



**T.C.**  
**Uludağ Üniversitesi**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**DALGABOYU BÖLMELİ ÇOĞULLAMA YÖNTEMİNİN  
KULLANILDIĞI PASİF OPTİK AĞLARDA  
DÖRT DALGA KARIŞIMI OLAYININ  
ETKİLERİNİN ANALİZİ**

**Abbas Yuldurum SALEH**

**Yüksek Lisans Tezi**



**DALGABOYU BÖLMELİ ÇOĞULLAMA YÖNTEMİNİN  
KULLANILDIĞI PASİF OPTİK AĞLARDA  
DÖRT DALGA KARIŞIMI OLAYININ  
ETKİLERİNİN ANALİZİ**

**Abbas Yuldurum SALEH**



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DALGABOYU BÖLMELİ ÇOĞULLAMA YÖNTEMİNİN KULLANILDIĞI  
PASİF OPTİK AĞLARDA DÖRT DALGA KARIŞIMI OLAYININ  
ETKİLERİNİN ANALİZİ**

**Abbas Yuldurum SALEH**

Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2016

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Abbas Yuldurum SALEH tarafından hazırlanan “Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama Yönteminin Kullanıldığı Pasif Optik Ağlarda Dört Dalga Karışımı Olayının Etkilerinin Analizi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

**Başkan:** Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

**Üye:** Prof. Dr. Güneş YILMAZ

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Bahadır HIÇDURMAZ

**Üye:**

**Üye:**

İmza

İmza

İmza

İmza

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü

30.09.2016

**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.**

06/09/2016

**Abbas Yuldurum SALEH**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DALGABOYU BÖLMELİ ÇOĞULLAMA YÖNTEMİNİN KULLANILDIĞI PASİF OPTİK AĞLARDA DÖRT DALGA KARIŞIMI OLAYININ ETKİLERİNİN ANALİZİ

**Abbas Yuldurum SALEH**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

Günümüzde, telekomünikasyon altyapılarında internetin büyük önem arz ettiği görülmektedir. İnternet kullanımında artan kullanıcı ve bantgenişliği ihtiyaçları, uzak mesafe ve erişim ağlarında verinin hızlı ve hatasız olarak taşınabilmesi gerekliliğini gündeme getirmiştir. Optik ağlar, bu imkanı sağlayan önemli bir seçenektir. Bu tez kapsamında, uç kullanıcılar için önemi gittikçe artan optik erişim ağları incelenmiştir. Erişim ağlarında, kullanıcı sayısındaki artışın yanısıra yüksek bant genişliği gerektiren kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayacak yapı olarak dalgaboyu bölmeli çoğullama-pasif optik ağ (WDM-PON) sistemleri öngörülmektedir. Bu tezde, yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama/aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama-pasif optik ağ (DWDM/UDWDM-PON) sistemleri ele alınarak bu sistemlerin donanımları ve ağ yapısı açıklanmış, dört dalga karışımı (FWM) etkisi altındaki performansları benzetimler yardımıyla analiz edilmiştir. Benzetimlerde, FWM etkisi işaret-çaprazkarışım oranı (SXR) parametresi dikkate alınarak gözlemlenmiştir. Analizlerde, FWM etkisi altındaki DWDM/UDWDM-PON sistemlerde SXR'in kanal giriş güçleri, kanallar arası boşluk değerleri ve kanal uzunlukları ile değişimi değerlendirilmiştir.

Elde edilen benzetim sonuçları, FWM etkisi altındaki DWDM/UDWDM-PON sistemlerde minimum 23 dB SXR değeri sağlanacak şekilde iletimin gerçekleştirilebilmesi için değişik kanal sayılarına sahip uygulamalarda kullanılacak kanal giriş güçleri, kanallarası boşluk değerleri ve kanal uzunlukları hakkında fikir vermesi açısından önemlidir. Ayrıca, benzetimlerde kullanılan G.652 optik fiber tasarım parametreleri, şu anda Bursadaki erişim ağlarında kullanılan bir optik fibere ait olduğundan, elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen/gerçekleştirilecek PON sistemler için de önemli bir referans değeri taşımaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** PON, GPON, FWM, DWDM, UDWDM, Optik Fiber.  
**2016, xiv + 80**

## ABSTRACT

MSc Thesis

### ANALYSIS OF EFFECT OF FOUR WAVE MIXING PHENOMENON IN PASSIVE OPTICAL NETWORKS USING WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING METHOD

**Abbas Yuldurum SALEH**

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electronics Engineering

**Supervisor:** Assist. Prof. Dr. Sait Eser KARLIK

Currently, internet has an important role in telecommunication infrastructures. Higher bandwidth requirements and increasing number of subscribers in internet usage have revealed rapid and error-free transmission of data in long-haul and access networks. Optical networks are important choices in providing those requirements. In this thesis, optical access networks having gradually increasing importance for end users are analyzed. Wavelength division multiplexing passive optical networks (WDM-PON) are being predicted as systems meeting increasing number of subscribers as well as high bandwidth requirements in the near future for access networks. In this thesis, dense/ultra dense wavelength division multiplexing passive optical network (DWDM/UDWDM) systems have been dealt with, the hardware and architecture of those systems have been described and their performance under the effect of four wave mixing (FWM) have been analyzed with simulations. In simulations, FWM effect has been observed via focusing on signal-to-crosstalk ratio (SXR) parameter. In analyses, variations of SXR with varying channel input powers, channel spacing values and channel lengths in DWDM/UDWDM-PON systems under the effect of FWM have been evaluated.

Simulation results obtained are important in the aspect of giving important clues for channel input powers, channel spacing values and channel lengths that can be selected in applications performed with various number of channels where a minimum 23 dB SXR value is provided in transmission for DWDM/UDWDM-PON systems under the effect of FWM. Furthermore, since design parameters of the G.652 optical fiber used in simulations belong to an optical fiber that is already in usage of access networks in Bursa, results obtained have an important reference value for PON systems that have been or are going to be implemented.

**Key Words:** PON, GPON, FWM, DWDM, UDWDM, Optical Fiber.  
**2016, xiv + 80**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında sahip olduğu bilgi birikimiyle, bilimsel eleştiri ve yönlendirmeleriyle en büyük katkıyı sağlayan değerli hocam Sayın **Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK**'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen bana hep destek olan annem **Gülser Rafik SALEH** ve babam **Yıldırım SALEH**'a ve ailemin tüm fertlerine teşekkür ederim.

**AbbasYuldurum SALEH**

.././....



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL BİLGİLER</b> .....	3
2.1. Erişim Ağlarının Gelişimi.....	3
2.1.1. Optik Fiber Ağları ve Teknolojisi.....	4
2.1.2. Optik Fiber Kabloların Yapısı.....	5
2.1.3. Optik Fiber Kabloların Tipleri.....	6
2.1.4. Optik Fiber İletişim Sistemini Etkileyen Parametreler.....	13
2.2. Optik Erişim Ağ Çeşitleri.....	14
2.2.1. Noktadan Noktaya Bağlantılı Ağlar.....	15
2.2.2. Aktif Yıldız Bağlantılı Ağlar.....	16
2.2.3. Pasif Yıldız Bağlantılı Ağlar (PON).....	18
2.2.4. Optik Erişim Ağ Çeşitlerinin Karşılaştırılması.....	20
2.2.5. FTTX Uygulamaları.....	22
2.3. Optik Erişim Ağlarında Çoklu Erişim Yöntemleri.....	23
2.3.1. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim Yöntemi.....	24
2.3.2. Dalgaboyu Bölmeli Çoklu Erişim Yöntemi.....	25
2.3.3. Alt Taşıyıcı Çoklu Erişim Yöntemi.....	26
2.3.4. Optik Kod Bölmeli Çoklu Erişim Yöntemi.....	27
2.4. PON Standartları ve Tarihi Gelişimi.....	28
2.4.1. APON ve BPON.....	28
2.4.2. EPON – GEPON – 10G EPON.....	29
2.4.3. GPON Standartı.....	31
2.4.4. NGPON.....	32

2.5. Gelişmiş ve Yeni Nesil PON Çalışmaları.....	33
2.5.1. PLANET Super PON.....	34
2.5.2. PIEMAN Mimarisi.....	34
2.6. Pasif Optik Ağ Sistem Tasarımı.....	36
2.6.1. OLT ve ONU/ONT.....	36
2.6.2. Optik Bölücüler.....	39
2.7. Optik Fiberde Doğrusal Olmayan Etkiler ve Pasif Optik Ağlarda Dört Dalga Karışımı Olayı.....	40
2.7.1. Optik Fiberde Doğrusal Olmayan Etkiler.....	40
2.7.1.1. Öz Faz Modülasyonu (SPM).....	41
2.7.1.2. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM).....	41
2.7.1.3. Dört Dalga Karışımı Olayı (FWM).....	41
2.7.1.4. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS).....	44
2.7.1.5. Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS).....	44
2.7.2. FWM Olayının WDM-PON Sistemlerdeki Etkisi.....	45
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>47</b>
3.1. Benzetim Modeli.....	47
3.2. SXR- $P_{giriş}$ Benzetim Koşulları.....	51
3.3. SXR- $\Delta f$ Benzetim Koşulları.....	51
3.4. SXR-Kanal Uzunluğunun Benzetim Koşulları.....	51
<b>4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....</b>	<b>53</b>
4.1. SXR- $P_{giriş}$ Benzetim Sonuçları.....	53
4.2. SXR- $\Delta f$ Benzetim Sonuçları.....	63
4.3. SXR-Kanal Uzunluğu Benzetim Sonuçları.....	65
<b>SONUÇ.....</b>	<b>74</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>76</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>79</b>

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$c$	Işık hızı
$d$	Fiberin çekirdek yarıçapı
dB	Desibel
$f_{ijk}$	FWM işaretinin frekansı
$P_{fwm}$	FWM işaretinin gücü
$d_{ijk}$	Dejenerasyon faktörü
$\gamma$	Doğrusalsızlık katsayısı
$\lambda$	Dalgaboyu
$\alpha$	Fiberin zayıflama katsayısı
L	Fiber uzunluğu
$\Delta B_{ijk}$	Faz uyumsuzluk faktörü
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line (Asimetrik Sayısal Abone Hattı)
AE	Active Ethernet (Aktif Ethernet)
AON	Active Optical Network (Aktif Optik Ağ)
APON	ATM Passive Optical Network (ATM Pasif Optik Erişim Ağı)
ATM	Asynchronous Transfer Mode (Asenkron İletim Modu)
BER	Bit Error Rate (Bit Hata Oranı)
BPON	Broadband Passive Optical Network (Geniş Bant Pasif Optik Erişim Ağı)
Cat 5	Category 5 UTP Copper Cable (Kategori 5 UTP Bakır Kablo)
Cat 6	Category 6 UTP Copper Cable (Kategori 6 UTP Bakır Kablo)
CATV	Community Access Television (Topluluk Erişim Televizyonu)
CDMA	Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
CO	Central Office (Merkez Ofis)
CWDM	Coarse Wavelength-Division Multiplexing (Kaba Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama)
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing (Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama)
ECS	Edge Collection Switch (Kenar Toplama Anahtarı)
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier (Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç)
EPON	Ethernet PON (Ethernet PON)
FCS	Fiber Collection Switch (Fiber Toplama Anahtarı)
FSAN	Full Service Access Network (Tam Hizmet Erişim Ağı)
FTP	File Transfer Protocol (Dosya Aktarım Protokolü)
FTTB	Fiber To The Building (Binaya Kadar Fiber)
FTTC	Fiber To The Curb (Kaldırıma Kadar Fiber)
FTTCab	Fiber To The Cabinet (Kabinete Kadar Fiber)
FTTH	Fiber To The Home (Eve Kadar Fiber)
FTTN	Fiber To The Node (Düğümüne Kadar Fiber)
FTTx	Fiber To The x (x'e Kadar Fiber)
FWM	Four Wave Mixing (Dört Dalga Karışımı Olayı)
GEM	Generic Encapsulation Method (Genel Kapsülleme Yöntemi)

GEPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network (Gigabit Ethernet PON)
GPON	Gigabit Passive Optical Network (Gigabit Pasif Optik Ağ)
IDSN	International Dalit Solidarity Network (Uluslararası Dalit Dayanışma Ağı)
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineering (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IP	Internet Protocol (İnternet Protokolü)
ISO	International Standards Organization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
IT	Information Technology (Bilşim Teknoloji)
ITU	International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
ITU-T	International Telecommunication Union-Telecommunication (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği Telekomünikasyon Standartlaştırma Birimi)
LAN	Local Area Network (Yerel Alan Ağı)
MAC	Medium Access Control (Ortam Erişim Yönetimi)
MDU	Multiple Dwelling Unit (Çoklu Konut Birimi)
MM	Multi Mode (Çok Modlu)
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access (Optik Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
OLT	Optical Line Termination (Optik Hat Sonlandırıcı)
ON	Optical Network (Optik Ağ)
ONU	Optical Network Unit (Optik Ağ Birimi)
P2MP	Point To Multipoint (Noktadan Çoklu Noktaya)
PON	Passive Optical Network (Pasif Optik Ağ)
SCMA	Subcarrier Multiple Access (Alt Taşıyıcılı Çoklu Erişim)
SM	Single Mode (Tek Mod)
SBS	Stimulated Brillouin Scattering (Uyarılmış Brillouin Saçılması)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SPM	Self Phase Modulation (Öz Faz Modülasyonu)
SRS	Stimulated Raman Scattering (Uyarılmış Raman Saçılması)
TDM	Time Division Multiplexing (Zaman Bölmeli Çoğullama)
TDMA	Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
TDM-PON	Time Division Multiplexing Passive Optical Network (Zaman Bölmeli Çoğullamalı Pasif Optik Ağ)
TPON	Telephone PON (Telefon PON)
UTP	Unshielded Twisted Pair (ekranlanmamış Bükümlü Kablo)
VDSL	Very High Bit Rate Digital Subscriber Line (Çok Yüksek Hızlı Sayısal Abone Hattı)
WAN	Wide Area Network (Geniş Alan Ağı)
WDM	Wavelength Division Multiplexing (Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama)
WDMA	Wavelength Division Multiple Access (Dalgaboyu Bölmeli Çoklu Erişim)
WDM-PON	Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network (Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı Pasif Optik Ağ)
XPM	Cross Phase Modulation (Çapraz Faz Modülasyonu)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Yıllara göre erişim ağlarında bantgenişliğinin ve veri iletim hızlarının gelişimi.....	4
Şekil 2.2. Optik fiber kablo yapısı.....	5
Şekil 2.3. Optik fiberde iletimi.....	6
Şekil 2.4. Çok kullanılan tek modlu fiber tipleri.....	7
Şekil 2.5. Tek modlu fiberlerde iletim.....	7
Şekil 2.6. Çok modlu fiber kabloda iletim.....	9
Şekil 2.7. Farklı Ethernet uygulamalarında çok modlu fiberlerin desteklediği mesafeler.....	11
Şekil 2.8. Dalgaboyuna bağlı optik fiber zayıflama grafiği.....	12
Şekil 2.9. Optik fiber iletişiminde dalgaboyuna göre optik güç zayıflaması.....	13
Şekil 2.10. Dispersiyon etkisi nedeniyle oluşan semboller arası girişim: a) fiber girişindeki darbeler b) fiber içerisinde ilerleyen darbelerin durumu c) optik alıcıdaki durum.....	14
Şekil 2.11. Noktadan noktaya bağlantılı optik erişim ağ mimarisi.....	15
Şekil 2.12. Aktif yıldız bağlantılı optik erişim ağ mimarisi.....	16
Şekil 2.13. Aktif Ethernet ağ altyapısı.....	17
Şekil 2.14. Pasif yıldız bağlantılı optik erişim ağ mimarisi.....	18
Şekil 2.15. Pasif optik ağ sisteminin yapısı.....	19
Şekil 2.16. Optik erişim ağ çeşitlerinin erişim mesafesi ve kullanıcı sayısına göre maliyet karşılaştırması.....	21
Şekil 2.17. FTTX uygulamaları.....	23
Şekil 2.18. Optik erişim ağları için geliştirilmiş çoklu iletişim yöntemleri....	24
Şekil 2.19. Zaman bölmeli çoklu erişim.....	25
Şekil 2.20. Dalgaboyu bölmeli çoklu erişim.....	26
Şekil 2.21. Alt taşıyıcılı çoklu erişim.....	27
Şekil 2.22. Ethernet ve pasif optik ağların yıllara göre gelişimi.....	31
Şekil 2.23. Super PON'un genel mimari tasarımı.....	34

Şekil 2.24.	PIEMAN mimarisi.....	35
Şekil 2.25.	Pasif optik ağ bileşenleri.....	36
Şekil 2.26.	Ericsson OLT.....	37
Şekil 2.27.	ONU birimi.....	38
Şekil 2.28.	PON topoloji çeşitleri.....	39
Şekil 2.29.	NxN optik bölücü.....	39
Şekil 2.30.	Kanallar arası boşluğun eşit ve 100 GHz olduğu 3 kanallı bir DWDM sisteminde FWM olayı neticesinde oluşan ürünler.....	42
Şekil 3.1.	PON sisteminin blok şeması.....	47
Şekil 4.1.	$\Delta f = 1.5625$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	53
Şekil 4.2.	$\Delta f = 3.125$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	54
Şekil 4.3.	$\Delta f = 6.25$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	54
Şekil 4.4.	$\Delta f = 12.5$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	55
Şekil 4.5.	$\Delta f = 1.5625$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	55
Şekil 4.6.	$\Delta f = 3.125$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	56
Şekil 4.7.	$\Delta f = 6.25$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	56
Şekil 4.8.	$\Delta f = 12.5$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 40 \text{ mW}$ ).....	57
Şekil 4.9.	$\Delta f = 1.5625$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	58
Şekil 4.10.	$\Delta f = 3.125$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	58
Şekil 4.11.	$\Delta f = 6.25$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{griş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	59

Şekil 4.12.	$\Delta f = 12.5$ GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	59
Şekil 4.13.	$\Delta f = 1.5625$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	60
Şekil 4.14.	$\Delta f = 3.125$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	60
Şekil 4.15.	$\Delta f = 6.25$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	61
Şekil 4.16.	$\Delta f = 12.5$ GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ ).....	61
Şekil 4.17.	$P_{\text{giriş}}=0.1$ mW için aşağı yönlü iletim kanalında SXR- $\Delta f$ değişimi.....	63
Şekil 4.18.	$P_{\text{giriş}}=0.1$ mW için yukarı yönlü iletim kanalında SXR- $\Delta f$ değişimi.....	64
Şekil 4.19.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 7 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	66
Şekil 4.20.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 15 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	66
Şekil 4.21.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 29 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	67
Şekil 4.22.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 35 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	67
Şekil 4.23.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 7 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	68
Şekil 4.24.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 15 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	68
Şekil 4.25.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 29 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	69
Şekil 4.26.	$P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW için 35 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi.....	69

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Çok modlu fiberlerin tipleri ve bantgenişlikleri.....	10
Çizelge 2.2. Dalgaboylarına göre pencere aralıkları.....	12
Çizelge 2.3. PON standartlarının karşılaştırılması.....	32
Çizelge 2.4. Bölme oranına bağlı olarak bölücü kayıpları.....	40
Çizelge 3.1. Benzetimlerde kullanılan G.652 standartlı tek modlu fiber kablunun parametreleri.....	47
Çizelge 3.2. 7-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri.....	48
Çizelge 3.3. 15-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri....	48
Çizelge 3.4. 29-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri....	49
Çizelge 3.5. 35-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri....	50
Çizelge 4.1. SXR- $P_{giriş}$ benzetiminde aşağı yönlü iletim kanalında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum giriş gücü değerleri.....	62
Çizelge 4.2. SXR- $P_{giriş}$ benzetiminde yukarı yönlü iletim kanalında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum giriş gücü değerleri.....	62
Çizelge 4.3. $P_{giriş}=0.1$ mW için 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde aşağı yönlü iletim kanalında elde edilen SXR değerleri.....	64
Çizelge 4.4. $P_{giriş}=0.1$ mW için 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde yukarı yönlü iletim kanalında elde edilen SXR değerleri.....	65
Çizelge 4.5. $P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 7-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	70
Çizelge 4.6. $P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 15-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	70
Çizelge 4.7. $P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 29-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	70



Çizelge 4.8.	$P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 35-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	71
Çizelge 4.9.	$P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 7-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	71
Çizelge 4.10.	$P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 15-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	71
Çizelge 4.11.	$P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 29-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	72
Çizelge 4.12.	$P_{giriş}=0.1$ mW için farklı kanal uzunluklarında 35-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri.....	72

## 1. GİRİŞ

Telekomünikasyon alanında her geçen gün kullanıcı sayısı ve ihtiyaçları artmaktadır. Bu artan hizmet beklentilerini ve çoğalan kullanıcı sayısı sorununu karşılamak için yüksek bant genişliği hizmetini sağlayan erişim ağı yapıları ortaya çıkmıştır. Pasif optik ağlar (PON) ve onun değişik standartları bu problemleri gidermekte ideal ağ yapılarındandır.

Son zamanlarda PON ağların popüler bir çeşidi olan gigabit pasif optik ağlar (GPON) uygulamada önemli avantajlar sunmakta olup küresel anlamda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Mevcut bakır şebekelerin yerine geçmeye başlayan optik iletişim ağlarında gelecekteki sistemlerin fiberin doğrudan son kullanıcıya ulaştığı sistemler olması istenmektedir. Bu sistemler en yaygın haliyle eve kadar fiber sistemler (FTTH) olarak adlandırılır. Teknik terminolojide FTTx olarak isimlendirilen bu tip sistemlerde x harfi fiber kablonun ulaşacağı son noktayı belirlemektedir.

Bu tezde, dalgaboyu bölmeli çoğullama yönteminin kullanıldığı pasif optik ağlarda, en önemli doğrusal olmayan olaylardan, dört dalga karışımının (FWM) etkileri PON standartları dikkate alınarak ve ticari olarak elde edilebilen G.652 standart tek modlu optik fiber (SSMF) tasarım parametreleri kullanılarak geliştirilen sistem modelleri üzerinde benzetimler (simülasyonlar) yapılarak analiz edilmiştir.

2. bölümde, erişim ağları ile ilgili literatürdeki çalışmalardan derlenen bilgiler paylaşılmıştır. Erişim ağlarının hayatımızdaki rolü, erişim ağ mimarileri ve mimarileri arasındaki temel farklar, kullanılan bantgenişlikleri, optik ağlarda kullanılan ağ donanımları, fiber çeşitleri ve standartları açıklanmıştır. Ayrıca, erişim ağlarının en tercih edilen çeşidi olan PON ağları üzerinde durulmuştur. PON ağlarının değişik topolojileri hakkında bilgi verilmiştir ve eve kadar optik fiber erişim ağlarına değinilmiştir. PON ağlarında kullanılan bir çoğullama yöntemi olan dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) yöntemi açıklanmıştır. Ayrıca WDM sistemlerde meydana gelen, doğrusal olmayan olaylardan FWM'in teorik altyapısı ve WDM sistemler üzerindeki etkisi anlatılmıştır.

3. Bölümde ise optik hat sonlandırıcı (OLT) ve optik bölücü arasındaki kanalda görülen FWM olayının, yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı/ aşırı yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı pasif optik ağ (DWDM/UDWDM-PON) sistemlerindeki etkilerini analiz etmek için yapılan benzetimlerde kullanılan yöntemler, modeller, optik fiber parametreleri ve benzetim koşulları açıklanmıştır.

4. Bölümde, UDWDM/DWDM-PON sisteminde yapılan benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.



## **2.KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL BİLGİLER**

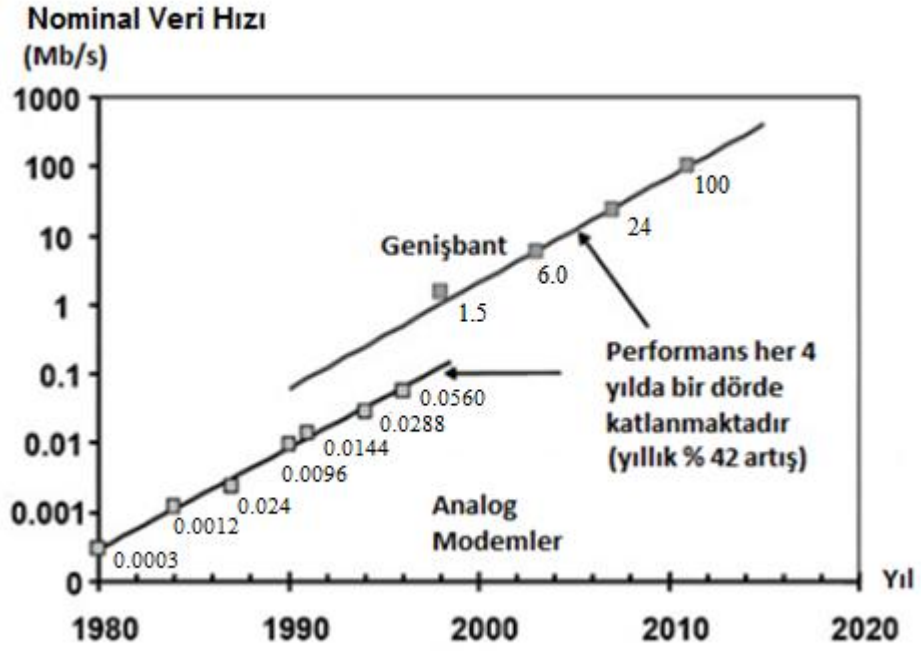
### **2.1. Erişim Ağlarının Gelişimi**

Geride bırakılan son üç yüzyılın her bir asrına bir teknoloji damgasını vurmuştur. 18. yüzyıl mekanik sistemler devriydi, 19. yüzyıl buhar makinalarının dönemi, 20. yüzyıl ise bilgi ve verinin toplanıp, işlenmesi ve kullanıcılara dağıtılması dönemidir.

Dünya çapında telefon şebekelerinin kurulumu, TV ve radyo yayın sistemlerinin gelişmesi, uydu haberleşmesinin ve lazer teknolojisinin hayata geçmesi, bilgisayar endüstrisinin ve erişim ağlarının olanaklarını büyük ölçüde arttırmıştır. Bu olanakların en önemlilerinden birisi de haberleşme cihazlarının ve bilgisayar kullanıcılarının birbirleriyle iletişim sağlayarak barındırdıkları veritabanını ve kaynakları paylaşmaları olmuştur.

Günümüzde, bilgi çok hızlı bir şekilde üretilip dağıtılmaktadır. Kullanıcılara bu imkanı sağlayan kurumlar bilimsel ve teknolojik yönden üstünlük sağlamıştır. Bu nedenle, 21. yüzyıla “Bilgi Çağı” ismi verilmiştir. Bilgi aynı zamanda çok hızlı şekilde değişmektedir. Ayrıca, yakın gelecekte video tabanlı uygulamaların büyük bir kitleye hizmet ve imkan sağlayacağına inanılmaktadır [Anonim 2010]

Şekil 2.1'de, erişim ağlarının tarihsel ve geleceğe dönük olarak nominal veri iletim hızları gösterilmiştir. Şekil 2.1 artan bantgenişliği ihtiyacıyla birlikte yüksek kaliteli video uygulamaları geliştirildikçe servis kalitesi gereksinimlerinin de arttığını göstermektedir.



Şekil 2.1. Yıllara göre erişim ağlarında bantgenişliğinin ve veri iletim hızlarının gelişimi (Lee Chang-Hee ve diğ., 2006)

### 2.1.1. Optik Fiber Ağları ve Teknolojisi

Günümüzde, büyük şehirlerde insanların ihtiyaçlarını tek bir merkezden giderme gereksinimi duyulmuştur. Ofisler, rezidans ve AVM'ler gibi yapıların ağ altyapılarını tek bir komplekste toplanması gerekli olmuştur. IP tabanlı sistemleri kullanmaya başlayan, ses ve verinin yanı sıra alarm, yangın alarm, kamera, bina yönetim sistemleri gibi pek çok altyapıya ait sistemler, buldukları binaların en kritik unsurları haline gelmiştir. Optik fiberli omurga sistemleri, IP tabanlı donanımların tek bir ağ yapısı üzerinden iletişimini gerçekleştirmektedir. Optik fiberli sistemlerin diğer sistemlere göre sağladığı yüksek bantgenişliği ve yüksek hız desteğinin yanısıra uzak mesafe iletim imkanı bu sistemleri önemli bir seçenek haline getirmiştir.

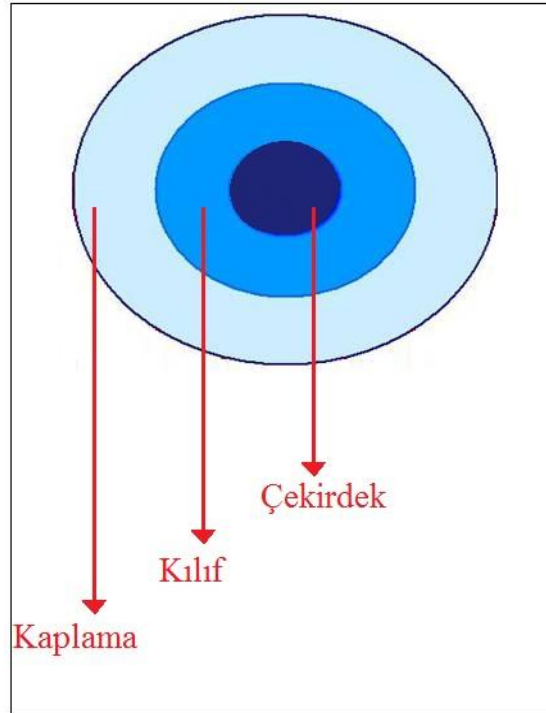
Optik fiberler 1960'larda kullanılmaya başlanmış, cam fiberler üzerinden işaret taşıma işlemi yapılmıştır. 1970'lerin ortasında ticari olarak bazı servis sağlayıcılar tarafından ABD ve İngiltere'de optik sistemin tasarım ve kurulumu başlamıştır. Başlangıçta fiber kabloların erişim mesafesi 2 km idi. Zamanla gelişen teknoloji sayesinde 1980'lerin sonunda Tyco Telecommunication tarafından 6000 km uzunluğunda ilk transatlantik

fiber kablo okyanus altından döşenerek Avrupa ve Amerika kıtaları birbirine bağlanmıştır [Çakın 2003].

Bakır kablo, mikro dalga ve uydu iletişim araçlarının yerine fiber kablolar 1980'li yıllarda alternatif olarak görülmüştür. CATV sistemlerinin fiber üzerinden taşınmaya başlanması ise 1990'larda olmuştur. Optik fiber hatların evlerimize kadar ulaşmasının önünü açan faktör ise, hem ses işaretlerinin hem internet verisinin tek bir fiber hattı üzerinden taşınabilmesidir. Dolayısıyla optik fiber hem telekom hem bilgisayar ağlarında (LAN) kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, optik fiber, teknolojinin sağladığı avantajlar nedeniyle hem uzak mesafe hem de erişim ağlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır.

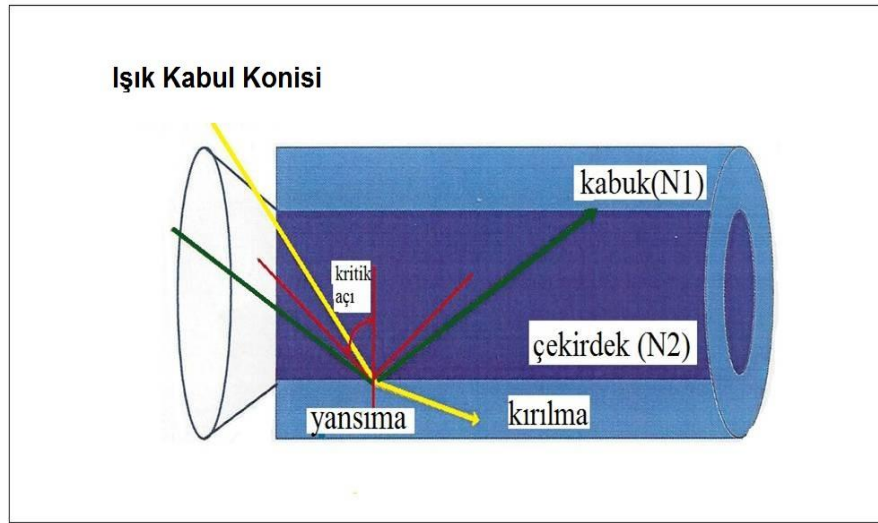
### 2.1.2. Optik Fiber Kabloların Yapısı

Optik fiber, genel olarak çekirdek, kılıf ve koruyucu tabaka bölgesinden oluşur. Işığın iletiminin sağlandığı merkez bölgeye çekirdek denir. Çekirdek kısmını saran ve optik malzemeden yapılan bölgeye kılıf denir. En dış kısımda kaplama bulunur ve fiberi dış etkilerden koruma görevi yapar. Şekil 2.2'de optik fiber kablo yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Optik fiber kablo yapısı

Bilginin fiberde iletilmesi tam yansıma prensibi ile gerçekleştirilir. Bu prensibin sağlanabilmesi için, kılıfın kırılma indisinin çekirdek bölgesinin kırılma indisinden daha küçük olması sağlanır. Çekirdek bölümünü saran tipik bir kılıfın çapı 125  $\mu\text{m}$  olup cam maddesinden yapılmaktadır. Ancak kırılma indisi çekirdeğe göre % 1 oranında daha küçüktür. Bu fark sayesinde çekirdek bölgesine enjekte edilen ışık ışını kılıfa geçemez ve çekirdekte belli bir hızda tam yansımalar ile ilerler. Şekil 2.3'te optik fiber iletimi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Optik fiberde iletim

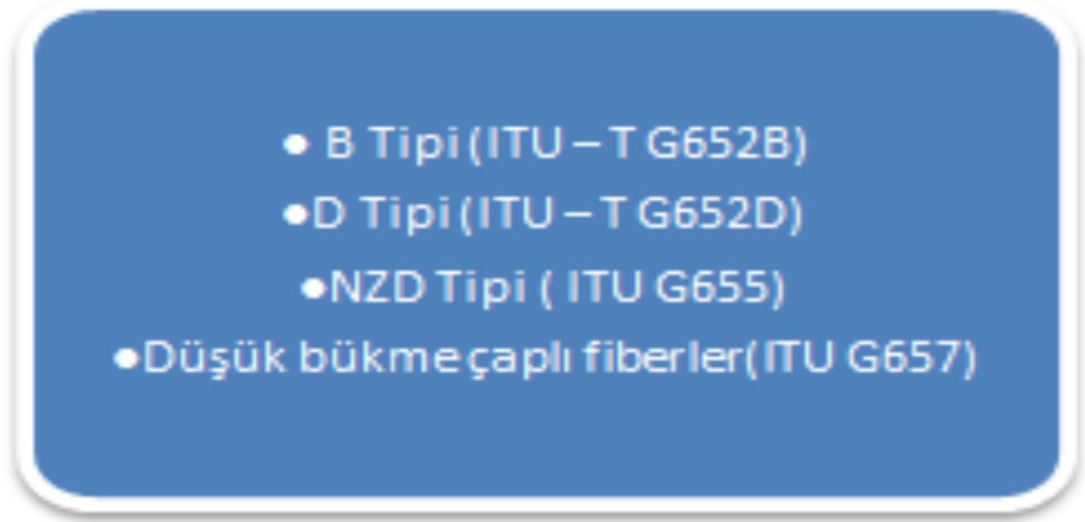
Fiberi darbe ve şoklardan koruyan kaplama tabakasının optik özelliği yoktur, plastik ve polimerden yapılmaktadır. Fiber lifleri genel olarak cam ve plastikten yapılır, plastik lifler daha esnek olup, cam fiberlerin kaybı daha azdır.

### 2.1.3. Optik Fiber Kabloların Tipleri

Yayınım moduna göre optik fiber kablolar, tek modlu (SM) ve çok modlu (MM) fiberler olmak üzere ikiye ayrılır.

**Tek modlu (SM)** fiberlerde, tek modda ışık bilgisi gönderilir. Tek modlu fiberin dış ceket rengi genellikle sarı olur, çekirdek çapı 8-10  $\mu\text{m}$  seviyesindedir ancak 9  $\mu\text{m}$ 'lik çekirdek çok yaygındır, kılıf çapı ise 125  $\mu\text{m}$ 'dir.

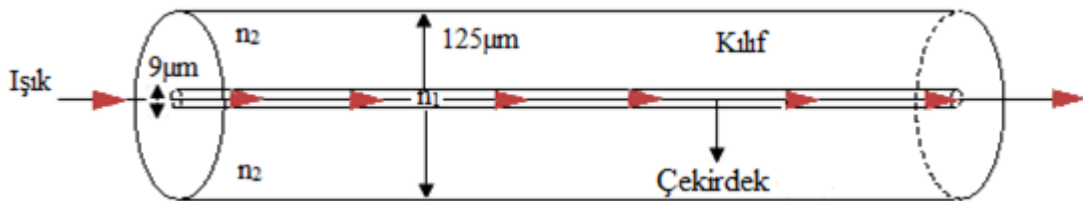
Kablo kaplamasında yazan 9/125 ibaresi tek modlu fiber kablonun çekirdek çapının 9  $\mu\text{m}$  ve kılıf çapının 125  $\mu\text{m}$  olduğunu gösterir. En çok kullanılan tek modlu fiber tipleri Şekil 2.4'te açıklanmıştır. SM fiberlerde ışık zayıflaması minimum seviyededir ve teorik olarak ortalama 0.2 dB/km'dir.



Şekil 2.4. En çok kullanılan tek modlu fiber tipleri [Sönmez 2014].

Tek modlu fiberlerdeki iletimde, ışık ışını çekirdeğe fiber kesiti ile  $90^\circ$ 'lik açı yaparak girer. Sadece tek bir giriş açısında ışık gönderildiği için zayıflama düşük, bantgenişliği yüksek olup çok uzak mesafelerde iletişim sağlanabilmektedir.

Böylece hem iletim hızı hem de iletim mesafesi arttırılmış olur. Bu nedenle, tek modlu fiberler genellikle geniş alan ağlarında (WAN) kullanılırlar. Şekil 2.5'te tek modlu fiberlerde iletim gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Tek modlu fiberlerde iletim



Tek modlu fiber için iki temel standarttan söz edilmektedir: ITU-T-G.65x ve IEC 60793-2-50 (EN IEC 60793-2-50) standartları. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği olan ITU tarafından belirlenmiş 19 farklı tip tek modlu fiber standardı bulunmaktadır.

Bunlar :

ITU-T G652.A,B,C ve D.

ITU-T G653.A ve B.

ITU-T G654.A,B ve C.

ITU-T G655.A,B,C, D ve E.

ITU-T G656

ITU-T G657 Category A1, A2, B1 ve B2.

Her bir fiber standardı, fiber sistemlerin ilk kullanılmaya başladığı dönemlerden günümüze kadar gelişen farklı tip uygulamaları desteklemek amacıyla ITU tarafından zaman içerisinde geliştirilmiş ve tanımlanmıştır.

Örneğin :

ITU.T G652.D, günümüzde standart tek modlu fiber diye anılan veri ağlarında, telekom alt yapıları vb. bütün uygulamalarda kullanılan ana fiber tipidir. Yaklaşık olarak 75-100 km arası mesafelerde sorunsuz çalışabilir. Ancak uygulamaya ve taşınacak bilgisinin türüne göre bu mesafe değişim gösterebilir.

ITU.T G653.B, dispersiyonu ötelenmiş fiberlerdir (DSF). DSF'ler 1550 nm dalgaboyunda dispersiyon katsayısı neredeyse sıfır olan fiberlerdir. Bu tür fiberler ile 1550 nm dalgaboyunda çok uzak mesafelere yüksek hızlarda iletişim sağlanabilir. DWDM sistemleri için uygun değildir. Ancak 653.B versiyonu kısmen CWDM sistemler için uygun bir dispersion etkisi verebilir.

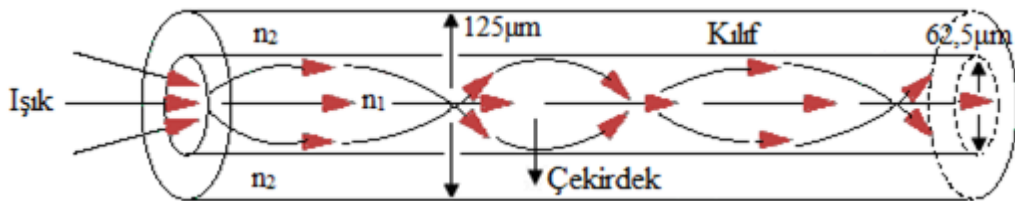
ITU.T.G655, sıfır olmayan dispersiyonu ötelenmiş fiberlerdir (NZDSF). Standart'ın A,B,C versiyonlarının çalışma dalgaboyu bölgeleri birbirlerinden farklıdır.

NZDSF'lerde 655.A sadece C bandında çalışırken 655.C versiyonu 1260-1565 nm aralığındaki tüm bölgede çalışabilir. Kısaca söylenecek olunursa CWDM ve DWDM sistemler için uygundur.

ITU.T.G656, genişbant sıfır olmayan dispersiyonu ötelenmiş fiberler'dir (WBNZDSF). Bu tür fiberler 1460 nm-1625 nm aralığında uzak mesafelerde rahatlıkla kullanılabilir. G.655 ile aralarındaki temel fark desteklemiş oldukları dalgaboyu aralığıdır. En pahalı fiber tiplerinden biridir. Bütün DWDM sistemlerinde iyi bir performans sağlar.

ITU.T.G657.B3, günümüzde artık çok konuşulan eve kadar fiber (FTTx) uygulamalarının yaygınlaşması ile daha fazla öne çıkmış bir fiber türüdür. Bilindiği gibi fiberler her çapta bükülemezler. Fiberler limiti üzerinde bükülürse, kırılabilir ve/veya veri iletişimi bozulabilir. Bu sorun eve kadar fiber uygulamalarında özellikle bina içi, ev içi gibi dar alanlarda montaj yapılması gerektiğinde büyük sorun yaratmaktadır. Bu tip fiberlerde, bu sorun aşılmıştır. G657.B3 versiyonu ile bükme çapı 5 mm'ye kadar düşürülmüştür. Bu ürünün halen farklı bükme çaplarında ve saçılma etkisi değerlerinde çalışan A1/A2 ve B2/B3 türevleri vardır. Genellikle bina içi kablolama amacı ile kullanılan optik fiber kablolarda, optik fiber patchcordlarda bu tür fiber tercih edilebilir. Bu tip fiber, G652.D ile birlikte kullanılabilir [Anonim 2014].

**Çok modlu (MM)** fiberlerde, ışık çoklu modda bilgi gönderebilir. 50  $\mu\text{m}$  ve 62.5  $\mu\text{m}$  çekirdek çapına ve 125  $\mu\text{m}$  kılıf çapına sahiptir. Fiberin iç yapısının genişliğinden dolayı hat boyunca çoklu modda ışık gönderilebilir Ancak modal saçılma nedeniyle zayıflaması yüksektir ve kısa mesafelerde kullanılabilir. Çok modlu fiber kabloda iletim Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Çok modlu fiber kabloda iletim

Çok modlu fiberler üretim süreçlerinde farklı uygulamalardan geçirilerek, cam içerisindeki hava boşlukları, mikro çatlaklar minimize edilerek daha yüksek bant genişliğine sahip olabilmekte ve günümüzde yaygın olarak kullanılan 1 ve 10 Gigabit Ethernet gibi yeni nesil uygulamalarda daha yüksek mesafeleri destekleyebilmektedir. Bu amaçla uluslararası standartlar, farklı tip ağ uygulamaları için, farklı tip bant genişliğine sahip çok modlu fiber standartları belirlemiştir. Çizelge 2.1'de çok modlu fiber tipleri ve bantgenişlikleri gösterilmektedir [Çakın 2012].

Çizelge 2.1. Çok modlu fiberlerin tipleri ve bantgenişlikleri

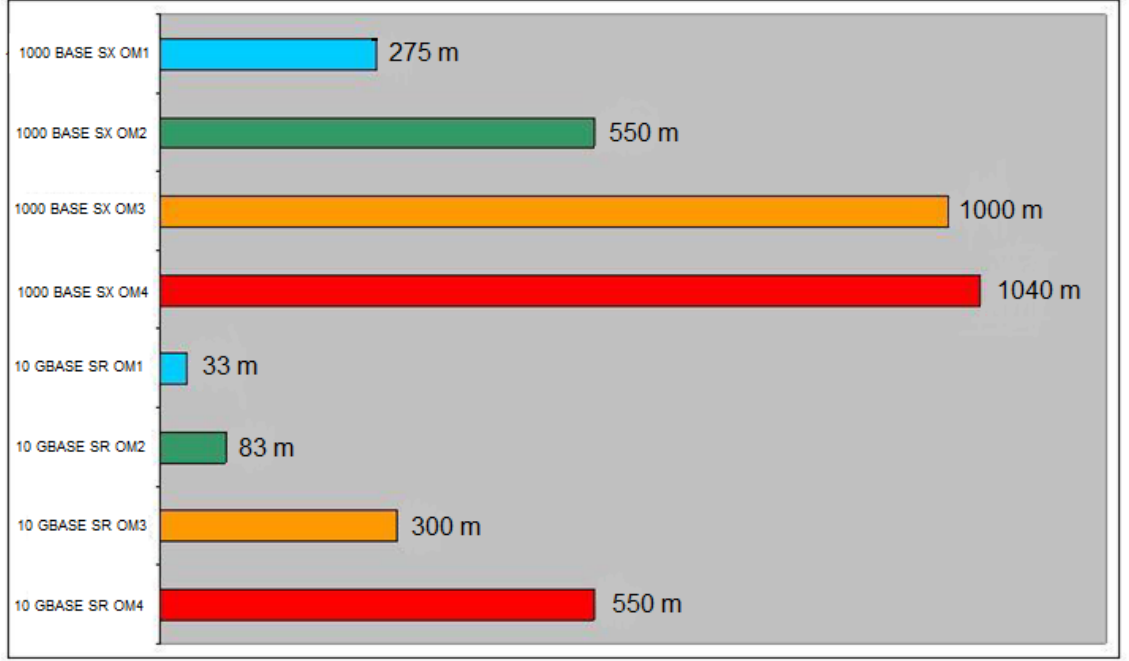
		BANTGENİŞLİĞİ	
MM FİBER TİPİ	ÇEKİRDEK ÇAPI	850 nm	1300 nm
OM1	50/62.5 $\mu\text{m}$	200 MHz x km	500 MHz x km
OM2	50/62.5 $\mu\text{m}$	500 MHz x km	500 MHz x km
OM3	50 $\mu\text{m}$	1500 MHz x km	500 MHz x km
OM4	50 $\mu\text{m}$	3500 MHz x km	500 MHz x km

Çok modlu fiberler 850 nm ve 1300 nm dalgaboylarında çalışır. İhtiyaç duyulan bantgenişliğine göre iletim mesafesi değişir. Dolayısıyla, çok modlu fiber kablolarında frekans kriteri önemlidir. ISO standartlarında bu frekans kriterlerine göre çok modlu fiberler ayrıştırılmıştır. Buna göre, 62.5/125  $\mu\text{m}$  fiberler genelde OM1 tipinde olup 200/500 MHz.km'de çalışırlar. Bu şu anlama gelmektedir: 100 Mbps ile 2 km'lik mesafeye ulaşabilir. 1 Gbps ile en fazla 220 m'ye kadar gidilebilir. OM2 tipi 62.5/125  $\mu\text{m}$  fiberler daha seyrek kullanılırlar.

Diğer, 50/125  $\mu\text{m}$  fiberler ise OM2,OM3,OM4 olarak mevcuttur. OM2 genel olarak 500/500 MHz.km olsa dahi şu anda 500/900 MHz.km olan tipleride mevcuttur. OM2 fiber ile 1 Gbps hızında 550 m kadar iletişim sağlanabilir. OM3 ise 850 nm dalgaboyunda lazer özel olarak 50  $\mu\text{m}$  fibere göre optimize edilerek 2000MHz.km

sağlayabilir. Buda 1 Gbps hıza çok modlu fiber ile 1 km'ye kadar çalışabilme imkanı verir [Anonim 2014].

Bu veriler daha iyi anlaşılabilmesi amacı ile ve karmaşıklarılmamak adına yuvarlak olarak verilmiştir kullanılan fiber optik modülün 1000BaseSX olacağı düşünülmüştür. Farklı modüller ile farklı mesafeler desteklenir. OM3 fiberler 10 Gbps'ı 300 m'ye kadar desteklemek amacı ile geliştirilmiştir. Ancak hız ihtiyacının artması ile yeni nesil 50/125  $\mu\text{m}$  OM4 çok modlu fiberler geliştirilmiştir. OM4 fiberlerin frekansı 3500 MHz.km'dir. Şekil 2.7'de çok modlu fiberlerin günümüzde yaygın olarak kullanılan farklı tip Ethernet uygulamalarını hangi mesafelere kadar desteklediği görülmektedir.

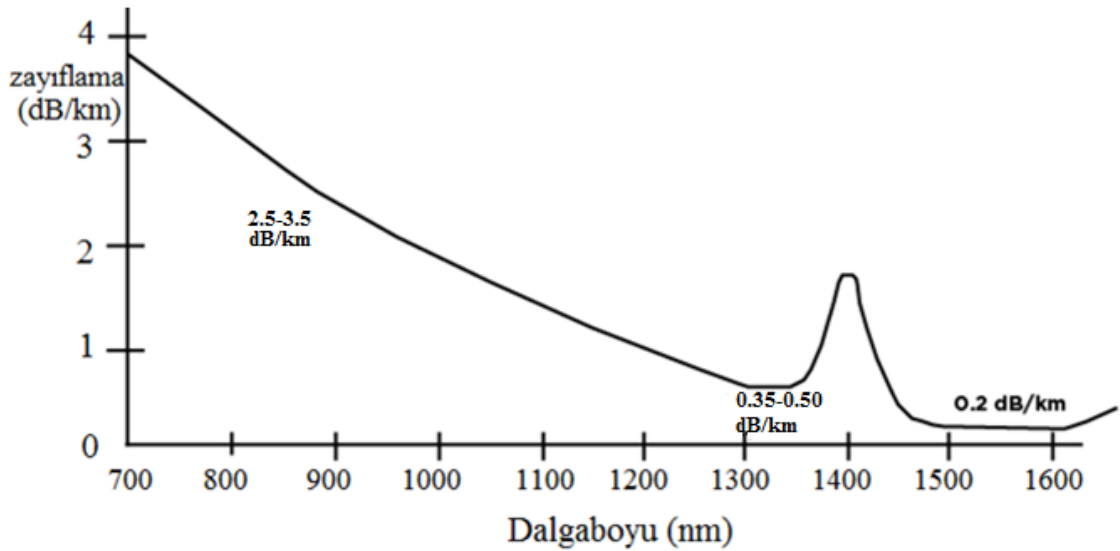


Şekil 2.7. Farklı Ethernet uygulamalarında çok modlu fiberlerin desteklediği mesafeler

Çok modlu fiberler, yüksek çekirdek çapı sayesinde daha düşük maliyetli LED veya VCSEL ışık kaynaklarını kullanarak 850 nm dalgaboyunda iletişime imkan tanımaktadır. Bu sayede özellikle görece olarak daha kısa mesafelerin olduğu LAN'larda maliyet avantajı sağladığı için tercih edilen fiber tipidir.

Optik fiberlerde uygun iletim için üç değişik dalgaboyu bölgesi kullanılmaktadır. Optik fiberlerin ilk kullanımında (1966 yılında), 850 nm dalgaboyu bölgeyi (1. optik pencere) kullanılmıştır. 1975 yılında 1310 nm dalgaboyu bölgesi (2. optik pencere) kullanılmaya başlanmıştır. 1987 yılından başlayarak 1550 nm dalgaboyu bölgesi (3. optik pencere) kullanılmaktadır. Şu anda optik iletim ve araştırmalarda ağırlıklı olarak 3. optik pencere temel alınmaktadır. Çalışma dalgaboylarına göre pencere aralıkları Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Fiber optik damarlarda, 1. optik pencerede önceleri 20 dB/km daha sonraları 4 dB/km, 2. optik pencerede 0.40-0.36 dB/km ve 3. optik pencerede 0.22-0.15 dB/km zayıflama elde edilmiştir. Kilometredeki zayıflama ve dalgaboyu diyagramı Şekil 2.8'de verilmiştir [Anonim 2013].



Şekil 2.8. Dalgaboyuna bağlı optik fiber zayıflama grafiği

Çizelge 2.2. Dalgaboylarına göre pencere aralıkları

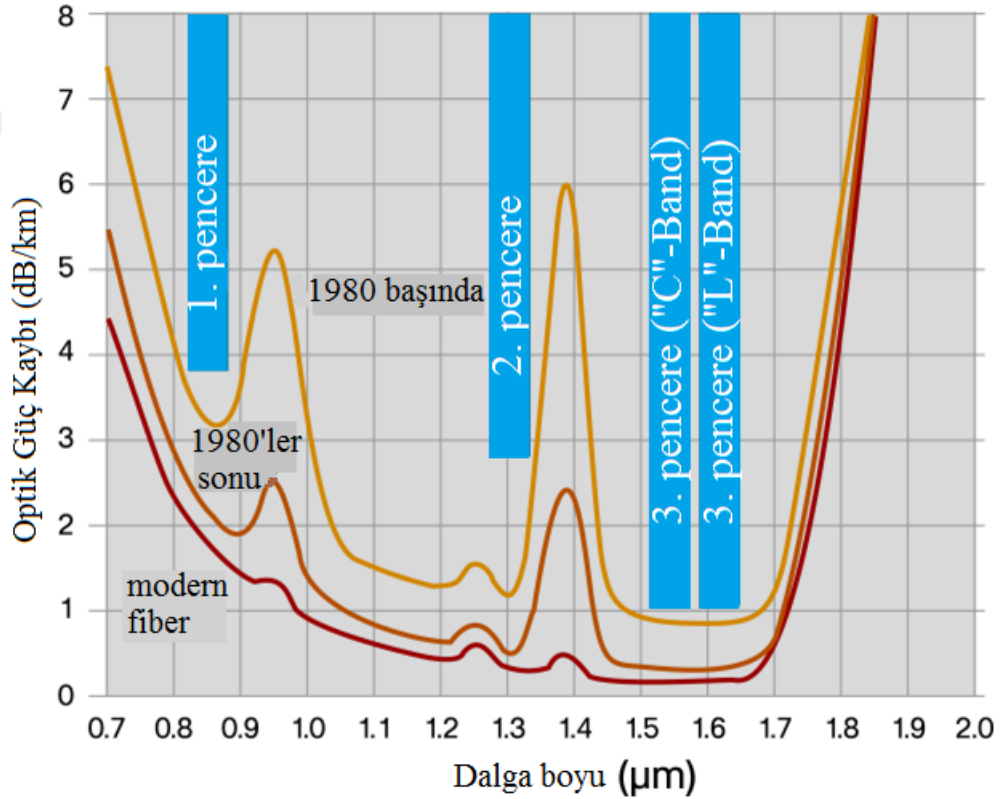
Pencere Aralığı (nm)	Dalgaboyu (nm)
800-900	850
1300-1350	1310
1500-1600	1550

#### 2.1.4. Optik Fiberli İletişim Sistemini Etkileyen Parametreler

Optik fiber iletişim sisteminin performansını etkileyen parametrelerin özelliği ve etkisi fiber tipine göre ve uygulanması istenen sistem mekanizmasına göre değişmektedir. En önemli iki parametre zayıflama ve dispersiyon olarak kabul edilmektedir.

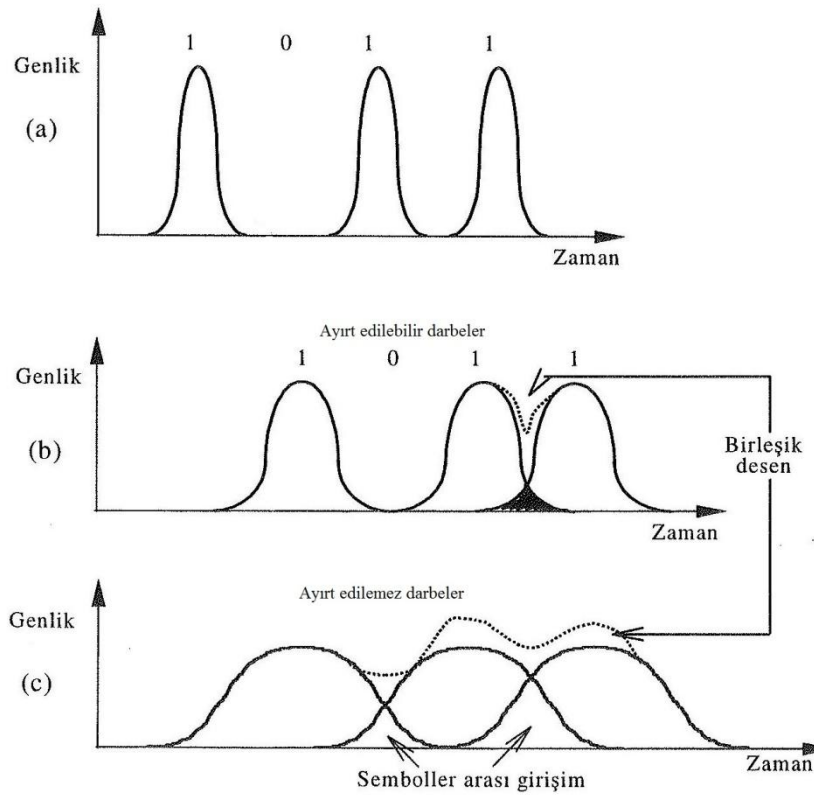
**Zayıflama :** Optik işaretin bir noktadan diğer noktaya iletimi sırasında optik gücün azalması olayına zayıflama denir. Optik fiberlerde güç kaybı, absorpsiyon (UV, IR), saçılma (lineer, non lineer), mikro ve makro bükülme ve konnektör kayıpları neticesinde meydana gelmektedir. Güç kaybı dB/km birimiyle verilir. Zayıflama, işaretin ağdaki iletim mesafesini sınırlayan etkili parametrelerden birisidir.

Şekil 2.9, değişik malzemeli fiberlerde zayıflama ve dalgaboyu ilişkisini göstermektedir. Üç temel pencere aralığında gösterilen dalgaboyu bölgeleri en uygun ve zayıflamanın düşük olduğu bölgelerdir [Anonim 2008].



Şekil 2.9. Optik fiber iletişiminde dalgaboyuna göre optik güç zayıflaması

**Dispersiyon** : Optik fiberdeki iletimde bozulmaya neden olur. Sayısal modülasyonlu iletimde, dispersiyon mekanizmaları, fiber içerisinde ilerleyen ışık darbelerinde genişlemeye sebep olur. Bu genişleme neticesinde, komşu darbeler üst üste binerek alıcı uçta ayırt edilemez bir duruma gelebilirler. Bu olaya semboller arası girişim (ISI) denir. ISI etkisi arttıkça, optik fiberdeki iletimde bit hata oranı (BER) da artar. Dolayısıyla, dispersiyon optik fiberin ulaşabileceği maksimum bantgenişliğini ve bit hızını sınırlar. Dispersiyon etkisi nedeniyle oluşan semboller arası girişim Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Dispersiyon etkisi nedeniyle oluşan semboller arası girişim: a) fiber girişindeki darbeler b) fiber içerisinde ilerleyen darbelerin durumu c) optik alıcıdaki durum [Özsoy 2009]

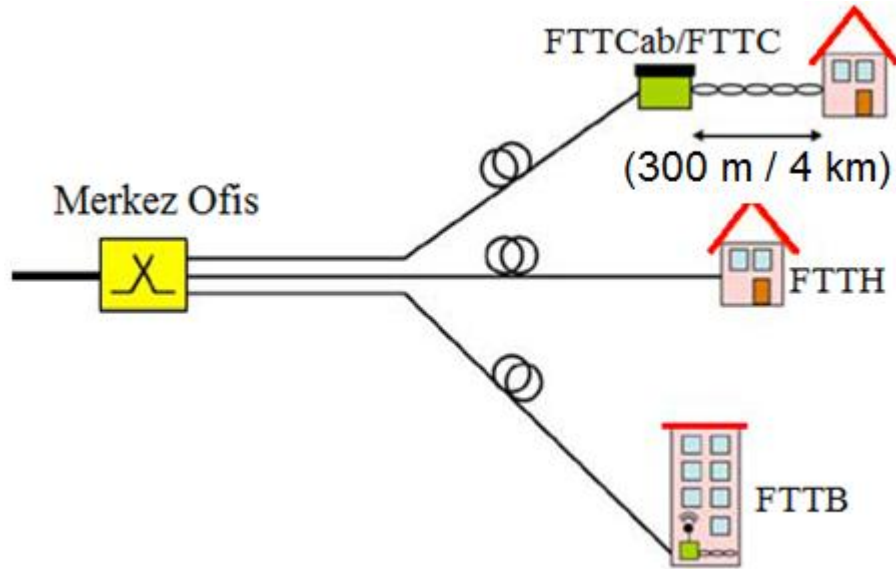
## 2.2. Optik Erişim Ağ Çeşitleri

Bu alt bölümde genel olarak optik erişim ağ çeşitleri incelenmiştir. Noktadan noktaya, aktif yıldız bağlantılı ve pasif yıldız bağlantılı ağlar ayrıntıları ile incelenmiş olup karşılaştırmalar yapılmıştır.

### 2.2.1. Noktadan Noktaya Bağlantılı Ağlar

Bu mimaride, merkez ofisten her kullanıcı için ayrı bir fiber hat çekilir. Böylece her bir kullanıcı diğerinden bağımsız bir kanaldan iletişim kurarak ve aynı zamanda diğer kullanıcı trafiğinden etkilenmeyecek şekilde hizmet alır. Bu sistemin maliyeti ilk başta yüksektir ancak sistemin geleceğe dönük genişletilmesi gerektiğinde maksimum esneklik sağlar ve ağ üzerinde iki nokta arasında problem oluştuğu zaman problem kolay şekilde çözülebilir [Turna ve ark. 2009].

Noktadan noktaya bağlantılı ağlarda, bağlantının kurulabilmesi için çok sayıda fiber hattın döşenmesi ve merkezi ofisteki hat girişinin her kullanıcı için ayrı bir sonlandırıcısının olması gerekmektedir. Merkez ofise bağlanacak uç sayısının çok olması da beraberinde stok problemini getirecektir. Her bir kullanıcının birbirinden bağımsız sonlandırıcıya sahip olması merkez binalarındaki donanım sayısının artması demektir. Bu tür mimaride merkez ofis ile kullanıcı arasında esneklik sağlanması ve maksimum kapasiteye ulaşmanın mümkün olması avantajına karşı maddi açıdan yüksek maliyetli olması bir dezavantajdır. Şekil 2.11'de noktadan noktaya bağlantılı optik ağ mimarisi gösterilmiştir [Koonen 2006].



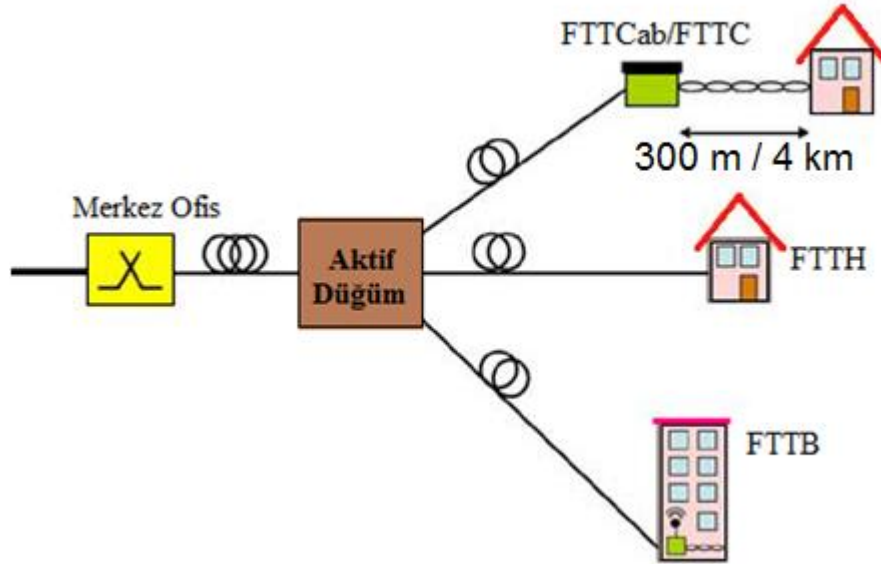
Şekil 2.11. Noktadan noktaya bağlantılı optik erişim ağ mimarisi



### 2.2.2. Aktif Yıldız Bağlantılı Ağlar

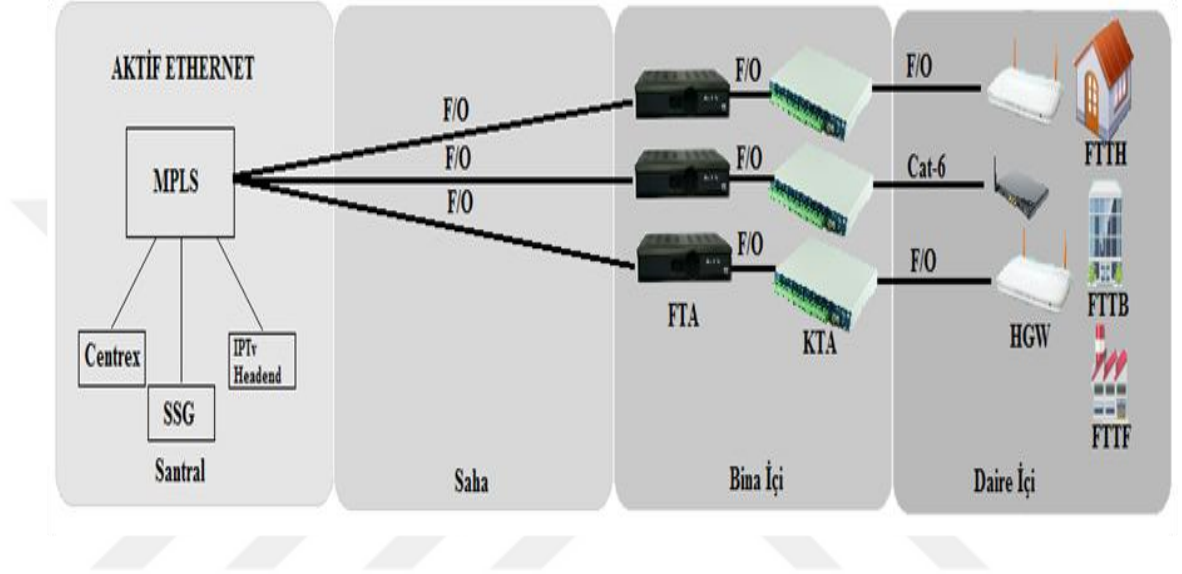
Bu mimaride, merkez ofisten aktif düğüme kadar tüm trafik tek bir fiber kablo üzerinden taşınmaktadır. Düğümden sonra bağımsız fiber kablolar ile kabinete, eve veya apartmana hatların çekildiği bir modeldir. Noktadan noktaya mimariye göre son kullanıcılara ulaşmak için kullanılan fiber kablolar daha kısa uzunluklarda olacaktır, dolayısıyla maliyeti de daha ucuzdur. Ancak, mevcut aktif düğümün bakım ve enerji maliyeti de vardır. Aynı zamanda diğer ekipmanların da sıcaklığa karşı dayanıklı olması gerekmektedir.

Aktif düğümden sonraki aşamada, çift bükümlü bakır hatlar çekilebilir (mesela ADSL'de 4 km mesafe ile 6 Mbit/s hız elde edilebilir veya VDSL 50 Mbit/s hızında yaklaşık 500 m mesafeye kadar mümkündür), ya da koaksiyel kablo hattı kullanılabilir (HFC), hatta kablosuz bağlantılar (wireless links FWA) da düşünülebilir. Aktif düğüm, kaldırım kabinetine (FTTCab ve FTTC) ya da çok konutlu binaların ünitesine (FTTB) konumlandırılabilir. Böylece veri son kullanıcılara bakır kablolu ya da kablosuz 100 Mbit/s'e kadar hızlarda ulaştırılabilir. Şekil 2.12'de aktif yıldız mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Aktif yıldız bağlantılı optik erişim ağ mimarisi

Optik ağlarda aktif ürünler, telekomünikasyon ve kablolu televizyon marketlerinde kullanılan kaynak lazerler, pompa lazerler, dış modülatörler, dedektörler, alıcılar ve birleştirilmiş lazer modülleri olarak sıralanır. Aktif mimaride veri trafiği Ethernet tabanlı olup IEEE802.3ah standartını referans almıştır. Sistem yönetimi hariç üç temel unsurdan oluşur; fiber toplama anahtarı (FTA), Kenar anahtarı (KTA) ve kullanıcı anahtarı. Şekil 2.13'te Ethernet ağ altyapısı görülmektedir.



Şekil 2.13. Aktif Ethernet ağ altyapısı

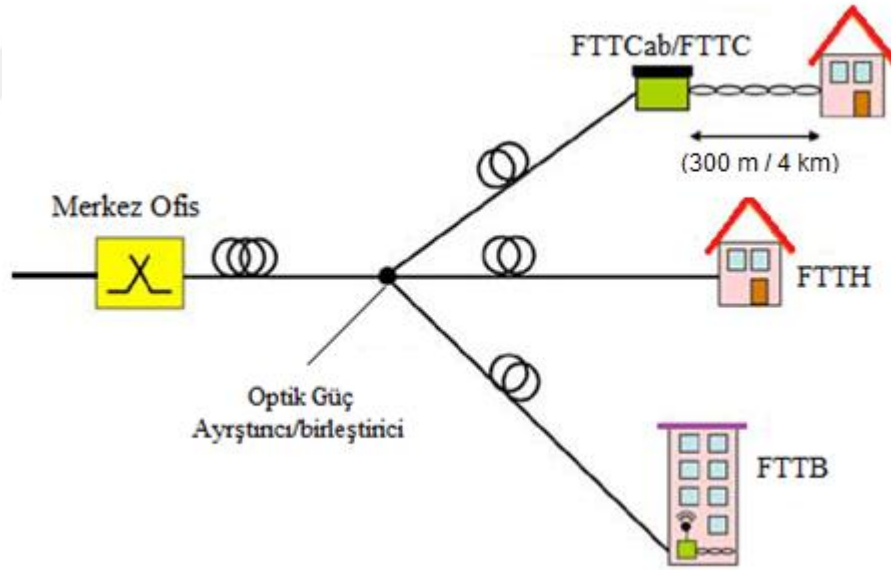
Müşteri trafiği KTA ile toplanarak toplama merkezindeki FTA üzerinden çok protokollü etiket anahtarlama (MPLS) şebekesine optik fiber kablo üzerinden aktarılır. FTA ve KTA arasında aşağı ve yukarı akış trafiği iki fiber (1 per) üzerinden taşınır. FTA ve MPLS arasında ise yedekli (2 per) sistem bulunur. 1310 ve 1550 nm dalgaboylarında tek ya da çift fiber üzerinden farklı arayüzler kullanılarak santralden 10, 40, 70 km uzaklıktaki abonelere hizmet verilebilmektedir.

Şekil 2.13'te görülen FTA, sistemde toplama merkezlerine kurularak KTA'lardan gelecek kabloların bağlanacağı ve harici güç kaynakları bulunan cihazlardır. Yukarı kanal portları ile MPLS'e bağlanır. Bu portlar 1 G ve 10 G Ethernet ara yüzlerine sahiptir. FTA cihazları MPLS şebekesine yedekli olarak 1-10 Gigabit bağlantı ile bağlanır.

KTA, bina altlarına ya da toplama noktalarına inşa edilerek kullanıcılardan gelecek kabloların bağlandığı cihazlardır. Bu cihazlar yukarı kanal portları ile FTA'lara bağlanarak abonelere sağlanacak servislere erişir. Yukarı kanal portları 1 G Ethernet ara yüzlerine sahiptir. Her bir KTA cihazı tek bir FTA'da sonlanacak şekilde sistem planlanmıştır. Her bir abone, ev ağ geçit (HGW) bağlantısı için bir adet KTA portu kullanır. Tüm KTA cihazları FTA'lara port sırasına göre bağlıdır. KTA cihazı müşteri veya kullanıcı tarafına konumlandırılan uç cihazdır, FTA ise servis sağlayıcılar tarafında çalışan donanımlardır.

### 2.2.3. Pasif Yıldız Bağlantılı Ağlar

Aktif mimarideki aktif düğümün pasif bir elemanla değiştirilmesi sonucu ortaya çıkan mimariye pasif yıldız mimarisi denir. Düğümün ortadan kalkması ile hem uygulama hem de bakım ve enerji maliyeti ortadan kalkmıştır. Bu nedenle, pasif mimari erişim ağlarında oldukça yaygındır. Şekil 2.14'da pasif yıldız mimarisi gösterilmiştir.

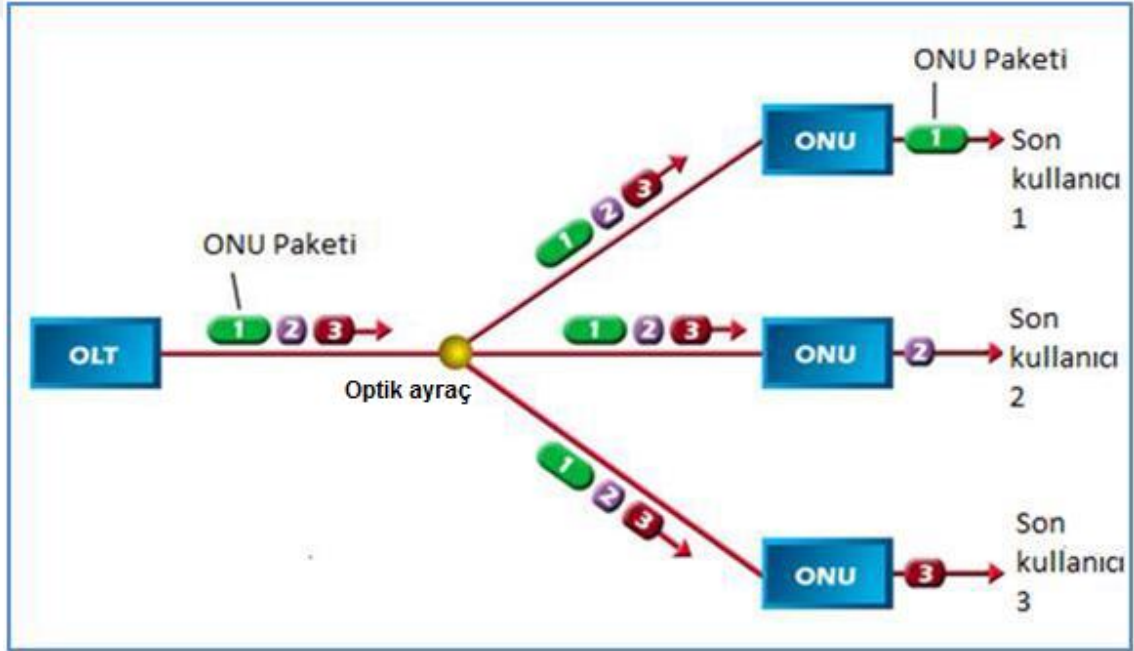


Şekil 2.14. Pasif yıldız bağlantılı optik erişim ağ mimarisi

Son kullanıcıya ulaşmayı sağlayan ve pasif elemanlarla oluşturulan sistemlere pasif optik ağ (PON) adı verilmiştir. Pasif optik ağlar, bu özellikleri nedeniyle geleceğe yönelik en büyük yatırımlar arasında yer almaktadır. Pasif optik ağlarda, aktif yıldız

topolojisinin aksine, tek modlu fiber optik kablo ile tek bir damar üzerinden çift yönlü iletişim gerçekleştirilir.

Pasif olarak nitelendirilen ürünler ise izolatörler, WDM kuplörler, ızgaralar, sirkulatörler, optik anahtarlar, ayarlanabilir filtreler ve bazı mikro-elektronik ve mekanik sistemlerdir. Pasif üniteler üretilmiş bu işaretin ayrıştırılması, yansıtılması ve birleştirilmesi gibi amaçlar için kullanılır. Bir PON sistemi Şekil 2.15'te görüldüğü gibi, optik hat sonlandırıcısından (OLT), optik ağ biriminden (ONU), OLT ve ONU arasındaki pasif eleman olan optik ayraç ve sistem bileşenlerini birbirine bağlayan fiber kablolardan oluşmaktadır.



Şekil 2.15. Pasif optik ağ sisteminin yapısı

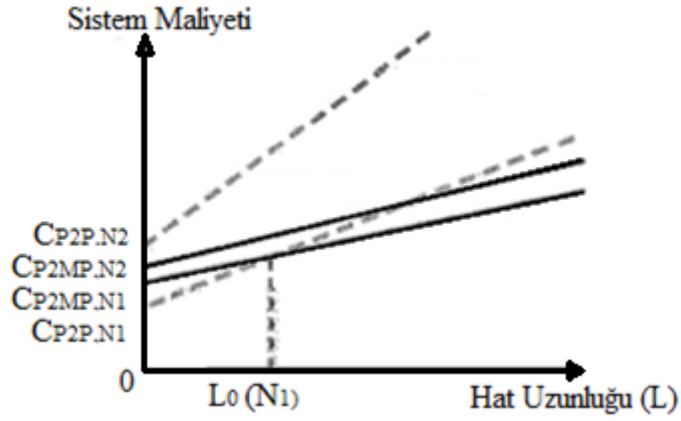
OLT'den ONU'lara veri iletimi yayım (broadcast) şeklinde olup optik ayraç ile tüm ONU'lara ve son kullanıcılara dağıtılmaktadır. Dolayısıyla, ONU'lar kendisine ait olan paketi alıp işlemektedir, aksi halde o bilgiyi dikkate almaksızın silecektir. ONU'lardan OLT'ye veri trafiği de çoğuşma şeklinde iletilmektedir. Bu durumda, ONU'lardan OLT'ye veri iletimi gerçekleşirken tüm ONU'ların paketleri pasif ayraçtan sonra tek bir fiber hattını kullanacaktır. Bu yüzden çarpışmayı engellemek için çoklu erişim yöntemleri kullanılmaktadır.

Günümüzde PON yapılarında sıkça kullanılan çoklu erişim yöntemi zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) yöntemidir. Yakın geleceğe dönük üzerinde oldukça yoğun çalışmalar ve araştırmalar yapılan bir diğer yöntem ise dalgaboyu bölmeli çoklu erişim (WDMA) yöntemidir. Bilim dünyasındaki birçok çalışma, PON sistemlerde WDMA yönteminin kullanılması veya WDMA ile TDMA'nın birlikte kullanılması sonucu, erişilebilecek kullanıcı sayısını ve iletim miktarını arttırmayı hedeflemektedir.

#### **2.2.4. Optik Erişim Ağ Çeşitlerinin Karşılaştırılması**

Optik erişim ağ çeşitleri ele alındığında, bu mimarilerin teknik performansının yanında bir de ekonomik açıdan analizi ve değerlendirilmesi gerekmektedir; çünkü ekonomik faktör optik ağların hangi mimaride tasarlanacağına çok önemli bir rol oynamaktadır. Her üç mimaride kanal modeli aynı olabilir. Ancak, noktadan noktaya mimari (P2P) kurulumunda ağ yapısı boyunca çok sayıda fiber gerekmektedir, oysa noktadan bir çok noktaya (pasif veya aktif yıldız) (P2MP) mimarilerde besleyici kısım sadece bir fiber kablodan oluşmaktadır.

P2MP daha avantajlıdır; çünkü besleyici hattın zarar görmesi halinde P2P mimarilerde çok sayıda fiberin tekrar baştan tanımlanması ve bağlanması gerekir, halbuki P2MP mimarilerde sadece trafiği taşıyan besleyici fiber hattının tekrardan onarılması yeterli olacaktır. P2P mimaride her hat için biri kullanıcıda ikincisi de dağıtım noktasında olmak üzere iki OLT gerekir. Oysa P2MP mimarilerde dağıtım noktasında sadece bir sonlandırıcıya ihtiyaç vardır. Fakat, P2MP mimarisinde kullanılan hat sonlandırıcısı P2P'de kullanılan sonlandırıcıya kıyasla daha maliyetlidir; çünkü besleyici fiberin paylaşılması ve çarpışmaları önlemek için ekstra önlem almak ve bu karmaşıklıkları iyi idare eden bir donanım gerekmektedir. Diğer yandan, optik hat sonlandırıcının maliyeti P2MP mimarisinde birçok kullanıcı tarafından ortak şekilde karşılanırsa, o zaman maliyet açısından kıyaslama yapıldığı takdirde P2P ve P2MP mimarileri arasında sonuç olarak Şekil 2.16'da gösterilen eğirideki veriler ile karşılaştırılır [Koonen 2006].



Şekil 2.16. Optik erişim ağ çeşitlerinin erişim mesafesi ve kullanıcı sayısına göre maliyet karşılaştırması

N optik ağına bağlı kullanıcı sayısı olmak üzere,  $N_2 > N_1$  olarak alınırsa sistem maliyeti ve hat uzunluğu grafiği gösterilmiştir. Şekil 2.16'ya göre iki mimaride de kurulum maliyeti erişim mesafesi ya da kanalın uzunluğu arttıkça maliyet de artmaktadır, P2P mimaride sistemin maliyeti erişim mesafesi arttıkça, P2MP mimarisine kıyasla daha çok artmaktadır. Ayrıca, kullanıcı sayısı arttıkça, hat uzunluğu faktörü üzerinden değerlendirme yapıldığında, P2P mimarisi maliyetli olacaktır; çünkü her bir kullanıcıya uzun bir fiber hattı çekmek söz konusu olacaktır. Lakin P2MP mimarisinde erişim kanalı yada hattı ne kadar uzasa da sadece besleyici hattı uzatmak yeterli olacaktır.

Kullanıcı sayısına göre sistem değerlendirildiğinde, kullanıcı sayısı arttıkça P2P mimari, P2MP mimarisine göre daha maliyetlidir; çünkü kullanıcı sayısının artması, fazla sayıda veya her kullanıcıya bağımsız bir fiber hattı çekmek demektir. Bu da sistemde optik hat sonlandırıcı donanım sayısının artması demek olup sonlandırıcının kapsayacağı mekan ve yer sorunu da göz ardı edilmeyen bir dezavantajdır.

Noktadan noktaya ve aktif yıldız mimarilerde, her fiber hattı (link) veri akışını sadece iki elektro-optik dönüştürücü arasında taşımaktadır, kullanıcıların da trafik akışı elektriksel çoğullaması sonlandırıcıda gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, optik veri akışının çarpışma riski bulunmamaktadır. Bu noktadan noktaya linkler, basit şekilde uygun maliyetli alıcı-verici (tranceiver) ile gerçekleştirilebilir.

P2MP pasif yıldız (PON) mimarisinde, trafiğin optik çoğullaması pasif güç birleştiricide gerçekleştirilir. Dolayısıyla, verilerin çarpışmasını önlemek gerekmektedir. Bunun için de çoklu erişim teknikleri tasarlanıp geliştirilmiştir. Bu teknikler Bölüm 2.3'te ele alınıp açıklanacaktır.

### 2.2.5. FTTX uygulamaları

Günümüzde, internet kullanımında yüksek bantgenişliği gereksiniminden dolayı, iletişim teknolojilerinde optik haberleşmenin önemi kullanılan optik donanım çeşitleri ve ses, veri ya da video hizmetinin verileceği lokasyona göre uygun altyapı seçimiyle artmaktadır. İnternet kullanımında elde edilen yüksek bantgenişliği sayesinde, internetin kullanım alanları da artmıştır. Eski internet kullanımlarının yerine, artık canlı oyun, canlı video izleme, çevrimçi televizyon ve yüksek boyutlu dosya transferleri gibi çeşitli uygulamalar geçmiştir. Dolayısıyla, gelecekteki sistemlerin optik fiberin doğrudan son kullanıcıya kadar ulaşacağı sistemler olması öngörülmektedir. Bu nedenle optik sistemler haberleşme teknolojisine yön veren en önemli etkenlerdendir [Uzar ve Ünverdi 2014].

Erişim ağ mimarileri değişik topolojilerle son kullanıcıya kadar ulaştırılmaktadır. Bu topolojilerin adlandırılması ise fiberin gideceği son noktaya göre belirlenmektedir. FTTX (x'e kadar fiber) teknolojilerindeki x fiberin gideceği son noktaya göre çeşitlenmektedir.

Örneğin,

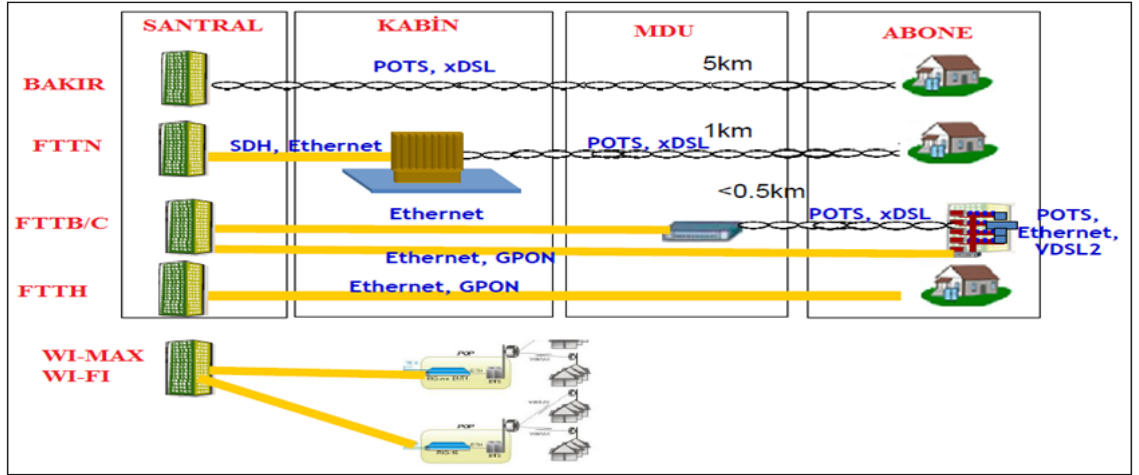
**FTTCab:** saha dolabına kadar fiber.

**FTTC:** kaldırıma kadar fiber; kaldırımdan son kullanıcıya 300 m'ye kadar bakır hat çekilir.

**FTTB:** binaya kadar fiber; bina sınırlarına kadar fiber hattı çekilir bina içine de yerel alan ağı (LAN) ile dağıtılır.

**FTTN:** düğüme kadar fiber; kullanıcıya en yakın sokak birimi olan kabinete (düğüm) kadar fiber çekilir, ondan sonra mevcut bakır hatları ile son kullanıcıya ulaştırılır. Bakır kabloların uzunluğu birkaç kilometreyi bulabilir [Anonim 2011].

**FTTH:** eve kadar fiber; en fazla üzerinde durulan topoloji olup gelecekteki çalışmaların FTTH üzerine olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 2.17'de FTTX uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.17. FTTX uygulamaları

Eve kadar fiber uygulamasının amacı sadece telekomünikasyon hizmeti sağlamak değildir. Ek olarak, interaktif yaşam, evlerin uzaktan kontrol edilmesi ve yönlendirilmesi (smart home), güvenlik sistemlerinin yönetimi ve uzaktan sağlık hizmetlerinin sağlanması gibi değişik hizmetlerinde sunulmasıdır. Kısacası, müşterinin veya kullanıcının tüm ihtiyaçlarını karşılayacak bir altyapı oluşturmaktır.

Türkiyede, FTTH teknolojisine Türk Telekom'un yatırım yaptığı bilinmektedir. İlk olarak 2007 yılında yaklaşık 1200 konutluk Ankara Dikmen Park Vadi Evlerin'de Aktif Ethernet teknolojisi uygulanarak FTTH'in konutlarda uygulanmasına başlanmıştır. 2011 yılında ise kullanıcı sayısı 237,800'e ulaşmıştır, alternatif operatör ise 1000000 kullanıcıya ulaşmak için plan yapmıştır. Yerleşik ve alternatif operatörler, FTTH uygulamasında, ilk başlarda AE teknolojisini sonrasında da pasif mimarinin GPON standardını kullanmıştır. GPON teknolojisi Bursa'da da uygulanmıştır [Çankaya 2012].

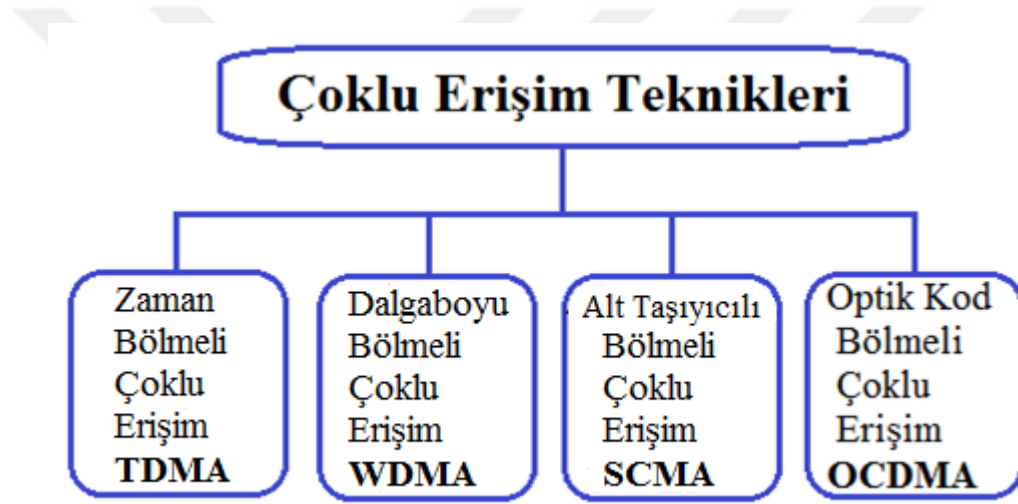
### 2.3. Optik Erişim Ağlarında Çoklu Erişim Yöntemleri

Çoklu erişim teknikleri hakkında bilgi vermeden önce, çoklama/çoğullama hakkında bilgi verilmesinde fayda vardır. Bilginin, aynı iletim ortamı kullanılarak birden çok kaynaktan yine birden çok alıcıya iletilmesine çoklama veya çoğullama denir. Günümüzde artan haberleşme ihtiyacını karşılayabilmek için çoklu iletişim tekniklerini kullanmak, yeni teknikler geliştirmek şart olmuştur. TDMA ve FDMA gibi klasik çoklu iletişim yanında optik kod bölmeli çoklu erişim (OCDMA), alt taşıyıcılı çoklu erişim (SCMA) gibi yeni yöntemler de kullanılmaktadır [Anonim 2007].



Pasif optik ağlarda, besleyici fiber hattı tüm optik ağ birimleri (ONUs) tarafından kullanılmaktadır ve bu birimler optik güç birleştirici/bölüştürücüde toplanmaktadır. Trafiğin dağıtım noktasındaki optik hat sonlandırıcıdan (OLT) optik ağ birimlerine akışına yayım (broadcast) denir ve optik güç birleştirici üzerinden ONU'lara iletilir. Bu yöndeki trafik akışına aşağı yönde trafik akışı denir.

Optik ağ birimlerinden (ONU) dağıtım noktasına giden trafik akışına yukarı yönde trafik akışı denir. Burdaki olası çakışmaların engellenmesi gerekmektedir. Bu çakışmaların engellenmesi de çoklu erişim yöntemleriyle sağlanır. Optik erişim ağları için geliştirilmiş dört ana çoklu erişim yöntemi Şekil 2.18'de gösterilmiştir.

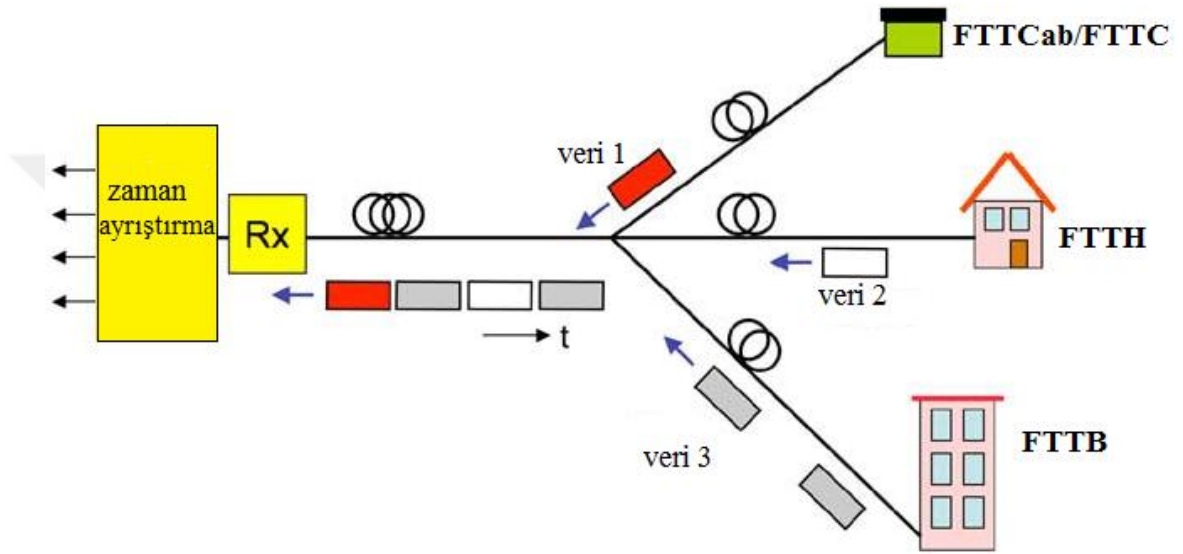


Şekil 2.18. Optik erişim ağları için geliştirilmiş çoklu iletişim yöntemleri

### 2.3.1. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim Yöntemi

Zaman paylaşımlı sistemlerde birbirinden bağımsız birçok kaynaktan gelen bilgiler aynı ortam üzerinden fakat farklı zamanlarda iletilir. Sadece tek bir dalgaboyu gereklidir (tek bir lazer), her kullanıcı kendisine ayrılan süre içerisinde bantgenişliğinin tamamını kullanma hakkına sahiptir. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi TDMA sistemlerde yukarı akış kanalında gönderilen paketler ayrıştırma noktasından itibaren zamana göre sıraya konmuş durumdadır. Bunun için ONU'larda paket iletiminin senkronize edilmesi önem arz eder.

Bu eşleme, merkezi olarak OLT tarafından gönderilen hizmet alma bilgileri ile sağlanır. Bu bilgi ONU'lara ne zaman paket gönderebileceklerini bildirir. Zamanlamanın doğru tahmini ONU'ların merkezi ofise olan uzaklıklarını keşfeden mesafe tayin protokolleri ile sağlanır. Bu şekilde OLT farklı ONU'lardan gelebilecek paketleri hızlıca senkronize eder. Ancak ONU'lar OLT kapasitesini birlikte paylaştıkları için abone sayısının artması durumunda hizmet kalitesi düşüş gösterecektir [Kumdereli 2010].



Şekik 2.19. Zaman bölmeli çoklu erişim

Sistemde ONU'lardan bazılarının çok fazla veri göndermesi gerektiği zamanlarda diğer ONU'larda o kadar veri yok ise bir aboneye ayrılmış olan zaman bir diğer ONU'ya aktarılabilir. Bu özellik dinamik bant genişliği ataması (DBA) olarak bilinir.

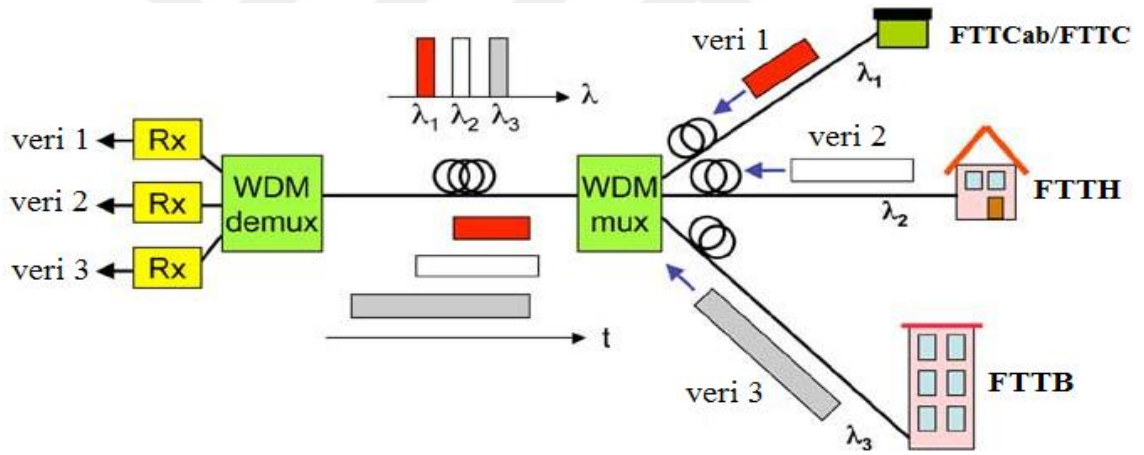
Birçok DBA algoritması bu işlevi sağlayabilmektedir ancak bu işleyle PON etkinliği artırılrsa da kullanıcı istekleri her zaman aynı olmadığı için algoritmaların kontrolü kolay değildir. Örneğin bantgenişliğine ihtiyaç arttıkça, veri göndermek için sırada bekleyen aboneye daha fazla tampon bellek ayrılarak servis kalitesine (QoS) aktarım yapılabilir. Ancak her mimari QoS'yi desteklememektedir.

#### 2.4.2 Dalgaboyu Bölmeli Çoklu Erişim Yöntemi

WDM, PON sistemlerinde kullanılan en önemli çoklu erişim yöntemlerindedir. Bu yöntemle optik sistemlerde farklı dalgaboylarındaki optik ışınlar aynı fiber hat üzerinde taşınabilmektedir. Bu mantıkla geliştirilen WDM-PON sistemlerinde OLT'ye

paketlerini göndermek isteyen her ONU birimi paketleri farklı bir dalgaboyu üzerinden istediği herhangi bir zamanda iletir. Dalgaboyu kanalları PON'un ayrışma noktasına yerleştirilmiş bir çoğullayıcı/birleştirici cihaz aracılığı ile OLT'den ONU'lara ve ONU'lardan OLT'ye olacak şekilde yönlendirilmiştir. Her bir dalgaboyu birbirinden izole edilmiş şekilde çalıştığı için farklı işaretleri taşıyabilirler.

Bu durumda zaman senkronizasyonuna da gerek yoktur. Aynı dalgaboyu çift yönlü ve eşzamanlı olarak kullanılabilir. PON'un ayrışım noktasına konulan ayrıştırıcıdan dolayı geniş bant yayımına ihtiyaç duyan kablolu TV gibi hizmetlerin verilmesi engellenir. Bu teknikte dikkat edilmesi gereken nokta ONU'da kullanılan ayrıştırıcılar için baştan belli bir dalgaboyu tanımlaması yapılması gerekliliğidir. Ayrıca OLT N kullanıcıya ayrı birer bağlantı tanımlayabilmek için N adet ileticiye ihtiyaç duyar. Şekil 2.20'de dalgaboyu bölmeli çoklu erişim yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Dalgaboyu bölmeli çoklu erişim

Yukarı akış kanalında veri iletecek her ONU'nun belirlenmiş bir dalgaboyunda çalışacak bir lazer diyota ihtiyacı vardır. Bu durum WDM-PON'ların maliyetinde artışa neden olmaktadır.

### 2.3.3 Alt Taşıyıcılı Çoklu Erişim Yöntemi

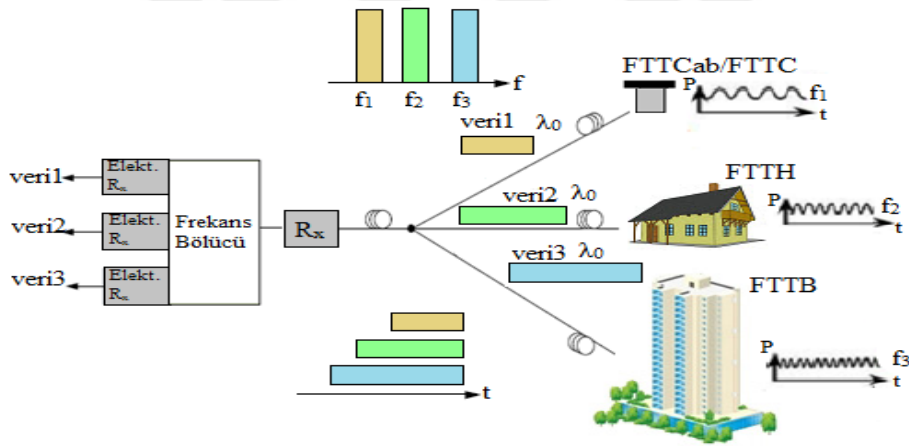
Alt taşıyıcılı çoklu erişim yönteminde değişik ONU'lar paket akışlarını farklı elektriksel taşıyıcı frekanslarına modüle ederler. Her abone yaklaşık olarak aynı frekansta veri gönderir ancak merkezde veriye göre ayrı frekanslarda algılanır. OLT'deki basit alıcı N farklı frekanslı alır ve elektriksel işaret olarak çoğullar. Bu frekanslar sonradan lazer

diyotlarla ışık enerjisine modüle edilir. Böylece paket akışları farklı farklı frekans bantlarına yerleştirilip bu şekilde farklı kanallar üzerinden OLT'ye taşınmış olur (bir kanal yüksek hızda sayısal veri işareti taşıırken diğer kanaldan analog video işareti taşımak mümkündür).

Bu durum N adet kullanıcının tek bir kanal üzerinde ortak dalgaboyunu kullanabilmesine olanak verir. Şekil 2.21'de alt taşıyıcılı çoklu erişim yöntemi gösterilmiştir.

Yani kısaca özetlenirse :

- Çoklu taşıyıcı frekansları (*subcarrier*) elektriksel yolla birleştirilir.
- Yalnızca bir dalgaboyu (*optik taşıyıcı*) gereklidir. (tek bir lazer)
- Fiber üzerinden video işaretlerini taşımak için uygundur.



Şekil 2.21. Alt taşıyıcılı çoklu erişim

### 2.3.4. Optik Kod Bölmeli Çoklu Erişim Yöntemi

4. nesil iletişim tekniği olarak adlandırılan bu erişim türü yüksek hızlarda kablosuz veri iletimini destekleyen bir teknolojidir. Optik kod bölmeli çoklu erişim (OCDMA) yöntemlerinde her kullanıcıya ayrı bir hat tanımlanmayıp her bir ONU kendine özgü bir optik kod kullanır.

Bu kodlama tekniği ile iletilen bilgiler sadece ilgili kullanıcı tarafından çözülüp mevcut spektrumdan farklı abonelere aynı anda hizmet sağlanır. Bu kodlama işlemi, zaman

dilimli ya da spektrum dilimli kod kelimelerini kullanan optik kod bölmeli çoklu erişim yöntemi olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir.

Zaman dilimli OCDMA'da her bir ONU kısa optik darbelerden oluşan farklı imza dizileri kullanır ve bu dizi gönderilecek veri ile birlikte var/yok modüle edilir. Dizi uzunluğunun verideki en az bir bit kadar uzun olması gerekmektedir. Spektrum dilimli OCDMA'da ise her ONU geniş bant bir optik kaynaktan gönderilecek veri ile modüle edilen farklı spektrum dilim kombinasyonları alırlar. OLT de aynı spektrum dilimlerini geçirerek filtre yardımı ile ilgili ONU'lardan gelen veriyi ayırır.

#### **2.4. PON Standartları ve Tarihi Gelişimi**

PON teknolojileri ilk olarak 1980'lerde uzak mesafe telekomünikasyon sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. 1990'ların ortalarında bantgenişliğine olan ihtiyaçtaki hızlı yükseliş optik hatların erişim ağlarında kullanılmasının önünü açmıştır. 1995 yılında Tam Hizmet Erişim Ağı (FSAN) grubunun kurulması ile PON üzerinde çalışmalar yoğun olarak başlamıştır. FSAN grubu, PON topolojisinin ve zaman bölmeli çoğullamanın erişim kontrolünde kullanılması konusunda fikir birliği sağlamıştır.

##### **2.4.1. APON ve BPON**

ITU-T'nin G.983.1 standardı altında yayımladığı ilk PON standardıdır, yüksek bant genişliği gereksiniminin daha fazla olduğu iş çevrelerine hitaben 1995'te geliştirilen ve ATM çalışma prensiplerine dayalı olan ATM PON (APON) olup, bu standartta simetrik olarak 155 Mb/s bantgenişliği elde edilebilmektedir. 1996 yılında ise FSAN tarafından asenkron iletim modunun (ATM) çoklu servisli ağlarda en iyi kapsülleme yöntemi olduğu kararlaştırılmıştır. ATM PON'da da hem ses, hem veri, hem de görüntü iletiminde 53 bayt büyüklüğündeki ATM hücrelerin kullanımı söz konusu olup bu iletimlerde garantili hizmet kalitesi sağlanabilmektedir [Acar 2009].

ATM PON sistemleri veri trafiğinin taşınması için tasarlanmış olmasına rağmen erişim ağlarının hizmet verdiği son kullanıcının ucuz kablolu TV ihtiyacına da hizmet verebilmesi gerekmektedir. G983.3 standardında video servisleri için optik spektrumda bir bölge ayrılmıştır. APON hizmeti ile video servisi hizmetinin sağlayıcı ve kullanıcı

tarafında birbirinden bağımsız olarak çalışabilmesi için dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) yöntemi kullanılmaktadır.

APON teknolojisinin biraz daha öncesine gidilecek olursa Telefon PON (TPON) ismiyle anılan PON çeşidinin olduğu ortaya çıkmaktadır. TPON yapısı kısaca PON ağı üzerinden iletişimin sağlanması olup 256 çift yönlü telefon kanalı, 128 ayırım için yeterli güç hesabı ve güç koruması için CMOS teknolojisini içerir. APON mimarisi zamanla servis sağlayıcılarının ihtiyaçlarını karşılayamaz duruma gelmiştir. Bunun sonucunda 2001 yılında APON sistemleri geliştirilerek Geniş Bant Pasif Optik Erişim Ağı (BPON) tasarlanmıştır ve Uluslararası Telekomünikasyon Birliğinin (ITU) ITU-T G.983 serisi adı altında standartlaştırılmıştır.

BPON mimarisi ise, ATM PON üzerine inşa edilmiş olup tek modlu fiber kullanarak maksimum 20 km mesafede 64 kullanıcıya 622 Mbps aşağı yönde ve 155 Mbps yukarı yönde veri iletimini sağlamak mümkündür. Simetrik BPON'da sağlanan bantgenişliği ise aşağı ve yukarı yönde 155 Mbps olarak görülmektedir. BPON sistemleri paketleme yöntemi olarak ATM yöntemini ve çoklu erişim sağlayabilmek için zaman bölmeli çoklu erişim TDMA yöntemini kullanırlar. BPON aşağı yönde 1500 nm dalgaboyu bandını, yukarı yönde ise 1300 nm dalgaboyu bandını kullanmaktadır. 2005 yılında ITU-T G.983.3 standardında tek fiber üzerinde dalgaboyu bölmeli çoğullama ile 1300 nm dalgaboyunun yukarı akış trafiği, 1490 nm dalgaboyunun da aşağı akış trafiği için kullanılması belirlenmiştir [Aydın ve ark. 2009].

#### **2.4.2. EPON – GEAPON – 10G EPON**

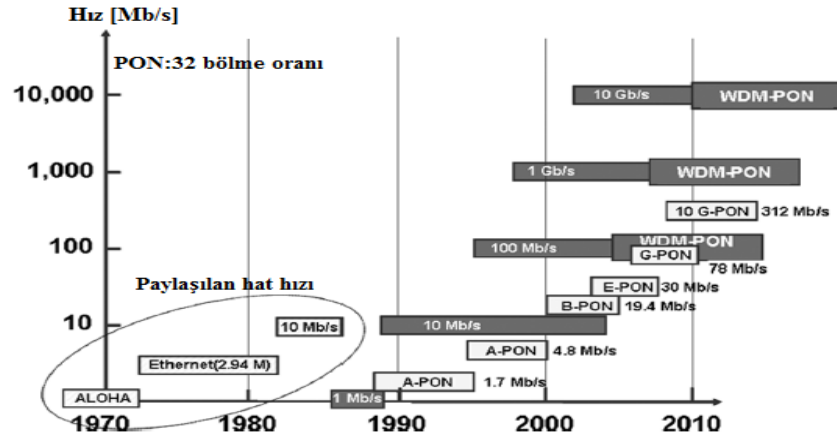
EPON standardı IEEE 802.3ah EFM (Ethernet in the First Mile) grubu tarafından geliştirilmiştir ve 2004 yılında onaylanmıştır. ATM PON sistemlerinden temel farkı, veri iletimi için sabit ATM hücreleri yerine değişken uzunlukta olabilen Ethernet paketleri kullanmasıdır. Yani, ATM PON'da verilerin 5 bayt başlık bilgisinin ve 48 bayt ana bilginin oluşturduğu 53 bayt boyutunda ATM hücreleriyle taşınmalarına karşın; EPON'da verilerin, 1518 bayt üst sınırı içerisinde değişken boyutlarda olabilen Ethernet çerçevesiyle taşınmasıdır.

Yeni nesil şebekelerde verilerin IP paketler halinde taşındıkları ve bu paketlerin 65536 bayt boyutuna sahip olabildikleri düşünülürken, IP paketlerinin ATM PON'dan geçerken 48 bayt büyüklüğünde ATM hücrelere bölünmeleri gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu kapsamda, her bir ATM hücresi, 5 bayt boyutunda başlık bilgisi ihtiva ettiğinden, ATM hücrelerinin başlık bilgileri gereksiz bir yığılma oluşturacaktır. (örneğin 4800 byte büyüklüğünde bir IP paketi ATM PON'dan geçerken 100 adet ATM hücresine bölünecek ve bu işlem sırasında, ATM hücrelerinin başlık bilgilerinin oluşturduğu yığılmanın boyutu 500 bayt olacaktır). Bu yığılma ise, bant genişliğinin azalmasına ve OLT ile ONT/ONU maliyetlerinin artmasına neden olacaktır.

EPON'da haberleşme ATM ailesine mensup olan PON'ların tersine Ethernet ile gerçekleştirilmektedir. EPON sistemler veri iletimi için aşağı ve yukarı akış yönünde sabit uzunluklu çerçeveler kullanır. Her çerçeve değişik ONU'lara ait zaman dilimlerinden oluşur. Ethernet paketleri bu zaman dilimleri içerisinde bölünmeksizin taşınmaktadırlar. Eğer bir Ethernet paketi var olan zaman dilimine giremeyecek boyutta ise bir sonraki dilime kalır. Bu bağlamda, EPON'da simetrik olarak 1.25 Gbps bantgenişliği sağlanabilmektedir. EPON'da 20 km'lik bir alan içerisinde, bir OLT 16 adet ONT/ONU bağlantı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte ses trafiklerinin iletilmesinde VoIP ya da TDM kullanılmaktadır.

Şeki 2.22'de Ethernet ve pasif optik ağların yıllara göre gelişim grafiği gösterilmiştir. EPON'da aşağı akış yönünde 1500 nm dalgaboyu bandı yukarı akış yönünde de 1300 nm dalgaboyu bandı kullanılmaktadır. Gigabit iletimin mümkün olduğu GEPON standardı geliştirilmiş ve her iki yönde simetrik 1.25 Gbps iletme imkanı tanınmıştır. IEEE 802.3av altında, 10 Gbps aşağı akışı ve 1.25 Gbps yukarı akışı olanaklı kılacak 10G-EPON standardı geliştirilmiştir.



Şekil.2.22. Ethernet ve pasif optik ağların yıllara göre gelişimi

### 2.4.3. GPON Standartı

ITU-T G.984 altında geliştirilmiş standart olup BPON standardının takipçisidir. EPON ve BPON'un özelliklerini bünyesinde barındıran, IP tabanlı ve çok yüksek bantgenişliklerinin söz konusu olduğu uygulamalarda kullanılan bir standarttır. GPON'u, EPON'dan ayıran en önemli fark; GPON'un, ses veri ve görüntü trafiklerinin iletilmesinde ATM, Ethernet ve TDM tekniklerinin tümünü desteklemesi ve her hizmete farklı bir şebekenin tahsis edildiği günümüz şebeke yapısından yeni nesil şebekeye geçiş sürecinde her iki şebeke yapısının çalışabilmesine olanak sağlamasıdır.

Erişim ağlarındaki IP trafiğin ATM hücrelere bölünerek taşınması sisteme ek yük getirmektedir. Bu nedenle GPON'da ITU-T, BPON'da kullanılan ATM hücreleri yerine 125 µs'lik çerçeveleme yöntemi kullanılmaktadır. Yani, GPON kapsülleme yöntemini (GEM) esas almaktadır. Bu çerçeveler, içerisinde Ethernet, ATM veya klasik TDM paketlerini taşıyabilmektedir. Kullanılan bu kapsül mekanizması sayesinde GPON sadece Ethernet veya sadece ATM kipinde çalışabilme imkânına da sahiptir.

GPON'da, bir OLT'nin 15 km'lik bir mesafe içerisinde 64 adet, 20 km'lik bir mesafe içerisinde 32 ve 30 km'lik bir mesafe içerisinde 16 adet ONT/ONU'ya bağlantı sağlayabildiği GPON'da 2.5 Gb/s aşağı yönlü ve 1.24 Gb/s yukarı yönlü bantgenişliği sağlanabilmektedir. Bu itibarla, 2.5 Gb/s aşağı yönlü akış söz konusu olduğu ve ayırma faktörünün 32 olduğu bir GPON uygulamasında her bir kullanıcıya 80 Mb/s bantgenişliği sağlanması mümkün olabilmektedir. GPON optik ayraçtaki bölümlenme



oranı 1:128'i yakın gelecekteki uygulamalar için desteklemektedir. Çizelge 2.3'te PON standartlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 2.3. PON standartlarının karşılaştırılması

	BPON	GE-PON	G-PON
Standart	ITU-T G.983	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984
Alım Veri Hızı	622 Mbps	1.25 Gbps	2.4 Gbps
Gönderim Veri Hızı	155 Mbps	1.25 Gbps	1.2 Gbps
İletim Formatı	ATM	Ethernet	Ethernet + TDM +ATM

#### 2.4.4. NGPON

FSAN, NGA (Next Generation Access) grubu GPON standardı üzerinden yeni nesil optik erişim ağı standardı geliştirmeye çalışmaktadır. Yeni nesil erişim ağı standardı için birçok mimari ve teknolojik gelişmeleri incelemektedir (WDM kullanımı, 10 Gbps iletim, Optik yükselteçler v.b.). Geliştirilecek yeni standardın şu an kullanımda olan GPON ve GEAPON sistemlerle uyumlu olması gerekmektedir.

FSAN grubu sürekli olarak mevcut standartları geliştirme eğilimindedir. Dağıtım oranının azaltılarak kapasite artırmaya yönelik yapılan çalışmaların sonucu olarak ölçeklenebilir bantgenişliğinin, uzak mesafeye erişimin mümkün olduğu ve her bir dalgaboyu için ayrı ayrı çalışma hızının ve ayrışma oranının ayarlanabilir olduğu dalgaboyu bölmeli çoğullama yöntemine dayanan pasif optik ağ (WDM-PON) teknolojisi geliştirilmiştir. Ancak bu avantajlarının yanı sıra kapasite ihtiyacı 1 Gbps altında olan ev kullanıcıları için WDM-PON, GPON ve EPON sistemlere göre daha pahalıdır. 2008 yılından itibaren WDM-PON'lar, Kore Telekom (KT) tarafından abonelere geniş bant hizmetler sunabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca Kore'de 2007 yılından itibaren devlet destekli olarak melez PON (WDM-TDM-PON) üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir [Takai ve Yamauchi 2008].

## 2.5. Gelişmiş ve Yeni Nesil PON Çalışmaları

PON sistemlerinin kapasitesini, erişim mesafesini ve erişilen kullanıcı miktarını arttırmak için dünyada birçok çalışma grubunda araştırmalar yapılmaktadır. Daha uzak mesafelere erişebilecek PON sistemleri için yapılan çalışmaların özeti bu bölümde anlatılacaktır. Uzun mesafeli erişim ağlarının tasarlanması ile elde edilecek en önemli artılar; ara düğüm elektronik elemanların azaltılması ve ağın daha basit bir yapıya indirgenmesidir. 100 km uzunluğunda fiber altyapı kullanılarak erişim ağları ile metro ağların yerini alacak bir PON sistemi kurulabilir. Bunun için düşünülen genel yapılarda son kullanıcılar bir PON sistemi ile yerel değişim noktalarına bağlanacak ve bu yerel değişim noktaları ile merkez ofis arasında yüksek kapasiteli fiber hat bulunacaktır.

Şu anda var olan PON standartları 20 km mesafede 16 (BPON), 32 (EPON), 64 (GPON) ayrımla çalışabilmektedir. PON sistemlerin daha fazla kullanıcıya hizmet verebilmesi için daha fazla ayrıştırma yapabilecek sistemler tasarlanmaktadır. Ayrıştırma oranının artması aşağı akıştaki iletilen optik işaretin gücünde azalma meydana getireceğinden ayrıştırma oranını artırmak için optik yükselteçlere ihtiyaç duyulmaktadır.

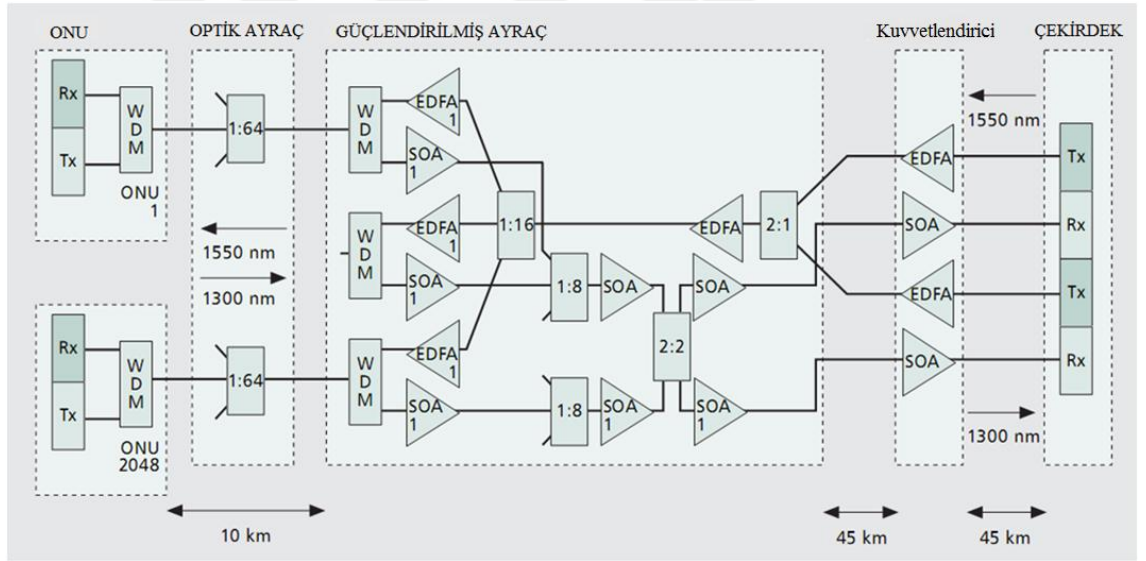
Ayrıca yerel değişim noktaları ile merkez ofis arasında kalan uzun mesafe fiber hatta taşınan verinin de işaret gücündeki azalmayı gidermek için optik yükselteç ihtiyacı vardır. Ayrıştırmayı ve mesafeyi artırabilmek için gerekli güç ihtiyacını karşılamak için çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir: GPON genişletme kutusu, yarıiletken optik yükselteç, praeosdminum/thulium fiber yükselteç, transponder. Geleceğin PON sistemleri için yaygın olarak, 1530-1600 nm aralığında etkin kullanılabilen EDFA (erbium doped fibre amplifier) yükseltecinin kullanımı tasarlanmaktadır.

EDFA kullanımı ile 10 Gbps iletim hızında 100 km mesafeye erişebilen PON sistemlerinin kurulabilmesi mümkün görülmüştür. Ayrıştırma oranını ve hattın taşıma kapasitesini arttırmak için üzerinde çalışılan diğer bir konu da dalgaboyu bölmeli çoklu erişim yöntemi WDMA ile zaman bölmeli çoklu erişim TDMA yönteminin birlikte kullanılmasıdır. Bu bölümün devamında yeni nesil PON sistemleri geliştirmek için yürütülen iki çalışmaya değinilecektir.

### 2.5.1. PLANET Super PON

Yapılan çalışmalar FTTH(Fiber to the Home) tekniğinin FTTC (Fiber to the Cabinet) tekniğinden daha uygun olduğunu ortaya koymuştur. FTTH'ın kurulumunda daha fazla fiber döşenmesi gerekirken FTTC sistemlerde bakıma ihtiyaç duyacak sokak ünitelerinin (kabin) kullanılması gerekir. Burada FTTH sistemler aktif cihazların bakım maliyetini son kullanıcıya bıraktığından geniş kapsamda işletme maliyeti bakımından avantajlıdır. 100 km mesafede 2048 ayrıştırma ile hizmet verebilecek bir PON sisteminin kurulumu amaçlanmıştır. Bunun için BPON standardının 32 olan ayrıştırma miktarının 1024'e çıkarılması ve erişilebilen maksimum mesafeyi 20 km'den 100 km'ye çıkarılması planlanmıştır.

Ayrıştırma miktarının artırılması ve mesafedeki artışı sağlamak için yükselteçler kullanılmaktadır. Super PON'un temel mimari tasarımı Şekil 2.23'te görülmektedir.



Şekil 2.23. Super PON'un genel mimari tasarımı

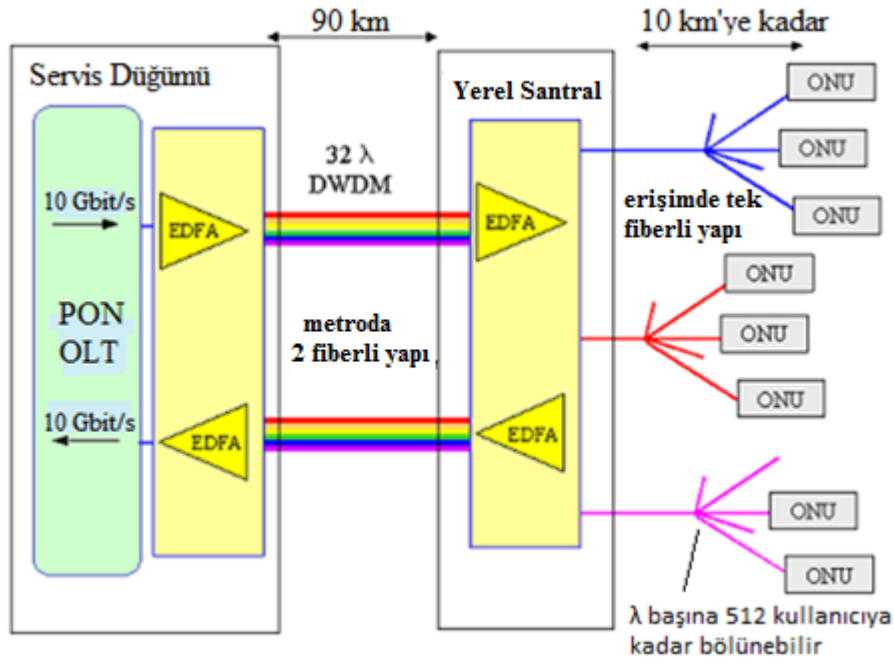
### 2.5.2. PIEMAN Mimarisi

PON sistemlerinin geliştirilmesi üzerine çalışan bir başka çalışma grubu da PIEMAN'dır(www.ist-pieman.org). Birbirinden bağımsız kullanıcıların doğrudan 10 Gbps aşağı akış ve 10 Gbps yukarı akış erişimine sahip olacağı bir erişim ağı tasarlamayı amaçlamaktadır. Erişim ağlarının ulaşabileceği mesafeyi arttırarak, erişim

ve metro ağları birleştirmeyi, böylece ağ üzerindeki optik-elektronik dönüşümünü azaltmayı hedeflemektedir.

Tasarlanan sistemin temel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir :

- Her kullanıcıya her iki yönde 10 Gbps erişim imkanı sağlanacak
- Her 10 Gbps taşıma kapasiteli dalgaboyu için 512 ayrı kullanıcıya hizmet verilebilecek
- DWDM teknolojisinden faydalanarak arka plan ağında her biri 10 Gbps taşıma kapasitesine sahip 32 dalgaboyunda veri iletimi yapılabilecek
- Optik yükselteçler kullanılarak optik-elektronik dönüşüm olmaksızın 100 km mesafeye kadar hizmet verilecek

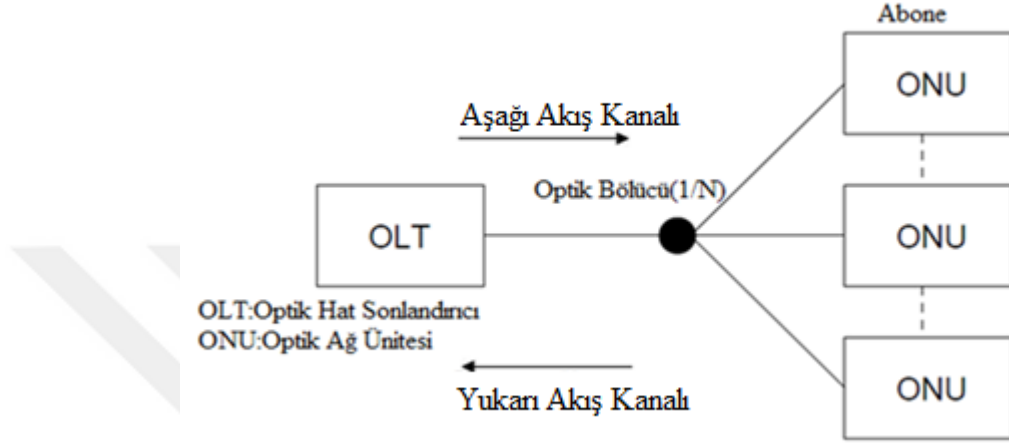


Şekil 2.24. PIEMAN mimarisi

PIEMAN'ın temel mimarisi şekil 2.24'te görülmektedir. PIEMAN projesi oluşturulacak sistemin sadece fiziksel katmanı ile ilgilenmektedir. Daha üst katmanlardaki düzenlemeler MUSE çalışma grubu tarafından yürütülmektedir.

## 2.6. Pasif Optik Ağ Sistem Tasarımı

Bir PON sistemi, Şekil 2.25'te görüldüğü gibi OLT (Optical Line Termination, Optik Hat Sonlandırıcı), ONU (Optical Network Unit, Optik Ağ Ünitesi), OLT ve ONU'lar arasında bilgi akışını bölümleyen ve birleştiren optik ayraç ve bu cihazları birbirine bağlayan fiber kablolardan meydana gelir [Kayhan 2015].



Şekil 2.25. Pasif optik ağ bileşenleri

### 2.6.1. OLT ve ONU/ONT

Merkez ofise yerleştirilen OLT cihazı merkezi ekipmandır ve verinin optik dağıtım ağı boyunca çift yönlü olarak iletilmesini sağlar. Başka bir deyişle OLT cihazı aşağı yönde şehir içi ağdan aldığı ses, veri ve video trafiğinin tüm ONU cihazlarına, yukarı yönde ise farklı içerikteki verilerin şehre içine dağıtılmasından sorumludur. OLT cihazları, son kullanıcılardan gelen bütün trafiğin toplanıp gerekli yerlere aktarıldığı istasyondur. ONU/ONT, kullanıcılar ile PON arasındaki ara yüz olup ayırıcılar OLT'den gelen optik işaretleri her bir ONU/ONT'da elektriksel işaretlere dönüştürür.

ONU/ONT sonrasında erişim, bina içinde bakır veya optik fiber kablo üzerinden sağlanır. Diğer bir ifadeyle OLT kapasitesi, ayırıcı üzerinden her bir ONU/ONT'ya paylaşılır. OLT, kendisine bağlı olan ONU/ONT'lara ses, veri veya görüntü içerikli aşağı ve yukarı akış trafiklerinin her biri için farklı dalgaboylarındaki işaretler kullanır. OLT cihazlarında abonelere iletilecek işaretin sağlığı açısından optik güç ölçümü yapan birimler bulunmak zorundadır. OLT'de bulunan OLT kasası güç kaynağı, fan ve kart

yuvalarından oluşur. Yukarı kanal kartı, PON ve kontrol modüllerinden oluşup ONU'lerden aldığı veri trafiğini uygun şekilde yüksek hızlarda anahtarlayarak şehir içi ağa doğru yönlendirir.

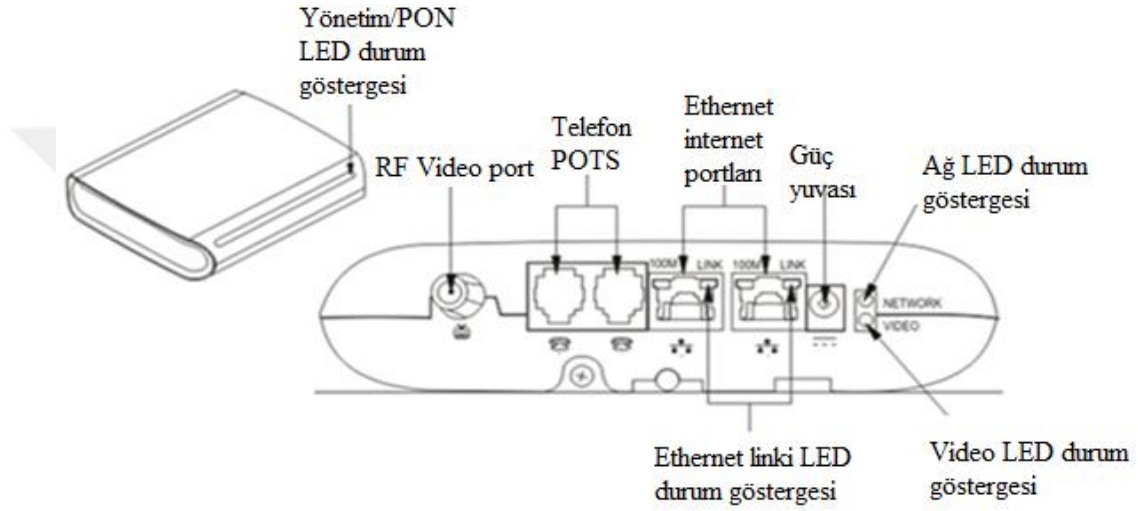
Türk Telekom, Ericsson EDA 1500 OLT cihazını kullanmaktadır. Şekil 2.26'da örnek OLT cihazı gösterilmiştir. Bu cihaz GPON sistemler için tasarlanmış olup Ericsson 1500 platformunda port yoğunluğu ile ilgili olarak yeni kriterler belirlenmiştir. 16 portlu bir GPON OLT kartı, 14000 'den fazla FTTH abonesine geniş bant hizmetler sağlayabilir özelliğindedir. Bu port yoğunluğu merkez ofis alanının küçülmesini, port maliyetlerinin ve hat başına güç profiline azalmasını sağlayarak ekonomik olarak önemli tasarruflar getirmiştir. OLT cihazı geniş bant erişim ekipmanları ile yüksek hızlı, zengin çoğul ortam içerikli yeni nesil IP tabanlı ağlar için basit, akıllı ve ölçeklenebilir çözümler getirmektedir [Kayhan 2015].



Şekil 2.26. Ericsson OLT

ONU birimi son kullanıcının ilk olarak erişebildiği, merkez ofisten gelen trafiğin aboneye aktarıldığı ve abone isteklerini merkez ofise taşıyan ekipmandır. ONU doğrudan kullanıcının evine ya da işyerine yerleştirilir ve gerekli elektriksel-optik dönüşümleri sağlayarak ağ içerisinde bağlantı noktası oluşturur. ONU birimi verilecek hizmete bağlı olarak farklı haberleşme servislerini sağlayabilir.

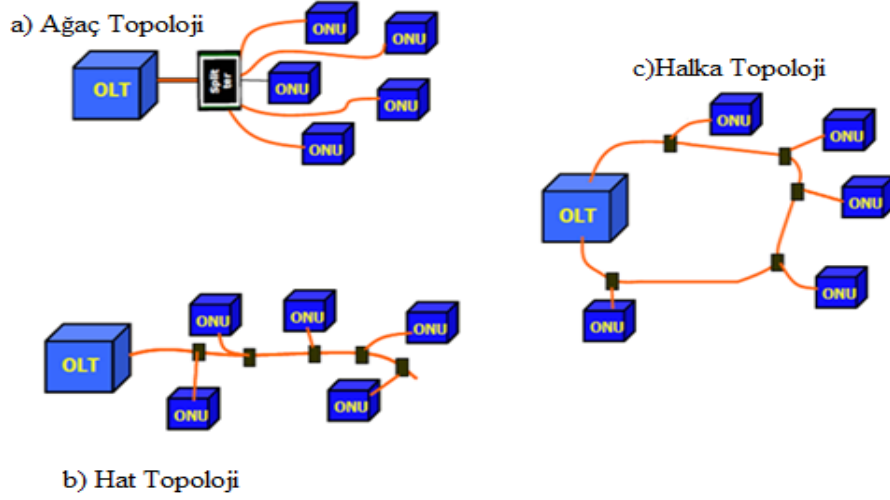
Örneğin Şekil 2.27’de görüldüğü gibi iki port’tan telefon çıkışı sağlanmaktadır. OLT’den çıkan optik bilgi, bölücü ile tüm ONU’lara dağıtılır. ONU’lar gelen bilgiyi eğer kendisine gönderilmiş ise alıp işler. ONU’ların kendine ait olmayan bilgiyi de alma durumu olduğundan geliştirilecek servislerin giden paketlerin gizliliğini sağlaması gerekir. Diğer taraftan tüm ONU’lardan OLT’ye iletimde tek bir fiber hattın kullanılması gerektiğinden gönderilen verilerin hat üzerinde çakışmasını engelleyecek çoklu erişim sisteminin kullanılması gerekir.



Şekil. 2.27. ONU birimi

ONU cihazı evlerde kullanılan ve köprü görevi gören kablolu modem cihazlarına eşdeğer görülmektedir. VoIP destekli bu cihazlar internet hattı üzerinden telefon hizmetlerini de destekler [Kayhan 2015].

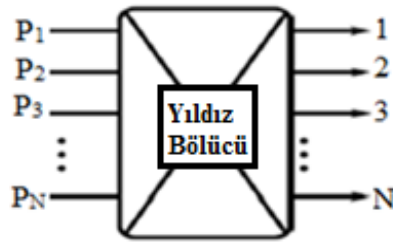
Pasif optik ağlarda hat (ortak yol) topolojisi, halka topolojisi, ağaç topolojisi ve örgü topoloji gibi yapılar abone yerleşimlerinin fiziksel özellikleri, çevre şartları ve maliyet göz önünde bulundurularak kullanılmaktadır. Şekil 2.28’de pasif optik ağ topoloji çeşitleri verilmiştir.



Şekil 2.28. PON topoloji çeşitleri

### 2.6.2. Optik Bölücüler

OLT ile ONU'lar arasındaki çoklu bağlantılar optik bölücüler ile sağlanmaktadır. Optik bölücülerin tek girişi birden çok çıkışı bulunur. Optik bölücüdeki çıkış noktası sayısı  $2^n$  olup optik güç bu çıkışlar arasında paylaşılır. Optik bölücüler çift yönlü olarak çalışan cihazlardır. Bu yüzden ayırıcı ya da birleştirici olarak isimlendirilebilirler. Çıkış noktalarındaki optik işaret gücü, giriş gücüne ve bölücü oranına bağlı olarak  $n \times 3.5$  dB oranında bir azalma gösterir. Optik işaret her yönde aynı miktarda azalır. Şekil 2.29'da  $N \times N$  yıldız optik bölücü yapısı gösterilmiştir [Kayhan 2015].



Şekil 2.29.  $N \times N$  optik bölücü

Yıldız bölücü tüm dalgaboylarını eşit olarak böler. Böylece her bir  $N$  çıkışı giriş gücünün  $1/N^2$ 'ini alır.



Bölme oranına göre optik bölücü kayıpları Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Bölme oranına bağlı olarak bölücü kayıpları

Bölme Oranı	Bölücü Kaybı (dB)
1:2	3.01
1:4	6.02
1:8	9.03
1:16	12.04
1:32	15.05
1:64	18.06

## 2.7. Optik Fiberde Doğrusal Olmayan Etkiler ve Pasif Optik Ağlarda Dört Dalga Karışımı Olayı

Bu alt bölümde, öncelikle optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler açıklanacak, daha sonra ise yüksek lisans tezinin ana konusu olan ve bu doğrusal olmayan etkilerin en önemlilerinden birisi olan dört dalgalı karışım olayının pasif optik ağlardaki etkisine değinilecektir.

### 2.7.1. Optik Fiberde Doğrusal Olmayan Etkiler

Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler ortam kırılma indisinin ışık yoğunluğuna bağımlılığından ve elastik olmayan saçılmadan kaynaklanmaktadır.

Optik fiberin kırılma indisinin ışık yoğunluğuna bağımlılığı optik Kerr etkisi olarak da bilinir. Optik Kerr etkisi göz önüne alındığında fiber kırılma indisi

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

ile ifade edilir. (2.1)'de  $n_0$  doğrusal kırılma indisi  $n_2$  doğrusal olmayan kırılma indisi ve  $I$  optik yoğunluktur. Optik Kerr etkisinden kaynaklanan doğrusal olmayan olaylar, öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM) ve dört dalga karışımı (FWM) olaylarıdır. Optik fiberdeki elastik olmayan saçılma etkilerinden kaynaklanan olaylar ise uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve uyarılmış Brillouin saçılması (SBS)'dir.

### 2.7.1.1. Öz Faz Modülasyonu (SPM)

SPM, fiber içerisinde ilerleyen ışık darbesinin kendi yoğunluğundan dolayı spektrumunu genişletmesi durumudur. Bu spektrum genişlemesi, malzeme dispersiyonu ile beraber darbenin zamansal genişliğinde de bir değişime yol açar. Bu doğrusal olmayan genişleme fiberin kromatik dispersiyonu sayesinde dengelenebilir ya da daha da büyüyebilir.

### 2.7.1.2. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)

XPM de SPM'e benzer etkiye sahip olmakla beraber XPM'de bir yerine en az iki adet optik dalga mevcuttur. Dalgalardan birinin yoğunluk modülasyonu diğerinde faz modülasyonu oluşturur. XPM, WDM tekniğinin kullanıldığı sistemlerde iletim performansını etkileyen önemli bir doğrusal olmayan olaydır. Bu tür sistemlerde, bir kanalın doğrusal olmayan faz kayması, XPM nedeniyle, sadece o kanalda iletilen güce bağlı olmayıp diğer kanallarda iletilen güç ile de ilişkilidir.

### 2.7.1.3. Dört Dalga Karışımı Olayı (FWM)

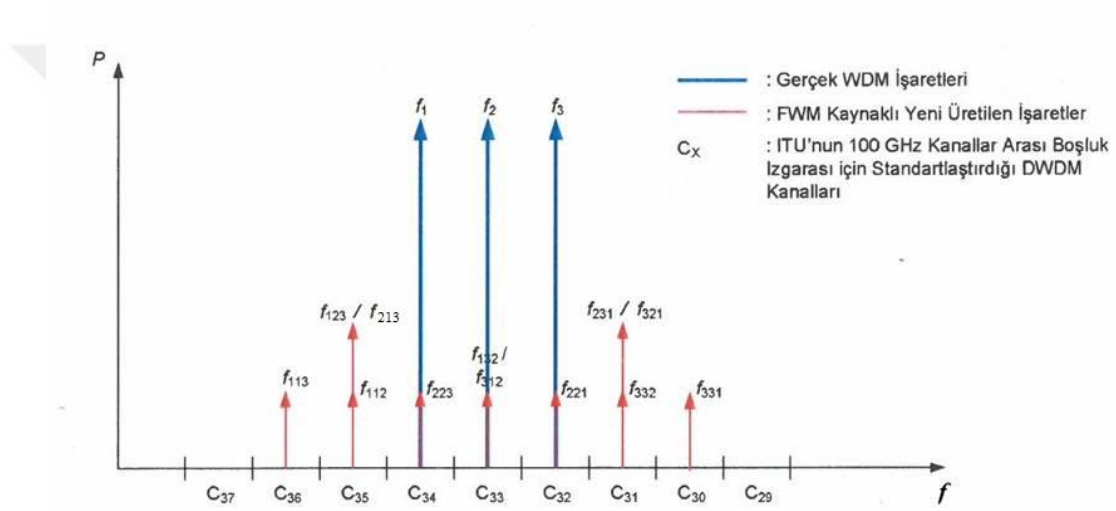
FWM olayı, fiberde yayılan  $f_i$ ,  $f_j$  ve  $f_k$  gibi değişik frekanslı üç optik dalganın, malzemenin 3. derece doğrusalsızlığı nedeniyle birbirleriyle etkileşmesi ve bu etkileşim sonucunda  $f_{ijk}$  frekanslı yeni bir dalganın üretilmesidir. FWM etkisi,

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (2.2)$$

ile matematiksel olarak açıklanabilir. (2.2)'de yeni bir frekanslı işaret üretilmesi için gereken şart  $k \neq i, j$  ile tanımlanabilir. Çok kanallı bir WDM sisteminde  $i, j$  ve  $k$  indisleri üç farklı kanalı göstermektedir.

FWM, doğrusal olmayan olayların en önemlilerinden birisidir. Yeni üretilen dalgaların etkin bir şekilde oluşması, etkileşimde bulunan üç optik işaretin aralarındaki faz uyumuna son derece bağlıdır. WDM sistemlerinde de faz uyumu şartı bulunduğu için, bu sistemlerde FWM olayının etkisi neticesinden meydana gelen çapraz karışım, işaret gürültü oranı SNR'yi ciddi bir şekilde etkilemektedir.

WDM sistemlerinde kanallar arası boşlukların eşit olması durumunda, FWM olayı nedeniyle oluşan yeni frekanslı işaretler mevcut kanallardaki işaretlerle faz uyumlu girişimde bulunabilirler. Kanallar arası boşluk değerlerinin farklı olması durumunda ise, bir çok FWM ürünü bu boşluklara düşer ve toplam gürültüye eklenir. Sistem performansı her iki durumda da olumsuz etkilenir. Ancak çapraz karışımın faz uyumlu yapısından dolayı kanallar arasındaki boşlukların eşit olması durumunda alıcıdaki işaret gürültü oranı daha da düşer. Şekil 2.30'da kanallar arası boşluğun eşit ve 100 GHz olduğu 3 kanallı bir DWDM sisteminde FWM olayı neticesinde oluşan ürünler gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Kanallar arası boşluğun eşit ve 100 GHz olduğu 3 kanallı bir DWDM sisteminde FWM olayı neticesinde oluşan ürünler [Hiçdurmaz 2013].

WDM sistemlerinde FWM olayı neticesinde oluşan toplam ürün sayısı kanal sayısına bağlıdır. N-kanallı WDM sisteminde oluşan toplam ürün sayısı M

$$M = \frac{N^2(N-1)}{2} \quad (2.3)$$

ile hesaplanabilir.

Üretilen bir FWM işaretinin gücü

$$P_{\text{FWM}}(f_{ijk}) = \left( \frac{d_{ijk}\gamma L_{\text{eff}}}{3} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (2.4)$$

ile bulunabilir. (2.4)'te  $d_{ijk}$  dejenerasyon faktörü ( $i = j \neq k$  ise  $d_{ijk} = 3$  ve  $i \neq j \neq k$  ise  $d_{ijk} = 6$ ),  $\gamma$  doğrusalsızlık katsayısı,  $L_{\text{eff}}$  fiberin etkin uzunluğu,  $P_i$ ,  $P_j$  ve  $P_k$  kanalların giriş güçleri,  $\eta_{ijk}$  FWM etkinliği,  $\alpha$  fiberin zayıflama katsayısı,  $L$  fiber uzunluğudur.

Doğrusalsızlık katsayısı  $\gamma$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (2.5)$$

ile tanımlanabilir. (2.5)'te  $n_2$  doğrusal olmayan kırılma indisi,  $\lambda$  çalışma dalga boyu,  $A_{\text{eff}}$  fiberin etkin alanıdır.

Fiberin etkin uzunluğu  $L_{\text{eff}}$

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

ile elde edilebilir. (2.6)'da,  $\alpha$  fiberin zayıflama katsayısı,  $L$  fiberin uzunluğudur.

FWM'in etkinliği  $\eta_{ijk}$

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta B_{ijk}^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \sin^2 \left( \frac{\Delta B_{ijk} L}{2} \right) \right] \quad (2.7)$$

ile tanımlanabilir. (2.7)'de  $\Delta B_{ijk}$  faz uyumsuzluğu faktörüdür.

$$\Delta B_{ijk} = \frac{2\pi \lambda c^2}{c} (|f_i - f_k| |f_j - f_k|) \left[ D_c + \frac{\lambda c^2}{2c} \frac{dD_c(\lambda c)}{d\lambda} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (2.8)$$

(2.8)'de  $\lambda_c$  merkez kanal dalga boyu,  $c$  ışığın boşluktaki hızı,  $D_c$  fiberin kromatik dispersiyon katsayısı,  $dD_c(\lambda c)/d\lambda$  kromatik dispersiyon eğimidir.

FWM olayının WDM sisteminin belli bir kanalındaki işaret iletimi üzerindeki etkisini gösteren önemli bir parametre, işaret çaprazkarışım oranıdır (SXR). SXR

$$SXR=10 \log_{10} \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{FWM}}} \quad (2.9)$$

ile hesaplanabilir. (2.9)'da  $P_{\text{çıkış}}$  giriş gücü  $P_{\text{giriş}}$  olan WDM kanalının çıkış gücü ( $P_{\text{çıkış}} = P_{\text{giriş}} \cdot e^{-\alpha L}$ ),  $P_{\text{FWM}}$  ilgili kanalda çapraz karışım oluşturan tüm FWM ürünlerinin toplam gücüdür [Hiçdurmaz 2013].

#### **2.7.1.4. Uyarılmış Raman Saçılması (SRS)**

Optik fiberdeki elastik olmayan saçılmalardan SRS, fiberin moleküler titreşimi titreşimi ile fotonların etkileşiminden meydana gelir. Hem ileri hem de geri yönde oluşabilir ancak geri yönde saçılma optik izolatörler ile yok edilebildiğinden ileri yönde saçılma daha önemlidir. Raman kazanç katsayısı Brillouin kat saçılmasından 1000 kat daha küçük olup tek kanallı sistemlerde Raman saçılması için eşik güç değeri 1 W civarında bulunduğu için tek kanallı sistemlerde SRS etkisi ihmal edilebilir. Fakat SRS'nin 12 THz kazanç bantgenişliği WDM sistemlerinde farklı kanalların etkileşime girerek çapraz karışım oluşturmaya sebebiyet verebilir.

#### **2.7.1.5. Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS)**

Optik fiberdeki elastik olmayan saçılmalardan bir diğeri de SBS'dir. SBS, fiber içerisinde ilerleyen optik dalgalarla akustik dalgaların etkileşiminden kaynaklanır ve sadece geri yönde meydana gelir. SBS'nin SRS'ye göre daha dar olan kazanç bantgenişliği, WDM sistemlerinde kanallar arası etkileşimi engeller. SBS'nin oluşmaması için gereken şart her bir kanalda iletilen işaret gücünün SBS eşik gücünden daha az olmasıdır. SBS optik fiberli iletişim sistemlerinde, iletim performansını etkilemesine rağmen, genellikle diğer doğrusal olmayan olayların sistem kısıtlamaları üzerindeki etkisi daha belirgindir.

### 2.7.2. FWM Olayının WDM-PON Sistemlerdeki Etkisi

WDM sistemler genel olarak çift yönlü uzak mesafeli telekomünikasyon sistemlerinde ve erişim ağlarında optik işaret iletiminde kullanılır. Bu sistemlerde kullanılmasının nedeni, optik ağlarda yüksek iletim kapasitesi, yüksek veri hızı ve esneklik sağlamasıdır. Kullanıcı sayısı arttıkça, 1991'ların ortasında DWDM, ikinci milenyum başlangıcında da UDWDM sistemleri hakkında araştırma alanlarının önü açılmıştır.

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği tarafından belirlenen DWDM cihazında kanallar arası boşluklar 1000 GHz'den daha düşüktür. DWDM uygulamaları için kanallar arası boşluk değerleri günümüzde 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olarak belirlenmiştir. DWDM sistemlerde kullanılan kanallar arası boşluk 12.5 GHz'in altında ise o zaman sistem UDWDM adı verilir.

DWDM ve UDWDM sistemlerinin gelişimi sayesinde veri hızı ve optik giriş gücü seviyesi artmıştır. Aynı zamanda kanallar arası boşluk mesafesi azalmıştır. Dolayısıyla doğrusal olmayan optik olayların sistem üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Tüm bu olayların arasında, FWM DWDM ve UDWDM sistemlerinin performansını kısıtlayan en ciddi faktörlerden biridir.

FWM olayında üretilen yeni optik frekanslı işaretlerin çapraz karışım oluşturduğu DWDM/UDWDM sistem kanallarında, işaret gürültü oranı (SNR) etkilenmekte ve bit hata oranında (BER) artışlar meydana gelmektedir. Dolayısıyla DWDM ve UDWDM yöntemlerini kullanan uzak mesafeli sistemlerde ve pasif optik erişim ağlarında FWM olayının etkisi iyi analiz edilmeli ve bu olayı azaltmanın yolları araştırılmalıdır.

Bu nedenle, bu yüksek lisans tezinde, DWDM/UDWDM-PON sistemleri üzerindeki FWM etkisine odaklanılmış ve bu etki hem yukarı yönlü hem de aşağı yönlü iletim kanallarında analiz edilmiştir. Sistem modellemesinin zorluğu ve karmaşıklığından dolayı, bu tezde DWDM/UDWDM-PON sistemlerindeki FWM etkisi 7, 15, 29 ve 35 kanallı sistemler için modellenmiş ve benzetimler yoluyla incelenmiştir. Kanallar arası boşluk değeri olarak 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz kullanılmıştır.

Belirtilen sistemlerde FWM olayının en etkili ve yoğun olduğu kanallar merkez kanallar olup bu nedenle sırasıyla 4., 8., 15. ve 18. kanallara odaklanılmıştır. İncelenen sistemlerdeki fiber kablo tek modlu G.625 SSMF kablodur.

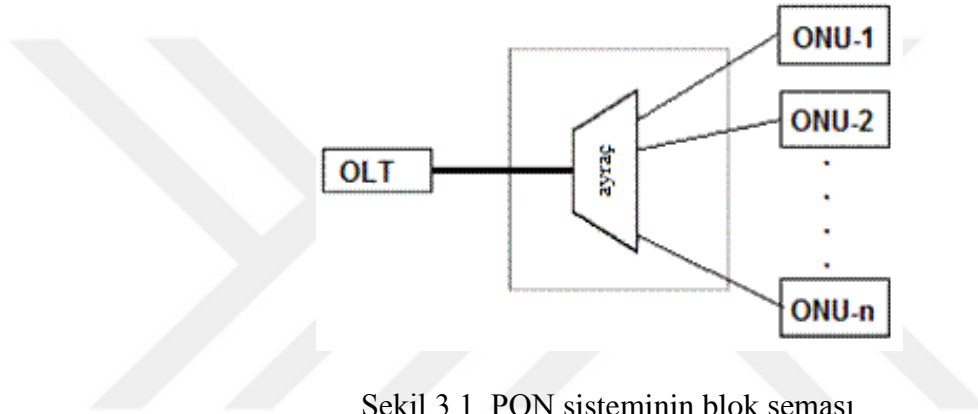


### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Benzetim Modeli

Bu alt başlıkta, PON ağlar için MATLAB ortamında gerçekleştirilen benzetimlerde kullanılan benzetim modeli ve optik fiber tasarım parametreleri açıklanmıştır.

Değişik kanal sayıları kullanılarak PON ağlarındaki doğrusal olmayan olaylardan dört dalga karışımı olayı gözlemlenmiştir. PON ağ yapısında, sistemin OLT ve optik bölücü / birleştirici arasındaki bölüm modellenip analiz edilmiştir. Şekil 3.1'de benzetimlerde kullanılan PON sisteminin blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. PON sisteminin blok şeması

OLT ve ONU'lar arasında kullanılan fiber kablo tek modlu G.652 optik fiberli kablodur. Kullanılan kablonun parametreleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Benzetimlerde kullanılan G.652 standartlı tek modlu fiber kablonun parametreleri.

Bilgi akış yönü	Dc (ps/nm.km)	S (ps/nm <sup>2</sup> .km)	$\gamma$ (1/W.km)	$\alpha$ (dB/km)
Yukarı yön	-0.26	0.086	1.54	0.35
Aşağı yön	12.72	0.086	1.35	0.22

PON ağlarındaki FWM olayı 7, 15, 29 ve 35 kanallı ağ yapıları üzerinde incelenmiştir. FWM etkisi en yoğun olan merkez kanallarda yani, sırasıyla, 4., 8., 15. ve 18. kanallarda test edilmiştir. Bu kanallarda oluşan FWM ürünleri, sırasıyla, Çizelge 3.2-3.5'te verilmiştir.



Çizelge 3.2. 7-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri

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

Çizelge 3.3. 15-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri

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

Çizelge 3.4. 29-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri

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

Çizelge 3.5. 35-kanallı sistemin merkez kanalında oluşan FWM ürünleri

i\j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35						
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	k=17	k=18						
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	k=18	k=19						
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	k=19	k=20						
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	k=20	k=21						
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	k=21	k=22						
6															k=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	k=17	k=18	k=19	k=20	k=21	k=22	k=23				
7															k=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	k=17	k=18	k=19	k=20	k=21	k=22	k=23	k=24			
8															k=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	k=17	k=18	k=19	k=20	k=21	k=22	k=23	k=24	k=25		
9															k=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	k=17	k=18	k=19	k=20	k=21	k=22	k=23	k=24	k=25	k=26	
10															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	k=17	k=18	k=19	k=20	k=21	k=22	k=23	k=24	k=25	k=26	k=27	
11															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	k=19	k=20	k=21	k=22	k=23	k=24	k=25	k=26	k=27	k=28		
12															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	k=21	k=22	k=23	k=24	k=25	k=26	k=27	k=28	k=29			
13															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	k=23	k=24	k=25	k=26	k=27	k=28	k=29	k=30				
14															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	k=25	k=26	k=27	k=28	k=29	k=30	k=31					
15															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	k=27	k=28	k=29	k=30	k=31	k=32						
16															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	k=29	k=30	k=31	k=32	k=33							
17															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	k=31	k=32	k=33	k=34								
18																																									
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	k=32	k=33	k=34	k=35						
20																				k=22	k=23	k=24	k=25	k=26	k=27	k=28	k=29	k=30	k=31	k=32	k=33	k=34	k=35								
21																					k=24	k=25	k=26	k=27	k=28	k=29	k=30	k=31	k=32	k=33	k=34	k=35									
22																					k=26	k=27	k=28	k=29	k=30	k=31	k=32	k=33	k=34	k=35											
23																					k=28	k=29	k=30	k=31	k=32	k=33	k=34	k=35													
24																					k=30	k=31	k=32	k=33	k=34	k=35															
25																					k=32	k=33	k=34	k=35																	
26																					k=34	k=35																			
27																																									
28																																									
29																																									
30																																									
31																																									
32																																									
33																																									
34																																									
35																																									

Çizelge 3.2-3.5'te i, j ve k etkileşerek merkez kanal frekansına eşit frekanslı FWM ürünlerini oluşturan UDWDM/DWDM kanallarını ifade etmektedir. Örneğin; Çizelge 3.4'te 29-kanallı sistemde 5. kanal (i=5), 16. kanal (j=16) ve 6. kanal (k=6) etkileşerek, merkez kanal içinde, yani 15. kanalda, bir FWM ürünü oluşturmaktadır. Çizelge 3.2-3.5 oluşturulurken, Bölüm 2.9.1'de açıklanan  $k \neq i, j$  koşuluna dikkat edilmiştir.

### **3.2. SXR-P<sub>giriş</sub> Benzetim Koşulları**

Bu alt başlıkta yapılan çalışmalarda SXR ile sistemde kullanılan giriş gücü arasındaki bağlantı incelenmiştir. PON sistemindeki iki yönlü iletim trafiği için standartlarda belirtilen iki ayrı dalgaboyu aşağı yönde 1490 nm, yukarı yönde 1310 nm olarak kullanılmıştır. Giriş gücü olarak 0.1-1 mW ve 0.1-40 mW aralıkları alınmıştır.

Kanallar arası boşluk mesafesi için DWDM ve UDWDM sistemlerini kapsayan değerler kullanılmıştır. Yani, 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, her bir benzetimde tek bir  $\Delta f$  değeri kullanılmıştır. OLT ve optik bölücü arasındaki kanal uzunluğu sabit alınmış, 7, 15, 29 ve 35 kanallı sistemlerde standartlara uygun olarak bu uzunluk 15 km biçiminde belirlenmiştir. Bu benzetimde, SXR-Pgiriş değişikliği gözlemlenirken SXR kritik değeri 23 dB olarak belirlenmiştir. Benzetim sonuçları ve elde edilen grafikler 4. Bölüm'de gösterilmiştir.

### **3.3. SXR- $\Delta f$ Benzetim Koşulları**

Bu alt başlıkta yapılan çalışmalarda SXR ile sistemdeki kanallar arası boşluk mesafesi ( $\Delta f$ ) arasındaki bağlantı incelenmiştir. PON sistemindeki iki yönlü iletim trafiği için standartlarda belirtilen iki ayrı dalgaboyu aşağı yönde 1490 nm, yukarı yönde 1310 nm olarak kullanılmıştır. Sistemdeki giriş gücü ise sabit değerde olup 0.1 mW olarak belirlenmiştir.

Ayrıca, sabit kanal boyu (mesafe) belirlenerek, SXR değerinin  $\Delta f$  ile değişimi gözlemlenmiştir. OLT ve optik bölücü arasındaki kanal uzunluğu 7, 15, 29 ve 35 kanallı sistemlerde standartlara uygun olarak 15 km biçiminde belirlenmiştir.  $\Delta f$  değeri 1.5625 GHz-12.5 GHz aralığında değiştirilmiştir. Benzetim sonuçları ve elde edilen grafikler 4. Bölüm'de gösterilmiştir.

### **3.4. SXR-Kanal Uzunluğunun Benzetim Koşulları**

Bu alt başlıkta yapılan çalışmalarda SXR ile kanal uzunluğu arasındaki bağlantı incelenmiştir. PON sistemindeki iki yönlü iletim trafiği için standartlarda belirtilen iki ayrı dalgaboyu aşağı yönde 1490 nm, yukarı yönde 1310 nm olarak kullanılmıştır. Sistemdeki giriş gücü ise sabit değerde olup 0.1 mW olarak belirlenmiştir.

GPON sisteminde maksimum kanal uzunluğu ağdaki ONU sayısına bağlıdır. Dolayısıyla, maksimum kanal uzunluğu standartlara uyularak 7 ve 15 kanallı yapı için 30 km, 29 kanallı yapı için ise 20 km ve 35 kanallı yapı 15 km seçilmiştir. Ayrıca, kanallar arası boşluk mesafesi olarak 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz değerleri kullanılmıştır. Benzetim sonuçları ve elde edilen grafikler 4. Bölüm'de gösterilmiştir.

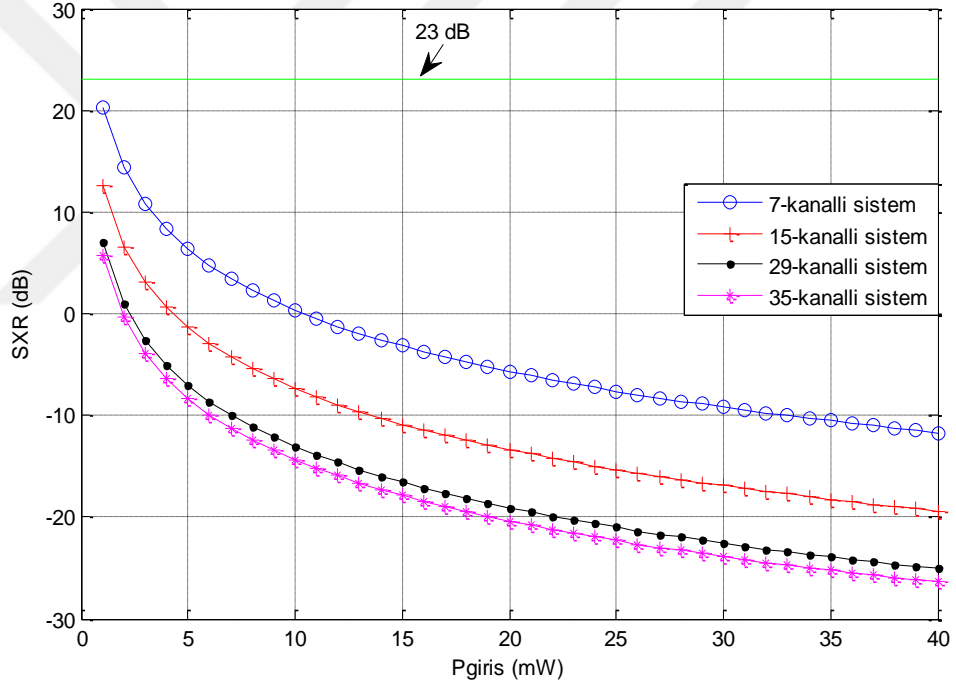


#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

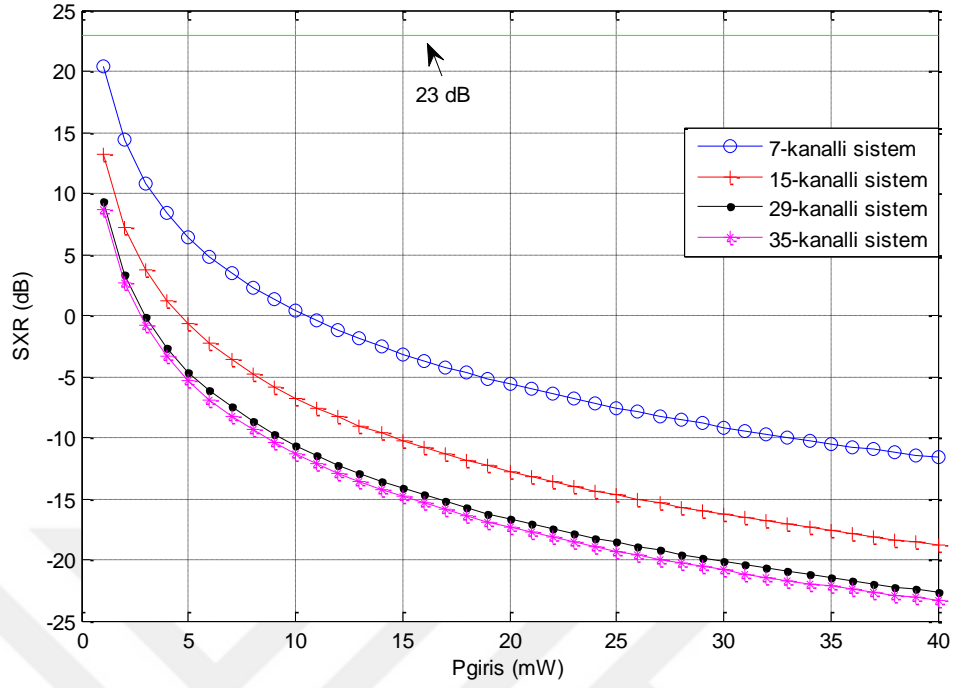
Bu bölümde, FWM etkisi altında SXR değerinin kanal giriş gücü ( $P_{\text{giriş}}$ ), kanallar arası boşluk değeri ( $\Delta f$ ) ve optik fiber uzunluğu ( $L$ ) ile değişimini gösteren benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

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

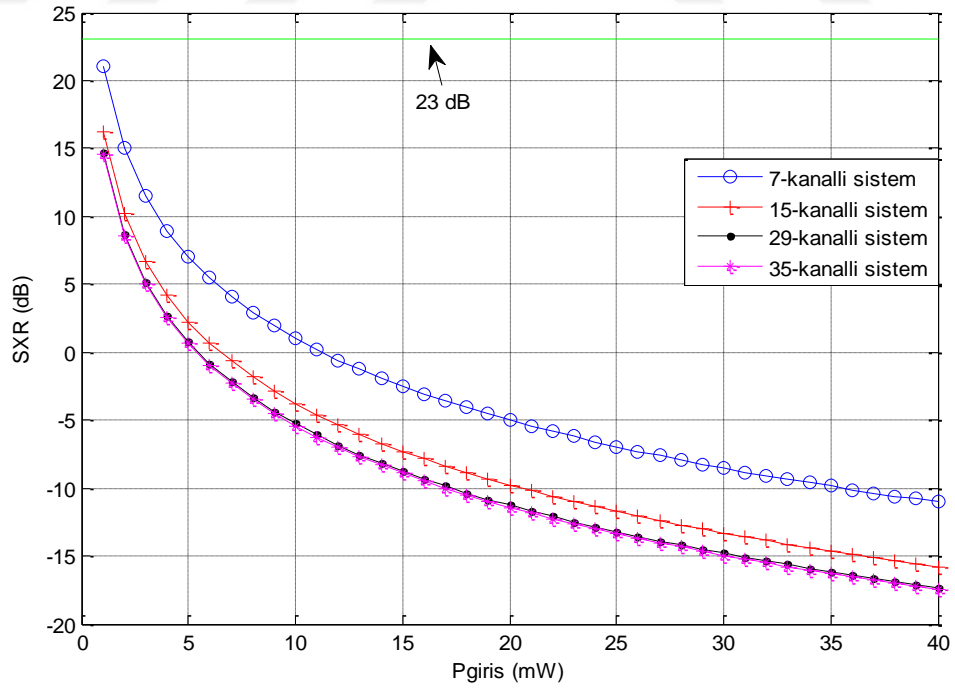
Bölüm 3.2'de açıklanan benzetim koşulları altında, farklı  $\Delta f$  değerleri için, SXR değerinin 1 mW-40 mW arasında değişen eşit kanal giriş güçleri ile değişimini gösteren benzetim sonuçları Şekil 4.1-4.4'te; yukarı yönlü iletim kanallarındaki değişimini gösteren benzetim sonuçları da Şekil 4.5-4.8'de verilmiştir.



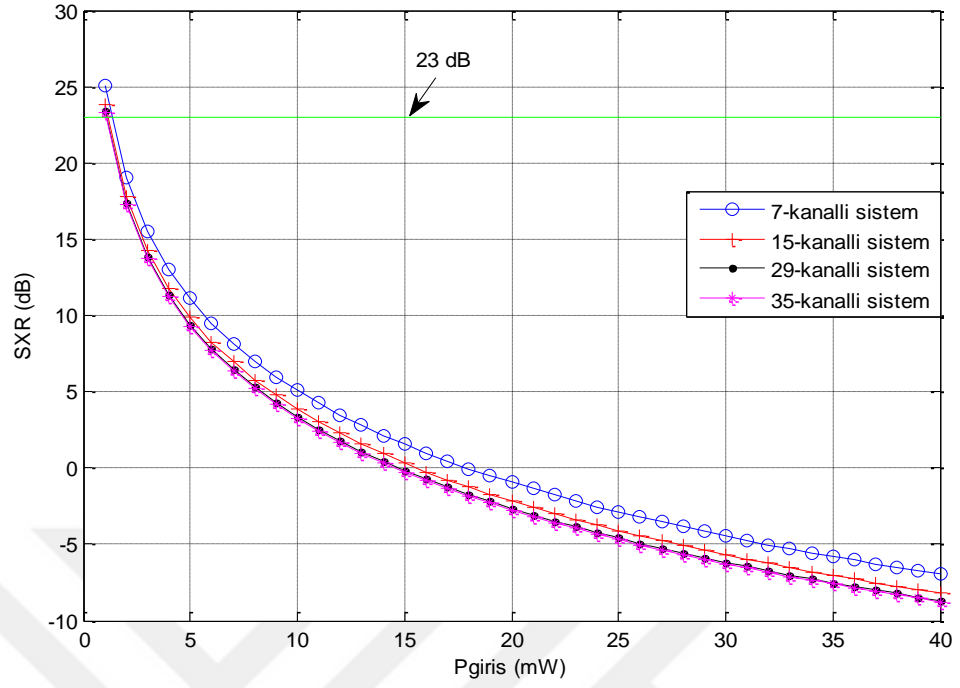
Şekil 4.1.  $\Delta f = 1.5625$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 40 \text{ mW}$ )



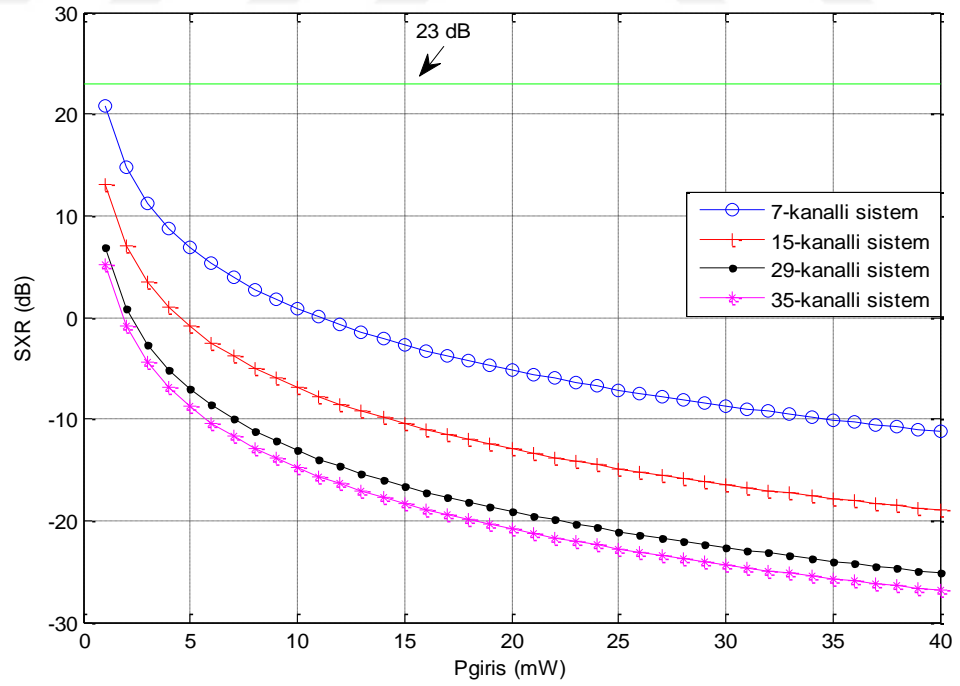
Şekil 4.2.  $\Delta f = 3.125$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 40 \text{ mW}$ )



Şekil 4.3.  $\Delta f = 6.25$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 40 \text{ mW}$ )

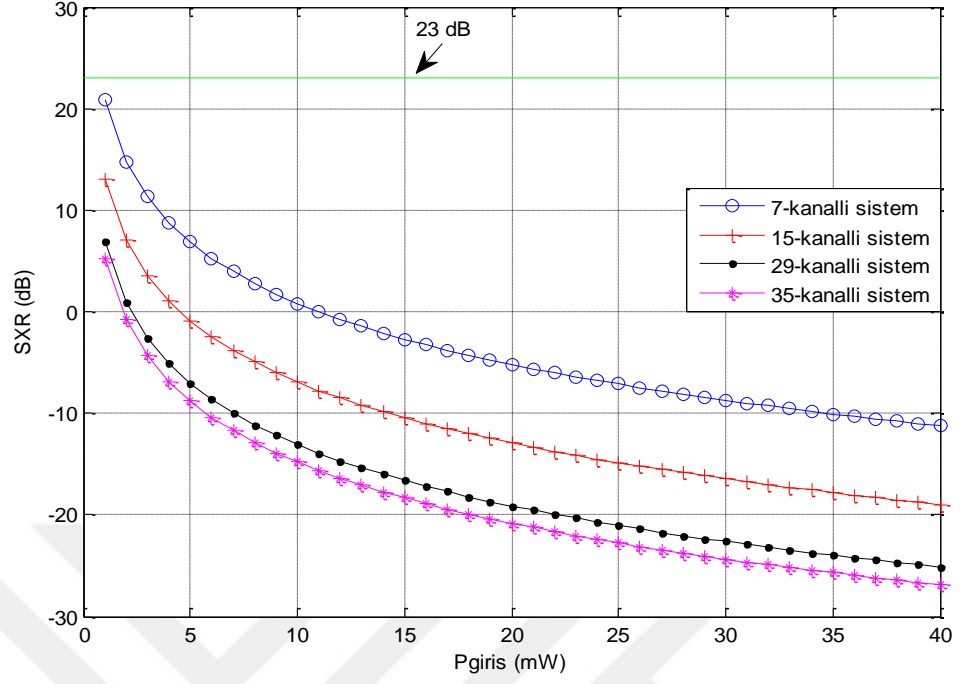


Şekil 4.4.  $\Delta f = 12.5$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 40 \text{ mW}$ )

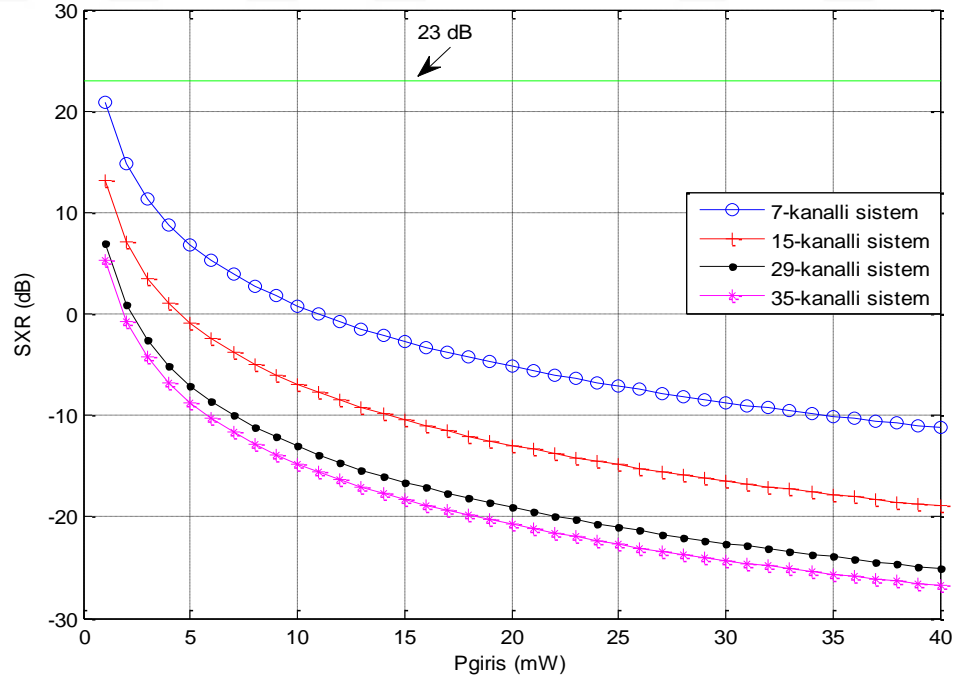


Şekil 4.5.  $\Delta f = 1.5625$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 40 \text{ mW}$ )

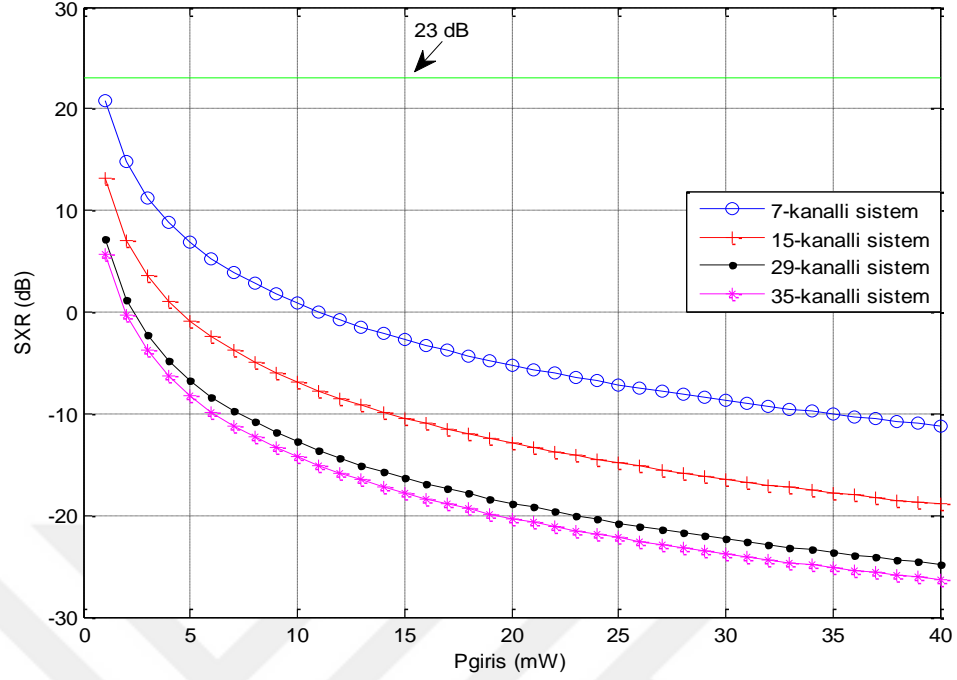




Şekil 4.6.  $\Delta f = 3.125$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 40 \text{ mW}$ )

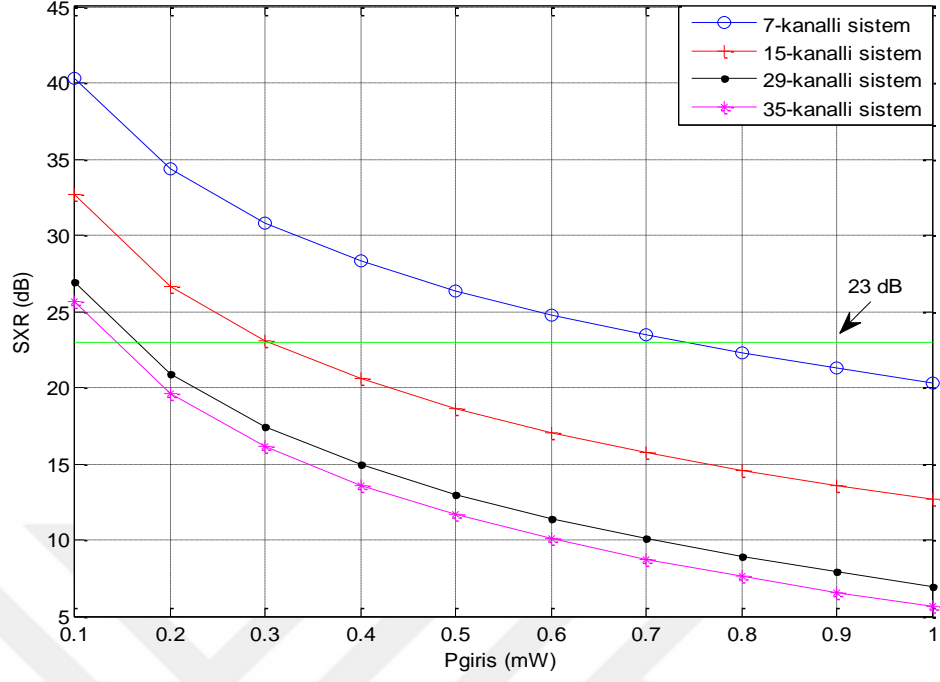


Şekil 4.7.  $\Delta f = 6.25$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 40 \text{ mW}$ )

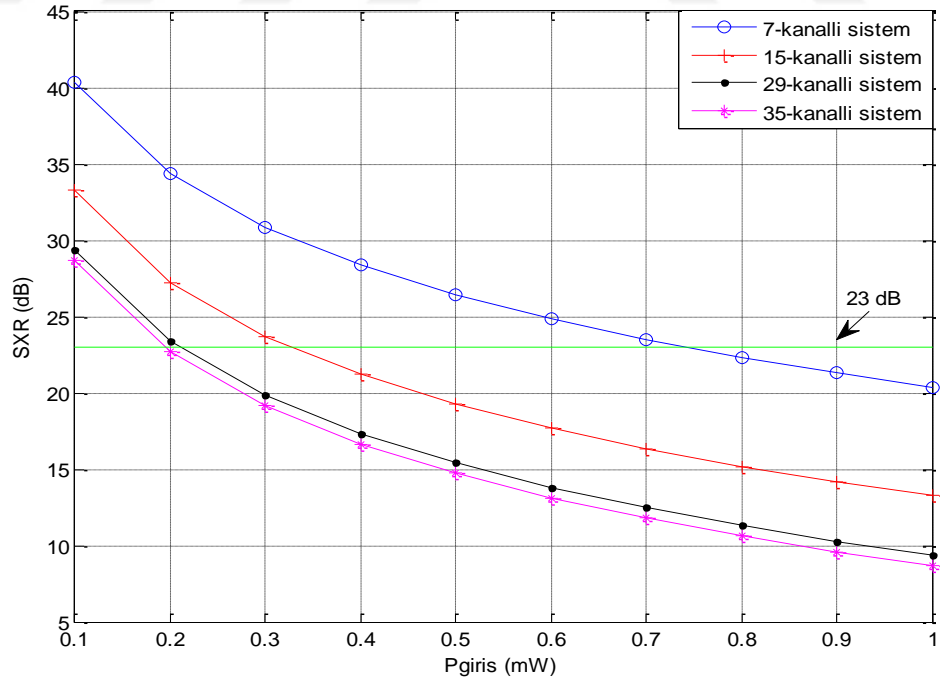


Şekil 4.8.  $\Delta f = 12.5$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 40 \text{ mW}$ )

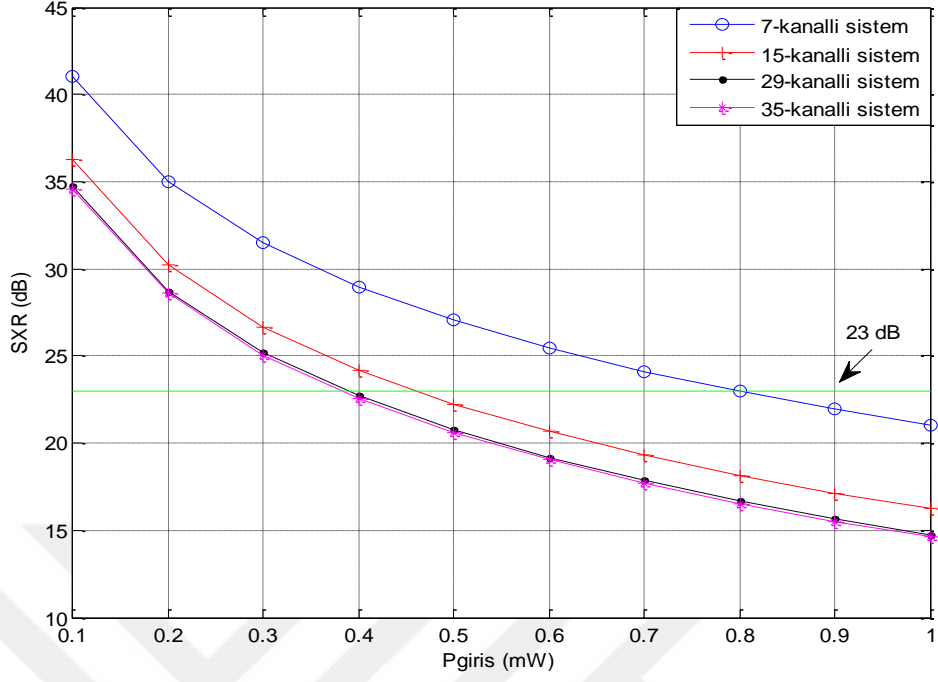
FWM'nin DWDM/UDWDM sistemleri üzerindeki etkisini yorumlayabilmek için uygun bir SXR değerinin seçilmesi önemlidir. Literatürde bu değer için 20 dB, 23 dB ve 25 dB seviyesini minimum olarak seçen çalışmalar mevcuttur (Harboe ve ark. 2009, Nakajima ve ark. 1997, Bogoni ve Poti 2004). Bu tezde minimum SXR seviyesi 23 dB olarak seçilmiştir. Şekil 4.1-4.8 incelendiğinde giriş gücü değişim aralığının 1 mW-40 mW seçilmesi durumunda, SXR değerlerinin 23 dB seviyesinin çok altına düştüğü görülmektedir. Bu nedenle, minimum 23 dB SXR değerini elde edecek maksimum kanal giriş gücü değerlerini belirleyebilmek için, benzetimler 0.1 mW-1 mW giriş gücü aralığında yenilenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.9-4.16'da gösterilmiştir. 0.1 mW-1 mW arasında değişen eşit kanal giriş güçleri için, SXR değerinin, aşağı ve yukarı yönlü iletim kanallarında farklı  $\Delta f$  değerleri için aşağı yönlü iletim kanallarındaki değişimini gösteren benzetim sonuçları Şekil 4.9-4.12'de; yukarı yönlü iletim kanallarındaki değişimini gösteren benzetim sonuçları da Şekil 4.13-4.16'da verilmiştir.



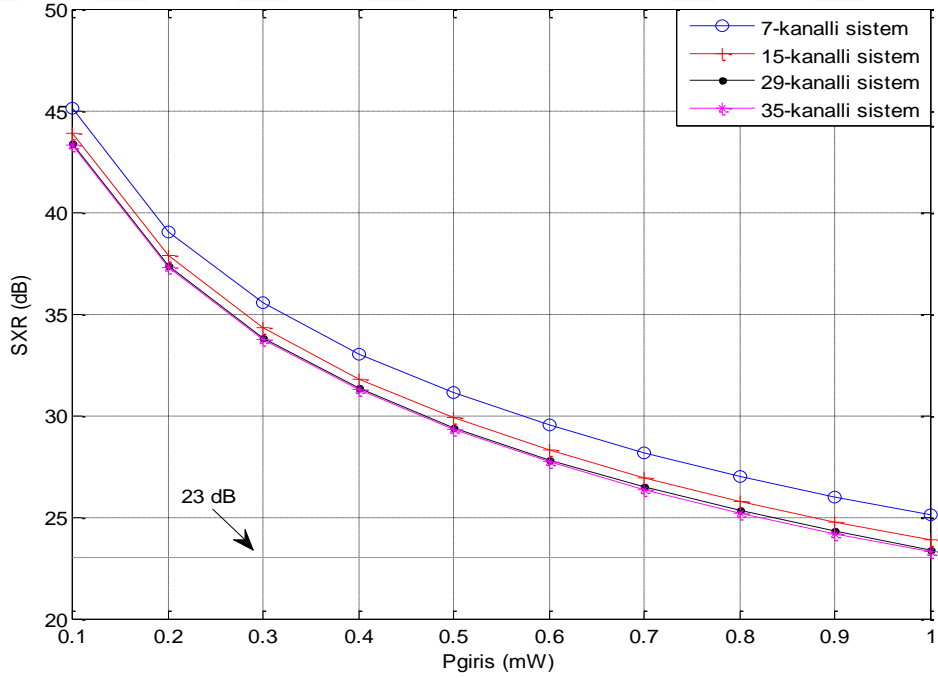
Şekil 4.9.  $\Delta f = 1.5625$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ )



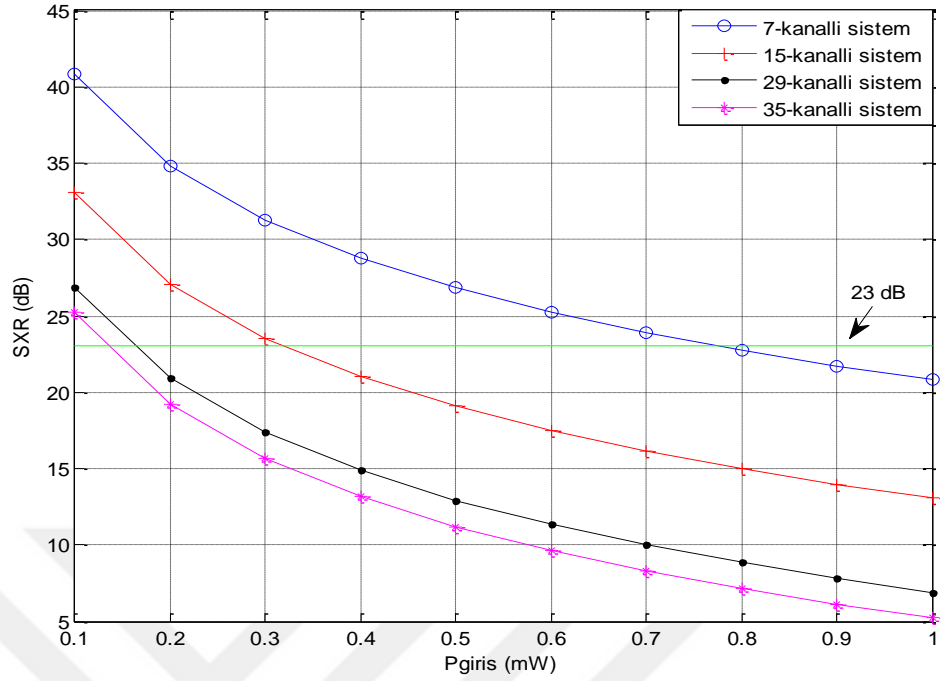
Şekil 4.10.  $\Delta f = 3.125$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ )



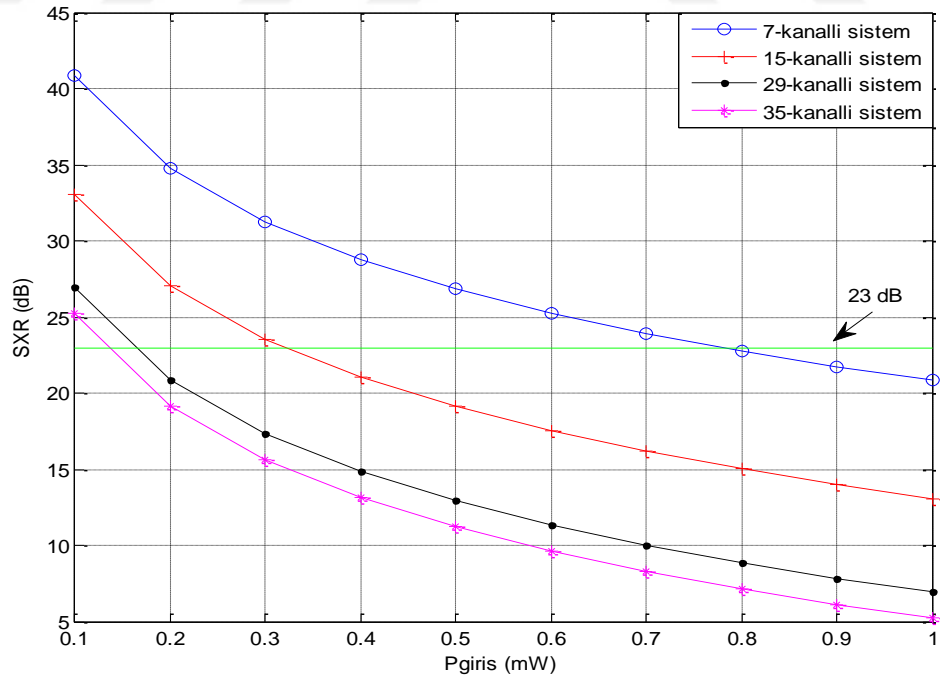
Şekil 4.11.  $\Delta f = 6.25$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ )



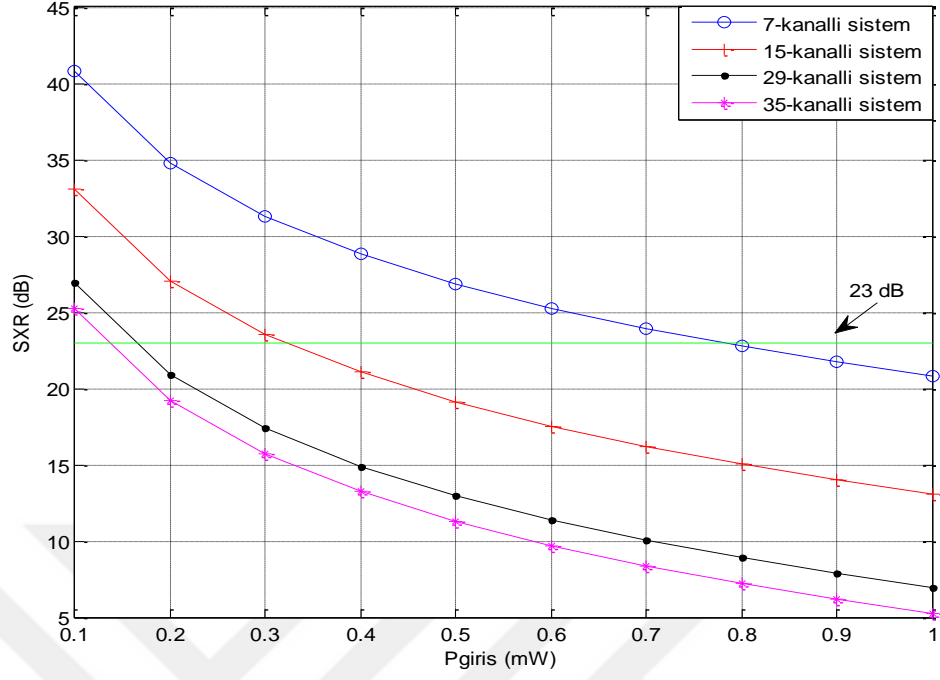
Şekil 4.12.  $\Delta f = 12.5$  GHz için aşağı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ )



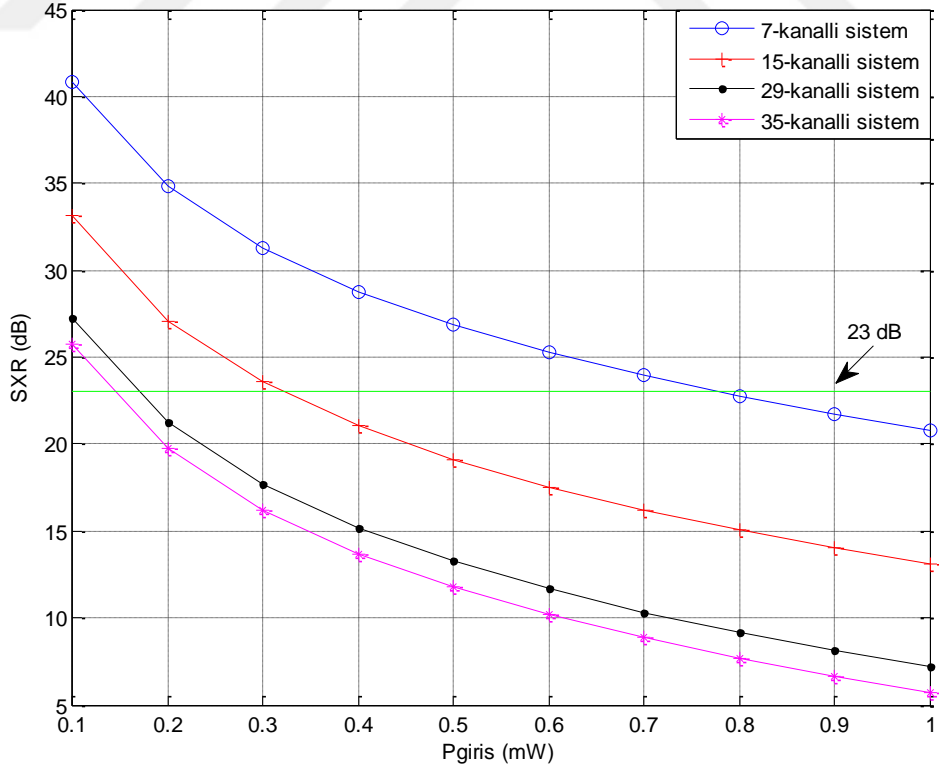
Şekil 4.13.  $\Delta f = 1.5625$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ )



Şekil 4.14.  $\Delta f = 3.125$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giriş}} \leq 1 \text{ mW}$ )



Şekil 4.15.  $\Delta f = 6.25$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 1 \text{ mW}$ )



Şekil 4.16.  $\Delta f = 12.5$  GHz için yukarı yönlü iletim kanalında SXR-kanal giriş gücü değişimi ( $0.1 \text{ mW} \leq P_{\text{giris}} \leq 1 \text{ mW}$ )

Şekil 4.9-4.12'den elde edilen sonuçlara göre, Çizelge 4.1'de 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı 15 km uzunluklu SSMF kullanan UDWDM ve DWDM GPON sistemlerde aşağı yönlü iletim kanalında ( $\lambda=1490$  nm) 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum giriş gücü ( $P_{girişmax}$ ) değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. SXR- $P_{giriş}$  benzetiminde aşağı yönlü iletim kanalında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum giriş gücü değerleri.

UDWDM/DWDM GPON Sistemler	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
7-kanal	$P_{girişmax}$ (mW)	0.73	0.74	0.79	1.34
15-kanal		0.30	0.32	0.46	1.14
29-kanal		0.16	0.21	0.38	1.06
35-kanal		0.14	0.19	0.38	1.04

Şekil 4.13-4.16'dan elde edilen sonuçlara göre Çizelge 4.2'de 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı 15 km uzunluklu SSMF kullanan UDWDM ve DWDM GPON sistemlerde yukarı yönlü iletim kanalında ( $\lambda=1310$  nm) 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum giriş gücü ( $P_{girişmax}$ ) değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. SXR- $P_{giriş}$  benzetiminde yukarı yönlü iletim kanalında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum giriş gücü değerleri

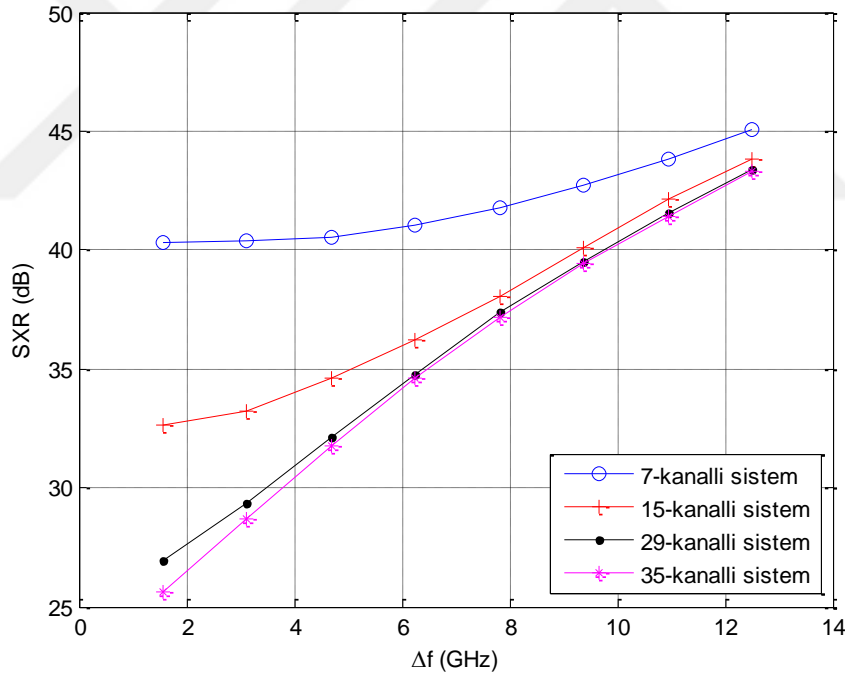
UDWDM/DWDM GPON Sistemler	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
7-kanal	$P_{girişmax}$ (mW)	0.77	0.78	0.78	0.78
15-kanal		0.32	0.32	0.32	0.32
29-kanal		0.16	0.16	0.16	0.17
35-kanal		0.13	0.13	0.13	0.14

Şekil 4.1-4.16 ve Çizelge 4.1-4.2'de verilen simülasyon sonuçlarına göre G.652 standartına göre üretilmiş SSMF fiber kullanan UDWDM-GPON sistemlerde aşağı ve yukarı yönlü iletim kanallarında 23 dB SXR değerine sağlayabilmek için kullanılacak maksimum giriş gücü değeri 1 mW'ın altında olmalıdır. Bu değer kanallar arası boşluk değeri azaldıkça ve kanal sayısı arttıkça 0.1 mW değerine yaklaşmaktadır.

Kanallar arası boşluk değerinin 12.5 GHz olduğu DWDM-GPON sistemlerde, 23 dB SXR değerine sağlayabilmek için kullanılacak maksimum giriş gücü değeri, aşağı yönlü iletim kanalında 1.5 mW'ın, yukarı yönlü iletim kanalında ise 1 mW'ın altındadır. Bu değer kanal sayısı arttıkça, yukarı yönlü iletim kanalında 1 mW değerine, aşağı yönlü iletim kanalında ise 0.1 mW değerine yaklaşmaktadır.

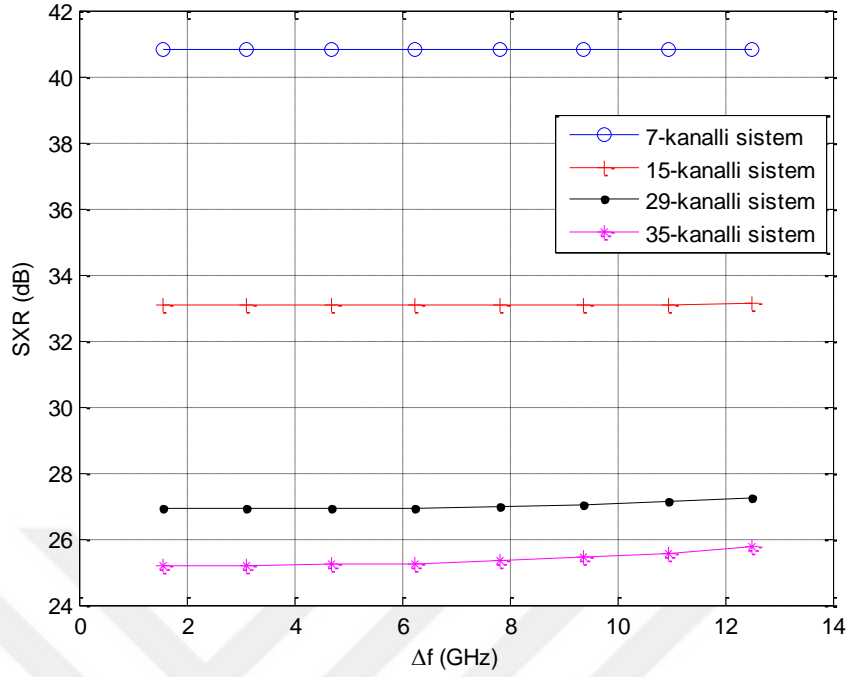
#### 4.2. SXR- $\Delta f$ Benzetim Sonuçları

Bölüm 3.3'te açıklanan benzetim koşulları altında, 0.1 mW değerli eşit kanal giriş güçleri için, SXR değerinin, 1.5625 GHz-12.5 GHz arasında değişen  $\Delta f$  değerleri ile aşağı yönlü iletim kanallarındaki değişimini gösteren benzetim sonuçları Şekil 4.17'de; yukarı yönlü iletim kanallarındaki değişimini gösteren benzetim sonuçları da Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.17.  $P_{giriş}=0.1$  mW için aşağı yönlü iletim kanalında SXR- $\Delta f$  değişimi





Şekil 4.18.  $P_{giriş}=0.1$  mW için yukarı yönlü iletim kanalında SXR- $\Delta f$  değişimi

Şekil 4.17 ve 4.18'de verilen benzetim sonuçlarına göre  $P_{giriş}=0.1$  mW için 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde aşağı yönlü ve yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri, sırasıyla, Çizelge 4.3 ve 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.3.  $P_{giriş}=0.1$  mW için 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde aşağı yönlü iletim kanalında elde edilen SXR değerleri

UDWDM/DWDM GPON Sistemler	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
7-kanal	SXR (dB)	40.34	40.38	41.01	45.07
15-kanal		32.63	33.25	36.22	43.84
29-kanal		26.95	29.37	34.74	43.36
35-kanal		25.65	28.69	34.60	43.27

Çizelge 4.4.  $P_{giriş}=0.1$  mW için 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde yukarı yönlü iletim kanalında elde edilen SXR değerleri

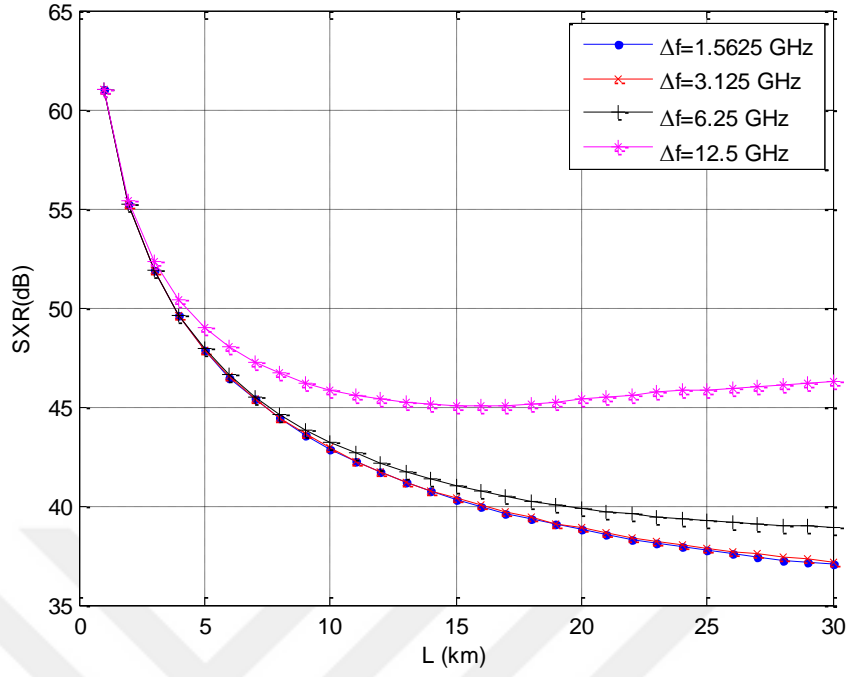
UDWDM/DWDM GPON Sistemler	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
7-kanal	SXR (dB)	40.82	40.82	40.82	40.83
15-kanal		33.07	33.07	33.08	33.11
29-kanal		26.90	26.91	26.93	27.23
35-kanal		25.19	25.19	25.24	25.74

Şekil 4.17 ve Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere, aşağı yönlü iletim kanallarında giriş gücü tüm kanallar için 0.1 mW değerinde sabit tutulduğunda, 7-kanallı ve 15-kanallı 1.5625 GHz ve 3.125 GHz kanallar arası boşluk değerlerine sahip GPON sistemlerde SXR derğeri ufak değışiklikler göstermekte, ancak kanallar arası boşluk değerleri artırıldıkça SXR değeri de belirgin bir şekilde artmaktadır. 29-kanallı ve 35- kanallı sistemlerde ise SXR değeri, kanallar arası boşluk değeri arttıkça yaklaşık olarak lineer bir şekilde değışmekte ve belirgin bir şekilde artmaktadır.

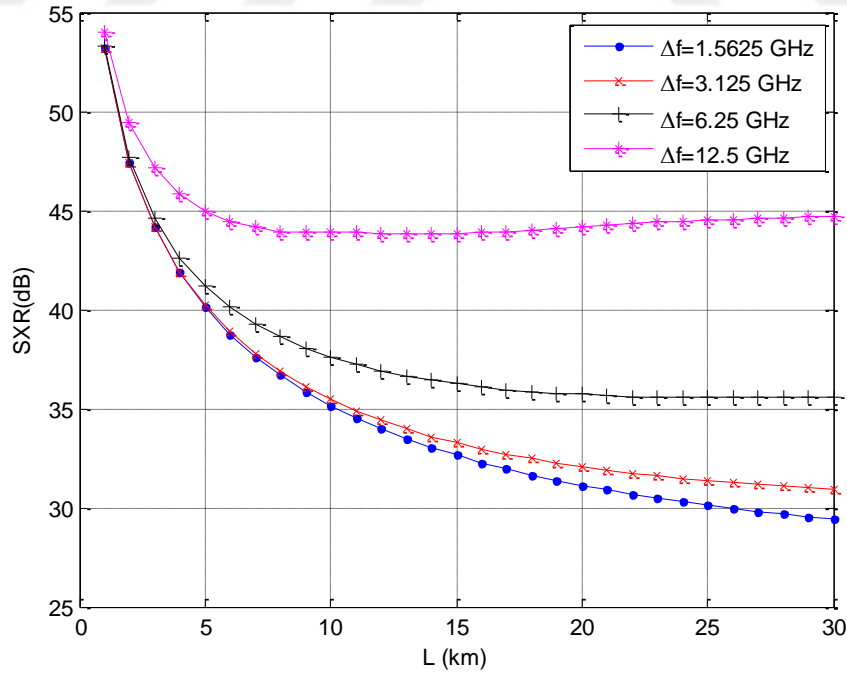
Şekil 4.18. ve Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere yukarı yönlü iletim kanallarında giriş gücü tüm kanallar için 0.1 mW değerinde sabit tutulduğunda, 1.5625 GHz-6.25 GHz kanallar arası boşluk değerleri için, 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı tüm UDWDM sistemlerde, SXR değeri yaklaşık olarak sabit kalmakta ancak 12.5 GHz kanallar arası boşluk değeri DWDM sistemlerde UDWDM sistemlerdeki değerlere göre ufak bir artış göstermektedir.

### 4.3. SXR-Kanal Uzunluğu Benzetim Sonuçları

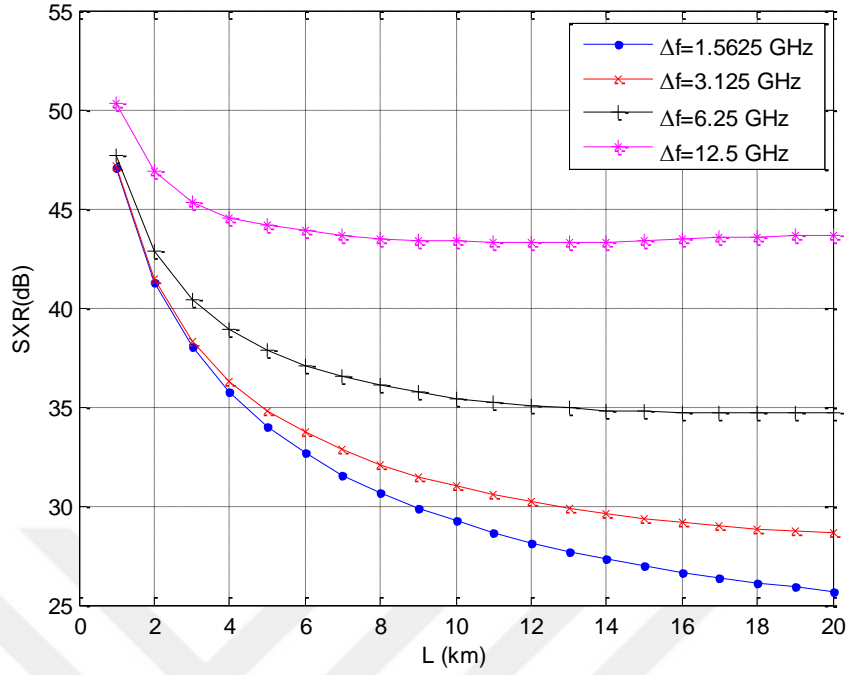
Bölüm 3.4'te açıklanan benzetim koşulları altında, 0.1 mW değeri eşit kanal giriş güçleri için, SXR değerinin, kanal uzunluğu ile aşağı yönlü iletim kanallarındaki değışimini gösteren benzetim sonuçları Şekil 4.19-4.22'de, yukarı yönlü iletim kanallarındaki değışimini gösteren benzetim sonuçları da Şekil 4.23-4.26'da verilmiştir.



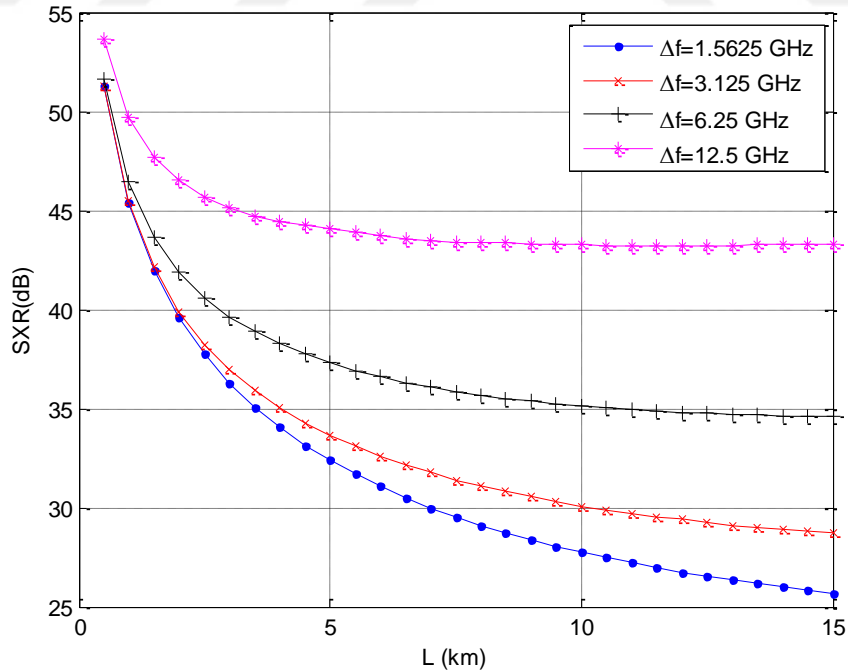
Şekil 4.19.  $P_{giriş} = 0.1$  mW için 7 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğunun değişimi



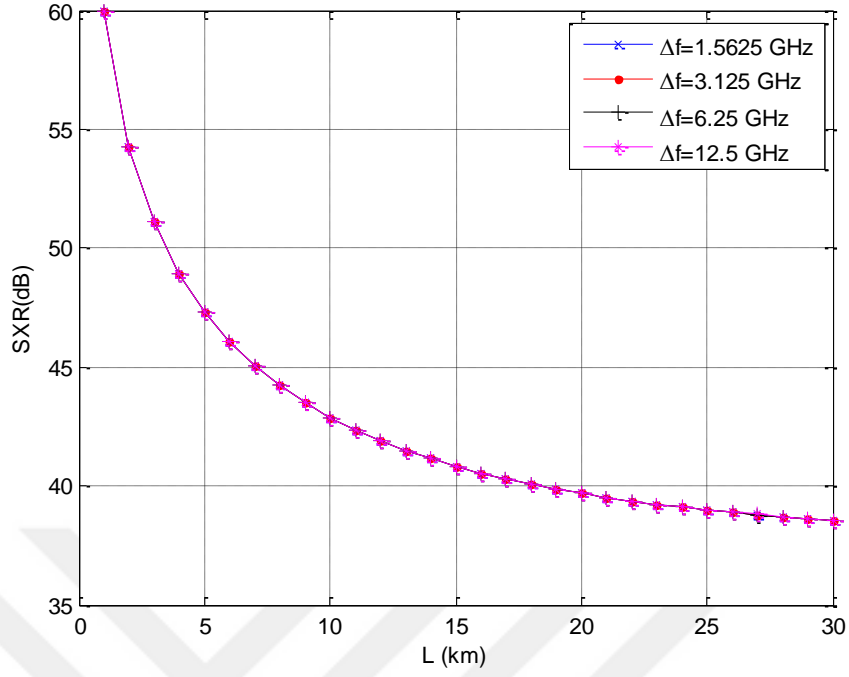
Şekil 4.20.  $P_{giriş} = 0.1$  mW için 15 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi



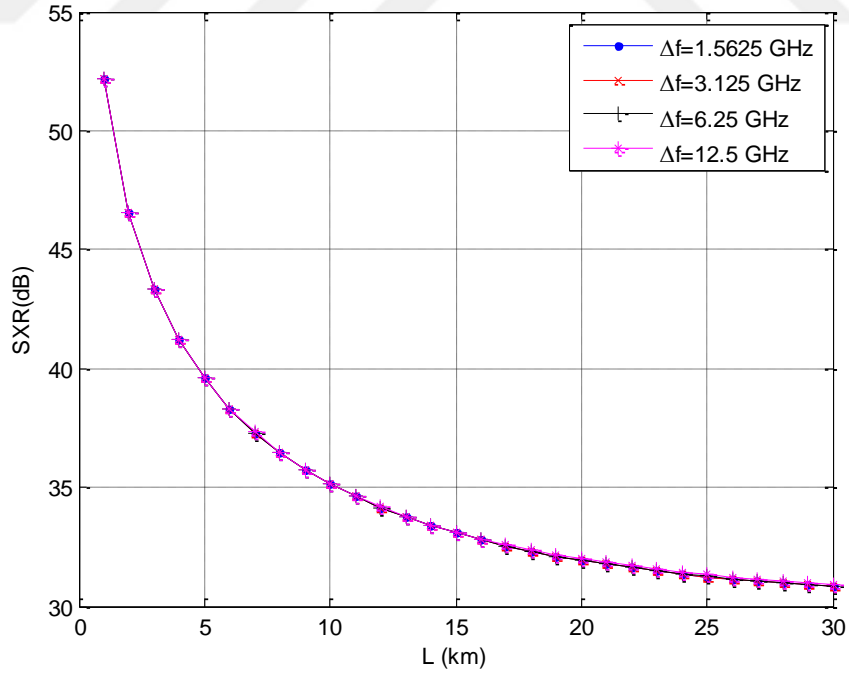
Şekil 4.21.  $P_{giriş} = 0.1$  mW için 29 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi



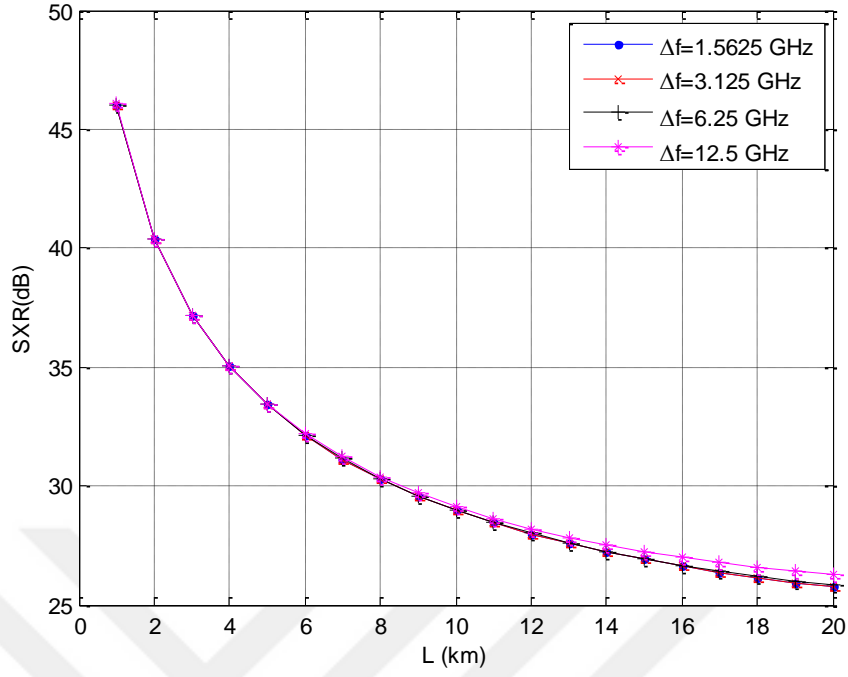
Şekil 4.22.  $P_{giriş} = 0.1$  mW için 35 kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi



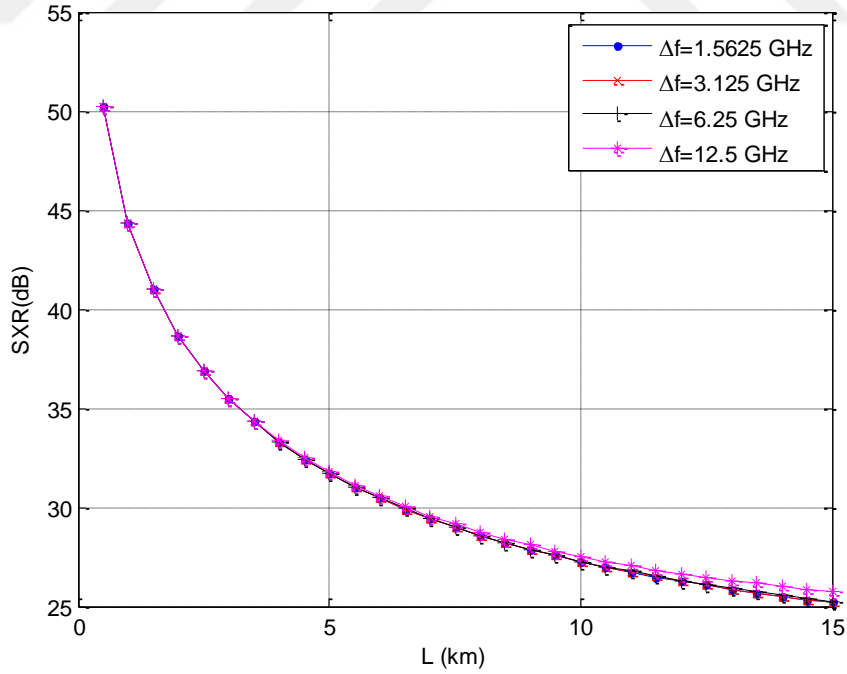
Şekil 4.23.  $P_{\text{giriş}} = 0.1$  mW için 7 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi



Şekil 4.24.  $P_{\text{giriş}} = 0.1$  mW için 15 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi



Şekil 4.25.  $P_{giriş} = 0.1$  mW için 29 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi



Şekil 4.26.  $P_{giriş} = 0.1$  mW için 35 kanallı sistemlerde yukarı yönlü iletimde SXR-kanal uzunluğu değişimi

Şekil 4.19-4.22'deki benzetim sonuçlarına göre  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında, 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri, sırasıyla, Çizelge 4.5-4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.5.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 7-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	47.86	47.86	47.94	49.01
10		42.87	42.89	43.19	45.86
15		40.34	40.38	41.01	45.07
20		38.78	38.86	39.87	45.36
30		37.01	37.17	38.89	46.28

Çizelge 4.6.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 15-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	40.11	40.20	41.19	44.99
10		35.14	35.45	37.59	43.86
15		32.63	33.25	36.22	43.86
20		31.11	32.05	35.70	44.15
30		29.43	30.90	35.54	44.72

Çizelge 4.7.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 29-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	34.01	34.81	37.83	44.14
10		29.22	30.98	35.43	43.34
15		26.95	29.37	34.74	43.36
20		25.69	28.60	34.66	43.67

Çizelge 4.8.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 35-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin aşağı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	32.37	33.64	37.29	44.06
10		27.74	30.08	35.12	43.25
15		25.65	28.69	34.60	43.27

Şekil 4.23-4.26'daki benzetim sonuçlarına göre  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında, 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri, sırasıyla, Çizelge 4.9-4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.9.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 7-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	47.33	47.33	47.33	47.33
10		42.88	42.88	42.88	42.88
15		40.82	40.82	40.82	40.83
20		39.68	39.68	39.68	39.68
30		38.55	38.55	38.55	38.56

Çizelge 4.10.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 15-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	39.58	39.58	39.58	39.58
10		35.13	35.13	35.13	35.15
15		33.07	33.07	33.08	33.11
20		31.93	31.93	31.93	31.99
30		30.80	30.80	30.81	30.92



Çizelge 4.11.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 29-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	33.41	33.41	33.41	33.45
10		28.97	28.97	28.98	29.12
15		26.90	26.91	26.93	27.23
20		25.76	25.76	25.81	26.27

Çizelge 4.12.  $P_{giriş}=0.1$  mW için farklı kanal uzunluklarında 35-kanallı UDWDM/DWDM sistemlerin yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR değerleri

Kanal Uzunluğu (km)	$\Delta f$ (GHz)	1.5625	3.125	6.25	12.5
5	SXR (dB)	31.69	31.69	31.70	31.77
10		27.25	27.25	27.27	27.52
15		25.19	25.19	25.24	25.74

Şekil 4.19-4.22 ve Çizelge 4.5-4.8'den görüldüğü üzere FWM etkisi altında, 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı UDWDM/DWDM-PON sistemlerindeki aşağı yönlü iletim kanallarında, SXR değeri kanal uzunluğundaki artış ile ekponansiyel olarak azalmaktadır. Aynı kanal uzunluğuna sahip sistemlerde kanallar arası boşluk değerleri arttırıldığında SXR değeri de beklenildiği gibi artmaktadır. Bu artış miktarları özellikle 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde ve artan kanal sayılarında belirginleşmektedir.

Şekil 4.23-4.26 ve Çizelge 4.9-4.12'den görüldüğü üzere FWM etkisi altında, 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı UDWDM/DWDM-PON sistemlerindeki yukarı yönlü iletim kanallarında, SXR değeri, aşağı yönlü iletim kanallarında olduğu gibi, kanal uzunluğundaki artış ile ekponansiyel olarak azalmaktadır. Ancak, aşağı yönlü iletim kanallarındaki aksine, kanallar arası boşluk değerlerindeki artış SXR değişimini belirgin ölçüde etkilememektedir.

7-kanallı ve 15-kanallı UDWDM/DWDM-PON sistemlerde, 1.5625 GHz, 3.125 GHz, 6.25 GHz ve 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerleri için elde edilen simülasyon grafikleri üst üste binmektedir. 29-kanallı sistemlerde, kanal uzunluğunun 12 km'yı aştığı durumlarda, 35-kanallı sistemlerde ise, kanal uzunluğunun 10 km'yı aştığı durumlarda 12.5 GHz kanallar arası boşluk değerlerine sahip DWDM-PON sistemlerdeki SXR değeri, 1.5625 GHz-6.25 GHz UDWDM-PON sistemlerin SXR değerlerinden sapma göstermektedir.



## 5. SONUÇ

Bu tez kapsamında, uç kullanıcılar için önemi gittikçe artan optik erişim ağları incelenmiştir. Erişim ağlarında, kullanıcı sayısındaki artışın yanısıra yüksek bant genişliği gerektiren kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayacak yapı olarak WDM-PON sistemleri öngörülmektedir. Bu tezde, DWDM/UDWDM-PON sistemleri ele alınarak bu sistemlerin donanımları ve ağ yapısı açıklanmış, FWM etkisi altındaki performansları benzetimler yardımıyla analiz edilmiştir. Benzetimlerde, FWM etkisi SXR parametresi dikkate alınarak gözlemlenmiştir. Analizlerde, FWM etkisi altındaki DWDM/UDWDM-PON sistemlerde SXR'ın kanal giriş güçleri, kanallar arası boşluk değerleri ve kanal uzunlukları ile değişimi değerlendirilmiştir.

SXR-giriş gücü benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, 7-, 15-, 29- ve 35-kanallı UDWDM-PON sistemlerinde, minimum 23 dB SXR değerini elde edebilmek için maksimum kanal giriş güçlerinin 1 mW'ın altında olması gerektiğini göstermektedir. Örneğin, bu değer 1.5625 GHz kanallar arası boşluk değerli 7-kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletim kanalında 0.73 mW iken, 35-kanallı sistemde 0.14 mW'a düşmektedir. Aynı kanallar arası boşluk değerleri için yukarı yönlü iletim kanallarında 7-kanallı sistem için 0.77 mW ve 35-kanallı sistemde 0.13 mW'tır. Kanallar arası boşluk değerleri arttıkça giriş gücü değerleri de artmasına rağmen yine de 23 dB SXR değerini sağlayan maksimum giriş gücü değeri 1 mW'ın altındadır. 12.5 GHz boşluk değerli DWDM-PON sistemlerde yukarı yönlü iletim kanallarında UDWDM-PON'lardakine benzer sonuçlar görülmekle beraber aşağı yönlü iletim kanallarında 23 dB SXR kriterini sağlayan maksimum giriş güçleri, kanal sayısına bağlı olarak 1.04-1.34 mW aralığında değişmektedir. Bu sonuçlar, FWM etkisi altındaki SXR değerini kanal giriş güçlerinin yanısıra kanallar arası boşluk değerlerinin de etkilediğini göstermektedir.

SXR-giriş gücü benzetimlerinden elde edilen sonuçlar ışığında yapılan SXR-kanallar arası boşluk değeri benzetimlerinde, tüm DWDM/UDWDM-PON sistemlerinde 23 dB SXR değerini sağlayan 0.1 mW giriş gücü değerleri için, 7, 15, 29 ve 35-kanallı sistemlerde aşağı yönlü iletim kanallarında SXR değeri, kanallar arası boşluk değeri azaldıkça ve kanal sayıları arttıkça düşmektedir. Ancak yukarı yönlü iletim kanallarında, kanallar arası boşluk değerindeki artış ya da azalıştan SXR değerinin fazla

etkilenmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun benzetimlerde kullanılan G.652 optik fiber kabloların tasarım parametrelerinin, yukarı yönlü iletim hatlarından kullanılan çalışma dalgaboyu olan 1310 nm için optimize edilmesinden kaynaklandığı düşünölmektedir.

SXR-kanal uzunluğu benzetimlerinden elde edilen sonuçlar, aşağı yönlü iletim hatlarında SXR değerinin kanal uzunluğu ve kanal sayısındaki artışın yanısıra kanallararası boşluk değerindeki azalmayla azaldığını, ancak yukarı yönlü iletim hattında SXR değerinin kanal uzunluğu ve kanal sayısındaki artışla azalmasına rağmen kanallararası boşluk değerinin değişiminden etkilenmediğini göstermektedir.

Elde edilen benzetim sonuçları, FWM etkisi altındaki DWDM/UDWDM-PON sistemlerde minimum 23 dB SXR değerini sağlanacak şekilde iletimin gerçekleştirilebilmesi için değişik kanal sayılarına sahip uygulamalarda kullanılabilir kanal giriş güçleri, kanallararası boşluk değerleri ve kanal uzunlukları hakkında fikir vermesi açısından önemlidir. Ayrıca, benzetimlerde kullanılan G.652 optik fiber tasarım parametreleri, şu anda Bursadaki erişim ağlarında kullanılan bir optik fibere ait olduğundan, elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen/gerçekleştirilecek PON sistemler için de önemli bir referans değerini taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

**Acar, S. 2009.** Yeni Nesil Sabit Erişim Şebekeleri (FTTX) Geçiş Sürecinde Düzenleyici Yaklaşımlar: Uluslararası Örnekler ve Türkiye İçin Öneriler. Uzmanlık Tezi, BTK, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Ankara.

**Anonim, 2007.** Çoklu erişim teknikleri.  
[https://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2010/11/haberlesme-muhendisligi-temelleri-coklu-erisimteknikleri.pdf-\(01.01.2016\)](https://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2010/11/haberlesme-muhendisligi-temelleri-coklu-erisimteknikleri.pdf-(01.01.2016)).

**Anonim, 2008.** Fiber Types in Gigabit Optical Communications. CISCO, Yayın No: 200, USA.

**Anonim, 2010.** Ağların bugünü ve geleceği.  
[http://www.fatih.edu.tr/~bguler/bilg121/Bilgisayar%20aglari%20ders%20notlari.pdf-\(25.10.2015\)](http://www.fatih.edu.tr/~bguler/bilg121/Bilgisayar%20aglari%20ders%20notlari.pdf-(25.10.2015)).

**Anonim, 2011.** FTTX, FTTC, FTTB Örnekleri. Topaz Telekomünikasyon Yayıncılık Reklamcılık San. ve Tic. A.Ş. İstanbul.  
[http://www.topaz.com.tr/default.asp?mod=content&Cid=4&ID=22&menu=Link26-\(20.11.2015\)](http://www.topaz.com.tr/default.asp?mod=content&Cid=4&ID=22&menu=Link26-(20.11.2015)).

**Anonim, 2013.** Fiber optik kablolama.  
[http://www.ofi.com.tr/makaleler/fiber-optik-kablolama-1/-\(09.11.2015\)](http://www.ofi.com.tr/makaleler/fiber-optik-kablolama-1/-(09.11.2015)).

**Anonim, 2014.** Fiber optik kablo temini.  
[http://www.elektrox.org/fiber-optik-cozumleri/fiber-optik-kablo-temini/-\(09.11.2015\)](http://www.elektrox.org/fiber-optik-cozumleri/fiber-optik-kablo-temini/-(09.11.2015)).

**Anonim, 2015.** Tek modlu optik fiber kablolar.  
[http://www.emresupcin.com/tek-modlu-ve-cok-modlu-fiber-kablo/-\(03.11.2015\)](http://www.emresupcin.com/tek-modlu-ve-cok-modlu-fiber-kablo/-(03.11.2015)).

**Aydın, M.A., Turna, Ö.C., Zaim, A.H., 2009.** Pasif Optik Erişim Ağlarının Gelişimi. Akademik Bilişim'09 - XI. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 11-13 Şubat 2009, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.

**Bi, M., Xiao, S., Li, J. He, H. 2013.** A bandwidth-efficient channel allocation scheme for mitigating FWM in ultra-dense WDM-PON. State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai-China.

**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.

**Çakın, H. 2012.** Fiber optik teknolojisi ve karmaşık yapılarda fiber uygulamaları. Tyco elektronik amp. Türkiye.

**Çankaya, S. 2012.** Eve kadar fiber (FTTH) teknolojisi. EMO (Elektirik Mühendisliği Odalar Birliği). Ankara.

**Erdinç, F. 2014.** Windows Server 2012 R2 sistem uzmanlığı. Deniz Matbaa Mücellit, Topkapı-İstanbul, Türkiye, 368 s.

**Esen, B. 2012.** Cisco certified network associate. Bilişim Eğitim Merkezi (Datahouse), Bursa.

**Harboe, P.B., da Silva, E., Souza, J.R. 2008.** Analysis of FWM penalties in DWDM transmission systems based on G.652, G.653 and G.655 optical fibers. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2(12): 2674-2680.

**Hiçdurmaz, B. 2013.** Yüksek hızlı DWDM sistemlerinde optik fiberdeki FWM ve ASE etkisi altında iletim performansının analizi ve optimizasyonu. *Doktora Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Hiçdurmaz, B., Karlık, S.E., Yılmaz, G. 2012.** Doğrusal Olmayan Etkiler Altındaki Bir WDM Sistemin Farklı Veri İletim Hızları İçin Performans Analizi. ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa.

**Işık, Y., Kahvecioğlu, A. 2003.** Veri iletim yöntemleri ve optik veri iletiminin aviyonik sistemlerdeki kullanımı. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(2): 91-97.

**Kayhan, E. 2015.** Dalgaboyu bölmeli çoğullama yöntemini kullanan bir gigabit pasif optik ağ sisteminin modellenmesi ve performans analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Koonen, T. 2006.** Fiber to the home / fiber to the premises: what, where, and when?. *Proceedings of the IEEE*, 94(5): 911-934.

**Kundereli, Ü.C. 2010.** Çok kullanıcıli sistemler, *Seminer Sunumu*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne.

**Lee, C.H., Sorin, W.V., Kim, B.Y. 2006.** Fiber to the home using a PON infrastructure. *Journal of Lightwave Technology*, 24(12): 4568-4583.

**Nakajima, K., Ohashi, M., Miyajima, Y., Shiraki, K. 1997.** Assessment of dispersion varying fibre in WDM systems. *Electronics Letters*, 33(12): 1059-1060.

**Özsoy, S. 2009.** Fiber optik (genişletilmiş üçüncü baskı). Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 78 s.

**Sönmez, B. 2014.** Fiber optik kablolar ve standartları. Türk Prysmian Kablo ve Sistemleri A.Ş. Bursa.

**Takai, H., Yamauchi, O. 2009.** Optical fiber cable and wiring techniques for fiber to the home (FTTH).

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520009000376>-(Erişim tarihi: 20.01.2014).

**Turna, Ö.C. 2009.** FTTH nedir ?. *Bilşim Dergi (Türk Elektronik Dergisi)*, (9): 1-2.

**Turna, Ö.C., Aydın, M.A., Zaim, A.H. 2009.** Pasif Optik Erişim Ağlarının Gelişimi. Harran Üniversitesi Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 11-13 Şubat 2009, Şanlıurfa.

**Uzar, İ., Ünverdi, N.Ö. 2014.** Optik Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan FTTX Teknolojisi ve Uygulamaları. Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 27 – 29 Kasım 2014, Bursa.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abbas SALEH  
Doğum Yeri ve Tarihi : Kerkük 01.01.1991  
Yabancı Dili : İngilizce ve Arapça

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kerkük Merkezi Fen Lisesi (2005-2008)

Lisans : Kerkük Teknik Fakültesi (2008-2012)  
Elektronik ve Kontrol Mühendisliği Anabilim  
Dalı

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi (2013- )  
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalışmakta Olduğu Kurum : Korek Telekom Gurubu  
Bazistasyon Denetim Mühendisi  
(Temmuz 2012-Ekim 2012)

İletişim : abbas\_yuldurum@yahoo.com