkez kanallarında FWM, SRS, ASE birleşik etkisini karşılaştırmakta ve güvenilir uzak mesafe DWDM/UDWDM sistemlerin tasarımı ve gerçeklenmesi için önemli fikirler vermektedir.

Anahtar Kelimeler: FWM, SRS, ASE, EDFA, DWDM, UDWDM, uzak mesafe haberleşme sistemi, optik fiber
2022, xxiii + 110 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

MODELING AND SIMULATION OF THE COMBINED EFFECT OF SRS, FWM AND ASE NOISE IN DWDM/UDWDM LONG HAUL COMMUNICATION SYSTEMS USING EDFAs

Kübra KILINCARSLAN

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sait Eser KARLIK

The importance of dense/ultra dense wavelength division multiplexing (DWDM/UDWDM) multi-span long haul communication systems using EDFAs in modern optical fiber communication systems increases. Those systems enable flexible optical network designs and transmission over long distances. DWDM/UDWDM multi-span systems using EDFAs transmit the optical signal by amplifing the optical signal without any need to opto-electronic/electro-optical conversions with high gain and low noise. System parameters such as input power, channel spacing, number and spacing of amplifiers, total transmission length limit the system performance by affecting nonlinear phenomena in the optical fiber. These nonlinear phenomena can be described as self-phase modulation (SPM), cross phase modulation (XPM), four wave mixing (FWM), stimulated Raman scattering (SRS), stimulated Brillouin scattering (SBS) but FWM and SRS are the major nonlinear effects that limit the system performance as well as the amplified spontaneous emission (ASE) noise occuring in EDFAs.

In this thesis, SXR variations both under the single FWM impact and under the combined impact of FWM and SRS at central channels of single span DWDM/UDWDM communication systems; OSNR variations under the combined impact of SRS, FWM and ASE noises at central channels of multi span DWDM/UDWDM communication systems have been analyzed. Simulation results obtained for SXR variations under the single impact of FWM and combined impact of FWM and SRS at single-span DWDM/UDWDM systems show that FWM becomes the more dominant effect with respect to SRS. OSNR variations obtained under the combined impact of SRS, FWM and ASE noise at multi-span UDWDM systems with narrow channel spacing values show that due to the increase in FWM crosstalk power and the decrease in optical filter bandwidth, FWM power becomes the more dominant effect with respect to SRS and ASE noise. OSNR variations obtained under the combined impact of SRS, FWM and ASE noise at multi-span DWDM systems with broad channel spacing values show that due to the increasing optical filter bandwidth and decreasing channel spacing values, ASE noise becomes the more dominant effect with respect to FWM and SRS. Simulation results compare both single impact of FWM with combined impact of FWM and SRS at central channels of single-span systems and combined impact of SRS, FWM and ASE noise at central channes of multi-span systems. Therefore, this thesis gives important clues for design and implementation of reliable long-haul DWDM/UDWDM systems.

Keywords:FWM, SRS, ASE, EDFA, DWDM/UDWDM, long haul communication systems, optical fiber

2022, xxiii + 110 pages.

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca bilimsel bilgi birikimi, değerli düşünceleri ve yönlendirmeleriyle her zaman sabırla yol gösteren ve çalışmamın her aşamasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Sait Eser KARLIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Sevgi ve güvenlerini her zaman yanımda hissettiğim, sabırla ve büyük emeklerle beni bugünlere ulaştıran başta annem Şengül KILINÇARSLAN ve babam Ali KILINÇARSLAN olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana emek veren tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Kübra KILINÇARSLAN
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....iii
ABSTRACT....iv
TEŞEKKÜR....v
İÇİNDEKİLER....ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....vii
ŞEKİLLER DİZİNİ....ix
ÇİZELGELER DİZİNİ....xvii
1. GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....3
2.1. Kaynak Araştırması....3
2.2. Yoğun /Aşırı Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (DWDM/UDWDM)....8
2.3. Optik Kuvvetlendiciler....9
2.3.1. Yarıiletken Optik Kuvvetlendiriciler (SOA)....9
2.3.2. Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici (EDFA)....10
2.3.2.1. EDFA Mimarisi....11
2.3.2.2. EDFA'nın Kuvvetlendirme Mekanizması....12
2.3.2.3. EDFA Kazancı ve Güç Dönüşüm Verimliliği....14
2.3.2.4. EDFA Oran Denklemleri....16
2.3.2.5.Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım (ASE) Gürültüsü....19
2.3.3. Raman Fiber Kuvvetlendiriciler....20
2.4. Optik Fiberlerde Doğrusal Olmayan Olaylar....22
2.4.1. Doğrusal Olmayan Kırılma İndisi Etkileri (Kerr Etkisi)....22
2.4.1.1. Öz Faz Modülasyonu (SPM)....23
2.4.1.2. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)....23
2.4.1.3. Dört Dalga Karışımı (FWM)....24
2.4.2. Elastik Olmayan Saçılma Etkileri....28
2.4.2.1. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS)....29
2.4.2.2. Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS)....32
2.5. EDFA Kullanılan Çok Segmentli DWDM/UDWDM Sistemlerde FWM, SRS ve ASE Gürültülerinin Birleşik Etkisi....33
2.6. Tek Segmentli ve EDFA Kullanılan Çok Segmentli DWDM/UDWDM Haberleşme Sistemleri Blok Diyagramları....34
3. MATERYAL ve YÖNTEM....36
3.1. Benzetim Modeli....36
3.2. SXR/OSNR-Giriş Gücü Benzetim Koşulları....39
3.3. SXR/OSNR-Kanallar Arası Boşluk Değeri Benzetim Koşulları....39
3.4. SXR/OSNR-Kanal Uzunluğu Benzetim Koşulları....40
3.5. OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Koşulları....40
4. BULGULAR ve TARTIŞMA....42
4.1. SXR/OSNR-Kanal Giriş Gücü Benzetim Sonuçları....42
4.2. SXR/OSNR-Kanallar Arası Boşluk Değeri Benzetim Sonuçları....62
4.3. SXR/OSNR-Kanal Uzunluğu Benzetim Sonuçları....71
4.4. SXR/OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Sonuçları....93
5. SONUÇ....101
ÖZGEÇMİŞ .... **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$\emptyset_{NL}$	Doğrusal olmayan kayma
T_1'	Üçüncü seviyenin iyon geçiş zamanı
Δf	Kanallar arası boşluk
$\Delta\omega_{SPM}$	SPM etkisiyle oluşan spektral genişleme
A_{eff}	Etkin alan
c	Işık hızı
D_c	Kromatik dispersiyon katsayısı
d_{ijk}	Dejenerasyon faktörü
E_a	Anti-Stokes foton enerjisi
E_p	Pompa foton enerjisi
E_s	Stokes foton enerjisi
f_a	Anti-Stokes foton frekansı
f_{ijk}	FWM işaretinin frekansı
f_p	Pompa foton enerjisi
f_s	Stokes foton enerjisi
G	Kuvvetlendirici kazancı
G_{max}	Maksimum kuvvetlendirici kazancı
g_{Rmax}	Maksimum Raman kazanç katsayısı
I	Optik yoğunluk
L	Fiber uzunluğu
l	Segment uzunluğu
Leff	Etkin uzunluk
m	EDFA sayısı
M	FWM ürün sayısı
N	Kanal sayısı
n	Kırılma indisi
n_0	Doğrusal kırılma indisi
n_{sp}	Popülasyon ters birikimi faktörü
N_1	Birinci seviyenin atom yoğunluğu
n_2	Doğrusal olmayan kırılma indisi
N_2	İkinci seviyenin atom yoğunluğu
N_3	Üçüncü seviyenin atom yoğunluğu
n_{ijk}	FWM verimliliği
P	Optik güç
P_{ASE}	ASE gürültü gücü
$P_{Çıkış}$	Çıkış gücü
P_{FWM}	FWM işaretinin gücü
$P_{giriş}$	Giriş gücü
$P_{girişmax}$	Maksimum giriş gücü
$P_{girişmin}$	Minimum giriş gücü
$P_{p,in}$	Pompa giriş gücü
$P_{s,in}$	İşaret giriş gücü

$P_{s,out}$	İşaret çıkış gücü
P_{SRS}	SRS'e bağlı olarak değişen (modifiye) güç
R_{ab}	Pompa fotonun a seviyesinden b seviyesine geçiş oranı
S	Dispersiyon eğimi
T_1	İkinci seviyenin iyon geçiş zamanı
W_{ab}	İşaret fotonun a seviyesinden b seviyesine geçiş oranı
α	Zayıflama katsayısı
γ	Doğrusalsızlık katsayısı
ΔB_{ijk}	Faz uyumsuzluk faktörü
λ	Dalgaboyu
λ_p	Pompa dalgaboyu
λs	İşaret dalgaboyu
ρ	Nadir toprak elementi konsantrasyonu
ρ_0	Katkı iyonlarının toplam yoğunluğu
σ_e	İşaret emisyon kesiti
Γ_p	Pompa için mod örtüşme faktörü
Γ_s	İşaret için mod örtüşme faktörü

Kısaltmalar	**Açıklama**
ASE	Amplified Spontaneous Emission (Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım)
BER	Bit Error Rate (Bit Hata Oranı)
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	International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector (Uluslararası Haberleşme Birliği Haberleşme Standartlaştırma Sektörü)
NZDSF	Non-Zero Dispersion Shifted Fibers (Sıfır Olmayan Dispersiyonu Kaydırmalı Fiber)
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio (Optik İşaret Gürültü Oranı)
PCE	Power Conversion Efficiency (Güç Dönüşüm Verimliliği)
QCE	Quantum Conversion Efficiency (Kuantum Dönüşüm Verimliliği)
SBS	Stimulated Brillouin Scattering (Uyarılmış Brillouin Saçılması)
SNR	Signal to Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SOA	Semiconductor Optical Amplifier (Yarıiletken Optik Kuvvetlendirici)
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 Çapraz Karışım 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.	N kanallı WDM haberleşme sistemi blok diyagramı……	8
Şekil 2.2.	SOA şematik diyagramı (Connely 2002)……..	10
Şekil 2.3.	Optik iletimde son kuvvetlendirici, hatiçi kuvvetlendirici, ön kuvvetlendirici olarak EDFA kullanımı……	11
Şekil 2.4.	EDFA'larda üç farklı pompalama konfigürasyonu a) eş yönlü pompalama b) ters yönlü pompalama c) çift yönlü pompalama (Keiser2000)……...	12
Şekil 2.5.	Silikadaki Er^{+3} iyonlarının enerji diyagramı ve geçişleri (Keiser 2000)……..	13
Şekil 2.6.	ASE fotonları gösterimi (Binh 2014)……	19
Şekil 2.7.	ASE gürültü spektrumu (Binh 2014)…….	19
Şekil 2.8.	İleri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendirici (Agrawal 2002)……..	21
Şekil 2.9.	Raman kuvvetlendirme sistemi kurulumu (Keiser 2000)……..	21
Şekil 2.10.	Dalgaboyu aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin dalgaboyları (Schneider 2004)……	25
Şekil 2.11.	Frekans aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin frekansları (Schneider 2004)……...	25
Şekil 2.12.	Pompa, Stokes ve anti-Stokes fotonların frekansları (Schneider 2004)……..	29
Şekil 2.13.	Stokes ve anti-Stokes fotonun enerji seviyeleri ve saçılımın şematik gösterimi (Premaratne ve Agrawal 2011)…….	30
Şekil 2.14.	Standart tek modlu fiberde uyarılmış Brillouin saçılması……..	32
Şekil 2.15.	Tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemi blok diyagramı……	34
Şekil 2.16.	EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemi blok diyagramı……...	35
Şekil 4.1.	Δf=3,125 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri……	43
Şekil 4.2.	Δf=6,25 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri……	43
Şekil 4.3.	Δf=12,5 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri……	44

Şekil 4.4. Δf=25 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 44
Şekil 4.5. Δf=50 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 45
Şekil 4.6. Δf=100 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…….. 45
Şekil 4.7. Δf=3,125 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 46
Şekil 4.8. Δf=6,25 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 46
Şekil 4.9. Δf=12,5 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 47
Şekil 4.10. Δf=25 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…….. 47
Şekil 4.11. Δf=50 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…….. 48
Şekil 4.12. Δf=100 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 48

Şekil 4.13. Δf=3,125 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 49
Şekil 4.14. Δf=6,25 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 49
Şekil 4.15. Δf=12,5 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 50
Şekil 4.16. Δf=25 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…….. 50
Şekil 4.17. Δf=50 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…….. 51
Şekil 4.18. Δf=100 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 51
Şekil 4.19. Δf=3,125 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 52
Şekil 4.20. Δf=6,25 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 52
Şekil 4.21. Δf=12,5 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 53

Şekil 4.22. Δf=25 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…….. 53
Şekil 4.23. Δf=50 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 54
Şekil 4.24. Δf=100 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri…… 54
Şekil 4.25. Δf < 12,5 GHz için 7-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri……. 63
Şekil 4.26. $12{,}5 \leq \Delta f \leq 100$ GHz için 7-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri…….. 63
Şekil 4.27. Δf < 12,5 GHz için 15-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri…….. 64
Şekil 4.28. $12{,}5 \leq \Delta f \leq 100$ GHz için 15-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri…….. 64
Şekil 4.29. Δf < 12,5 GHz için 31-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri…….. 65
Şekil 4.30. $12{,}5 \leq \Delta f \leq 100$ GHz için 31-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri……. 65

Şekil 4.31. $\Delta f < 12{,}5$ GHz için 63-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri……. 66
Şekil 4.32. $12{,}5 \leq \Delta f \leq 100$ GHz için 63-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri…… 66
Şekil 4.33. Δf=3,125 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri……. 72
Şekil 4.34. Δf=6,25 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri……. 72
Şekil 4.35. Δf=12,5 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 73
Şekil 4.36. Δf =25 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 73
Şekil 4.37. Δf =50 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 74
Şekil 4.38. Δf=100 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 74
Şekil 4.39. Δf=3,125 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 75

Şekil 4.40. Δf=6,25 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 75
Şekil 4.41. Δf=12,5 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 76
Şekil 4.42. Δf=25 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri……..... 76
Şekil 4.43. Δf=50 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 77
Şekil 4.44. Δf=100 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 77
Şekil 4.45. Δf=3,125 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 78
Şekil 4.46. Δf=6,25 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 78
Şekil 4.47. Δf=12,5 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…… 79
Şekil 4.48. Δf=25 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri……. 79

Şekil 4.49. Δf=50 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 80
Şekil 4.50. Δf=100 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 80
Şekil 4.51. Δf=3,125 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 81
Şekil 4.52. Δf=6,25 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 81
Şekil 4.53. Δf=12,5 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…… 82
Şekil 4.54. Δf=25 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 82
Şekil 4.55. Δf=50 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 83
Şekil 4.56. Δf=100 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri…….. 83
Şekil 4.57. Δf =3,125 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi…….. 94

Şekil 4.58. Δf =6,25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi……. 94
Şekil 4.59. Δf =12,5 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi……. 95
Şekil 4.60. Δf =25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi…….. 95
Şekil 4.61. Δf =50 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi…….. 96
Şekil 4.62. Δf =100 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi…….. 96

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Optik fiberde doğrusal olmayan olaylar (Keiser 2000)……	22
Çizelge 3.1.	1550 nm çalışma dalgaboyu aralığında SSMF parametreleri……	36
Çizelge 3.2.	7-kanallı optik fiberli haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri……...	37
Çizelge 3.3.	15-kanallı optik fiberli haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri……...	37
Çizelge 3.4.	31-kanallı optik fiberli haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri……...	38
Çizelge 4.1.	7-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri……	55
Çizelge 4.2.	7-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri……	55
Çizelge 4.3.	15-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri……	56
Çizelge 4.4.	15-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri……	56
Çizelge 4.5.	31-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri……	57
Çizelge 4.6.	31-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri……	57

Çizelge 4.7. 63-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri…… 58
Çizelge 4.8. 63-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW - 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri…… 58
Çizelge 4.9. 7- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 67
Çizelge 4.10. 7- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 67
Çizelge 4.11. 15- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 67
Çizelge 4.12. 15- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 68
Çizelge 4.13. 31- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 68
Çizelge 4.14. 31- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 68
Çizelge 4.15. 63- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 69
Çizelge 4.16. 63- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri…… 69

Çizelge 4.17. 7-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 84
Çizelge 4.18. 7-kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 85
Çizelge 4.19. 15-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 86
Çizelge 4.20. 15-kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 87
Çizelge 4.21. 31-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 88
Çizelge 4.22. 31-kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 89
Çizelge 4.23. 63-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 90

Çizelge 4.24. 63-kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki 63-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri……. 91
Çizelge 4.25. Δf =3,125 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri…….. 97
Çizelge 4.26. Δf =6,25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri……. 97
Çizelge 4.27. Δf =12,5 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri…… 97
Çizelge 4.28. Δf =25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri……. 97
Çizelge 4.29. Δf =50 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri…… 98
Çizelge 4.30. Δf =100 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri…… 98

1. GİRİŞ

Günümüzde optik fiberli haberleşme sistemleri yüksek bantgenişliğine sahip olması, elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi, zayıflamanın düşük olması, etkin maliyetli ve uzun ömürlü olması, uzak mesafelerde iletim yapabilmesi özellikleri ile her geçen gün artan kullanıcı taleplerini karşılayan bir teknolojidir.

Erbiyum katkılı optik fiberli kuvvetlendirici (EDFA) kullanılan çok segmentli yoğun/aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM/UDWDM) uzak mesafe haberleşme sistemleri, optik fiber iletim ortamında zayıflayan işaretleri, opto-elektronik ve elektro-optik dönüşümlere gerek kalmadan, doğrudan optik olarak kuvvetlendirerek uzak mesafelere iletim olanağı sağlamaktadır. Farklı dalgaboylarında bulunan n tane iletim kanalı, DWDM/UDWDM yöntemleriyle tek bir iletim fiberinde çoğullanarak hedefe aktarılmaktadır. Bu durum daha esnek ve daha yüksek kapasiteli tasarımlara olanak sağlamaktadır.

Bu tezde, EDFA kuvvetlendirici kullanılmayan tek segmentli (single-span) yoğun/aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM/UDWDM) uzak mesafe optik haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında oluşan yalın dört dalga karışımı (FWM) etkisi ile uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve FWM birleşik etkileri ve EDFA kuvvetlendirici kulanılan çok segmentli (multi-span) DWDM/UDWDM uzak mesafe optik haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında oluşan FWM, SRS ve kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım (ASE) gürültülerinin birleşik etkisi farklı sistem parametreleri, kuvvetlendirici sayıları ve aralıklarında karşılaştırılarak, sistem performansları benzetimlerle analiz edilmiştir. Benzetimlerde G.652 standart tek modlu fiber parametreleri kullanılmıştır.

İkinci bölümdeki kaynak araştırmasında, optik fiberde meydana gelen SRS, FWM ve ASE gibi doğrusal olmayan etkilerin WDM tabanlı haberleşme sistemlerinin performansı üzerindeki etkilerini inceleyen literatürdeki çalışmalar verilmektedir. Yoğun/aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM/UDWDM) yöntemleri, optik kuvvetlendiriciler, yarıiletken optik kuvvetlendiriciler (SOA), erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA) ve EDFA'ların kuvvetlendirme mekanizması, mimarisi, güç dönüşüm verimliliği, oran denklemleri ve kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım (ASE)

gürültüsü, Raman fiber kuvevetlendiriciler açıklanmaktadır. Ayrıca optik fiberde meydana gelen doğrusal olmayan olaylar; öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM), dört dalga karışımı (FWM), uyarılmış Raman saçılması (SRS), uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) etkileri açıklanmıştır. Bu bölümde son olarak EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistemlerde FWM, SRS ve ASE gürültülerinin birleşik etkisi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde hem tek segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisini karşılaştırmak hem de EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE gürültülerinin birleşik etkisini farklı kuvvetlendirici sayılarında ve aralıklarında karşılaştırmak için gerekli optik fiber tasarım parametreleri, benzetim modelleri ve koşulları açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde tek segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisini karşılaştırmak için yapılan benzetimler ile EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında FWM, SRS ve ASE gürültülerinin birleşik etkisini farklı kuvvetlendirici sayılarında ve aralıklarında karşılaştırmak için yapılan benzetimler ve benzetim sonuçları verilerek yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Birçok araştırmacı tarafından WDM tabanlı optik fiber haberleşme sistemlerinde meydana gelen doğrusal olmayan olaylarla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Literatürde yer alan bazı çalışmalar şunlardır;

Kaur ve Singh, SRS, FWM ve ASE gürültülerinin birleşik etkisi dikkate alındığında toplam sistem gürültüsünde FWM'nin etkisini araştırmak için bir algoritma önermiştir. EDFA kullanımının toplam iletim uzunluğunu artırmasına rağmen ASE gürültüsüne neden olduğu ve FWM ve SRS'nin etkilerini ağırlaştırdığı belirtilmiştir. Kanallar arası boşluk değerinin artmasının, FWM'i azaltırken ASE gürültüsünü artırdığı belirtilmiştir. Sistemin toplam gürültüsünde FWM'nin baskın bir rol oynadığı ve orta kanallarda etkisinin arttığı vurgulanmıştır. WDM sistemde iletilen işaretin SNR değerinin maksimize edilmesi için FWM'nin azaltılması gerektiği ve bunun için eşit olmayan kanal aralıklarının kullanılması gerektiği vurgulanmıştır (Kaur ve Singh 2009).

A. Singh ve diğerleri, 8 kanallı DWDM haberleşme sisteminde dört dalga karışımı gürültü gücünü bastıran yeni yöntemler önermiştir. Eşit kanallar arası boşluk değeri ile alternatif polarizasyon, alternatif güç, alternatif gecikme, alternatif birleşme ve eşit olmayan kanallar arası boşluk değeri ile alternatif polarizasyon olmak üzere beş farklı FWM bastırma metodu önermiştir. Önerilen metodlar, eşit ve eşit olmayan kanallar arası boşluk değerine sahip sistemlerle karşılaştırılmıştır. Eşit olmayan kanallar arası boşluk değeriyle ortagonal polarizasyon metodu ile en düşük FWM gücü elde edilmiştir. Tüm yöntemlerde ise kromatik dispersiyon değeri arttıkça FWM gücünde eksponansiyel azalma görülmektedir (A. Singh ve diğerleri, 2009).

Kaur ve diğerleri (2010)'da, ASE gürültüsü varlığında SRS ve FWM'nin birleşik etkisi araştırılmıştır. Kanallar arası boşluk değeri, kuvvetlendirici aralığı ve WDM sistemin kanal sayıları ve iletim uzunluğunun değişen değerleri için sistem performansı SNR parametresi üzerinden incelenmiştir. SNR parametresi hesaplamalarında SRS etkisinin neden olduğu modifiye işaret gücü, işaret gücü olarak değerlendirilirken FWM ve

ASE'nin birleşik etkileri gürültü gücü olarak değerlendirilmiştir. SNR değerinin en yüksek olduğu tasarım koşulları belirtilmiştir (Kaur ve diğerleri, 2010).

Kaur ve diğerleri, FWM, SRS ve ASE birleşik etkisini dikkate alarak farklı sistem uzunluğu ve kuvvetlendirici aralığı değerlerinde SNR parametresi üzerinden sistem performansını incelemiştir. Yapılan araştırmada kuvvetlendirici aralığını belirleyen ana faktörlerin FWM ve ASE gürültüleri olduğu ve kuvvetlendirici aralığının 50 km olması durumunda en iyi SNR değerinin elde edildiği belirtilmiştir. Sistem uzunluğunun ve kuvvetlendirici aralığının farklı değerleri için eğri uydurma yöntemleriyle matematiksel eşitlikler elde edilerek DWDM sistem tasarımında kullanılan kompleks ifadeler sadeleştirilmiştir (Kaur ve diğerleri 2011).

Kaler ve Kaler, farklı kanallar arası boşluk değerlerinde çıkış spektrumu, göz açıklığı, BER ve Q faktörünü dikkate alarak FWM'nin sistem performansı üzerine etkilerini araştırmıştır. 6,25, 10, 20, 25, 75 GHz kanal boşluğu değerlerinde elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Kanal boşluğu değeri arttıkça Q faktörü artarken, göz açıklığı ve BER değeri azalmıştır. Yüksek kanallar arası boşluk değerlerinde minimum FWM gürültüsü ve düşük kanallar arası boşluk değerlerinde maksimum FWM gürültüsü elde edilmiştir (Kaler ve Kaler 2012).

Hiçdurmaz ve diğerleri, hat içi optik kuvvetlendirici içeren eşit kanal boşluğuna sahip WDM sistemlerin en şiddetli etkilenen kanallarında FWM ve ASE'nin birleşik etkisini azaltan bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde en düşük OSNR değerine sahip kanalların OSNR değerini yükseltmek için, her bir kanalın giriş gücü Diferansiyel Evrim Algoritması'yla optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen OSNR değerleriyle minimum optik giriş gücü için elde dilen OSNR değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar farklı kanal sayısına sahip WDM sistemlerde tekrarlanmıştır ve OSNR değerlerinde önemli artışlar elde edilmiştir (Hiçdurmaz ve diğerleri, 2013).

Sharma ve Kaur, tek aralıklı dispersiyon kompanzasyonlu 80 Gbps DWDM haberleşme sisteminde BER, Q faktörü ve alıcı gücünü dikkate alarak, FWM etkisinin sistem perfomansı üzerine etkilerini incelemiştir. Makalede 0,25 nm ve 0,27 nm eşit ve eşit olmayan kanal boşluğu değerlerinde elde edilen BER, Q faktörü ve alıcı gücü sonuçları

karşılaştırılmıştır. 0,27 nm ve 0,25 nm eşit kanallar arası boşluk değerine sahip sistemlerde BER değerleri karşılaştırılmış ve 0,25 nm kanallar arası boşluk değerinde daha yüksek BER değerleri elde edilmiştir. Kanallar arası boşluk değeri azaldıkça FWM gürültü gücünün arttığı vurgulanmıştır. Q faktörü ve alıcı gücü parametreleri eşit ve eşit olmayan kanallar arası boşluk değerleri için karşılaştırılmış ve eşit olmayan kanallar arası boşluk değerine sahip sistemlerde elde edilen değerlerin yüksek hızlı DWDM sistemler için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Sharma ve Kaur 2013).

S. Singh ve diğerleri, EDFA, SOA ve Raman kuvvetlendiricilerin kullanıldığı 16-, 32- ve 64- kanallı 10 Gbps WDM sistemlerde kromatik dispersiyon ve iletim uzunluğu değerlerinin değişimiyle BER, çıkış gücü ve Q faktörü parametrelerinin değişimini inceleyerek kuvvetlendiricilerin performanslarını karşılaştırmıştır. Kromatik disperiyon değeri 2 ps/(nm.km) olarak düşünüldüğünde ve düşük kanal sayısına sahip sistemlerde en iyi performansı SOA göstermiştir. Kromatik dispersiyon değeri 2-10 ps/(nm.km) aralığında artırıldığında ise EDFA, SOA'a göre daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca Raman kuvvetlendirici fiber doğrusalsızlık etkilerini azalttığı için L bandında yükseltme ve kazanç düzleştirme durumunda daha iyi sonuç göstermiştir (S. Singh ve diğerleri, 2013) .

Abd ve diğerleri, WDM haberleşme sistemlerinde FWM etkisini azaltmak için önceliğe dayalı parametre optimizasyon stratejisi önermiştir. Sistem performansı, tek öncelik parametresi (etkin alan) ve birleşik öncelik parametreleri (etkin alan, uzunluk, kanallar arası boşluk değeri, giriş gücü) dikkate alınarak BER terimiyle incelenmiştir. FWM etkisini bastırmak için optimizasyon parametrelerinin öncelik seçimi belirtilmiş ve FWM'i bastırmak için en etkili parametrelerin öncelik sırasının etkin alan, iletim uzunluğu, kanallar arası boşluk değeri ve giriş gücü olduğu belirtilmiştir. Karşılaştırmalar ayrıca standart tek modlu fiber (SSMF), dispersiyon kaydırmalı fiber (DSF), sıfır olmayan dispersiyonlu fiber (NZDF) ve sıfır olmayan dispersiyonu kaydırmalı fiber (NZDSF) olmak üzere dört farklı fiber tipinde yapılmıştır. FWM'i azaltmanın en etkin yöntemi SSMF kulanıldığında etkin alan, iletim uzunluğu, kanallar arası boşluk değeri artırılırken giriş gücünün azaltıldığı yöntemdir ve birleşik öncelik parametrelerinin tek öncelik parametrelerine göre daha iyi BER performansı gösterdiği vurgulanmıştır (Abd ve diğerleri, 2014).

Karlık, tek segmentli 9-, 11-, 13- ve 15- kanallı DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında FWM ürünlerinin etkisini analiz etmiştir. Giriş gücü, kanal boşluğu, fiber uzunluğu ve kanal dalgaboyu değişimlerine göre FWM gürültüsünün değişimleri benzetilmiş ve yorumlanmıştır. SSMF ve NZDSF kullanılan haberleşme sistemlerinde FWM gürültüsünden en yoğun etkilenen kanallar merkez kanallar olduğu için benzetimlerde merkez kanallara odaklanılmıştır. Makalede dört farklı (Teralight, LEAF, TrueWave-Reach, TrueWave-RS) NZDSF tipleri için karşılaştırmalar yapılmıştır. Makalede incelenen tüm NZDSF tiplerinde 1 mW giriş gücü değerinde 6,25 ve 12,5 GHz kanallar arası boşluk değerlerine sahip DWDM/UDWDM sistemlerde 23 dB SXR seviyesinin aşılmadığı vurgulanmıştır. Üretilen FWM gürültüsünün en yüksek ve en düşük değerde olduğu NZDSF tipi belirlenmiştir. En yüksek kromatik dispersiyon değerine sahip olan Teralight NZDSF'de FWM gürültüsü en düşük değerini alırken, TrueWave-RS'te ise en yüksek değerini almaktadır (Karlık 2016a) .

Karlık, 5-, 7-, 9- kanallı DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında FWM etkisini incelemiştir. Benzetimlerde kromatik dispersiyon, dispersiyon eğimi, doğrusalsızlık katsayısı ve zayıflama katsayısı gibi farklı tasarım parametrelerine sahip üç farklı standart tek modlu fiber (SSMF) kullanılmıştır. Kanallar arası boşluk değerlerinin eşit ve 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olduğu varsayılmıştır. Kanalların giriş güçleri eşit ve 1-40 mW aralığında değerlendirilmiştir. Kanal giriş gücü, kanallar arası boşluk değerleri ve fiber uzunluğuyla SXR değişimi benzetimlerle incelenmiştir. SXR-$P_{giriş}$ benzetimlerinde minimum 23 dB SXR şartının sağlandığı giriş gücü aralıkları belirtilmiştir. Ayrıca benzetimler kromatik dispersiyon, dispersiyon eğimi, doğrusalsızlık katsayısı ve zayıflama katsayısı gibi fiber parametrelerinin birleşik etkisini göstermektedir. En iyi SXR performansı en düşük doğrusalsızlık katsayısına sahip olan $SSMF_2$ için elde edilmiştir. SXR-Δf benzetimlerinde, daha dar kanallar arası boşluk değerlerinde bantgenişliği daha etkin kullanılmasına rağmen, SXR değerlerinde daha ciddi bozulmalar görülmüştür. SXR-fiber uzunluğu benzetimlerinde, kanallar arası boşluk değeri ve fiber uzunluğu arttıkça SXR'ın osilasyon davranışının arttığı vurgulanmıştır (Karlık 2016b).

N. Singh ve diğerleri, 16 kanallı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM) haberleşme sistemlerinde hibrit kuvvetlendiricilerin performanslarını çıkış gücü, Q faktör, BER ve kazanç düzlüğü parametreleriyle inceleyerek karşılaştırmıştır. Kanallar arası boşluk değeri sabit ve 25 GHz olarak değerlendirilmiştir. EDFA-EDFA, SOA-EDFA ve Raman-EDFA olmak üzere üç farklı hibrit kuvvetlendirici konfigürasyonları incelenmiştir. SOA-EDFA konfigürasyonu FWM'e en yatkın konfigürasyon iken, Raman-EDFA konfigürasyonu FWM'den en az etkilenen konfigürasyondur. Ayrıca iletim mesafesinin 20-140 km aralığında en optimal konfigürasyon Raman-EDFA konfigürasyonu iken, 150-200 km aralığında SOA-EDFA en iyi performansı göstermektedir (N. Singh ve diğerleri, 2019).

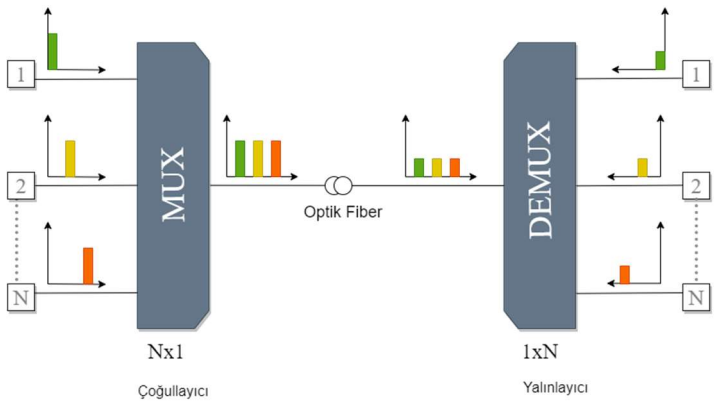
Lovhesh ve Kaur, 1,28 Tbps veri hızında son kuvvetlendirici, hatiçi kuvvetlendirici ve ön kuvvetlendirici olmak üzere üç farklı EDFA konfigürasyonuna sahip WDM haberleşme sistemlerinde FWM etkisini incelemiştir. Ayrıca ileri yönde ve geri yönde pompalanan EDFA konfigürasyonlarını da karşılaştırmıştır. 100 GHz ve 400 GHz kanallar arası boşluk değerine sahip WDM haberleşme sistemlerinde ileri ve geri yönde pompalanan üç farklı EDFA konfigürasyonuna ait göz diyagramları karşılaştırılmıştır ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerinde elde edilen göz diyagramı performansı 400 GHz'e göre daha düşüktür. Giriş gücünün -20 dBm ve 10 dBm aralığı için Q faktör değişimine ait benzetimler yapılmıştır ve bu benzetimlerde SPM, XPM ve FWM dikkate alındığında en iyi Q faktörü performansını hatiçi kuvvetlendirici konfigürasyonu göstermiştir. Giriş gücü değişimiyle FWM çapraz karışımı değişimi dikkate alındığında ileri yönde pompalanan son kuvvetlendirici konfigürasyonu en iyi performansı göstermiştir (Lovkesh ve Kaur 2021).

Literatürde incelenen yukarıdaki çalışmalardan yola çıkılarak, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarında elde edilen SXR/OSNR değişimlerinin analiz edilerek sistem performanslarının karşılaştırılması; tek segmentli ve çok segmentli sistemlerde değişen kanal giriş gücü, kanallar arası boşluk değerleri, toplam sistem uzunluğu gibi tasarım koşulları dikkate alındığında, baskın doğrusal olmayan olayın belirlenmesi; çok segmentli uzak mesafe DWDM/UDWDM sistemlerde, farklı sayılarda EDFA kullanımının ASE gürültüsüne ve

merkez kanallarda görülen OSNR değerlerine etkisinin karşılaştırılması; çok segmentli sistemlerde optik filte bantgenişliğinin ASE gürültüsüne ve uzak mesafe DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarından elde edilen OSNR değerlerine etkisi konularında çalışma eksikliği ve gerekliliği olduğu görülmüş, tezde bu konulara odaklanılmıştır.

2.2. Yoğun/Aşırı Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (DWDM/UDWDM)

Dalgaboyu bölmeli çoğullamada (WDM) farklı dalgaboylarına sahip n tane kanal optik çoğullayıcı tarafından birleştirilerek tek bir optik fiberle iletilir. Böylece ilave bir optik fiber kurulumuna gerek kalmadan sistem kapasitesi önemli derecede artırılır (Kolimbiris 2004). Çoğullanan işaret optik yalınlayıcı tarafından n tane kanala ayrıştırılır ve fotoalıcılar tarafından algılanır. N kanallı WDM haberleşme sistemi blok diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Sistem kapasitesi ihtiyacının artması ve daha uzak mesafelerde iletim gerekliliği yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM) ve aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (UDWDM) sistemlerini ön plana çıkarmıştır. DWDM haberleşme sistemlerinde kanallar arası boşluk değerleri WDM sistemlere göre daha dardır. Böylece aynı optik fiberde daha fazla sayıda kanal iletilebilir. ITU-T G.694.1'e göre, DWDM haberleşme sistemlerinde kanallar arası boşluk değerleri 12,5 GHz ile 100 GHz ve tam sayı katları aralığında değişebilir. UDWDM, ITU-T tarafından henüz standartlaştırılmamıştır fakat kanallar arası boşluk değerinin 12,5 GHz'den daha dar olduğu uygulamalar UDWDM uygulamalar olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.1. N kanallı WDM haberleşme sistemi blok diyagramı

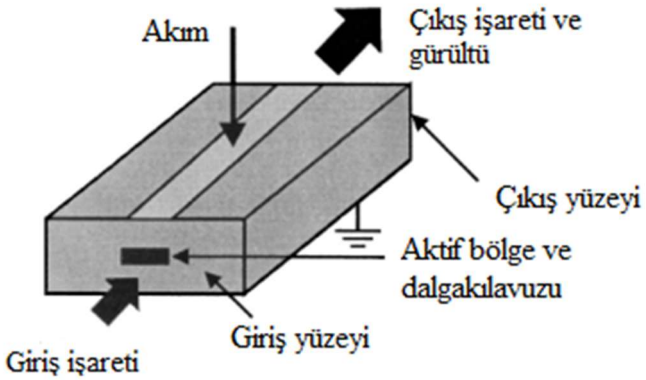
2.3. Optik Kuvvetlendiciler

Fiber kayıpları, optik fiberli iletişim sisteminin iletim uzunluğunu sınırlandırır. Uzak mesafe haberleşme sistemlerinde fiber kayıplarının etkisi optik tekrarlayıcılar kullanılarak azaltılır. Geleneksel tekrarlayıcılar optik işareti kuvvetlendirmek için foton-elektron dönüşümü, elektriksel kuvvetlendirme, yeniden zamanlama, darbe şekillendirme ve elektron-foton dönüşümü yapar. Bu süreç orta hızlı tek dalgaboylu sistemlerde çalışmasına rağmen, yüksek hızlı ve çoklu dalgaboylu sistemlerde karmaşık ve pahalıdır (Keiser 2000). Bu yüzden optik kuvvetlendiricilerin gelişmesi için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Optik kuvvetlendiriciler foton-elektron dönüşümü yapmadan çoklu dalgaboylu sistemlerde optik işareti kuvvetlendirebilir. Optik kuvvetlendiciler yarıiletken optik kuvvetlendiriciler (SOA), katkılı fiber kuvvetlendiriciler (DFA) ve Raman kuvvetlendiciriler olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Katkılı fiber kuvvetlendiricilerde en yaygın kullanıma sahip olan Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA) üzerine odaklanılmıştır.

2.3.1. Yarıiletken Optik Kuvvetlendiriciler (SOA)

Yarıiletken optik kuvvetlendiriciler (SOA), uygun çalışma şartları altında giriş işaretini kuvvetlendiren optoelektronik cihazlardır. Optik entegre devrelerindeki optik işaret işleme uygulamalarında kullanımı giderek artmaktadır. SOA'lar yüksek kazanç katsayısı ve nispeten düşük doyma gücünden dolayı fotonik entegre devrelerinde etkin bir şekilde kullanılır. SOA'lar genellikle doğrusal olmayan optik döngü aynaları, saat elde etme devreleri, darbe gecikme diskriminatörleri ve mantık elemanları gibi işlevsel cihazlar oluşturmak için kullanılır (Premaratne ve Agrawal 2011).

SOA şematik diyagramı Şekil 2.2'de verilmektedir. Aktif bölge giriş işaretine kazanç sağlar. Harici elektrik akımı kazancın oluşmasını sağlar. Gömülü dalga kılavuzu, işareti aktif bölgede tutmayı sağlar fakat optik sınırlandırma zayıf olduğu için işarette kayıplı kaplama bölgesine sızıntılar gerçekleşir. Çıkışta ise çıkış işareti ve gürültü bulunmaktadır. Gürültü, kuvvetlendirme süreci tarafından üretilir ve bu nedenle kaçınılmazdır. Kuvvetlendirici yüzeyleri yansıtıcıdır. Bu yüzden kazanç spektrumunda dalgalanmalara sebep olur (Connely 2002).



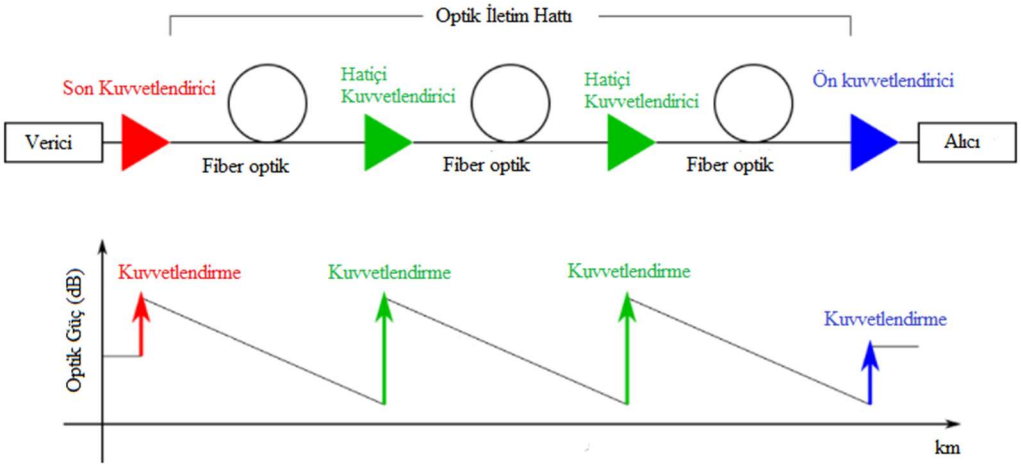
Şekil 2.2. SOA şematik diyagramı (Connely 2002)

SOA'lar hatiçi kuvvetlendirici olarak kullanılmaları durumunda çeşitli dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlardan bazıları polarizasyon hassasiyeti, kanallar arası etkileşim ve bağlantı kayıplarıdır. SOA'ların dezavatajlarından dolayı, 1980'lerde alternatif kuvvetlendirici arayışları başlamıştır. Raman etkisi ve nadir toprak elementlerinin kullanıldığı kuvvetlendiriciler geliştirilmiştir (Agrawal 2002).

2.3.2. Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici (EDFA)

Optik fiberlerin Erbiyum (Er), İterbiyum (Yb), Tulyum (Tm) vb. nadir toprak elementleriyle katkılanması sonucu katkılı fiber kuvvetlendiriciler geliştirilmiştir. En çok kullanılan katkı elementleri Erbiyum ve İterbiyum'dur. Ana malzeme silika, florit tabanlı cam, tellürit cam olabilir. Katkılı kuvvetlendiricilerin karakteristikleri ve çalışma bölgeleri katkı elementine ve ana malzemeye bağlıdır. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA), optik fiberdeki zayıflamanın en aza indiği C bandı (1530 nm-1565 nm) ve L bandı (1565 nm -1625 nm) dalgaboyu bölgesinde çalışmaktadır. EDFA'lar iletim mesafenin arttığı uzak mesafe haberleşme sistemlerinde zayıflayan işareti kuvvetlendirmek için kullanılırlar. EDFA'lar çoğullanmış optik işaretleri yükseltebilirler. Bu yüzden WDM tabanlı haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca EDFA'lar deniz altı optik fiberli haberleşme sistemlerinde de önemli bir yer tutmaktadır.

EDFA'lar optik haberleşme sistemlerinde verici çıkışında son kuvvetlendirici olarak, iletim hattında hatiçi kuvvetlendirici olarak ya da alıcı girişinde ön kuvvetlendirici olarak Şekil 2.3'te gösterildiği kullanılmaktadır.



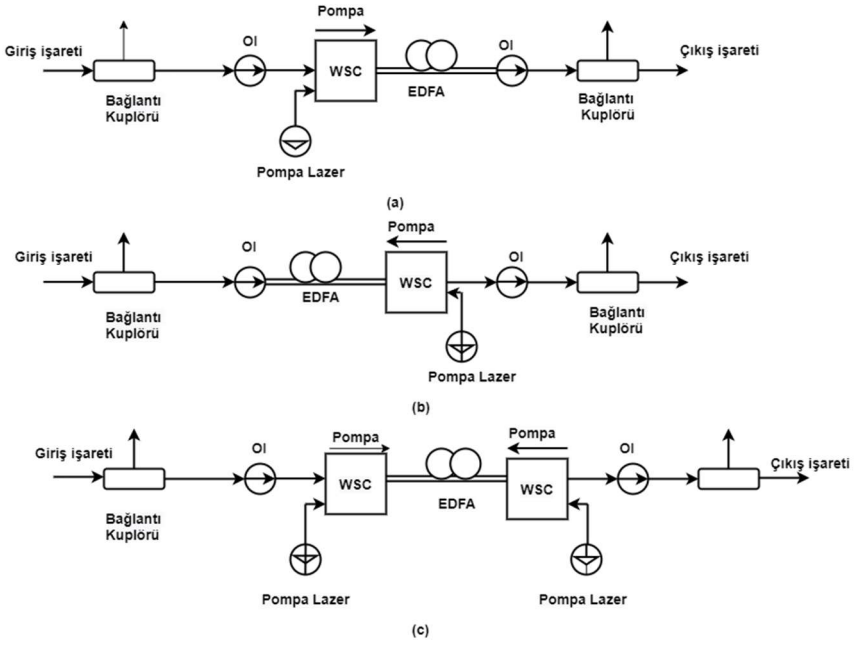
Şekil 2.3. Optik iletimde son kuvvetlendirici, hatiçi kuvvetlendirici, ön kuvvetlendirici olarak EDFA kullanımı

2.3.2.1. EDFA Mimarisi

EDFA'ların pompalanması için Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bir ya da daha fazla pompa lazer kullanılabilir. Ayrıca EDFA'ların genel mimarisinde pasif dalgaboyu kuplör, optik izolatör, bağlantı kuplörleri bulunmaktadır. Dikroik kuplör, 980/1550 nm ya da 1480/1550 nm dalgaboyunda hem pompa dalgasını hem de işaret dalgasını fiber kuvvetlendirici içine gücü etkin bir şekilde birleştirmek için kullanılır. Bağlantı kuplörleri, kuvvetlendiriciye gelen işaret dalgası ile kuvvetlendirici çıkışında elde edilen kuvvetlendirilmiş işareti karşılaştırmak için kuvvetlendiricinin her iki tarafında kullanılmaktadır. Optik izolatörler, kuvvetlendirilmiş işaretin cihazdan yansımasını önlemek için kullanılır.

Pompa dalga, genelde işaret dalgasıyla aynı yönde enjekte edilir. Bu pompalama konfigürasyonu eş yönlü pompalama olarak bilinir. Pompa dalga, bazı uygulamalarda işaret dalgaya ters yönde enjekte edilir. Bu durum ters yönlü pompalama olarak bilinir. Bazen iki pompa lazer kullanılabilir. Bu durumda sisteme hem işaret dalga ile aynı yönlü hem de ters olarak pompa dalga enjekte edilir. Ters yönlü pompalama daha yüksek

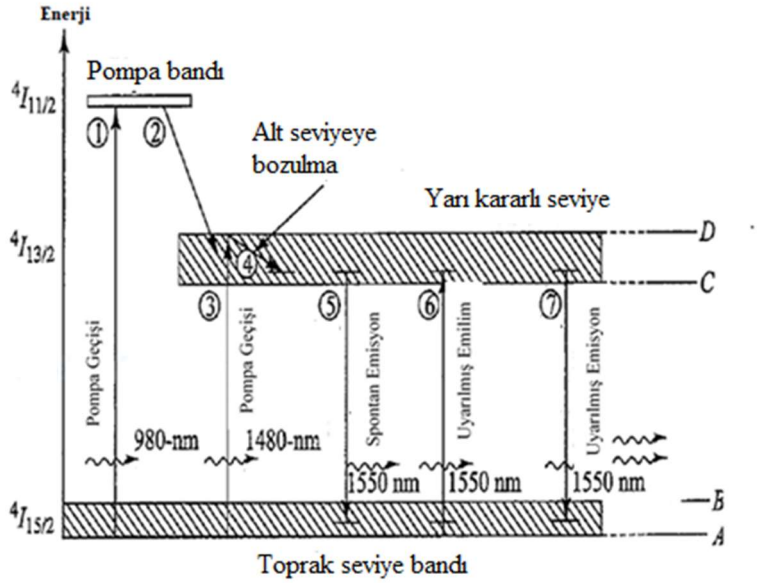
kazanç sağlarken, eş yönlü pompalama daha iyi gürültü performansı vermektedir. Genellikle 980 nm dalgaboyunda pompalama tercih edilir çünkü daha az gürültü üretir ve 1480 nm dalgaboyunda pompalamaya göre daha yüksek populasyon ters birikimi sağlamaktadır (Keiser 2000).



Şekil 2.4. EDFA'larda üç farklı pompalama konfigürasyonu a) eş yönlü pompalama b) ters yönlü pompalama c) çift yönlü pompalama (Keiser 2000)

2.3.2.2. EDFA'nın Kuvvetlendirme Mekanizması

Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler optik pompalamayı kullanır. Bu süreçte elektronları uyarılmış seviyeye yükseltmek için fotonlar kullanılır. Optik pompalama süreci üç ya da daha çok enerji seviyesinden oluşmaktadır. Pompa fotonun enerjisi, işaretin enerjisinden daha yüksek olmalıdır yani başka bir deyişle pompa fotonun dalgaboyu, işaretin dalgaboyundan daha kısa olmalıdır. EDFA'nın çalışma mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için Erbiyum enerji seviyesi incelenmelidir. Er^{+3} iyonlarının enerji diyagramı ve iyonların geçiş süreçleri Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5. Silikadaki Er^{+3} iyonlarının enerji diyagramı ve geçişleri (Keiser 2000)

Enerji geçişleri ve foton yayınım aralığını anlayabilmek için yarıkararlı bant, pompa bandı ve toprak bantlarının enerji seviyeleri incelenmelidir. Pompa bandı ve alt toprak seviyesi (A seviyesi) arasındaki enerji farkı 1,27 eV yani 980 nm'dir. Yarı kararlı bandın üst seviyesi (D seviyesi) ve alt toprak seviyesi (A seviyesi) arasındaki enerji farkı 0,84 eV yani 1480 nm'dir. Yarı kararlı bandın alt seviyesi (C seviyesi) ve alt toprak seviyesi (A seviyesi) arasındaki enerji farkı 0,814 eV yani 1530 nm'dir. Er^{+3} iyonlarının alt toprak seviyesinden pompa bandına uyarılması için 980 nm foton yayan pompa lazer kullanılır. Pompa bandında bulunan uyarılmış Er^{+3} iyonları çok hızlı bir şekilde yarı kararlı seviyeye geçiş yapar. Bu geçiş sırasında fazla enerji foton salınımına neden olur ve fiberde mekanik titreşim yapar. Yarı kararlı bantta bulunan uyarılmış Er^{+3} iyonları daha düşük enerji bandına geçmeye yatkındır. 1480 nm dalgaboyunda pompa lazer kullanıldığında ise fotonların enerjisi işaretin enerjisine çok benzer, fakat pompa fotonun enerjisi daha yüksektir. 1480 nm foton alt toprak seviyesinde bulunan Er^{+3} iyonları yarı kararlı bandın üst seviyesine (D seviyesi) uyarılır. Uyarılan Er^{+3} iyonları yarı kararlı bandın alt seviyesine geçiş yaparlar (C seviyesi). Foton uyarımı yapılmaksızın yarı kararlı seviyede bulunan Er^{+3} iyonları kendiliğinden toprak seviyesine geçiş yaparlar. Bu süreç kendiliğinden yayınım olarak bilinir ve kuvvetlendirici gürültüsüne neden olur. Ayrıca kendiliğinden yayınım süreci dışında iki geçiş türü vardır. Fotonların bir kısmı alt toprak seviyesinde bulunan Er^{+3} iyonları tarafından soğurulur ve bu iyonlar yarı kararlı

seviyeye çıkarlar. Bu süreç uyarılmış yayınım süreci olarak bilinir. Bazen de işaret foton yarı kararlı seviyede bulunan uyarılmış iyonları etkileyerek toprak seviyesine düşmesine neden olur. Bu süreç uyarılmış yayınım süreci olarak bilinir. Yarı kararlı seviye ve toprak seviye arasındaki genişlik, 1530 nm ve 1565 nm aralığında yüksek seviyelerde uyarılmış yayınımların oluşumuna izin verir (Keiser 2000).

2.3.2.3. EDFA Kazancı ve Güç Dönüşüm Verimliliği

Herhangi bir kuvvetlendiricide olduğu gibi, EDFA'nın çıkış işaretinin genliği arttıkça kuvvetlendirici kazancı doymaya başlar. Popülasyon ters birikiminde azalma olduğu zaman EDFA kazancında da azalma meydana gelir. EDFA'nın giriş ve çıkış gücü arasındaki bağıntı, enerjinin korunumu dikkate alınarak (2.1)'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$P_{s,out} \leq P_{s,in} + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} P_{p,in} \tag{2.1}$$

Burada $P_{s,out,}$ işaretin çıkış gücü; $P_{s,in,}$ işaretin giriş gücü; λ_p ve λ_s sırasıyla pompa foton ve işaret fotonun dalgaboyu; $P_{p,in}$ pompa fotonun giriş gücüdür.

(2.1)' e göre, EDFA'nın çıkışında elde edilen işaretin gücü, cihazda depolanan pompa enerjisinden büyük olamaz. Ayrıca işaretin maksimum çıkış gücü λ_p/λ_s oranına bağlıdır. Pompalama mekanizmasının çalışabilmesi için $\lambda_p < \lambda_s$ ve uygun bir kazanca sahip olmak için $P_{s,in} \ll P_{p,in}$ olmalıdır. Buna göre güç dönüşüm verimliliği (PCE) (2.2)'de tanımlanmaktadır.

$$PCE = \frac{P_{s,out} - P_{s,in}}{P_{p,in}} \approx \frac{P_{s,out}}{P_{p,in}} \leq \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \leq 1 \tag{2.2}$$

(2.2)'ye göre, güç dönüşüm verimliliğinin (PCE) maksimum değeri λ_p/λ_s oranıdır.

Mutlak referans amacıyla kuantum dönüşüm verimliliğini (QCE) kullanmak daha faydalı olabilir. Kuantum dönüşüm verimliliği (QCE)

$$QCE = \frac{\lambda_s}{\lambda_p} PCE \tag{2.3}$$

olarak tanımlanmaktadır. QCE'nin maksimum değerinde tüm pompa fotonlar işaret fotonuna dönüştürülür.

Kendiliğinden yayınım yok sayıldığında, (2.2)'deki kuvvetlendirici kazancı ifadesi dikkate alınarak yeniden yazılırsa

$$G = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} \leq 1 + \frac{\lambda_p P_{p,in}}{\lambda_s P_{s,in}} \tag{2.4}$$

elde edilir. (2.4), işaret giriş gücü ve kazanç arasında önemli bir ilişki olduğunu gösterir. Ayrıca (2.4) yeniden düzenlenirse, maksimum kazancı hesaplamak için işaret gücü, (2.5) ile tanımlanan değeri geçemez.

$$P_{s,in} \leq \frac{(\lambda_p/\lambda_s) P_{p,in}}{G - 1} \tag{2.5}$$

Kazanç pompa gücünün yanı sıra uzunluğa da bağlıdır. Maksimum kazancın uzunluğa bağımlılığı

$$G_{max} = \exp(\rho \sigma_e L) \tag{2.6}$$

olarak ifade edilebilir. Burada ρ, nadir toprak elementi konsantrasyonu; σ_e, işaret emisyon kesiti ve L, fiber uzunluğudur. (2.4) ve (2.6) birlikte değerlendirildiği zaman olası maksimum EDFA kazancı iki kazanç ifadesinin minimum değerinde verilir. Bu durum, (2.7) ile gösterilmektedir.

$$G \leq \min(\exp(\rho \sigma_e L), 1 + \frac{\lambda_p P_{p,in}}{\lambda_s P_{s,in}}) \tag{2.7}$$

$$G = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} = (\exp(\rho\sigma_e L) \tag{2.8}$$

(2.7) ile (2.8) ifadesi birlikte değerlendirilirse olası maksimum EDFA çıkışı

$$P_{s,out} \leq \min\left\{P_{s,in}(\exp(\rho\sigma_e L)\,, P_{s,in} + \frac{\lambda_p P_{p,in}}{\lambda_s})\right\} \tag{2.9}$$

olarak hesaplanır (Keiser 2000).

2.3.2.4. EDFA Oran Denklemleri

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, EDFA 980 nm ya da 1480 nm dalgaboyunda pompalanabilir. Analizleri basitleştirmek için 980 nm dalgaboyunda pompalanan üç seviyeli enerji diyagramı dikkate alınmıştır. EDFA pompalandığı zaman fiber kayıpları ve katkı iyonlarının pompa gücünü emmesiyle pompa gücünde kayıplar oluşur. Bu kayıplar nedeniyle EDFA uzunluğu boyunca atomik yoğunluk eşit şekilde dağılmaz. Pompa gücünün ve atomik yoğunlukların değişimi önemlidir. Bu yüzden atom yoğunlukları N_1, N_2 ve N_3, uzunluk (z) ve zamana (t) göre değişim göstermektedir (Premaratne ve Agrawal 2011).

Üç seviyeli oran denklemlerinde erbiyum iyonlarının herhangi bir enerji seviyesinde bulunması ya da bulunmaması dikkate alındığında atomik oran denklemleri

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -R_{13}N_1 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + \frac{N_2}{T_1} + R_{31}N_3 + \frac{N_3}{T_1'} \tag{2.10}$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 + R_{32}N_3 - \frac{N_2}{T_1'} \tag{2.11}$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = R_{13}N_1 - R_{32}N_3 - R_{31}N_3 - \frac{N_3}{T_1'} \tag{2.12}$$

ile ifade edilmektedir. Verilen eşitliklerde T_1 ve T_1' sırasıyla ikinci ve üçüncü seviyenin iyon geçiş zamanıdır. W_{ab} işaretin a seviyesinden b seviyesine geçiş oranıdır. R_{ab} ise pompanın a seviyesinden b seviyesine geçiş oranıdır (Premaratne ve Agrawal 2011).

Erbiyum iyonlarının üçüncü seviyeden ikinci seviyeye geçişi, üçüncü seviyeden birinci seviyeye geçişine göre daha fazladır. Bu nedenle $R_{32} \gg R_{31}$ olduğu kabul edilir. Ayrıca üçüncü seviyeden birinci seviyeye kendiliğinden geçiş oranı R_{32}'den daha zayıftır ($R_{32} \gg 1/T_1'$).

Bu sadeleştirmeler, (2.12)'de yerine yazılırsa

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} \approx R_{13}N_1 - R_{32}N_3 \tag{2.13}$$

elde edilir.

Durağan durumda yani zamana bağımlılığın olmadığı durumda $R_{32} \gg R_{13}$ varsayıldığında üçüncü seviyedeki iyon yoğunluğu

$$R_{32}N_3 \approx (R_{13}/R_{32})N_1 \approx 0 \tag{2.14}$$

olarak ifade edilir. Bu sonuç, (2.10) ve (2.11)'de kullanılırsa birinci ve ikinci enerji seviyelerinin iyon yoğunluğu

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -R_{13}N_1 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + \frac{N_2}{T_1} \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = R_{13}N_1 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - \frac{N_2}{T_1} = -\frac{\partial N_1}{\partial t} \tag{2.16}$$

olarak ifade edilmektedir. (2.15) ve (2.16), N_1 ve N_2 arasında $N_1+N_2=\rho_0$ şeklinde ifade edilen bir ilişki olduğunu göstermektedir. Burada ρ_0 katkı iyonlarının toplam yoğunluğudur ve pompalama ve kuvvetlendirilmiş kendiliğinde emisyon sürecinde toplam atomik yoğunluğu ifade etmektedir. Burada sırasıyla işaret ve pompa geçiş parametreleri yani W ve R ,

$$W_{12} = \frac{\Gamma_s \sigma_{12} P_s}{A_c h v_s} \tag{2.17}$$

$$W_{21} = \frac{\Gamma_s \sigma_{21} P_s}{A_c h v_s} \tag{2.18}$$

$$R_{13} = \frac{\Gamma_p \sigma_{12} P_p}{A_c h v_p} \tag{2.19}$$

olarak ifade edilmektedir. Verilen eşitliklerde P_p ve P_s sırasıyla pompa ve işaret güçleri; A_c fiberin çekirdek kesit alanı; Γ_p ve Γ_s sırasıyla pompa ve işaret için mod örtüşme faktörü; v_p ve v_s sırasıyla pompa ve işaretin frekanslarıdır (Premaratne ve Agrawal 2011).

Pratik uygulamalarda pompa ve işaret çalışma dalgaboyunda fiber uzunluğu boyunca kayıplar ihmal edildiğinden pompa ve işaret güçleri sırasıyla, (2.20) ve (2.21)'deki gibi verilmektedir.

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = -R_{13} A_c h v_p N_1 \tag{2.20}$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = (W_{21} N_2 - W_{12} N_1) A_c f v_s \tag{2.21}$$

$\rho = \int_0^L N_2 A_c \, dz$ olarak yeniden düzenlenirse

$$\frac{dP}{dt} = P_s^{in}(t)[1 - exp(B_s \rho - C_s)] + P_p^{in}(t)\left[1 - exp\left(B_p \rho - C_p\right)\right] - \frac{\rho}{T_1} \tag{2.22}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik ile EDFA kazancının zamana bağlı değişimi ifade edilmektedir (Premaratne ve Agrawal 2011). Burada verilen B_s, C_s, B_p ve C_p katsayıları

$$B_p = \frac{\Gamma_p \sigma_{13}}{A_c h v_p} \tag{2.23}$$

$$B_s = \frac{\Gamma_s (\sigma_{12} + \sigma_{12})}{A_c h v_s} \tag{2.24}$$

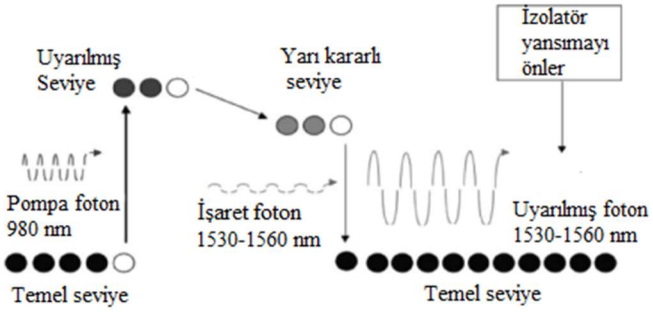
$$C_p = \Gamma_p \sigma_{13} \rho L \tag{2.25}$$

$$C_s = \Gamma_s \sigma_{12} \rho L \tag{2.26}$$

olarak ifade edilmektedir. Burada P_s^{in} ve P_p^{in} sırasıyla EDFA girişindeki işaret ve pompa gücünü ifade eder.

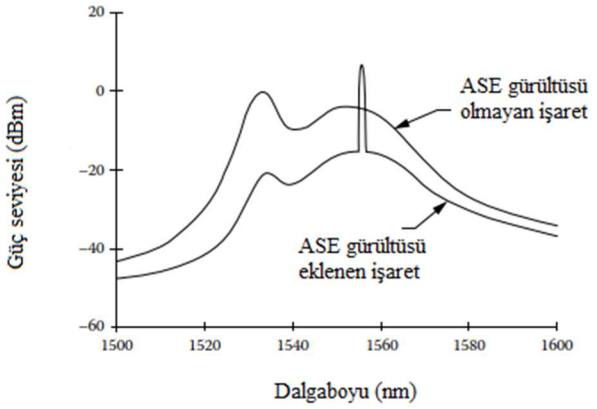
2.3.2.5.Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım (ASE) Gürültüsü

İşaret fotonun kuvvetlendirilmesi sürecinde gürültüler üretilmektedir. Bu gürültülerden en baskın olanı kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım (ASE) gürültüsüdür. Uyarılmış seviyede bulunan Er^{+3} iyonları temel seviyeye doğru foton yayarlar. Bu olay ile kendiliğinden yayılan fotonlar fiber boyunca kuvvetlendirilebilir ve uyarılan iyonlardan daha fazla fotonun salınımına neden olabilir. Bu foton salınımları sistem performansını sınırlandıran ASE gürültüsünü oluşturmaktadır. Fotonların salınımları herhangi bir frekans ve yönde gerçekleşebilir. ASE fotonları oluşumu Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. ASE fotonları gösterimi (Binh 2014)

ASE spektral aralığı çok geniştir ve kuvvetlendiricinin kazanç spektrumunu kapsayan C ve L bandının neredeyse tamamını kaplamaktadır. Şekil 2.7'de ASE gürültüsü eklenen işaretin ve ASE gürültüsü dahil edilmeyen işaretin güç seviyesi gösterilmektedir.



Şekil 2.7. ASE gürültü spektrumu (Binh 2014)

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi ASE gürültüsü işaretin gücünü düşürmektedir. Bu durum optik işaret gürültü gücünün (OSNR) düşmesine neden olmaktadır. ASE gürültü gücü, (2.27)'de ifade edilmektedir (Chraplyvy ve Tkach 1993).

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G-1)hfB_o m \tag{2.27}$$

Burada n_{sp} popülasyon ters birikimi faktörü; G kuvvetlendirici kazancı ($e^{\alpha \ell}$); h Planck sabiti ($6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s); f optik işaretin merkez frekansı (Hz); B_o optik bantgenişliği (Hz) ve m kuvvetlendirici sayıdır. Toplam kuvvetlendirici sayısı

$$m = L/\ell - 1 \tag{2.28}$$

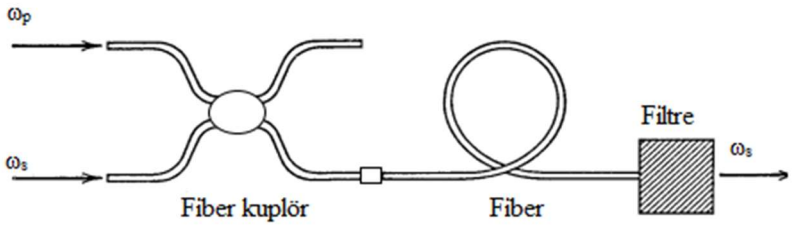
olarak ifade edilmektedir. Burada L optik fiber hat uzunluğu ve ℓ kuvvetlendirici aralığı ya da segment uzunluğudur. İletim sisteminde kullanılan tüm kuvvetlendiricilerin aynı parametrelere sahip olduğu ve segmentlerdeki iletim kayıplarını tamamen telafi ettiği varsayılırsa, m adet kuvvetlendirici içeren sistemde oluşan toplam ASE gürültüsü

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G-1)hfB_o m e^{-\alpha \ell} \tag{2.29}$$

olarak ifade edilmektedir.

2.3.3. Raman Fiber Kuvvetlendiriciler

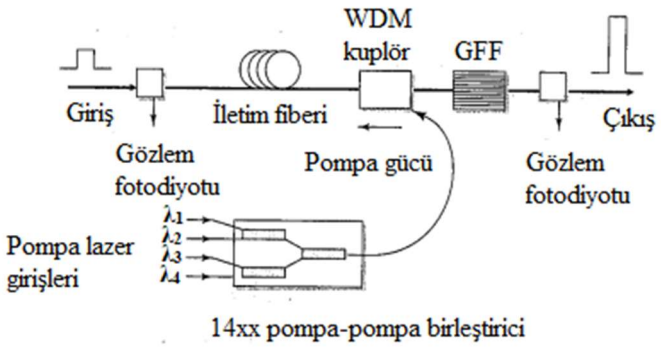
Raman kuvvetlendiriciler, yüksek güçlerde oluşan uyarılmış Raman saçılması (SRS) etkisine dayanır. SRS olayında pompa foton enerjisini daha düşük frekanslı fotona aktarır ve kalan enerji ortamdaki moleküler titreşimler tarafından emilir. Bu yüzden Raman kuvvetlendiriciler kazanç sağlayabilmek için optik olarak pompalanmalıdır. Şekil 2.8'de ileri yönde pompalanan Raman kuvvetlendiricinin şematik gösterimi verilmektedir. ω_p frekanslı pompa foton ve ω_s frekanslı işaret foton fiber kuplör aracılığıyla iletim fiberine enjekte edilir. Pompa fotondan işaret fotona enerji aktarılır ve iki foton fiberde birlikte yayılır. İstenilen işareti elde etmek için çıkışta filtre kullanılmaktadır. Geri yönde pompalama konfigürasyonunda ise pompa foton ve işaret foton birbiriyle zıt yönlüdür. Pratik uygulamalarda geri yönlü pompalama konfigürasyonu tercih edilmektedir.



Şekil 2.8. İleri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendirici (Agrawal 2002)

Raman fiber kuvvetlendiriciler optik haberleşme spektrumunun tüm frekanslarında kuvvetlendirme yapabilmektedir. Özellikle C ve L bandındaki işaretleri kuvvetlendirmek için tercih edilmektedir. Kuvvetlendirme mekanizması pompa foton ve işaret fotonun frekans farkına bağlıdır. Raman kazancı pompa foton ve işaret fotonun frekans farkına ve bu fotonların polarizasyonuna bağlı olarak değişirken, pompalama yönüne bağlı değildir. Raman kuvvetlendiriciler ileri yönde ve geri yönde pompalanmaktadır.

Şekil 2.9 Raman kuvvetlendirme sisteminin kurulumunu göstermektedir. Burada 14xx pompa birleştirici dört farklı pompa lazerden gelen girişleri birleştirir. Birleştirilen pompa güçleri daha sonra WDM kuplör aracılığıyla iletim fiberinde birleştirilir. Girişte ve çıkışta konumlanan gözlem fotodiyotları sayesinde kuvvetlendirici kazancı hesaplanır. Kazanç düzleştirme filtresi (GFF) farklı dalgaboylarında kazançları eşitlemek için kullanılır (Keiser 2000).



Şekil 2.9. Raman kuvvetlendirme sistemi kurulumu (Keiser 2000)

2.4. Optik Fiberlerde Doğrusal Olmayan Olaylar

Optik fiberde doğrusal olmayan olaylar, kırılma indisine bağlı doğrusal olmayan etkiler ve elastik olmayan saçılma etkileri olarak gruplandırılmaktadır. Kırılma indisine bağlı doğrusal olmayan etkiler, optik fiber kırılma indisinin ışın yoğunluğa bağımlılığından kaynaklanmakta ve Kerr doğrusalsızlığı olarak bilinmektedir. Kerr doğrusalsızlığı, öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM) ve dört dalga karışımı (FWM) olarak üçe ayrılmaktadır. Elastik olmayan saçılma etkileri, uyarılmış Brillouin saçılması ve uyarılmış Raman saçılması olarak ikiye ayrılmaktadır. Optik fiberde doğrusal olmayan olaylar Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Optik fiberde doğrusal olmayan olaylar (Keiser 2000)

	Tek Kanallı Sistem	**Çok Kanallı Sistem**
Kırılma İndisine Bağlı Doğrusal Olmayan Etkiler	Öz Faz Modülasyonu (SPM)	Çapraz Faz Modülasyonu (XPM) Dört Dalga Karışımı (FWM)
Elastik Olmayan Saçılma Etkileri	Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS)	Uyarılmış Raman Saçılması (SRS)

Öz faz modülasyonu ve uyarılmış Brillouin saçılması; WDM tabanlı iletişim sistemlerinin kanal sayılarından bağımsız etkilerdir. FWM, SRS ve SBS etkilerinde güç değişimleri optik işaretin yoğunluğuna bağlıdır ve bazı kanalların güç tüketimi diğer kanallarda güç indüklenmesine neden olur. SPM ve XPM'de sadece işaretin fazı değişir ve özellikle yüksek hızlı sistemlerde işaretin genişlemesine neden olur.

2.4.1. Doğrusal Olmayan Kırılma İndisi Etkileri (Kerr Etkisi)

Ortamın kırılma indisinin ışık yoğunluğu ile değişimi optik Kerr etkisi olarak bilinmektedir. Bu değişim, (2.30)'da ifade edilmektedir.

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + n_2\left(\frac{P}{A_{eff}}\right) \tag{2.30}$$

Burada n_0 doğrusal kırılma indisi; n_2 doğrusal olmayan kırılma indisi; I optik yoğunluk; P optik güç ve A_{eff} fiberin etkin alanıdır.

2.4.1.1. Öz Faz Modülasyonu (SPM)

Fiberdeki ışığın optik yoğunluk değişimi Kerr etkisinden dolayı ortamın kırılma indisinin değişimine neden olur. Kırılma indisinde meydana gelen bu değişim ışığın fazının değişmesine yol açar. Işığın fazında meydana gelen doğrusal olmayan kayma

$$\emptyset_{NL} = \gamma P L_{eff} \tag{2.31}$$

olarak ifade edilmektedir. Burada γ doğrusalsızlık katsayısı; P optik güç ve L_{eff} etkin uzunluktur.

Doğrusalsızlık katsayısı doğrusal olmayan etkilerin şiddetini belirler ve

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \tag{2.32}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Faz kaymasının zamana göre türevi alınarak SPM nedeniyle meydana spektral genişleme, (2.33)'te verilmektedir.

$$\Delta\omega_{SPM} = -\frac{d\varphi_{SPM}}{dt} = -\gamma L_{eff}\frac{dP}{dt} \tag{2.33}$$

Buradan görüldüğü gibi işaretin gücünün değişimi işaretin spektrumunun genişlemesine neden olmaktadır. Bu genişlemeye işaretin kendisi neden olduğu için öz faz modülasyonu olarak adlandırılmaktadır.

2.4.1.2. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)

XPM tıpkı SPM gibi ışığın optik yoğunluk değişiminin kırılma indisi değişimine neden olduğu doğrusal olmayan bir olaydır. XPM'de SPM'den farklı olarak en az iki tane optik ışının etkileşimi söz konusudur. Işınlardan birinin yoğunluk değişimi diğerinde faz modülasyonuna neden olur. Yani XPM, WDM tabanlı haberleşme sistemlerinde iki ya da daha fazla kanalın eş zamanlı olarak iletilmesiyle oluşur.

Fiberde iletilen optik ışınlar aynı polarizasyondaysa j. kanalda görülen faz kayması

$$\emptyset_{NL.j} = \gamma L_{eff}(P_j + 2\sum_{m \neq j} P_m) \tag{2.34}$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim SPM etkisini, ikinci terim ise XPM etkisini tanımlamaktadır. Buna göre j. kanalda XPM nedeniyle meydana gelen spektral genişleme

$$\Delta\omega_{XPM} = -2\gamma L_{eff}\frac{d(\sum_{m \neq j} P_m)}{dt} \tag{2.35}$$

olarak tanımlanmaktadır. (2.35)'te görüldüğü gibi, eşit miktarda örtüşen iki güç için XPM etkisi SPM etkisine göre daha baskındır. SPM'de söz konusu işaretin yoğunluk dalgalanmalarından yine aynı işaret etkilenirken, XPM'de ise bu yoğunluk dalgalanmalarından WDM tabanlı haberleşme sistemlerindeki diğer kanallar da etkilenir.

2.4.1.3. Dört Dalga Karışımı (FWM)

Dört dalga karışımı (FWM) ya da dört foton karışımı (FPM), maddenin üçüncü dereceden doğrusalsızlığından dolayı, iletim ortamında yayılan f_i, f_j ve f_k frekanslı üç dalganın etkileşime girerek f_{ijk} frekanslı dördüncü dalganın üretilmesi olayıdır. Optik fiberde meydana gelen FWM etkisi

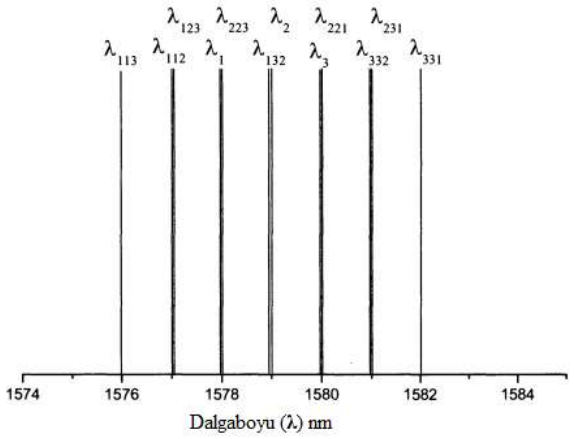
$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \tag{2.36}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada f_{ijk} FWM etkisiyle üretilen yeni dalganın frekansı ve f_i, f_j, f_k sırasıyla WDM tabanlı haberleşme sistemlerinde i., j., ve k. kanalların frekanslarıdır. Farklı frekanslı yeni dalganın üretilmesi için $i \neq j \neq k$ ya da $k \neq i, j$ şartının sağlanması gerekir.

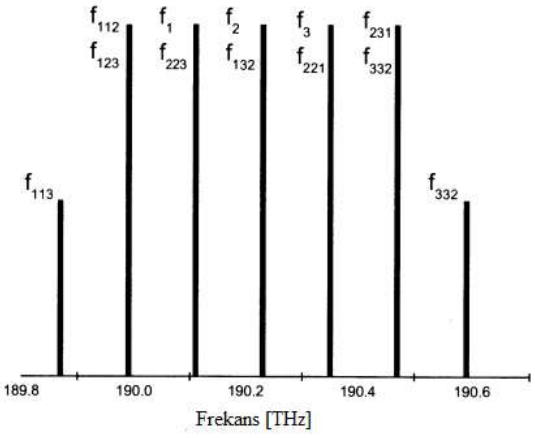
FWM'nin WDM tabanlı haberleşme sistemleri üzerindeki en ağır etkisi, kanalların üçlü etkileşimi sonucu ürettiği yeni FWM ürünlerinin mevcut WDM kanallarda iletilen işaret ile örtüşmesi sonucunda ortaya çıkar. Eğer WDM kanalların dalgaboyu aralıkları eşitse frekans farkları tamamen eşit değildir. Frekans aralıklarında çok küçük farklılıklar

bulunmaktadır. Bu farklılıktan dolayı FWM ürünleri orijinal WDM kanallarda iletilen işaret ile daha az örtüşür. Eğer WDM kanalların frekans aralıkları eşitse üretilen FWM ürünleri orijinal WDM kanallarda iletilen işaretle daha fazla örtüşür.

Yeni üretilen FWM ürünleri orijinal WDM kanallarıyla aynı frekans desenini gösterir. Bu durumda FWM çapraz karışımı sistem performansında önemli bozulmalara neden olur (Schneider 2004). Kanalların dalgaboyu aralıklarının ve frekans aralıklarının eşit olması durumunda üretilen FWM ürünlerinin dalgaboyları ve frekansları Şekil 2.10 ve 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Dalgaboyu aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin dalgaboyları (Schneider 2004)



Şekil 2.11. Frekans aralıkları eşit olan WDM sistemlerde üretilen FWM ürünlerinin frekansları (Schneider 2004)

WDM tabanlı haberleşme sistemlerinde üretilen FWM ürünlerinin sayısı WDM kanalların sayısına bağlıdır ve

$$M = \frac{N^2(N-1)}{2} \tag{2.37}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada M, üretilen FWM ürünlerinin sayısı ve N, WDM haberleşme sisteminin kanal sayısıdır.

Tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe haberleşme sistemlerinde üretilen FWM ürünlerinin gücü farklılık göstermektedir.

Tek segmentli haberleşme sisteminde üretilen FWM işaretin gücü ($P(f_{ijk})$),

$$P(f_{ijk}) = \left(\frac{d_{ijk}\Upsilon L_{eff}}{3}\right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \tag{2.38}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada d_{ijk} dejenerasyon faktörü (eğer i=j≠k ise d_{ijk}=3 ve $i \neq j \neq k$ ise d_{ijk}=6); γ doğrusalsızlık katsayısı; L_{eff} etkin uzunluk; P_i, P_j, P_k sırasıyla i., j. ve k. kanalın giriş gücü; α fiberin zayıflama katsayısı; L fiber uzunluğu; η_{ijk} FWM verimliliğidir.

Fiberin etkin uzunluğu (L_{eff})

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \tag{2.39}$$

olarak tanımlanmaktadır.

FWM verimliliği (η_{ijk})

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta B_{ijk}^2}\left[1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})^2}\, sin^2\left(\frac{\Delta B_{ijk} L}{2}\right)\right] \tag{2.40}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada ΔB_{ijk} faz uyumsuzluğudur ve

$$\Delta B_{ijk} = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c}\left(|f_i - f_k|\left|f_j - f_k\right|\right)\left[D_c + \frac{\lambda_c^2}{2c}\frac{dD_c(\lambda_c)}{d\lambda}\left(|f_i - f_k| + \left|f_j - f_k\right|\right)\right] \quad (2.41)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada λ_k k. kanalın dalgaboyu; c ışık hızı; D_c kromatik dispersiyon katsayısı; $dD_c/d\lambda$ kromatik dispersiyon eğimidir.

EDFA kullanılmayan WDM haberleşme sisteminin belirli bir kanalındaki FWM çapraz karışımının sistem performansı üzerine etkisini analiz etmek için kullanılan SXR parametresi

$$SXR = 10\log_{10}\frac{P_{çıkış}}{P_{FWM}} \quad (2.42)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $P_{çıkış}$ kanalın çıkış gücü olup EDFA kullanılmayan tek segmentli sistemlerde $P_{çıkış}=P_{giriş}e^{-\alpha L}$ ile hesaplanabilir. Burada L fiber uzunluğudur.

EDFA kullanılan çok segmentli haberleşme sistemlerinde, FWM çapraz karışımı kuvvetlendirici sayısından ve kuvvetlendirici aralığından da etkilenmektedir. Bu nedenle FWM etkisiyle üretilen işaretin gücünün ve FWM verimliliğinin matematiksel ifadeleri, haberleşme sistemine dahil edilen EDFA sayısı ve aralıkları göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. EDFA kullanılan çok segmentli haberleşme sistemlerinde üretilen FWM işaretin gücü ($P(f_{ijk})$),

$$P(f_{ijk}) = \frac{1024\pi^6}{n^4\lambda_{ijk}^2c^2}(DX)^2\frac{Pi(0)Pj(0)Pk(0)}{A_{eff}^2}e^{-\alpha l}\left(\frac{1-e^{-\alpha l}}{\alpha}\right)^2(m+1)^2\eta_{ijk} \quad (2.43)$$

olarak tanımlanmaktadır (Inoue 1992). Burada n fiberin kırılma indisi; λ_{ijk} dalgaboyu; c ışık hızı; D dejenerasyon faktörü (eğer i=j≠k ise D=3 ve $i \neq j \neq k$ ise D=6), X maddenin üçüncü dereceden elektriksel duyarlılığı; P_i, P_j, P_k sırasıyla i., j. ve k. kanalın giriş gücü; A_{eff} fiberin etkin alanı; α fiberin zayıflama katsayısı; l segment uzunluğu; m kuvvetlendirici sayısı; η_{ijk} FWM verimliliğidir.

FWM verimliliği (η_{ijk})

$$\eta_{ijk=}\frac{\alpha^2}{(m+1)^2(\alpha^2+\Delta B_{ijk}^2)}\left[\frac{sin^2((m+1)\Delta B_{ijk}(l/2))}{sin^2(\Delta B_{ijk}(l/2))}\right]\left[1+\frac{4e^{-\alpha l}}{(1-e^{-\alpha l})^2}\ sin^2\left(\frac{\Delta B_{ijk}l}{2}\right)\right] \quad (2.44)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada ΔB_{ijk} faz uyumsuzluğudur ve

$$\Delta B_{ijk}=\frac{2\pi\lambda_k^2}{c}\left(|f_i-f_k||f_j-f_k|\right)\left[D_c+\frac{\lambda_c^2}{2c}\frac{dD_c(\lambda_c)}{d\lambda}\left(|f_i-f_k|+|f_j-f_k|\right)\right] \quad (2.45)$$

olarak tanımlanmaktadır.

EDFA kullanılan çok segmentli WDM tabanlı haberleşme sisteminin belirli bir kanalındaki FWM çapraz karışımının sistem performansı üzerine yalın etkisini analiz etmek için kullanılan OSNR parametresi

$$OSNR = 10\log_{10}\frac{P_{çıkış}}{P_{FWM}} \quad (2.46)$$

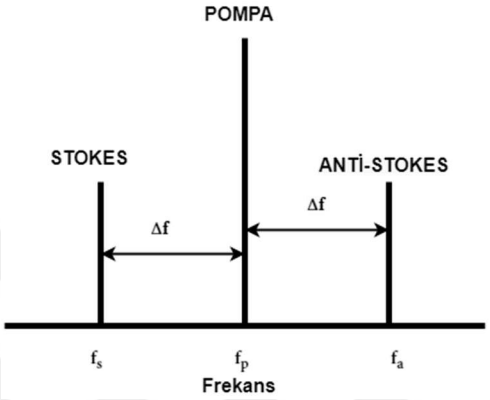
olarak tanımlanmaktadır. Burada $P_{çıkış}$ kanalın çıkış gücü olup EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde, tüm EDFA kuvvetlendiricilerinin kazançlarının birbirine eşit ($G=e^{\alpha l}$) ve tüm segment uzunluklarının birbirine eşit olduğu durum için, $P_{çıkış}=P_{giriş}e^{-\alpha l}$ ile hesaplanabilir. Buradaki l segment uzunluğudur.

2.4.2. Elastik Olmayan Saçılma Etkileri

Elastik olmayan saçılma etkilerinde daha yüksek enerjili dalgalar enerjilerin bir kısmını daha düşük enerjili dalgalara aktarır. Yani WDM tabanlı iletim sistemlerinde bazı kanalların gücünün tükenmesi pahasına diğer kanalların gücü artırılır. Enerjinin bir kısmı ise moleküler titreşimler ve fononlar tarafından emilir. En önemli elastik olmayan saçılma etkileri, uyarılmış Raman saçılması ve uyarılmış Brillouin saçılmasıdır. Uyarılmış Raman saçılmasının eşik gücü, uyarılmış Brillouin saçılmasına göre daha yüksektir ve optik fiberde SRS hem ileri hem geri yönde gerçekleşebilirken, SBS sadece geri yönde gerçekleşmektedir.

2.4.2.1. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS)

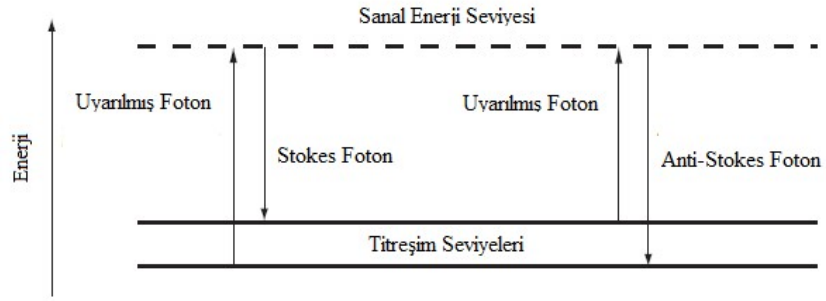
SRS'de, fotonlar fiberin moleküler titreşimiyle etkileşime girer ve bu etkileşim sonucunda saçılma meydana gelir. Saçılan fotonda hem orijinal dalgaboyu hem de daha yüksek ve daha düşük dalgaboyuna sahip bileşenler bulunabilir. Uyarılmış Raman saçılmasına neden olan foton, pompa foton; daha düşük frekanslı foton, Stokes foton ve daha yüksek frekanslı foton ise anti-Stokes foton olarak adlandırılmaktadır. Pompa, Stokes ve anti-Stokes fotonların frekans dağılımı Şekil 2. 12'de verilmektedir.



Şekil 2.12. Pompa, Stokes ve anti-Stokes fotonların frekansları (Schneider 2004)

Raman Saçılması sürecinde $E_p=h.f_p$ enerjili gelen foton, ortam ile etkileşime girerek yıkılır. Ortamdaki molekül uyarılarak daha yüksek bir sanal enerji seviyesine çıkar. Sanal enerji seviyesi ve taban seviye arasındaki enerji farkı pompa fotonun enerjisine eşittir. Sanal enerji seviyesindeki molekül, moleküllerin dönüşü ya da periyodik titreşimleri tarafından üretilen titreşim seviyesine düşer ve Stokes fotonun yayınımı gerçekleşir. Pompa fotonun yıkımı ve Stokes fotonun yayınımı eş zamanlı olarak gerçekleşir. Oluşan $E_s=h.f_s$ enerjili Stokes fotonun enerjisi, pompa fotonun enerjisinden daha düşüktür. Anti-Stokes fotonun yayınım sürecinde ise pompa foton enerjisi, sanal enerji seviyesi ve titreşim seviyesi arasındaki farka eşittir. Anti-Stokes fotonun yayınımı sürecinde, foton ortamda bulunan moleküllerden enerji alır ve $E_p=h.f_p$ enerjili foton yıkılarak $E_a= h.f_a$ enerjili anti-Stokes foton üretilir. Bu süreç, Stokes süreci gibi eş zamanlı olarak gerçekleşir. Anti-Stokes fotonun enerjisi, pompa fotonun enerjisinden daha yüksektir. Bu süreç Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Raman saçılmasında, daha düşük enerjili Stokes

fotonun enerjisi yükseltilirken, daha yüksek enerjili Anti-Stokes fotonun enerjisi düşürülmektedir.



Şekil 2.13. Stokes ve anti-Stokes fotonun enerji seviyeleri ve saçılımın şematik gösterimi (Premaratne ve Agrawal 2011)

WDM tabanlı iletişim sistemlerinde de, Stokes ve anti-Stokes fotonun yayınım sürecince olduğu gibi, daha yüksek enerjili (yüksek frekanslı, düşük dalgaboylu) kanalların enerjilerinin bir kısmı, daha düşük enerjili (düşük frekanslı, yüksek dalgaboylu) kanallara aktarılır. Bu enerji aktarımı, WDM tabanlı iletişim sistemlerinde kanallar arasında çapraz karışıma neden olur ve sistem performansını etkiler. Fakat SRS, tek kanallı sistemlerde ya da düşük kanal sayısına sahip sistemlerde sistem performansını sınırlayıcı bir etkiye sahip değildir. Çünkü SRS, 1550 nm çalışma bölgesinde yaklaşık olarak 500 mW gibi yüksek bir eşik gücüne sahiptir. Optik iletişim sistemlerinde kanal giriş gücü genellikle 10 mW değerinin altındadır (Agrawal 2002). Bu nedenle kanal sayısı ve kanal giriş gücü arttıkça SRS'nin sistem performansı üzerine etkileri artmaktadır.

SRS'e bağlı olarak farklı dalgaboylarında modifiye işaret gücü

$$P_M[k]=P_T[k]-P_T[k]\sum_{i=k+1}^{N} D[k,i]+\sum_{j=1}^{k-1} P_T[j].D[j,k] \qquad (2.47)$$

$$k=1,2,\ldots N$$

$$D[k,i]=0 \text{ için } i>N$$

$$D[j,k]=0 \text{ için } k=1$$

olarak ifade edilmektedir (M. L. Singh ve Hudiara 2004). Burada eşitliğin sağ tarafında verilen ilk terim yani $P_T[k]$ k-kanalına iletilen toplam güç, ikinci terim yani $P_T[k]\sum_{i=k+1}^{N} D[k,i]$, k- kanalından daha düşük enerjili kanallara iletilen toplam güç,

üçüncü terim yani $\sum_{j=1}^{k-1} P_T[j].D[j,k]$, daha yüksek enerjili kanallardan k- kanalına iletilen toplam güce karşılık gelmektedir.

j kanalının i kanalından tükettiği güç oranı yani D[i,j],

$$D[i,j] = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i}\right).P_T[j]\left\{\frac{(f_i-f_j)}{1.5x10^{13}}\right\}g_{Rmax}\left\{\frac{L_{eff}(\lambda_j)x10^5}{b.A_{eff}}\right\}, (f_i-f_j)\leq 1.5x10^{13}\text{ Hz ve } j>i \\ 0 \qquad\qquad , (f_i-f_j)>1.5x10^{13}\text{ Hz ve } j\leq i \end{cases} \quad (2.48)$$

burada λ_j ve λ_i sırasıyla i. ve j. kanallarının dalgaboyları [nm]; $P_t[j]$ j. kanalda iletilen optik güç [W]; f_i ve f_j sırasıyla i. ve j. kanalın merkez frekansları [Hz]; g_{Rmax} maksimum Raman kazancı [cm/W]; $L_{eff}(\lambda_j)$ dalgaboyuna bağlı etkin uzunluk [km]; A_{eff} fiberin etkin alanı [cm^2]; b ise farklı dalgaboyuna sahip kanalların polarizasyon durumuna göre 1 ve 2 arasında değişim gösteren bir sabittir. Burada EDFA kullanılmayan tek segmentli sistemlerde, (2.39) ile verilen etkin uzunluk değeri kullanılırken; EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde ise kuvvetlendirici sayısı ve aralığı dikkate alındığında etkin uzunluk (L_{eff}) değeri

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha l}}{\alpha}(m+1) \quad (2.49)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada α zayıflama katsayısı; l segment uzunluğu ve m kuvvetlendirici sayısıdır.

Alıcının algıladığı k. kanalın gücü

$$P_R[k] = \begin{cases} P_M[k]e^{-\alpha L}, & Tek\ segmentli\ sistem \\ P_M[k]e^{-\alpha \ell}, & Çok\ segmentli\ sistem \end{cases} \quad (2.50)$$

olarak verilmektedir. Burada L, tek segmentli sistemdeki fiber uzunluğu; ℓ çok segmentli sistemdeki segment uzunluğudur. Çok segmentli sistemde, EDFA'ların kazaçlarının $G=e^{\alpha\ell}$ ve segment uzunluklarının eşit olduğu durum göz önüne alınmaktadır.

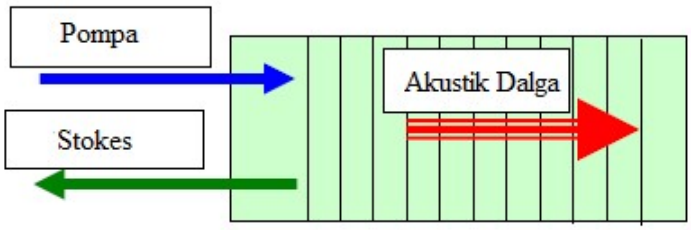
EDFA kullanılmayan tek segmentli uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen FWM ve SRS birleşik etkisi için SXR değeri

$$SXR = 10\log_{10}\frac{P_{SRS}}{P_{FWM}} \tag{2.51}$$

olarak ifade edilmektedir. Burada $P_{SRS,}$ alıcının algıladığı SRS etkisiyle değişen modifiye işaret gücü; $P_{FWM,}$ FWM gürültüsüdür.

2.4.2.2. Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS)

Uyarılmış Brillouin saçılması fotonların akustik dalgalarla etkileşime girmesi sonucunda oluşan ve sadece geri yönde gerçekleşen elastik olmayan saçılmadır. SRS'de molekülün titreşimsel modu saçılmadan sorumluyken, SBS'de ise ortamdaki yoğunluk dalgalanmaları saçılmaya neden olmaktadır. SBS, en düşük eşik değerine sahip doğrusal olmayan etkidir; ancak bir ya da daha fazla optik izolatöre sahip optik kuvvetlendiricilerin kullanıldığı uzak mesafe haberleşme sistemlerinde ciddi bozucu etkilere neden olmaz. Çünkü optik izolatörler SBS nedeniyle geri saçılan ışığı engeller. Şekil 2.14'te uyarılmış Brillouin saçılması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Standart tek modlu fiberde uyarılmış Brillouin saçılması

Raman saçılmasında olduğu gibi, saçılmadan sorumlu foton, pompa foton olarak; saçılan foton ise Stokes foton olarak adlandırılır. Pompa foton yıkılır ve eş zamanlı olarak Stokes foton üretilir. SBS'de, SRS'nin aksine anti-Stokes foton üretimi yoktur. SBS süreci boyunca enerji ve momentum korunur. Enerjinin korunumunda dolayı, pompa fotonun enerjisinin bir kısmı Stokes fotona aktarılırken, bir kısmı ise fonon üretimine neden olur.

2.5. EDFA Kullanılan Çok Segmentli DWDM/UDWDM Sistemlerde FWM, SRS ve ASE Gürültülerinin Birleşik Etkisi

WDM tabanlı optik haberleşme sistemlerinin performansı, kanal giriş gücü, kanal sayısı, toplam iletim uzunluğu, kanallar arası boşluk değerleri, kullanılan kuvvetlendirici sayısı ve segment uzunluğu gibi tasarım parametreleriyle ilişkilidir. Optik fiberde meydana gelen SPM, XPM, FWM, SRS ve ASE gürültüsü gibi olaylar sistem kapasitesini sınırlamaktadır. DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinde, SRS ve FWM sistem kapasitesini sınırlayan en baskın etkilerdir. Bu nedenle, tek segmentli DWDM/UDWDM sistemlerinin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi incelenmelidir.

EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen FWM, SRS ve ASE gürültülerinin birleşik etkisi için OSNR değeri, (2.52) ile ifade edilmektedir.

$$OSNR = 10\log_{10}\frac{P_{SRS}}{P_{FWM} + P_{ASE}} \tag{2.52}$$

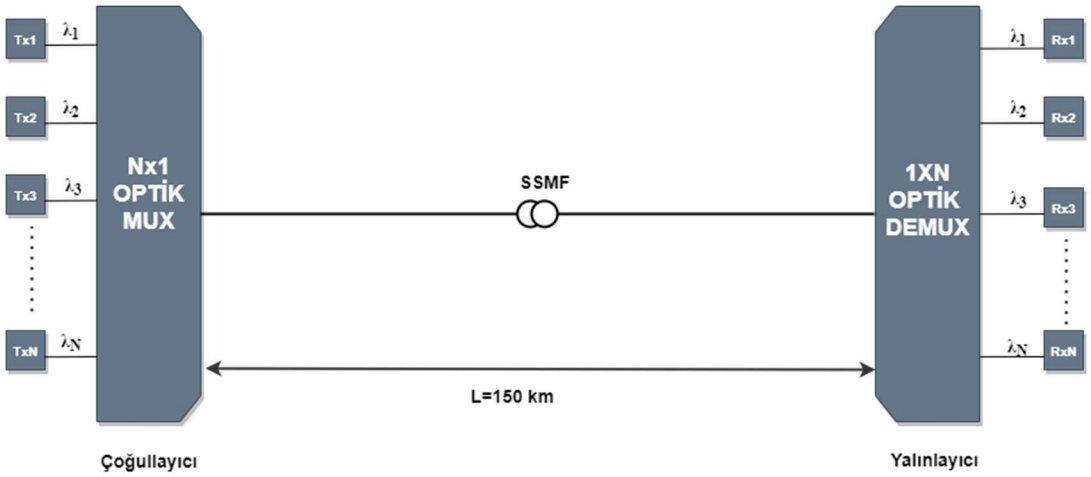
Burada $P_{SRS,}$ alıcının algıladığı, SRS etkisiyle değişen modifiye işaret gücü; $P_{FWM,}$ kanallar arasındaki etkileşimin neden olduğu FWM gürültüsü ve P_{ASE} , kuvvetlendirici kaynaklı ASE gürültüsüdür.

Tek segmentli DWDM/UDWDM sistemlerde ve EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistemlerde, doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmak ve güvenilir uzak mesafe DWDM/UDWDM haberleşme sistemleri tasarlamak için, bu yüksek lisans tezinde 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı uzak mesafe DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanalları dikkate alınarak, tek segmentli sistemlerde işaret çapraz karışım oranı (SXR) benzetimleriyle yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi; EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde optik işaret gürültü oranı (OSNR) benzetimleriyle SRS, FWM ve ASE gürültüsü birleşik etkisi incelenmiştir.

Benzetimlerde kanallar arası boşluk değerleri 3,125 GHz, 6,25 GHz, 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olarak seçilmiştir. Ayrıca G.652 standart tek modlu optik fiber kullanılmıştır. SSMF ve NZDSF kullanan haberleşme sistemlerinde FWM etkisinden en çok etkilenen kanallar merkez kanallardır (Karlık 2016). Bu nedenle benzetimlerde merkez kanallardaki doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmıştır.

2.6. Tek Segmentli ve EDFA Kullanılan Çok Segmentli DWDM/UDWDM Haberleşme Sistemleri Blok Diyagramları

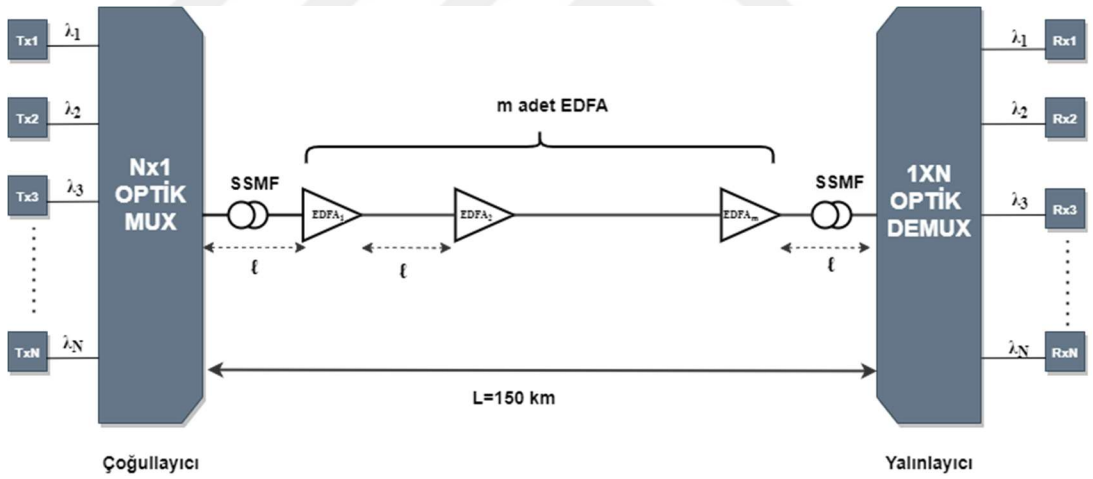
Tek segmentli haberleşme sistemi blok diyagramı Şekil 2.15'te verilmektedir. Sistem, verici, optik çoğullayıcı, optik fiber iletim ortamı, optik yalınlayıcı ve alıcıdan oluşmaktadır. Vericide, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 ..... \lambda_N$ dalgaboylarında optik işaret üretilmektedir. Farklı dalgaboylarına sahip optik işaretler çoğullanarak iletim ortamına aktarılır. İletim ortamında yayılan çoğullanmış işaretler, doğrusal olmayan olayların ve zayıflamanın etkisine maruz kalır, işarette bozulmalar meydana gelir. Çoğullanan işaretler optik yalınlayıcı tarafından $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 ..... \lambda_N$ dalgaboylarına ayrıştırılır ve alıcı tarafından algılanır.



Şekil 2.15. Tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemi blok diyagramı

EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemi blok diyagramı Şekil 2.16'da gösterilmektedir. Sistem, verici, optik çoğullayıcı, optik fiber iletim ortamı, m adet EDFA, optik yalınlayıcı ve alıcıdan oluşmaktadır. Vericide, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 ..... \lambda_N$

dalgaboylarında optik işaret üretilmektedir. Farklı dalgaboylarına sahip optik işaretler çoğullanarak iletim ortamına aktarılır. İletim ortamında yayılan çoğullanmış işaretler, doğrusal olmayan olayların ve zayıflamanın etkisine maruz kalır, işarette bozulmalar meydana gelir. İşarette meydana gelen zayıflama etkisini azaltmak için EDFA kullanılır; ancak EDFA'nın kuvvetlendirme mekanizmasının yapısı gereği kuvvetlendirilmiş kendiliğinde yayınım (ASE) gürültüsü oluşmaktadır. İlk kuvvetlendirici optik çoğullayıcıdan ℓ km uzaklıkta konumlandırılır ve sistemde kullanılan tüm hatiçi kuvvetlendiriciler arasındaki uzaklığın eşit ve ℓ km olduğu varsayılmaktadır. Sistemde, $m=(L/\ell)-1$ adet EDFA bulunmaktadır. Sistemde kullanılan EDFA sayısı 1, 2, 4 ve 5 olarak değerlendirildiğinde, toplam 150 km'lik hat uzunluğu için, EDFA aralıkları sırasıyla 75 km, 50 km, 30 km ve 25 km olacaktır. Böylece hem EDFA sayısının hem de EDFA aralıklarının sistemde oluşan doğrusal olmayan olaylara etkisi incelenmektedir. İletim ortamında iletilen çoğullanmış işaret optik yalınlayıcı tarafından tarafından $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \ldots\ldots \lambda_N$ dalgaboylarına ayrıştırlır ve alıcı tarafından algılanır.



Şekil 2.16. EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemi blok diyagramı

Şekil 2.15 ve Şekil 2.16 ile verilen blok diyagramları dikkate alınarak benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerde, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen doğrusal olmayan etkiler karşılaştırılmıştır. Ayrıca haberleşme sisteminde kullanılan EDFA sayısının ve aralıklarının doğrusal olmayan olaylara etkisi incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Benzetim Modeli

Bu alt bölümde, tek segmentli haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisinin karşılaştırıldığı ve EDFA kullanılan çok segmentli haberleşme sistemlerinde FWM, SRS ve ASE'nin birleşik etkisinin farklı kuvvetlendirici sayıları ve aralıkları için karşılaştırıldığı benzetim modelleri, fiber parametreleri ve benzetim koşulları açıklanmıştır.

Benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı haberleşme sistemlerinin merkez kanallarının dalgaboyu 1550 nm olarak belirlenmiş ve bu dalgaboyu bölgesine uyumlu G.652 standart tek modlu fiber (SSMF) kullanılmıştır. Kullanılan optik fibere ait parametreler Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Benzetimlerde, alıcıda merkez kanaldaki işareti elde etmek için kullanılan optik filtrenin merkez dalgaboyu 1550 nm ve bantgenişliği sistemin kanallar arası boşluk değerine eşit seçilmiştir.

Çizelge 3.1. 1550 nm çalışma dalgaboyu aralığında SSMF parametreleri

	D_c (ps/nm.km)	S (ps/nm^2km)	γ $(W.km)^{-1}$	α (dB/km)
SSMF	18	0,089	1,120	0,195

SSMF ve NZDSF kullanan sistemlerde, merkez kanallar diğer kanallara göre FWM etkisinden daha ağır etkilendiği için (Karlık 2016a), 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı sistemlerin sırasıyla 4., 8., 16., ve 32. kanalları yani merkez kanalları dikkate alınarak benzetimler yapılmıştır. 7-, 15- ve 31- kanallı haberleşme sistemlerinde üretilen FWM ürünleri, sırasıyla Çizelge 3.2-3.4'te verilmiştir. 63-kanallı haberleşme sisteminde üretilen FWM ürün çizelgesine sayfa sınırlarına sığmadığı için yer verilmemiştir.

Çizelge 3.2. 7- kanallı optik fiberli haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri

i/j	1	2	3	4	5	6	7
1					k=2	k=3	k=4
2			k=1		k=3	k=4	k=5
3			k=2		k=4	k=5	k=6
4							
5					k=6	k=7	
6							
7							

Çizelge 3.3. 15-kanallı optik fiberli 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 3.4. 31- kanallı optik fiberli 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 3.2- 3.4'te f_i frekanslı i. kanal, f_j frekanslı j. kanal ve f_k frekanslı k. kanal etkileşime girerek, DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında FWM ürünlerini oluşturmaktadır. Örneğin 31 kanallı sistemde 13. kanal (i=13), 18. kanal (j=18) ve 15. kanal (k=15) etkileşime girerek, sistemin merkez kanalında yani 16. kanalda f_{ijk} frekanslı yeni bir dalga üretmektedir. Yeni dalganın üretiminde $k \neq i, j$ şartına dikkat edilmiştir.

3.2. SXR/OSNR-Giriş Gücü Benzetim Koşulları

Bu alt bölümde, SXR/OSNR- giriş gücü benzetimlerinde dikkat edilen benzetim koşulları yer almaktadır. Tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli optik fiberli haberleşme sistemlerinde, 1550 nm dalgaboyu bölgesinde benzetimler yapılmıştır. Tüm kanalların giriş güçlerinin eşit olduğu varsayılmıştır. Kanal giriş güçleri, 0.1 mW ve 5 mW aralığında değiştirilerek tek segmentte yalın FWM ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve çok segmentli sistemde farklı kuvvetlendirici sayılarında ve aralıklarında FWM, SRS ve ASE'nin birleşik etkileri karşılaştırılmıştır.

Tek segmentli ve çok segmentli optik fiberli haberleşme sistemi için iletim uzunluğu 150 km olarak seçilmiştir. EDFA kullanılan çok segmentli sistem yapısında 1, 2, 4 ve 5 adet EDFA kullanıldığı durumlar için, kuvvetlendirici aralıkları (segment uzunlukları) sırasıyla 75 km, 50 km, 30 km ve 25 km olarak belirlenmiştir. ITU-T G.694.1'e göre, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe UDWDM sistem için kanallar arası boşluk değerleri 3.125 GHz ve 6.25 GHz, DWDM sistem için 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz olarak alınmıştır.

Tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkileri altındaki DWDM/UDWDM optik haberleşme sistemlerinin performansını analiz etmek için, literatürde minimum SXR/OSNR değerleri 20-25 dB aralığında seçilmiştir (Nakajima ve diğerleri 1997; Harboe ve diğerleri 2008). Bu çalışmada minimum SXR/OSNR kriteri 23 dB olarak belirlenmiştir. Bölüm 4.1'de benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

3.3. SXR/OSNR-Kanallar Arası Boşluk Değeri Benzetim Koşulları

Bu alt bölümde SXR/OSNR-kanallar arası boşluk değeri benzetimleri için belirlenen benzetim koşulları yer almaktadır. EDFA'ların çalışma bölgesine uygun olarak çalışma dalgaboyu 1550 nm alınmıştır. Bu benzetimlerde, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe DWDM/UDWDM haberleşme sistemleri için kanallar arası boşluk değerleri 3.125 GHz-100 GHz aralığında değiştirilmiştir.

Tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli sistem yapılarında, minimum 23 dB SXR/OSNR kriterinin büyük ölçüde sağlanabilmesi için, tüm kanalların giriş güçlerinin eşit ve 0,1 mW değerinde olduğu kabul edilmiştir.

DWDM/UDWDM tek segmentli ve çok segmentli uzak mesafe haberleşme sisteminin iletim yapısı göz önüne alınarak çoğullayıcı ve optik filtre arasındaki toplam fiber uzunluğu 150 km olarak belirlenmiştir. EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistem yapısında 1, 2, 4 ve 5 EDFA kullanıldığı durumlar göz önüne alınarak, segment uzunlukları sırasıyla 75 km, 50 km, 30 km ve 25 km olarak alınmıştır. Bölüm 4.2'de benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

3.4. SXR/OSNR-Kanal Uzunluğu Benzetim Koşulları

Bu alt bölümde, SXR/OSNR-kanal uzunluğu benzetimleri için belirlenen benzetim koşulları açıklanmıştır. EDFA'ların çalışma bölgesine uygun olarak, çalışma dalgaboyu 1550 nm seçilmiştir. Tüm kanalların giriş güçlerinin eşit ve 0,1 mW değerinde olduğu kabul edilmiştir. Kanallar arası boşluk değerleri DWDM/UDWDM standartlarına uygun şekilde 3.125 GHz, 6.25 GHz, 12.5 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olarak alınmıştır.

Tek segmentli DWDM/UDWDM sistemler için çoğullayıcı ve optik filtre arasındaki toplam fiber uzunluğu 1-150 km aralığında değiştirilmiştir. EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistemlerde çoğullayıcı ve optik filtre arasındaki fiber uzunluğu değişimleri, tasarımda kullanılan EDFA sayısına bağlı olarak kuvvetlendiriciler arasındaki mesafenin de değişimine neden olmaktadır. Örneğin, çoğullayıcı ve optik filtre arasındaki toplam fiber uzunluğu 150 km ise, 1, 2, 4 ve 5 adet EDFA kullanıldığında, kuvvetlendiriciler arası mesafe sırasıyla 75 km, 50 km, 30 km ve 25 km olmaktadır. Bölüm 4.3'te benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

3.5. OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Koşulları

Bu alt bölümde, OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetimleri için belirlenen benzetim koşulları verilmiştir. EDFA'ların çalışma bölgesine uygun olarak çalışma dalgaboyu 1550 nm olarak belirlenmiştir. Tüm kanalların giriş güçlerinin eşit ve 0.1 mW değerinde olduğu kabul edilmiştir. Kanallar arası boşluk değerleri, DWDM/UDWDM standartlarına uygun olarak 3.125 GHz, 6.25 GHz, 12.5 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olarak alınmıştır.

EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sisteminde, çoğullayıcı ve optik filtre arasındaki toplam fiber uzunluğu sabit değerde ve 150 km olarak alınmıştır. Kuvvetlendirici sayısı 1-5 aralığında değiştirilmiştir. Bölüm 4.4'te benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

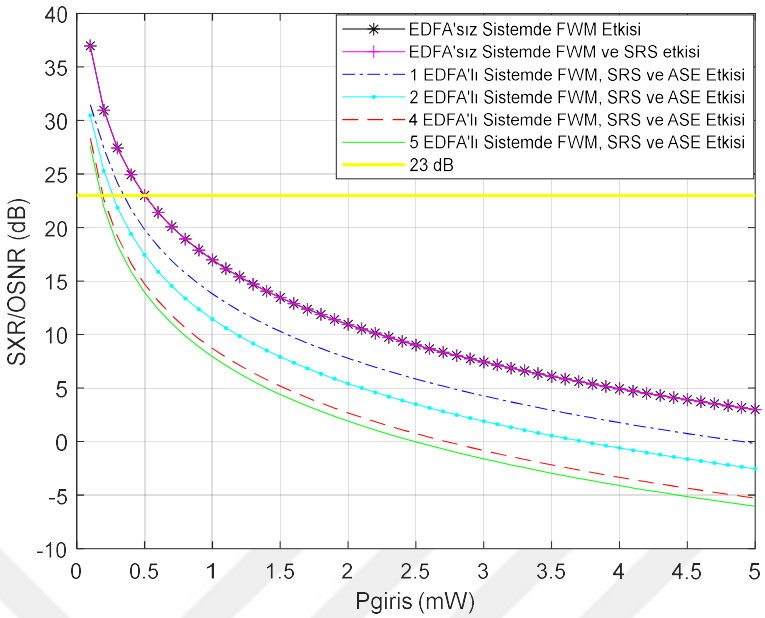
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, 2. Bölüm'de verilen matematiksel eşitlikler ile 3. Bölüm'de açıklanan benzetim modeli ve benzetim koşulları kullanılarak, MATLAB 2021a benzetim programı aracılığıyla elde edilen, tek segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE'nin birleşik etkisi altında; SXR/OSNR değerlerinin kanal giriş güçleri (Pgiriş), kanallar arası boşluk değerleri (Δf), kanal uzunlukları (L) ve kuvvetlendirici sayısı (m) ile değişimlerini gösteren benzetim sonuçları ve yorumları yer almaktadır.

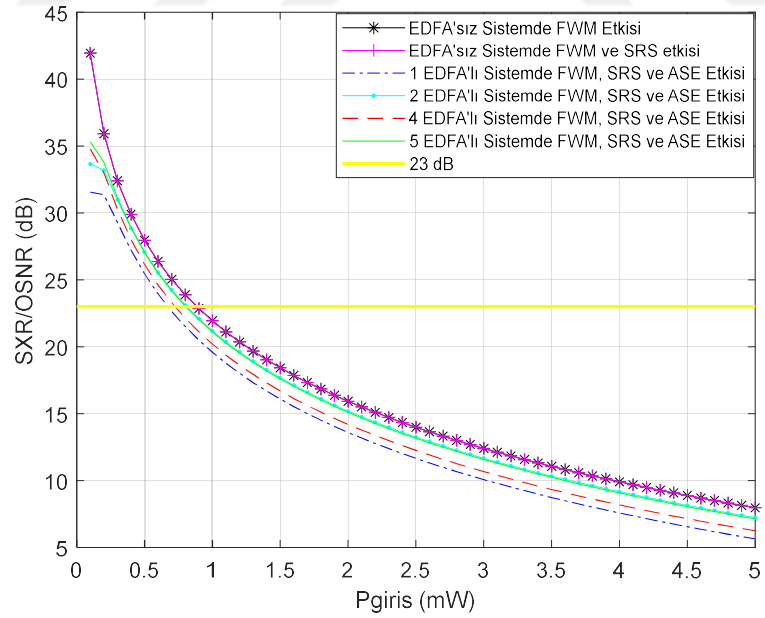
4.1. SXR/OSNR-Kanal Giriş Gücü Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.2'de açıklanan benzetim koşulları altında, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında farklı kanallar arası boşluk değerleri için giriş gücünün 0,1 mW-5 mW aralığında değiştirilmesiyle elde edilen SXR/OSNR değişimlerine ait benzetimler, Şekil 4.1-4.24'te yer almaktadır.

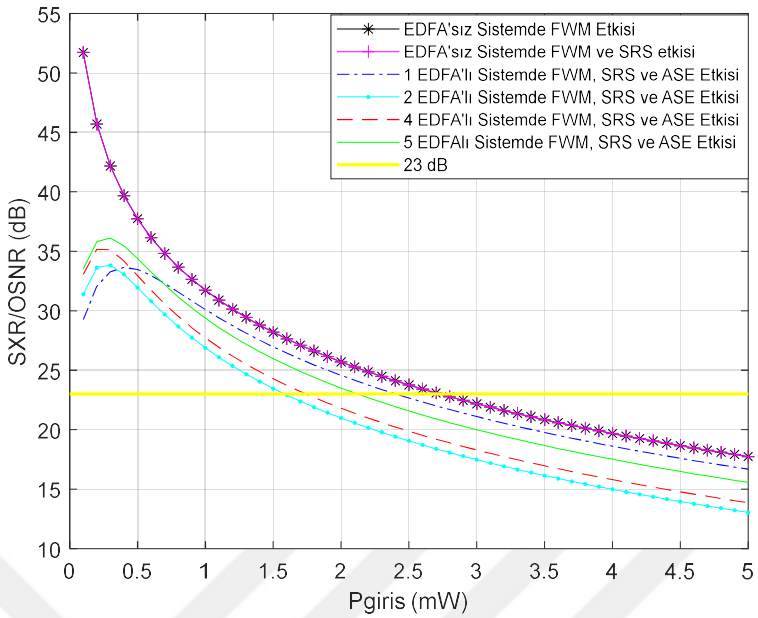
Tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi dikkate alındığında, minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan maksimum ve minimum kanal giriş güçlerine ait karşılaştırmalar Çizelge 4.1-4.8'de yer almaktadır.



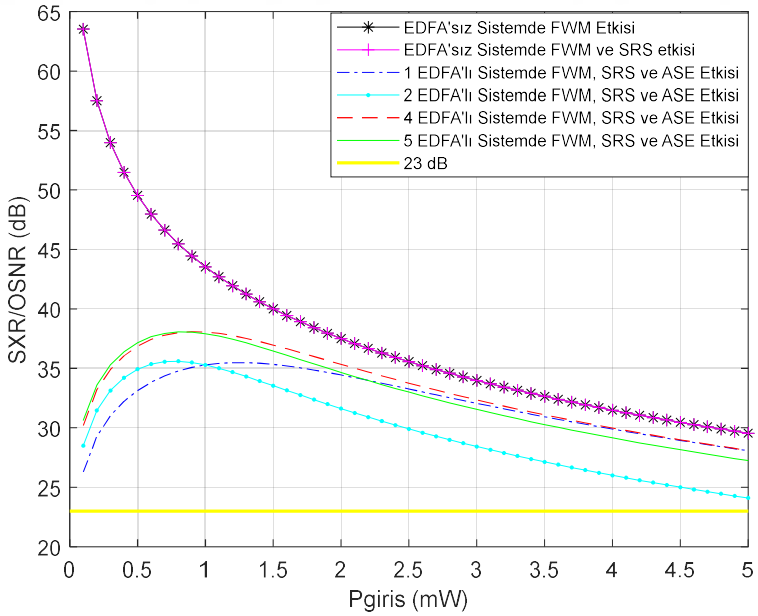
Şekil 4.1. Δf=3,125 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



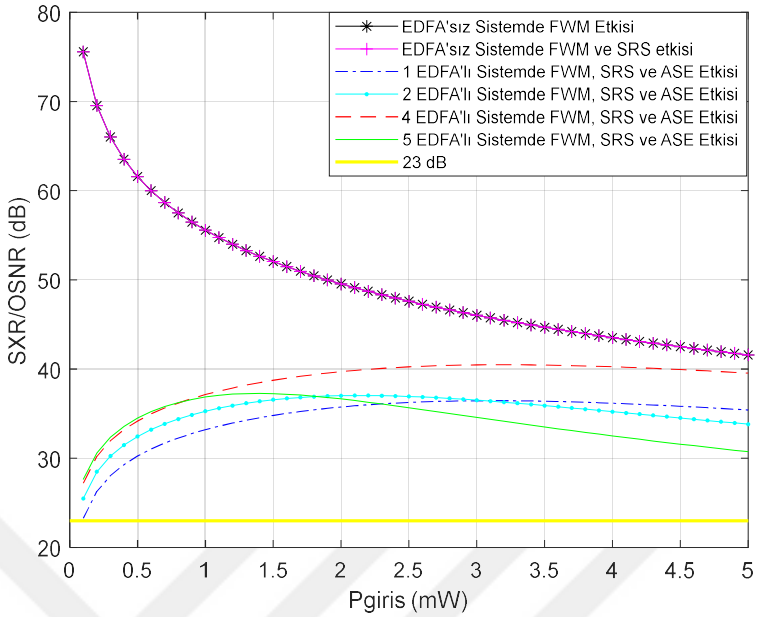
Şekil 4.2. Δf=6,25 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



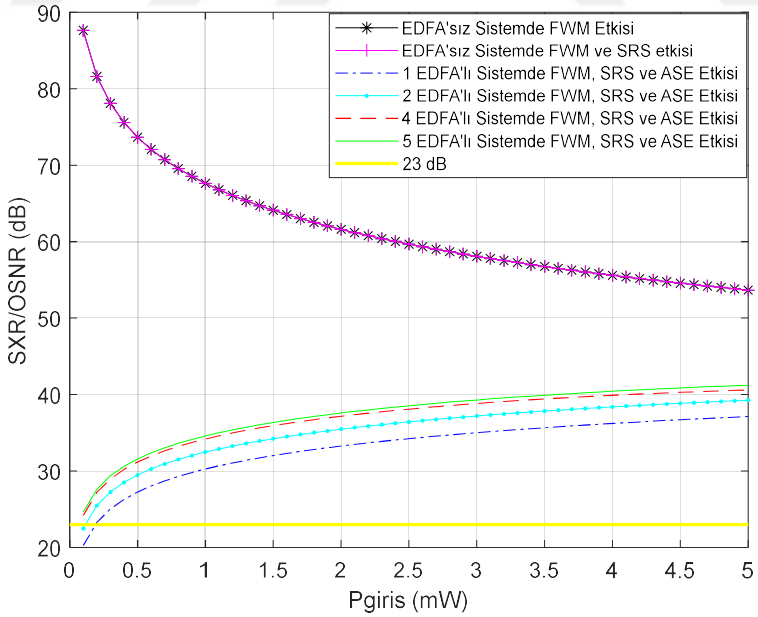
Şekil 4.3. Δf=12,5 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



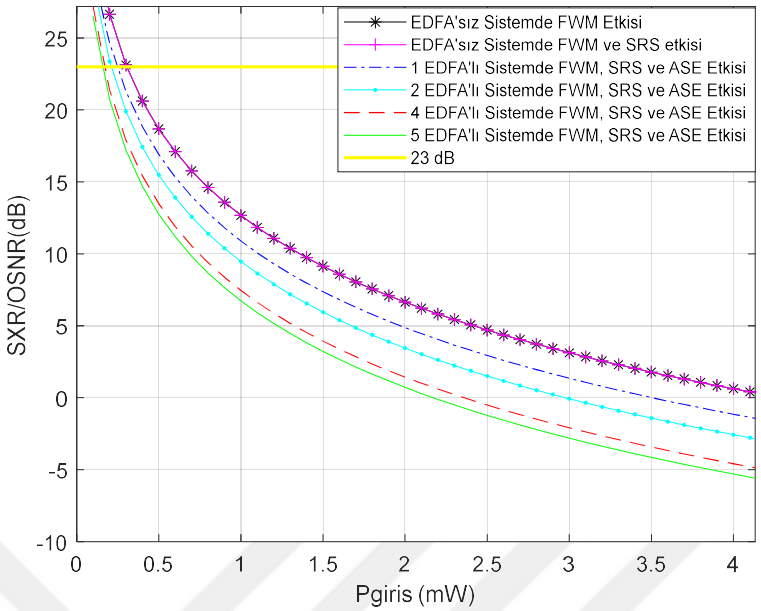
Şekil 4.4. Δf=25 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



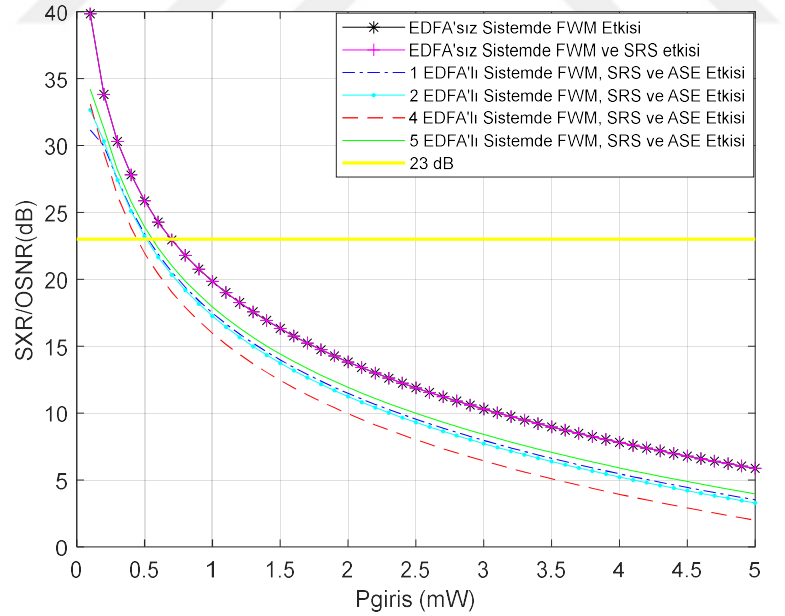
Şekil 4.5. Δf=50 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



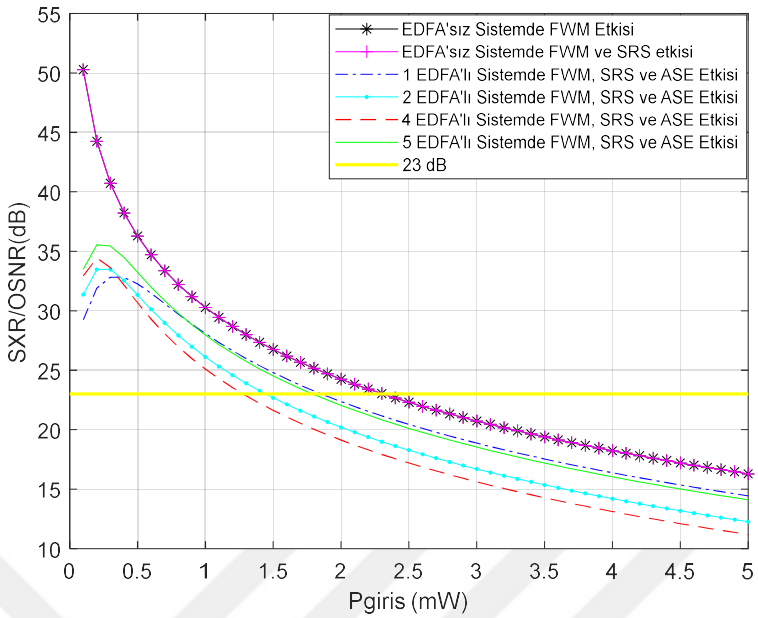
Şekil 4.6. Δf=100 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



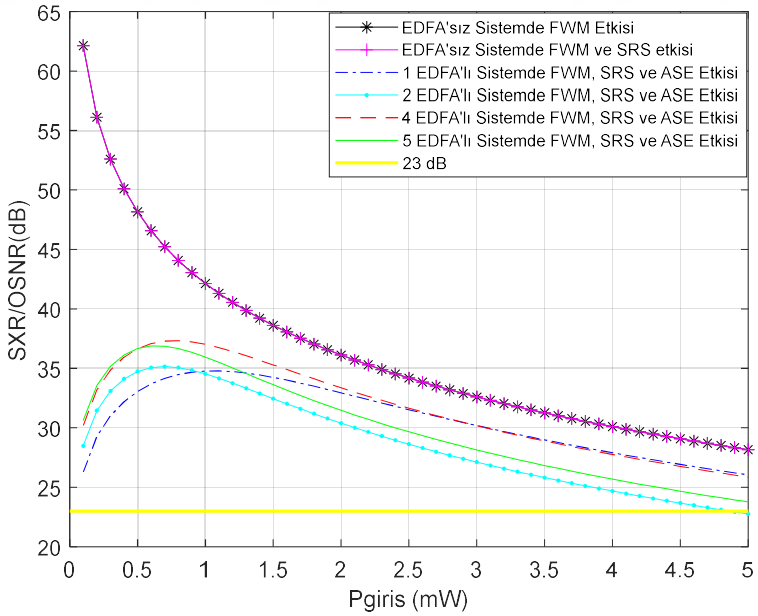
Şekil 4.7. Δf=3,125 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



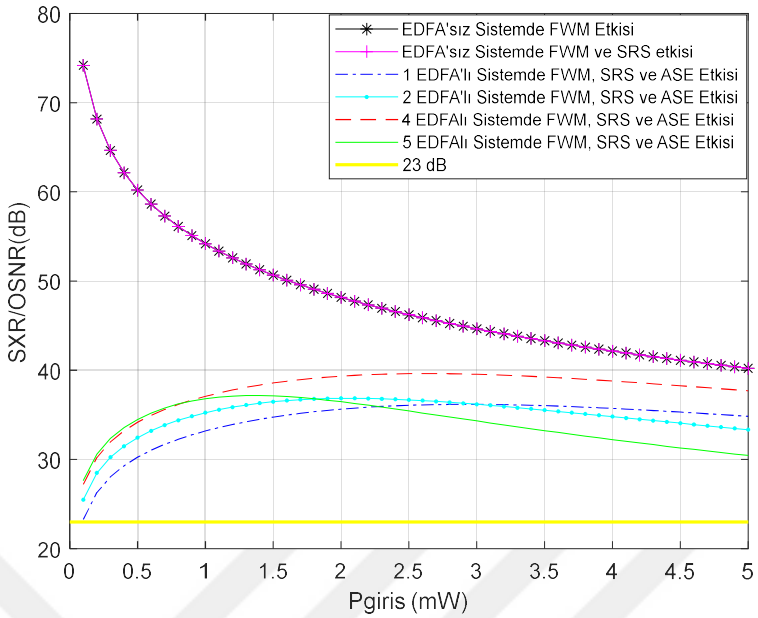
Şekil 4.8. Δf=6,25 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



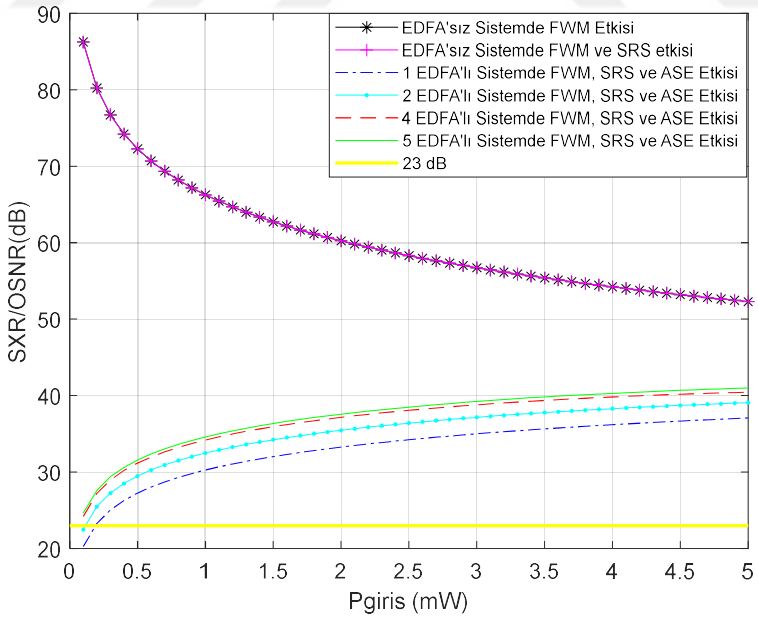
Şekil 4.9. Δf=12,5 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



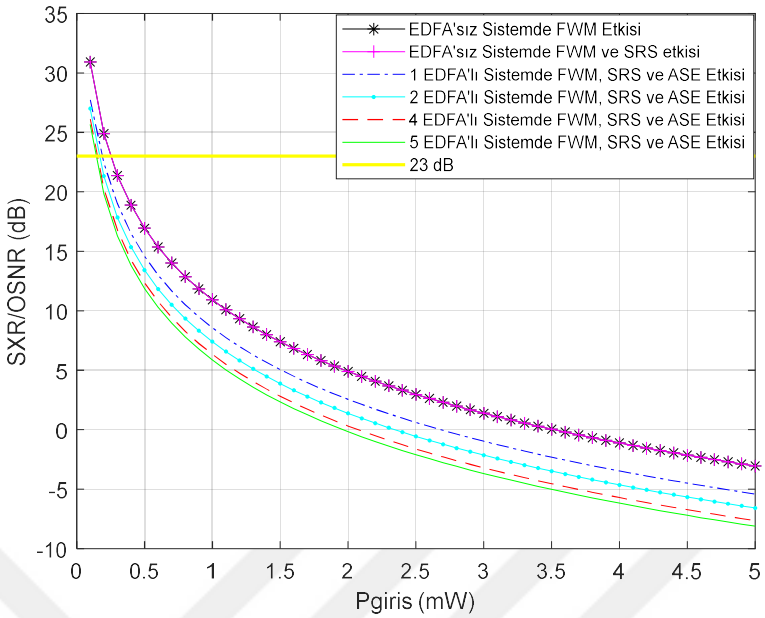
Şekil 4.10. Δf=25 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



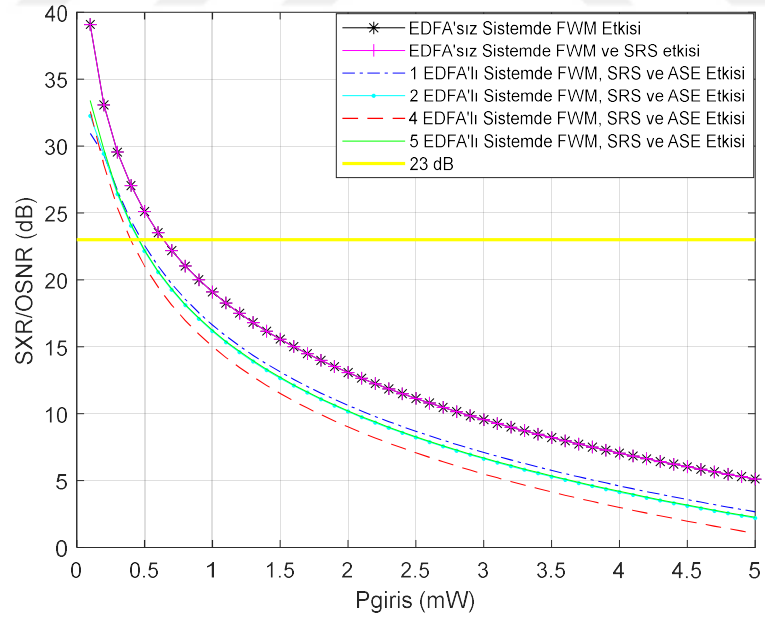
Şekil 4.11. Δf=50 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



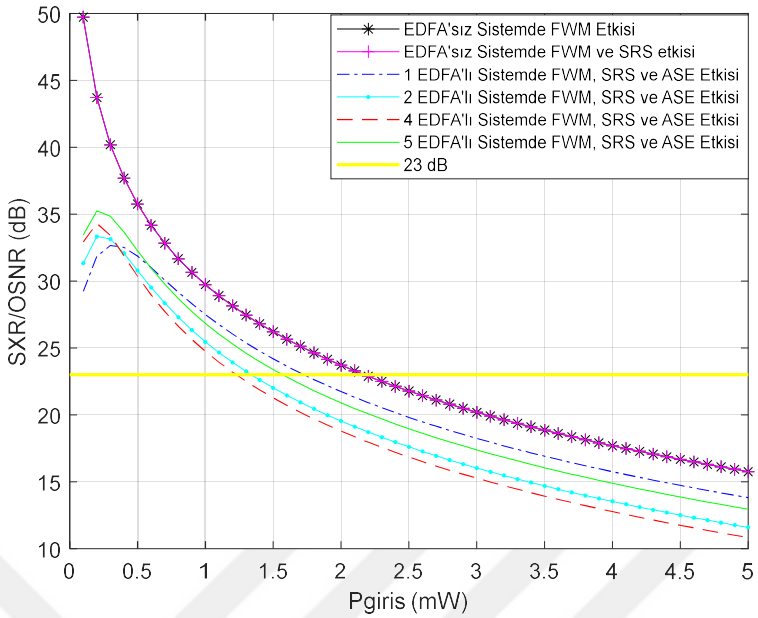
Şekil 4.12. Δf=100 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



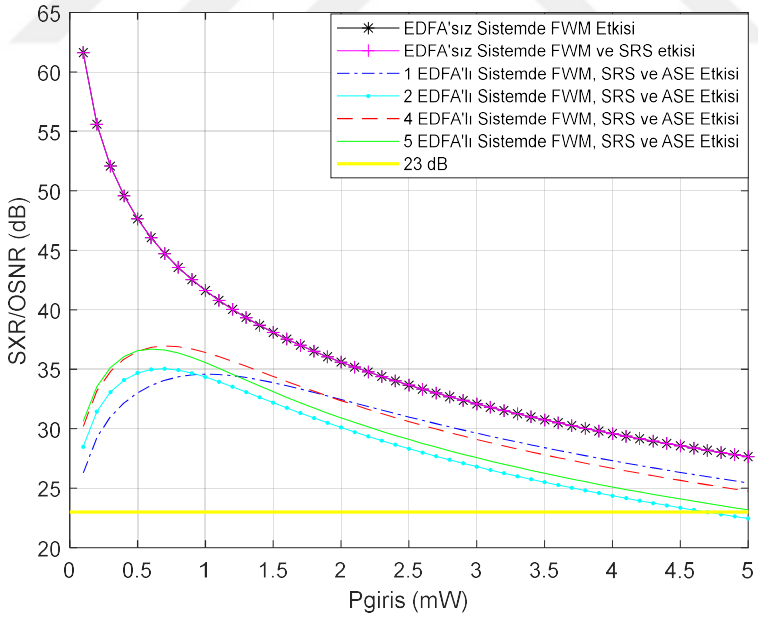
Şekil 4.13. Δf=3,125 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



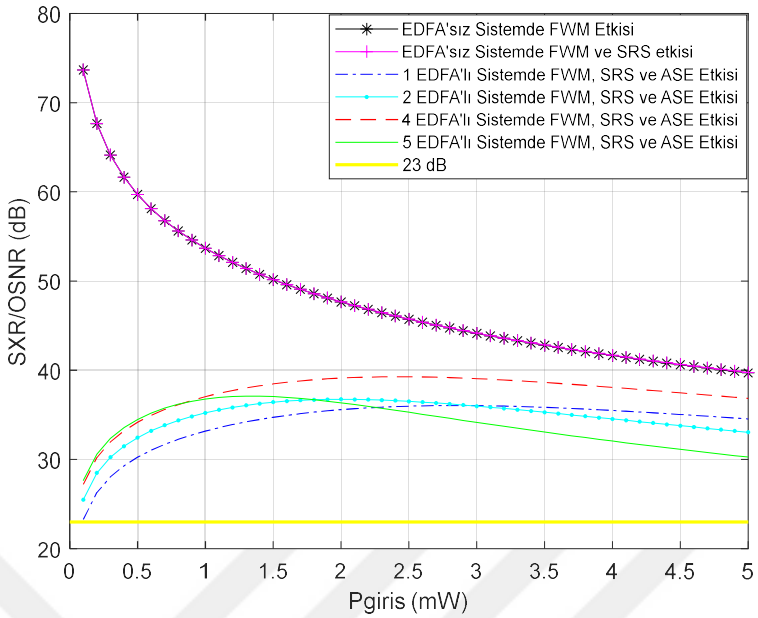
Şekil 4.14. Δf=6,25 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



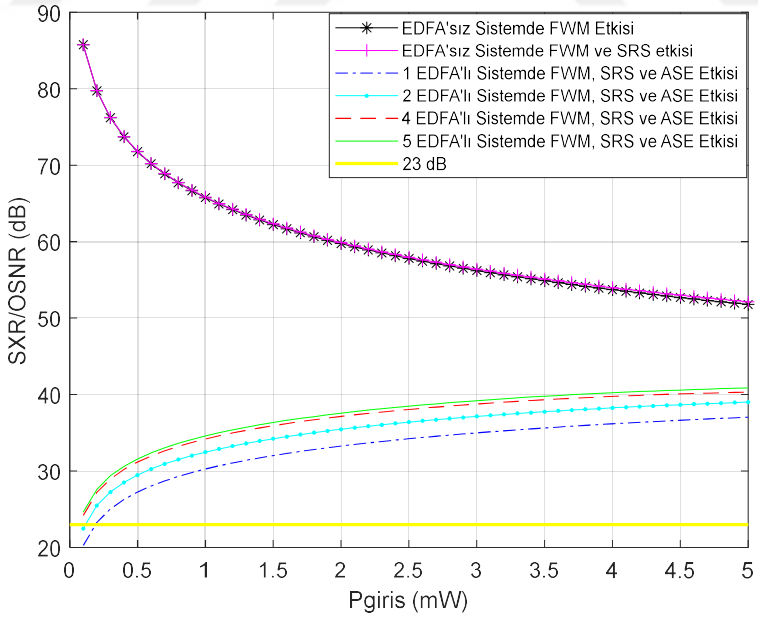
Şekil 4.15. Δf=12,5 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



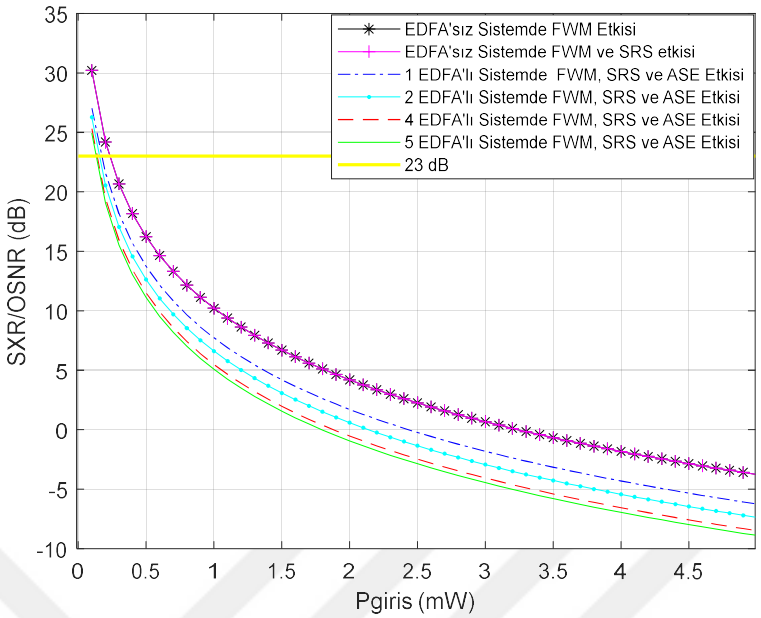
Şekil 4.16. Δf=25 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



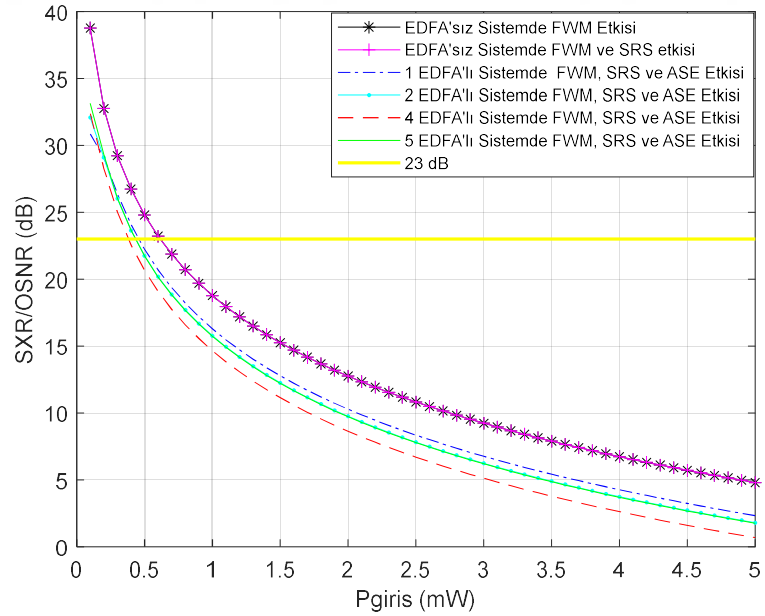
Şekil 4.17. Δf=50 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



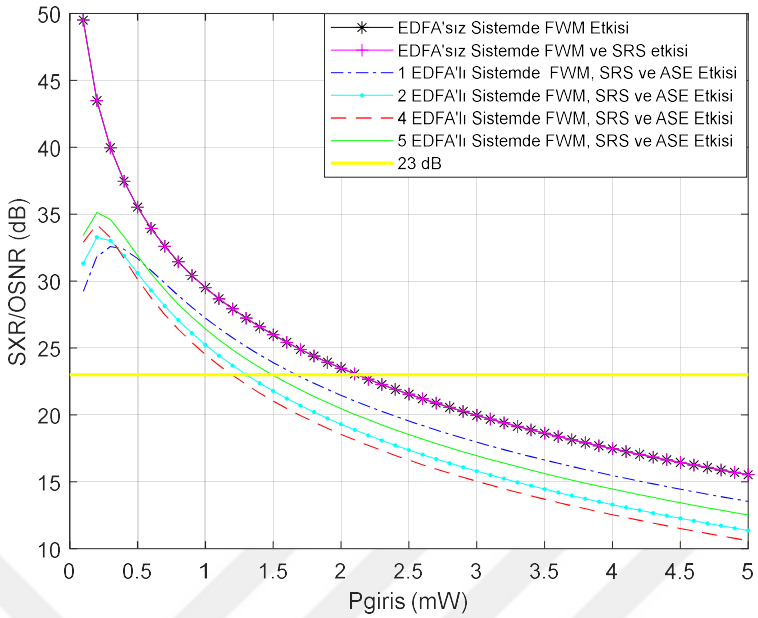
Şekil 4.18. Δf=100 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



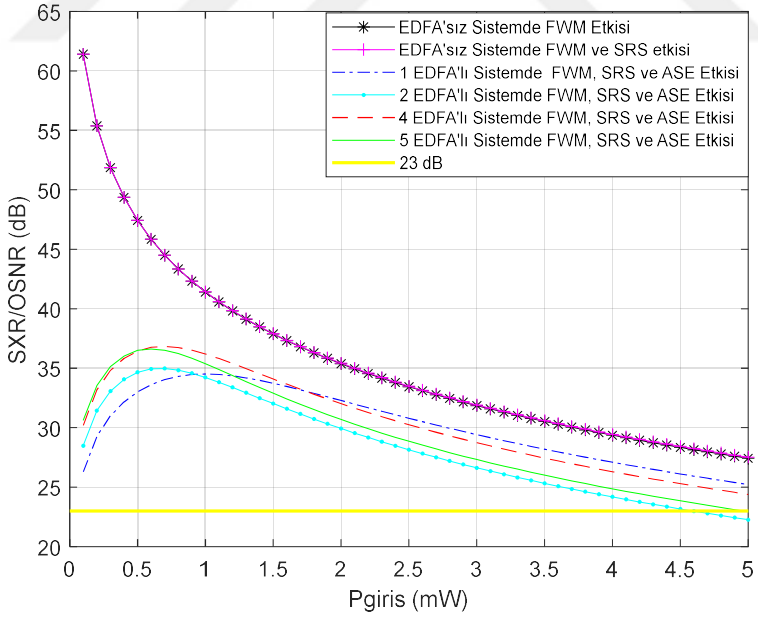
Şekil 4.19. Δf=3,125 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



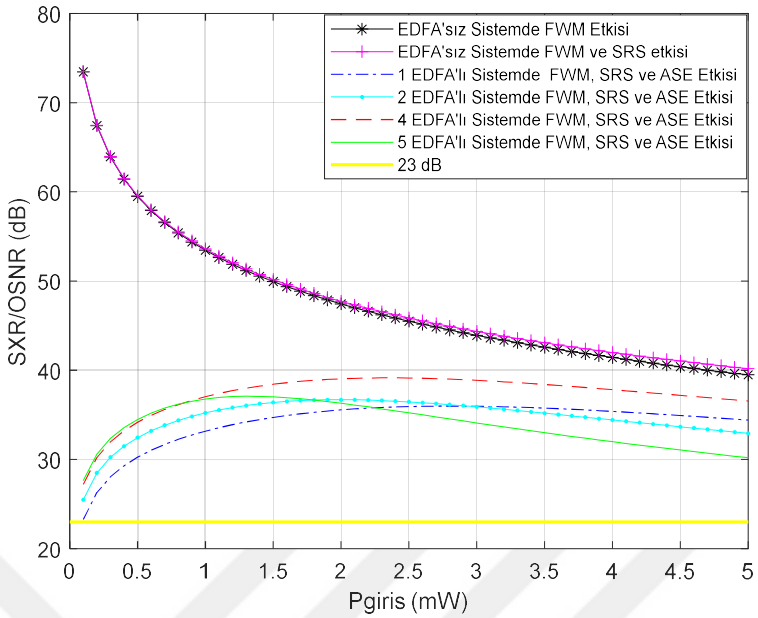
Şekil 4.20. Δf=6,25 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



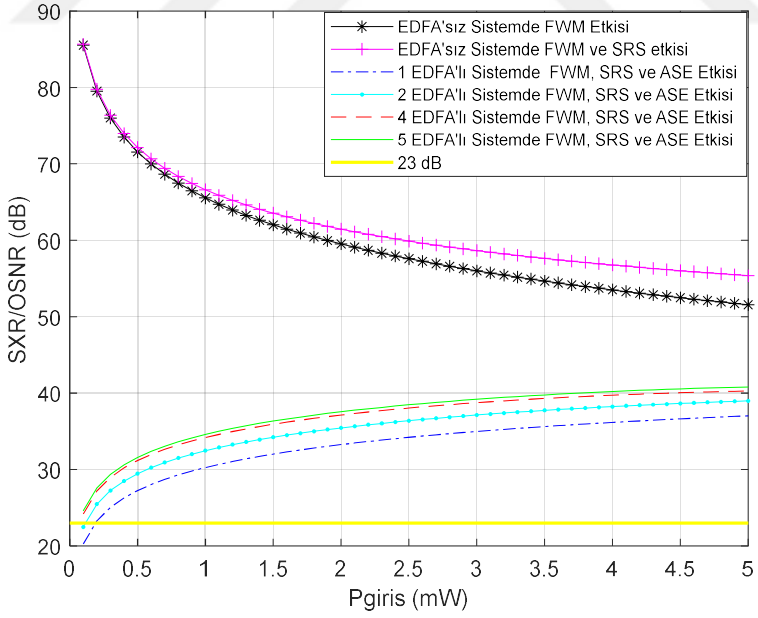
Şekil 4.21. Δf=12,5 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



Şekil 4.22. Δf=25 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



Şekil 4.23. Δf=50 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri



Şekil 4.24. Δf=100 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-$P_{giriş}$ değişimleri

Şekil 4.1-4.6 ile gösterilen benzetimlerden elde edilen sonuçlara göre, Çizelge 4.1 ve 4.2'de tek segmentli 7-kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli 7-kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE'nin birleşik etkisi altında minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki maksimum ve minimum kanal giriş gücü değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1. 7-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

7- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**3.125**	**6.25**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/0,50	0,10/0,89
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/0,50	0,10/0,89
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,35	0,10/0,67
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,27	0,10/0,81
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,19	0,10/0,72
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,18	0,10/0,80

Çizelge 4.2. 7-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

7- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**12.5**	**25**	**50**	**100**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/2,73	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/2,73	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/2,40	0,10/5,00	0,10/5,00	0,19/5,00
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,58	0,10/5,00	0,10/5,00	0,12/5,00
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,74	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/2.12	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00

Şekil 4.7-4.12 ile gösterilen benzetimlerden elde edilen sonuçlara göre, Çizelge 4.3 ve 4.4'te tek segmentli 15-kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli 15- kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE'nin birleşik etkisi altında minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW-5 mW aralığındaki maksimum ve minimum kanal giriş gücü değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.3. 15-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

15- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**3.125**	**6.25**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/0,31	0,10/0,70
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/0,31	0,10/0,70
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,25	0,10/0,53
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,21	0,10/0,54
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,17	0,10/0,45
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,16	0,10/0,56

Çizelge 4.4. 15-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

15- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**12.5**	**25**	**50**	**100**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/2,31	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/2,31	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,86	0,10/5,00	0,10/5,00	0,19/5,00
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,45	0,10/4,86	0,10/5,00	0,12/5,00
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,28	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,79	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00

Şekil 4.13-4.18 ile gösterilen benzetimlerden elde edilen sonuçlara göre, Çizelge 4.5 ve 4.6'da tek segmentli 31-kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli 31- kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE'nin birleşik etkisi altında minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW-5 mW aralığındaki maksimum ve minimum kanal giriş gücü değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.5. 31-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

31- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**3.125**	**6.25**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/0,26	0,10/0,64
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/0,26	0,10/0,64
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,19	0,10/0,48
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,17	0,10/0,46
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,15	0,10/0,40
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,14	0,10/0,46

Çizelge 4.6. 31-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

31- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**12.5**	**25**	**50**	**100**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/2,17	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/2,17	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,73	0,10/5,00	0,10/5,00	0,19/5,00
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,34	0,10/4,69	0,10/5,00	0,12/5,00
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,23	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,57	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00

Şekil 4.19-4.24 ile gösterilen benzetimlerden elde edilen sonuçlara göre, Çizelge 4.7 ve 4.8'de tek segmentli 63-kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli 63-kanallı uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE'nin birleşik etkisi altında minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki maksimum ve minimum kanal giriş gücü değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.7. 63-kanallı UDWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

63- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**3.125**	**6.25**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/0,23	0,10/0,62
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/0,23	0,10/0,62
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,17	0,10/0,46
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,16	0,10/0,43
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,14	0,10/0,38
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/0,13	0,10/0,43

Çizelge 4.8. 63-kanallı DWDM tek segmentli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarda minimum 23 dB SXR/OSNR kriterini sağlayan 0,1 mW- 5 mW aralığındaki minimum ve maksimum kanal giriş güçleri

63- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**12.5**	**25**	**50**	**100**
EDFA'sız Sistemde Yalın FWM Etkisi	**$P_{girişmin}/P_{girişmax}$ (mW)**	0,10/2,11	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		0,10/2,12	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,67	0,10/5,00	0,10/5,00	0,19/5,00
2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,30	0,10/4,59	0,10/5,00	0,12/5,00
4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,19	0,10/5,00	0,10/5,00	0,10/5,00
5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		0,10/1,49	0,10/4,96	0,10/5,00	0,10/5,00

Şekil 4.1-24 ile verilen benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı tek segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında giriş gücü arttıkça SXR değerleri ekponansiyel olarak azalış göstermektedir. Bunun sebebi, (2.38) ile gösterilen FWM gücü denkleminde de görüleceği gibi, kanal giriş gücü arttıkça, FWM gücünün ekponansiyel artış göstermesi, FWM gücünde oluşan bu artışın, (2.42) ve (2.51) ile verilen SXR değerlerinde azalışa neden olmasıdır.

Şekil 4.1-24 ile verilen benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı tek segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, kanallar arası boşluk değeri arttıkça SXR değeri artış göstermektedir. Kanallar arası boşluk değeri arttıkça, (2.41) ile ifade edilen faz uyumsuzluğu değeri artış göstermekte, faz uyumsuzluğunda oluşan bu artış, (2.40) ile ifade edilen FWM verimliliği değerinde azalışa neden olmakta ve bu durum FWM gücünün azalarak SXR değerini artırmasıyla sonuçlanmaktadır.

Şekil 4.1-24 ile verilen benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı tek segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, aynı kanallar arası boşluk değeri ve giriş gücüne sahip haberleşme sistemlerinde kanal sayısı arttıkça SXR değeri azalış göstermektedir; çünkü kanal sayılarının artması doğrusal olmayan etkilerin artışına neden olmakta ve bu durum SXR değerinin azalmasıyla sonuçlanmaktadır.

Şekil 4.1-24 ile verilen benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı tek segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, kanallar arası boşluk değerinin daha dar olduğu UDWDM sistemlerde, yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisine ait SXR değerleri arasında çok küçük farklılıklar bulunmaktadır ve bu farklılıklar ihmal edilebilir. Kanallar arası boşluk değeri, kanal sayısı ve kanal giriş gücünün artışıyla bu farklılıklar belirginleşmektedir. Bu farklılıklar, özellikle kanallar arası boşluk değerinin 50 GHz ve 100 GHz olduğu; giriş gücünün 2 mW değerinden yüksek olduğu 63-kanallı sistemlerde açık bir şekilde görülmektedir. 100 GHz kanallar arası boşluk değerine sahip 31- kanallı ve 63-kanallı sistemlerde, 0,5-5 mW giriş gücü aralığında, FWM ve SRS birleşik etkisine ait SXR

değerleri yalın FWM etkisine ait SXR değerlerine kıyasla sırasıyla 0,04-0,34 dB ve 0,57-3,81 dB daha yüksektir (Kılınçarslan ve Karlık, 2021).

Kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz ve 6,25 GHz olduğu Şekil 4.1, 4.2, 4.7, 4.8, 4.13, 4.14, 4.19, 4.20 ile verilen benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen OSNR değeri, 0,1-5 mW giriş gücü aralığında eksponansiyel olarak azalış göstermektedir. Şekil 4.1, 4.7, 4.13, 4.14, 4.19 ve 4.20'ye göre, en yüksek OSNR değeri bir adet EDFA kullanılan iki segmentli haberleşme sisteminde elde edilmiştir. Şekil 4.2'ye göre en yüksek OSNR değeri, iki adet EDFA kullanılan üç segmentli, Şekil 4.8'e göre beş EDFA kullanılan altı segmentli haberleşme sisteminde elde edilmiştir. Kanallar arası boşluk değerinin 3,125 GHz ve 6,25 GHz olduğu 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, minimum 23 dB OSNR kriterini sağlayan minimum giriş güçleri, Çizelge 4.1, 4.3, 4.5, 4.7'ye göre eşit ve 0,1 mW'tır. Ayrıca kanallar arası boşluk değerinin 3,125 GHz olduğu 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı sistemlerin merkez kanallarında, minimum 23 dB OSNR kriterini sağlayan maksimum giriş güçleri, sistemde kullanılan EDFA sayısı arttıkça azalış göstermiştir.

Kanallar arası boşluk değerlerinin 12,5 GHz ve 25 GHz olduğu Şekil 4.3, 4.4, 4.9, 4.10, 4.15, 4.16, 4.21, 4.22 ile verilen benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı EDFA kullanılan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen OSNR değeri, giriş gücünün belirli bir kritik değerine kadar artış gösterirken, bu kritik değerden sonra ekponansiyel olarak azalış göstermektedir. Kanallar arası boşluk değerinin 12,5 GHz olduğu 7- kanallı 1, 2, 4 ve 5 EDFA kullanılan çok segmentli sistemler için, bu kritik giriş gücü değerleri sırasıyla 0,4 mW, 0,3 mW, 0,2 mW ve 0,3 mW iken; 25 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 1,2 mW, 0,8 mW, 0,9 mW ve 0,7 mW'tır. Kanallar arası boşluk değerinin 12,5 GHz olduğu 15- kanallı 1, 2, 4 ve 5 EDFA kullanılan çok segmentli sistemleri için bu kritik giriş gücü değerleri sırasıyla 0,3 mW, 0,2 mW, 0,2 mW ve 0,2 mW iken; 25 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 1 mW, 0,7 mW, 0,8 mW ve 0,6 mW'tır. Kanallar arası boşluk değerinin 12,5 GHz olduğu 31- kanallı 1, 2, 4 ve 5 EDFA kullanılan çok segmentli sistemler için, bu kritik giriş gücü değerleri sırasıyla 0,3 mW, 0,2 mW, 0,2 mW ve 0,2 mW iken; 25 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 1 mW, 0,7 mW, 0,7 mW ve 0,7 mW'tır. Kanallar arası boşluk

değerinin 12,5 GHz olduğu 63-kanallı 1, 2, 4 ve 5 EDFA kullanılan çok segmentli sistemler için, bu kritik giriş gücü değerleri sırasıyla 0,3 mW, 0,2 mW, 0,2 mW ve 0,2 mW iken; 25 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 1 mW, 0,7 mW, 0,7 mW ve 0,6 mW'tır. Kanallar arası boşluk değerinin 12,5 GHz ve 25 GHz olduğu 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, minimum 23 dB OSNR kriterini sağlayan minimum giriş güçleri Çizelge 4.2, 4.4, 4.6, 4.8'ye göre eşit ve 0,1 mW'tır. Ayrıca kanallar arası boşluk değerinin 25 GHz olduğu 15- kanallı 2 adet EDFA kullanılan, 31-kanallı 2 adet EDFA kullanılan ve 63- kanallı 2 ve 5 adet EDFA kullanılan çok segmentli sistemler hariç diğer olası tüm durumlarda, giriş gücünün 0,1 mW-5mW aralığında minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

Kanallar arası boşluk değerlerinin 50 GHz ve 100 GHz olduğu Şekil 4.5, 4.6, 4.11, 4.12, 4.17, 4.18, 4.23, 4.24 ile verilen benzetimlerde, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı EDFA kullanılan çok segmentli DWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen OSNR değeri, giriş gücü arttıkça eksponansiyel olarak artış göstermektedir. Kanallar arası boşluk değerinin 50 GHz olduğu Şekil 4.5, 4.11, 4.17, 4.23 ve Çizelge 4.2, 4.4, 4.6 ve 4.8'e göre, giriş gücünün 0,1 mW- 5 mW aralığında, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır. Kanallar arası boşluk değerinin 100 GHz olduğu Şekil 4.6, 4.12, 4.18, 4.24 ve Çizelge 4.2, 4.4, 4.6 ve 4.8'e göre minimum 23 dB OSNR kriterini sağlayan minimum giriş güçleri, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı bir EDFA ve iki EDFA kullanan çok segmentli sistemler için sırasıyla 0,19 mW ve 0,12 mW'tır. Olası diğer tüm konfigürasyonlarda giriş gücünün 0,1 mW- 5 mW aralığında, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

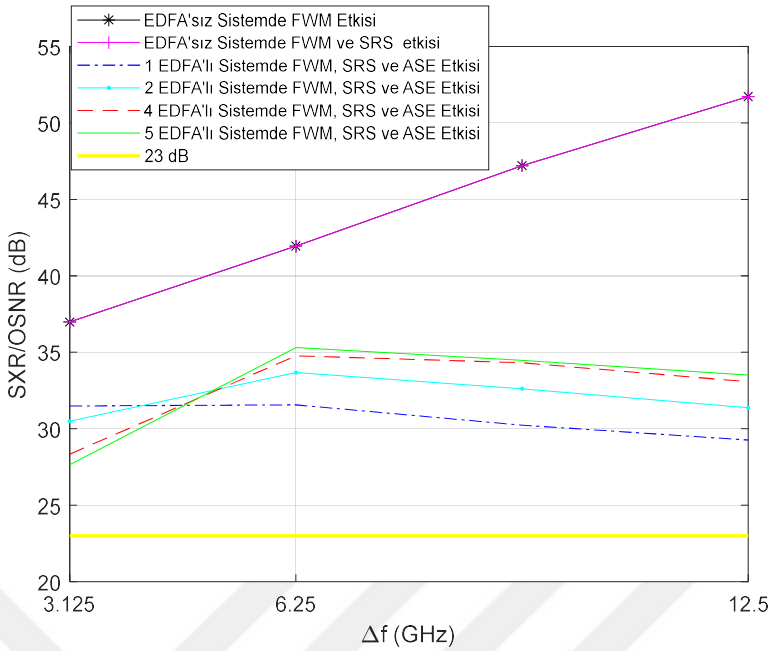
Sonuç olarak, kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz ve 6,25 GHz olduğu benzetimlerde, EDFA kullanılan çok segmentli uzak mesafe UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değeri, giriş gücü arttıkça eksponansiyel olarak azalış gösterirken; kanallar arası boşluk değerlerinin 50 GHz ve 100 GHz olduğu benzetimlerde, EDFA kullanan çok segmentli uzak mesafe DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değeri, giriş gücü arttıkça eksponansiyel olarak artış göstermektedir; çünkü giriş gücü arttıkça modifiye SRS gücü (P_{SRS}) ve FWM gürültü gücü (P_{FWM}) artış gösterirken, ASE gürültüsü (P_{ASE}) değişmemektedir. Kanallar arası boşluk değerinin daha dar olduğu UDWDM sistemlerde kanal bantgenişliği daha etkin kullanılırken, alıcıdaki optik filtre

bantgenişliği daha dardır. Bu nedenle, (2.29)'a göre üretilen ASE gürültü gücü (P_{ASE}) düşüktür ve (2.43)'e göre üretilen FWM gürültü gücü yüksektir. UDWDM sistemlerde, FWM gürültüsü ASE gürültüsüne göre daha baskın bir etkiye sahiptir; bu nedenle giriş gücü arttıkça, merkez kanallarda görülen OSNR değer azalış göstermektedir. Oysaki, kanallar arası boşluk değerinin daha geniş olduğu DWDM sistemlerde, ihtiyaç duyulan kanal bantgenişliği ve alıcıdaki optik filtre bantgenişliği daha geniştir. Dolayısıyla, üretilen ASE gürültüsü (P_{ASE}) yüksektir ve FWM gürültü gücü düşüktür. DWDM sistemlerde ASE gürültüsü, FWM gürültüsüne göre daha baskındır. Bu nedenle, (2.52) ile verilen matematiksel ifadede P_{FWM} ve P_{ASE} gürültülerinin toplamı, kanal giriş gücünün artışından çok etkilenmez. Fakat kanal giriş gücü arttıkça P_{SRS} artmaya devam eder. Dolayısıyla, kanallar arası boşluk değerinin daha geniş olduğu DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değeri, artan kanal giriş gücü ile ekponansiyel olarak artış göstermektedir.

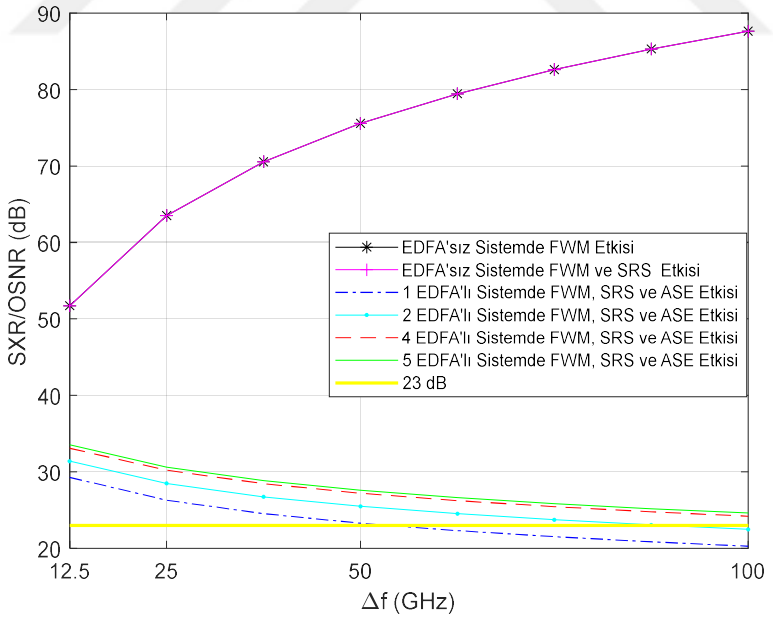
4.2. SXR/OSNR-Kanallar Arası Boşluk Değeri Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.3'te açıklanan benzetim koşulları altında, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz-100 GHz aralığında değiştirilmesiyle elde edilen SXR/OSNR değişimlerine ait benzetimler 7-kanallı sistem için Şekil 4.25-4.26'da, 15-kanallı sistem için Şekil 4.27-4.28'de, 31-kanallı sistem için Şekil 4.29-4.30'da ve 63-kanallı sistem için Şekil 4.31-4.32'de yer almaktadır.

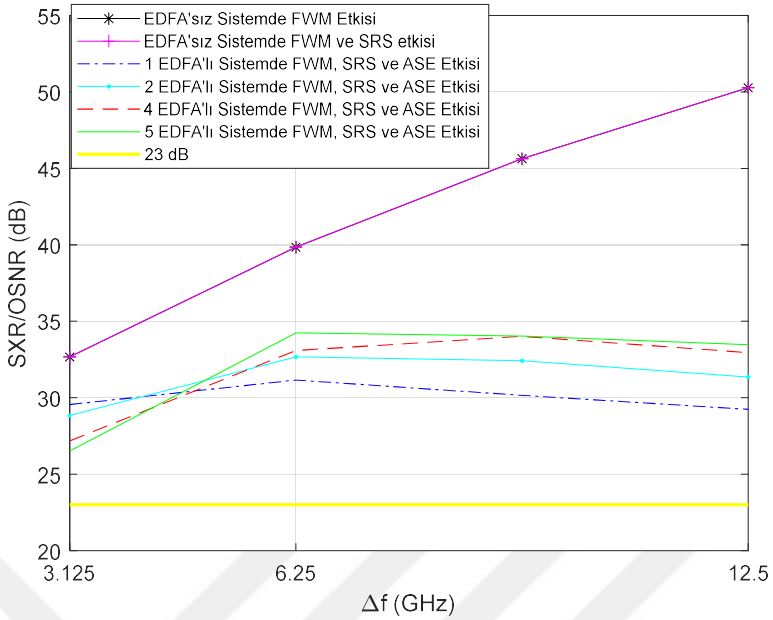
Tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi dikkate alındığında, elde edilen SXR/OSNR değerleri, 7-kanallı sistem için Çizelge 4.9-4.10'da, 15-kanallı sistem için Çizelge 4.11-4.12'de, 31-kanallı sistem için Çizelge 4.13-4.14'te ve 63-kanallı sistem için Çizelge 4.15-4.16'da yer almaktadır.



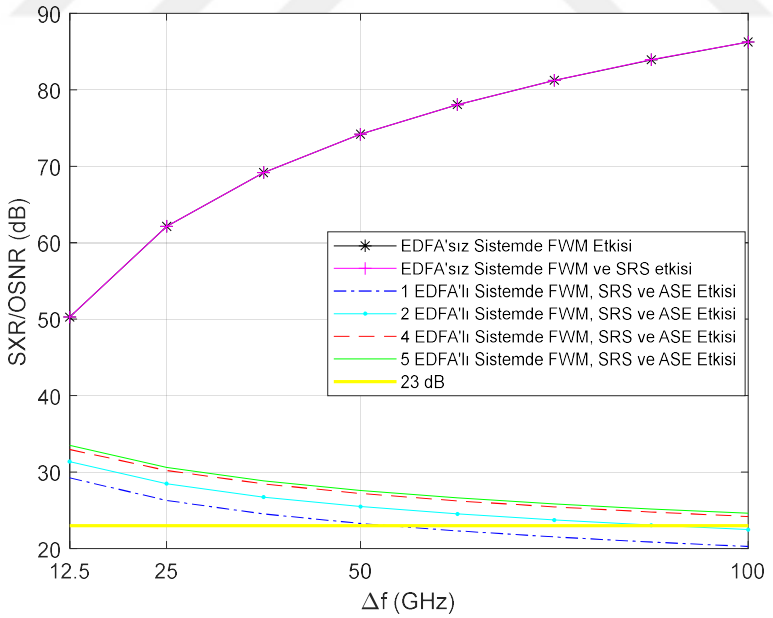
Şekil 4.25. Δf < 12,5 GHz için 7-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri



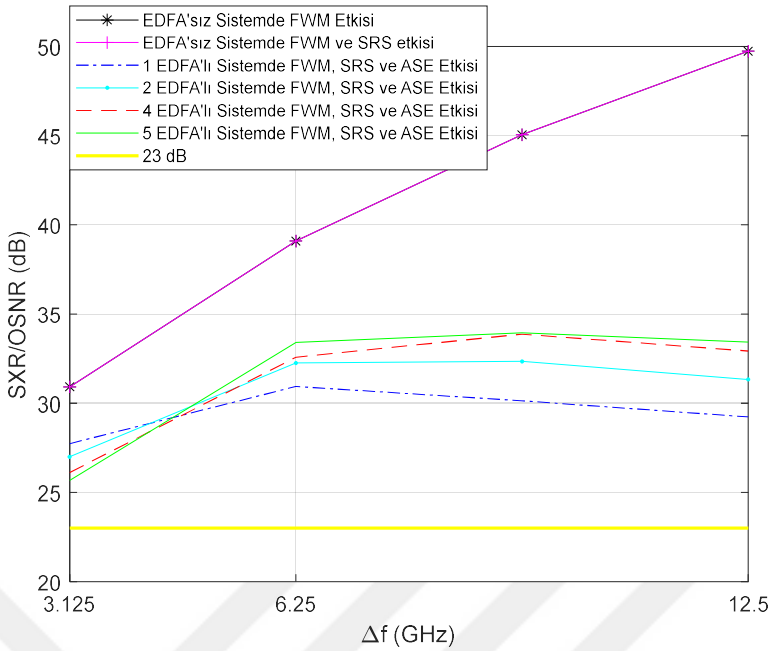
Şekil 4.26. 12,5 ≤ Δf ≤ 100 GHz için 7-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri



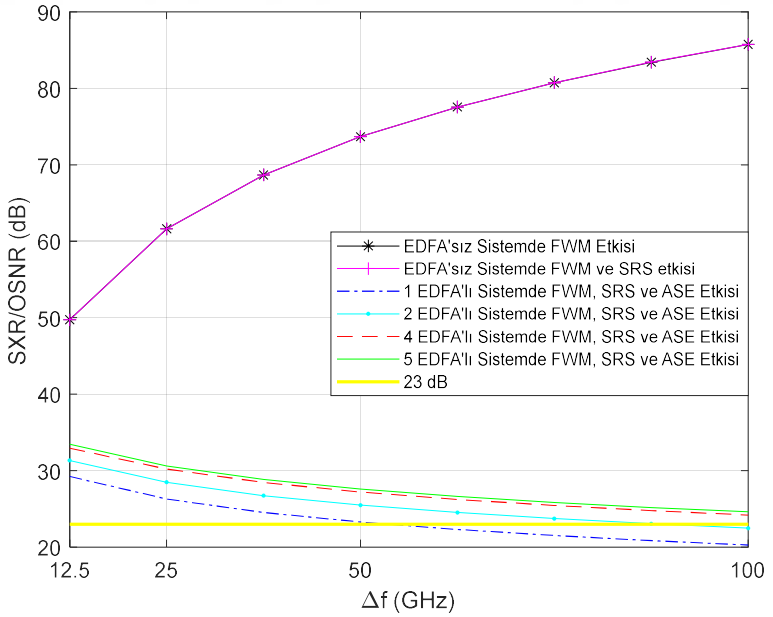
Şekil 4.27. Δf < 12,5 GHz için 15-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri



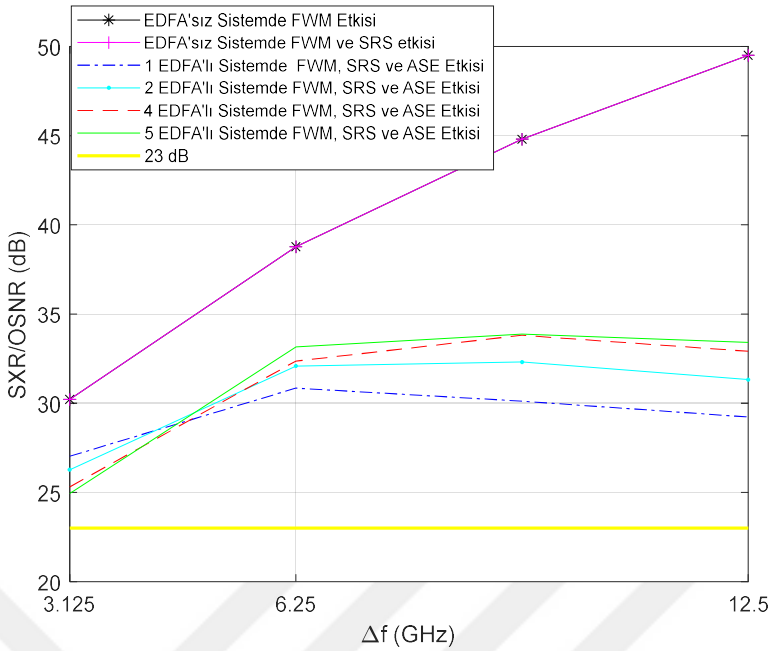
Şekil 4.28. 12,5 ≤ Δf ≤ 100 GHz için 15-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri



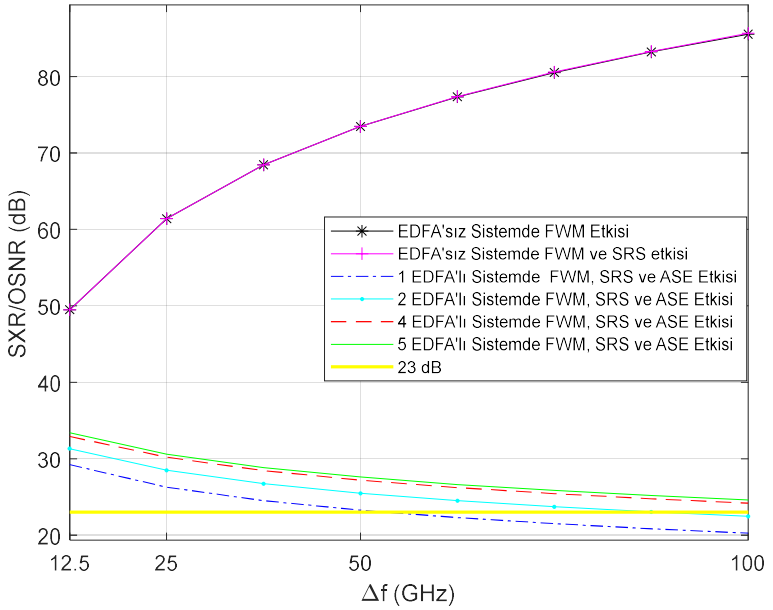
Şekil 4.29. Δf < 12,5 GHz için 31-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri



Şekil 4.30. 12,5 ≤ Δf ≤ 100 GHz için 31-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri



Şekil 4.31. Δf < 12,5 GHz için 63-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri



Şekil 4.32. 12,5 ≤ Δf ≤ 100 GHz için 63-kanallı sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki, EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-Δf değişimleri

Çizelge 4.9. 7- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

7- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	Δf (GHz)	3.125	6.25
EDFA'sız FWM Etkisi	SXR/OSNR (dB)	36,98	41,94
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		36,98	41,94
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,49	31,56
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		30,48	33,67
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,35	34,93
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,65	35,31

Çizelge 4.10. 7- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

7- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	Δf (GHz)	12.5	25	50	100
EDFA'sız FWM Etkisi	SXR/OSNR (dB)	51,72	63,53	75,57	87,63
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		51,72	63,53	75,57	87,63
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,26	26,28	23,27	**20,26**
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,38	28,48	25,48	**22,47**
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,07	30,20	27,20	24,19
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,52	30,61	27,61	24,60

Çizelge 4.11. 15- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

15- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	Δf (GHz)	3.125	6.25
EDFA'sız FWM Etkisi	SXR/OSNR (dB)	32,66	39,84
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		32,66	39,84
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,55	31,16
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,84	32,66
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,17	33,09
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,52	34,23

Çizelge 4.12. 15- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

15- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**12.5**	**25**	**50**	**100**
EDFA'sız FWM Etkisi	**SXR/OSNR (dB)**	50,27	62,14	74,18	86,25
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		50,27	62,14	74,18	86,25
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,24	26,28	23,27	**20,26**
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,36	28,48	25,48	**22,47**
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,95	30,20	27,20	24,19
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,47	30,61	27,61	24,60

Çizelge 4.13. 31- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

31- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**3.125**	**6.25**
EDFA'sız FWM Etkisi	**SXR/OSNR (dB)**	30,92	39,09
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		30,92	39,09
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,74	30.94
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,99	32,25
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,12	32,58
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,68	33,42

Çizelge 4.14. 31- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

31- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	**Δf (GHz)**	**12.5**	**25**	**50**	**100**
EDFA'sız FWM Etkisi	**SXR/OSNR (dB)**	49,73	61,62	73,67	85,75
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		49,73	61,62	73,68	85,76
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,23	26,28	23,27	**20,26**
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,33	28,48	25,48	**22,47**
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,93	30,20	27,20	24,19
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,43	30,61	27,61	24,60

Çizelge 4.15. 63- kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

63- Kanallı Uzak Mesafe UDWDM Sistem	Δf (GHz)	3.125	6.25
EDFA'sız FWM Etkisi	SXR/OSNR (dB)	30,21	38,77
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		30,21	38,77
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,03	30,85
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,27	32,09
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,30	32,62
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		24,93	33,15

Çizelge 4.16. 63- kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63- kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanalların SXR/OSNR değerleri

63- Kanallı Uzak Mesafe DWDM Sistem	Δf (GHz)	12.5	25	50	100
EDFA'sız FWM Etkisi	SXR/OSNR (dB)	49,50	61,40	73,46	85,54
EDFA'sız FWM ve SRS Etkisi		49,50	61,40	73,46	85,66
1 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,23	26,28	23,27	**20,26**
2 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,32	28,48	25,48	**22,47**
4 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,91	30,20	27,20	24,19
5 EDFA için FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,41	30,61	27,61	24,60

Şekil 4.25-4.32 ve Çizelge 4.9-4.16 ile verilen benzetim sonuçlarına göre, tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisinin incelendiği SXR değeri, kanallar arası boşluk değeri arttıkça, artış göstermektedir; çünkü kanallar arası boşluk değeri arttıkça, modifiye SRS gücü ve faz uyumsuzluğu artarken, FWM verimliliği ve FWM gücü azalmaktadır. Ayrıca Bölüm 3.3'te tanımlanan benzetim koşullarına göre, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı haberleşme sistemlerinin kanal giriş güçleri eşit ve 0,1 mW olarak değerlendirilmiştir. 0,1 mW giriş gücü değerinde, modifiye SRS gücü çok düşüktür. Bu nedenle yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki 7-, 15- 31- ve 63- kanallı haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen SXR değerleri arasında çok küçük farklılıklar bulunmaktadır ve bu farklılıklar ihmal edilebilir.

Şekil 4.25, 4.27, 4.29, 4.31 ve Çizelge 4.9, 4.11, 4.13, 4.15 ile verilen benzetim sonuçlarına göre, kanallar arası boşluk değerleri arttıkça, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli UDWDM sistemlerde, FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarında OSNR değerleri artış göstermektedir; çünkü kanallar arası boşlukların dar olduğu UDWDM sistemlerde, FWM gürültü gücü çok yüksek olmasına rağmen, optik filtre bantgenişliği dar olduğu için ASE gürültü gücü düşüktür. Bu durum haberleşme sisteminin merkez kanallarında görülen FWM etkisinin ASE etkisine göre daha baskın olmasına yol açar. Kanallar arası boşluk değeri arttıkça, FWM çapraz karışımı azalırken ASE gürültüsü bir miktar artmaktadır. Ancak UDWDM sistemlerde baskın etkiye sahip olan FWM gücünde oluşan bu azalma, OSNR değerlerinin artmasına neden olur. Bir, iki, dört ve beş EDFA kullanan çok segmentli 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri minimum 23 dB kriterini sağlamaktadır.

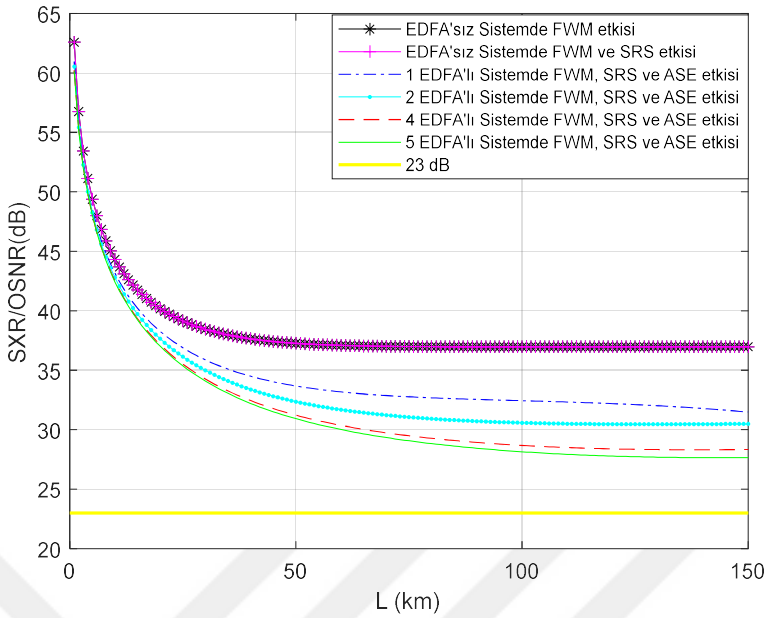
Şekil 4.26, 4.28, 4.30, 4.32 ve Çizelge 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 ile belirtilen benzetim sonuçlarına göre, kanallar arası boşluk değerleri arttıkça, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistemlerde, FWM, SRS ve ASE birleşik etkileri altındaki merkez kanallarında OSNR değerleri azalış göstermektedir; çünkü kanallar arası boşlukların geniş olduğu DWDM sistemlerde, FWM gürültü gücü çok düşük olmasına rağmen, optik filtre bantgenişliği arttığı için, ASE gürültü gücü yüksektir. Bu durum, haberleşme sisteminin merkez kanallarında görülen ASE etkisinin FWM etkisine göre daha baskın olmasına neden olur. Dolayısıyla kanallar arası boşluk değeri arttıkça, FWM çapraz karışımı azalırken, ASE gürültüsü artmaktadır. DWDM sistemlerde baskın bir etkiye sahip olan ASE gürültüsündeki bu artış, OSNR değerlerinin azalmasına neden olur. Kanallar arası boşluk değerinin 100 GHz olduğu, bir EDFA kullanan iki segmentli ve iki EDFA kullanan üç segmentli 7-, 15- 31- ve 63-kanallı uzak mesafe DWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değeri sabit olup sırasıyla 20,26 dB ve 22,47 dB değerleri ile minimum 23 dB OSNR kriterini sağlamamaktadır. Olası diğer tüm durumlarda minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

Şekil 4.25-4.32 ve Çizelge 4.9-4.16 ile belirtilen benzetim sonuçlarına göre, EDFA kullanan çok segmentli 7-, 15-, 31- ve 63 kanallı DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinde, kanallar arası boşluk değerlerinin 6,25 GHz-100 GHz olduğu frekans aralığında, sistemde kullanılan EDFA sayısı arttıkça, merkez kanallardaki OSNR değerleri artmaktadır. En yüksek OSNR değerleri, beş tane EDFA kullanan altı segmentli uzak mesafe DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinde elde edilmektedir. Tasarlanan haberleşme sisteminin maliyetini ve karmaşıklığını artırmamak için, minimum 23 dB OSNR kriterini sağlayan minimum sayıda EDFA kullanılmalıdır.

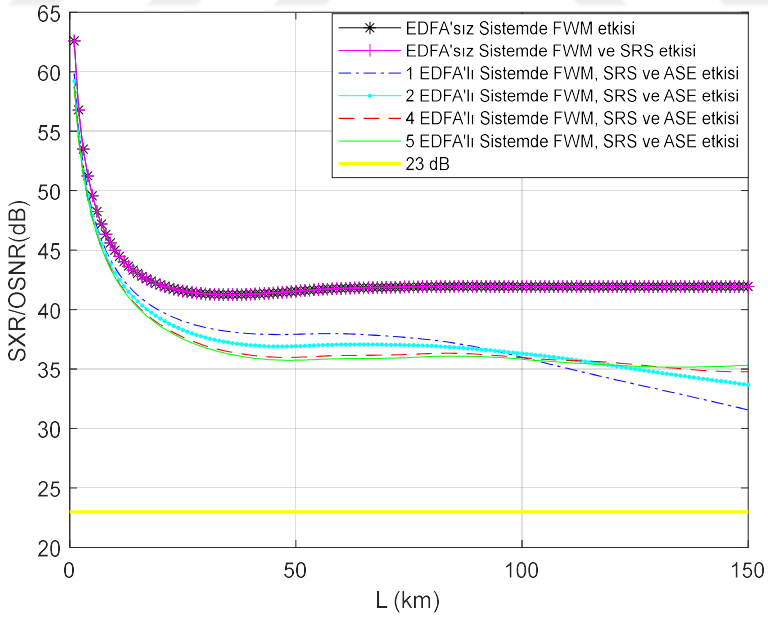
4.3. SXR/OSNR-Kanal Uzunluğu Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.4'te açıklanan benzetim koşulları altında, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında, çoğullayıcı ve optik filtre arasındaki toplam fiber uzunluğunun ve dolayısıyla kuvvetlendirici aralığının değiştirilmesiyle elde edilen SXR/OSNR değişimlerine ait benzetim sonuçları 7-kanallı sistem için Şekil 4.33-4.38'de, 15-kanallı sistem için Şekil 4.39-4.44'te, 31-kanallı sistem için Şekil 4.45-4.50'de ve 63-kanallı sistemler için Şekil 4.51-4.55'te yer almaktadır.

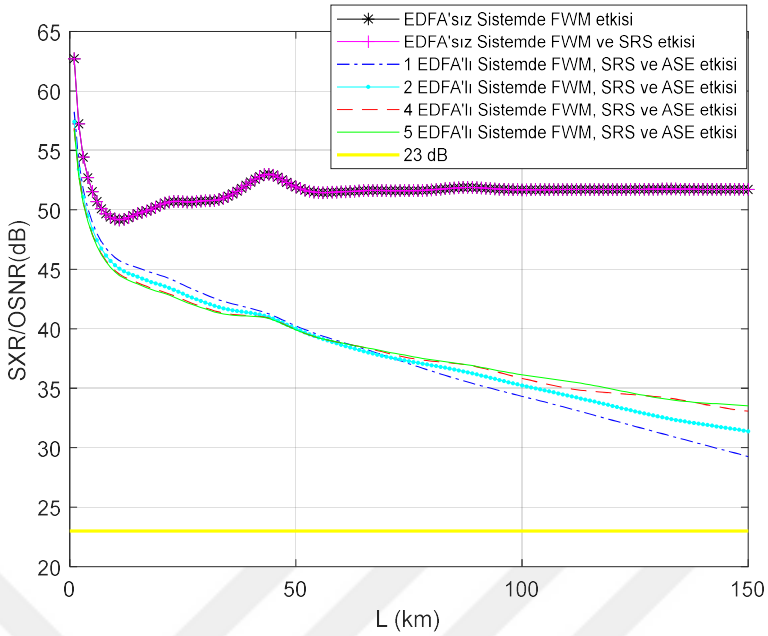
Tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM'nin yalın etkisi ile FWM ve SRS'nin birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR/OSNR değerleri, 7-kanallı sistem için Çizelge 4.17-4.18'de, 15-kanallı sistem için Çizelge 4.19-4.20'de, 31-kanallı sistem için Çizelge 4.21-4.22'de ve 63-kanallı sistem için Çizelge 4.23-4.24'te yer almaktadır.



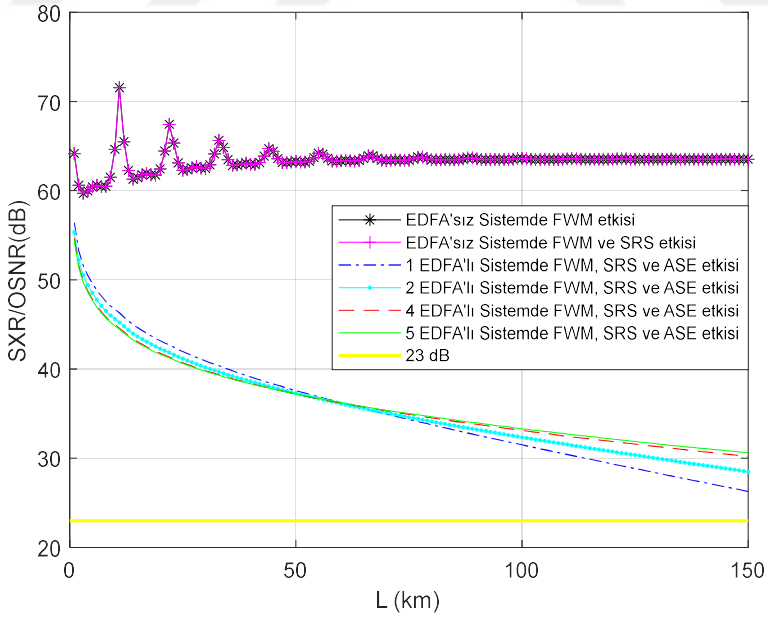
Şekil 4.33. Δf =3,125 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



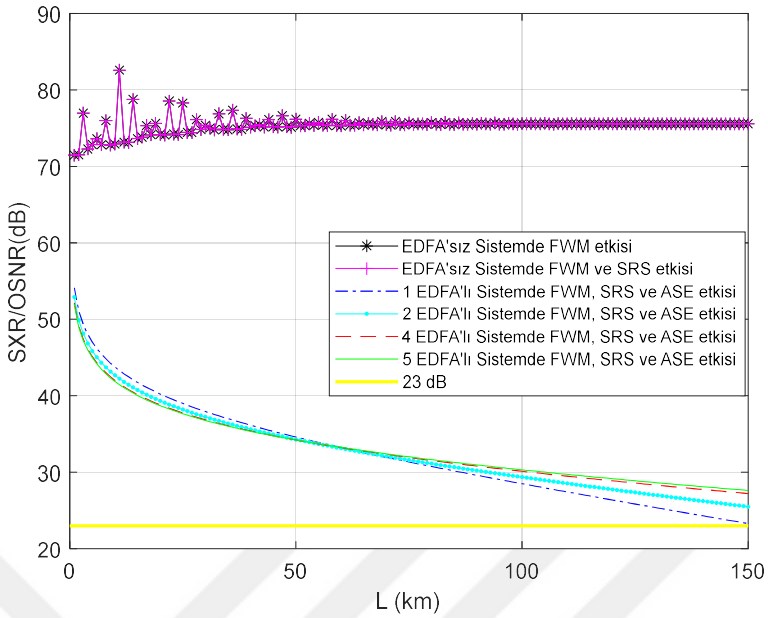
Şekil 4.34. Δf =6,25 GHz için 7-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



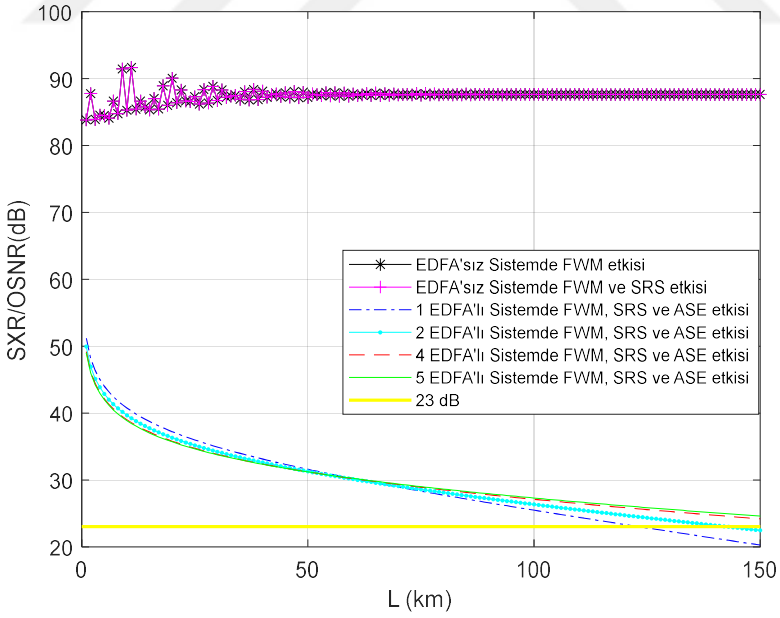
Şekil 4.35. Δf =12,5 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



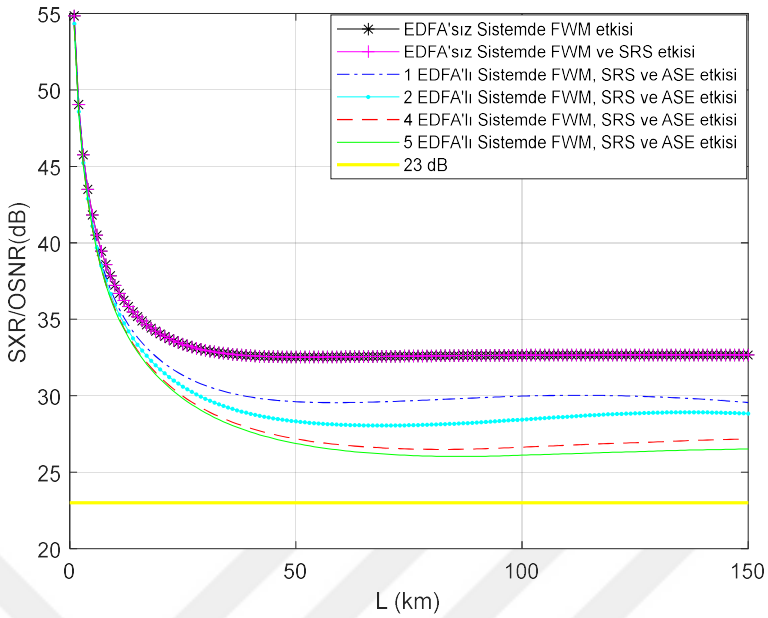
Şekil 4.36. Δf =25 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



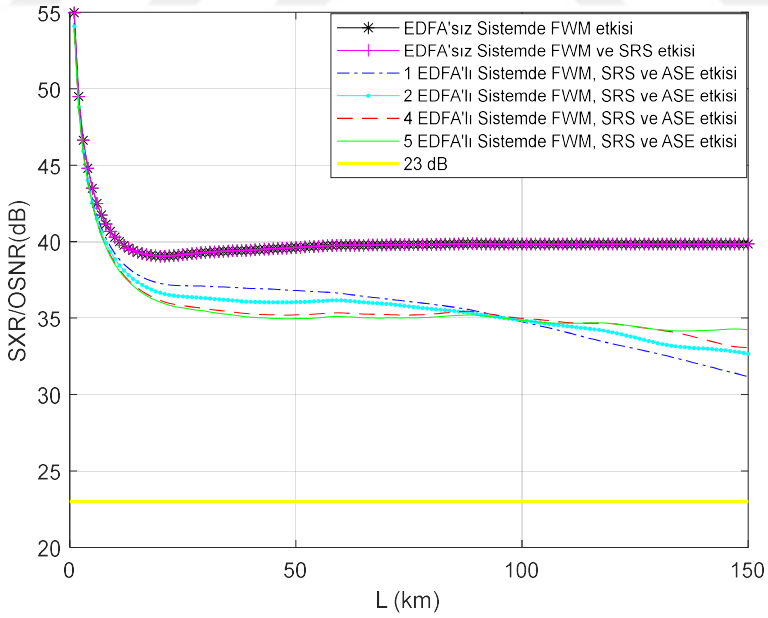
Şekil 4.37. Δf =50 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



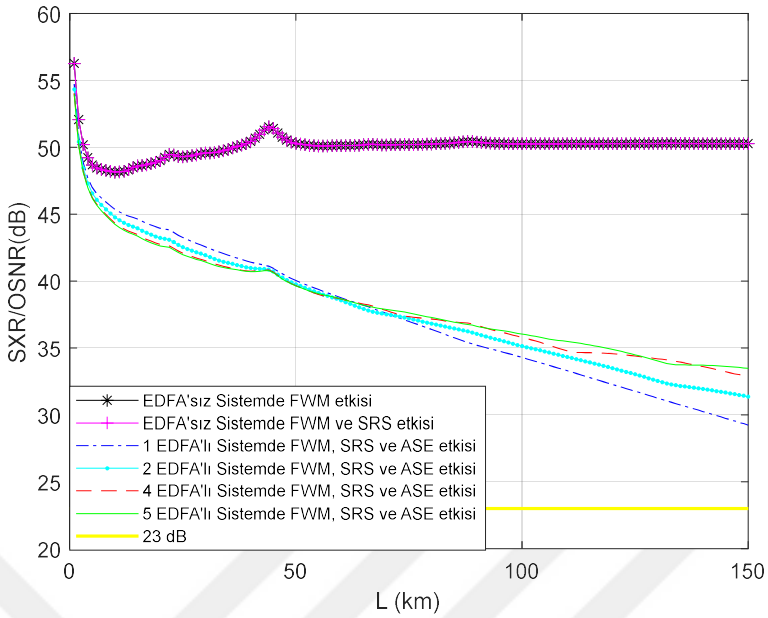
Şekil 4.38. Δf =100 GHz için 7-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



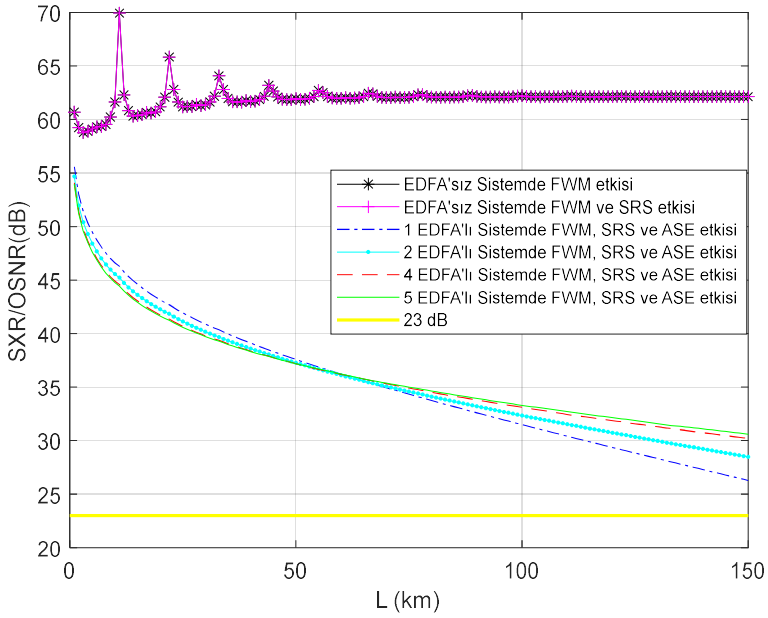
Şekil 4.39. Δf =3,125 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



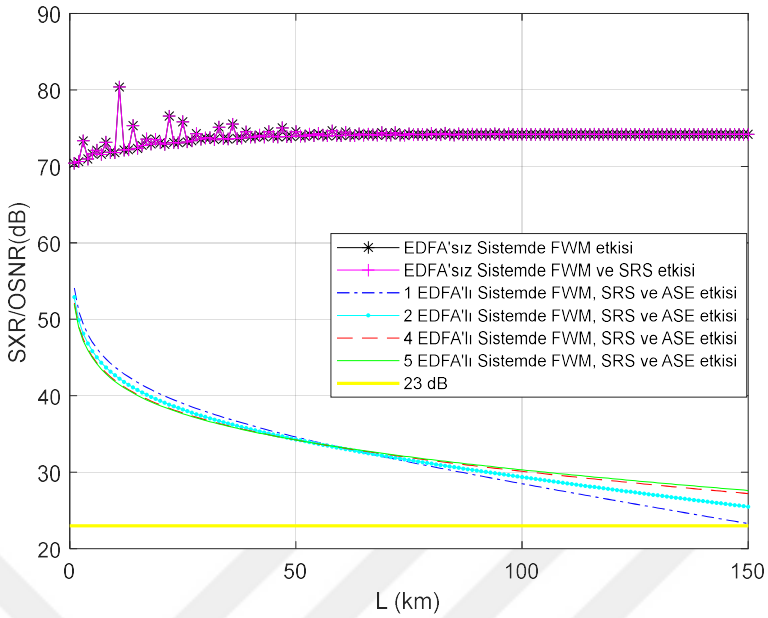
Şekil 4.40. Δf =6,25 GHz için 15-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



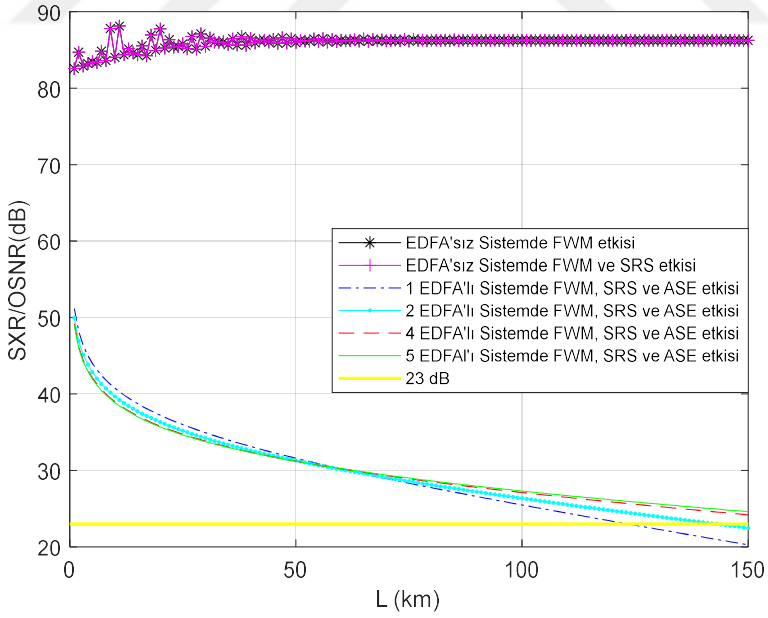
Şekil 4.41. Δf =12,5 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



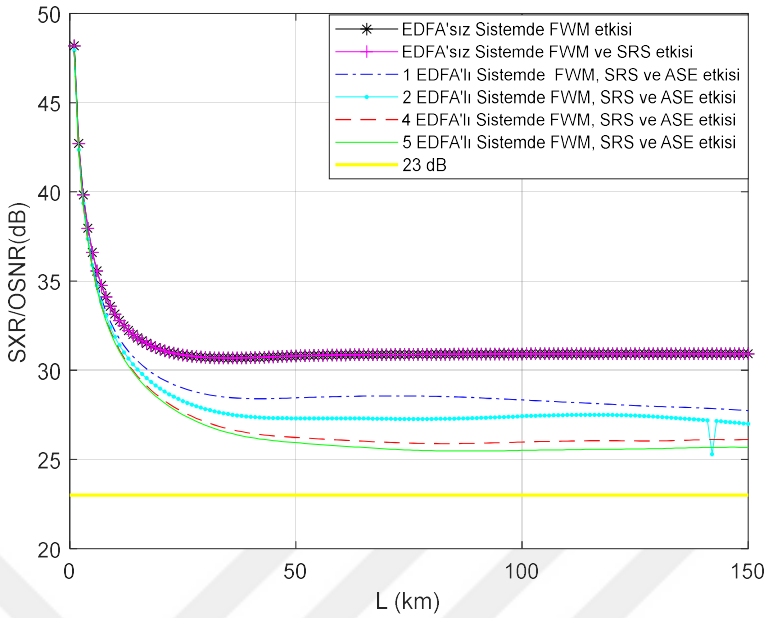
Şekil 4.42. Δf =25 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



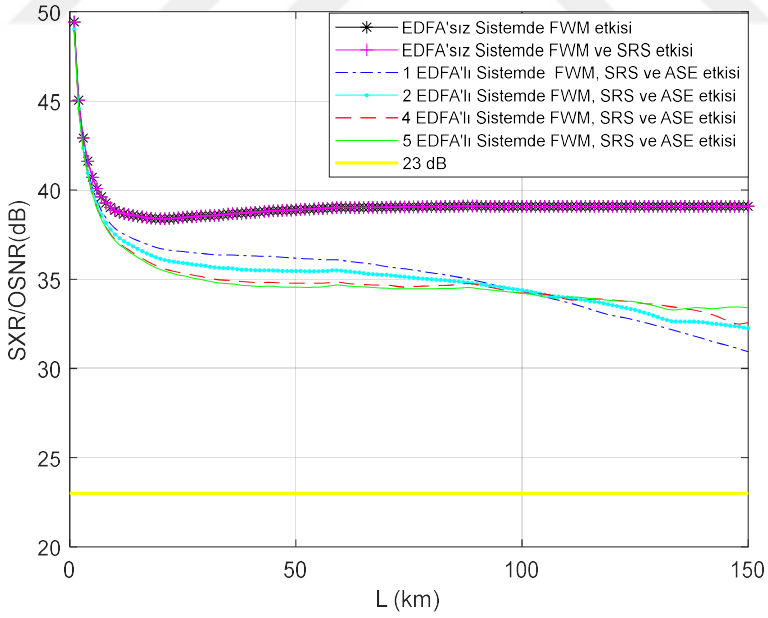
Şekil 4.43. Δf =50 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



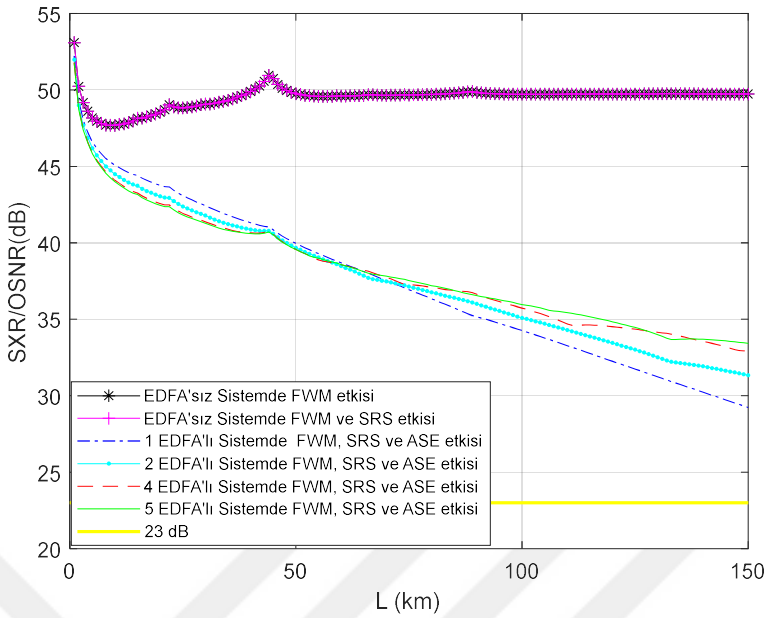
Şekil 4.44. Δf =100 GHz için 15-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



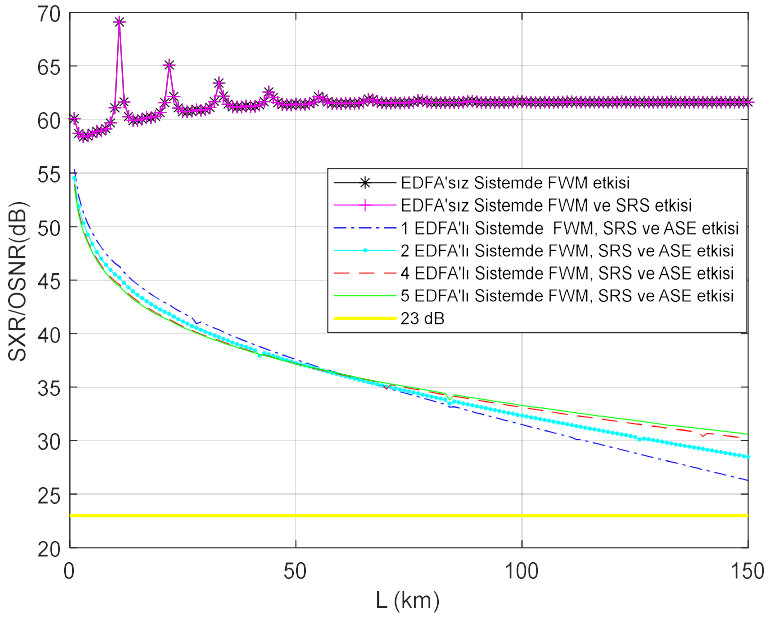
Şekil 4.45. Δf =3,125 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



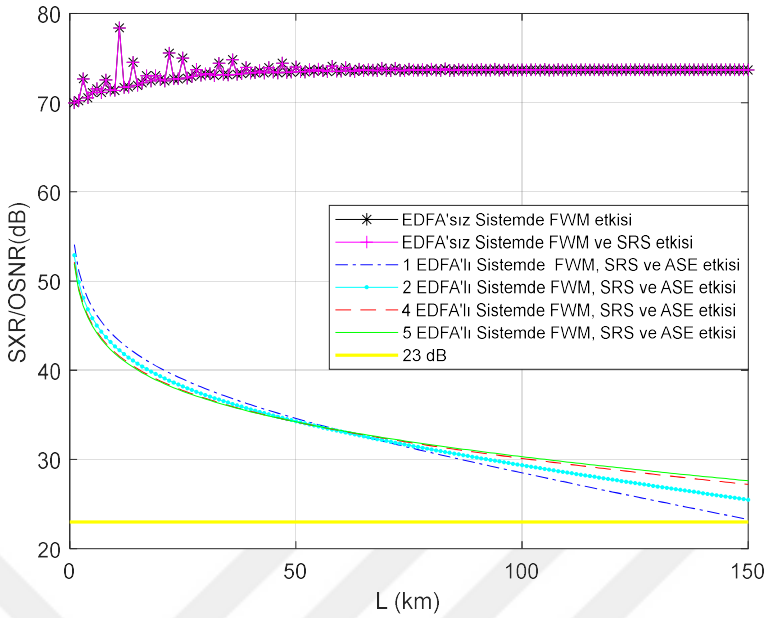
Şekil 4.46. Δf =6,25 GHz için 31-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



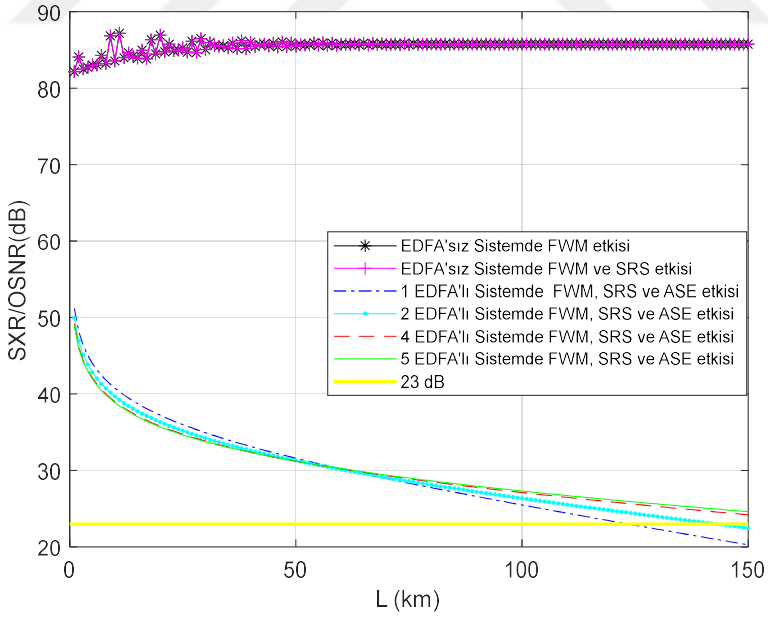
Şekil 4.47. Δf =12,5 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



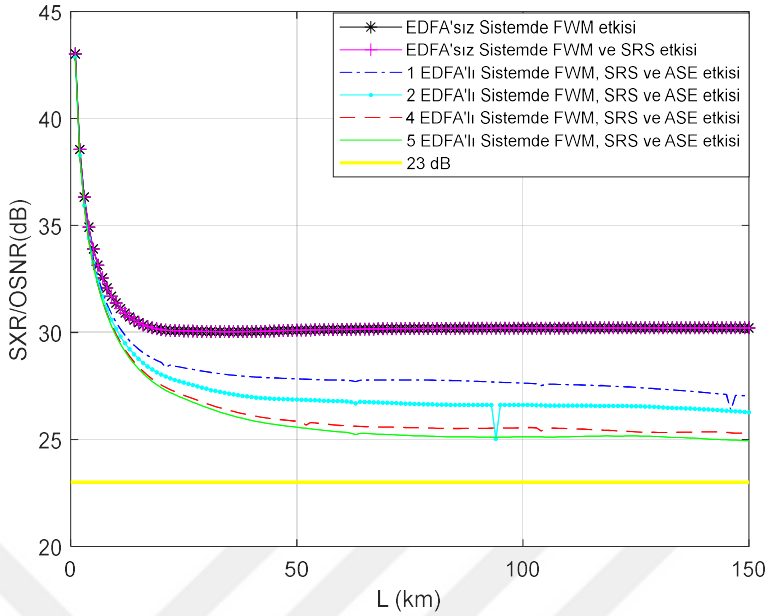
Şekil 4.48. Δf =25 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



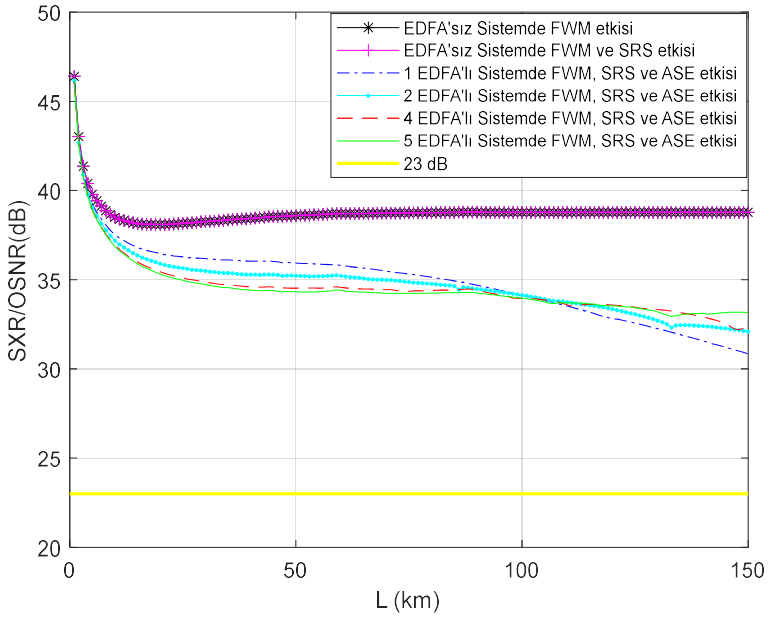
Şekil 4.49. Δf =50 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



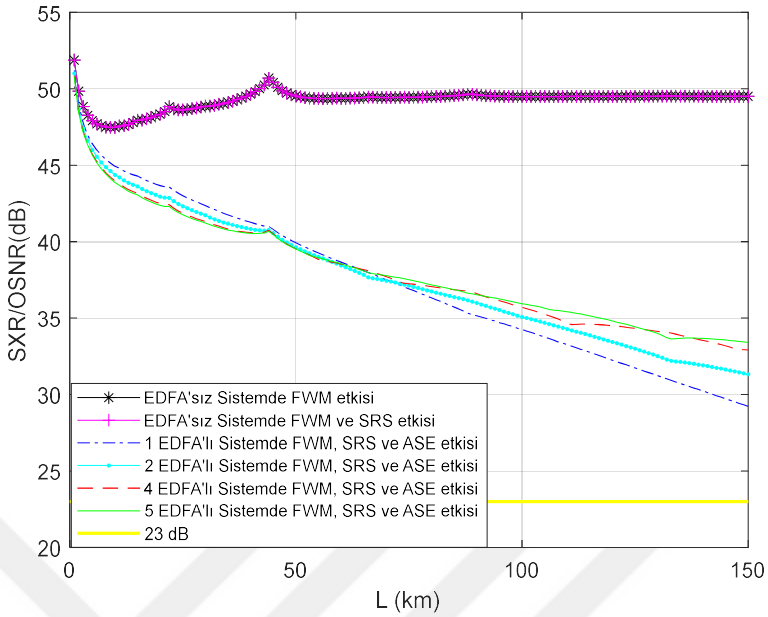
Şekil 4.50. Δf =100 GHz için 31-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



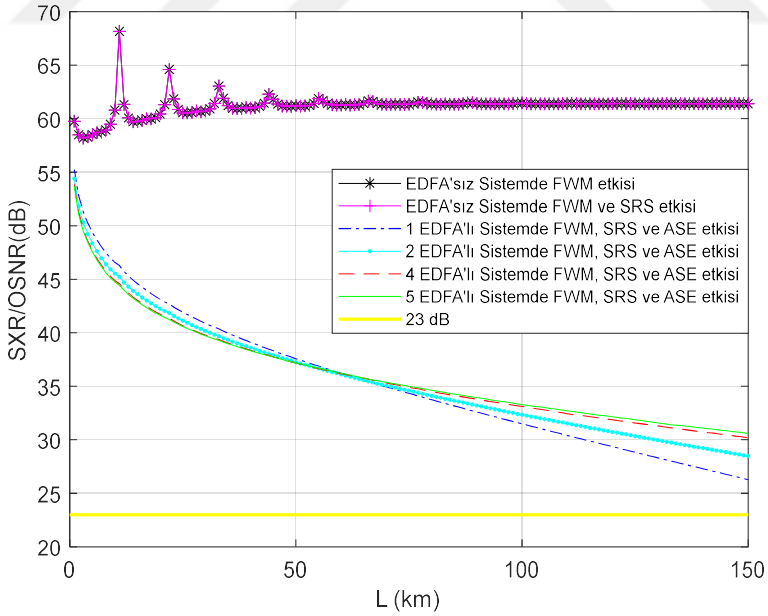
Şekil 4.51. Δf =3,125 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



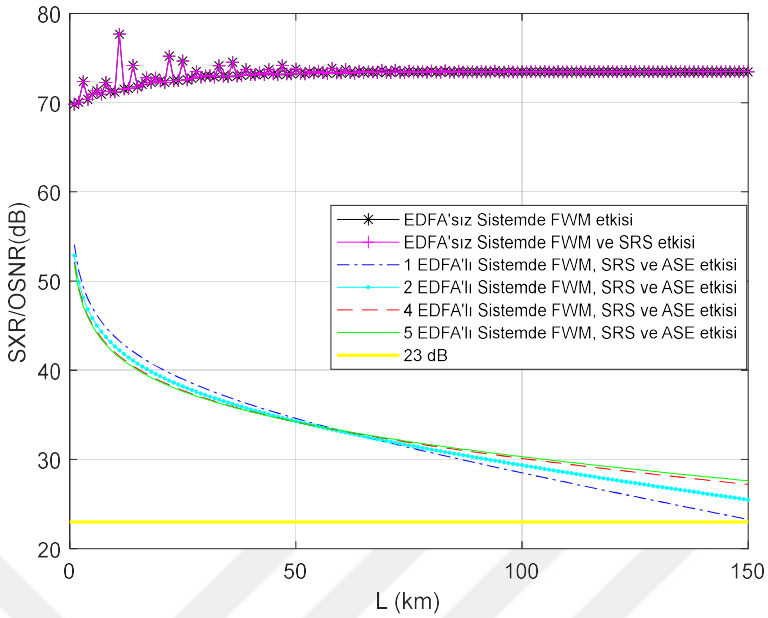
Şekil 4.52. Δf =6,25 GHz için 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



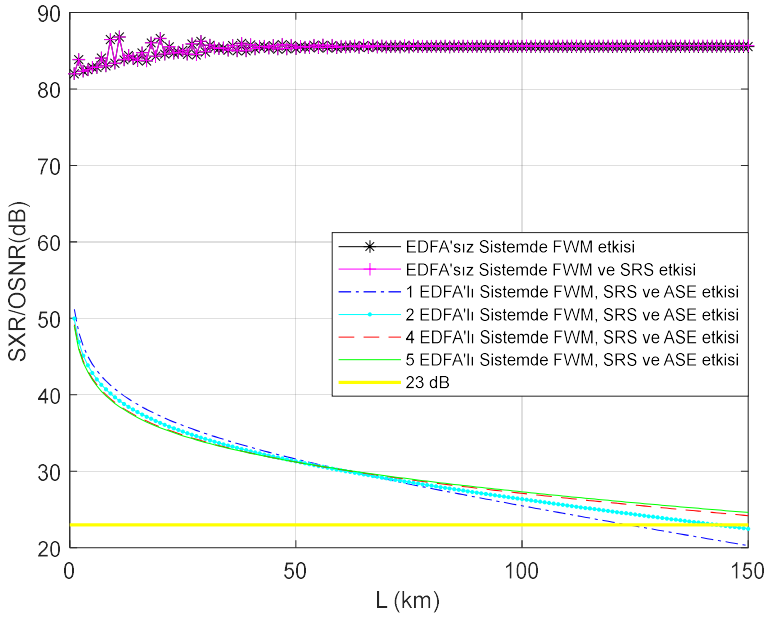
Şekil 4.53. Δf =12,5 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



Şekil 4.54. Δf =25 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



Şekil 4.55. Δf =50 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri



Şekil 4.56. Δf =100 GHz için 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, tek segmentli sistem için yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; EDFA içeren çok segmentli sistem için FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki SXR/OSNR-L_{toplam} değişimleri

Çizelge 4.17. 7-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	UDWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	3,125	6,25
7 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	39,15	41,56
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		39,15	41,56
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		36,89	39,04
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		36,14	38,28
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		35,52	37,69
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		35,37	37,54
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		37,26	41,54
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		37,26	41,54
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,67	37,92
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,35	36,91
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,22	35,99
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		30,93	35,74
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		36,99	41,90
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		36,99	41,90
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,77	37,63
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,06	37,01
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,49	36,23
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,07	35,97
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		36,98	41,94
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		36,98	41,94
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,49	31,56
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		30,48	33,67
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,34	34,77
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,65	35,31

Çizelge 4.18. 7 kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 7-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	DWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	12,5	25 G	50	100
7 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	50,68	62,27	78,28	87,29
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		50,68	62,27	78,28	87,29
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		43,70	41,95	38,99	35,99
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		42,94	41,15	38.19	35,18
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		42,46	40,69	37,74	34,73
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		42,35	40,60	37,64	34,63
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		51,92	63,29	76,17	87,20
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		51,92	63,29	76,13	87,20
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		40,24	37,59	34,60	31,59
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		40,01	37,27	34,29	31,28
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,92	37,20	34,21	31,20
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,91	37,20	34,20	31,20
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		51,61	63,43	75,70	87,52
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		51,61	63,43	75,70	87,52
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,06	34,33	31,34	28,33
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,28	34,59	31,59	28,58
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,55	34,91	31,92	28,91
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,72	35,01	32,01	28,99
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		51,72	63,53	75,57	87,62
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		51,72	63,53	75,57	87,62
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,26	26,25	23,27	**20,26**
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,38	28,48	25,48	**22,47**
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,07	30,20	27,20	24,19
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,52	30,61	27,61	24,60

Çizelge 4.19. 15-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	UDWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	3,125	6,25
15 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	33,37	39,15
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		33,37	39,15
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,34	37,12
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		30,59	36,41
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,98	35,82
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,82	35,66
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		32,53	39,62
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		32,53	39,62
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,61	36,80
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,32	36,05
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,18	35,21
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,88	34,96
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		32,59	39,80
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		32,59	39,80
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,67	36,09
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,07	35,76
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,52	35,20
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,10	35,01
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		32,66	39,84
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		32,66	39,84
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,55	31,16
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,84	32,66
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,17	33,09
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,52	34,23

Çizelge 4.20. 15-kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 15-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	DWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
15 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	49,29	61,19	75,84	85,80
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		49,29	61,19	75,84	85,80
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		43,25	41,93	39,00	35,99
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		42,53	41,13	38,19	35,18
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		42,08	40,68	37,74	34,73
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		41,97	40,59	37,64	34,63
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		50,28	61,96	74,54	85,97
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		50,28	61,96	74,54	85,97
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		40,04	37,58	34,59	31,59
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,76	37,26	34,29	31,28
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,66	37,19	34,21	31,20
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,64	37,19	34,20	31,20
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		50,20	62,08	74,26	86,16
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		50,20	62,08	74,26	86,16
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		36,98	34,34	31,34	28,33
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,20	34,58	31,59	28,58
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,33	34,91	31,92	28,91
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,61	35,00	32,00	28,99
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		50,27	62,14	74,18	86,25
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		50,27	62,14	74,18	86,25
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,24	26,28	23,27	**20,26**
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,36	28,48	25,48	**22,47**
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,95	30,20	27,20	24,19
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,47	30,61	27,61	24,60

Çizelge 4.21. 31-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	UDWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	3,125	6,25
31 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	30,86	38,47
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,86	38,47
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,99	36,55
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,27	35,91
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,66	35,35
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,51	35,20
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		30,80	38,90
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,80	38,90
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,45	36,18
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,31	35,46
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,23	34,78
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,94	34,56
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		30,88	38,90
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,88	38,90
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,56	35,56
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,26	35,11
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,92	34,57
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,52	34,47
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		30,92	39,09
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,92	39,09
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,74	30,94
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,00	32,25
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,12	32,58
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,68	33,42

Çizelge 4.22. 31-kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 31-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	DWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
31 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	48,82	60,75	75,01	85,26
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		48,82	60,75	75,01	85,26
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		43,08	41,93	38,99	35,99
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		42,38	41,13	38,19	35,18
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		41,93	40,68	37,74	34,73
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		41,82	40,58	37,64	34,64
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		49,76	61,46	73,99	85,49
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		49,76	61,46	73,99	85,49
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,96	37,5	34,60	31,59
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,67	37,26	34,29	31,28
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,57	37,19	34,21	31,20
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,56	37,19	34,21	31,20
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		49,67	61,57	73,74	85,67
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		49,67	61,57	73,74	85,67
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		36,94	34,34	31,34	28,33
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,14	34,58	31,59	28,58
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,26	34,90	31,92	28,92
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,54	35,00	32,01	28,99
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		49,73	61,62	73,67	85,75
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		49,73	61,62	73,68	85,75
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,23	26,28	23,27	**20,26**
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,33	28,48	25,48	**22,47**
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,93	30,20	27,20	24,19
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,43	30,60	27,61	24,60

Çizelge 4.23. 63-kanallı UDWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63-kanallı UDWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	UDWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	3,125	6,25
63 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	30,07	38,16
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,07	38,16
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		28,35	36,28
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,66	35,65
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,06	35,11
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,91	34,97
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		30,11	38,59
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,11	38,59
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,83	35,93
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,86	35,22
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,85	34,52
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,57	34,32
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		30,18	38,74
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,18	38,74
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,78	35,32
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,67	34,87
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,55	34,35
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,18	34,23
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		30,21	38,77
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		30,21	38,77
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		27,03	30,85
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		26,27	32,09
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		25,30	32,36
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		24,93	33,15

Çizelge 4.24. 63-kanallı DWDM tek segmetli sistemlerde yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki; 63-kanallı DWDM çok segmentli sistemlerde FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki farklı kanallar arası boşluk ve kanal uzunluğu değerlerine sahip sistemlerin merkez kanallarındaki SXR/OSNR değerleri

Kanal Sayısı	Kanal Uzunluğu (km)	DWDM-Uzak Mesafe Haberleşme Sistemleri	Δf (GHz)	12,5	25	50	100
63 kanallı	25	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi	SXR değerleri (dB)	48,61	60,55	74,68	85,05
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		48,61	60,55	74,68	85,07
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		43,01	41,92	38,99	35,99
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		42,31	41,12	38,19	35,18
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		41,86	40,67	37,74	34,73
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		41,75	40,58	37,64	34,63
	50	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		49,52	61,24	73,75	85,28
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		49,52	61,24	73,76	85,32
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,92	37,58	34,60	31,59
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,63	37,26	34,29	31,28
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,52	37,19	34,21	31,20
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		39,51	37,18	34,21	31,19
	75	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		49,44	61,35	73,52	85,46
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		49,44	61,35	73,53	85,52
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		36,92	34,33	31,34	28,33
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,11	34,58	31,58	28,58
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,24	34,91	31,92	28,91
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		37,50	34,99	32,01	28,99
	150	EDFA'sız Sistemde FWM Etkisi		49,50	61,40	73,45	85,54
		EDFA'sız Sistemde FWM ve SRS Etkisi		49,50	61,40	73,47	85,66
		1 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		29,23	26,28	23,27	**20,26**
		2 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		31,32	28,48	25,48	**22,47**
		4 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		32,91	30,20	27,19	24,19
		5 EDFA'lı Sistemde FWM, SRS ve ASE Etkisi		33,41	30,61	27,61	28,59

Şekil 4.33, 4.34, 4.39, 4.40, 4.45, 4.46, 4.51, 4.52'ye göre kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz ve 6,25 GHz olduğu, tek segmentli, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki UDWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen SXR değerleri, kanal uzunluğu arttıkça ekponansiyel olarak azalış göstermektedir.

Şekil 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.47, 4.48, 4.49, 4.50, 4.53, 4.54, 4.55, 4.56'ya göre, kanallar arası boşluk değerlerinin 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olduğu, tek segmentli, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı, yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki DWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen SXR değerleri, kanal uzunluğu arttıkça osilasyon davranışı sergilemektedir. Osilasyon davranışı ilk olarak 12,5 GHz kanallar arası boşluk değerine sahip benzetimlerde görülmekte olup kanallar arası boşluk değerleri arttıkça, osilasyon şiddetlenmektedir. Bu durumun nedeni, kanallar arası boşluk değerlerinin artmasıyla faz uyumsuzluğunda meydana gelen artışlardır. Ayrıca kanallar arası boşluk değerlerinin artmasıyla, FWM etkinliği ve FWM gücü azalmaktadır. Bu durum, kanal uzunluğu yaklaşık olarak 50 km'ye kadar artırıldıkça, SXR değerlerinin osilasyonlar yaparak artış göstermesine ve kanal uzunluğunun 100 km-150 km aralığında ise sönümlenen osilasyonlarla neredeyse sabit kalmasına neden olur. Benzetimlerde görülen bu osilasyonlar, kanal uzunluğunun çok kısa mesafelerdeki değişimlerinde, SXR değerlerinde ani değişikliklere neden olduğundan, sistemin güvenirliğini olumsuz etkilemektedir.

Şekil 4.33- 4.56'ya göre bir, iki, dört ve beş adet EDFA kullanılan çok segmentli, 7-, 15-31- ve 63-kanallı, FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, kanal uzunluğu arttıkça ekponansiyel olarak azalış göstermektedir. Kanal uzunluğunun değişimi, kuvvetlendirici aralığının değişimine neden olmaktadır. Kanal uzunluğu arttıkça, etkin uzunluk (L_{eff}), kuvvetlendirici aralığı (ℓ), EDFA kazancı ($G=e^{\alpha\ell}$) ve dolayısıyla FWM, SRS ve ASE gürültüsü artmaktadır.

Şekil 4.35, 4.40, 4.41, 4.46, 4.47, 4.52, 4.53'e göre kanallar arası boşluk değerinin 12,5 GHz olduğu 7- kanallı bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistem ve kanallar arası boşluk değerlerinin 6,25 GHz ve 12,5 GHz olduğu 15-, 31- ve 63- kanallı bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, kanal uzunluğu ve kuvvetlendirici aralığı arttıkça osilasyon davranışı göstermektedir. Fakat EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerlerinde gözlemlenen osilasyon davranışı, tek segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki SXR değerlerinde gözlemlenen osilasyon davranışı kadar güçlü değildir. Ayrıca tek segmentli sistemlerde, kanallar arası

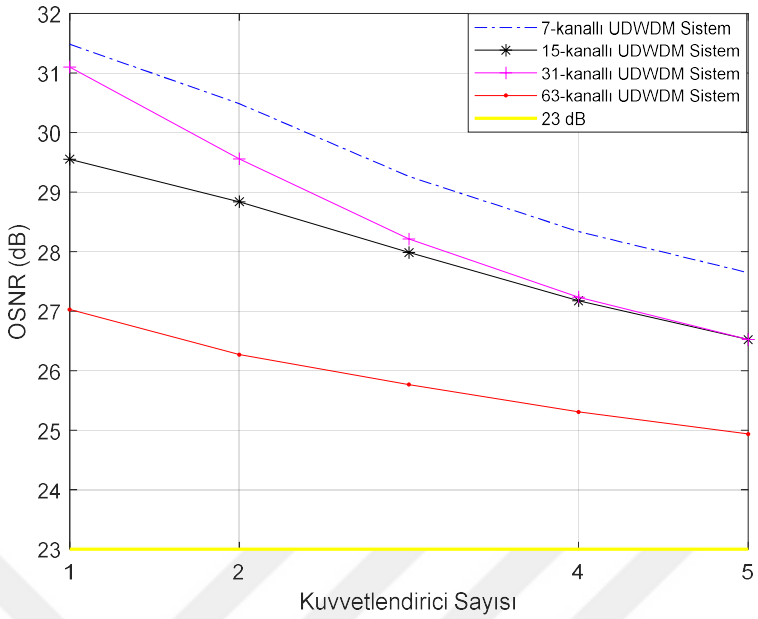
boşluk değerleri arttıkça osilasyon şiddetlenirken, EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde osilasyon görülmemektedir. Kanallar arası boşluk değeri arttıkça faz uyumsuzluğu artar. Faz uyumsuzluğundaki bu artış tek segmentli sistemlerin merkez kanallarında görülen SXR değerlerinde osilasyona neden olmaktadır. Fakat EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde kanallar arası boşluk değerleri arttıkça hem faz uyumsuzluğu hem optik filtre bantgenişliği arttığı için, ASE gürültüsü güçlü bir şekilde artar. ASE gürültü gücü kanallar arası boşlukların çok geniş olduğu DWDM sistemlerde baskın hale geldiği için, merkez kanalllarda görülen OSNR değerlerinde osilasyon oluşumunu engellemektedir. Böylece EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde OSNR performansı kanal uzunluğunun çok kısa mesafelerdeki değişimlerinden sadece belirli şartlar altında çok az etkilenmektedir. Bu durum daha güvenilir sistemler tasarlamak için önemlidir.

Çizelge 4.17- 4.24'e göre, kanallar arası boşluk değerinin 100 GHz ve kanal uzunluğunun 150 km olduğu 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı bir ve iki EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri, sırasıyla, 20,26 dB ve 22,47 dB'dir ve minimum 23 dB OSNR kriterini sağlamamaktadır. Olası diğer tüm konfigürasyonlarda minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

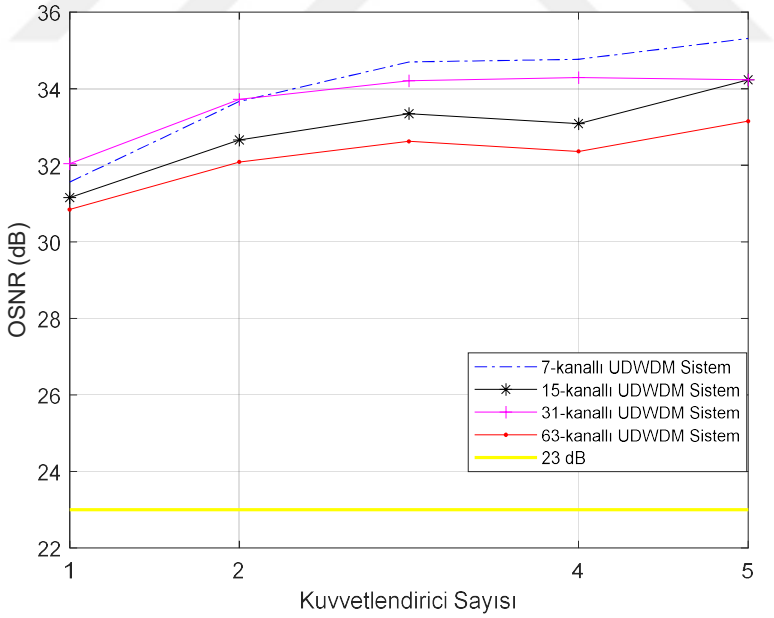
4.4. SXR/OSNR-Kuvvetlendirici Sayısı Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.5'te açıklanan benzetim koşulları altında, EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinde, kuvvetlendirici sayısının 1-5 aralığında değiştirilmesiyle elde edilen OSNR değişimlerine ait benzetimler, Şekil 4.57-4.62'de yer almaktadır.

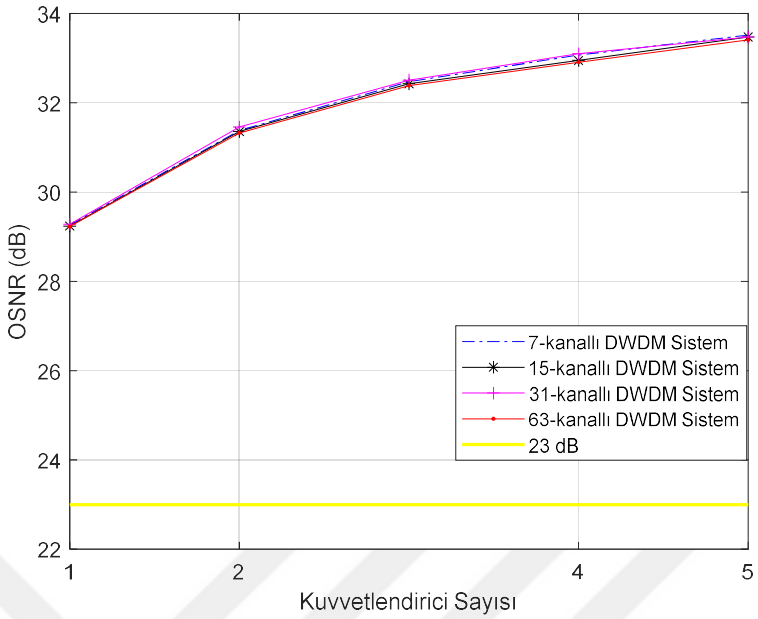
EDFA kullanılan çok segmentli 7-, 15-, 31-, ve 63-kanallı DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi dikkate alındığında, elde edilen OSNR değerleri, UDWDM sistemler için Çizelge 4.25 ve 4.26'da, DWDM sistemler için Çizelge 4.27-4.30'da verilmiştir.



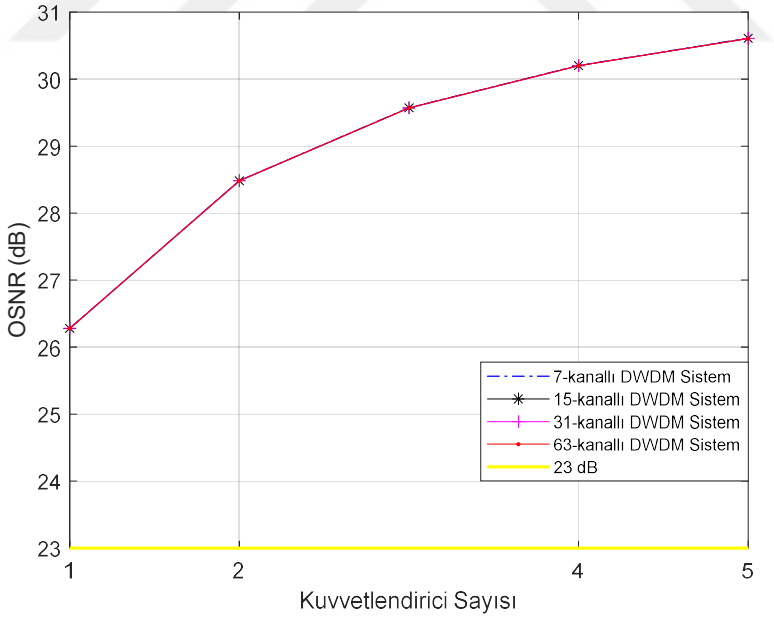
Şekil 4.57. Δf =3,125 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi



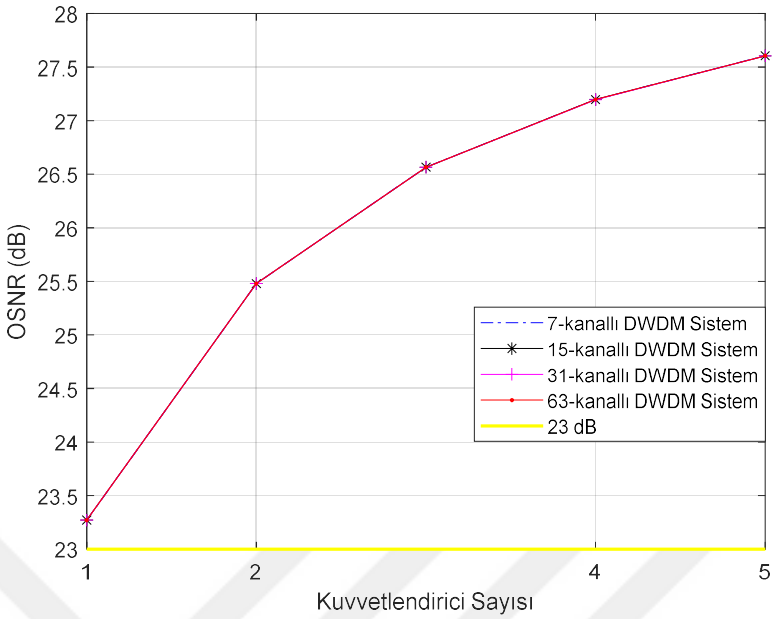
Şekil 4.58. Δf =6,25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi



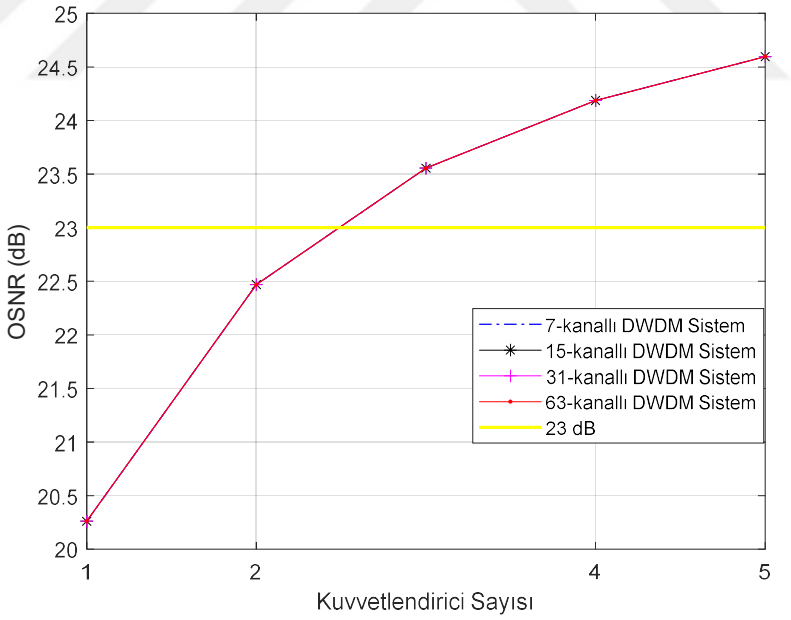
Şekil 4.59. Δf =12,5 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi



Şekil 4.60. Δf =25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi



Şekil 4.61. Δf =50 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi



Şekil 4.62. Δf =100 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında OSNR'ın kuvvetlendirici sayısı ile değişimi

Çizelge 4.25. Δf =3,125 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri

UDWDM Sistem	Kuvvetlendirici Sayısı	1	2	4	5
7- kanallı	OSNR (dB)	31.49	30.48	28.34	27.65
15-kanallı		29.55	28.84	27.17	26.52
31-kanallı		31.10	29.56	27.23	26.52
63-kanallı		27.03	26.27	25.30	24.93

Çizelge 4.26. Δf =6,25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri

UDWDM Sistem	Kuvvetlendirici Sayısı	1	2	4	5
7- kanallı	OSNR (dB)	31.56	33.67	34.77	35.31
15-kanallı		31.16	32.66	33.09	34.23
31-kanallı		32.04	33.72	34.29	34.23
63-kanallı		30.85	32.09	32.36	33.15

Çizelge 4.27. Δf =12,5 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri

DWDM Sistem	Kuvvetlendirici Sayısı	1	2	4	5
7- kanallı	OSNR (dB)	29.26	31.38	33.07	33.52
15-kanallı		29.24	31.36	32.95	33.47
31-kanallı		29.28	31.46	33.10	33.47
63-kanallı		29.23	31.32	32.91	33.41

Çizelge 4.28. Δf =25 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri

DWDM Sistem	Kuvvetlendirici Sayısı	1	2	4	5
7- kanallı	OSNR (dB)	26.28	28.48	30.20	30.61
15-kanallı		26.28	28.48	30.20	30.61
31-kanallı		26.28	28.48	30.20	30.61
63-kanallı		26.28	28.48	30.20	30.61

Çizelge 4.29. Δf =50 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri

DWDM Sistem	Kuvvetlendirici Sayısı	1	2	4	5
7- kanallı	OSNR (dB)	23.27	25.48	27.20	27.61
15-kanallı		23.27	25.48	27.20	27.61
31-kanallı		23.27	25.48	27.20	27.61
63-kanallı		23.27	25.48	27.20	27.61

Çizelge 4.30. Δf =100 GHz için FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerleri

DWDM Sistem	Kuvvetlendirici Sayısı	1	2	4	5
7- kanallı	OSNR (dB)	**20.26**	**22.47**	24.19	24.60
15-kanallı		**20.26**	**22.47**	24.19	24.60
31-kanallı		**20.26**	**22.47**	24.19	24.60
63-kanallı		**20.26**	**22.47**	24.19	24.60

Şekil 4.57 ve Çizelge 4.25'e göre, kullanılan EDFA sayısı arttıkça, kanallar arası boşluk değerinin 3,125 GHz olduğu 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı uzak mesafe UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki OSNR değeri azalış gösterir. EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistemlerde, EDFA sayısının artmasıyla FWM gücü, modifiye SRS gücü ve ASE gürültüsü artmaktadır. Ancak bu artıştan en çok FWM etkilenmektedir. UDWDM sistemlerde, kanallar arası boşluk değerleri ve optik filtre bantgenişliği DWDM sistemlere göre daha dardır. Bu durum, UDWDM sistemlerde kanal bantgenişliğini daha etkin kullanma ve daha düşük ASE gürültüsü üretme gibi avantajlara sahip olsa da, FWM etkinliğini ve FWM gücünü çok fazla artırmaktadır. Bu nedenle, kanallar arası boşlukların dar olduğu sistemlerde, FWM'nin baskınlığı artmaktadır. Dolayısıyla hem kanallar arası boşlukların dar olması hem de kullanılan EDFA sayısının artmasıyla meydana gelen FWM gücündeki artış, Şekil 4.57 ile gösterilen 3,125 GHz kanallar arası boşluğa sahip UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerlerinin azalmasına neden olmakta, ancak bu azalışa rağmen, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

6,25 GHz-100 GHz kanallar arası boşluk değeri aralığına sahip sistemlerde, Şekil 4.58-4.62 ve Çizelge 4.26-4.30'a göre, kullanılan EDFA sayısı arttıkça, merkez kanallardaki OSNR değeri genellikle artış göstermektedir. Kullanılan EDFA sayısı arttıkça, modifiye SRS gücü, FWM çapraz karışımı ve ASE gürültüsü artmaktadır. Kanallar arası boşluk değerleri arttıkça, optik filtrenin bantgenişliği artar ve bu da ASE gürültüsünün artışına neden olur. Oysaki, kanallar arası boşluk değeri arttıkça, FWM etkinliği ve FWM gücü azalış gösterir. Bu durum, kanallar arası boşlukların geniş olduğu DWDM sistemlerde, ASE gürültüsünün FWM gürültüsüne göre baskın olmasına yol açar. Ayrıca çok segmentli sistemlerde kullanılan EDFA sayısı arttıkça, modifiye SRS gücünde görülen artış, ASE gücünde görülen artışa göre daha yüksektir. Bu nedenle 6,25 GHz-100 GHz kanallar arası boşluk değerine sahip çok segmentli sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değeri, kullanılan EDFA sayısı arttıkça, artış göstermektedir.

Ayrıca, kanallar arası boşluk değerinin 25 GHz-100 GHz aralığında olduğu Çizelge 4.28- 4.30'a göre, aynı kuvvetlendirici sayısına sahip çok segmentli sistemlerde, kanal sayısı farketmeksizin, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında, aynı OSNR değeri elde edilmiştir. (2.29)'a göre, ASE gürültüsü optik filtre bantgenişliğine bağımlıyken, haberleşme sisteminin toplam kanal sayısından bağımsızdır. Kanallar arası boşluk değerinin ve optik bantgenişliğin büyük olduğu DWDM sistemlerde, FWM çapraz karışımı düşük olmasına rağmen, ASE gürültü gücü yüksektir. Bu nedenle, kanallar arası boşluk değerleri artırıldıkça, ASE gürültü gücü, FWM gürültü gücüne göre daha baskın olmaya başlar. Bölüm 3.5 ile açıklanan benzetim koşullarına göre, tüm kanalların giriş gücü eşit ve 0,1 mW değerindedir. Giriş gücünün 0,1 mW değeri için, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı sistemlerin merkez kanallarında görülen modifiye SRS güçleri arasındaki farklılıklar çok düşüktür ve ihmal edilebilir. Şekil 4.24 ile gösterildiği gibi, modifiye SRS gücü, 0,5 mW- 5 mW giriş gücü aralığında daha etkindir. Dolayısıyla, kanallar arası boşluk değerlerinin yüksek olduğu DWDM uygulamalarda, ASE gürültüsünün kanal sayısına bağlı olmaması; FWM gücünün düşmesi; 0,1 mW giriş gücü koşullarında, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı sistemlerin merkez kanallarında görülen SRS gücünün fazla değişmemesi nedeniyle, aynı EDFA sayısına sahip 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı sistemlerin merkez kanallarında elde edilen OSNR değerleri aynıdır.

Şekil 4.57-4.62 ve Çizelge 4.25-4.30'a göre, kanallar arası boşluk değeri 100 GHz olan 1 ve 2 EDFA kullanılan çok segmentli 63-kanallı DWDM sistemler hariç, diğer tüm konfigürasyonların merkez kanallarında görülen OSNR değeri minimum 23 dB kriterini sağlamaktadır.

5. SONUÇ

Bu tezde, tek segmentli 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı, yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen SXR'ın ve farklı sayılarda EDFA kullanılan çok segmentli, 7-, 15, 31- ve 63-kanallı, FWM, SRS ve ASE gürültüsü birleşik etkisi altındaki DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin merkez kanallarında görülen OSNR'ın, kanal giriş gücü ($P_{giriş}$), kanallar arası boşluk değerleri (Δf), toplam iletim uzunluğu (L) ve kuvvetlendirici aralığı (ℓ), kuvvetlendirici sayısı (m) gibi tasarım parametreleriyle değişimi incelenerek, tek segmentli ve EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerin performansları karşılaştırılmıştır.

Tek segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin, yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki merkez kanalları için elde edilen SXR-Pgiriş benzetim sonuçları şunları göstermektedir:

1. 3,125 GHz- 12,5 GHz kanallar arası boşluk değerleri için, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinde, giriş gücü belirli bir kritik seviyeyi aştığında, SXR seviyesi minimum 23 dB kriterini sağlamamaktadır. Bu kritik giriş gücü seviyeleri, kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz, 6,25 GHz ve 12,5 GHz olduğu 7- kanallı sistemler için, sırasıyla, 0,50 mW, 0,89 mW ve 2,73 mW; 15-kanallı sistemler için, sırasıyla, 0,31 mW, 0,70 mW ve 2,31 mW; 31-kanallı sistemler için, sırasıyla, 0,26 mW, 0,64 mW ve 2,17 mW; 63-kanallı sistemler için, sırasıyla, 0,23 mW, 0,62 mW ve 2,11 mW değerlerine sahiptir.

2. Kanallar arası boşluk değerlerinin 25 GHz-100 GHz aralığında olduğu, 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinde, 0,1 mW- 5 mW giriş gücü aralığının tamamında minimum 23 dB SXR kriteri sağlanmaktadır.

3. Kanallar arası boşluk değerinin 100 GHz olduğu 31-kanallı sistemler ile kanallar arası boşluk değerlerinin 50 GHz ve 100 GHz olduğu 63-kanallı sistemler hariç, diğer olası tüm konfigürasyonlarda, yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki merkez kanallardaki SXR değerleri arasında çok küçük farklılıklar vardır ve bu

farklılıklar ihmal edilebilir. 100 GHz kanallar arası boşluk değerine sahip 31-kanallı sistemde, 0,5-5 mW giriş gücü aralığında, FWM ve SRS birleşik etkisine ait SXR değerleri yalın FWM etkisine kıyasla 0,035-0,340 dB daha yüksektir. 50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerine sahip 63-kanallı sistemlerde, 0,5-5 mW giriş gücü aralığında, FWM ve SRS birleşik etkisine ait SXR değerleri yalın FWM etkisine göre, sırasıyla 0,075-0,697 dB ve 0,57-3,81 dB daha yüksektir.

Bir, iki, dört ve beş adet EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarında elde edilen OSNR-Pgiriş benzetim sonuçları şunları göstermektedir:

1. Kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz ve 6,25 GHz olduğu, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli UDWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, kanal giriş gücü arttıkça ekponansiyel olarak azalmaktadır.

2. Kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz olduğu, 7-kanallı UDWDM haberleşme sisteminde, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde, giriş gücü, sırasıyla, 0,35 mW, 0,27 mW, 0,19 mW ve 0,18 mW kritik değerlerini aştığında; kanallar arası boşluk değeri 6,25 GHz iken, giriş gücü, sırasıyla 0,67 mW, 0,81 mW, 0,72 mW ve 0,80 mW değerlerini aştığında, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmamaktadır.

3. Kanallar arası boşluk değerinin 3,125 GHz olduğu, 15-kanallı UDWDM haberleşme sisteminde, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde, giriş gücü, sırasıyla, 0,25 mW, 0,21 mW, 0,17 mW ve 0,16 mW kritik değerlerini aştığında; kanallar arası boşluk değeri 6,25 GHz iken, giriş gücü, sırasıyla, 0,53 mW, 0,54 mW, 0,45 mW ve 0,56 mW değerlerini aştığında, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmamaktadır.

4. Kanallar arası boşluk değerinin 3,125 GHz olduğu, 31-kanallı UDWDM haberleşme sisteminde, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde, giriş gücü, sırasıyla, 0,19 mW, 0,17 mW, 0,15 mW ve 0,14 mW kritik değerlerini aştığında; kanallar arası boşluk değeri 6,25 GHz iken, giriş gücü, sırasıyla, 0,48 mW, 0,46 mW,

0,40 mW ve 0,46 mW değerlerini aştığında, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmamaktadır.

5. Kanallar arası boşluk değerinin 3,125 GHz olduğu, 63-kanallı UDWDM haberleşme sisteminde, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde, giriş gücü, sırasıyla, 0,17 mW, 0,16 mW, 0,14 mW ve 0,13 mW kritik değerlerini aştığında; kanallar arası boşluk değeri 6,25 GHz iken, giriş gücü, sırasıyla, 0,46 mW, 0,43 mW, 0,38 mW ve 0,43 mW değerlerini aştığında, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmamaktadır.

6. Kanallar arası boşluk değerlerinin 12,5 GHz ve 25 GHz olduğu, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, giriş gücü belirli bir kritik seviyeye kadar arttıkça ekponansiyel olarak artış gösterirken bu kritik güç seviyesinden sonra eksponansiyel olarak azalış göstermektedir. Kanallar arası boşluk değeri 12,5 GHz iken, 0,1 mW- 5 mW aralığındaki belirli bir maksimum giriş gücü seviyesi aşıldığında, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmamaktadır. Oysaki kanallar arası boşluk değerinin 25 GHz olduğu durumda, iki EDFA kullanılan 15-, 31- ve 63-kanallı sistemler hariç, diğer tüm konfigürasyonlarda minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

7. Kanallar arası boşluk değerlerinin 50 GHz ve 100 GHz olduğu, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, giriş gücü arttıkça ekponansiyel olarak artış göstermektedir. Kanallar arası boşluk değerinin 100 GHz olduğu, bir ve iki EDFA kullanılan çok segmentli 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı sistemlerde, giriş gücünün, sırasıyla, 0,19 mW ve 0,12 mW değerlerinden küçük olduğu aralıkta, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmamaktadır. Olası diğer tüm durumlarda, minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

Tek segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki merkez kanallarında elde edilen SXR-Δf benzetim sonuçları şunları göstermektedir:

1. Tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisinin incelendiği SXR değerleri, kanallar arası boşluk değerleri arttıkça, artış göstermektedir. Bu artış miktarları, kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz- 6,25 GHz aralığında, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemler için, sırasıyla, 4,96 dB, 7,18 dB, 8,09 dB ve 8,56 dB; kanallar arası boşluk değerlerinin 12,5 GHz-100 GHz aralığında, DWDM sistemler için, sırasıyla, 35,91 dB, 35,98 dB, 36,02 dB (FWM ve SRS birleşik etkisinde 36,03 dB)ve 36,04 dB'dir (FWM ve SRS birleşik etkisinde 36,11 dB).

2. Kanal giriş gücü 0,1 mW gibi düşük değerlerde iken, SRS etkisiyle oluşan modifiye işaret gücü çok düşüktür. Bu nedenle yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisine ait SXR değerleri arasındaki farklar çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Tüm benzetimlerde minimum 23 dB SXR kriteri sağlanmaktadır.

Bir, iki, dört ve beş adet EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarında elde edilen OSNR-Δf benzetim sonuçları şunları göstermektedir:

1. Kanallar arası boşluk değerleri arttıkça, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli UDWDM sistemlerde, FWM, SRS ve ASE birleşik etkileri altındaki merkez kanallarında OSNR değerleri artış göstermektedir. Ayrıca kanal sayısı arttıkça, OSNR değerinde meydana gelen bu artış miktarı da genellikle artmaktadır. Bir, iki, dört ve beş EDFA kullanan çok segmentli 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı UDWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, minimum 23 dB kriterini sağlamaktadır.

2. Kanallar arası boşluk değerleri arttıkça, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistemlerde, FWM, SRS ve ASE birleşik etkileri altındaki merkez kanallarında OSNR değerleri azalış göstermektedir. Kanallar arası boşluk değerinin

100 GHz olduğu bir EDFA kullanan iki segmentli ve iki EDFA kullanan üç segmentli 7-, 15- 31- ve 63- kanallı uzak mesafe DWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değeri, sabit ve sırasıyla, 20, 26 dB ve 22,47 dB olup minimum 23 dB OSNR kriterini sağlamamaktadır. Olası diğer tüm durumlarda minimum 23 dB OSNR kriteri sağlanmaktadır.

Tek segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki merkez kanalları için elde edilen SXR-kanal uzunluğu (L) benzetim sonuçları şunları göstermektedir:

1. Kanallar arası boşluk değerlerinin 3,125 GHz ve 6,25 GHz olduğu, tek segmentli 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki SXR değerleri, kanal uzunluğu arttıkça ekponansiyel olarak azalış göstermektedir. Oysaki, kanallar arası boşluk değerlerinin 12,5 GHz-100 GHz aralığında olduğu DWDM sistemlerin merkez kanallarındaki SXR değerleri, kanal uzunluğu arttıkça osilasyon davranışı sergilemektedir. Osilasyon davranışı, ilk olarak 12,5 GHz kanallar arası boşluk değerinde başlayıp kanallar arası boşluk değerleri arttıkça şiddetlenmektedir. Kanal uzunluğu yaklaşık olarak 50 km'ye kadar artırıldıkça, SXR değerleri osilasyonlar yaparak artış gösterir. Kanal uzunluğunun 100 km-150 km aralığında ise, osilasyonlar sönümlenerek SXR neredeyse sabit kalır. Faz uyumsuzluğu artışının neden olduğu bu osilasyonlar, kanal uzunluğunun çok kısa mesafelerde değişimiyle sistemin SXR değerlerinde ani değişimlere neden oldukları için, sistemin güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bir, iki, dört ve beş adet EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarında elde edilen OSNR-Δf benzetim sonuçları şunları göstermektedir:

1. Bir, iki, dört ve beş adet EDFA kullanılan 7-, 15-, 31- ve 63- kanallı çok segmentli sistemlerde, FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, kanal uzunluğu arttıkça ekponansiyel olarak azalış göstermektedir.

2. Kanallar arası boşluk değerinin 12,5 GHz olduğu, 7- kanallı bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM sistem ile kanallar arası boşluk değerlerinin 6,25 GHz ve 12,5 GHz olduğu, 15-, 31- ve 63- kanallı, bir, iki, dört ve beş EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, kanal uzunluğu ve kuvvetlendirici aralığı arttıkça osilasyon davranışı göstermektedir. Fakat EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki OSNR değerlerinde gözlemlenen osilasyon davranışı, tek segmentli sistemlerin merkez kanallarındaki SXR değerlerinde gözlemlenen osilasyon davranışı kadar güçlü değildir. Ayrıca tek segmentli sistemlerde, kanallar arası boşluk değerleri arttıkça osilasyon şiddetlenirken, EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde osilasyon görülmemektedir. Böylece EDFA kullanılan çok segmentli sistemlerde OSNR performansı, kanal uzunluğunun kısa mesafeli değişimlerinden sadece belirli şartlar altında çok az etkilenmektedir. Bu durum daha güvenilir sistemler tasarlamak için önemlidir.

Bir, iki, dört ve beş adet EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi altındaki merkez kanallarında elde edilen OSNR-kuvvetlendirici sayısı benzetim sonuçları şunları göstermektedir:

1. Kullanılan EDFA sayısı arttıkça, kanallar arası boşluk değerinin 3,125 GHz olduğu 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı uzak mesafe UDWDM haberleşme sistemlerinin merkez kanallarındaki OSNR değeri azalış gösterir. Oysaki, 6,25 GHz-100 GHz kanallar arası boşluk değeri aralığına sahip sistemlerde, kullanılan EDFA sayısı arttıkça, merkez kanallardaki OSNR değeri genellikle artış göstermektedir.

2. Ayrıca kanallar arası boşluk değerinin 25 GHz-100 GHz aralığında olduğu çok segmentli sistemlerde, aynı kuvvetlendirici sayısına sahip olunması durumunda, kanal sayısı farketmeksizin, 7-, 15-, 31- ve 63-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanallarında aynı OSNR değeri elde edilmiştir.

3. Kanallar arası boşluk değerinin 100 GHz olduğu 1 ve 2 EDFA kullanılan çok segmentli 63-kanallı DWDM sistemler hariç, diğer tüm konfigürasyonların merkez kanallarında görülen OSNR değerleri, minimum 23 dB kriterini sağlamaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre, tek segmentli DWDM/UDWDM haberleşme sisteminin merkez kanallarındaki yalın FWM etkisi ile FWM ve SRS birleşik etkisi ve EDFA kullanılan çok segmentli DWDM/UDWDM sistemlerin merkez kanallarındaki FWM, SRS ve ASE birleşik etkisi karşılaştırılarak incelenmiştir. Güvenilir tek segmentli ve çok segmentli DWDM/UDWDM uzak mesafe optik haberleşme sistemlerinin tasarımı ve gerçeklenmesi için, elde edilen bulgular ve bulgulardan çıkarılan sonuçlar önemli fikirler vermektedir.

KAYNAKLAR

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. 2002. Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition. (Vol. 6), John Wiley& Sons.

Binh, L. N. 2014. Optical Fiber Communications Systems with Matlab and Simulink Models, Second Edition, CRC Press.

Chraplyvy, A. R., Tkach, R. W. 1993. What is the actual capacity of single-mode fibers in amplified lightwave systems?. IEEE Photonics Technology Letters, 5(6): 666–668.

Connely, M. J. 2002. Semiconductor Optical Amplifiers, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Harboe, P. B., Silva, E., Souza, J. R. 2008. Analysis of FWM Penalties in DWDM Systems. World Academy of Science, Engineering and Technology, 48: 77–83.

Hiçdurmaz, B., Temurtaş, H., Karlik, S. E., Yilmaz, 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

Inoue, K. 1992. Phase-mismatching characteristic of four-wave mixing in fiber lines with multistage optical amplifiers. Optics Letters, 17(11): 801-803. https://doi.org/10.1364/ol.17.000801

ITU-T Recommendation, G.694.1. 2020 Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.

Kaler, R., Kaler, R. S. 2012. Investigation of four wave mixing effect at different channel spacing. Optik, 123(4): 352–356. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.01.017

Karlık, S. E. 2016a. 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

Karlık, S. E. 2016b. Analysis of signal-to-crosstalk ratio variations due to four-wave mixing in dense wavelength division multiplexing systems implemented with standard single-mode fibers. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 21(2): 171-188. https://doi.org/10.17482/uujfe.96713

Kaur, G., Singh, M. L. 2009. Effect of four-wave mixing in WDM optical fibre systems. Optik, 120(6): 268–273. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2007.08.007

Kaur, G., Singh, M. L., Patterh, M. S. 2010. Effect of fibre nonlinearities in a WDM transmission system. Optik, 121(10): 889–896. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2008.09.035

Kaur, G., Singh, M. L., Patterh, M. S. 2011. Analytical analysis of long-haul DWDM optical transmission systems in the presence of fiber nonlinearities. Journal of Engineering, Design and Technology, 9(3): 336–346. https://doi.org/10.1108/17260531111179942

Keiser, G. 2000. Optical Fiber Communication, Fourth Edition, Tata McGraw Hill.

Kılınçarslan, K., Karlık S.E. (2021,November), Comparison of single FWM impact with combined impact of FWM and SRS on the performance of long haul DWDM/UDWDM communication systems using SSMFs. 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO_2021), Bursa,Turkey.
Kolimbiris, H. 2004. Fiber Optics Communication, New Jersey, Pearson/Prentice Hall.
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): 1–11. https://doi.org/10.1007/s11082-021-02833-y
Nakajima, K., Ohashi, M., M., S., K., S. 1997. Assessment of dispersion varying fibre in WDM systems. Electronics Letters, 33(12): 1059–1060.
Premaratne, M., Agrawal, G. P. 2011. Light Propagation in Gain Media, New York, Cambridge University Press.
Schneider, T. 2004. Nonlinear Optics in Telecommunications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH Advanced Texts in Physics.
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
Singh, A., Sharma, A. K., Kamal, T. S. 2009. Investigation on modified FWM suppression methods in DWDM optical communication system. Optics Communications, 282(3): 392–395. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.10.014
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, N., Kumar, M., Verma, A. 2019. Analysis of four wave mixing in ultra dense WDM-hybrid optical amplifier systems. Journal of Optical Communications, 1–7. https://doi.org/10.1515/joc-2019-0006
Singh, S., Singh, A., Kaler, R. S. 2013. Performance evaluation of EDFA, Raman and SOA optical amplifier for WDM systems. Optik, 124(2): 95–101. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.11.043