



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**PASİF OPTİK ERİŞİM AĞLARINDA FİBERDEKİ
DOĞRUSAL OLMAYAN OLAYLARIN SİSTEM
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ BİRLEŞİK ETKİLERİNİN
MODELLENMESİ VE BENZETİMİ**

Faisal Ibrahim Mohamed IBRAHİM

Yüksek Lisans Tezi



**PASİF OPTİK ERİŞİM AĞLARINDA FİBERDEKİ
DOĞRUSAL OLMAYAN OLAYLARIN SİSTEM
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ BİRLEŞİK ETKİLERİNİN
MODELLENMESİ VE BENZETİMİ**

Faisal Ibrahim Mohamed IBRAHİM



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PASİF OPTİK ERİŞİM AĞLARINDA FİBERDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN
OLAYLARIN SİSTEM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ BİRLEŞİK
ETKİLERİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ**

Faisal Ibrahim Mohamed İBRAHİM

Dr. Öğr. Üyesi Sait Eser KARLIK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2018

TEZ ONAYI

Faisal Ibrahim Mohamed IBRAHİM tarafından hazırlanan "PASİF OPTİK ERİŞİM AĞLARINDA FİBERDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN OLAYLARIN SİSTEM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ BİRLEŞİK ETKİLERİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Sait Eser KARLIK

Başkan : Prof. Dr. Güneş YILMAZ
Bursa Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sait Eser KARLIK
Bursa Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ömer ZOR
Bursa Teknik Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü
13.8.2018

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

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

30/07/2018

Faisal Ibrahim Mohamed IBRAHIM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PASİF OPTİK ERİŞİM AĞLARINDA FİBERDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN OLAYLARIN SİSTEM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ BİRLEŞİK ETKİLERİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Faisal Ibrahim Mohamed IBRAHİM

BURSA Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sait Eser KARLIK

Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı Pasif Optik Ağ (WDM-PON), modern optik ağ iletişim sistemlerinde önemli bir rol oynamakta olup uzak mesafe ağlarda, tasarımda esneklik sağladığı ve iletim kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı için iyi bir seçenek haline gelmiştir. Günümüzde, Gigabit Pasif Optik Ağ (GPON) yapıları, erişim ağları için önemli özellikler sağlamaktadır. Kanal başına giriş gücü, kanallar arasındaki mesafe, kanal sayısı ve toplam iletim uzunluğu gibi sistem özellikleri, sistemin performansı üzerinde önemli rol oynamakta olup optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler de sistemin performansını sınırlamaktadır. Optik fiberdeki tüm doğrusal olmayan olaylar arasında, uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve dört dalga karışımının (FWM), optik fiberli sistemlerdeki performans sınırlamaları üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu bilinmektedir.

Bu tezde, işaret-çapraz karışım oranı (SXR), -SRS'den kaynaklanan modifiye işaret gücünün FWM çapraz karışım gücüne oranı - değişimlerinden yararlanılarak, aşırı yoğun/yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı gigabit pasif optik ağ (UDWDM/DWDM-GPON) sistemleri üzerindeki SRS ve FWM'nin birleşik etkisi ile FWM'nin yalın etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörünün -Raman kazancı (G_R)- sistem parametreleriyle değişimi de analiz edilmiştir. Benzetim sonuçları, SRS'nin FWM'nin olumsuz etkilerini kompanze ettiğini ve artan kanal sayıları ve kanallar arası boşluk değerleri ile kompanzasyon miktarının arttığını göstermektedir. Ayrıca, Raman kazancının 0.1-5 mW aralığında kanal giriş gücü ile yaklaşık lineer bir değişim sergilediği ve artan fiber uzunlukları, kanallar arası boşluk değerleri ve kanal sayıları ile arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, sistem üzerinde SRS ve FWM'nin birleşik etkisi ile FWM'nin yalın etkisi arasındaki önemli farkları vurgulamakta ve mevcut/gelecekteki UDWDW/DWDM-GPON uygulamaları için önemli fikirler vermektedir.

Anahtar Kelimeler: SRS, FWM, GPON, DWDM, UDWDM, optik fiber, kuvvetlendirme faktörü.

2018, xv + 82

ABSTRACT

MSc Thesis

MODELLING AND SIMULATION OF THE COMBINED EFFECTS OF THE FIBER NONLINEAR PHENOMENA ON THE SYSTEM PERFORMANCE OF PASSIVE OPTICAL ACCESS NETWORKS

Faisal Ibrahim Mohamed IBRAHIM

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Sait Eser KARLIK

Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM-PON) is playing an important role on modern optical network communication systems and becomes a good choice for long-haul networks since it provides flexibility in design and enhances the transmission capacity. Currently, Gigabit Passive Optical Network (GPON) structures promise important features for access networks. System specifications such as input power per channel, channel spacing values, channel numbers and total transmission length have important roles in overall system performance as well as the nonlinear effects in optical fibers limiting the system performance. Among all nonlinear phenomena in the optical fiber, stimulated Raman scattering (SRS) and four wave mixing (FWM) are known to have the major impact on performance limitations in optical fiber systems. In this thesis, using the variations on signal-to-crosstalk ratio (SXR), i.e. the ratio of the modified signal power due to SRS to the FWM crosstalk power, comparative analysis of the combined impact of SRS and FWM with the single impact of FWM on the ultra-dense/dense wavelength division multiplexed gigabit passive optical network (UDWDM/DWDM-GPON) systems has been accomplished. Furthermore, variation of the amplification factor of the Stokes wave, i.e. the Raman gain (G_R), with system parameters has been also analyzed. Simulation results show that SRS compensates negative impacts of FWM and the significance of compensation enhances with increasing channel numbers and channel spacing values. In addition, it has been observed that the Raman gain exhibits an approximately linear variation with channel input powers in the range of 0.1-5 mW and it increases with increasing fiber lengths, channel spacing values and channel numbers. Simulation results emphasize the significant difference between the combined impact of SRS and FWM and the single impact of FWM on the system performance and give important clues for current/future UDWDW/DWDM-GPON implementations.

Key Words: SRS, FWM, GPON, DWDM, UDWDM, Optical fiber, Amplification factor.

2018, xv + 82

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması ve çalışmanın yürütölmesi sırasında kıymetli bilgilerinden, yapıcı eleőtirilerinden ve yönlendirmelerinden dolayı saygıdeğer hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sait Eser Karlık'a çok teşekkür ederim.

Değerli ve sevgili babam İBRAHİM TABALDI'a, annem HARAM MOHAMED'a ve aileme tüm eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteklerini asla esirgemedikleri için sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Faisal İbrahim Mohamed İBRAHİM

.../.../2018



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Işık Dalgası Sistemlerinin Evrimi.....	3
2.2. Kaynak Araştırması.....	6
2.3. Pasif Optik Ağlar (PON'lar).....	9
2.3.1. Zaman Bölmeli Çoğullamalı PON (TDM PON).....	12
2.3.1.1. APON/BPON (ITU-T G.983).....	12
2.3.1.2. GPON (ITU-T G.984x).....	13
2.3.1.3. NG-PON (ITU-T G.987).....	14
2.3.1.4. EPON (IEEE 802.3ah).....	15
2.3.1.5. 10G EPON (IEEE 802.3av).....	16
2.3.2. WDM PON.....	16
2.3.3. OFDM PON.....	17
2.4. Optik Fiberlerde Doğrusal Olmayan Etkiler.....	18
2.4.1. Doğrusal Olmayan Kırılma İndisi Etkileri (Kerr Etkisi).....	19
2.4.1.1. Öz Faz Modülasyonu (SPM).....	19
2.4.1.2. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM).....	19
2.4.1.3. Dört Dalga Karışımı (FWM).....	20
2.4.2. Elastik Olmayan Saçılma Etkileri.....	23
2.4.2.1. Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS).....	23
2.4.2.2. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS).....	24
2.5. SRS ve FWM Olaylarının GPON Sistemlerin Üzerindeki Birleşik Etkisi...	27

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1. Benzetim Modeli.....	29
3.2. SXR-Pgiriş Benzetim Koşulları.....	31
3.3. SXR- Δf Benzetim Koşulları.....	32
3.4. SXR-Kanal Uzunluğu Benzetim Koşulları.....	32
3.5. G_R - Pgiriş Benzetim Koşulları.....	33
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	34
4.1. SXR-Pgiriş Benzetim Sonuçları.....	34
4.2. SXR- Δf Benzetim Sonuçları.....	45
4.3. SXR-Kanal Uzunluğu Benzetim Sonuçları.....	50
4.4. G_R - Pgiriş Benzetim Koşulları.....	60
5. SONUÇ.....	74
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

A_{eff}	Fiberin etkin alanı
D_c	Fiberin kromatik dispersiyon katsayısı
d_{ijk}	Dejenerasyon faktörü
c	Işık hızı
γ	Doğrusalsızlık katsayısı
λ	Dalgaboyu
η_{ijk}	FWM etkinliği
α	Fiberin zayıflama katsayısı
ΔB_{ijk}	Faz uyumsuzluğu faktörü
f_{ijk}	FWM işaretinin frekansı
G_R	Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü
g_{Rmax}	En yüksek Raman kazanç katsayısı
I	Işın yoğunluğu
L	Fiber uzunluğu
L_{eff}	Fiberin etkin uzunluğu
M	Üretilen toplam FWM ürünleri sayısı
n_0	Doğrusal kırılma indisi
n_2	Doğrusal olmayan kırılma indisi
N	Kanal sayısı
P_{FWM}	Üretilen FWM işaretinin gücü
P_{SRS}	SRS'ye bağlı olarak değişen (modifiye) güç

Kısaltmalar

Açıklama

ASE	Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayılma
ATM	Asenkron Transfer Modu
ATM-PON	Asenkron Transfer Modu Pasif Optik Ağ
AWG	Dizi Dalga Kılavuzu Izgarası
BPON	Geniş Bantlı Pasif Optik Ağ
CO	Merkez Ofis
DWDM	Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
DWDM-GPON	Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı Gigabit Pasif Optik Ağ
EDFA	Erbiyum Katkılı Fiber Yükseltici
EPON	Ethernet Pasif Optik Ağ
FSAN	Tam Hizmet Erişim Ağı
FWM	Dört Dalga Karışımı
GPON	Gigabit Pasif Optik Ağ
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ITU-T	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği Telekomünikasyon Standartlaştırma Birimi
MPCP	Çok Noktalı Kontrol Protokolü
NG-PON	Yeni Nesil Pasif Optik Ağ
OFDM-PON	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullamalı Pasif Optik Ağ
OLT	Optik Hat Sonlandırıcı

ONU	Optik Ağ Ünitesi
P2MP	Noktadan Çoklu Noktaya
PLOAM	Fiziksel Katman Operasyon, Yönetim ve Bakımı
PON	Pasif Optik Ağ
POTS	Geleneksel Telefon Hizmeti
QoS	Hizmet Kalitesi
RF	Radyo Frekansı
SBS	Uyarılmış Brillouin Saçılması
SNR	İşaret Gürültü Oranı
SPM	Öz Faz Modülasyonu
SRS	Uyarılmış Raman Saçılması
SSMF	Standart Tek Modlu Optik Fiber
SXR	İşaret Çapraz-Karışım Oranı
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
TDM	Zaman Bölmeli Çoğullama
TDM-PON	Zaman Bölmeli Çoğullamalı Pasif Optik Ağ
UDWDM	Aşırı Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
UDWDM-GPON	Aşırı Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı Gigabit Pasif Optik Ağ
VoIP	IP üzerinden Ses
WDM	Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
WDM-PON	Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı Pasif Optik Ağ
XPM	Çapraz Faz Modülasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	1850-2000 döneminde BL (bit hızı-mesafe) değerinin artışı..... 5
Şekil 2.2.	Veri iletim hızlarının ve erişim ağlarında bantgenişliğinin yıllara göre gelişimi..... 5
Şekil 2.3.	Pasif Optik Ağ (PON) mimarisi..... 10
Şekil 2.4.	Pasif Optik Ağların evrimi..... 11
Şekil 2.5.	APON çerçeve biçimi..... 12
Şekil 2.6.	Yeni Nesil PON (NG-PON) mimarisi..... 15
Şekil 2.7.	WDM-PON mimarisi..... 17
Şekil 2.8.	OFDM-PON mimarisi..... 18
Şekil 2.9.	Optik fiberlerdeki doğrusal olmayan etkiler..... 18
Şekil 2.10.	f1, f2, f3 frekanslarından oluşturulan FWM ürünlerinin gösterimi..... 21
Şekil 2.11.	SBS olayının temel mekanizması..... 24
Şekil 2.12.	SRS etkisinden dolayı optik güç transferi..... 24
Şekil 2.13.	Stokes ve Anti-Stokes Raman saçılması..... 25
Şekil 4.1.	$\Delta f=1.5625$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri 35
Şekil 4.2.	$\Delta f=1.5625$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri..... 35
Şekil 4.3.	$\Delta f=3.125$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri 36
Şekil 4.4.	$\Delta f=3.125$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri..... 36

Şekil 4.5.	$\Delta f=6.25$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri	37
Şekil 4.6.	$\Delta f=6.25$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri.....	37
Şekil 4.7.	$\Delta f= 12.5$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri	38
Şekil 4.8.	$\Delta f=12.5$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri.....	38
Şekil 4.9.	$\Delta f=25$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri	39
Şekil 4.10.	$\Delta f= 25$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri.....	39
Şekil 4.11.	$\Delta f= 50$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri	40
Şekil 4.12.	$\Delta f= 50$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri.....	40
Şekil 4.13.	$\Delta f=100$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri	41
Şekil 4.14.	$\Delta f=100$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri.....	41

Şekil 4.15.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{giriş} = 0.1 \text{ mW}$).....	45
Şekil 4.16.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{giriş} = 0.1 \text{ mW}$).....	46
Şekil 4.17.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{giriş} = 0.1 \text{ mW}$).....	46
Şekil 4.18.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{giriş} = 0.1 \text{ mW}$).....	47
Şekil 4.19.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri	50
Şekil 4.20.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	51
Şekil 4.21.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri	51
Şekil 4.22.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	52
Şekil 4.23.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 15-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	52
Şekil 4.24.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 15-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	53

Şekil 4.25.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri	53
Şekil 4.26.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	54
Şekil 4.27.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	54
Şekil 4.28.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	55
Şekil 4.29.	FWM'nin yalın etkisi altındaki 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri	55
Şekil 4.30.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri.....	56
Şekil 4.31.	1.5625 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - Pgiriş değişimleri.....	61
Şekil 4.32.	3.125 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - Pgiriş değişimleri.....	62
Şekil 4.33.	6.25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - Pgiriş değişimleri.....	62
Şekil 4.34.	12. 5 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - Pgiriş değişimleri	63

Şekil 4.35.	25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	63
Şekil 4.36.	50 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	64
Şekil 4.37.	100 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	64
Şekil 4.38.	1.5625 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	65
Şekil 4.39.	3.125 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	65
Şekil 4.40.	6.25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	66
Şekil 4.41.	12.5 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	66
Şekil 4.42.	25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	67
Şekil 4.43.	50 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	67
Şekil 4.44.	100 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	68

Şekil 4.45.	1.5625 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	68
Şekil 4.46.	3.125 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	69
Şekil 4.47.	6.25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	69
Şekil 4.48.	12.5 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri.....	70
Şekil 4.49.	25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri	70
Şekil 4.50.	50 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri	71
Şekil 4.51.	100 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R -Pgiriş değişimleri	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli PON standartlarının özellikleri.....	11
Çizelge 3.1. G.652 standart tek modlu fiber kablonun parametreleri.....	29
Çizelge 3.2. 7-kanallı sistemin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri için kanal kombinasyonları.....	30
Çizelge 3.3. 15- kanallı sistemin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri için kanal kombinasyonları.....	30
Çizelge 3.4. 31- kanallı sistemin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri için kanal kombinasyonları.....	31
Çizelge 4.1. FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri	42
Çizelge 4.2. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri	42
Çizelge 4.3. FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri	43
Çizelge 4.4. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri	43
Çizelge 4.5. $P_{giriş} = 0.1$ mW için FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	47

Çizelge 4.6.	$P_{giriş} = 0.1$ mW için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	47
Çizelge 4.7.	$P_{giriş} = 0.1$ mW için FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	48
Çizelge 4.8.	$P_{giriş} = 0.1$ mW için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	48
Çizelge 4.9.	FWM'nin yalın etkisi altındaki farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	57
Çizelge 4.10.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	58
Çizelge 4.11.	FWM'nin yalın etkisi altındaki farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	59
Çizelge 4.12.	SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri	60
Çizelge 4.13.	$P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarına sahip 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R değerleri.....	72
Çizelge 4.14.	$P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarına sahip 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R değerleri.....	73

1. GİRİŞ

Modern optik haberleşme sistemlerinde, kullanıcıların sürekli artan talepleri nedeniyle uzun ömürlü, yüksek hızlı, yüksek bantgenişlikli ve düşük maliyetli ağlar önem kazanmaktadır. Optik kanallar yardımıyla bilgi ileten iletişim sistemleri çok çeşitli uygulamalar için geliştirilmektedir. Optik iletişimin avantajları yüksek bantgenişliği, düşük zayıflama ve elektromanyetik (EM) girişimlere karşı bağımsızlığıdır. Bu avantajları, optik iletişimi özellikle uzun mesafeli iletişim bağlantıları için uygun kılmaktadır.

Günümüzde, pasif optik ağ (PON) yapıları, özellikle Gigabit Pasif Optik Ağlar (GPONs), erişim ağları için önemli özellikler sağlamaktadır. Farklı kanallardaki bilgilerin değişik dalgaboylarında aynı anda tek fiber yardımıyla hem yukarı hem de aşağı yönlerde iletilmesine izin verilmesi nedeniyle, Aşırı Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı-GPON (UDWDM-GPON) ve Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı-GPON (DWDM-GPON) sistemlerinin ağ tasarımında kapasiteyi ve esnekliği arttırmada daha iyi bir seçenek olduğu kanıtlanmıştır.

Bu tezde, hem aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (UDWDM) hem de yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM) yönteminin kullanıldığı pasif optik ağlarda, optik fiberde medyana gelen uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve dört dalga karışımı (FWM) gibi doğrusal olmayan olayların iletim performansına etkileri PON standartları göz önüne alınarak incelenmiştir. Ayrıca G.652 standart tek modlu optik fiber (SSMF) tasarım parametreleri kullanılarak geliştirilen sistem modelleri üzerinde benzetimler (simülasyonlar) yapıp yorumlanmıştır.

İkinci bölümde, ışık dalgası sistemlerinin evrimi hakkında bilgiler verilmiştir. Kaynak araştırması kısmında optik fiberdeki SRS ve FWM gibi doğrusal olmayan olayların UDWDM/DWDM sistem performansı üzerindeki etkisini konu alan literatürdeki çalışmalara değinilmiştir. PON teknolojisi, zaman bölmeli çoğullamalı PON (TDM-PON), dalgaboyu bölmeli çoğullamalı PON (WDM-PON) ve ortogonal frekans bölmeli çoğullamalı PON (OFDM-PON) açıklanmıştır. Ayrıca, optik fiberlerde doğrusal olmayan etkiler; öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM), dört dalga karışımı

(FWM), uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) olayları açıklanmıştır. Bu bölümde son olarak uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve dört dalga karışımı (FWM) olaylarının WDM-GPON sistemleri üzerindeki birleşik etkisi anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, UDWDM/DWDM-PON sistemlerindeki optik hat sonlandırıcı (OLT) ve optik bölücü arasındaki kanallarda görülen SRS ve FWM birleşik etkisini ve FWM yalın etkisini analiz etmek için yapılan benzetimlerde kullanılan yöntemler, modeller, optik fiber parametreleri ve benzetim koşulları açıklanmıştır. Ayrıca, Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü (G_R) de sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, UDWDM/DWDM-PON sistemler üzerindeki SRS ve FWM birleşik etkisi, FWM yalın etkisi ve Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü için yapılan benzetim sonuçları verilmiş ve bu sonuçlar yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Işık Dalgası Sistemlerinin Evrimi

Optik iletişimin geçmişi eski çağlara kadar uzanmaktadır. Geçmişteki medeniyetler bilgi transferi için, ateş, duman işaretleri, yansıyan güneş ışığı ve işaret lambaları gibi araçları kullanmıştır.

1980'lerde, ilk nesil ışık dalgası sistemleri ticari olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Bu nesilde, 0.8 μm civarında çalışan GaAs yarı iletken lazerler kullanılmıştır. Ayrıca, 45 Mb/s'lik bir hızla çalışılmış ve 10 km'ye kadar tekrarlayıcı aralıklarına izin verilmiştir. Tekrarlayıcı aralığı, ışık dalgası sistemi fiber zayıflamasının 1 dB/km'nin altında olduğu 1.3 μm civarındaki dalgaboyu bölgesinde çalıştırılarak önemli ölçüde artırılabilir. Ayrıca bu dalgaboyu bölgesinde optik fiberler asgari dispersiyon sergiler. InGaAsP yarı iletken lazerleri ve dedektörleri 1.3 μm civarında geliştirilmiştir.

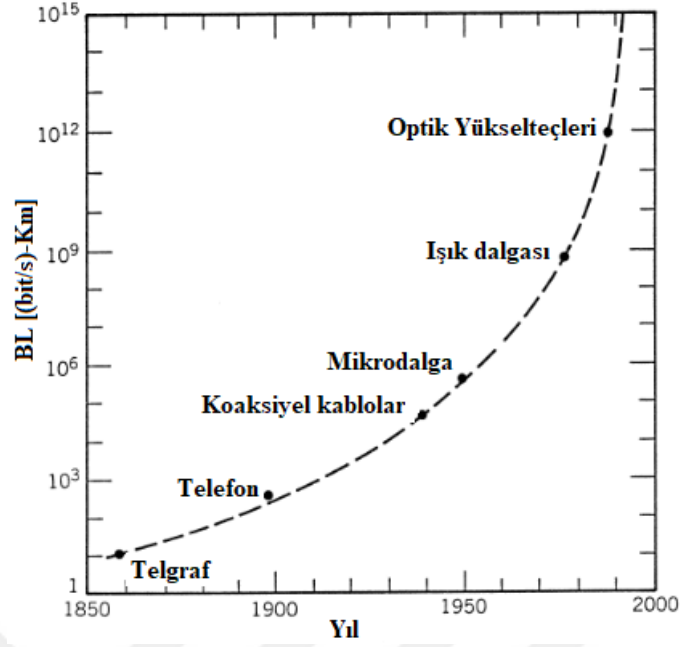
1980'lerin başında, ikinci nesil optik fiberli iletişim sistemleri kurulmuştur. Çok modlu fiberlerdeki dispersiyon nedeniyle, ilk sistemlerin bit hızı 100 Mb/s'nin altında sınırlandırılmıştır (Gloge ve arkadaşları 1980). 1981'de, bir laboratuvar deneyinde, 44 km'lik tek modlu fiber üzerinden 2 Gb/s hızında iletim gerçekleştirilmiştir (Yamada ve ark. 1981). 1987'de, yaklaşık 50 km'lik bir tekrarlayıcı aralığıyla 1.7 Gb/s'e kadar bit hızında çalışan ikinci nesil ışık dalgası sistemi ticari olarak geliştirilmiştir. İkinci nesil ışık dalgası sistemlerinin tekrarlayıcı aralığı, 1.3 μm çalışma dalgaboyundaki fiber kayıplarıyla sınırlandırılmış olup bu kayıp tipik olarak 0.5 dB/km'dir.

1.55 μm 'de çalışan üçüncü nesil ışık dalgası sistemlerinin tanıtılması, 1.55 μm civarındaki büyük fiber dispersiyonu nedeniyle önemli derecede gecikmiştir. 1985'te laboratuvar deneyleri, 100 km'yi aşan mesafelerde 4 Gb/s'ye kadar olan bit hızlarında bilgi iletim imkânının varlığını göstermiştir (Gnauck ve ark. 1985). 1990'da, 2.5 Gb/s'de çalışan üçüncü nesil ışık dalgası sistemleri ticari olarak piyasaya sürülmüştür. Üçüncü nesil 1.55 μm sistemlerinin bir dezavantajı, işaretin 60-70 km aralıklara periyodik olarak yerleştirilen elektronik tekrarlayıcılar kullanılarak yeniden üretilmesidir.

Dördüncü nesil ışık dalgası sistemlerinin tekrarlayıcı aralığını arttırmak için optik kuvvetlendirme ve bit hızını arttırmak için dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) kullanılmıştır. Günümüzde, WDM tekniği aracılığıyla daha fazla kanal yayınlanarak sistem kapasitesi arttırılmıştır. Ayrıca, çoğu WDM sisteminde, fiber kayıpları, 60-80 km aralıklarla tekrarlanan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA) kullanılarak periyodik olarak telafi edilmiştir.

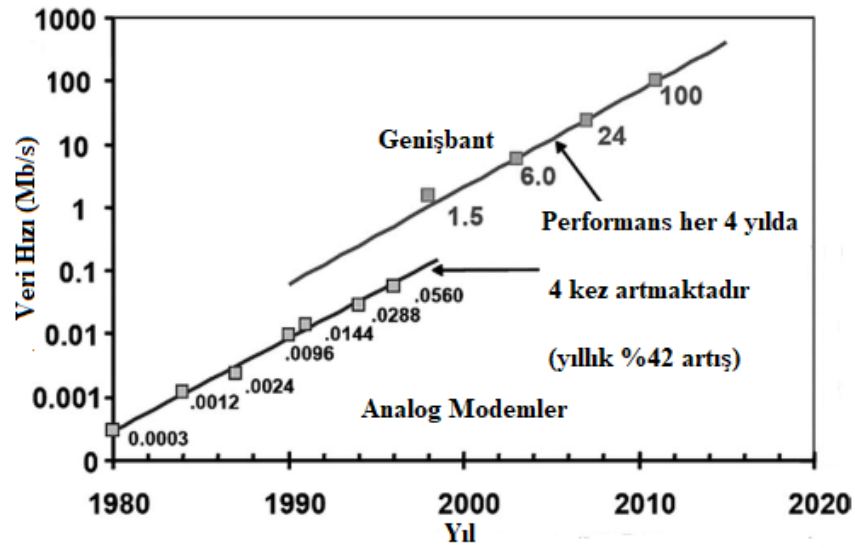
Beşinci nesil optik fiberli iletişim sistemleri, bir WDM sisteminin üzerinde eşzamanlı olarak çalışabileceği dalgaboyu aralığını genişletmekle ilgilidir. C bandı olarak bilinen konvansiyonel dalgaboyu penceresi, 1.530-1.565 μm dalgaboyu aralığını kapsar. İletim penceresi hem uzun hem de kısa dalgaboyu taraflarına uzatılarak, L ve S bantları da kapsanabilmektedir. Bundan başka, Raman kuvvetlendirme tekniği her üç dalgaboyu bandındaki işaretler için kullanılabilir. Ayrıca, 1.30-1.65 μm arasında uzanan tüm dalgaboyu bölgesinde fiber kayıpları küçük olduğu için, kuru fiber (Dry fiber) olarak bilinen yeni bir türde fiber geliştirilmiştir (Thomas ve ark. 2000).

Şekil 2.1'de, bit hızı-mesafe (BL) değerinin 1850-2000 dönemindeki teknolojik ilerlemeler yoluyla nasıl arttığı gösterilmektedir.



Şekil 2.1. 1850-2000 döneminde BL (bit hızı-mesafe) değerinin artışı (Agrawal 2002)

Şekil 2.2’de, erişim ağlarındaki ortalama veri hızlarının geçmiş ve gelecekteki projeksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Veri iletim hızlarının (Mb/s) ve erişim ağlarında bantgenişliğinin yıllara göre gelişimi (Lee ve arkadaşları 2006)

Şekil 2.2’de, her abone için bantgenişliğinin, her dört yılda bir dört kat artış sergilediği görülmektedir.

2.2. Kaynak Araştırması

Optik fiberdeki doğrusal olmayan olaylar (FWM ve SRS gibi) ile ilgili birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Literatürdeki bu çalışmalardan bazıları şunlardır; Singh ve Hudiara, DWDM sistemlerinde SRS etkisinin değerlendirilmesi için yeni bir yöntemi hem pompa tükenmesi hem de fiber zayıflama katsayısının dalgaboyu bağımlılığını dikkate alarak önermiştir. Çalışmada; yöntemin yeniliği, doğrusal olmayan SRS probleminin parçalı doğrusal bir şekilde çözülmüş olmasıdır, yani doğrusal olmayan problem küçük doğrusal adımlara bölünmüştür. Buna ek olarak, istenen doğruluğu kaybetmeden adım büyüklüğünü 100 m’den 1 km’ye çıkarmak için bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca, adım boyutundaki bu on katlık artış, benzetim için çok yararlı olan genel işlem süresinde önemli bir azalmaya yol açmıştır (Singh ve Hudiara 2004).

Kaur ve Singh, minimum gürültü elde etmek için SRS'nin ve FWM'nin birleşik etkisi göz önüne alınarak yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (ASE) gürültüsü varlığında kanallar arası boşluk değerinin optimizasyonu için, bir algoritma önermiştir. Buna göre, modifiye SRS işaretin toplam gürültüye (FWM ve ASE'nin birleşik etkisi) oranı, optimum kanallar arası boşluk değerini bulmak için kriter olarak seçilmiştir. Sunulan algoritma, fiberdeki doğrusal olmayan olayların etkisi altında, minimum gürültünün elde edileceği optimum kanallar arası boşluk değerini belirlemede uygulanabilmiştir (Kaur ve Singh 2007).

Kaur ve Singh, FWM'nin toplam sistem gürültüsündeki etkisini incelemek için SRS'nin ve FWM'nin birleşik etkisi ve yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (ASE) gürültüsü varlığını göz önünde bulundurularak bir algoritma önermiştir. Yapılan çalışmada, SNR, işaret olarak modifiye SRS işareti dikkate alınarak ve gürültü işaret olarak da ASE ve FWM'den kaynaklanan birleşik gürültü göz önünde bulundurularak hesaplatılmıştır. Sonuçta, FWM'nin, toplam sistem gürültüsüne en önemli katkıyı verdiği net bir şekilde gösterilmiştir. Bunun yanında, FWM gürültüsünü azaltmak için, eşit olmayan kanallar arası boşluk değerleri önerilmiştir (Kaur ve Singh 2009).

Kaur ve ark., kaskat kuvvetlendiricili DWDM iletim sistemlerinde SRS ve FWM gibi önemli doğrusal olmayan olayların etkisini, farklı veri hızlarında incelemiştir. Analizlerde, farklı veri hızlarında, SRS'nin ve FWM'nin birleşik etkisi ve kendiliğinden yükseltilmiş yayılma (ASE) gürültüsünün varlığı göz önüne alınarak, işaret gürültü oranı (SNR) değerlendirmeleri yapılmıştır. Sonuç olarak, veri hızındaki artışla SNR'nin arttığı görülmüştür. Ayrıca, farklı veri hızları için sistem uzunluğunda bir artış ile SNR'deki düşüş gözlemlenmiştir (Kaur ve ark. 2010).

Singh ve Iyer, FWM'nin ve SRS'nin yıldız topolojili tamamen optik WDM ağların performansı üzerindeki birleşik etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, en kötü etkilenen kanalın işaret-gürültü oranı (SNR) açısından performans karşılaştırması, (a) termal, atış, FWM ve (b) termal, atış, FWM ve SRS gürültüsü altında incelenmiştir. Sonuçta; FWM'nin varlığında, ağın performansının belli bir güç seviyesinden sonra azalmaya başladığı görülmüştür. FWM ürünlerinin sayısı, kullanıcı sayısındaki artışla arttıkça, ağın performansı düşmüştür. SRS'nin varlığının ağ performansını daha da düşürdüğü gözlenmiştir (SRS'den dolayı alıcıda alınan güç, SRS'nin dikkate alınmadığı durumlarda alıcıda alınan güçten daha düşüktür) (Singh ve Iyer 2010).

Sabapathi ve Sundaravadivelu, uyarılmış Brillouin saçılması (SBS), uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve dört dalga karışımı (FWM) gibi sınırlayıcı lineer olmayan faktörlerin DWDM optik fiberli haberleşme sistemlerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel sonuçlar, spektral genişliği arttırarak SBS güç eşiği seviyesinin arttırıldığını net bir şekilde ortaya koymuştur. Ayrıca, kanallar arası boşluktaki artışın SRS etkisini arttırdığı gözlenmiştir (düşük dalga boylarından daha yüksek dalga boylarına daha fazla güç transferi nedeniyle). Bununla birlikte, artan kanallar arası boşluk değeri FWM etkisini azaltmıştır (Sabapathi ve Sundaravadivelu 2011).

Kaur ve ark., DWDM optik iletim sistemlerinin analitik analizini, iki önemli doğrusal olmayan olayın (SRS ve FWM) varlığında gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, SRS ve FWM birleşik etkisi, EDFA'lar tarafından üretilen ASE gürültüsü varlığında analitik olarak incelenmiştir. Buna göre, sistemin SNR açısından performansı, aynı anda SRS, FWM ve ASE dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca, verilmiş olan denklemler, sistem

tasarımında, herhangi bir kuvvetlendirici aralığı değeri için SNR'yi hesaplama veya herhangi bir belirli SNR değeri uygun kuvvetlendirici aralığı değerini hesaplama konusunda yardımcı olabilmektedir (Kaur ve ark. 2011).

Kaur ve ark., DWDM sistemlerinde SRS etkisini analiz etmiştir. Yapılan çalışmalarda, SRS, tek kanallı sistemler üzerinde önemsiz bir etkiye sahip iken WDM sistemlerinde önemli hale gelir çünkü güç kaybı düşük dalgaboyundan daha yüksek dalgaboyuna doğru ciddi bir oranda meydana gelmektedir. Ayrıca, modifiye edilmiş SRS gücü dalgaboyu arttıkça artmıştır ve daha düşük dalgaboyu kanalından daha yüksek dalgaboyu kanalına güç transferi nedeniyle iletim uzunluğu değeri de artmıştır (Optik fiberde birlikte yayılan daha düşük dalgaboylu işareti zayıflatma pahasına daha yüksek dalgaboylu işaretin kuvvetlendirilmesine yol açmıştır). Sonuçta, kanal sayısı, fiber uzunluğu ve kanallar arası boşluk değeri arttıkça en kötü durum kanalındaki modifiye SRS gücünün azaldığı gösterilmiştir. Kanal sayısı, fiber uzunluğu ve kanallar arası boşluk gibi parametreler SRS etkisini artırmıştır. SRS etkisinden en çok etkilenen parametre kanal sayısıdır ve en az etkilenen parametre ise fiber uzunluğudur (Kaur ve ark. 2015).

Karlık, 9-, 11-, 13-, 15-kanallı DWDM ve UDWDM sistemlerin merkez kanallarında, farklı optik fiberler için (TeraLight, LEAF, TrueWave-Reach ve TrueWave-RS NZDSFs) FWM etkisinin analizini yapmıştır. Sonuçta, tüm NZDSF tipleri için, 1 mW kadar düşük giriş güçlerinde, sırasıyla 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerleri için UDWDM ve DWDM sistemlerinde minimum 23 dB işaret çapraz-karışım oranı (SXR) kriterinin karşılanmadığı gösterilmiştir. Ayrıca, tüm DWDM ve UDWDM sistemleri için, en düşük ve en yüksek FWM çapraz karışım değerleri TeraLight'a ve TrueWave-RS'e aittir (Karlık 2016a).

Karlık, FWM'nin etkilerinden dolayı işaret-çapraz-karışım oranının (SXR) değişimini, G.652 standart tek modlu fiberlerle (SSMF'ler) uygulanan 5-, 7-, 9-kanallı DWDM sistemlerin merkez kanalları üzerinde analiz etmiştir (12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz eşit kanallar arası boşluk değerleri için). Bu çalışmada benzetimler, kromatik dispersiyon, dispersiyon eğimi, doğrusalsızlık katsayısı ve zayıflama katsayısı için farklı tasarım parametreleri değerlerine sahip üç farklı ticari olarak temin edilebilen SMF'ler

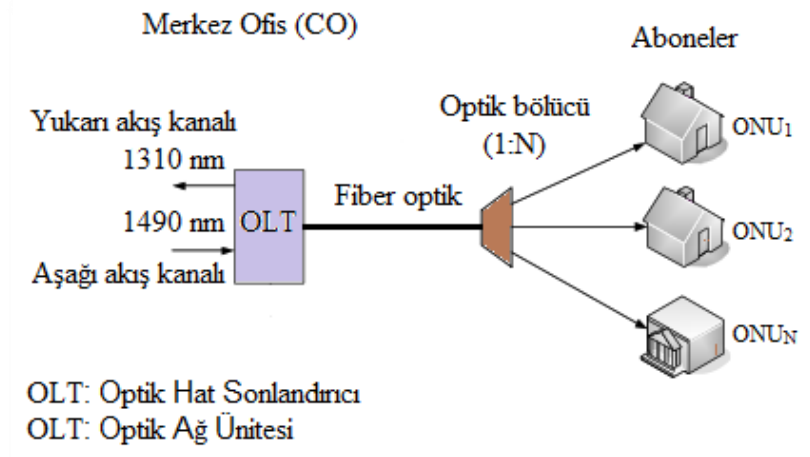
kullanan sistemler için gerçekleştirilmiştir. FWM'nin etkisi altında, giriş güçlerindeki, kanallar arası boşluk değerlerindeki ve fiber iletim uzunluklarındaki değişikliklerle SXR'nin değişimleri gözlenmiştir. Sonuçlar, optik fiber ve sistem tasarım parametrelerinin DWDM sistemlerin FWM performansı üzerindeki birleşik etkisini göstermekte ve sadece uzak mesafeler için değil aynı zamanda DWDM sistemlerinin erişim ağı uygulamalarına için de önemli ipuçları verilmiştir (Karlık 2016b).

Saleh ve Karlık, standart tek modlu fiberler (SSMF'ler) kullanan DWDM-GPON'ların yukarı yönlü hat performansı üzerindeki FWM etkisini analiz etmiştir. Bu yapılan çalışmada, 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı DWDM-GPON sistemlerinin merkez yukarı hat kanalları üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yukarı hat performansının değerlendirilmesinde, FWM etkilerine bağlı olarak işaret-çapraz-karışım oranı (SXR) değişimi göz önüne alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, hem FWM etkisi altında en kötü durum değerlerini sergilemekte hem de FWM etkileri altında sistem güvenilirliğini sağlama konusunda mevcut GPON uygulamaları için önemli ipuçları vermektedir (Saleh ve Karlık 2018).

2.3. Pasif Optik Ağlar (PON'lar)

Pasif optik ağ (PON), geleneksel telefon hizmeti (POTS), IP üzerinden ses (VoIP), veri ve video gibi birden fazla hizmeti taşıyabilen birleşmiş bir altyapıdır. Ayrıca, PON, Tam Hizmet Erişim Ağı (FSAN) çalışma grubu tarafından oluşturulmuş ITU-T ve IEEE tarafından standartlaştırılmış bir dizi teknolojidir.

Pasif optik ağlar (PON'lar) teknolojisi, birden fazla kullanıcıyı desteklemek için tek bir fiber kullanıldığı anlamına gelen, noktadan çoklu noktaya topolojiyi kullanan bir optik ağ teknolojisidir. PON, optik hat sonlandırıcı (OLT), optik ağ üniteleri (ONU) grubu, bir pasif optik cihaz veya yukarıda bahsedilen cihazları bağlayan bir bölücü (optik bölücü) ve optik fiberler içermektedir. PON mimarisi, Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

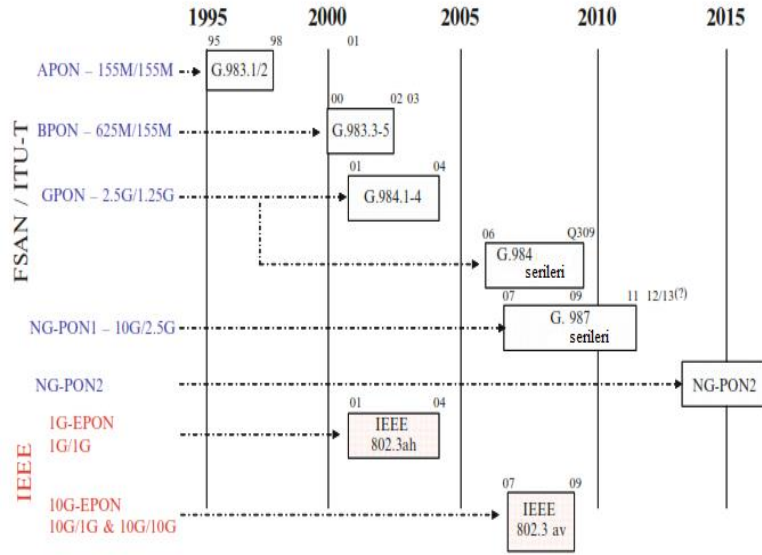


Şekil 2.3. Pasif Optik Ağ (PON) mimarisi

OLT, metropol ağından gelen verileri aşağı yönlü akış üzerinden ONU'lara ve ONU'lardan gelen verileri yukarı yönlü akış üzerinden metropol ağına gönderme yükümlülüğü bulunan merkezi ofis'te (CO) yer almaktadır. OLT tarafından iki dalgaboyu kullanılır, birisi aşağı yönlü trafik için 1490 nm ve diğeri yukarı yönlü trafik için 1310 nm'dir.

Yukarı yönde veri çarpışmalarını önlemek için, abone verileri kısa aralıklarla tamponlanmalı ve iletilmelidir. CO, hangi abonenin hangi noktada bir patlama gönderebileceğini koordine etmelidir. Bu yöntem, Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) olarak bilinir ve patlama modu iletimini gerektirmektedir. Aşağı akış yönü daha basittir. Buna göre CO, verileri adreslerle etiketlemekte ve sıralı düzenle tüm abonelere yayınlamaktadır. Her abone, bilgileri uygun adres etiketiyle seçer. Bu yöntem Zaman Bölmeli Çoğullama (TDM) olarak bilinmektedir.

ONU'lar kullanıcı yerleşkelerinde bulunmaktadır. ONU, son kullanıcılara servis arayüzü sağlamaktadır. Optik bölücü, OLT ve ONU arasında bulunur ve aşağı yönde iletim için bir çoğullama çözücü olarak ve yukarı yönde iletim için bir çoklayıcı olarak çalışmaktadır. PON'ların evrimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Pasif Optik Ağların evrimi (Ansari 2013)

Veri çoğullama yöntemine bağlı olarak üç ana tip PON vardır; zaman bölmeli çoğullamalı PON (TDM-PON), dalgaboyu bölmeli çoğullamalı PON (WDM-PON) ve ortogonal frekans bölmeli çoğullamalı PON (OFDM-PON). Çizelge 2.1’de, PON’ların standartlarının özellikleri ifade edilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli PON standartlarının özellikleri

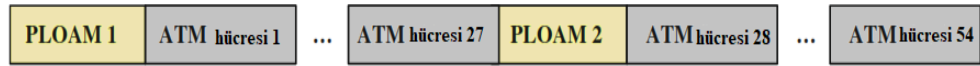
Özellikler	APON/BPON	GPON	XG-PON1	EPON	WDM-PON
Standart	ITU-T G.983	ITU-T G.984	ITU-T G.987	IEEE 802.3ah	ITU-T G.983
Aşağı akış hızları	622 Mbps	2.488 Gbps	9.9528 Gbps	1.25 Gbps	1-10 Gbps (kanal başına)
Yukarı akış hızları	155 Mbps	1.244 Gbps	2.488 Gbps 9.9528 Gbps	1.25 Gbps	1-10 Gbps (kanal başına)

2.3.1. Zaman Bölmeli Çokullanmalı PON (TDM-PON)

Şu anda en yaygın kullanılan PON sistemleri TDM-PON sistemleridir. TDM-PON, Asenkron Transfer Modu PON (ATM-PON veya APON), Geniş Bantlı PON (BPON), Ethernet PON (EPON), Gigabit PON (GPON), 10G-EPON ve Yeni Nesil PON'u (NG-PON) içermektedir.

2.3.1.1. APON/BPON (ITU-T G.983)

ATM PON ya da APON, FSAN komitesi tarafından belirlenen ilk PON teknolojisidir. APON, ATM'yi ikinci katmandaki işaretleme protokolü olarak kullanmaktadır. APON'da, aşağı yönde iletim, 155.52 Mb/s veya 622.08 Mb/s'lik bir bit hızında sürekli bir ATM akışıdır. Yukarı akış iletimi, ATM hücrelerinin patlamaları biçimindedir. Şekil 2.5'te APON çerçeve biçimleri gösterilmiştir.



Aşağı akış biçimi (155 Mbps): 56 hücre (54 ATM hücre + 2 PLOAM)



Yukarı akış biçimi (155 Mbps): 53 hücre (53-bayt ATM hücre + 3-bayt başlık)

Şekil 2.5. APON çerçeve biçimi (Ansari 2013)

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi yukarı akış kanalı, 155.520 Mbps'de 56 baytlık 53 yuvaya ayrılırken, aşağı akış kanalı hücre akışı 155.520 Mbps'de 56 hücrenin çerçevelerine bölünmüştür. Fiziksel Katman Operasyon, Yönetim ve Bakım (PLOAM) hücreleri, ATM hücrelerinin başına ve bir aşağı akışı çerçevenin ortasına yerleştirilir. Her bir PLOAM hücre 27 başlık alanı ve 12 baytlık bir mesaj alanına sahiptir. Başlık alanları, yukarı yönlü veri iletimini kontrol etmek için kullanılır iken, mesaj alanları, ONU'ların çalışmasını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Yukarı akış çerçevesinde, her bir yuvada (slot) 53 baytlık bir ATM hücrenden önce 3 baytlık bir ek yük başlığı (başlık) iletilir.

Bu 3 baytlık ek yük başlığı, minimum 4 bitlik koruma süresi, giriş bölümü (başlama eki) ve sınırlayıcı alan içerir. Koruma süresi, çarpışmaları önlemek için iki sürekli hücre arasında yeterli bir mesafe sağlamaktadır. Giriş bölümü veya başlama eki, gelen ATM hücresinin fazını bilgisini ve bit eş zamanlaması elde etmek için kullanılır ve sınırlayıcı alanı, gelen bir hücrenin başlangıcını belirten tekil (benzersiz) bir bit örüntüsüdür.

ITU-T G.983 serisinde tanımlandığı gibi Geniş Bantlı PON (BPON), APON sisteminin daha da geliştirilmiş biçimidir. BPON, ATM, Ethernet erişimi ve video dağıtımını dahil olmak üzere çok sayıda geniş bant hizmetleri sunmaktadır. BPON'da, aşağı akış iletimi için dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM), 200 GHz kanallar arası boşluk ile 16 dalgaboyu veya kanallar arasında 100 GHz'lik boşluk ile 32 dalgaboyu şeklinde kullanılır. Ayrıca, BPON, şifreleme anahtarının en az bir kez baş uçtaki Optik Hat Sonlandırıcı (OLT) ile Optik Ağ Sonlandırıcı (ONT) arasında kullanıcı binasında değiştirildiği karıştırma tekniği ile geliştirilmiş güvenliği sağlamaktadır.

2.3.1.2. GPON (ITU-T G.984x)

GPON teknolojisi, ITU-T tarafından G.984.x tavsiyeleri serisi ile standardize edilmiştir (G.984.1, 2008; G.984.2, 2003; G.984.3, 2014; G.984.4, 2008; G.984.5, 2014). 2.488 Gb/s aşağı akış hızı ve 1.244 Gb/s yukarı akış hızı, GPON sistemleri tarafından desteklenen veri hızlarıdır. GPON'lar şu özelliklere sahiptir;

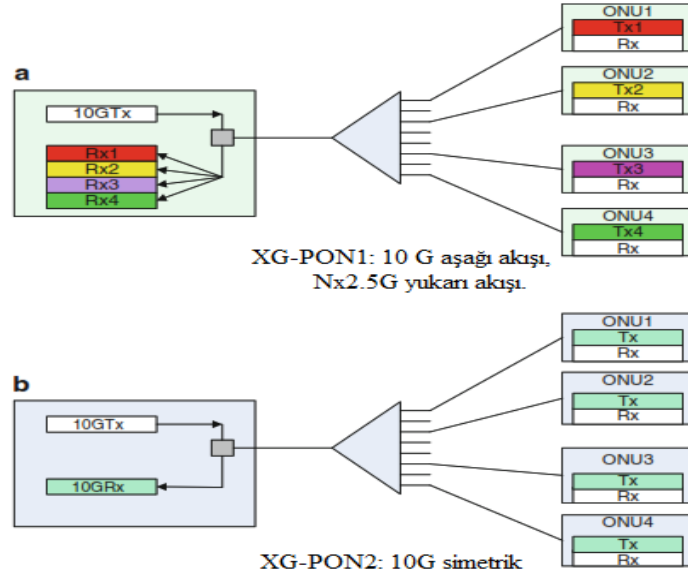
- Kullanıcı trafiğinin etkin bir şekilde paketlenmesi için GPON kapsülleme yöntemini (GEM) kullanmaktadır.
- Ses ve video uygulamaları gibi gecikme duyarlı trafikte hizmet kalitesini (QoS) daha iyi sağlamak için çerçeve bölümlenmeyi tanımlamaktadır.
- Farklı hizmetleri desteklemektedir; ses için ATM, veri için Ethernet ve video için özel kapsülleme. Böylece ses, zaman bölmeli çoğullama (TDM), Ethernet, ATM, kiralık hatlar ve kablosuz bağlantı dahil olmak üzere tüm hizmetleri destekleme özelliğine sahiptir.
- Aşağı akış kanalı için 1490 nm ve 1550 nm dalgaboyları kullanır iken, yukarı akış kanalı için 1390 nm dalgaboyu kullanmaktadır.

- 1550-1560 nm dalgaboyu bandında radyo frekansı (RF) video iletimini de desteklemektedir.
- Uçtan uca hizmet yönetimi sunmaktadır.
- Maksimum bölünme oranı olarak 1:64'ü ve 30 km'lik maksimum iletim mesafesini kullanmaktadır.

2.3.1.3. NG-PON (ITU-T G.987)

ITU-T/FSAN, daha yüksek bantgenişliği sağlamak için yeni nesil PON'u (NG-PON) geliştirmiştir. Buna göre NG-PON'un evrimi, NG-PON1 ve NG-PON2 olmak üzere iki evreye ayrılmıştır. ITU-T G.987'de standardize edilmiş olan NG-PON1, hem asimetrik hem de simetrik 10G-PON'ları belirtmektedir.

XG-PON1 olarak da anılan asimetrik 10G-PON, aşağı akış veri hızını 9.95328 Gbit/s ve yukarı akış veri hızını 2.48832 Gbit/s olarak sağlamaktadır. Şekil 2.6a'da gösterildiği gibi, NG-PON1 mimarisi, aşağı akış bağlantı kapasitesini 10Gb/s'ye yükseltmektedir. Ayrıca, bu mimari, hem aşağı akış hem de yukarı akışı yönünde bir TDM sistemi olarak kabul edilebilmektedir. Aşağı akış iletimi, 10 Gb/s bağlantısını paylaşan 32 ONU olarak modellenebilir. Mevcut yukarı yönlü dalgaboylarının sayısına bağlı olarak, yukarı akış senaryosundaki ONU'lar 2.5 Gb/s'de çalışan farklı sayıda gruba ayrılır. Eğer yukarı akış yönünde iki dalgaboyu tatbik edilirse, yukarı akış senaryosundaki ONU'lar, her biri 2.5 Gb/s yukarı akış bağlantısını paylaşan 16 ONU'ya sahip iki sanal gruba ayrılmakta iken, eğer bir dalgaboyu kabul edilirse, MAC katmanının perspektifinden 2.5 Gb/s yukarı akış bağlantısını paylaşan 32 ONU olarak soyutlanabilmektedir. XG-PON2 olarak adlandırılan simetrik 10G-PON, hem yukarı akış hem de aşağı akış yönünde 10 Gbit/s'ye gerçekteştirmektedir. NG-PON2 mimarisi, Şekil 2.6b'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Yeni Nesil PON (NG-PON) mimarisi (Ansari 2013)

2.3.1.4. EPON (IEEE 802.3ah)

EPON, Ethernet teknolojilerine dayanarak geliştirilmiştir. EPON, Japonya'da hızla kabul edilmiş ve ayrıca Çin, Kore ve Tayvan'daki taşıyıcılarla ivme kazanmakta iken, IEEE, Haziran 2004'te IEEE 802.3ah standardı olarak EPON'u onaylamıştır. EPON bir noktadan çoklu noktaya (P2MP) ağ topolojisidir ve bir P2MP topolojisine erişimi kontrol etmek için mesajları, durum makinelerini ve süreölçerleri kullanan çok noktalı kontrol protokolü (MPCP) olarak adlandırılan bir mekanizmaya dayanmaktadır. Ayrıca, EPON'un; hassas ölçeklenebilirlik, basitlik, çoklu gönderim kolaylığı ve tam hizmet erişimi sağlama yeteneği gibi birçok avantajı vardır.

EPON'da, aşağı akış trafiği, tüm ONU'lara sürekli olarak yayınlanır ve her bir ONU, kendisine gönderilen paketleri seçip diğer ONU'lara adreslenmiş paketleri atar. Yukarı yönde, her bir ONU, OLT tarafından tahsis edilen zaman dilimleri sırasında veri gönderir. Başka bir deyişle, yukarı akış işaretleri, genellikle zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) protokolü kullanılarak birleştirilmektedir.

2.3.1.5. 10G-EPON (IEEE 802.3av)

IEEE802.3av görev gücü (TF), 10G-EPON standardizasyonunu aşağı akış veri hızını 10 Gb/s'ye çıkarmak ve 10 ve 1 Gb/s'lik iki yukarı akış veri hızını desteklemek amacıyla gerçekleştirmiştir. 10G EPON, her iki simetrik 10 Gb/s aşağı akış ve yukarı akış ve asimetrik 10 Gb/s aşağı akış ve 1 Gb/s yukarı akış veri hızlarını destekler, 1G-EPON ise sadece 1 Gb/s simetrik veri hızını sağlamaktadır.

10G-EPON spesifikasyonunun temel özelliklerinden biri, 10G-EPON'un halihazırda EPON olan kullanılan aynı PON optik dağıtım ağı üzerinden çalışmasına izin vermesidir. Bu özelliğin avantajları şunlardır;

- Kullanıcıların talep ettikleri hizmetler için en uygun ve etkin maliyetli ONU'yu kullanmalarına izin vermektedir.
- Bir ağın, OLT'yi yükselterek ve ONU'ları gerektiği gibi taşıyarak EPON'tan 10G EPON'a geçmesine izin vermektedir.

2.3.2. WDM-PON

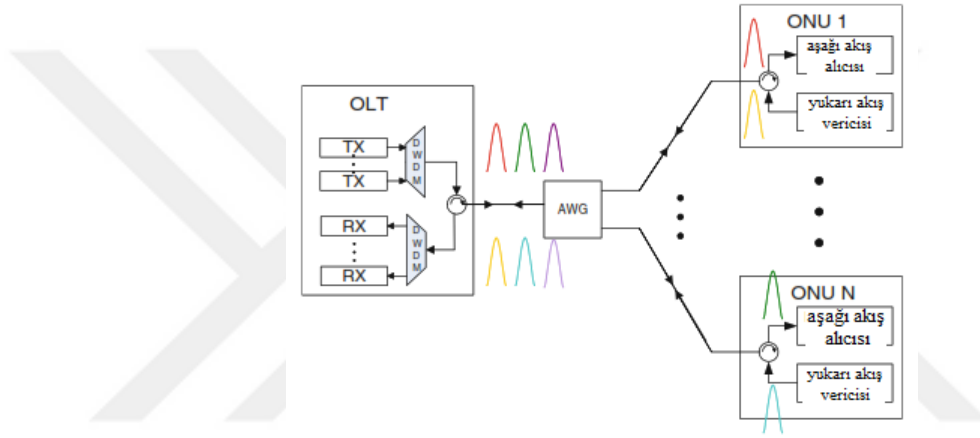
WDM-PON, 10G-EPON ve NG-PON1 sistemleri ile rekabet halindeki yeni nesil PON sistemleri için aday bir çözümdür. Yüksek bant genişliğinin sağlanabilmesi için, WDM-PON, TDM-PON'daki gibi 32 veya daha fazla abone arasında dalgaboyunu paylaşmak yerine her bir aboneye bir dalgaboyu sağlamaktadır. Ayrıca, WDM-PON için, TDM-PON sistemlerinde ayırıcı, her dalgaboyunun hedefine ONT yönlendiren bir dizi dalga kılavuzu ızgarası (AWG) ile değiştirilmektedir. Bunlarla birlikte, WDM-PON'un, TDM-PON sistemlerine göre birçok avantajı vardır;

- WDM-PON, her bir kullanıcıya bir veya daha fazla dalgaboyu tahsis edilmesini sağlamaktadır.
- WDM-PON ağları genellikle daha iyi güvenlik ve ölçeklenebilirlik sağlar, çünkü her ev (abone) sadece kendi dalgaboyunu almaktadır.
- WDM-PON'daki MAC katman kontrolü, TDM-PON'a kıyasla daha basittir, çünkü WDM-PON, OLT ve ONU arasında P2P bağlantıları sağlar ve diğer PON

ağlarında bulunan noktadan çoklu noktaya (P2MP) medya erişim denetleyicilerine gereksinim duymaz.

- Bir WDM-PON ağındaki her dalgaboyu etkin bir şekilde bir P2P bağlantısıdır, böylece her bir bağlantının farklı bir hızda ve maksimum esneklik için farklı bir protokolle çalışmasına izin verilmektedir.

Ancak WDM-PON, ONU'ların dalgaboyu özelliğinden dolayı maliyeti artırır. WDM-PON mimarisi, Şekil 2.7'de gösterilmiştir.

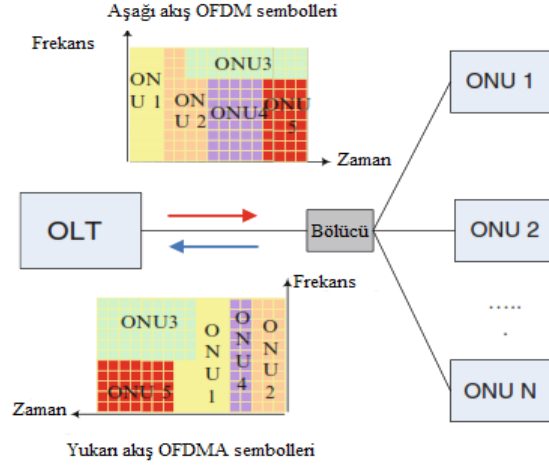


Şekil 2.7. WDM-PON mimarisi (Ansari 2013)

2.3.3. OFDM-PON

Ortogonal frekans bölmeli çoğullamalı PON (OFDM-PON), sayısal ses/video yayını ve kablolu/kablosuz iletişim sistemleri gibi çok çeşitli uygulamalar için çok sayıda sayısal standartta başarıyla kullanılmaktadır. OFDM'nin temel konsepti, yüksek hızlı veri akışının, paralel olarak bir dizi düşük hız ve ortogonal alt taşıyıcı üzerinden iletilmesidir. Ortogonalite nedeniyle, OFDM alt taşıyıcıların frekans alanında üst üste örtüşmesi yüksek spektral verimle sonuçlanmaktadır. Ayrıca, her OFDM alt taşıyıcının hızı çok daha düşük olacak şekilde tasarlanmıştır, böylece 10 Gb/s'den daha yüksek bit hızlarına sahip optik fiberli iletimlerde üstesinden gelinmesi gereken fiber dispersiyonuna karşı daha dayanıklıdır. OFDM-PON, düşük hesaplama karmaşıklığı, yüksek spektral verimliliği ve fiberin dispersiyon esnekliği özelliklerinden dolayı, OFDM'i uzun mesafe

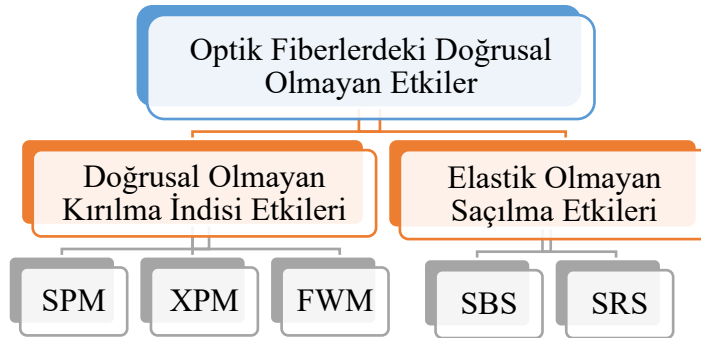
ve yüksek kapasiteli optik fiber iletimlerde başarılı hale getirmektedir (Qiu, 2011). Şekil 2.8’de, OFDM-PON mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. OFDM-PON mimarisi (Ansari 2013)

2.4. Optik Fiberlerde Doğrusal Olmayan Etkiler

Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler, ya ortamın kırılma indisinin yoğunluğuna bağlı olarak ya da elastik olmayan saçılma olayı nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Kırılma indisinin ışın yoğunluğu bağımlılığı Kerr etkisinden sorumludur. Kerr doğrusalsızlığı, öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM) ve dört dalga karışımı (FWM) gibi üç farklı etkide kendini göstermektedir. Optik fiberlerdeki elastik olmayan saçılma olayı, uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) ve uyarılmış Raman saçılması (SRS) gibi uyarılmış etkilerden sorumludur. Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Optik fiberlerdeki doğrusal olmayan etkiler.

SPM ve XPM hariç, tüm doğrusal olmayan etkiler, diğer kanallardan güç tüketme pahasına bir kanala bir miktar kazanç sağlayabilmektedir. SPM ve XPM sadece işaret fazını etkiler ve spektral genişlemeye neden olabilir. Baka bir deyişle, artan dispersiyona yol açmaktadır.

2.4.1. Doğrusal Olmayan Kırılma İndisi Etkileri (Kerr Etkisi)

Kerr etkisi göz önüne alındığında, optik fiber kırılma indisi,

$$n = n_0 + n_2 I \quad (2.1)$$

ile ifade edilebilir. (2.1)'de, n_0 doğrusal kırılma indisi, n_2 doğrusal olmayan kırılma indisi ve I ışın yoğunluğudur.

2.4.1.1. Öz Faz Modülasyonu (SPM)

Fiber içerisindeki değişen işaret yoğunluğu, yoğunluğa bağlı kırılma indisine sahip olan ortamda zamanla değişen kırılma indisi üretir. Bu zamanla değişen kırılma indisi, zamanla değişen bir faz değişikliğine yol açar. Bu doğrusal olmayan faz modülasyonu, işaretin kendisi tarafından indüklendiğinden, buna öz faz modülasyonu (SPM) denir. Başka bir deyişle, SPM, yoğunluk dalgalanmalarını faz dalgalanmalarına aynı optik işarete dönüştürür (Zengerle 2005).

2.4.1.2. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)

Kırılma indisinin yoğunluk bağımlılığı, çapraz-faz modülasyonu (XPM) olarak bilinen başka bir doğrusal olmayan olaya yol açar. İki veya daha fazla optik darbe eşzamanlı olarak yayıldığında, çapraz faz modülasyonu her zaman SPM'e eşlik eder ve bir optik ışın tarafından görülen doğrusal olmayan kırılma indisi, sadece bu ışının yoğunluğuna değil, aynı zamanda diğer eşzamanlı ışınların yoğunluğuna da bağlıdır (Kikuchi ve ark. 1997).

Aslında XPM, dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) tekniklerinin kullanıldığı fiber optik sistemlerinde iletim performansını etkileyen önemli bir doğrusal olmayan olaydır. Aynı şekilde, DWDM sistemleri durumunda, kanal dalgaboyu ayrımı çok dardır, bu da güçlü XPM etkisine yol açar.

XPM durumunda, faz kayması diğer kanalın gücüne bağlıdır. N-kanallı iletim sisteminde, i.kanal için toplam faz kayması,

$$\phi_{nL}^i = \gamma L_{\text{eff}} (P_i + 2 \sum_{n \neq i}^N P_n) \quad (2.2)$$

olarak temsil edilebilir. (2.2)'de, γ doğrusalsızlık katsayısı, L_{eff} fiberin etkin uzunluğu, P_i ve P_n kanalların gücüdür. $\gamma L_{\text{eff}} P_i$ SPM'nin etkisini temsil eder ve $2\gamma L_{\text{eff}} \sum_{n \neq i}^N P_n$ XPM'yi temsil eder. Bu denklemdeki 2 çarpanı, aynı miktarda güç için XPM'nin SPM'den iki kat daha etkili olduğunu göstermektedir (Singh ve Singh 2007).

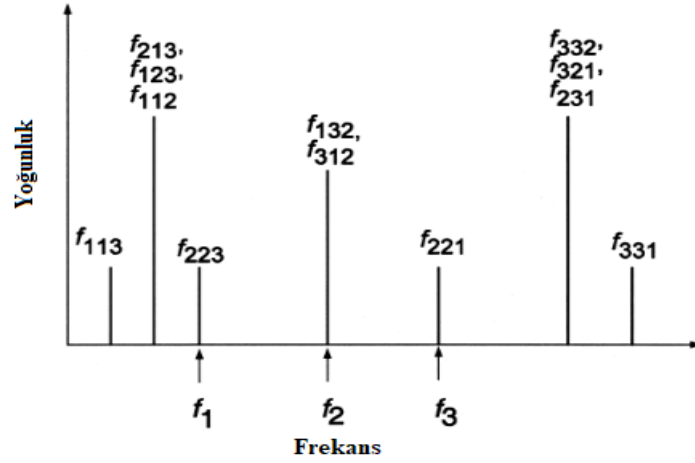
2.4.1.3. Dört Dalga Karışımı (FWM)

FWM olayı, optik fiber boyunca yayılan f_i , f_j ve f_k frekanslı üç farklı optik dalga arasında, fiberin üçüncü dereceden duyarlılığına bağlı olarak meydana gelen etkileşimin yeni bir f_{ijk} frekanslı dalga üretmesidir. FWM olayı,

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (2.3)$$

ile matematiksel olarak ifade edilmektedir. (2.3)'te, i, j ve k indisleri üç farklı dalgaboyundaki (frekanslardaki) WDM sistemi kanalını ifade eder ve yeni bir frekans üretilebilmesi için gereken şart $k \neq i, j$ ile tanımlanabilir.

Örneğin, $i = 1$, $j = 2$ ve $k = 3$ ise, oluşturulan FWM ürünleri ($i = k$ ve $j = k$ hariç), f_{321} , f_{231} , f_{312} , f_{213} , f_{332} , f_{331} , f_{223} , f_{221} , f_{113} ve f_{112} Şekil 2.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.10. f_1, f_2, f_3 frekanslarından oluşturulan FWM ürünlerinin gösterimi (Singh ve ark. 2004)

FWM'nin WDM sistemleri üzerindeki en büyük etkisi, optik işaretlerin üçlü kombinasyonun oluşturduğu yeni optik işaretler orijinal WDM kanallarına düştüğünde ve bu kanallarda orijinal işaretlerle etkileştiğinde ortaya çıkmaktadır. WDM sistemlerinde kanallar eşit aralıklıysa, önemli sayıda FWM ürünleri, yani üretilen optik işaretler, orijinal kanallarla aynı frekanslarda yayılabilir ve sonuç olarak, sistem performansında önemli bir bozulmaya neden olan FWM çapraz-karışımı oluşur.

WDM sistemlerinde üretilen toplam FWM ürünleri sayısı (M), WDM kanallarının sayısına (N) bağlıdır ve,

$$M = \frac{N^2(N-1)}{2} \quad (2.4)$$

ile belirlenebilir.

Üretilen FWM işaretinin gücü ($P_{\text{FWM}}(f_{ijk})$),

$$P_{\text{FWM}}(f_{ijk}) = \left(\frac{d_{ijk} \gamma L_{\text{eff}}}{3} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (2.5)$$

ile hesaplanabilir. (2.5)'te, d_{ijk} indisi dejenerasyon faktörü (eğer $i = j \neq k$ ise $d_{ijk} = 3$ ve $i \neq j \neq k$ ise $d_{ijk} = 6$), L_{eff} indisi fiberin etkin uzunluğu, γ indisi doğrusalsızlık katsayısı, P_i ,

P_j ve P_k indisleri kanalların giriş güçleri, L indisi fiber uzunluğu, η_{ijk} FWM etkinliği ve α indisi fiberin zayıflama katsayısıdır.

Fiberin etkin uzunluğu (L_{eff})

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (2.6)$$

ile ifade edilebilir.

Doğrusalsızlık katsayısı (γ)

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (2.7)$$

ile tanımlanabilir. (2.7)'de, A_{eff} indisi fiberin etkin alanını, n_2 indisi doğrusal olmayan kırılma indisini ve λ indisi çalışma dalgaboyunu göstermektedir.

FWM etkinliği (η_{ijk})

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta B_{ijk}^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1-e^{-\alpha L})^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta B_{ijk} L}{2} \right) \right] \quad (2.8)$$

ile açıklanabilir. (2.8)'de, ΔB_{ijk} indisi faz uyumsuzluğu faktörünü gösterir ve

$$\Delta B_{ijk} = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} (|f_i - f_k| |f_j - f_k|) \left[D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} \frac{dD_c}{d\lambda} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (2.9)$$

ile ifade edilebilir. (2.9)'da λ_k k kanalının dalgaboyu, c indisi ışığın boşluktaki hızı, D_c indisi fiberin kromatik dispersiyon katsayısı ve $dD_c(\lambda c)/d\lambda$ kromatik dispersiyon eğimidir.

Eşit aralıklı kanallara sahip bir WDM sisteminde, f_c frekanslı bir kanaldaki toplam FWM çapraz-karışımı,

$$P_{\text{FWM}}(f_c) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_c} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{\text{FWM}}(f_i + f_j - f_k) \quad (2.10)$$

olarak ifade edilebilir (Maeda ve ark. 1990).

Bir WDM sisteminin belirli bir kanalı üzerindeki FWM çapraz-karışım etkisinin analizi için kullanılabilen işaret çapraz karışım oranı (SXR) parametresi,

$$\text{SXR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{FWM}}} \right) \quad (2.11)$$

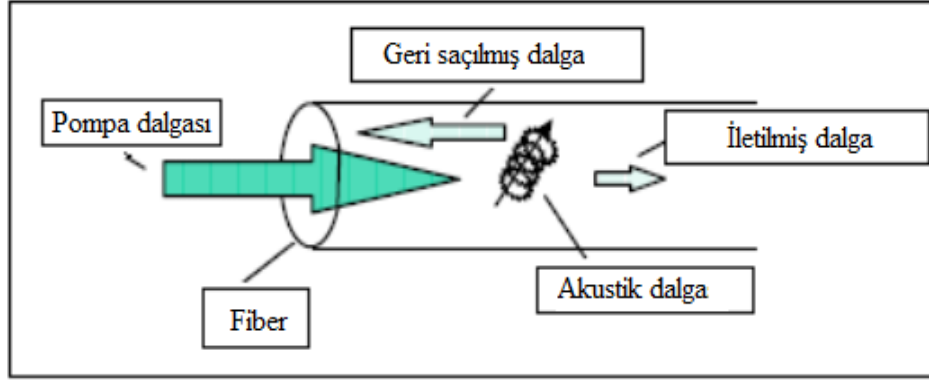
olarak tanımlanabilir. (2.11)'de, $P_{\text{çıkış}}$ kanalın çıkış gücü ve $P_{\text{çıkış}} = P_{\text{giriş}} \cdot e^{-\alpha L}$ ile hesaplanabilir.

2.4.2. Elastik Olmayan Saçılma Etkileri

Saçılma etkilerinde, enerji bir ışık dalgasından başka bir dalganın içine daha uzun dalgaboyunda veya daha düşük enerjide aktarılır. Kaybedilen enerji, ortamdaki moleküler titreşimler veya fononlar tarafından emilmektedir. Optik fiberlerde en önemli elastik olmayan etkiler (doğrusal olmayan saçılma türleri) uyarılmış Brillouin saçılması ve uyarılmış Raman saçılmasıdır. Temel farklılık, saçılmanın, SBS'de sadece bir yönde (geriye doğru) SRS'de ise her iki yönde (ileri ve geri) gerçekleşebilmesidir.

2.4.2.1. Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS)

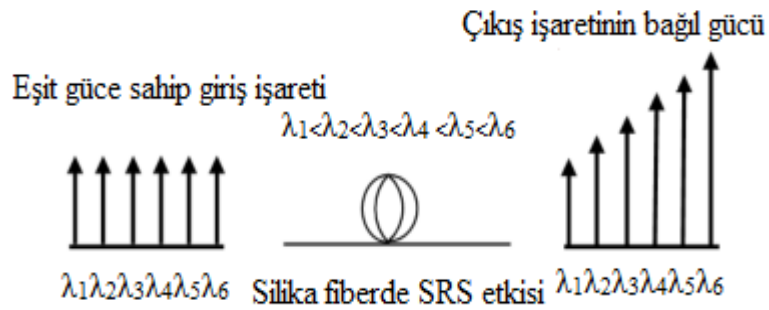
Doğrusal olmayan SBS olayı ve etkisi, ilk olarak 1964'te tespit edilmiştir. Bir optik fiberin içine iletilen güç bir eşik seviyesini aştığında, ışığın bir kısmı geriye doğru saçılmaktadır. Bu olay SBS olarak bilinir. SBS olayı, geniş yoğunlukta optik fiberlerde meydana gelebilen doğrusal olmayan bir işlemdir. SBS'de, giriş işareti, pompa dalgası olarak bilinir ve saçılma nedeniyle oluşan işaret Stokes dalgası olarak bilinmektedir. SBS sadece geri yönde gerçekleşir, yani giriş gücü eşik değeri aştığında, Stokes dalgası geri yönde saçılır (Stokes dalgası güç kazanırken pompa dalgası güç kaybetmektedir) (Tithi ve ark. 2014). SBS olayının temel mekanizması Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



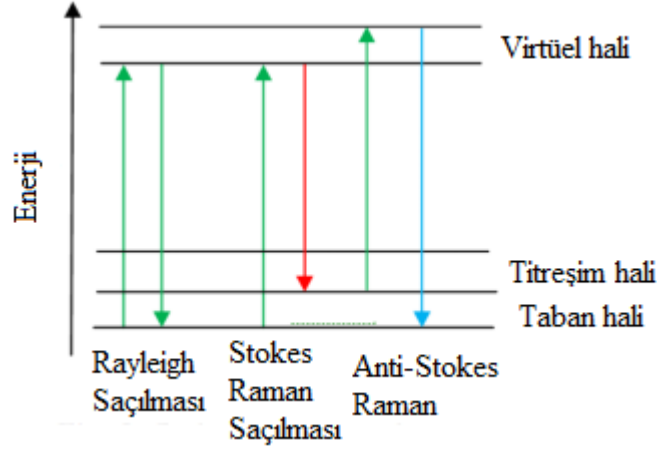
Şekil 2.11. SBS olayının temel mekanizması (Tithi ve ark. 2014)

2.4.2.2. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS)

SRS işlemi sırasında, gelen ışık fiber ortamın moleküler titreşimleriyle etkileşir ve bu etkileşim nedeniyle ışık saçılabilir. Ayrıca SRS'de, daha yüksek frekanslara sahip kanallar (daha kısa dalgaboyları), güçlerinin bir kısmını düşük frekanslı kanallara (daha uzun dalgaboyları) aktarmaktadır (Schneider 2004). WDM fiber iletişim sistemlerinde, SRS, kanal çapraz-karışması nedeniyle sistem performansını düşüren ve WDM sisteminin SXR'sinde bir azalmaya neden olan önemli doğrusal olmayan etkilerden biridir. SRS, Şekil 2.12 ve 2.13'te kısa bir şekilde açıklanabilmektedir.



Şekil 2.12. SRS etkisinden dolayı optik güç transferi (Kumari ve Tiwari 2015)



Şekil 2.13. Stokes ve Anti-Stokes Raman saçılması (Kuvari ve Tiwari 2015)

Tek kanallı tasarımlar için SRS genellikle bir problem değildir. SRS'nin etkisinin 500 mW toplam gücün altında ihmal edilebilir olduğu gösterilmiştir. Çoğu optik sistemlerin 10 mW'tan daha düşük güçte iletim yapması, SRS'nin bir sorun olmadığı anlamına gelebilir. Bununla birlikte, WDM sistemleri için her kanal 10 mW'a kadar gücü iletebilecektir. Bu nedenle, bütün kanalların toplam gücü, 500 mW eşiği kolayca geçebilir (Agrawal 2002).

SRS'ye bağlı olarak değişik dalgaboylarında modifiye işaret gücü

$$P_M[k] = P_T[k] - P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i] + P_T[k] \sum_{j=1}^{k-1} P_T[j] D[j, k] \quad (2.12)$$

olarak değerlendirilebilir (Singh ve Hudiara 2004). (2.12)'nin sağ tarafında, ilk terim, yani $P_T[k]$, k-kanalına iletilen toplam gücü, ikinci terim, yani $P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i]$, daha yüksek dalgaboylu kanallara k-kanalından transfer edilen toplam gücü ve üçüncü terim, yani $P_T[k] \sum_{j=1}^{k-1} P_T[j] D[j, k]$, düşük dalgaboylu kanallardan k-kanalı tarafından tüketilen toplam gücü gösterir. (2.12)'de, $k = 1, 2, \dots, N$ için $D[k, i] = 0$ ve $i > N$ ve $k=1$ için $D[j, k] = 0$.

j-kanalının i-kanalından tükettiği gücün oranı, yani $D [i, j]$,

$$D[i, j] = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right) \cdot P_T[j] \cdot \left\{ \frac{(f_i - f_j)}{1.5 \cdot 10^{13}} \right\} \cdot g_{Rmax} \cdot \left\{ \frac{(L_{eff}(\lambda_j) \cdot 10^5)}{(b \cdot A_{eff})} \right\}, & (f_i - f_j) \leq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ Hz ve } j > i \\ 0, & (f_i - f_j) > 1.5 \cdot 10^{13} \text{ Hz ve } j \leq i \end{cases} \quad (2.13)$$

olarak ifade edilebilir. (2.13)'te, λ_i ve λ_j , nm cinsinden sırasıyla i- ve j-kanallarının dalgaboyları, $P_T[j]$ j-kanalında mW cinsinden iletilen optik güç, g_{Rmax} cm/W cinsinden en yüksek Raman kazanç katsayısı, f_i ve f_j Hz cinsinden sırasıyla i- ve j-kanallarının merkez frekansları, $L_{eff}(\lambda_j)$ km cinsinden λ_j dalgaboyunda çalışan kanalın etkin uzunluğu, A_{eff} optik fiberin cm^2 cinsinden etkin çekirdek alanıdır. b değeri, farklı dalgaboylu kanallardaki işaretlerin kutuplanma durumuna göre 1 ile 2 arasında değişmektedir.

k-kanalının alıcı tarafında alınan gerçek optik gücü

$$P_R[k] = P_M[k] \cdot e^{-\alpha L} \quad (2.14)$$

olarak tanımlanabilir.

SRS'de daha önce bahsedildiği gibi, güç daha yüksek frekanslı kanallardan düşük frekanslı kanallara transfer edilir. Diğer bir deyişle, daha düşük dalgaboyuna sahip olan kanalın yardımıyla daha yüksek dalgaboyuna sahip olan kanaldaki ışık kuvvetlendirilir.

Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü G_R

$$G_R = \frac{I_S(L)}{I_S(0) \cdot e^{-\alpha_S L}} \quad (2.15)$$

ile ifade edilebilir.

$I_S(L) = P_{SRS} \cdot e^{-\alpha_S L}$ ve $I_S(0) = P_{giriş}$ dikkate alınarak denklem (2.15)

$$G_R = \frac{P_{SRS}}{P_{giriş}} \quad (2.16)$$

olarak yeniden yazılabilir. (2.16)'da, P_{SRS} SRS'ye bağılı olarak değişen (modifiye) gücü temsil etmektedir.

(2.11)'de verilen SXR, SRS'nin ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki WDM sistemleri için

$$SXR = 10\log_{10} \left(\frac{P_{SRS}}{P_{FWM}} \right) \quad (2.17)$$

şeklinde değiştirilebilir. (2.17)'de, P_{SRS} SRS'den dolayı değişen işaret gücü ve P_{FWM} FWM çapraz karışımının gücüdür.

2.5 SRS ve FWM Olaylarının GPON Sistemlerin Üzerindeki Birleşik Etkisi

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği Telekomünikasyon Standardizasyon Sektörü (ITU-T), DWDM sistemleri için kanallar arası boşluk değerlerini 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olarak standardize etmiştir. Eğer DWDM sistemlerde kullanılan kanallar arası boşluk değeri 12.5 GHz'in altında ise bu durumda sistem UDWDM olarak adlandırılır.

Optik haberleşme sistemlerinin çalışması sırasında WDM sisteminin kanal sayıları, kanallar arası boşluk değerleri, toplam iletim uzunluğu ve kanal başına giriş gücü gibi sistem özellikleri, genel sistem performansında önemli bir rol oynar. Optik fiber üzerindeki doğrusal olmayan etkiler de sistem performansı üzerinde önemli bir role sahiptir. Tüm fiber doğrusal olmayan olayları arasında, SRS ve FWM, UDWDM/DWDM-GPON sistemlerinde performans sınırlandırmaları üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Dolayısıyla UDWDM/DWDM-GPON sistemler üzerindeki hem SRS ve FWM birleşik etkisi hem de FWM yalın etkisi iyi analiz edilmeli ve araştırılmalıdır.

Bu nedenle, bu yüksek lisans tezinde, 7-, 15- ve 31-kanallı aşırı yoğun/yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı gigabit pasif optik ağ (UDWDM/DWDM-GPON) sistemlerinin merkez aşığı yönlü kanalları üzerinde gerçekleştirilen işaret-çapraz karışım oranı (SXR) benzetimleri yardımıyla, uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve dört dalga karışımının (FWM) birleşik etkisi, FWM'nin yalın etkisi ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan benzetimlerde, kanallar arası boşluk değerleri olarak 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz, 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz kullanılmıştır. Belirtilen optik haberleşme sistemlerinde SRS ve FWM olayından en çok etkilenen kanallar merkez kanallardır. Bu yüzden sırasıyla 4., 8., ve 16. kanallara odaklanılmıştır. Ayrıca, analizlerde G.652 standart tek modlu fiber (SSMF) kullanılan sistemler dikkate alınmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Benzetim Modeli

Bu alt başlıkta, MATLAB 2013a benzetim programı ve 2.bölümde verilen matematik denklemleri yardımıyla, 7-, 15- ve 31-kanallı aşırı yoğun/yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı gigabit pasif optik ağ (UDWDM/DWDM-GPON) sistemlerinin merkez aşağı yönlü kanalları üzerinde gerçekleştirilen ve işaret-çapraz karışım oranı (SXR) parametresi üzerinden, uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve dört dalga karışımının (FWM), aşağı yönlü kanal performansları üzerindeki birleşik etkisinin, FWM'nin yalın etkisi ile karşılaştırıldığı benzetimler ve Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü (G_R) ile giriş güçleri değişimi benzetimleri için kullanılan benzetim modeli ve fiber parametreleri hakkında bilgi verilmiştir.

Benzetimlerde, aşağı yönlü kanal için 1490 nm dalgaboyu bölgesinde çalışan G.652 standart tek modlu fiber (SSMF) kullanılmış ve bu fiberin önemli parametrelerinin değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. G.652 standart tek modlu fiber kablonun parametreleri

D_c (ps/nm.km)	S (ps/nm ² .km)	γ (1/W.km)	A (dB/km)
12.72	0.086	1.35	0.22

GPON ağlarındaki SRS ve FWM olayları 7-, 15-, ve 31-kanallı ağ yapıları üzerinde analiz edilmiştir. SSMF'lerle oluşturulan DWDM-GPON sistemlerinde, SRS ve FWM'den en çok etkilenen kanallar merkez kanallardır (Harboe ve ark. 2008). Bu nedenle, 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerinin merkez kanalları, sırasıyla 4., 8. ve 16. kanallar, benzetimlerde dikkate alınmıştır. Bu kanallarda üreten FWM ürünleri Çizelge 3.2-3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. 7-kanallı sistemin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri için kanal kombinasyonları

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 sistemin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri için kanal kombinasyonları

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 sistemin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri için kanal kombinasyonları

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

Çizelge 3.2-3.4'te i , j ve k , UDWDM/DWDM-GPON sistemlerinin merkez kanalının frekansına eşit frekanslı FWM ürünlerini oluşturan kanal numaralarını göstermektedir. Örneğin; Çizelge 3.3'te 15-kanallı sistemde 4. kanal ($i=4$), 10. kanal ($j=10$) ve 6. kanal ($k=6$) etkileşerek, merkez kanal içinde, yani 8. kanalda, bir FWM ürünü meydana getirmektedir. Çizelge 3.2-3.4 üretilirken, Bölüm 2'de daha önce de belirtildiği gibi, $k \neq i, j$ koşuluna dikkat edilmiştir.

3.2. SXR-P_{giriş} Benzetim Koşulları

Bu alt başlıkta, gerçekleştirilen SXR-P_{giriş} benzetimlerinde dikkate alınan benzetim koşulları açıklanmıştır. GPON sistemlerindeki aşağı yönlü iletim trafiği için standartlarda verilen 1490 nm dalgaboyu bölgesi kullanılmıştır. Ayrıca, kanalların giriş güçlerinin 0.1 ile 5 mW aralığında ve eşit olduğu kabul edilmiştir.

Kanallar arası boşluk mesafesi için UDWDM/DWDM-GPON sistemlerini kapsayan değerler kullanılmıştır. UDWDM-GPON için 1.5625 GHz, 3.125 GHz ve 6.25 GHz,

DWDM-GPON için 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz değerleri kullanılmıştır. GPON standartlarındaki iletim sınırlarını sağlamak için, OLT ve optik bölücüyü bağlayan fiber uzunluğu, tüm UDWDM/DWDM-GPON sistemleri için 15 km olarak alınmıştır.

UDWDM/DWDM-tabanlı sistemlerde SRS'nin ve FWM'nin birleşik etkisini ve FWM'nin yalın etkisini analiz etmek için, literatürde 20 dB, 23 dB veya 25 dB gibi uygun minimum SXR değerleri tercih edilmiştir (Nakajima ve. ark., 1997; Bogoni ve Poti, 2004; Harboe ve. ark, 2008). Bu benzetimde, SXR-Pgiriş değişimi analizlerinde minimum 23 dB SXR değeri göz önüne alınmıştır. Benzetim sonuçları ve elde edilen grafikler Bölüm 4.1'de gösterilmiştir.

3.3. SXR- Δf Benzetim Koşulları

Bu alt başlıkta, gerçekleştirilen SXR- Δf benzetimlerinde dikkate alınan benzetim koşulları açıklanmıştır. GPON sistemlerindeki aşağı yönlü iletim trafiği için standartlarda verilen 1490 nm dalgaboyu bölgesi kullanılmıştır. Sistemdeki tüm giriş güçleri sabit değerde ve 0.1 mW olarak kabul edilmiştir.

Bu benzetimde, UDWDM/DWDM-GPON sistemleri için, Δf değeri 1.5625 GHz ile 100 GHz aralığında değiştirilmiştir. GPON standartlarındaki iletim sınırlarını sağlamak için, OLT ve optik bölücüyü bağlayan fiber uzunluğu, tüm UDWDM/DWDM-GPON sistemleri için 15 km olarak alınmıştır. Bölüm 4.2'de, benzetim sonuçları ve elde edilen grafikler gösterilmiştir.

3.4. SXR-Kanal Uzunluğu Benzetim Koşulları

Bu alt başlıkta, gerçekleştirilen SXR-kanal uzunluğu benzetimlerinde dikkate alınan benzetim koşulları açıklanmıştır. GPON sistemlerindeki aşağı yönlü iletim trafiği için standartlarda verilen 1490 nm dalgaboyu bölgesi kullanılmıştır. Sistemdeki tüm giriş güçleri sabit değerde ve 0.1 mW olarak kabul edilmiştir.

GPON standartlarındaki iletim sınırlarını sağlamak için, OLT ve optik bölücüye bağlayan fiberin maksimum uzunluğu, 7- ve 15-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemleri için 30 km ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemleri için 20 km olarak seçilmiştir. Ayrıca, kanallar arası boşluk mesafesi olarak 1.5625 GHz ile 100 GHz arasında değişen değerler kullanılmıştır. Bölüm 4.3'te, benzetim sonuçları ve elde edilen grafikler gösterilmiştir.

3.5. G_R - $P_{giriş}$ Benzetim Koşulları

Bu alt başlıkta, gerçekleştirilen Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü (G_R)- $P_{giriş}$ benzetimlerinde dikkate alınan benzetim koşulları açıklanmıştır. GPON sistemlerindeki aşağı yönlü iletim trafiği için standartlarda belirtilen 1490 nm dalgaboyu bölgesi kullanılmıştır. Ayrıca, tüm kanalların giriş güçlerinin 0.1 ile 5 mW aralığında ve eşit olduğu kabul edilmiştir.

Bu benzetimde, 7- ve 15-kanallı DWDM-GPON sistemleri için 5, 10, 15, 20 ve 30 km kanal uzunlukları, 31-kanallı DWDM-GPON sistemleri için ise 5, 10, 15 ve 20 km kanal uzunlukları göz önüne alınmıştır.

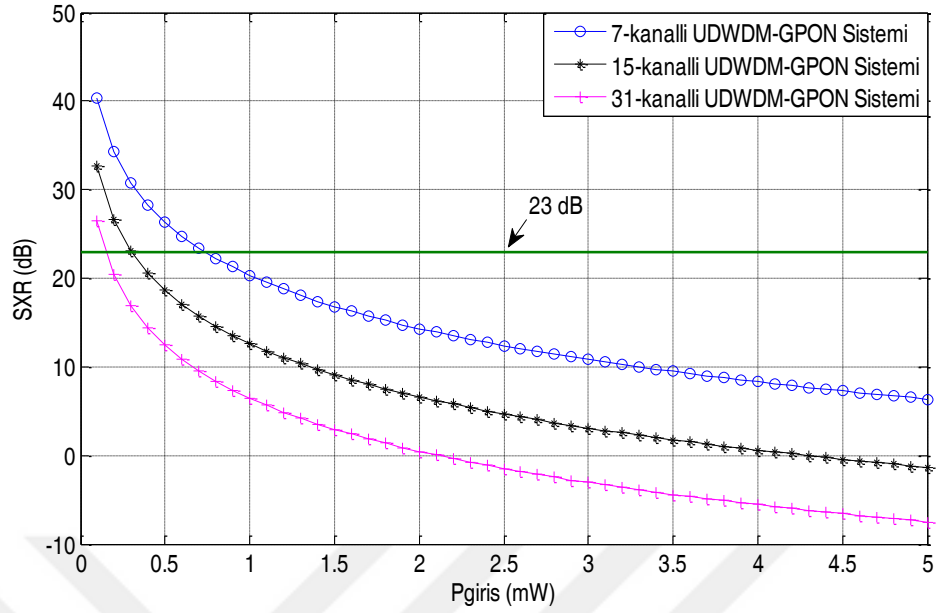
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerinin merkez aşağı yönlü kanalları üzerindeki hem SRS ve FWM birleşik etkisi hem de FWM yalın etkisi altında SXR değerinin kanal giriş güçleri ($P_{\text{giriş}}$), kanallar arası boşluk değerleri (Δf) ve kanal uzunlukları (L) ile değişimlerini gösteren benzetim sonuçları verilmiştir. Ayrıca, Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü (G_R) ile giriş gücü değişimleri benzetim sonuçları da sunulmuştur. Benzetim sonuçları yorumlanmış ve önemleri vurgulanmıştır.

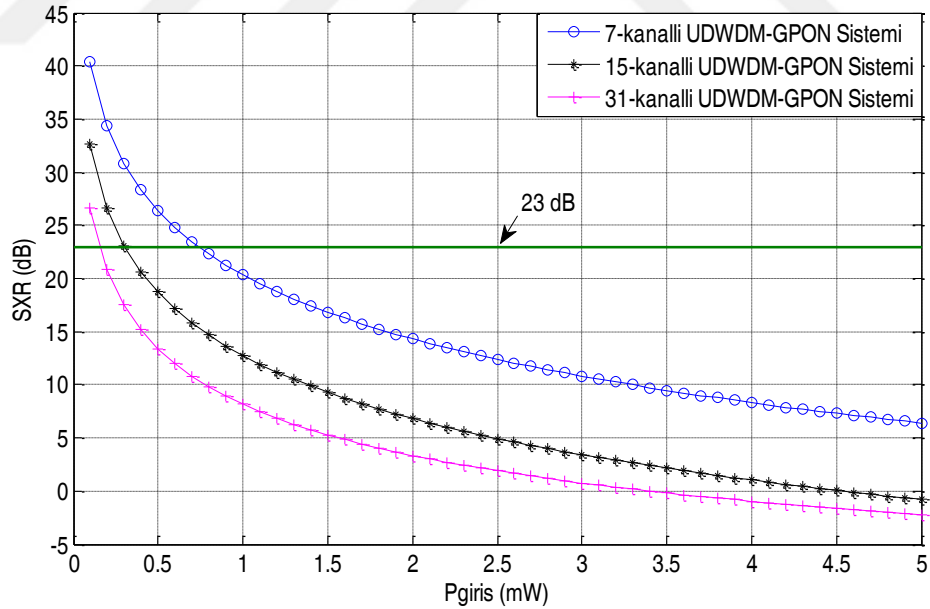
4.1. SXR- $P_{\text{giriş}}$ Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.2'de açıklanan benzetim koşulları altında, UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında farklı Δf değerleri için SXR değerinin 0.1 mW-5 mW arasında değişen eşit kanal giriş güçleri ile değişimlerine ait benzetim sonuçları Şekil 4.1- 4.14'te verilmiştir.

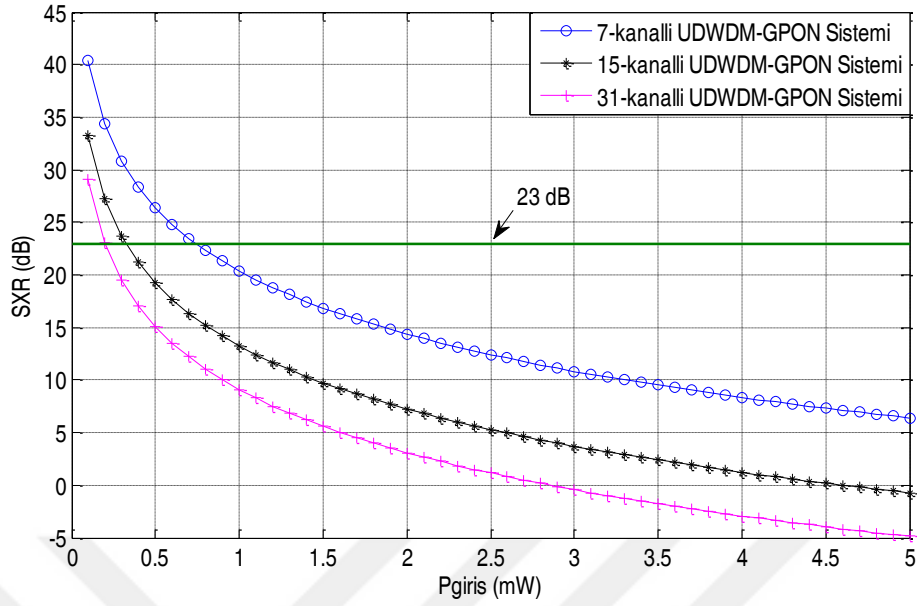
SXR- $P_{\text{giriş}}$ değişimleri için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi ve FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerinin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri ile ilgili karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 4.1- 4.2'de verilmiştir.



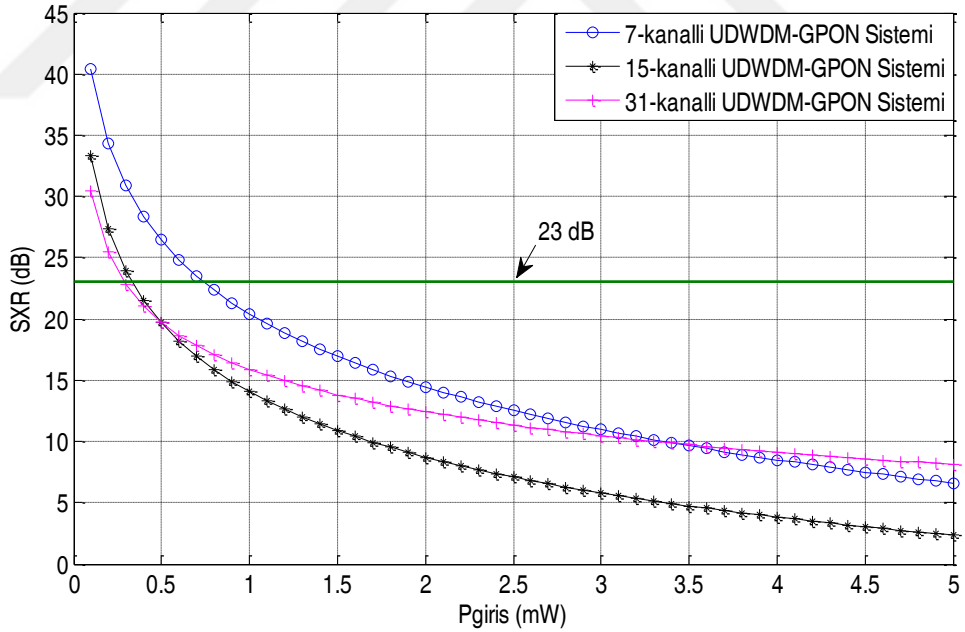
Şekil 4.1. $\Delta f=1.5625$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



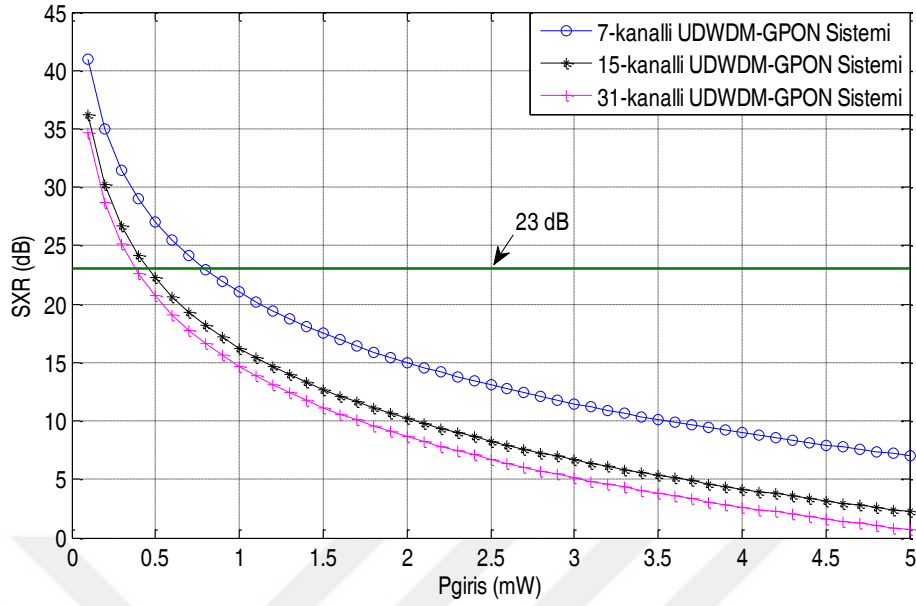
Şekil 4.2. $\Delta f=1.5625$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



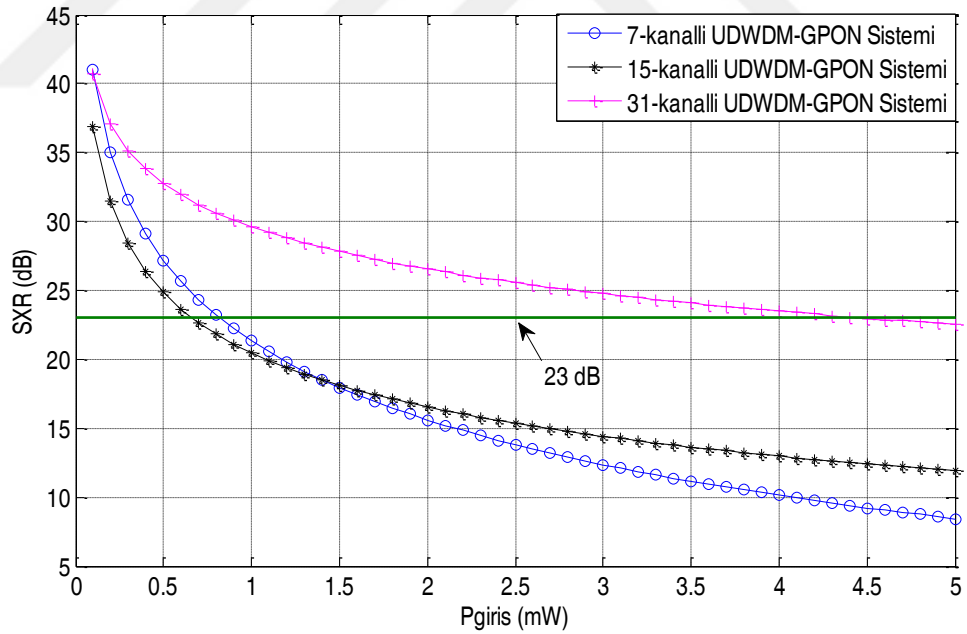
Şekil 4.3. $\Delta f=3.125$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



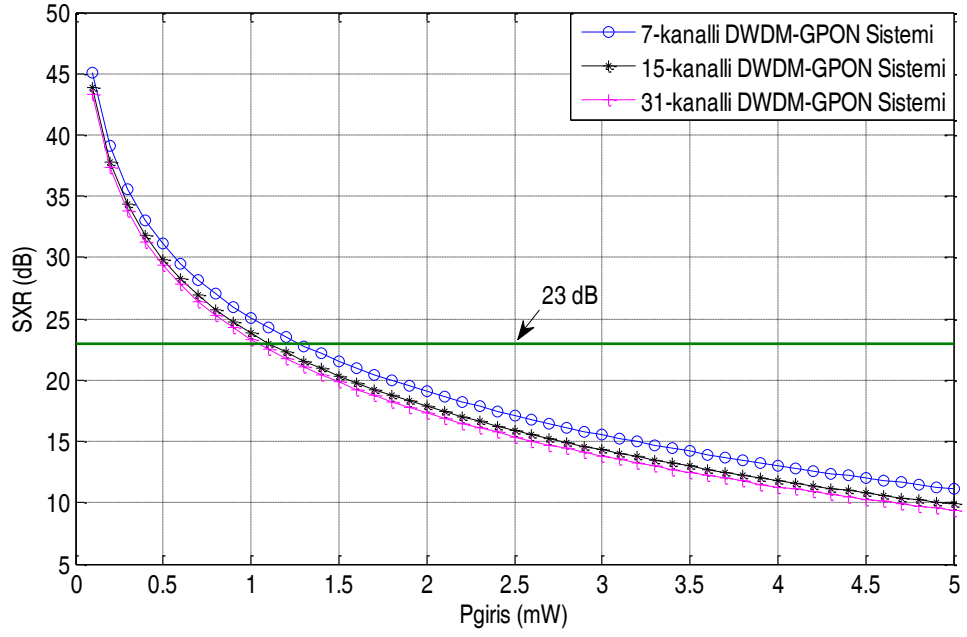
Şekil 4.4. $\Delta f=3.125$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



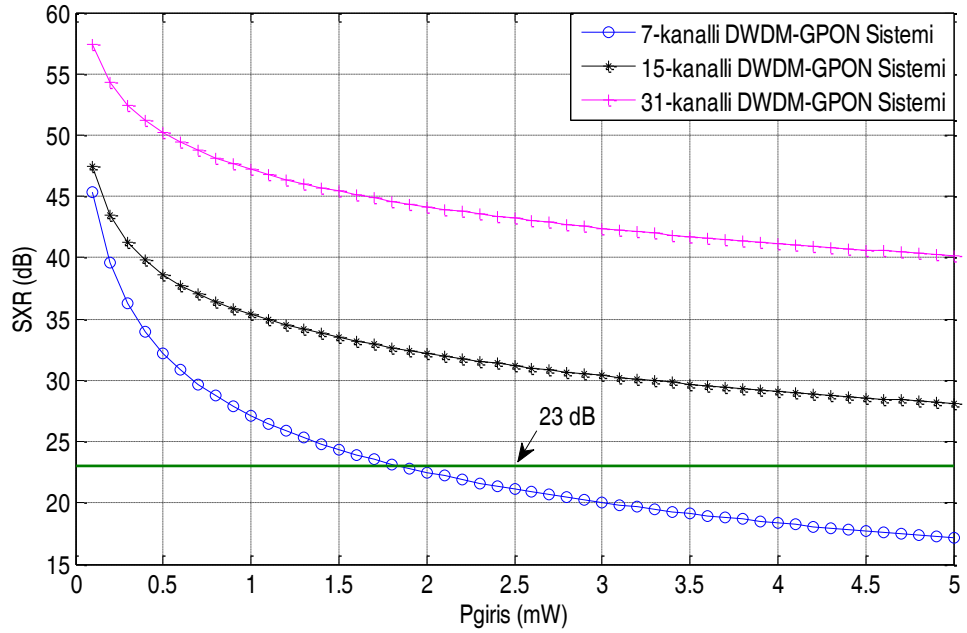
Şekil 4.5. $\Delta f=6.25$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



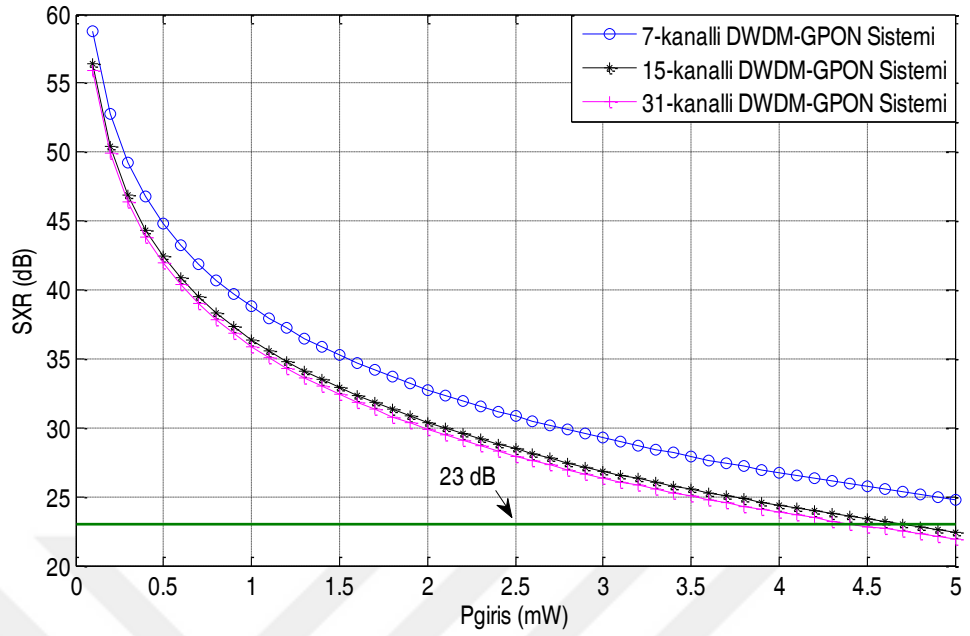
Şekil 4.6. $\Delta f=6.25$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



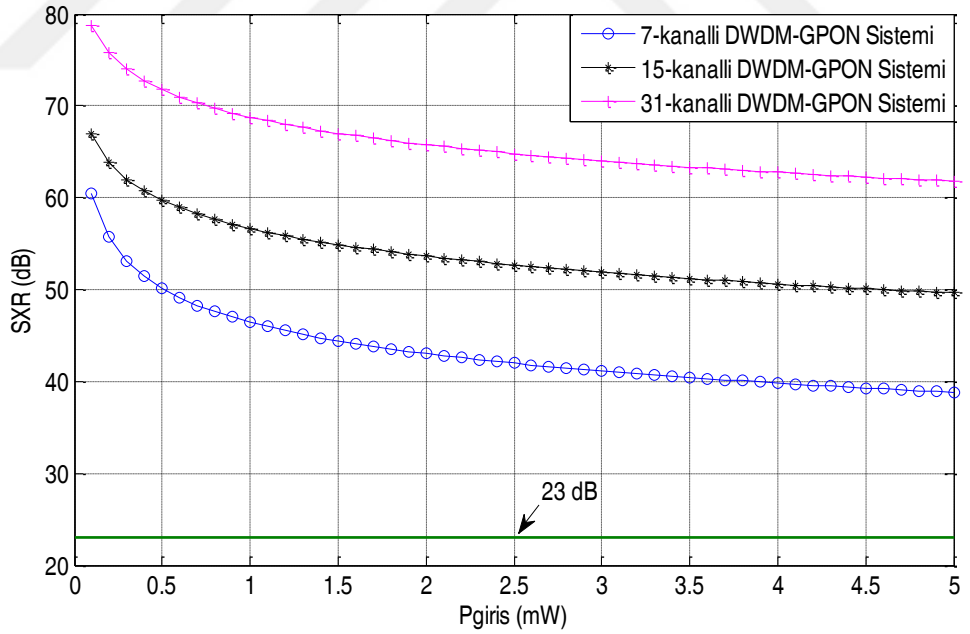
Şekil 4.7. $\Delta f=12.5$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



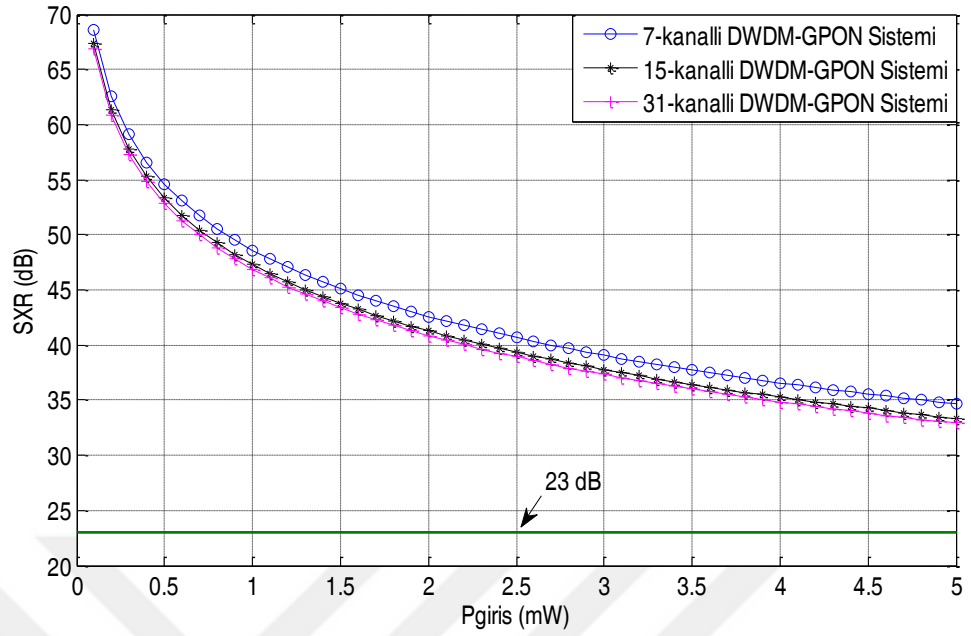
Şekil 4.8. $\Delta f=12.5$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



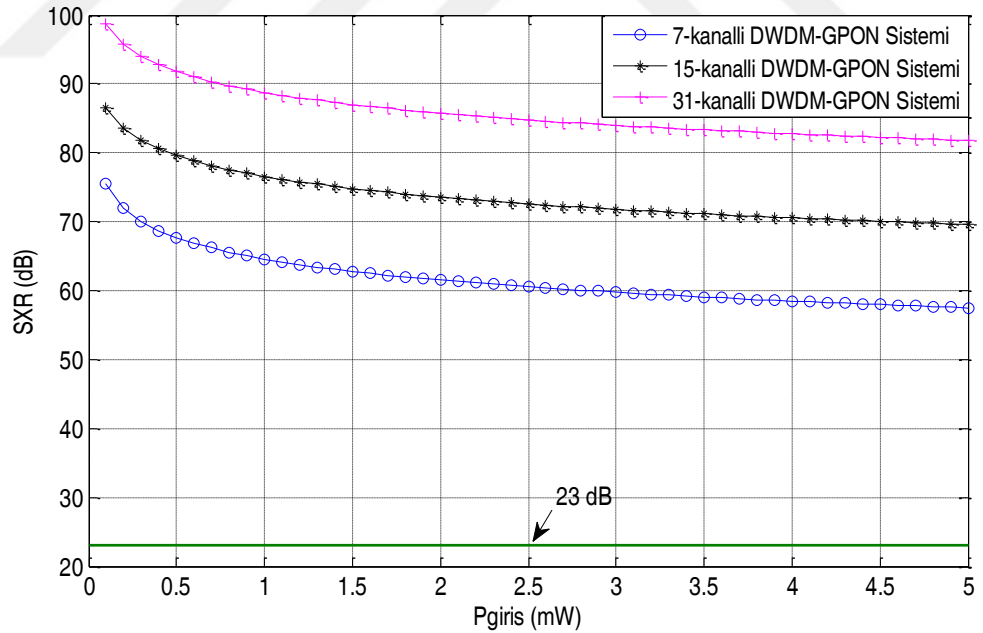
Şekil 4.9. $\Delta f = 25$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



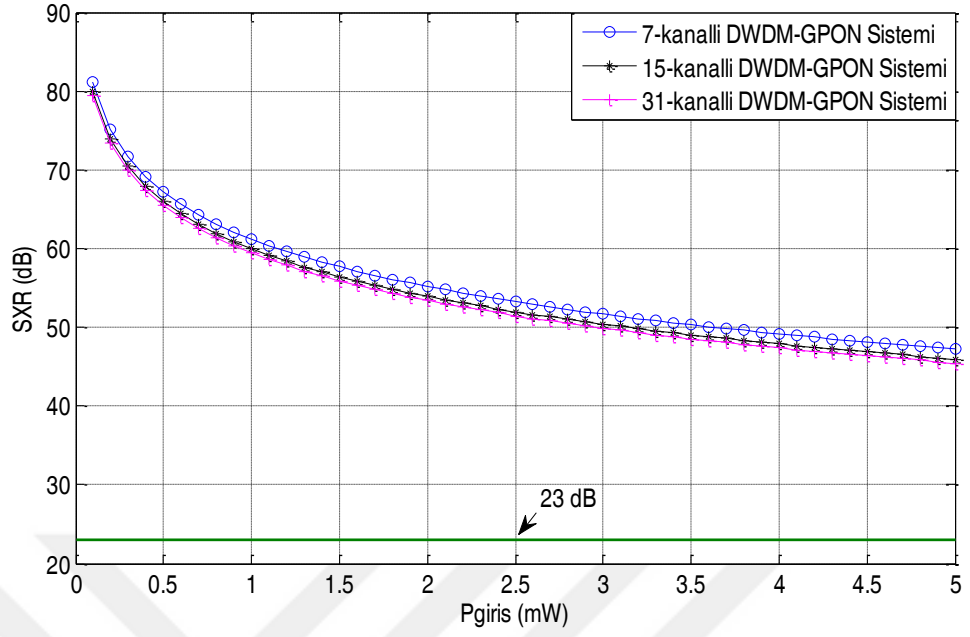
Şekil 4.10. $\Delta f = 25$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



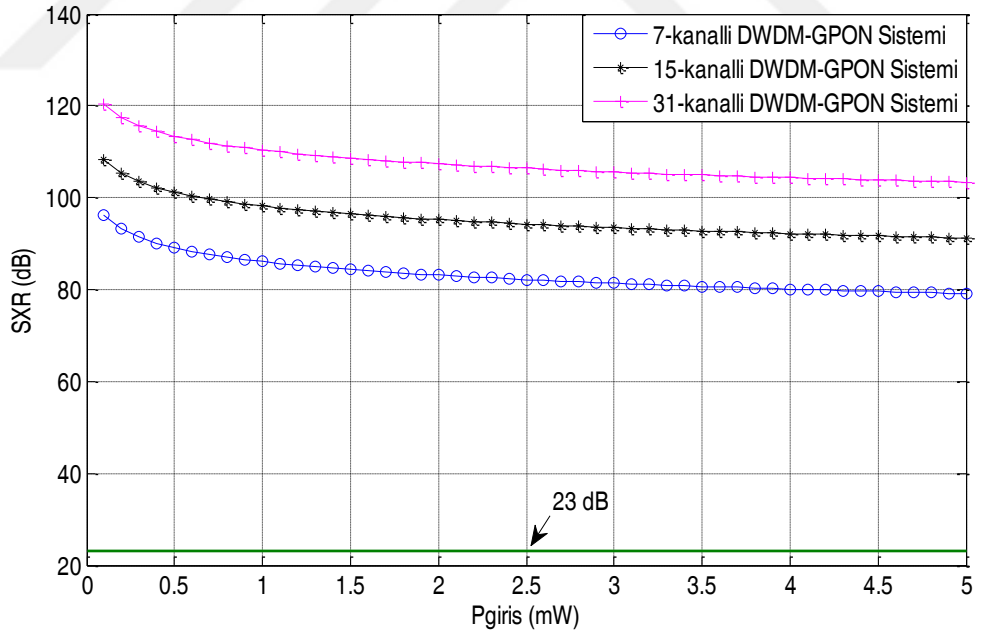
Şekil 4.11. $\Delta f = 50$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



Şekil 4.12 $\Delta f = 50$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



Şekil 4.13 $\Delta f = 100$ GHz için FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri



Şekil 4.14. $\Delta f = 100$ GHz için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal giriş gücü değişimleri

Şekil 4.1-4.6'dan elde edilen sonuçlara göre, Çizelge 4.1 ve 4.2'de, FWM'nin yalın etkisi ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş gücü değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri

UDWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	1.5625	3.125	6.25
7-kanallı	$P_{girişmax}$ (mW)	0.74	0.74	0.80
15- kanallı		0.30	0.33	0.46
31- kanallı		0.16	0.20	0.39

Çizelge 4.2. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri

UDWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	1.5625	3.125	6.25
7-kanallı	$P_{girişmax}$ (mW)	0.74	0.74	0.82
15- kanallı		0.31	0.34	0.66
31- kanallı		0.16	0.29	4.48

Şekil 4.7-4.14'ten elde edilen sonuçlara göre, Çizelge 4.3 ve 4.4'te FWM'nin yalın etkisi ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş gücü değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri

DWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	12.5	25	50	100
7-kanallı	$P_{girişmax}$ (mW)	1.27	>5	>5	>5
15- kanallı		1.10	4.68	>5	>5
31- kanallı		1.04	4.42	>5	>5

Çizelge 4.4. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum kanal giriş güçleri

DWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	12.5	25	50	100
7-kanallı	$P_{girişmax}$ (mW)	1.85	>5	>5	>5
15- kanallı		>5	>5	>5	>5
31- kanallı		>5	>5	>5	>5

Şekil 4.1- 4.14'te, SXR değerinin, denklem (2.5)'te gösteriliği gibi, eşit kanal giriş güçleri durumunda P_{FWM} 'nin $P_{giriş}^3$ bağımlılığı nedeniyle kanal giriş güçlerindeki artışla üstel bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, SXR, azalan kanallar arası boşluk değerleriyle azalır; çünkü daha dar kanal aralıkları faz uyumsuzluk faktörü ΔB_{ijk} 'de azalmaya neden olur ve bu da FWM verimliliğini arttırdığından P_{FWM} artar. Bu durum denklem (2.5), (2.8) ve (2.9)'dan kolayca görülebilir. SXR, 7'den 31'e kadar artan kanal sayılarıyla da azalır. Bu durum, P_{FWM} 'yi arttıran ve Çizelge 3.2-3.4'te verilen orta kanallarda üretilen FWM ürünlerinin artan sayısından kaynaklanır.

Şekil 4.1, 4.3 ve 4.5 ile Çizelge 4.1'den görüleceği üzere, 1.5625 GHz- 6.25 GHz kanallar arası boşluk değerleri için, tüm 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerinde

23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur. Bu, FWM'nin yalın etkisi altındaki durumdur.

Şekil 4.7, 4.9, 4.11 ve 4.13 ile Çizelge 4.3'ten görüleceği üzere, 12.5 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 1 mW'ı aşan kanal giriş güçlerinde, tüm 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur. 25 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 5 mW'a yaklaşan kanal giriş güçlerinde, sadece 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur. 0.1-5 mW kanal giriş gücü aralığındaki 50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerleri için, tüm 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcut değildir. Bu, FWM'nin yalın etkisi altındaki durumdur.

Şekil 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12 ve 4.14'te verilen sonuçlar Şekil 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11 ve 4.13 ile sırayla karşılaştırıldığında, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki SXR değerlerinin FWM'nin yalın etkisi altındakilerden daha büyük olduğu kolayca görülebilir. Ayrıca FWM'nin yalın etkisi altındaki durumun tersine, SXR değerleri artan kanal sayıları ile artmaktadır. Aslında bu, Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörünün, yani Raman kazancı G_R 'nin, artan kanal sayılarıyla birlikte artması ve bu durumun merkez kanallar için modifiye edilmiş işaret gücü P_{SRS} 'de bir artışa yol açması nedeniyle oluşur. Bölüm 4.4'teki benzetim sonuçları bu yorumları desteklemektedir.

Şekil 4.2, 4.4 ve 4.6 ile Çizelge 4.2'den görüleceği üzere, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında, tüm 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur.

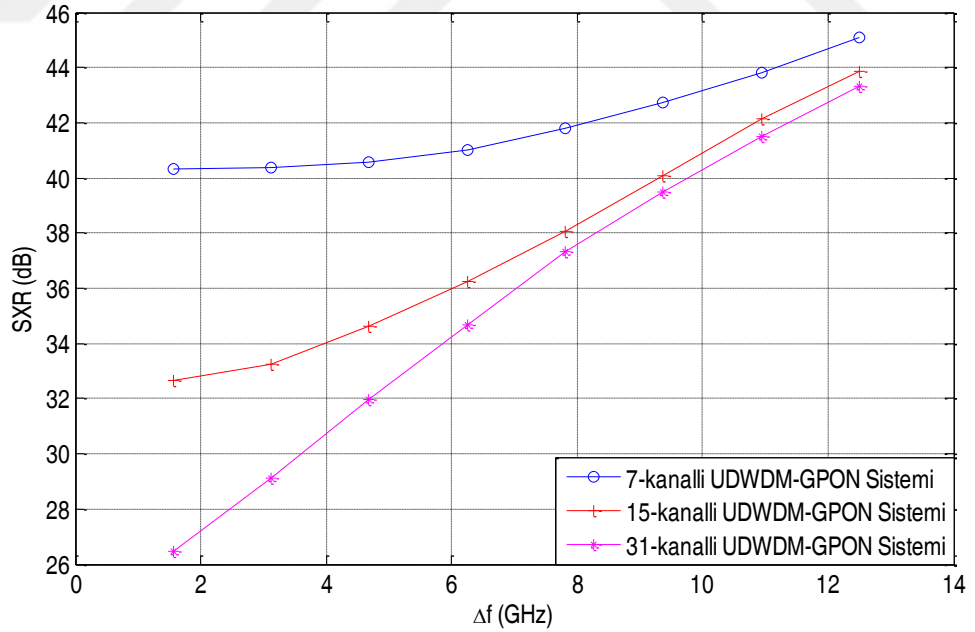
Şekil 4.8, 4.10, 4.12 ve 4.14 ile Çizelge 4.4'ten görüleceği üzere, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında, 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali, 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerini kullanan ve 2 mW'a yaklaşan kanal giriş güçlerine sahip olan sadece 7-kanallı DWDM-GPON sistemleri için meydana gelebilir. Diğer durumlarda, kanal giriş gücü 0.1-5 mW aralığını aşmadıkça 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemleri için böyle bir ihtimal mevcut değildir. Karşılaştırmalı sonuçlar, SRS'nin

7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki FWM'nin negatif etkilerini kompanse ettiğini, artan kanal sayıları ve kanallar arası boşluk değerleri ile kompanse miktarının arttığını göstermektedir.

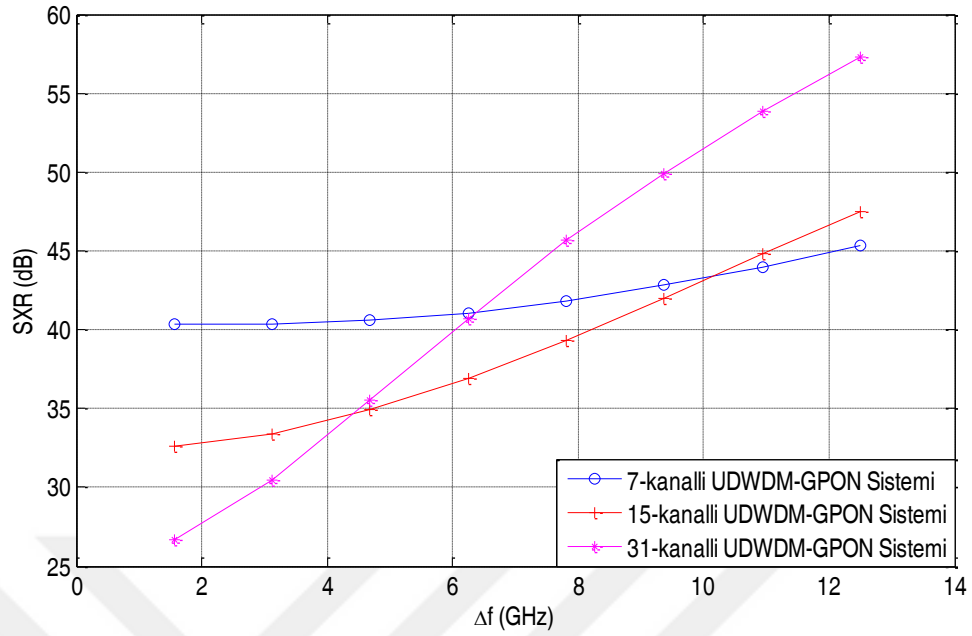
4.2. SXR- Δf Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.3'te açıklanan benzetim koşulları altında, 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarında elde edilen SXR-kanallar arası boşluk değeri (Δf) benzetim sonuçları FWM'nin yalın etkisi altındaki durum için Şekil 4.15 ve 4.17'de, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durum için Şekil 4.16 ve 4.18'de verilmiştir.

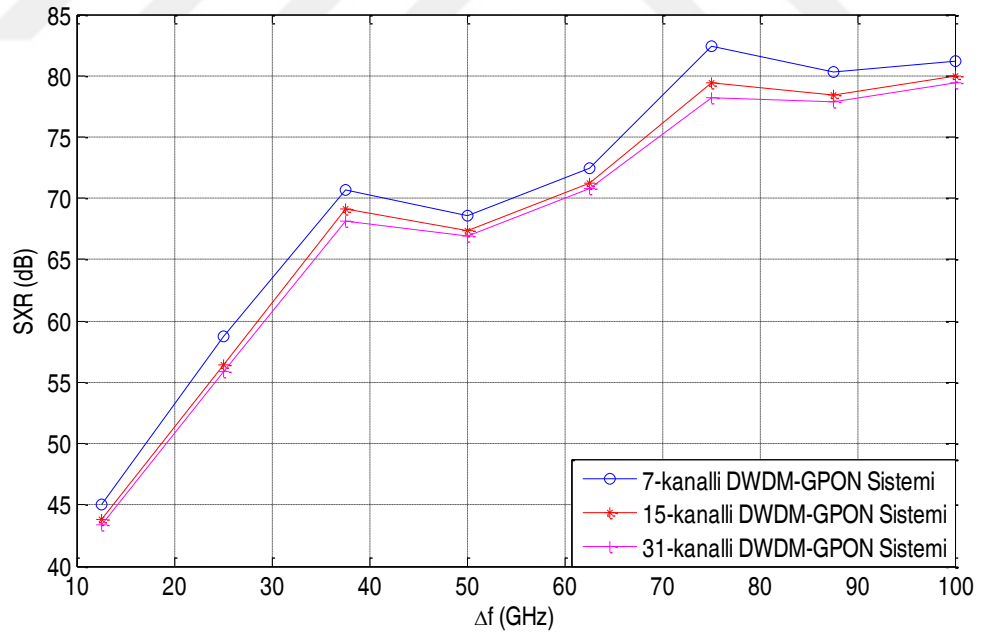
FWM'nin yalın etkisi ile SRS'nin ve FWM birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri için karşılaştırmalı sonuçlar, Çizelge 4.5-4.8'de verilmiştir.



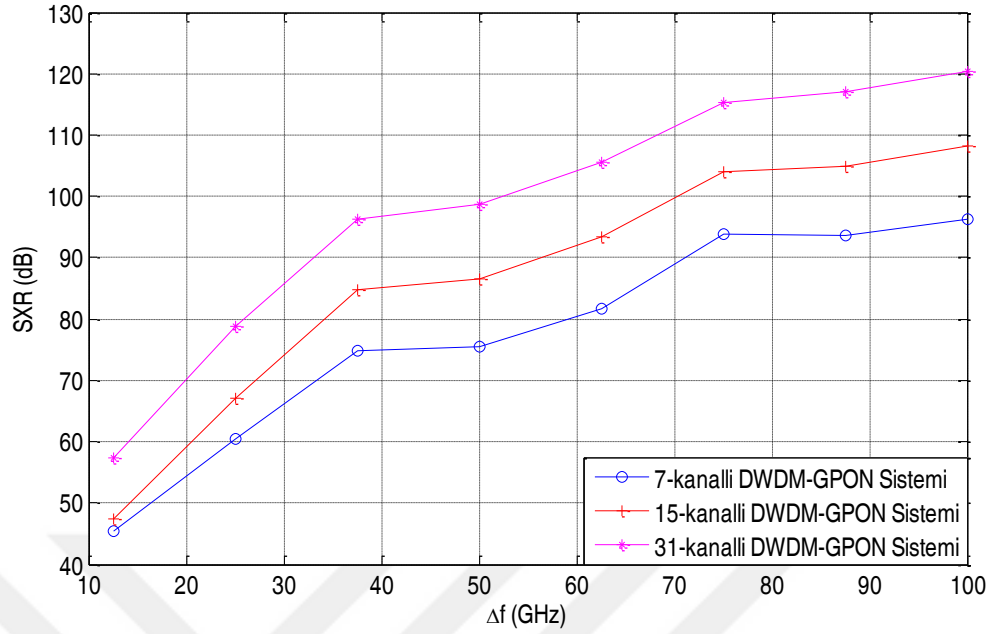
Şekil 4.15. FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{\text{giriş}} = 0.1 \text{ mW}$)



Şekil 4.16. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{\text{giriş}} = 0.1 \text{ mW}$)



Şekil 4.17. FWM'nin yalnız etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{\text{giriş}} = 0.1 \text{ mW}$)



Şekil 4.18. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR- Δf değişimleri ($P_{\text{giriş}} = 0.1 \text{ mW}$)

Çizelge 4.5. $P_{\text{giriş}} = 0.1 \text{ mW}$ için FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

UDWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	1.5625	3.125	6.25
7-kanallı	SXR (dB)	40.34	40.39	41.02
15- kanallı		32.64	33.26	36.23
31- kanallı		26.47	29.11	34.68

Çizelge 4.6. $P_{\text{giriş}} = 0.1 \text{ mW}$ için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

UDWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	1.5625	3.125	6.25
7-kanallı	SXR (dB)	40.34	40.39	41.05
15- kanallı		32.65	33.34	36.89
31- kanallı		26.67	30.49	40.70

Çizelge 4.7. $P_{giriş} = 0.1$ mW için FWM'nin yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

DWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	12.25	25	50	100
7-kanallı	SXR (dB)	45.08	58.79	68.62	81.22
15- kanallı		43.85	56.41	67.32	79.94
31- kanallı		43.34	55.91	66.88	79.43

Çizelge 4.8. $P_{giriş} = 0.1$ mW için SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

DWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	12.5	25	50	100
7-kanallı	SXR (dB)	45.33	60.49	75.46	96.23
15- kanallı		47.48	67.00	86.60	108.20
31- kanallı		57.32	78.77	98.76	120.30

Şekil 4.15 ve 4.16 ile Çizelge 4.5 ve 4.6'da koyu renkli verilen benzetim sonuçlarına göre, sabit kanal sayılarında, 6.25 GHz'teki SXR değerleri 1.5625 GHz'teki değerlerden, FWM yalın etkisi altındaki durumlarda, 7-kanallı sistemlerde 0.68 dB, 15-kanallı sistemlerde 3.59 dB, 31-kanallı sistemlerde 8.21 dB daha büyük iken; SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durumlarda, 7-kanallı sistemlerde 0.71 dB, 15-kanallı sistemlerde 4.24 dB, 31-kanallı sistemlerde 14.03 dB daha büyüktür. Halbuki sabit kanallar arası boşluk değerlerinde 7-kanallı ve 31-kanallı sistemler arasındaki SXR değişimi, FWM yalın etkisi altındaki durumlarda, 1.5625 GHz için 13.87 dB, 3.125 GHz için 11.28 dB ve 6.25 GHz için 6.34 dB iken; SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durumlarda, 1.5625 GHz için 13.67 dB, 3.125 GHz için 9.90 dB ve 6.25 GHz için 0.35 dB'dir.

Çizelge 4.5 ve 4.6'daki koyu renkte belirtilen benzetim sonuçları kendi aralarında kıyaslandıklarında 1.5625 GHz'te aynı özelliklere sahip sistemlerin SXR değerleri, FWM'nin yalın etkisi altındaki durum ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki

durum için büyük farklılıklar göstermemektedir. 6.25 GHz'te ise 7-kanallı ve 15-kanallı sistemler için 1.5625 GHz'tekine benzer şekilde SXR değerleri belirgin farklar göstermezken, 31-kanallı sistemde FWM'nin yalın etkisi altındaki durum ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durumda kaydedilen SXR değerleri arasında yaklaşık 6 dB'lik bir fark söz konusudur.

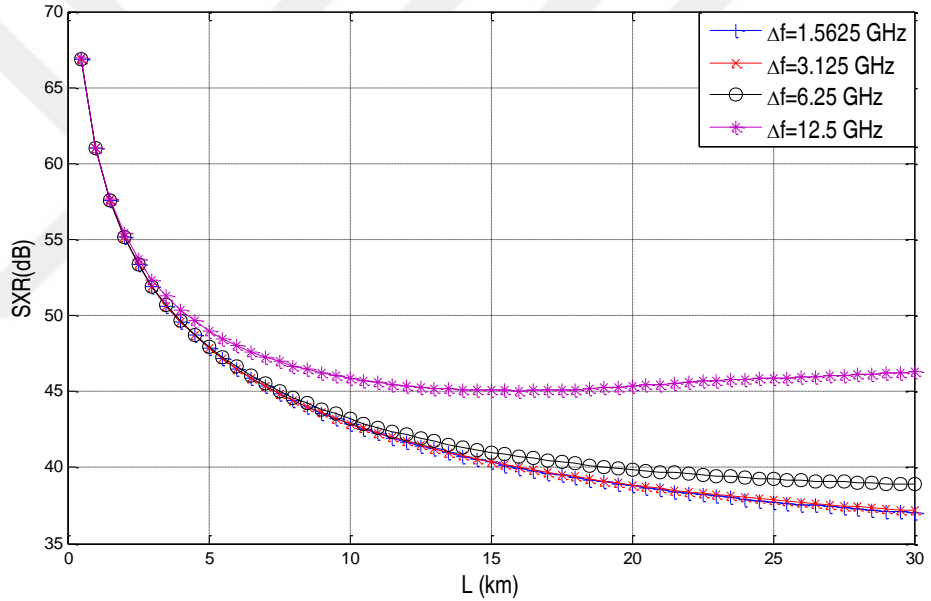
Kısaca toparlamak gerekirse UDWDM-GPON sistemlerde, 1.5625 GHz ve 3.125 GHz kanallar arası boşluk değerleri için 7-, 15- ve 31-kanallı sistemlerde FWM'nin yalın etkisi altındaki durum ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durum arasında SXR değerleri açısından belirgin bir fark yoktur. 6.25 GHz kanallar arası boşluk değeri için 7- ve 15-kanallı sistemlerde yine iki durum arasında belirgin bir fark yokken, 31-kanallı sistemde iki durum arasında belirgin bir fark (~ 6 dB) vardır.

Şekil 4.17 ve 4.18 ile Çizelge 4.7 ve 4.8'deki koyu renkli benzetim sonuçlarından, DWDM-GPON sistemlerde kanallar arası boşluk değerlerinin kanal sayılarına göre SXR üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerinde 7-kanallı sistem ile 31-kanallı sistem SXR değerleri arasındaki fark FWM'nin yalın etkisi altındaki durumda 1.74 dB, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durumda ise 11.99 dB iken aynı değerler 100 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde sırasıyla 1.79 dB ve 24.07 dB'dir. Halbuki 7-kanallı sistemde 12.5 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerleri arasındaki SXR farkı FWM'nin yalın etkisi altındaki durumda 36.14 dB, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durumda ise 50.90 dB iken 31-kanallı sistemde aynı değerler sırasıyla 36.09 dB ve 62.98 dB'dir. Ayrıca Çizelge 4.8'deki tüm SXR değerleri, Çizelge 4.7'deki ilgili değerlerden belirgin bir şekilde daha büyüktür. Çizelge 4.5-4.8'deki kalın yazılmış SXR değerleri dikkate alındığında, artan kanal sayıları ve kanallar arası boşluk değerleri ile SRS'nin FWM'nin negatif etkisini kompanze edici davranışının belirgin bir şekilde arttığı kolayca görülebilir.

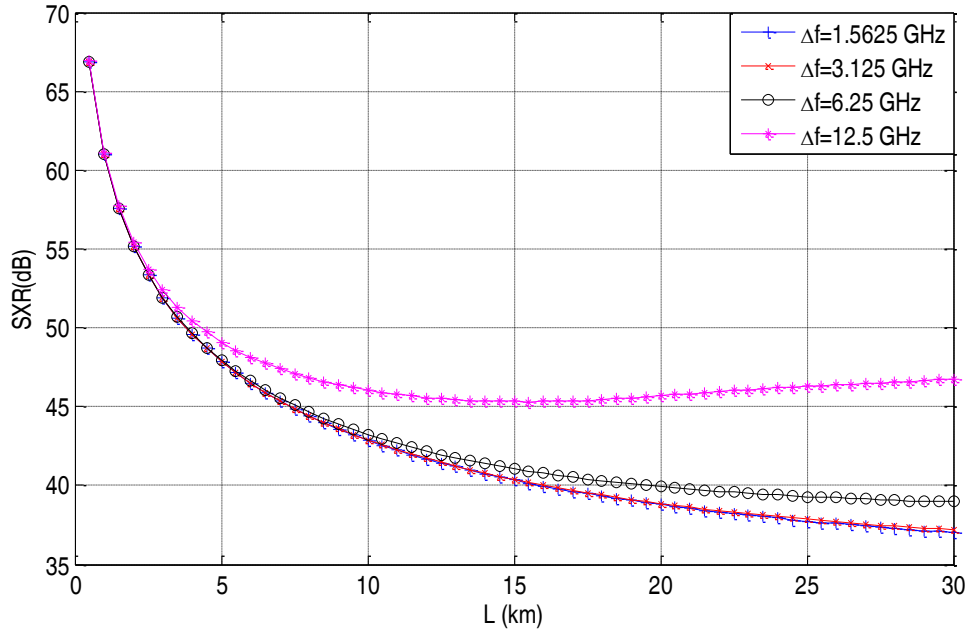
Bu alt bölümde verilen sonuçlar, Bölümde 4.1'de, UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki FWM'nin negatif etkileri üzerindeki SRS'nin kompanze edici davranışı hakkında verilen sonuçlarla iyi bir uyum içindedir.

4.3. SXR-Kanal Uzunluğu Benzetim Sonuçları

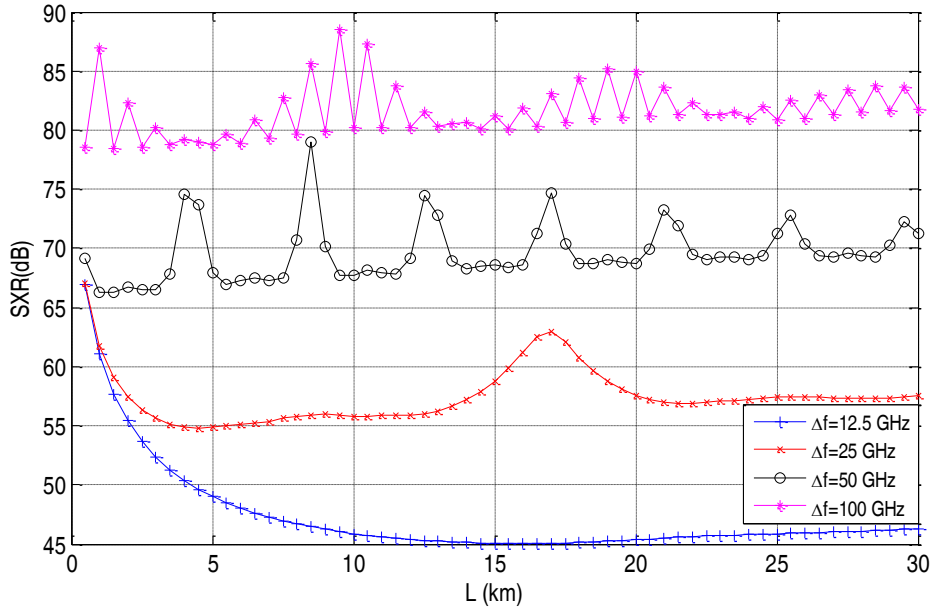
Bölüm 3.4'te verilen benzetim koşulları altında, $P_{giriş} = 0.1$ mW sabit kanal giriş güçleri için FWM'nin yalnız etkisi ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri için elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4.19-4.30'da gösterilmiştir. FWM'nin yalnız etkisi ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri için karşılaştırmalı sonuçlar, Çizelge 4.9-4.12'de gösterilmektedir.



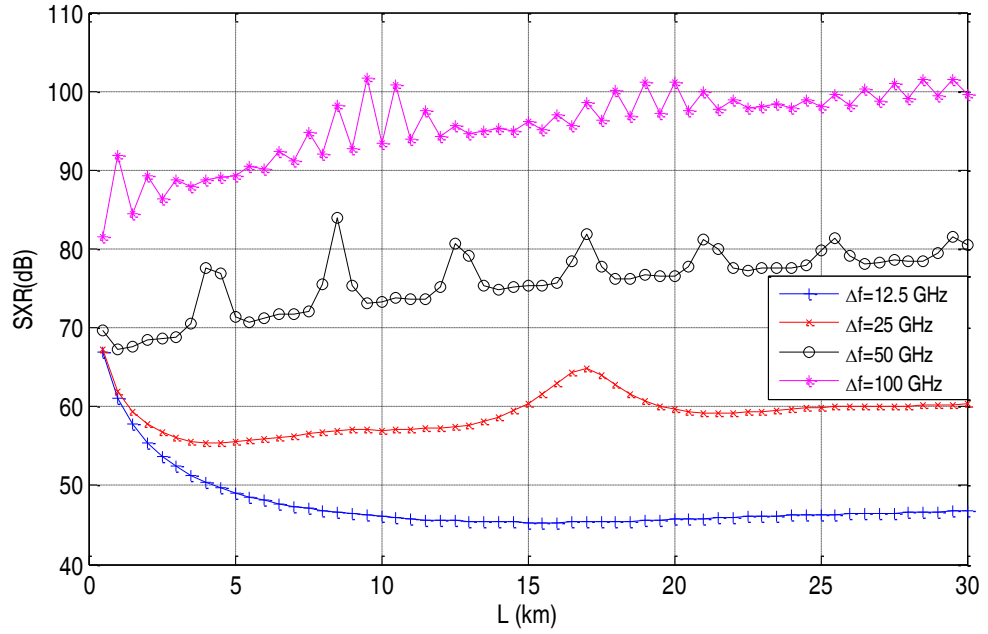
Şekil 4.19. FWM'nin yalnız etkisi altındaki 7-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



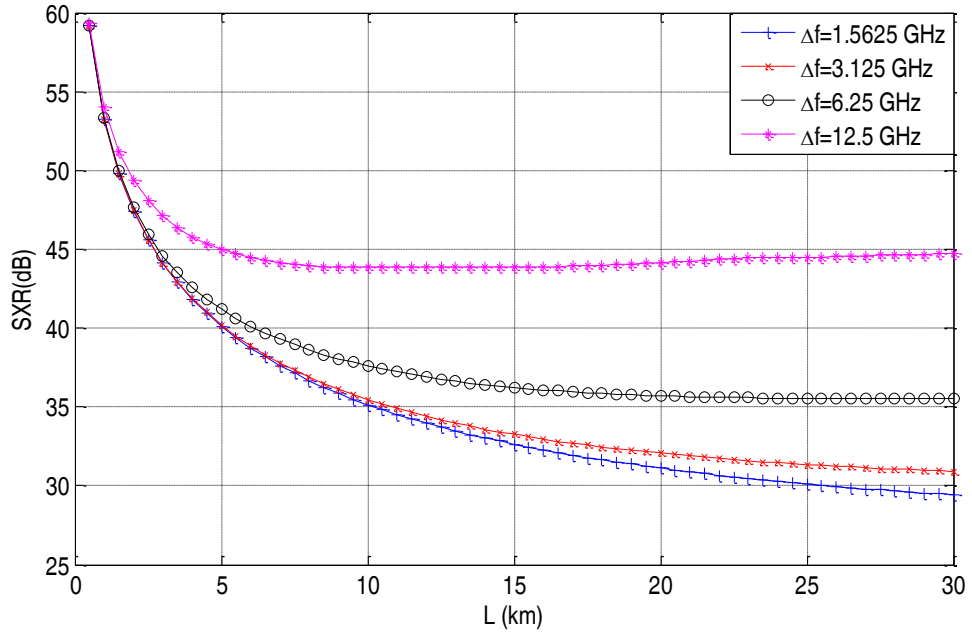
Şekil 4.20. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



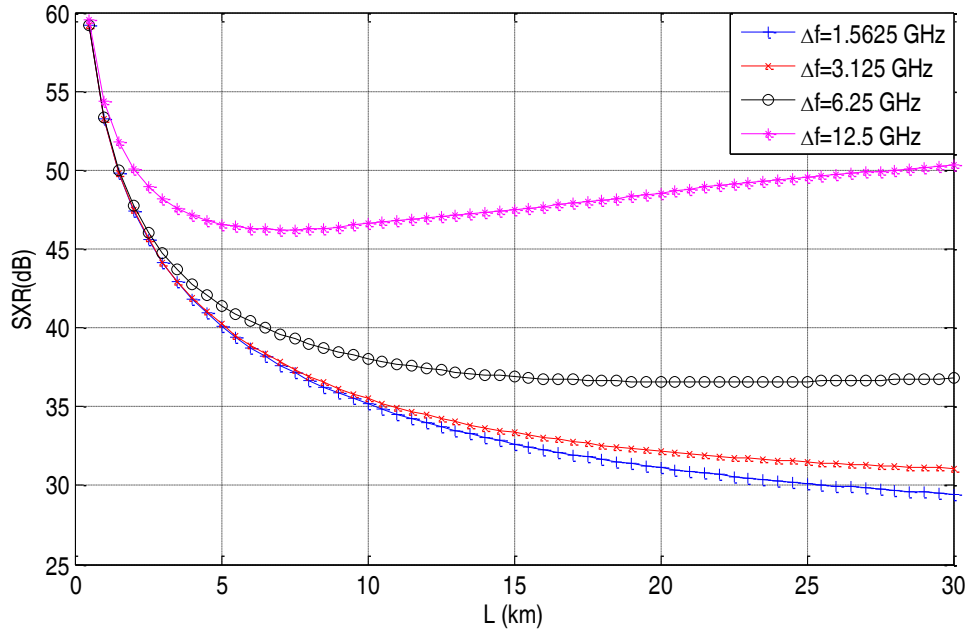
Şekil 4.21. FWM'nin yalnız etkisi altındaki 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



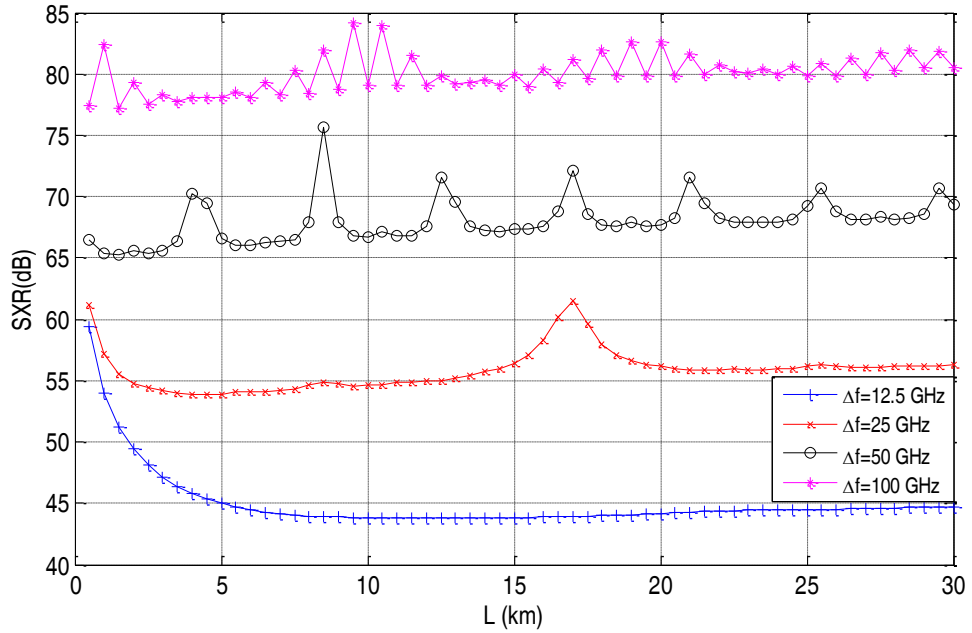
Şekil 4.22. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



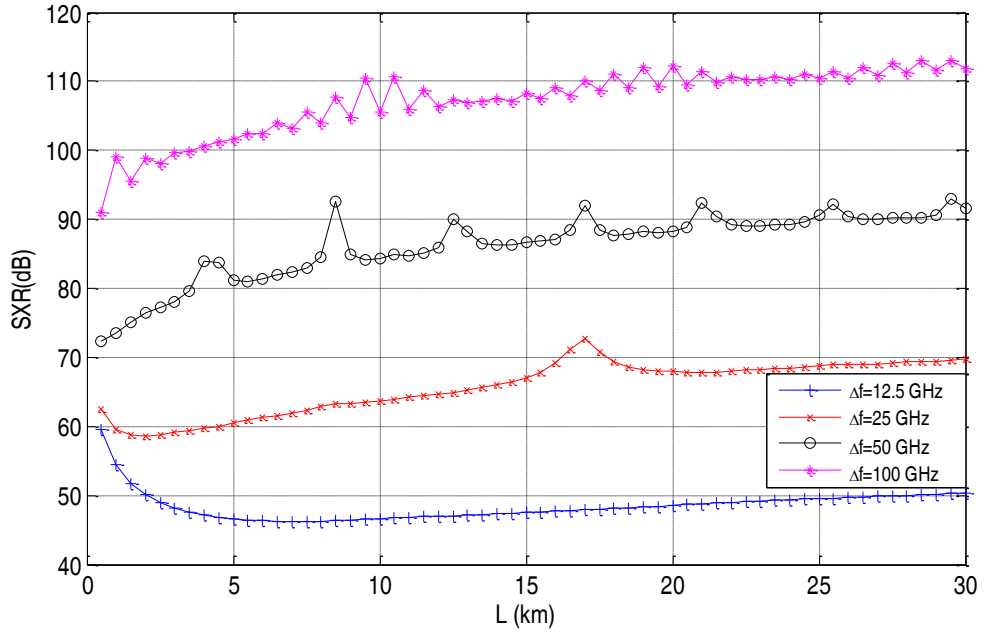
Şekil 4.23. FWM'nin yalnız etkisi altındaki 15-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



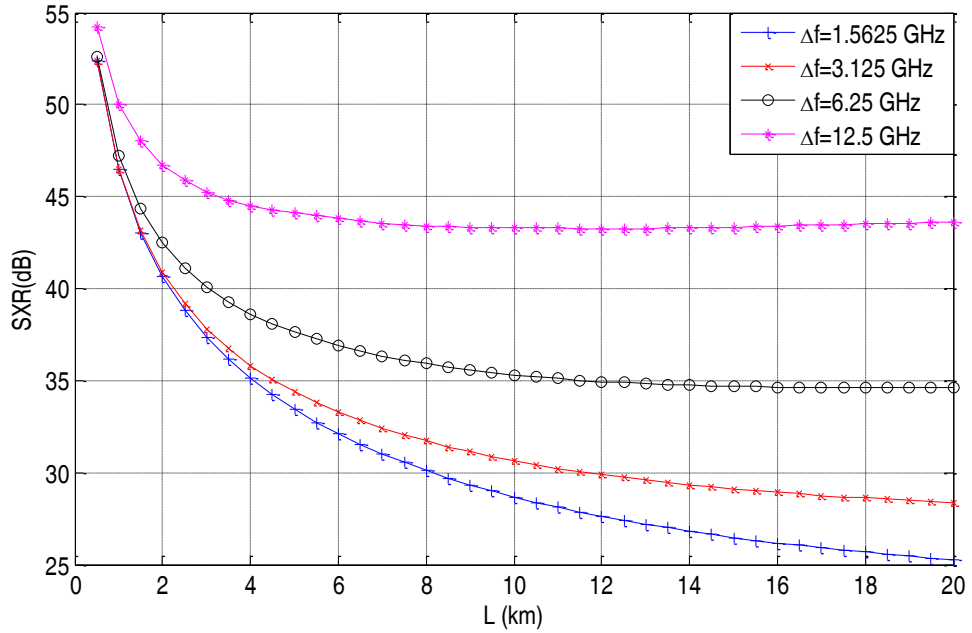
Şekil 4.24. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 15-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



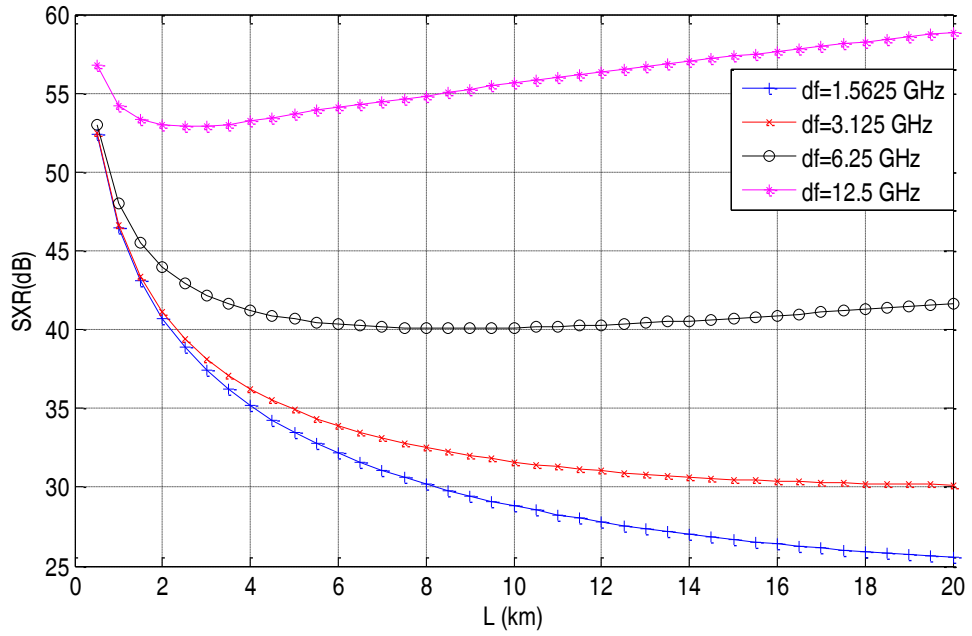
Şekil 4.25. FWM'nin yalnız etkisi altındaki 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



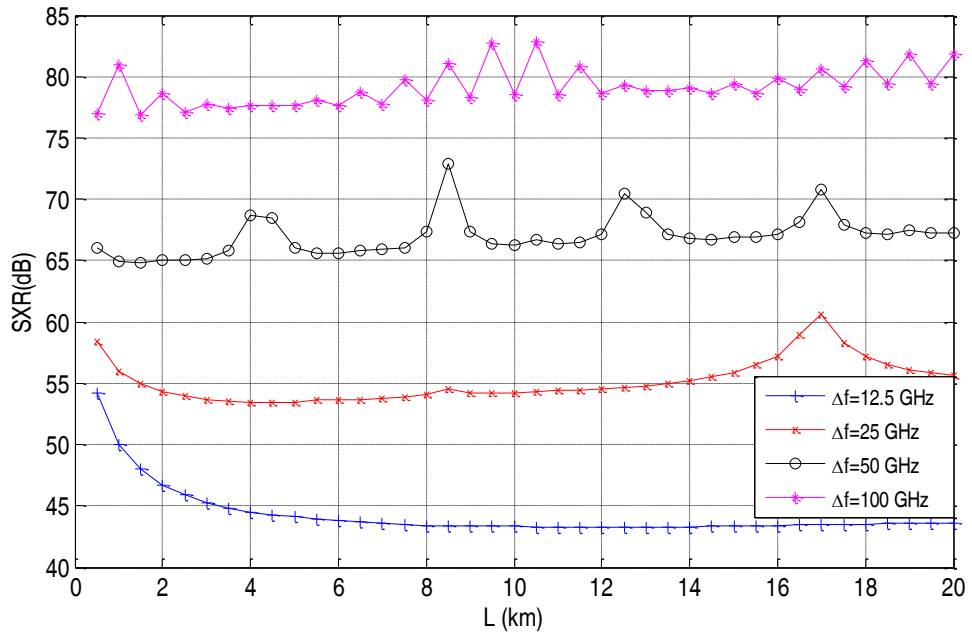
Şekil 4.26. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



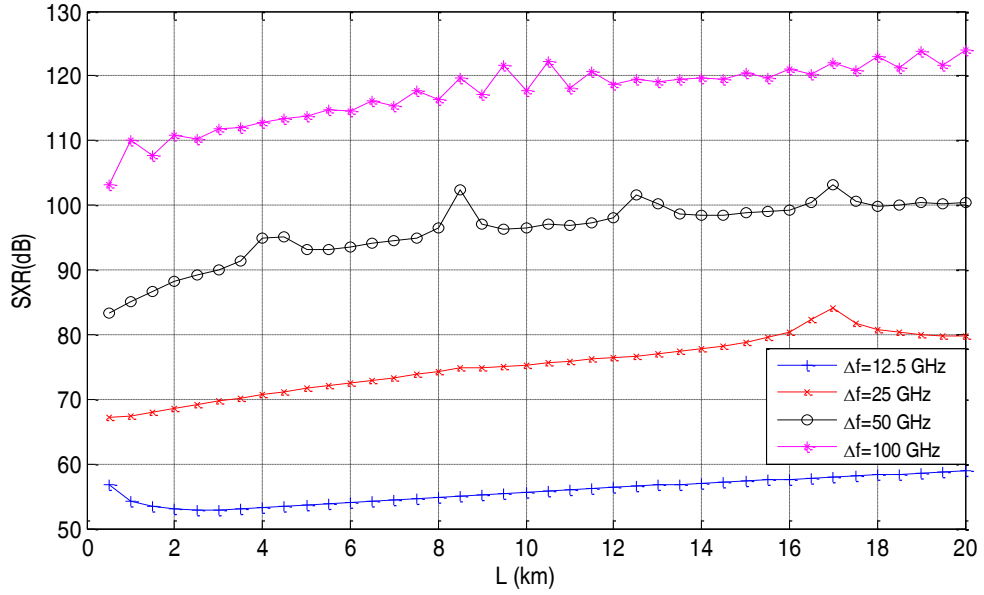
Şekil 4.27. FWM'nin yalın etkisi altındaki 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



Şekil 4.28. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



Şekil 4.29. FWM'nin yalnız etkisi altındaki 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri



Şekil 4.30. SRS ve FWM'nin yalnız etkisi altındaki 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR-kanal uzunluğu değişimleri

Şekil 4.19, 4.20, 4.23, 4.24, 4.27 ve 4.28 ile Çizelge 4.9 ve 4.10'daki benzetim sonuçlarına göre, FWM'nin yalnız etkisi altındaki ve SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15-, 31-kanallı DWDM-PON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri, kanal uzunluğundaki artma ile ekponansiyel bir şekilde azalmaktadır.

Şekil 4.21, 4.22, 4.25, 4.26, 4.29 ve 4.30 ile Çizelge 4.11 ve 4.12'de verilen benzetim sonuçlarıyla ilgili en dikkat çekici nokta, değişken kanal uzunluklarına sahip SXR değişimlerinin osilasyon davranışdır. Bu osilasyon davranışı, 25 GHz kanallar arası boşluk değerlerine sahip DWDM-GPON sistemlerinde hafif bir şekilde başlamakta ve kanallar arası boşluk değerleri 50 GHz ve 100 GHz'ye ulaştıkça daha da güçlenmektedir. Özellikle 100 GHz'te, tüm 7-, 15-, 31-kanallı DWDM-GPON sistemleri için, FWM'nin yalnız etkisi ile SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında, 0.5 km'lik çok kısa kanal uzunluğu değişikliklerinde güçlü bir osilasyon oluşmaktadır. Bu durum, 50 GHz ve 100 GHz gibi yüksek kanallar arası boşluk değerlerinde daha güçlü hale gelen faz uyumsuzluğu olgusundan kaynaklanmakta olup SXR performansını çok kısa kanal uzunluk değişimleri için önemli ölçüde azaltabildiğinden sistem uygulamalarının güvenilirliği açısından çok önemlidir.

Çizelge 4.9. FWM'nin yalın etkisi altındaki farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	UDWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	1.5625	3.125	6.25
1	7-kanallı	SXR değerleri (dB)	60.99	60.99	60.99
	15-kanallı		53.24	53.24	53.29
	31-kanallı		46.46	46.51	47.21
5	7-kanallı		47.86	47.87	47.95
	15-kanallı		40.12	40.20	41.19
	31-kanallı		33.42	34.38	37.63
10	7-kanallı		42.88	42.90	43.20
	15-kanallı		35.15	35.46	37.60
	31-kanallı		28.68	30.64	35.31
15	7-kanallı		40.34	40.39	41.02
	15-kanallı		32.64	33.26	36.23
	31-kanallı		26.47	29.11	34.68
20	7-kanallı		38.79	38.86	39.87
	15-kanallı		31.11	32.06	35.71
	31-kanallı		25.25	28.39	34.63
30	7-kanallı		37.02	37.18	38.90
	15-kanallı		29.43	30.91	35.55
	31-kanallı		-	-	-

Kanal uzunluklarındaki 0.5 km'lik bir artışın, 50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde, 7-kanallı DWDM-GPON sistemleri için FWM yalın etkisi altında sırasıyla 8.86 dB ve 8.66 dB'lik maksimum SXR değişimine neden olurken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında sırasıyla 8.69 dB ve 10.24 dB'lik maksimum SXR değişimine sebebiyet verdiği; 15-kanallı DWDM-GPON sistemleri için FWM yalın etkisi altında

sırasıyla 7.75 dB ve 5.43 dB'lik maksimum SXR değişimine neden olurken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında her iki kanallar arası boşluk değeri için 7.98 dB'lik maksimum SXR değişimine sebebiyet verdiği; 31-kanallı DWDM-GPON sistemleri için FWM yalın etkisi altında sırasıyla 5.54 dB ve 4.41 dB'lik maksimum SXR değişimine neden olurken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında sırasıyla 5.72 dB ve 7.00 dB'lik maksimum SXR değişimine sebebiyet verdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	UDWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	1.5625	3.125	6.25
1	7-kanallı	SXR değerler (dB)	60.99	60.99	60.99
	15-kanallı		53.24	53.24	54.34
	31-kanallı		46.47	46.62	48.01
5	7-kanallı		47.86	47.87	47.96
	15-kanallı		40.12	40.23	41.42
	31-kanallı		33.49	34.90	40.66
10	7-kanallı		42.88	42.90	43.22
	15-kanallı		35.15	35.52	38.05
	31-kanallı		28.81	31.61	40.10
15	7-kanallı		40.34	40.39	41.05
	15-kanallı		32.65	33.35	36.89
	31-kanallı		26.67	30.50	40.72
20	7-kanallı		38.79	38.87	39.92
	15-kanallı		31.13	32.18	36.57
	31-kanallı		25.52	30.16	41.64
30	7-kanallı		37.02	37.18	38.96
	15-kanallı		29.45	31.08	36.78
	31-kanallı		-	-	-

Çizelge 4.11. FWM'nin yalın etkisi altındaki farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	DWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	12.25	25	50	100
1	7-kanallı	SXR değerleri (dB)	61.04	61.77	66.28	87.00
	15-kanallı		54.00	57.22	65.32	82.46
	31-kanallı		50.04	55.92	64.90	80.92
5	7-kanallı		49.01	54.85	67.94	78.83
	15-kanallı		44.99	53.91	66.60	78.04
	31-kanallı		44.12	53.48	66.07	77.69
10	7-kanallı		45.86	55.83	67.75	80.20
	15-kanallı		43.86	54.63	66.66	79.04
	31-kanallı		43.32	54.21	66.25	78.58
15	7-kanallı		45.08	58.79	68.62	81.22
	15-kanallı		43.85	56.41	67.32	79.94
	31-kanallı		43.34	55.91	66.88	79.43
20	7-kanallı		45.36	57.54	68.71	84.94
	15-kanallı		44.15	56.16	67.70	82.65
	31-kanallı		43.64	55.61	67.28	81.81
30	7-kanallı		46.29	57.52	71.26	81.77
	15-kanallı		44.73	56.32	69.31	80.56
	31-kanallı		-	-	-	-

Genel olarak, SRS ve FWM'nin birleşik etkisinin FWM'nin yalın etkisine kıyasla, 50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde SXR değişiminin maksimum osilasyon genliğini arttırdığı açıktır.

Çizelge 4.12. SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında farklı kanal uzunluklarına ve kanallar arası boşluk değerlerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerinin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerleri

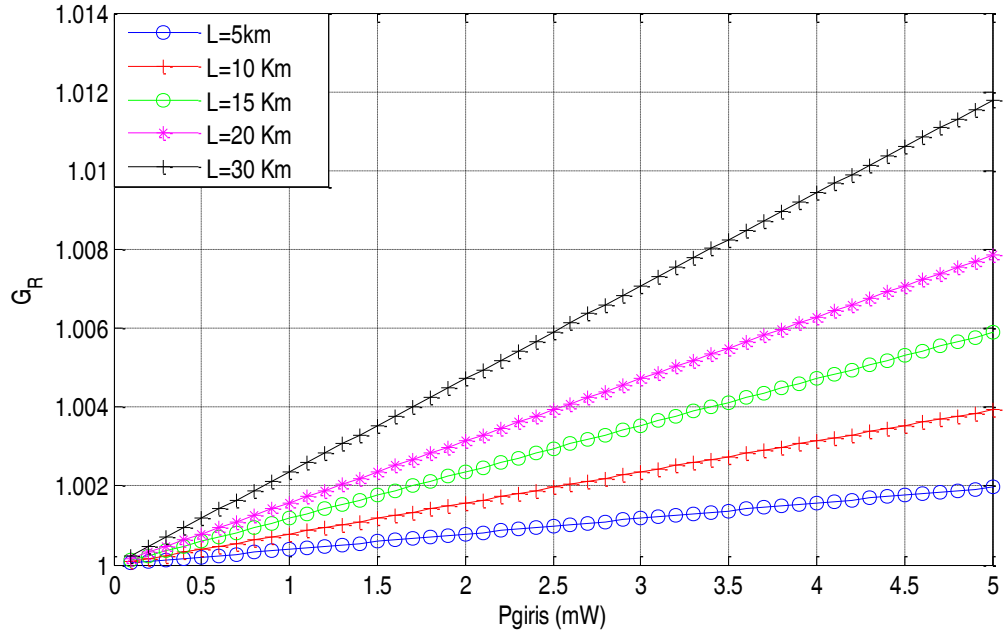
Kanal Uzunluğu (km)	DWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	12.25	25	50	100
1	7-kanallı	SXR değerler (dB)	61.06	61.91	67.25	91.77
	15-kanallı		54.37	59.52	73.52	99.08
	31-kanallı		54.20	67.35	85.08	110.10
5	7-kanallı		49.10	55.48	71.46	89.25
	15-kanallı		46.57	60.45	81.24	101.60
	31-kanallı		53.69	71.64	93.21	113.90
10	7-kanallı		46.04	57.01	73.20	93.44
	15-kanallı		46.60	63.67	84.23	105.60
	31-kanallı		55.65	75.35	96.39	117.80
15	7-kanallı		45.33	60.46	75.39	96.14
	15-kanallı		47.49	67.03	86.62	108.20
	31-kanallı		57.35	78.80	98.78	120.40
20	7-kanallı		45.70	59.65	76.50	101.10
	15-kanallı		48.55	67.93	88.24	112.20
	31-kanallı		58.86	79.74	100.40	124.00
30	7-kanallı		46.78	60.39	80.56	99.64
	15-kanallı		50.33	69.75	91.60	111.90
	31-kanallı		-	-	-	-

4.4. GR- P_{giriş} Benzetim Koşulları

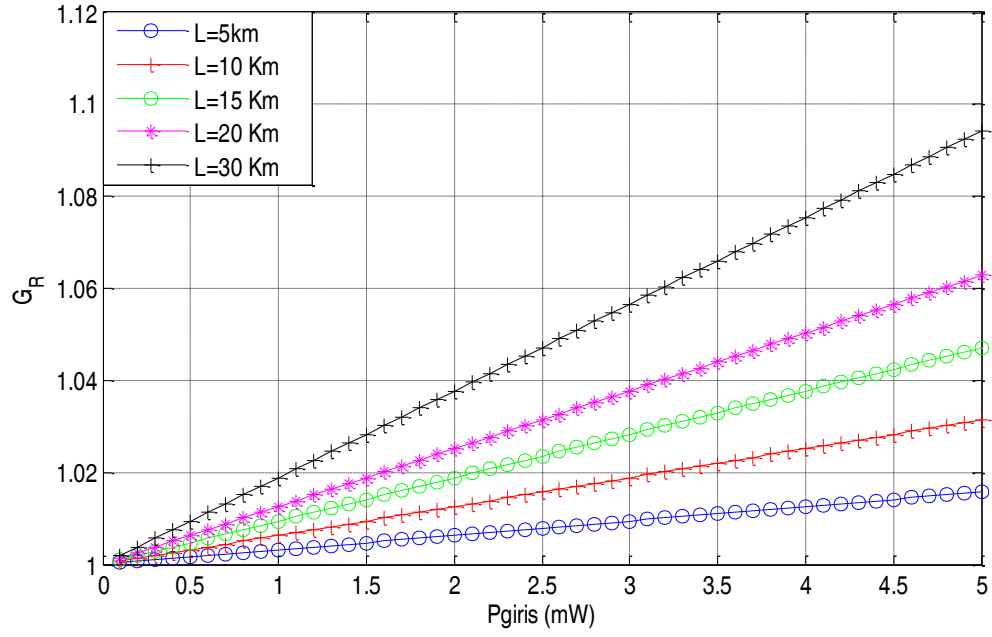
Bölüm 3.5'te verilen benzetim koşulları altında, 0.1 mW- 5 mW arasında değişen eşit kanal giriş güçleri için 1.5625 GHz-100 GHz kanallar arası boşluk değerlerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM/DWDM-GPON sistemlerin

merkez aşağı y6nl6 kanallarındaki SXR-Stokes dalgasının kuvvetlendirme fakt6r6 (G_R) değişimlerine ait benzetim sonuçları Şekil 4.31-4.51'de g6sterilmiştir.

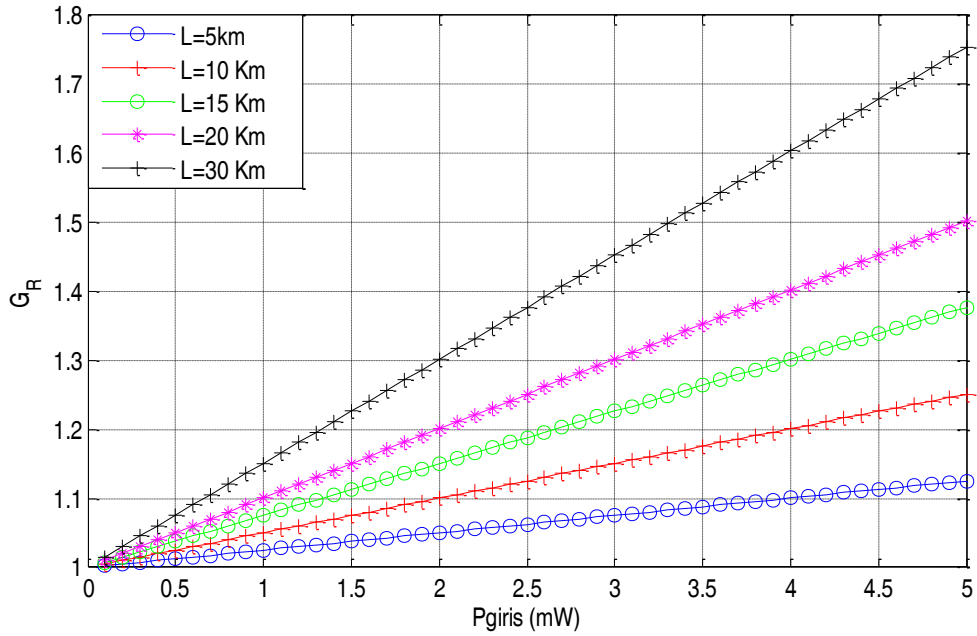
Farklı kanal uzunluklarına ve $P_{giriş} = 0.1$ mW eşit kanal giriş g6lerine sahip 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerinin merkez aşağı y6nl6 kanallarındaki G_R değerleri izelge 4.13 ve 4.14'te g6sterilmiştir.



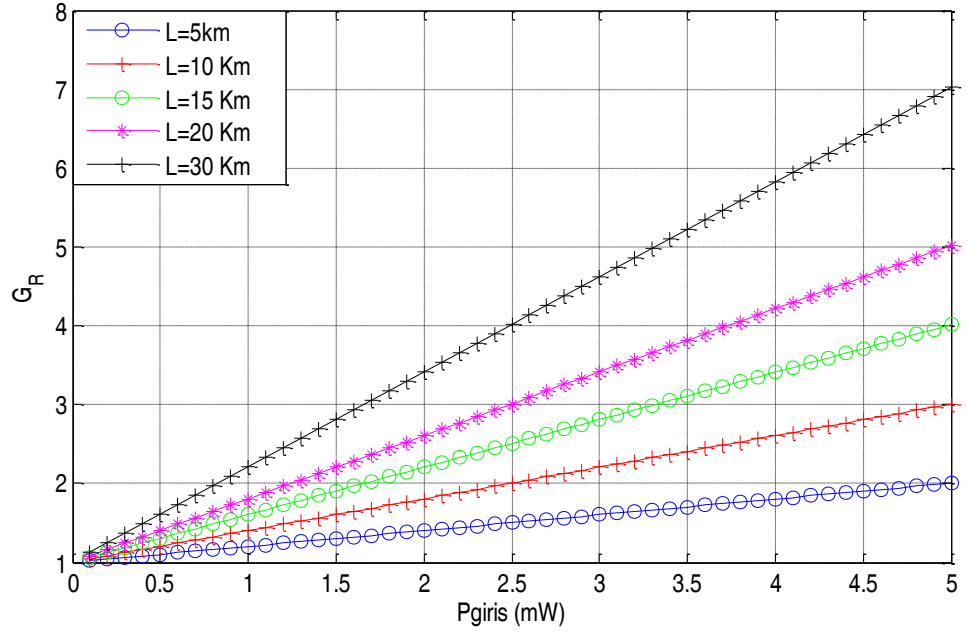
Şekil 4.31. 1.5625 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı y6nl6 kanallarındaki G_R - $P_{giriş}$ değişimleri



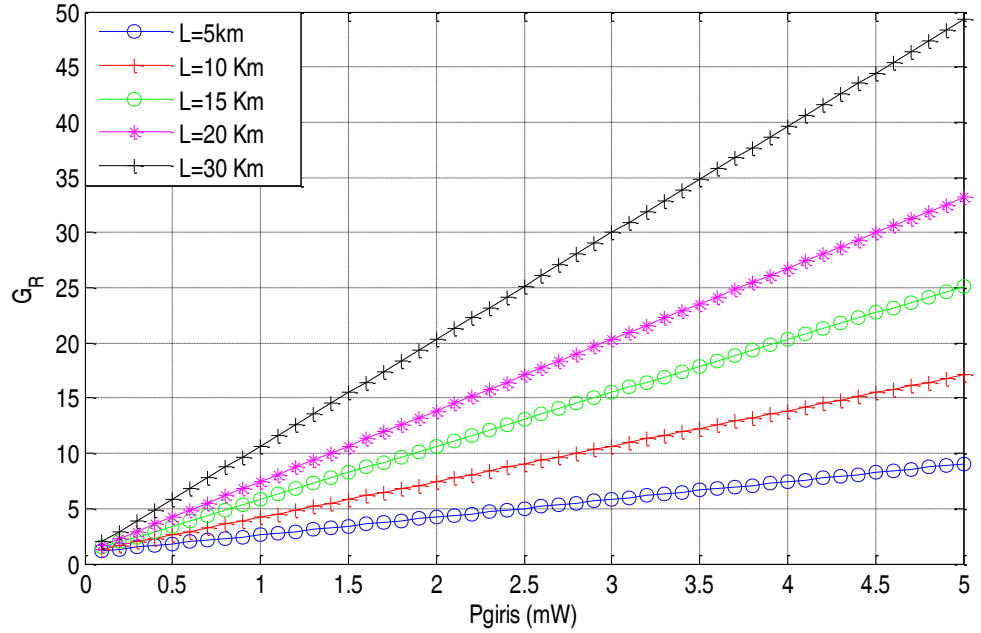
Şekil 4.32. 3.125 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



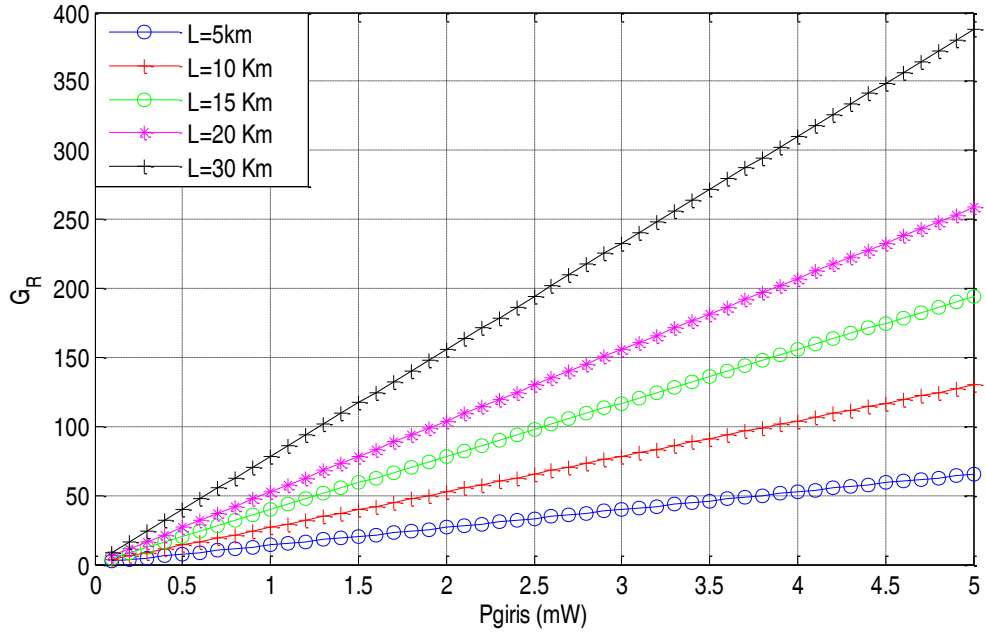
Şekil 4.33. 6.25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



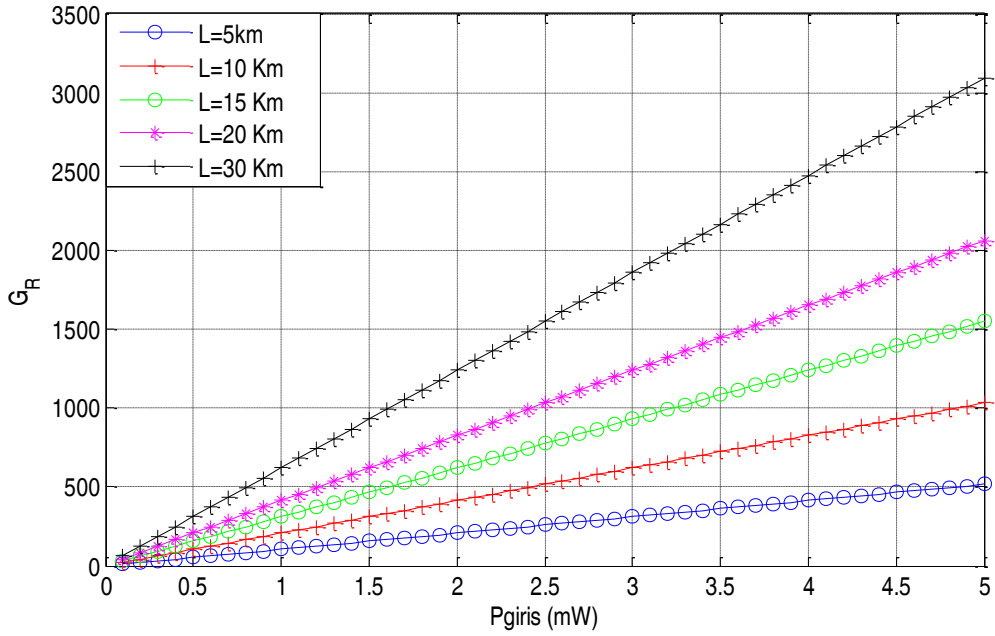
Şekil 4.34. 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



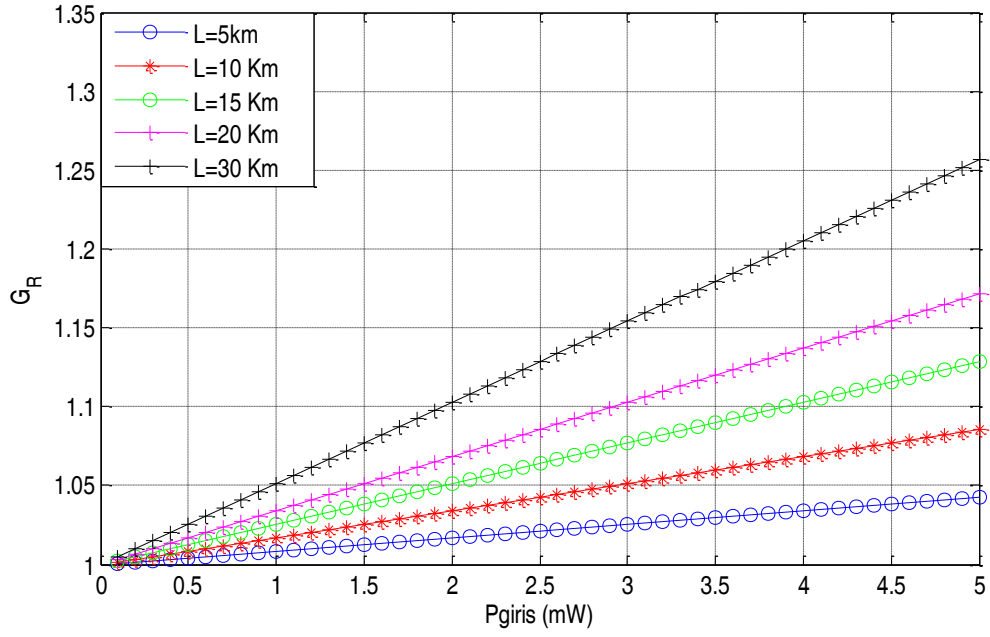
Şekil 4.35. 25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



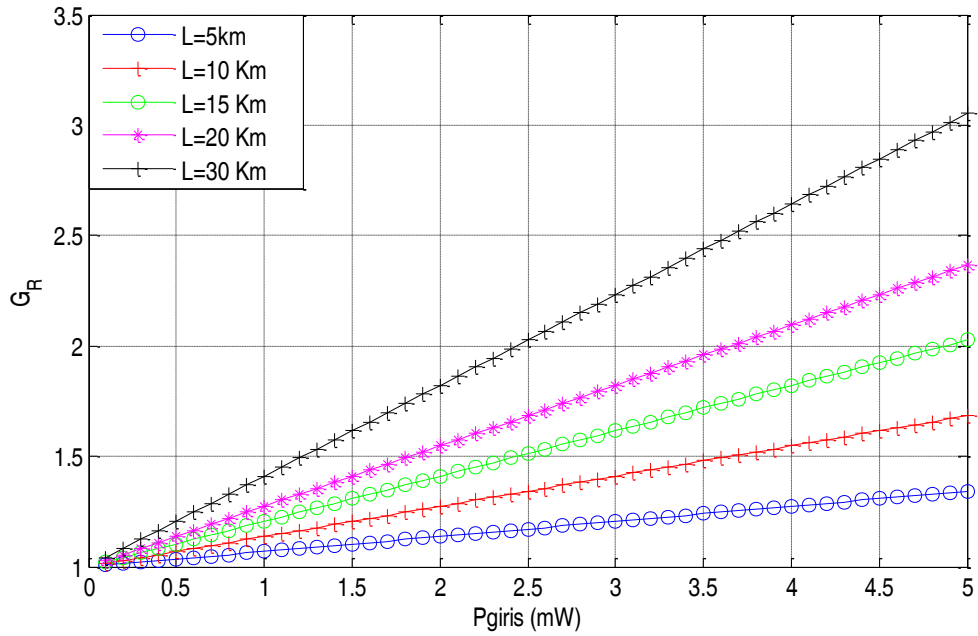
Şekil 4.36. 50 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



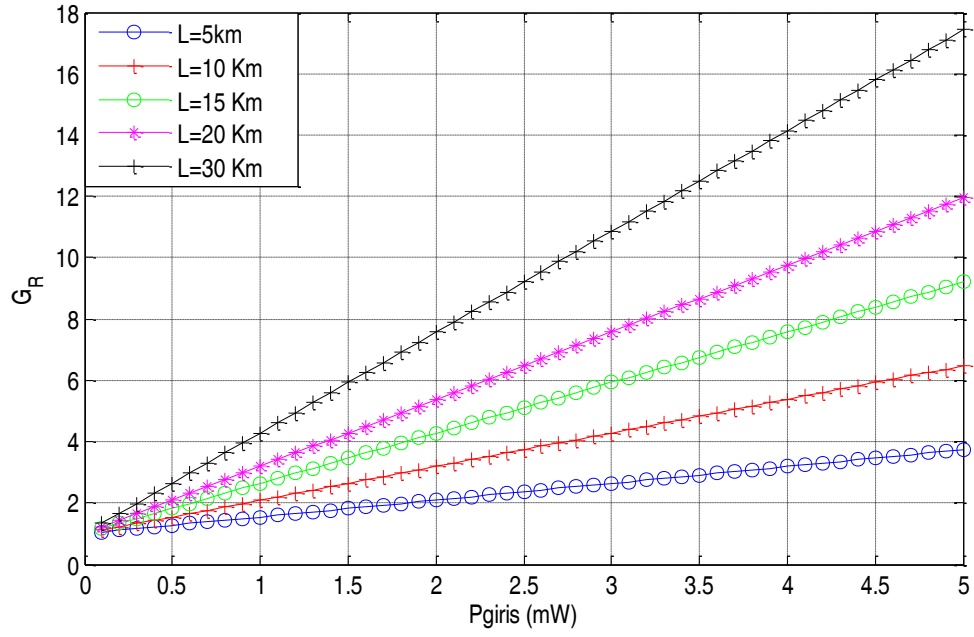
Şekil 4.37. 100 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 7-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



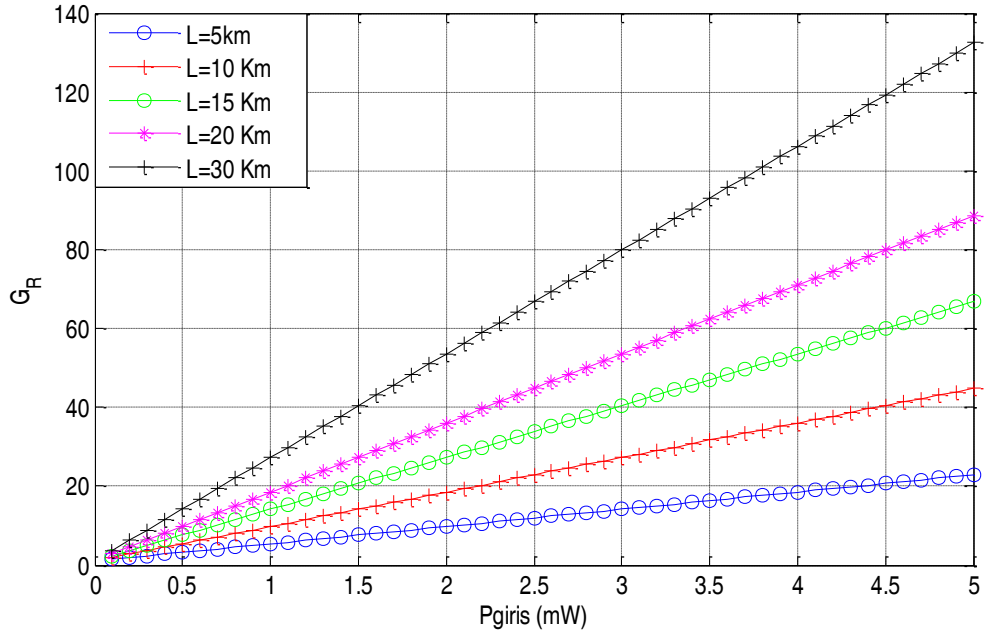
Şekil 4.38. 1.5625 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



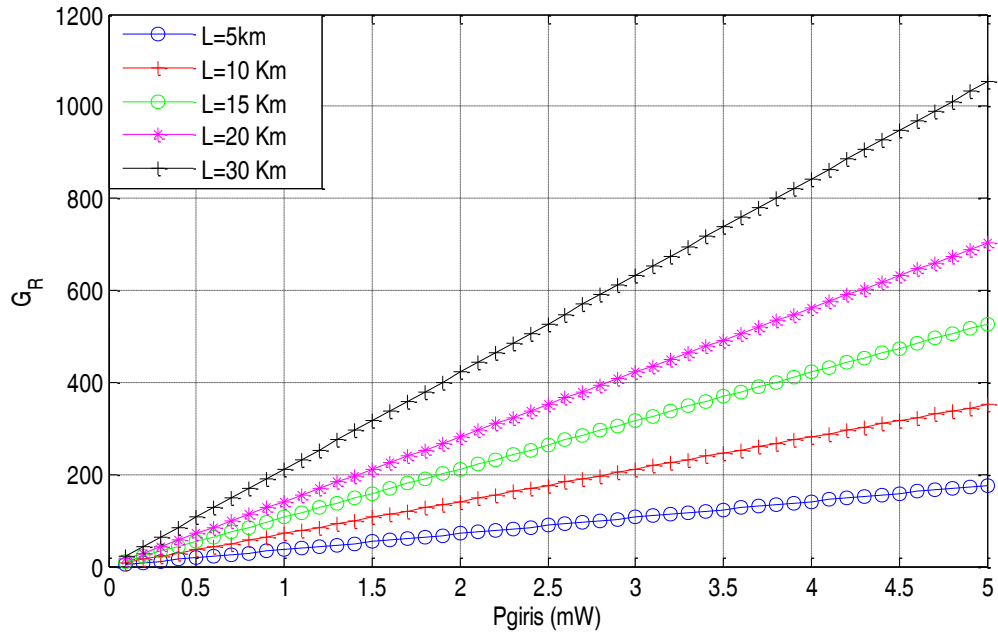
Şekil 4.39. 3.125 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



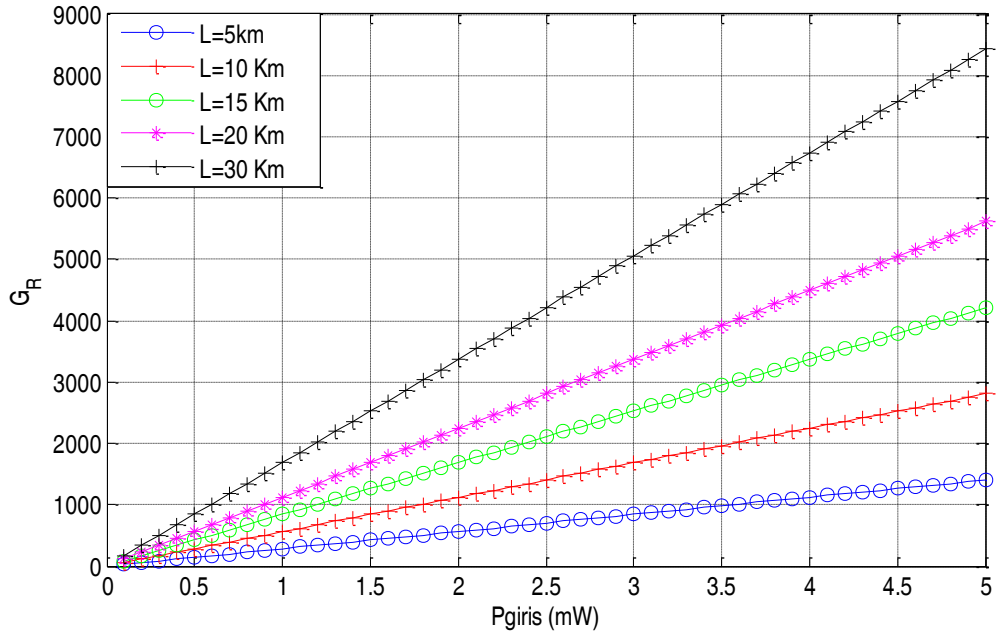
Şekil 4.40. 6.25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



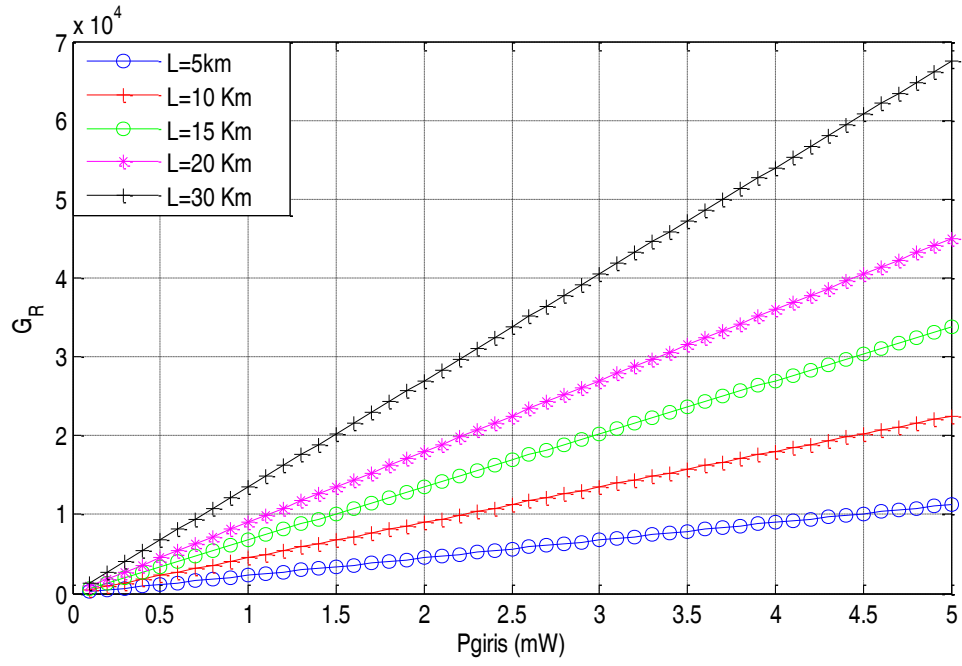
Şekil 4.41. 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



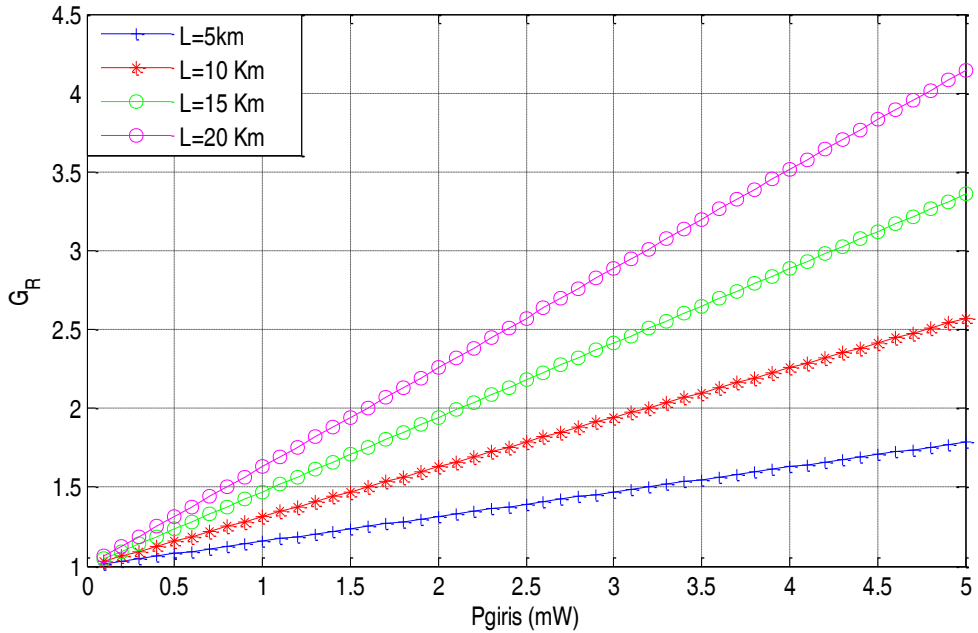
Şekil 4.42. 25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



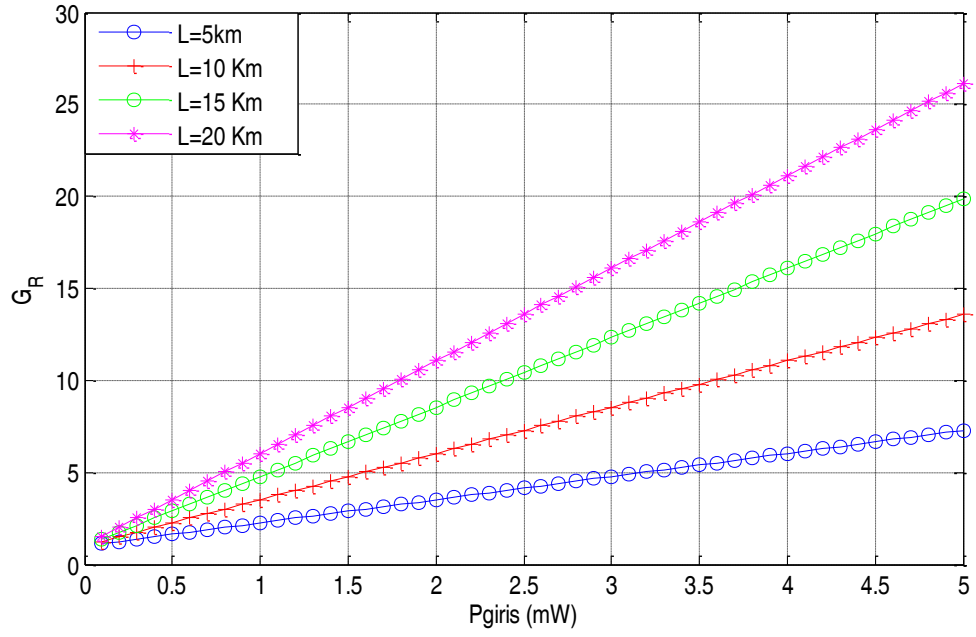
Şekil 4.43. 50 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



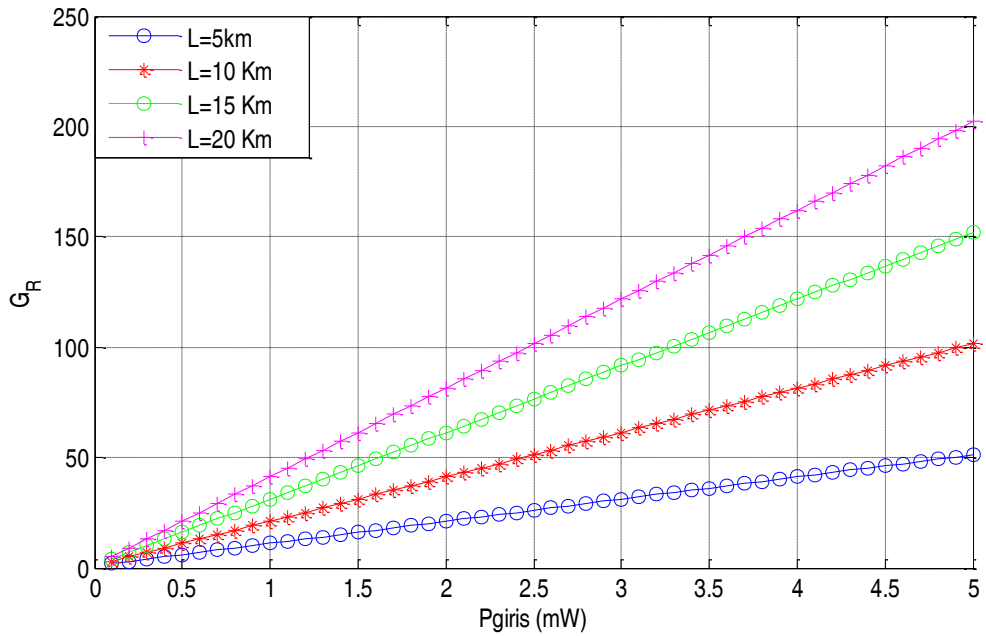
Şekil 4.44. 100 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 15-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



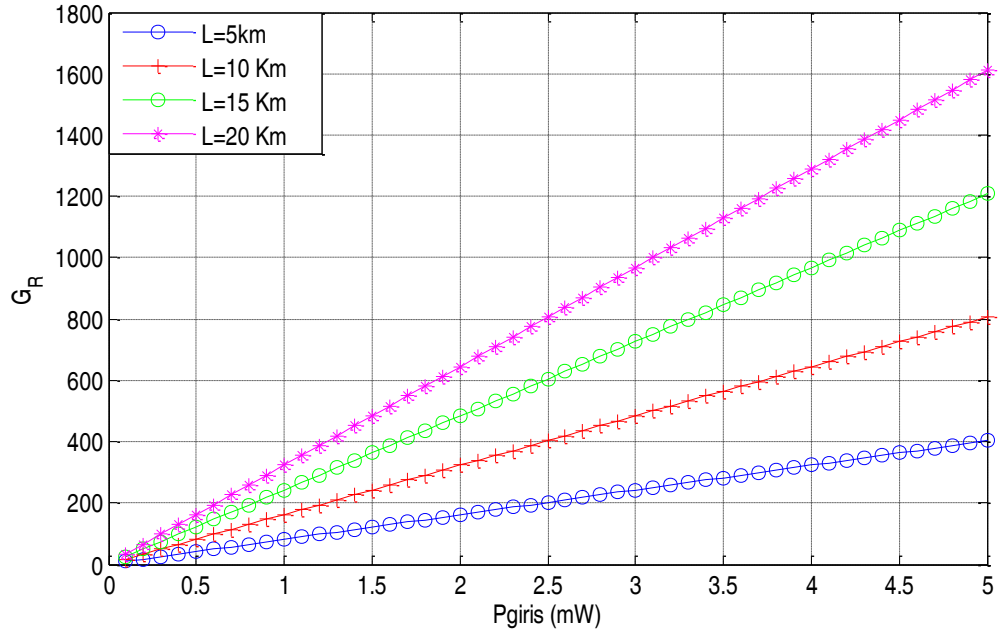
Şekil 4.45. 1.5625 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



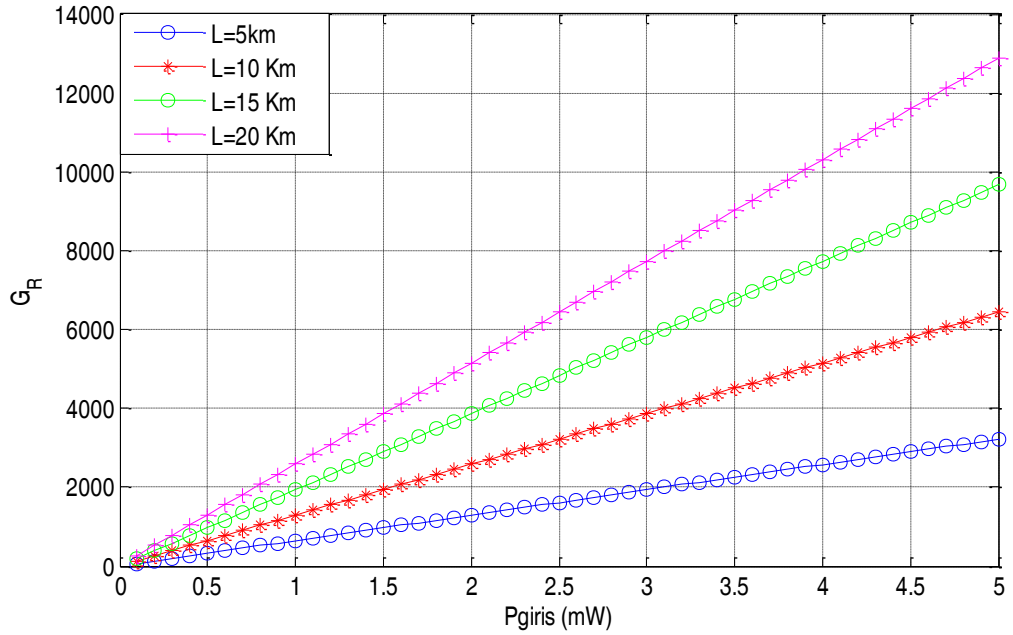
Şekil 4.46. 3.125 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



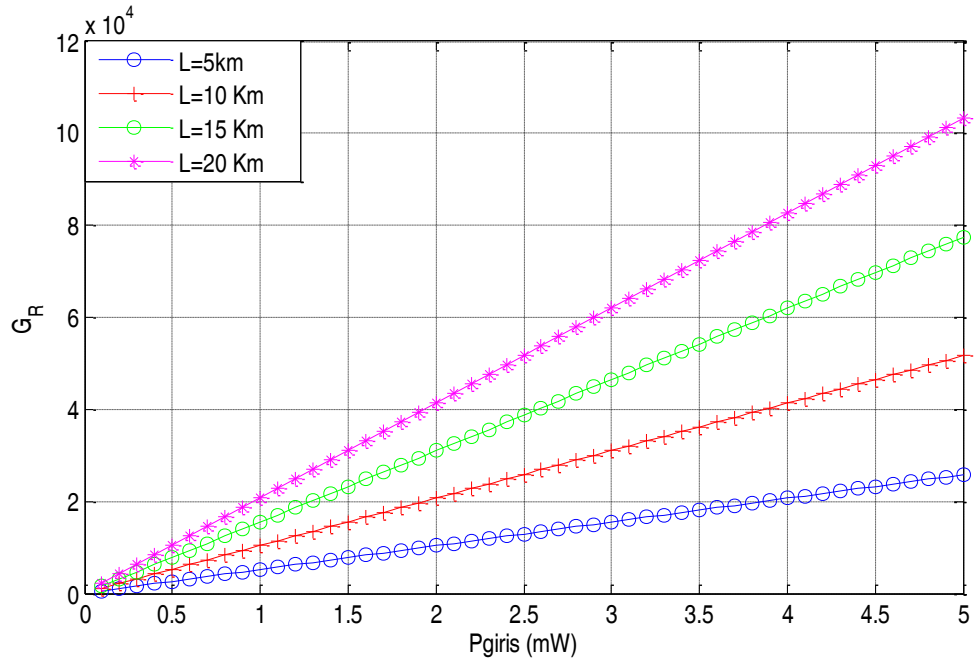
Şekil 4.47. 6.25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



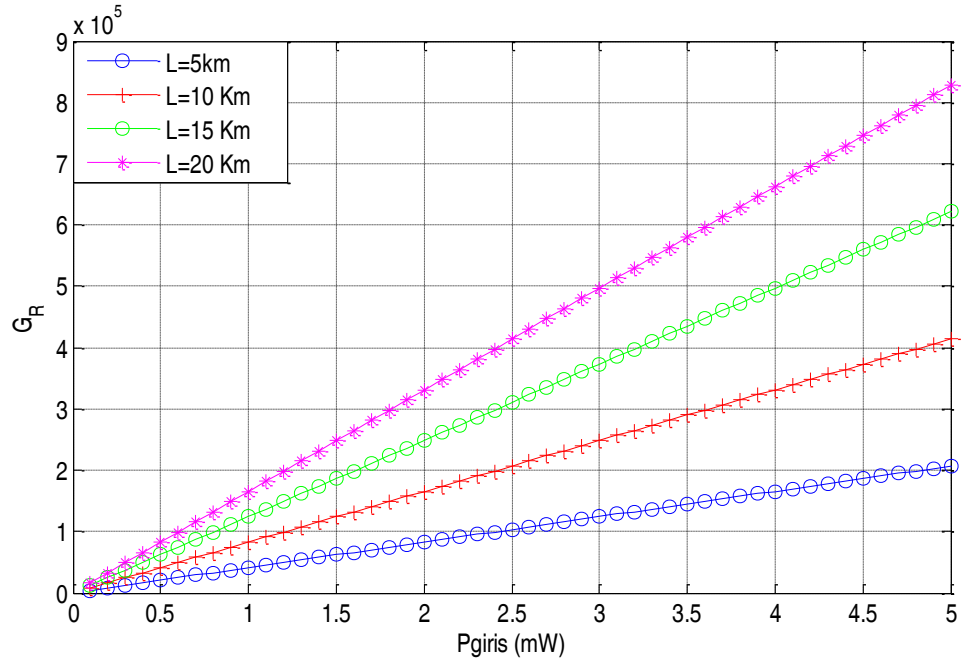
Şekil 4.48. 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



Şekil 4.49. 25 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



Şekil 4.50. 50 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri



Şekil 4.51. 100 GHz kanallar arası boşluk değerine ve farklı kanal uzunluklarına sahip 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R - P_{giris} değişimleri

Çizelge 4.13. $P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarına sahip 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	UDWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	1.5625	3.125	6.25
5	7-kanallı	G_R değerleri	1.00	1.00	1.00
	15-kanallı		1.00	1.01	1.06
	31-kanallı		1.02	1.13	2.01
10	7-kanallı		1.00	1.00	10.01
	15-kanallı		1.00	1.01	1.11
	31-kanallı		1.03	1.25	3.01
15	7-kanallı		1.00	1.00	1.01
	15-kanallı		1.00	1.02	1.16
	31-kanallı		1.05	1.38	4.02
20	7-kanallı		1.00	1.00	1.01
	15-kanallı		1.00	1.03	1.22
	31-kanallı		1.06	1.50	5.03
30	7-kanallı		1.00	1.00	1.02
	15-kanallı		1.01	1.04	1.33
	31-kanallı		-	-	-

Şekil 4.31-4.51'de, Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü, yani Raman kazancı değerinin (G_R), 0.1-5 mW aralığındaki kanal giriş gücü değişkeni ile yaklaşık olarak lineer bir değişim sergilediği gözlenmektedir. Ayrıca, G_R , Çizelge 4.13-4.14'te görüldüğü gibi artan fiber uzunlukları, kanallar arası boşluk değerleri ve kanal sayıları ile artmaktadır.

Çizelge 4.14. $P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarına sahip 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki G_R değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	DWDM-GPON Sistemleri	Δf (GHz)	12.25	25	50	100
5	7-kanallı	G_R değerleri	1.02	1.16	2.29	11.31
	15-kanallı		1.44	4.51	29.08	225.90
	31-kanallı		9.05	65.47	517.50	4146.00
10	7-kanallı		1.04	1.32	3.58	21.63
	15-kanallı		1.88	8.02	57.16	450.90
	31-kanallı		17.11	129.90	1034.00	8292.00
15	7-kanallı		1.06	1.48	4.87	31.94
	15-kanallı		2.32	11.52	85.24	675.90
	31-kanallı		25.16	194.40	1551.00	$1.24 \cdot 10^4$
20	7-kanallı		1.08	1.64	6.15	42.26
	15-kanallı		2.75	15.03	113.30	900.90
	31-kanallı		33.21	258.90	2067.00	$1.66 \cdot 10^4$
30	7-kanallı	1.12	1.97	8.73	62.88	
	15-kanallı	3.63	22.04	169.50	1351.00	
	31-kanallı	-	-	-	-	

5. SONUÇ

Bu tezde, yapılan sistem performans analizleri ile FWM yalın etkisi altındaki ve SRS ve FWM birleşik etkisi altındaki aşırı yoğun/yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı gigabit pasif optik ağ (UDWDM/DWDM-GPON) sistemlerde SXR'ın değişik kanal giriş güçleri ($P_{giriş}$), kanallar arası boşluk değerleri (Δf) ve kanal uzunlukları (L) ile değişimleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü yani Raman kazancının (G_R) değişen kanal giriş güçleri ile değişimleri de araştırılmıştır.

7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM/DWDM-GPON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanalları üzerinde gerçekleştirilen işaret-çapraz karışım oranı (SXR) benzetimleri yardımıyla, uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve dört dalga karışımının (FWM), UDWDM/DWDM-GPON aşağı yönlü kanal performansları üzerindeki birleşik etkisi, FWM'nin yalın etkisi ile karşılaştırılmıştır.

SXR ile giriş gücü değişimleri benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, FWM'nin yalın etkisi altındaki durum için şunları göstermektedir:

1.5625 GHz-6.25 GHz kanallar arası boşluk değerleri için, giriş güçleri ilgili sistem için benzetimlerde tespit edilen değerleri aştığında, tüm 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur.

12.5 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 1 mW'ı aşan kanal giriş güçleri için tüm 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur. 25 GHz kanallar arası boşluk değeri için, 5 mW'a yaklaşan kanal giriş güçlerinde sadece 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur.

50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerleri için, 0.1-5 mW aralığındaki kanal giriş güçlerinde tüm 7-, 15- ve 31-kanallı DWDM-GPON sistemlerin 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcut değildir.

SXR ile giriş gücü değişimleri benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki durum için şunları göstermektedir:

Benzetimlerde tespit edilen maksimum kanal giriş güçleri aşıldığında, tüm 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerinde 23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali mevcuttur.

23 dB'nin altında bir SXR değerine sahip olma ihtimali, 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerini kullanan ve 2 mW'a yaklaşan kanal giriş güçlerine sahip olan sadece 7-kanallı DWDM-GPON sistemleri için meydana gelmektedir. Kanal giriş gücü değeri 0.1-5 mW aralığını aşmadıkça 7-, 15- ve 31- kanallı DWDM-GPON sistemleri için böyle bir ihtimal mevcut değildir.

SXR ile kanallar arası boşluk değerleri değişimleri benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, FWM yalın etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin SXR değerleri üzerinde kanal sayılarının kanallar arası boşluk değerlerinden daha belirgin etkilere sahip olduğunu vurgularken SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki 7-, 15- ve 31-kanallı UDWDM-GPON sistemlerin SXR değerleri üzerinde kanallar arası boşluk değerlerinin kanal sayılarına göre biraz daha etkili olduğunu göstermektedir.

Örneğin, sabit kanal sayılarında, 6.25 GHz'deki SXR değerleri 1.5625 GHz'deki değerlerden FWM yalın etkisi altında 0.68-8.21 dB daha büyük iken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında 0.71-14.03 dB daha büyüktür. Ancak, sabit kanallar arası boşluk değerlerinde, 7-kanallı ve 31-kanallı sistemler arasındaki SXR değişimi FWM yalın etkisi altında 6.34-13.87 dB iken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında 0.35-13.67 dB aralığındadır.

Ancak 7-, 15- ve 31- kanallı DWDM-GPON sistemleri için, hem FWM yalın etkisi hem de SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında, kanallar arası boşluk değerlerinin SXR üzerinde kanal sayılarından daha önemli etkilere sahip olduğu açıktır.

Örneğin, sabit kanal sayılarında, 100 GHz'de SXR değerleri 12.5 GHz'teki değerlerden FWM yalın etkisi altında 36.09-36.14 dB daha büyük iken, SRS ve FWM'nin birleşik

etkisi altında 50.90-62.98 dB daha büyüktür. Ancak, sabit kanallar arası boşluk değerlerinde, 7-kanallı ve 31-kanallı sistemler arasındaki SXR değişimi FWM yalın etkisi altında 1.74-1.79 dB iken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında 11.99-24.07 dB aralığındadır.

SXR ile kanal uzunluğu değerleri değişimlerinin benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, hem FWM'nin yalın etkisi altında hem de SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında, 7-, 15-, 31- kanallı UDWDM-PON sistemlerin merkez aşağı yönlü kanallarındaki SXR değerlerinin kanal uzunluğundaki artış ile ekponansiyel bir şekilde azaldığını göstermektedir.

50 GHz ve 100 GHz gibi yüksek kanallar arası boşluk değerlerine sahip DWDM-GPON sistemlerinde, SXR değişimi, 0.5 km'lik çok kısa kanal uzunluğu değişimlerinde güçlü bir osilasyon davranışı sergilemektedir. Bu kanallar arası boşluk değerlerinde, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi, SXR değişimindeki maksimum osilasyon genliğini FWM'nin yalın etkisine göre genellikle daha da arttırmaktadır.

Örneğin, 50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde, FWM'nin yalın etkisi altında 7-kanallı DWDM-GPON sistemleri için SXR değişimindeki maksimum osilasyon genliği sırasıyla 8.86 dB ve 8.66 dB iken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında, sırasıyla 8.69 dB ve 10.24 dB'dir. İlgili değerler, 15-kanallı DWDM-GPON sistemleri için, FWM'nin yalın etkisi altında 50 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde sırasıyla 7.75 dB ve 5.43 dB iken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisi altında her iki kanallar arası boşluk değerinde 7.98 dB'dir. 31-kanallı DWDM-GPON sistemleri için 50 GHz ve 100 GHz kanallar boşluk değerlerinde, FWM'nin yalın etkisi altında sırasıyla 5.54 dB ve 4.41 dB iken, SRS ve FWM'nin birleşik etkisini altında 5.72 dB ve 7.00 dB'dir.

Benzetimlerden elde edilen sonuçlar, SRS'nin FWM'nin negatif etkilerini kompanze ettiğini ve kompanzasyon belirginliğinin artan kanal sayıları ve kanallar arası boşluk değerleri ile arttığını göstermektedir.

Stokes dalgasının kuvvetlendirme faktörü (G_R) ile kanal giriş gücü değişimleri benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, 0.1-5 mW aralığında, Raman kazancının kanal giriş güçleri ile yaklaşık olarak doğrusal değişim sergilediğini göstermektedir. Raman kazancı artan fiber uzunlukları, kanallar arası boşluk değerleri ve kanal sayıları ile artmaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları, UDWDM/DWDM-GPON sistemler üzerindeki SRS ve FWM'nin birleşik etkisi ile FWM yalın etkisi arasındaki farkları vurgulamakta ve mevcut/gelecekteki UDWDM/DWDM-GPON uygulamaları için önemli fikirler vermektedir.



KAYNAKLAR

- Agrawal, G.P. 2002.** Fiber Optic Communication Systems. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Ansari, N. Zhang J. 2013.** Media Access Control and Resource Allocation: For Next Generation Passive Optical Network. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology.
- Bogoni, A., Poti L. 2004.** Effective channel allocation to reduce inband FWM crosstalk in DWDM transmission systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 10(2): 387-392.
- Gloge, D., Albanese A., Burrus, C.A, Chinnock, E.L., Copeland, J.A., Dentai, A.G., Lee, T.P., Li, T., Ogawa, K. 1980.** High-speed digital lightwave communication using LEDs and PIN photodiodes at 1.3 μm . *The Bell System Technical Journal*, 59(8): 1365-1382.
- Gnauck, A., Kasper, B., Linke, R., Dawson, R., Koch, T., Bridges, T., Burkhardt, E., Yen, R., Wilt, D., Campbell, J., Nelson, K., Cohen, L. 1985.** 4-Gbit/s transmission over 103 km of optical fiber using a novel electronic multiplexer/demultiplexer. *Journal of Lightwave Technology* , 3(5): 1032-1035.
- Harboe, P.B., da Silva, E., R.Souza, J. 2008.** Analysis of FWM penalties in DWDM systems based on G.652, G.653 and G.655 optical fibers . *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2(12): 2674-2680.
- ITU-T Recommendation, G.984.1. 2008.** Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
- ITU-T Recommendation, G.984.2. 2003.** Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
- ITU-T Recommendation, G.984.3. 2014.** Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence layer specification. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
- ITU-T Recommendation, G.984.4. 2008.** Gigabit-capable passive optical networks (GPON): ONT management and control interface specification. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
- ITU-T Recommendation, G.984.5. 2014.** Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band . International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
- Karlık, S.E. 2016a.** Analysis of the four-wave mixing impact in the most heavily affected channels of dense and ultra-dense wavelength division multiplexing systems using non-zero dispersion shifted fibers. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127(19):7469-7486.
- 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):171-187.
- Kaur, G., Singh, M.L. 2007.** Optimization of interchannel separation in WDM transmission systems in the presence of fiber nonlinearities., *IEEE*, International Conference on Wireless and Optical Communications Networks WOCN'07, Singapore.

- Kaur, G., Singh, M.L. 2009.** Effect of four-wave mixing in WDM optical fiber systems. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 120(6): 268-273.
- Kaur, G., Singh, M.L., Patterh, M.S. 2010.** Impact of fibre nonlinearities in optical DWDM transmission systems at different data rates. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 121(23): 2166-2171.
- 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.
- Kaur, H., Singh, G., Kaur, J. 2015.** Analysis of Stimulated Raman Scattering Effect in WDM System. *International Journal of Advance Electrical and Electronics Engineering (IJAEED)*, 4(3): 28-33.
- Kikuchi, N., Sekine, k., Sasaki, S. 1997.** Analysis of cross-phase modulation (XPM) effect on WDM transmission performance. *IET*, 33(8): 653-654.
- Kumari, P., Tiwari, A. 2015.** Stimulated Raman scattering analysis of wavelength division multiplexing (WDM) channels in optical fiber. *International Journal of Advanced Research in Copmputer and Communication Engineering (IJARCCE)*, 4(4): 195-197.
- Lee, C., V.Sorin, W., Kim, B.Y. 2006.** Fiber to the Home Using a PON Infrastructure. *Journal Of Lightwave Technology*, 24(12): 4568 - 4583.
- Maeda, M.W., Sessa, W.B., Way, W.I., Yi-Yan, A., Curtis, L., Spicer, R., Laming, R.I. 1990.** The effect of four-wave mixing in fibers on optical frequency-division multiplexed systems. *Journal of Lighthwave Technology*, 8(9): 1402-1408.
- Nakajima, K., Ohashi, M., Miyajima, Y., Shiraki, K. 1997.** Assessment of dispersion varying fibre in WDM systems. *Electronics Letters*, 33(12): 1059-1060.
- Qiu, K., Yi, X., Zhang, J., Zhang, H., Deng, M., Zhang, C. 2011.** OFDM-PON Optical Fiber Access Technologies. *IEEE, Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 2011. ACP. Asia, Shanghai, China.
- Sabapathi, T., Sundaravadivelu, S. 2011.** Analysis of bottlenecks in DWDM fiber optic communication system. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 122(16): 1453-1457.
- Saleh, A.Y.S., Karlık, S.E. 2018.** Four-wave mixing impacts on the uplink performance of dense wavelength division multiplexing gigabit passive optical networks. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(1): 189-204.
- Schneider, T. 2004.** Nonlinear Optics in Telecommunications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- 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): 29-37.
- Singh, S.P., Iyer, S. 2010.** Effect of SRS and FWM on Performance of Optical Star WDM Networks: A deterministic Approach. *IEEE, Wireless And Optical Communications Networks (WOCN)*, 2010 Seventh Conference On. Colombo, Sri Lanka.
- Singh S.P., Kar, S., Jain, K. 2004.** Novel Strategies for Reducing FWM Using Modified Repeated Unequally Spaced Channel Allocation. *Fiber and Integrated Optics*, 23(6): 415-437.
- Singh, S.P., Singh, S. 2007.** Nonlinear effects in optical fibers: origin, managemet and applications. *Progress In Electromagnetics Research (PIER)*, 73: 249-275.

Thomas, G.A., Shraiman, B.I., F.Glodis, P.F., J.Stephen, M. (2000). Towards the clarity limit in optical fibre. *Nature*, 404, 262-264.

Tithi, F.H., Islam, M.S., Tanna, M.T.A. 2014. Overview of stimulated Brillouin scattering effect and various types of method to eliminate this effect. *International Journal of Computer Applications (IJCA)*, 92(7): 23-26.

Yamada, J.I., Machida, S., Kimura, T. 1981. 2 Gbit/s optical transmission experiments at 1.3 μm with 44 km single-mode fibre. *IET*, 17(13): 479-480.

Zengerle, R. 2005. Modeling of nonlinear phenomena in optical multichannel transmission system. *MSc. Thesis*, University of Kaiserslautern.



ÖZGEÇMİŞ

- Adı Soyadı : Faisal Ibrahim Mohamed IBRAHIM
Doğum Yeri ve Tarihi : SUDAN, 01.01.1985
Yabancı Dili : İngilizce ve Arapça
- Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)
Lise : Basheir Mohamed Saeid Lisesi (1999-2002)
Lisans : AL-Neelain Üniversitesi (2002-2007)
Fen ve Teknoloji Fakültesi, Elektronik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans : BURSA Uludağ Üniversitesi (2014-)
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- Çalıştığı Kurum : Sudan Meteoroloji Kurum, Mühendislik bölümü (2010-)
AL-Neelain Üniversitesi (2008-2009)
- İletişim : faisaltabaldi@gmail.com
- Yayınlar : Ibrahim, F.I.M., Karlık, S.E. 2018. The Combined Impact Of SRS and FWM Phenomena on the Downlink Channel Performance of DWDM-GPON Systems. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 23(2): 67-86