

**DÖRT DALGA KARIŞIMININ
FOTONİK WDM AĞLARDA
İLETİM PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

NAZLI ERGÜNEY



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT DALGA KARIŞIMININ FOTONİK WDM AĞLARDA
İLETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

NAZLI ERGÜNEY

Prof. Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA 2011
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Nazlı ERGÜNEY tarafından hazırlanan ‘Dört Dalga Karışımının Fotonik WDM Ağlarda İletim Performansı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Başkan: Prof. Dr. Güneş YILMAZ
U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK
U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Naim DEREBAŞI
U.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

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

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

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

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

beyan ederim.

26/04/2011
Nazlı ERGÜNEY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÖRT DALGA KARIŞIMININ FOTONİK WDM AĞLARDA İLETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Nazlı ERGÜNEY

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Doğrusal olmayan olaylar, optik fiber içerisinde iletilen işaretlerde bozulmalara ve zayıflamalara sebebiyet verir. Uyarılmış saçılmaya (Raman ve Brillouin Saçılması) ve Optik Kerr etkisine bağlı olarak (Öz Faz Modülasyonu, Çapraz Faz Modülasyonu ve Dört Dalga Karışımı) değişen bu olaylardan Dört Dalga Karışımı (FWM), iletilen gücün yüksek olması ve kanallar arası boşlukların dar olması sonucu üç işaretin birbirlerini etkilemesi ile yeni işaretlerin oluşması şeklinde ortaya çıkar. FWM, dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemlerinde doğrusal olmayan çapraz karışımın en önemli nedenlerinden biridir. WDM sistemlerinde kullanılan kuvvetlendiriciler, FWM etkisini de arttırmakta ve bu durum sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca FWM, işaretler arası girişime de neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, WDM haberleşme sistemlerinde FWM'i oluşturan etkenler ve FWM'in iletim performansı üzerindeki etkileri, G.652 (SMF-Tek modlu fiber), G.653 (DSF-Dispersiyonu kaydırılmış fiber), G.655 (NZDSF-Sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiber), DCF (Dispersiyon dengeleyici fiber) fiberlerde incelenmiştir. Yapılan benzetimlerle, kanallar arası boşluğun farklı değerlerindeki FWM gürültü gücü, kanal gücü değişiminin birinci ve ikinci dereceden FWM çapraz karışımına etkisi, FWM gücünün farklı iletim mesafeleri ve kromatik dispersiyon değerlerine göre değişimi, FWM etkinliği-iletim mesafesi ilişkisi, Yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM) sisteminde farklı kanal boşlukları ve kanal sayılarına göre FWM gücü ve FWM etkisi ile oluşan işaret gürültü oranları (SNR) irdelenmiştir.

Kanallar arası boşluğun eşit seçildiği sistemlerde, FWM gücünün etkisi arttığı için, bu etkinin kanal boşluklarının büyük (2.5 nm) tutulması ile azaltılabileceği, kromatik dispersiyonun iletim mesafesine kıyasla FWM gücünü daha fazla düşürdüğü, FWM etkinliğinin kısa iletim mesafelerinde daha belirgin olduğu (1 km için 50 GHz'de % 75 etkinlik), birinci dereceden FWM ürünlerinin ikinci dereceden FWM ürünlerine göre yaklaşık iki katı kadar FWM çapraz karışımına sebep olduğu saptanmıştır.

DWDM sistemlerinde, kanallardaki FWM'in etkisi sonucu SNR oranlarını gösteren sonuçlarda 1550 nm'de dispersiyon değeri 3.7 ps/nm.km olan aynı zamanda geniş etkin alanlı NZDSF'nin kanallar arası doğrusal olmayan çapraz karışımı azaltılabileceği görülmüştür. FWM gücünün ise DSF fiber için en büyük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: WDM, Optik fiber, Dört dalga karışımı (FWM), SNR

2011, x + 86 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ANALYSIS OF THE EFFECT OF FOUR WAVE MIXING ON TRANSMISSION PERFORMANCE OF PHOTONIC WDM NETWORKS

Nazlı ERGÜNEY

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

Supervisor: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Nonlinear phenomena cause distortions and attenuations on signals transmitted in optical fiber. These phenomena depend on stimulated scattering (i.e. Raman and Brillouin Scatterings) and optical Kerr effect (i.e. Self Phase Modulation, Cross Phase Modulation and Four Wave Mixing). As a result of high transmitted power and close channel spacings, interaction of three different signals transmitted in an optical fiber generates a new signal which is known as four wave mixing (FWM) phenomenon. FWM is one of the main reasons of nonlinear crosstalk in wavelength division multiplexing (WDM) systems. The amplifiers used in WDM systems increase the effect of FWM and this situation affects the system performance negatively. Moreover, FWM causes inter-symbol interference.

In this thesis, the parameters generating FWM and the effects of FWM on the transmission performance in WDM communication systems are investigated for G.652 (SMF- Single mode fibers), G.653 (DSF-Dispersion shifted fibers), G.655 (NZDSF-Non-zero dispersion shifted fibers) and DCF (Dispersion compensating fibers). FWM noise for different values of channel spacing, the effect of variation of channel signal power on first and second order FWM crosstalk, variation of FWM due to different transmission lengths and chromatic dispersion values, the relation between FWM efficiency and the transmission length, signal-to-noise ratio (SNR) occurred as a result of FWM noise and FWM efficiency in dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems considering different channel spacings and different numbers of channels, are analyzed with simulations performed.

In systems having equal channel spacings, since the FWM effect is getting high, it is observed that this effect can be reduced by using large channel spacings (2.5 nm). It is also observed that the chromatic dispersion has a more degrading influence on FWM with respect to the transmission length, the FWM efficiency is more obvious in short transmission lengths (for 1 km and 50 GHz, 75 % efficiency) and the first-order FWM products cause nearly twice FWM crosstalk with respect to second-order FWM products.

For DWDM systems, simulation results displaying SNR values affected by FWM in channels show that the NZDSF fiber having a 3.7 ps/nm.km dispersion value at 1550 nm and a large effective area can reduce the nonlinear crosstalk between channels. Furthermore, it is also determined that the FWM power is maximum for DSF fiber.

Keywords: WDM, Optical fiber, Four wave mixing (FWM), SNR
2011, x + 86 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince hem tezimde hem de tezimin haricinde karşılaştığım sorunlara sabırla çözüm yolları öneren, destek ve yardımını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a, her konuda desteğini aldığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK'a, tez çalışmamda bana her zaman yardımcı ve destek olan Sayın Arş. Gör. Bahadır HİÇDURMAZ'a, yetişmemde emeği bulunan tüm hocalarıma, her zaman her konuda yanımda olan beni destekleyip teşvik eden eşim Selçuk ERGÜNEY'e ve tez çalışmam esnasında yardımcı olan ailesine (Emine ve Muhammet ERGÜNEY) ve tabii ki her zaman karşılık beklemeden şefkat ve sevgileriyle daima yanımda olup bugünlere ulaşmamı sağlayan annem Gülçiçek ÖNALAN ve babam İhsan ÖNALAN'a sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

Nazlı ERGÜNEY
26/04/2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Tek Modlu Fiber Tipleri ve Özellikleri	5
2.2. WDM-DWDM Sistemleri	6
2.2.1. Standart WDM Sistemi	6
2.2.2. WDM Sisteminde Yüksek Kapasiteli Noktadan Noktaya Hatlar	8
2.2.3. DWDM Sistemi	11
2.2.4. Sistem Tasarımının Gereklere ve Esasları	14
2.3. Kaynak Araştırması	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM	21
3.1. Doğrusal Olmayan Optik	21
3.1.1. Doğrusal Olmayan Kutuplanma	21
3.1.2. $\chi^{(2)}$ Kaynaklı Doğrusal Olmayan Etkileşimler	22
3.1.3. Doğrusal Olmayan Schrödinger Eşitlikleri	24
3.2. Doğrusal Olmayan Optik Fiber	25
3.2.1. Doğrusal Olmayan Kırılma İndisi	26
3.2.2. Optik Kerr Olayı	27
3.2.3. $\chi^{(3)}$ Kaynaklı Doğrusal Olmayan Etkileşimler	28
3.2.3.1. Uyarılmış Brillouin Saçılımı	29
3.2.3.2. Uyarılmış Raman Saçılımı	29
3.2.3.3. Öz Faz Modülasyonu	29
3.2.3.4. Çapraz Faz Modülasyonu	30
3.3. Dört Dalga Karışımı (FWM)	31
3.3.1. FWM' in Matematiksel Tanımı	32
3.3.2. FWM'in WDM Kanalları Arasındaki Etkileşimi	35
3.3.3. Bozunmuş Dört Dalga Karışımı	36
3.3.4. Bozunmamış Dört Dalga Karışımı	37
3.3.5. Dört Dalga Karışımı İşlemleri	37
3.3.5.1. CARS- ' Evre Uyumlu Anti Stokes Raman Spektroskopisi'	37
3.3.5.2. CSRS- ' Evre Uyumlu Stokes Raman Spektroskopisi'	38
3.3.5.3. SRS- ' Uyarılmış Raman Kazanç Spektroskopisi'	39
3.3.5.4. TIRES- 'Ters Raman Etkisi Spektroskopisi'	39
3.3.5.5. RIKES- 'Raman Uyarımlı Kerr Etkisi Spektroskopisi'	40
3.3.6. Dört Dalga Karışımı Uygulamaları	41
3.3.6.1. Faz Şekillendirme	41

3.3.6.2. Dalgaboyu Dönüştürme	42
3.3.6.3. Sıkıştırma	43
3.3.6.4. Supersüreklilik Üretimi	43
3.3.6.5. Gerçek Zamanlı Holografik Görüntü	44
3.3.6.6. Gerçek Zamanlı Görüntü İşlemi	44
3.3.6.7. VUV ve IR de Evre Uyumlu Kaynakların Üretimi	44
3.3.6.8. Uyarılmış Durum Ömürlerinin Ölçümü ve Dephasing Hızları	44
3.4. Çok Kanallı Sistemlerde Başarım Değişkenleri	45
3.4.1. Heterodalgaboyu Doğrusal Çaprazkarışım	45
3.4.2. Homodalgaboyu Doğrusal Çapraz Karışım	48
4. BULGULAR	50
4.1. WDM Haberleşme Sistemlerinde FWM Olayını Tetikleyen Etkenlerin Matlab Çalışması ile Elde Edilen Analiz Sonuçları	50
4.1.1. WDM Sisteminde FWM Gürültü Gücünün Kanal Boşluklarına Göre Değişimini Gösteren Sonuçlar	51
4.1.2. FWM Gücünün Farklı Kromatik Dispersiyon Değerleri ve Farklı İletim Uzaklıklarına Göre Değişimini Gösteren Sonuçlar	52
4.1.3. FWM Etkinliğinin Farklı Mesafelere Göre Değişimini Gösteren Sonuçlar	53
4.1.4. Birinci Kanal Giriş Gücü Değişimine Göre Birinci Dereceden ve İkinci Dereceden FWM Çapraz Karışımı Değişimini Gösteren Sonuçlar	54
4.2. DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri İçin Kanal Sayısı Değişimine Göre FWM-SNR Analizinin Matlab Çalışması ile Elde Edilen Sonuçları	55
4.2.1. DSF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	57
4.2.2. SMF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	59
4.2.3. NZDSF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	61
4.2.4. DCF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	62
4.3. DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri İçin Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre FWM-SNR Analizinin Matlab Çalışması ile Elde Edilen Sonuçları	64
4.3.1. DSF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	64
4.3.2. SMF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	65
4.3.3. NZDSF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	66
4.3.4. DCF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR- Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar	67
4.4. DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri için Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre FWM Güç Değişimini Gösteren Sonuçlar	68
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	70
KAYNAKLAR	73
EKLER	77
ÖZGEÇMİŞ	86

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyıl boyunca dünya çapında telefon ağlarındaki gelişmeler haberleşme sistem tasarımında birçok üstünlüğü de beraberinde getirmiştir. Telekom haberleşmesindeki en önemli gelişme bükülü tel çifti yerine eşeksenel kablo kullanılarak veri iletim kapasitesinin artırılmasıdır. 1940'larda ilk eş eksenel kablo serviste kullanılmış ve 3 MHz'lik iletim kapasitesi ile üç yüz ses kanalı veya tek televizyon kanalı iletilmiştir. Bu gibi sistemlerde frekansa bağlı kablo kayıplarının band genişliğini sınırlaması üzerine frekanslar 10 MHz'in üzerine çıkarılmıştır. Bu da mikrodalga haberleşme sistemlerinin gelişmesine neden olmuştur.

1966 yılında bakır kabloya göre daha iyi iletim tekniği olan optik fiberli iletim gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde fiber kaybı (1000 dB/km) en büyük problem olarak görülse de 1970 yılında fiber kayıpları dalga boyunun yaklaşık 1 µm olduğu bölgede 20 dB/km altına düşürülmüştür. Modern ışık dalgası sistemlerinin bit hızı-uzaklık çarpımı (BL) ürünü, birinci dönem ışık dalgası sistemleri ile karşılaştırıldığında 10^7 'yi aşmıştır (Mir 2007, Agrawal 2002) .

Optik haberleşme sisteminin blok diyagramında optik verici elektriksel işareti optik işarete çevirir ve optik fiber üzerinden iletme başlanır. Başlangıç gücü ne kadarlık fiber kaybının dengelenebileceğini gösteren önemli bir değişkendir. Verici, optik kaynak, modülatör ve kanal birleştiricisini içerir. Optik vericideki en önemli eleman optik kaynaktır. Kanal birleştirici ise genellikle bir mikromercedir ve optik işareti optik fiber girişine olası en büyük etkinlik ile odaklar (Bang 2006).

Alıcı, bir birleştirici, fotoalıcı ve demodülatörden oluşur. Alıcıdaki birleştirici gelen işareti fotoalıcıya odaklar. Fotoalıcı ışığı elektriğe çevirir. Fotoalıcı yüksek hassasiyete, hızlı cevaba, düşük gürültüye, düşük maliyete ve yüksek güvenilirliğe sahip olmalıdır.

Optik fiberdeki hızlı gelişmelerden biri de optik kuvvetlendiricilerde yaşanmıştır. Erbium katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA) geliştirilmiş ve sistemlere büyük band genişliği imkanı sunması ile önemli bir yere sahip olmuştur. Dalga boyu bölmeli çoğullamalı sistemlerde kanallar EDFA ile aynı anda kuvvetlendirilerek uzak mesafelere iletim sağlanabilmektedir (Agrawal 2002).

Optik fiber haberleşme teknolojisi uzak mesafe ve yüksek veri hızlı iletim ile devrim yapmıştır ancak sistemde kullanılan elektronik aygıtların işlem kapasitesini sınırlamasından dolayı toplam fiber kapasitesi de kullanılamamaktadır (MIR 2007). Optik fiberli haberleşme sistemleri bütün haberleşme sistemlerine göre yüksek veri hızı sunarken aynı zamanda band genişliği ve iletim mesafesi bakımından da uydu, mikro dalga, radyo gibi diğer haberleşme sistemlerini geçmiştir.

Dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM), optik işaretlerin iletiminde yaygın olarak kullanılan bir çoğullama tekniğidir. Bu teknik, iletim kapasitesi ve veri hızının artırılmasının yanı sıra esnek optik ağ tasarımına da imkan sağlar. Optik kuvvetlendiriciler kullanılarak hat uzunluğu yüzlerce kilometreye uzatılabilir, daha şeffaf ve uygulanabilir optik ağ konsepti oluşturulabilir. WDM sisteminin toplam iletim uzunluğu, kanal sayısı, kanal boşluğu, her kanalda iletilen güç, kuvvetlendirici aralıkları gibi çeşitli sistem değişkenlerine bağlı olup fiber doğrusalsızlıklarından etkilenir (Kaur ve ark. 2007).

Yoğun dalga boyu bölmeli çoğullama (DWDM) ise, çoklu veri işaretlerini ışığın farklı dalga boylarını kullanarak tek bir fiber üzerinden ileten teknolojidir. DWDM teknolojisi, fiber ağların kapasitesini arttırmaya olanak sağlar. DWDM, uzak mesafe iletimlerinde meydana gelen optik haberleşme trafik tıkanıklarını gidermek için kullanılmaktadır. DWDM ağları, yüksek band genişlikli kanallar ile iletimin basit, kullanışlı ve uygun fiyatlı olarak yapılmasını sağlar. Bu sebeple DWDM, yüksek kapasiteli fotonik ağlar için anahtar bir teknolojidir (Bang 2006).

Doğrusal olmayan optik ilk olarak 1960 yılında yapılan lazer gelişim çalışmalarında ortaya çıkmıştır (Wilson and Hawkes, 2000). 19.yy'dan önce doğrusal olmayan optik etkileri bilinmesine rağmen doğrusal olmayan optik cevap yöntemine ulaşmak için yeterli şiddette DC alanlar üretilebiliyordu. Doğrusal olmayan optik, Frank ve çalışma arkadaşlarının kırmızı lazer ile yapmış oldukları kuvars da ikinci harmonik üretimi gösterimine kadar tam olarak keşfedilememiştir

(Tiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf> 2010).

Doğrusallık veya doğrusal olmama ışığın kendi özelliğine ve ışığın ilerlediği ortamın özelliğine bağlıdır (Boyd 1992).

Optik fiberde veri hızı, kanal sayısı, optik güç seviyeleri arttıkça doğrusal olmayan olayların etkisi artar. Bu olayların birkaçı Öz Faz Modülasyonu (SPM), Çapraz Faz Modülasyonu (XPM), Uyarılmış Raman Saçılması (SRS), Uyarılmış Brillouin Saçılması (SBS) ve Dört Dalga Karışımı'dır (FWM). Doğrusal olmayan olaylar, optik fiberde iletilen işaretlerde bozulmalara ve zayıflamalara neden olur (Schneider 2004).

FWM, temel olarak farklı frekanslardaki üç dalganın karışımı sonucunda değişik frekanslı bir dalganın oluşması şeklinde tanımlanabilir. FWM nedeniyle, M kanallı bir WDM sisteminde iletilen işaretler, çok sayıda farklı frekanslı yeni işaretler oluştururlar. Ayrıca, üretilen bu yeni işaretler (FWM ürünleri), kanaldaki işaretlerle veya birbirleri ile karışarak yüksek dereceli FWM ürünleri oluşturup çapraz karışıma sebebiyet verirler. FWM oluşumu çeşitli etkenlere bağlıdır. Bunlardan bazıları kanallar arası frekans boşlukları, her kanaldaki giriş gücü, optik fiberdeki dispersiyon karakteristiği, kanalların birbirini etkilediği mesafe ve iletim mesafesidir. Kanallar arası boşlukların dar ve kanal giriş güçlerinin yüksek olduğu sistemlerde, FWM ürünleri sistem başarımını ciddi biçimde düşürürler. FWM çapraz karışımını bastırmak için, kanallar arası boşluklar farklı değerlerde seçilerek FWM ürünlerinin oluşumu ve kanallara etkisi önlenmeye çalışılır (Agrawal 2001 a).

WDM sistemlerinde optik arayüz olarak G.652 (Tek modlu fiber-SMF), G653 (Dispersiyonu kaydırılmış fiber-DSF), G655 (Sıfır olmayan kaydırılmış dispersiyonlu fiber-NZDSF) belirlenmiştir. Kapasite arttırmak için gerekli olan dar kanal boşlukları yakın gelecekte daha fazla bilgi taşımak için zorunlu olacaktır. Kanallar arası boşluk azaldıkça FWM'den dolayı çapraz karışım şiddeti de artar. ITU-T tarafından tavsiye edilen eşit kanal boşlukları da FWM olayını artırır. Bit örnekleme hızına bağlı olarak kanal frekansları ile yeni FWM frekansları çakışır. Sonuçta algılanan işaret gücü oldukça dalgalanacaktır. Bu sebeple FWM, optik fiber tabanlı DWDM haberleşme sistemlerinde baskın sınırlayıcıdır (Harboe ve ark. 2008).

WDM haberleşme sistemlerinde iletim kapasitesi işaret gürültü oranının (SNR) artması ile artar. Bunun için de yüksek güçlü optik işaretin fiber girişine verilmesi gerekir.

Büyük SNR için yüksek güç kullanılması, fiber doğrusalsızlığından ötürü işaret bozulmalarının artmasına sebep olur. Optik fiberdeki doğrusalsızlık etkileri optik güçteki kırılma indisinin değişmesinden kaynaklanır. Bu kırılma indisi Kerr etkisinden sorumludur. Kerr doğrusalsızlığı FWM, SPM ve XPM gibi farklı etkileri artırır. Pratikte WDM sistemlerinin iyi bir SNR değerine sahip olması önemlidir. Böylece iletilen bilgi yüksek doğrulukla alıcıdan elde edilebilir. Alıcı ve vericinin detaylarını bilmeye gerek kalmaz. SNR hesaplaması için optik bantlara düşen bütün FWM ürünlerini tanımlamak gerekmektedir (Harboe ve ark. 2008).

Bütün fiber doğrusalsızlıkları içinde FWM, WDM sistemlerinde baskın doğrusal olmayan etkidir. Bu doğrusal olmayan etkinin haberleşme sistemlerine olan etkisi irdelenip bastırılma çalışmaları yapılması gerekmektedir.

Tez çalışmasında, özellikle kanallar arası boşluk değeri, iletim mesafesi, kromatik dispersiyon ve kanal giriş gücündeki değişimlerin FWM'e etkileri üzerinde durulmuştur. Ayrıca DWDM sistemlerinde FWM-SNR analizinin SMF, DSF, NZDSF, DCF fiber tipleri için karşılaştırması yapılmıştır. Bu fiber tipleri için kanal boşluğu-FWM güç değişimi incelenmiştir.

İkinci bölümünde FWM hakkında yapılan kaynak araştırması ve FWM ile ilgili kuramsal bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, doğrusal olmayan optik, FWM, çok kanallı sistemlerde sistem başarımları değişkenleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise yapılan benzetimler ve elde edilen sonuçlar sunulup yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Tek Modlu Fiber Tipleri ve Özellikleri

Basamak indisli fiber çapı küçültüldüğünde, dalga kılavuzunda sadece bir mod yayılabilir. Bu tür fiberlere mono veya tek modlu fiber denir.

Tek modlu fiberin üstünlüklerinden dolayı (yüksek kapasite, düşük kayıp, mod dispersiyonu olmaması) bu fiberler uzak mesafelere işaret iletimi için kullanılırlar. Optik dalga kılavuzunun kullanım alanlarının çeşitlenmesinden beri birçok tek modlu fiber önerilmiştir. Bu fiberler zayıflama, dispersiyon veya doğrusalsızlık davranışları ile farklılaşmışlardır.

Mevcut dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemleri, standart kanallar arası boşluklu (100 GHz-50 GHz veya 0.8-0.4 nm) C bandında (1.53-1.565 μm) çalışmaktadır. Standart tek modlu fiberde band genişliği arttırıldığında dördüncü optik pencere olan 1.57- 1.62 μm optik işaretlerin kılavuzlanmasında kullanılır. Uluslararası haberleşme birliği (ITU) dört tip tek modlu fiber tanımlamıştır (Schneider 2004).

Dispersiyonu Kaydırılmamış Fiber (USF): 1983'den beri kullanılan standart tek modlu fiber olup 1.31 μm 'de malzeme dispersiyonu sıfırdan geçişe sahiptir. Bu fibere standart numarası ITU.652 olan dispersiyonu kaydırılmamış fiber (USF) denir. Şu ana kadar haberleşmede en çok kullanılan fiber tipidir.

Dispersiyonu Kaydırılmış Fiber (DSF): 1.55 μm 'de silika camının zayıflamasının en az olduğu, malzeme dispersiyonu sıfırdan geçişli fiberler 1985'den itibaren kullanıma sunulmuştur. Bu tip fiberlere de standart numarası ITU G.653 olan dispersiyonu kaydırılmış fiber (DSF) denir. DSF, zayıflama ve dispersiyon değerlerinin düşüklüğü, EDFA'ların da yaygınlaşması nedeniyle, uzun süre üçüncü haberleşme penceresinde ideal fiber tipi olarak varsayılmıştır. Ancak doğrusal olmayan optik etkiler daha iyi anlaşıldıkça bu varsayım değişmiştir. DSF'ler, bir taşıyıcı dalga boyu üzerinden yüksek bit hızlı uzak mesafe OTDM haberleşme sistemlerinde ideal olup WDM sistemleri için uygun değildir. Düşük dispersiyon faz eşleşmesine yol açıp dört dalga karışımı ürünlerinin oluşumuna sebebiyet vermektedir (Schneider 2004).

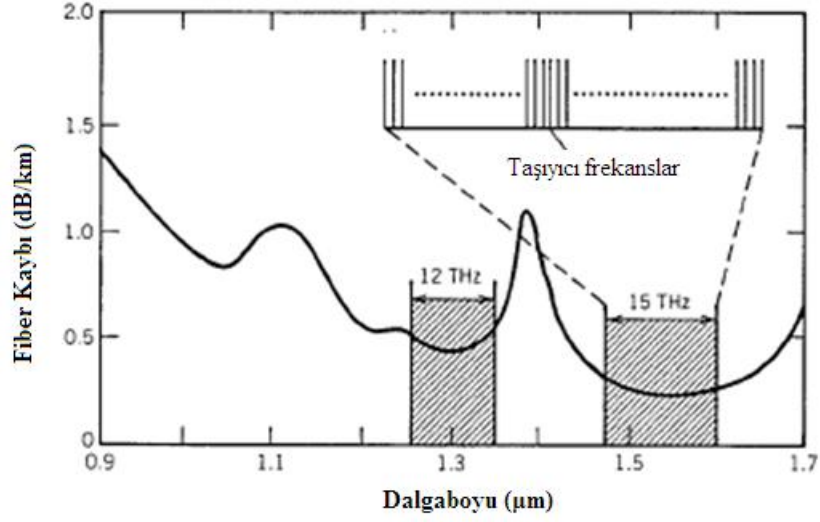
Sıfır Olmayan Kaydırılmış Dispersiyonlu Fiber (NZDSF): Üçüncü optik pencerede DWDM sistemler için uygundur. Bu fiberler 1.55 μm bölgesinde iletim için en uygun belirlenmiş dispersiyona sahiptir. Bu dispersiyon kanalları arasındaki FWM ürünlerini bastırarak faz uyumsuzluğu için yeterlidir. Aynı zamanda dispersiyon dengelemesine gerek kalmadan her WDM kanaldan 250 km mesafeye kadar 10 Gb/s bit hızı ile iletim yapılabilmektedir.

Dispersiyon Dengelemeli Fiber (DCF): Dalgaboyunun kırılma indisine bağlı olmasından dolayı optik darbenin farklı frekans bileşenleri farklı hızlarda yayılırlar. Bu etki darbede geçici genişlemeye sebep olur ve buna dispersiyon denir. Standart tek modlu fiberde dispersiyon değişkeni pozitif eğimlidir. Bu geçici genişlemeyi bastırmak için dispersiyon değişkeni negatif olan yeni tip optik fiberler geliştirilmiştir. Bu fiberler dispersiyon dengelemeli fiber (DCF) olarak adlandırılır. Eğer ortalama optik güç, optik fiberdeki doğrusal olmayan etkilerin ihmal edildiği düşük seviyede tutulursa DCF, grup hız dispersiyonunu (GVD) tamamen dengeleyebilir. DCF kullanılan karasal optik dalga sistemlerde yükselticiler arası 60-80 km olarak belirlenir ve fiber kayıpları dikkate alınarak GVD dengelenir. Ancak, bu durumda iki problem oluşur. Birincisi, DCF modül eklenmesi durumunda ilave kaybın 5 dB'yi aşmasıdır. İkincisi ise DCF modunun küçük çapından dolayı (etkin mod alanının yaklaşık $20 \mu\text{m}^2$ olması), DCF'ye giriş gücü verildiğinde optik şiddetin daha büyümesi ve doğrusal olmayan etkilerin oldukça artmasıdır. Bu problemler V değeri 2.5 olan iki modlu fiber tasarlanarak çözülebilir (Schneider 2004, Agrawal 2002).

2.2. WDM-DWDM Sistemleri

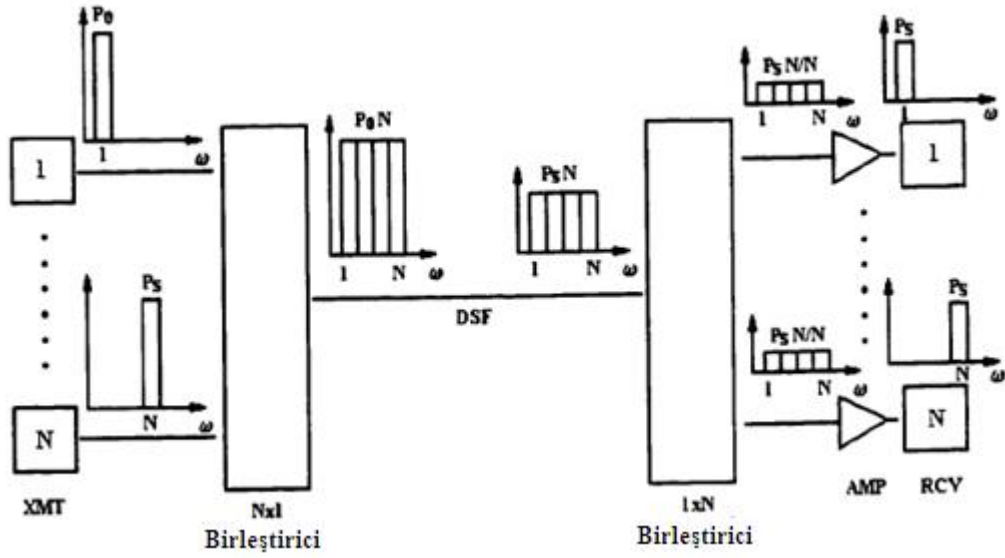
2.2.1. Standart WDM Sistemi

WDM, bağımsız elektriksel bit dizileri kullanılarak modüle edilen farklı dalga boylarındaki çoklu optik taşıyıcıların bulunduğu bir tekniktir. Modüle edilen işaretler aynı fiber üzerinden iletilirler. Alıcıdaki optik işaretler, optik teknikler kullanılarak yalınlayıcı ile farklı kanallara ayrılırlar. WDM, optik fiber bant genişliğini etkin kullanma potansiyeline sahiptir. Örneğin 10 Gb/s'lik yüzlerce kanal, kanal boşlukları 100 GHz altına düşürülerek aynı fiberden iletilebilirler (Agrawal, 2002).



Şekil 2.1. 1.3 μm ve 1.5 μm dalga boyu bölgelerinde silika fiberin düşük-kayıp iletim pencereleri (Agrawal 2002)

WDM sisteminde her kanala belirli dalga boyu tahsis edilir. N kanal aynı fiber üzerinden eş zamanlı olarak işaretlerini iletirler.



Şekil 2.2. N kanallı WDM sistem diyagramı (XMT verici, RCV alıcı, AMP kuvvetlendirici, DSF dispersiyonu kaydırılmış fiber) (Xiang 2000)

Dar bantlı optik bir kaynak her bir kanala giriş gücü sağlar. Her bir giriş gücü var-yok anahtarlama (OOK) ile modüle edilir. 1 biti için belirli miktarda güç iletilirken 0 biti için güç iletimi yapılmaz. Optik çoğullayıcı dört dalga karışımından kaynaklanan

spektrum bozulması ve zayıflamanın olduğu tek modlu fiberde belirli kaynaklardan gelen ışığı çoğullar. Alıcı sonunda optik yalınlayıcı (demultiplexer) gelen N tane çoğullanmış işareti ayırır. Bazı durumlarda erbium katkılı fiber yükselticiler gücü kuvvetlendirmek için kullanılırlar. Yükseltilmiş işaret ile büyük kayıplar telafi edilir. N kanaldan alınan işaret

$$Z_k = \{R_p, \text{ bit } 1\} \\ \{0, \text{ bit } 0\}$$

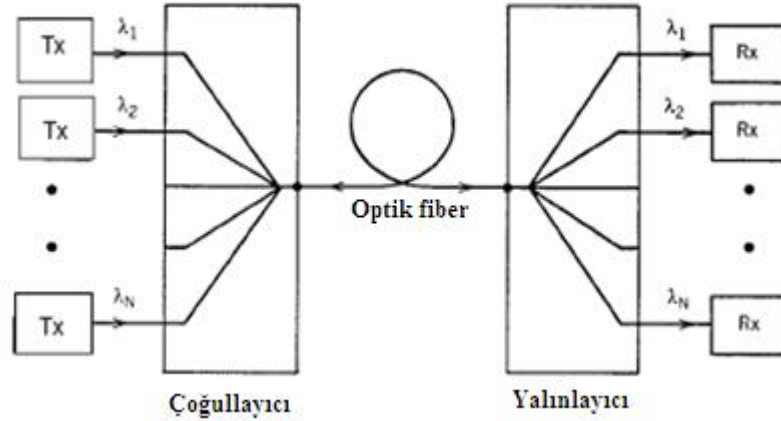
R_p : fotodiyot cevabı, çıkış akımının optik giriş gücüne oranıdır.
 P_V , alınan etkin işaret gücü

$$P_V = P_0 e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

P_0 , verici çıkış gücü veya fiber giriş gücüdür (Xiang 2000).

2.2.2. WDM Sisteminde Yüksek Kapasiteli Noktadan Noktaya Hatlar

Uzak mesafe taşıma kapasiteli fiber hatlar, haberleşme ağının belkemiğini şekillendirir. WDM' in rolü ise toplam bit hızını arttırmaktır. Şekil 2.3'te yüksek kapasiteli noktadan noktaya WDM hattının şematik gösterimi verilmiştir. Verici çıkışlarında, her bir işaret kendi taşıyıcı frekansına sahiptir, bu frekanslar ise beraber çoğullanmaktadır.



Şekil 2.3. Çok kanallı noktadan noktaya fiber hattı (T_x verici, R_x alıcı)

Hızları B_1 den B_N e kadar olan N kanal, L boyundaki fibere aynı anda iletilir. Toplam bit hızı- uzaklık çarpımı BL

$$BL = (B_1 + B_2 + \dots + B_N)L \quad (2.2)$$

WDM fiber hatlarının kapasitesi, dalga boyu domeninde birbirine yakın kanalların nasıl paketlenmesine bağlıdır. En küçük kanal boşluğu kanallar arası çapraz karışım tarafından sınırlandırılır. Genellikle kanallar arası boşluk Δn_{ch} , bit hızı B iken, $2B$ 'yi aşmalıdır. Bu gereklilik band genişliğinin önemli bölümünü boşa harcar. WDM sisteminin spektral etkinliği ;

$$h_s = B / \Delta n_{ch} \quad (2.3)$$

Spektral etkinlik olabildiğince geniş tutulmalıdır.

WDM sisteminin kanal frekansları, Uluslararası Haberleşme Birliği (ITU) tarafından 186-196 THz (1530 nm-1612 nm) frekans aralığı olarak standartlaştırılmıştır. WDM sisteminde kanal boşluğu genellikle 100 GHz'dir. Bu değer, 100 Gb/s bit hızı için % 10 spektral etkinliğe denk gelir. Kanal boşluğunun 50 GHz alınması durumunda, 40 Gb/s bit hızı için spektral etkinlik % 80'e çıkmaktadır. 40 Gb/s'lik kanal kapasitesi için, en küçük kanal boşluğu 50 GHz olabilir. 750 kanal 300 nm band genişliğini kullanır ise sonuçta etkin bit hızı 30 Tb/s'ye yükselebilir. Eğer WDM işareti, dispersiyon yönetimli optik yükselticiler kullanılarak 1000 km üzerine iletilirse, etkin BL, WDM teknolojisi kullanılarak 30.000 Tb/s-km' yi aşabilir. Çizelge 2.1' de sistem kapasitesi 2 Tb/s'yi aşan çeşitli WDM iletim başarımları gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Yüksek kapasiteli WDM iletim başarımları

Kanallar N	Bit Hızı B (Gb/s)	Kapasite NB (Tb/s)	Mesafe L (km)	NBL Ürün (Pb/s-km)
120	20	2.4	6200	14.88
132	20	2.64	120	0.317
160	20	3.20	1500	4.80
82	40	3.28	300	0.984
256	40	10.24	100	1.024
273	40	10.92	117	1.278

Pratikte düşük kayıp pencerelerinin kullanılmasını kısıtlayan birçok etken vardır. Çoğu optik yükseltici de sınırlı band genişliğine sahiptir. Kanal sayısı, yükselticiler tarafından uniform kazanç sağlayabilen band genişlikleri ile sınırlandırılır. Erbium katkılı fiber yükselticilerin band genişliği kazanç sabitleyici tekniği kullanılarak 40 nm’de sınırlandırılır. Raman yükselticileri yaklaşık 100 nm’lik band genişliğine sahiptir. Kanal sayılarını sınırlandıran diğer etkenler: i) dağıtılmış geribeslemeli yarıiletken lazerlerin kararlılığı ve ayarlanabilirliği ii) çeşitli doğrusal olmayan etkilerden dolayı iletim boyunca işaret zayıflaması iii) işaret çözümü esnasında kanallar arası çapraz karışım. Yüksek kapasiteli WDM fiber hatları için yüksek başarılı birçok bileşen gereklidir. Bunlardan bazıları, vericilerin DFB lazerlerle birleştirilmesi, eklenip çıkarılabilen kanal çoğullayıcılar ve yalınlayıcılar, büyük band genişlikli kazanç yükselticileridir (Agrawal 2002).

WDM sistemlerin deneysel sonuçları 100 km veya 1000 km iletim mesafesi tabanlı iki gruba bölünebilir. 1985 yılında on tane 2 Gb/s’lik kanallar 68 km’ye kadar iletilmiştir. Kanal sayıları ve özel kanalların bit hızları oldukça yükselebilir. 1995 yılında 340 Gb/s’lik kapasite, her bir kanalda 20 Gb/s olacak şekilde toplam 17 kanaldan 50 km’ye kadar iletilmiştir. 2001 yılında ise WDM sistem kapasitesi 10 Tb/s’e yükselmiştir. Yapılan bir denemede kanal boşluğu 0.4 nm olan 273 kanaldan, kanal başına 40 Gb/s işaret, 3 yükseltici kullanılarak 117 km boyunca gönderilmiş ve toplamda 11 Tb/s’lik bit hızına ulaşılmıştır. BL ise 1300 Tb/s-km’dir.

2.2.3. DWDM Sistemi

DWDM, sıradan WDM’in aksine, kesin bir işletim bölgesi veya uygulama şartları belirtmez. WDM ve DWDM tek modlu fiberde (SMF) farklı frekanslardaki çoklu ışık dalgalarını taşımada kullanılır. WDM ile DWDM arasındaki en temel fark kullanılabilen kanal sayısıdır. DWDM’de kanalların dalga boyları arasındaki boşluklar WDM’e göre daha azdır, bu sebeple de kapasitesi daha yüksektir. Kullanıcı WDM ve DWDM terminolojilerini birbirleri ile değişebilir şekilde kullanır. Tipik olarak WDM sistemlerinde tek fiberde dört veya sekiz farklı optik haberleşme kanalı sağlanırken DWDM ile sekiz ve üzeri haberleşme kanalı sağlanabilir. 1990 ortalarında DWDM sistemlerinde 16-40 kanal ve kanallar arası boşluk 100 GHz-200 GHz olarak

kullanılmıştır. 1990'lerden sonra ise DWDM sistemlerin kapasitesi 64-160 paralel kanal ve kanallar arası boşluk 50 GHz-25 GHz olarak geliştirilmiştir.

Birkaç ışık kaynağı kullanılması durumunda, kanallar arası boşluk yeterli ise işaretler arası girişim meydana gelmez. Her bir kaynaktan gelen bağımsız mesajların bütünü alıcıda sırası korunarak elektrik işaretine dönüştürülür. DWDM iletim sistemlerinin karakteristiğinde, frekans ve dalga boyunun birbirleri ile değişimi kullanılabilir. Dalga boyu λ ve taşıyıcı frekansı ν olmak üzere aralarındaki bağıntı:

$$u = \frac{c}{l} \quad (2.4)$$

c ışığın boşluktaki hızıdır ve 3×10^8 m/s'dir. Band genişliği Δf veya Δu_{opt} ile hesaplanabilir.

$$|\Delta u_{opt}| = \left(\frac{c}{l^2} \right) \Delta l \quad (2.5)$$

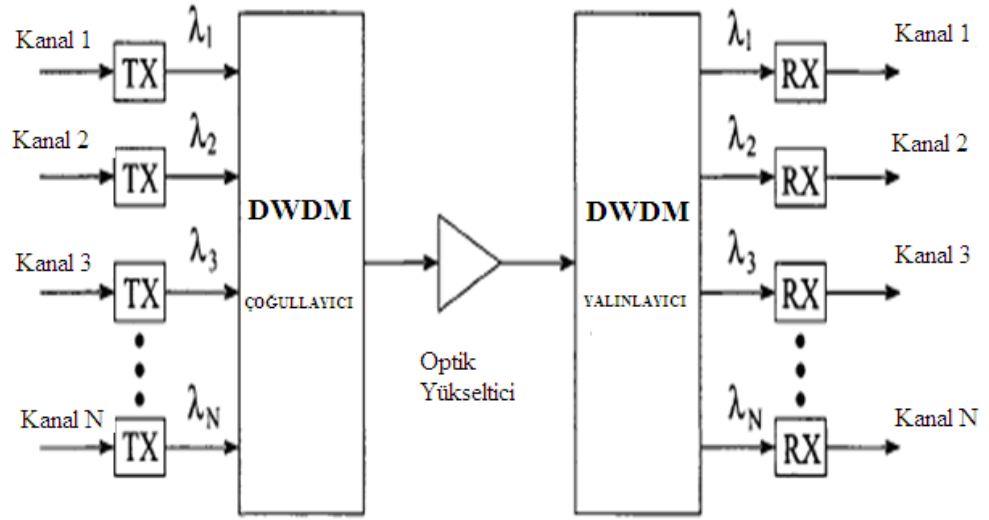
Frekans sapması (optik band genişliği) Δu_{opt} , λ civarındaki dalga boyu sapması $\Delta \lambda$ ile doğru orantılıdır. Bu ilişki kanallar arası boşluğun küçük olduğu durum sağlandıkça devam eder.

DWDM sisteminin en önemli özelliklerinden biri de ağ kapasitesinin var olan diğer teknolojiler ile karşılaştırılabilecek derecede geliştirilmiş olmasıdır. DWDM, SONET/SDH gibi ağ teknolojilerinin üzerine yüklenerek maliyet azaltılabilir. DWDM ekipmanları SONET/SDH standartlarının üzerinde yapılandırılabilir. Kanal tanımlama veya görüntüleme için uygulanan mekanizmalar ile DWDM ağları kontrol edilebilir. Standart tek fiberli optik hatlarda bir ışık kaynağı, alıcıda ise bir fotoalıcı mevcuttur. Bu hattın kapasitesinin 2.5 Gb/s olması durumunda, veri akış hızları 155 Mb/s olan 16 STM-1 SDH veya OC-3 SONET ile elektriksel çoğullama yapılır ve elektriksel işaretler lazer diyottan sonra optik işaret olarak optik fiberden iletilirler. Basit hatlarda farklı ışık kaynaklarından gelen işaretler tek bir optik fiberi ayırık ve atanmış kanallara ayırarak kullanılırlar. İşaretlerin ölçeklenirliğini sağlamak için DWDM terminallerinde yeniden

üretimi yapılabilir. Bu durum karmaşık metropolitan ve ulusal ağların kurulmasına olanak sağlar (Bang 2006).

Optik iletim sistemlerinde bir optik işaret optik fiber boyunca iletilir. Bu esnada zayıflama, dispersiyon, optik darbe genişlemesi gibi doğrusal etkiler ve kuvvetlendirici band genişliğini kapsayan bazı sınırlamalar ile karşılaşır. Ayrıca kırılma indisine bağlı doğrusal olmayan etkiler ve saçılım mekanizmaları DWDM sistemlerinde başarımın düşmesine sebep olur. İyi bir mühendislik ile tasarlanan DWDM sistemleri, bu tip potansiyel iletim problemlerinin üstesinden gelecek yapıya sahip olur.

DWDM sistem tasarımı tek fiberdeki toplam band genişliğinden yararlanır. Genel bir DWDM sisteminde beş ana eleman mevcuttur. Bunlar, optik verici (lazer), optik çoğullayıcı (multiplexer), optik yalınlayıcı (demultiplexer), optik kuvvetlendirici ve optik alıcıdır. DWDM sisteminin genel yapısı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. DWDM sisteminin blok diyagramı

MMF kullanan optik iletim sistemlerinde önceleri işlemler birinci dalga boyu penceresi olan 850 nm, daha sonraları ise ikinci dalga boyu penceresi olan 1330 nm civarlarında yapılmıştır. Ancak DWDM sistemlerinde 1550 nm civarları olan üçüncü dalga boyu penceresinde yapılan işlemlerde düşük zayıflamalar söz konusudur. Bu işlem aralığı optik güç kaybını minimize eder. Fiber boyunca yapılan iletimlerde optik yükselticiler

(EDFA) kullanılarak işaret gücü yükseltilir ve alıcıda iyi bir işaret doğruluğu ile uzak iletim mesafelerine olanak sağlanır.

Verici çıkışında birçok bağımsız modüle edilmiş ışık kaynağı söz konusudur ve yayılan işaretlerin dalga boyları $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ dir. Optik çoğullayıcı bu optik çıkışları sürekli spektrumlu işaretlere çevirip tek fiber üzerinde birleştirir. Yalınlayıcı (Demux.) optik işaretleri, uygun algılama kanallarında ayırır. Alıcıda kanallara sahte işaretlerin girmesini engellemek için farklı dalga boyları kullanılarak iyi bir kanal izolasyonu sağlanmalıdır. Yalınlayıcıda (Demux) ise dar bir spektral işlem sergilenmeli veya keskin dalga boyu kesimleri olan çok kararlı optik filtreler kullanılmalıdır.

Optik yükselticiler (OA), zayıflamış optik işareti yeniden oluşturmada anahtar aygıtlardır. İşaret elektriksel darbelere dönüştürülmez. Uzak mesafeli ağlarda OA kümülatif optik güç kayıplarını minimize eder ve daha doğru işaretler ile daha iyi iletim mesafesi sağlar. Optik alıcı gelen optik işaretleri algılamak ve bu işaretleri alıcı aygıtında işlem görecektir elektriksel işaretlere çevirmekle yükümlüdür. Optik alıcılar geniş bantlı aygıtlardır. Düşük optik güç kayıpları ve iyi bir iletim başarımı sergilenmesi durumunda 1300 nm-1600 nm aralığındaki dalga boylarını algılayabilirler. DWDM dalga boylarını aynı fiber üzerinde birleştirebilir. Böylece her optik fiberdeki toplam band genişliği artar (Bang 2006).

2.2.4. Sistem Tasarımının Gereklileri ve Esasları

DWDM sistem tasarımında bazı gereklilikler vardır. Bu gereklilikler; kanal değişkenleri, güç bütçesi, optik kuvvetlendirici ve band genişliği yönetimidir.

İlk olarak kanal merkez frekansı, kanal genişliği, kanallar arası boşluk, bit hızı, dispersiyon gibi çeşitli kanal değişkenleri mevcuttur. Kanalların merkez frekansı iletimde ve alımda aynı olmalıdır. Kanal genişliği kanallarla üst üste binmeyecek ve spektrumla uyumlu olacak şekilde tanımlanır. Çoğullanmış iki farklı işaret arasındaki en küçük frekans boşluğuna kanallar arası boşluk denir. İşlem dalga boyları frekansla ters orantılıdır. Kanallar arası boşluk azaldığı zaman iletilebilecek kanal sayısı artar. Böylece sistem iletim kapasitesi artar. Uluslararası Haberleşme Birliği (ITU) her bir dalga boyu için kanallar arası boşluğu 100 GHz (0.8 nm) olarak tavsiye eder. Bit hata

oranı (BER) kullanılan alıcının başarımlı değerini gösterme biçimidir. BER, kanallar arası girişime, alıcıdaki optik güç seviyesine, modülasyon tekniğine, diğer gürültü kaynaklarına bağlıdır. Farklı bit hızları için alıcı farklı büyüklükte hatalara sahiptir. Tipik olarak optik sistemde BER 10^{-9} ile 10^{-12} arasında olmalıdır. Bir DWDM sistemde, farklı dalga boylarındaki işaretler optik fiberde ve çeşitli optik bileşenlerde iletilirken, dispersiyon meydana gelir. Kanal sayısına bağlı olan merkez frekans etrafındaki her bir kanalın frekans dağılımları, kanallar arası boşluk, optik yol uzunluğu, optik yoldaki aygıtların dispersiyon karakteristikleri, her bir kanalın toplam dispersiyonu hesaplanmalıdır.

Güç bütçesi değişkenleri, optik iletim süresince optik alıcıya gelen yeterli gücün başarımlımlı güvenli şekilde sürdürmeyi sağlamak için düzenlenmiştir. Optik alıcı için gerekli olan en küçük ortalama güç alıcı hassasiyetidir. Her bir verici için belirlenen ortalama başlangıç gücü dBm olarak ifade edilir. Optik güç bütçesi, verici ve alıcı arasındaki yol boyunca her bir elemandaki işaret kayıpları hesaplanarak elde edilir. Alıcıya ulaşan güç yeterli büyüklükte olmalıdır böylece hatasız algılama sağlanmış olur. Alıcıdaki işaretlerin gürültüden daha büyük olması gerektiği gibi, alıcıdaki optik işaret gücü en küçük alıcı hassasiyetinden daha büyük olmalıdır.

Optik yükselticiler, optik işaret gücünü yeniden eski haline getirecek şekilde kullanılmalıdır. DWDM sistemlerinde en önemli kuvvetlendiricisi EDFA'dır. EDFA aynı anda çoklu kanalları kuvvetlendirebilir. EDFA 1530 nm ile 1570 nm aralığındaki işaret seviyelerini yükseltmek için kullanılır. En iyi işlem aralığı fiberdeki düşük zayıflama karakteristiğinden dolayı 1550 nm'dir.

Son olarak DWDM kanallarında bir dalga boyu tahsis edilen işaretin doğruluğu (bütünlüğü) sürekli olarak gözlemlenmelidir. Sadece gürültüden kaynaklı girişimler değil; verici, alıcı, kuvvetlendirici, filtreler gibi bütün optik elemanların izolasyonu ve hata yerleri izlenmelidir. Kanaldaki işaret kalitesi düştüğü zaman, dalga boyu yönetim fonksiyonu ile başka bir dalga boyu bu işaret için hemen tahsis edilmelidir. Bunun anlamı, DWDM sistemlerinin, dalga boyunu korumak için başarımlımlımlı izleyen optik aygıtlara ve dinamik dalga boyu tahsisi sağlayan protokollere sahip olduğudur (Bang 2006).

2.3. Kaynak Araştırması

Doğrusal olmayan optik konusunda ilk deneysel çalışma 1961 yılında Franken ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Frank ve ark. 1961). İkinci harmonik üretimiyle sonuçlanan deneyde, kuvars kristali kullanılarak aynı frekansta iki fotonun birleşip o frekansın iki katında tek bir fotonun oluşması gözlemlenmiştir. Deneyde gözlemlenen ikinci harmonik üretimi, ikinci dereceden doğrusal olmayan duyarlılık (χ^2) etkisi ile oluşan bir etkileşim olan üç dalga karışımının özel bir durumudur.

İlk doğrusal olmayan etkilerin ve dört dalga karışımının (FWM) optik fiberli haberleşme sistemlerinde incelenmesi ise 90'lı yılların başlarında gerçekleşmiştir. Marcuse ve arkadaşları (1991) uzak mesafe iletimlerde fiber doğrusalsızlık etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, çok kanallı WDM sistemlerinde olumsuz etkilere yol açan yapay dalgalar meydana geldiği için hiçbir kanalın tam olarak sıfır dispersiyon dalgaboyunda yer almaması gerektiği ve ASK formatı kullanılan ışık modüleli iki kanallı bir WDM iletiminde, iki kanal arası mesafenin en az 2-3 nm olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Chiang ve ark. (1993), ASK optik fiber sistemlerinde FWM girişiminin istatistiksel dağılımını yapmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre FWM girişiminin olasılık yoğunluk fonksiyonu Gauss dağılımına sahip değildir. Aynı grup FWM etkisini, SFED (tek filtreli zarf sezici) alıcılı optik FSK WDM haberleşme sistemlerinde de incelemişlerdir (Datta ve ark. 1993).

Kikuchi ve ark. (1993) yarı iletken optik yükselticilerde bozunmuş dört dalga karışımını kullanarak optik frekans değişiminin gürültü analizini gerçekleştirmiştir. Bu teknik, optik frekans band genişliğini kullandığı için esneklik ve verimlilik bakımından WDM sistemlerinde tercih edilmektedir. Burada, iki pompa lazerden birindeki çapraz karışımın, BER başarımı üzerinde alıcı hassasiyet cezasına sebep olabileceği gösterilmiştir. Elde ettikleri önemli bir bulgu da frekans çeviricideki işaret bozulmalarının en büyük ağ boyutunu sınırladığıdır.

İletim ağlarında optik dalga boyu değiştirme teknikleri Iannone ve ark. (1996) tarafından incelenmiştir. Ağ iletim başarımını geliştirmek için yarı-analitik model

geliştirmişlerdir. Uygulamada sönümleme oranının düşüklüğü ve yüksek gürültüsünden dolayı çapraz kazanç modülasyonuna dayalı dönüştürücüler uygun olmamıştır. Sonuçlara göre sistemdeki yüksek başarımlı, çapraz faz modülasyonu veya FWM'e bağlı dalga boyu dönüştürücüler ile sağlanabilir.

Breuer ve ark. (1998) 1550 nm'de 1000 km'lik standart tek modlu fiberli Nx40 Gb/s ve 4Nx10 Gb/s WDM iletimlerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. WDM sisteminde her bir kanalın sistem başarımının SMF'nin dispersiyonunun yetersiz dengelenmesinden dolayı birikmiş hat dispersiyonu tarafından sınırlandırıldığı, 16x10 Gb/s iletim için ise dispersiyon telafisine gerek olmadığı izlenmiştir.

Song (2000) WDM sistemlerde yüksek dereceli dört dalga karışımı ve etkilerini deneysel çalışmalar ile araştırmıştır. İki kanallı WDM sisteminde yüksek dereceli FWM çapraz karışımının birinci dereceden FWM çapraz karışımı ile karşılaştırılması yapıldığında eşit olmayan kanallar arası boşluk ile birinci dereceden FWM çapraz karışım etkisinin azaltılabileceği sonucu ortaya çıkmıştır.

Dispersiyon yönetimli fiber hatlarda FWM'in evre uyumlu etkisini Lee ve ark. (2002) incelemişlerdir. Kullandıkları Monte Carlo benzetimi ile DMF hatlarında var olan FWM'den kaynaklı sistem cezasındaki bit hata olasılığı (BER) başarımlı düşüşlerini anlamayı ve yaptıkları çalışmayı teori ile doğrulamayı amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışmada, Monte Carlo benzetimi tarafından sağlanan Q ceza eğiminin periyodik dalgalanması, FWM'in evre uyumlu etkisini doğruladığını göstermiştir.

Faisal ve ark. (2005) da FWM'in var olduğu WSK-WDM ve geleneksel var-yok WDM sistemleri arasında başarımlı karşılaştırmasını yapmışlardır. WSK-WDM'in OOK-WDM'e göre bütün işaret seviyeleri için daha iyi başarımlı gösterdiği, daha yüksek giriş gücüne izin verdiği, düşük güç cezasına sahip olduğu, 10^{-9} BER ile daha uzak noktalara iletim yapabileceği ve gürültüye karşı daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir.

Wehmann ve ark.(2005) bir WDM sistemi için dispersiyonu azaltılmış fiberde FWM'in analizini yapmışlardır. Çalışmalarında 1550 nm bölgesinde FWM için dönüştürme verimliliğini (CE) doğrusal, hiperbolik ve sabit olmak üzere üç farklı çalışma profiline göre incelemişlerdir. Yaptıkları karşılaştırma sonucu elde ettikleri bulgulara göre

küçültülmüş kanallar arası boşlukta, fiber mesafesine göre hiperbolik profilin CE'sinin daha büyük olduğu saptanmıştır. Elde ettikleri diğer önemli bir bulgu da fiber başlangıcında CE'nin artırılması durumunda hiperbolik profilin CE'sinde herhangi bir dalgalanmanın olmamasıdır.

FWM'in WDM optik fiberli sistemlerde incelenmesine sonraki yıllarda da devam edilmiştir. Nitekim Kaurr ve ark. (2007) erbium katkılı fiber yükselticili bir WDM sisteminde optik fiberde doğrusal olmayan ve toplam gürültüye eklenen dört dalga karışımı (FWM) ve uyarılmış Raman saçılması (SRS) etkilerini geliştirdikleri algoritma ile çalışmışlardır. İşaret gürültü oranında baskın gürültünün FWM olduğu ve yapılan diğer çalışmalarda (Forghieri ve ark. 1993, Hwang ve ark. 1995) olduğu gibi sistemde eşit olmayan kanallar arası boşluk kullanılarak bu etkinin azaltılması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır.

1999 yılından itibaren optik fiberli WDM sistemlerinde sistem cezasına yol açan SPM ve XPM'in FWM ile karşılaştırılması ve bu doğrusal olmayan olayların sisteme etkileri üzerine çalışmalar (Song ve ark. 1999, Ten ve ark. 1999, Wegener ve ark. 2004) yapılmıştır. XPM ve FWM'in baskın doğrusal olmayan etkiler olduğu, her birinin toplam gürültüye eklendiği ve işaretler arası çapraz karışıma sebebiyet vererek sistem SNR'ını olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır. Bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Optik fiberli WDM sistemlerinde iletim mesafesini arttırmak için yükselticiler kullanarak sistem modellemeyi Pasquale ve ark. (1995) gerçekleştirmiştir. Yükseltici olarak erbium katkılı fiber yükseltici (EDFA) kullanmışlardır. Uygun dalga boyu seçimi ve dispersiyon yönetimi ile bütün kanallar için $SNR > 17$ dB ve $\Delta SNR < 8$ dB olan 85'ten fazla dalga boyu kullanımı ile 500 km iletim mesafesine ulaşmışlardır. Bu konuda yapılan başka bir çalışma da Zeiler ve ark. (1996) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yine yükseltici olarak EDFA'lar kullanılmıştır. Dispersiyon dengelemesi için yüksek negatif dispersif fiber, işaret iletimi için ise tek modlu fiber kullanılmıştır. Böylece oluşan FWM bastırılarak sistem başarımı arttırılmış ve yirmi kanallı WDM sistemi için iletim mesafesi 4000 km'ye kadar ulaşmıştır.

FWM'in çapraz karışım etkisini bastırma yollarından biri olan dispersiyon yönetimi ile ilgili 1990'lerden itibaren birçok makale yayınlanmıştır. Bu çalışmalardan biri, Sekine ve ark. (1994) tarafından beş adet EDFA yükseltici kullanarak oluşturdukları WDM sistemidir. Sistemde dispersiyon değişkenliğini, dispersiyonu kaydırılmış fiber kullanarak ayarlayıp etkin mesafe boyunca faz uyumsuzluğunun doyuma ulaşmasını engellemişlerdir. Böylece toplam dispersiyon yaklaşık sıfır olmuş ve FWM çapraz karışım etkisini bastırmışlardır.

Juidy (1997) ise tek modlu fiber ve NZD fiber kullandığı DWDM sisteminde fiber dispersiyon etkisi ve sistem cezasındaki dispersiyon dengelemesini değerlendirmiş ve düşük dispersiyon değerinden kaçınılması gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

FWM'i bastırmak için dispersiyon değişkeninin değerlendirilmesi ile ilgili yapılan diğer bir çalışma da Singh ve ark. (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında yüksek dereceden (iki, üç dört, beş) dispersiyonlu WDM sistemlerinde FWM analizini farklı giriş güçlerine ve etkin alanlarına göre değerlendirmişlerdir. Yüksek dereceden dispersiyon terimlerinin FWM gücünde önemli etkiye sahip olduğu, dispersiyon derecesi arttıkça etkisinin azaldığı bulgusu yanında diğer önemli bir sonuç da yükseltilmiş dispersiyon değişkenlerinin birleştirilmiş etkisi altında FWM çapraz karışımının ortaya çıkmasıdır.

Optik fiberli WDM sistemlerinde var olan ve sistem başarımını olumsuz etkileyen FWM'i bastırmak veya etkisini azaltmak için 1993'ten itibaren birçok çalışmalar yapılmış ve çeşitli yöntemler kullanılmıştır.

Bu çalışmalardan biri de Hwang ve ark. (1995)'nin S-USCA yöntemini kullanarak toplam band genişliğini minimize etmesi ve eşit olmayan kanallar arası boşluk ile FWM güç cezasını azaltmalarıdır.

Chang ve ark. (2000) ise eşit olmayan kanallar arası boşluklu WDM sisteminde FWM ürünlerini, frekans farkı üçgeni (FDT) ve frekans farkı dikdörtgeni (FDS) yöntemlerini kullanarak geliştirdikleri iki algoritma ile tanımlamışlardır. Kanallar arası boşlukları ayarlayarak FWM çapraz karışım etkisini ve kanallar arası girişimi azaltabilmişlerdir.

FWM etkisini bastırmak için Randhawa ve ark. (2008) kanal paylaşırma yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntem ile band genişlik verimliliği sürdürülerek FWM etkinliğini düşürmeye izin veren Golomb kuralına dayandırmışlardır.

Singh ve ark. (2009) ise DWDM optik haberleşme sisteminde FWM bastırma yöntemleri olan eşit kanal boşluğu, optik birleştirme, sıralı (alternatif) gecikme, ortogonal kutuplanma, ortogonal kutuplanmalı eşit olmayan kanal boşluğu yöntemlerini incelemişlerdir. Önerilen FWM bastırma yöntemlerinden eşit olmayan kanal boşluğunun en iyisi olduğu ancak karmaşık sistem tasarımına gerek duyulduğu anlaşılmıştır.

Çeşitli fiber tipleri göz önüne alınarak FWM etkisinin optik WDM haberleşme sistemlerinde incelenmesi de ayrı bir konu oluşturmuştur.

Georges (1997) yoğun çoklu dalgaboyu kaynağında dispersiyonu kaydırılmış fiber ve düşük dispersiyon fiberlerinde FWM'i deneysel olarak çalışmıştır. Ancak kutuplanma etkisi kontrol edilemediği için en kötü durum göz ardı edilmiştir.

Gao ve ark.(2002) SMF, NZDSF ve HNLF fiberleri için FWM'in kanallar arası darbelerinin karşılaştırılmasını yapmışlardır. FWM'in değişim etkilerinden olan kanal boşluğu, fiber uzunluğu, işaret gücü gibi fonksiyonları incelenmiştir. Sonuçlara göre DWDM sisteminde HNLF'deki FWM, NZDSF'den 40 kez SMF'den 400 kez daha geniş bulunmuştur. Hesaplamalarda walk off değeri ve dispersiyon değişkenleri dikkate alınmıştır.

Optik fiberli haberleşme sistemlerinde faz modülasyonu tarafından indüklenen FWM çıkış gücünün etkileri, Wang ve ark. tarafından (2009) incelenmiştir. DSF, NZDSF ve iki tip DCF fiberdeki pompa ışık değişkenliği, nümerik benzetim ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Yapılan kaynak araştırmasında, FWM ile ilgili araştırmaların aşağıda gösterildiği gibi gruplanabileceği saptanmıştır.

- FWM' in haberleşme sistemlerine etkisinin analizi
- FWM nümerik çözümüne ait yöntemler

- FWM'li haberleşme sistemlerine etki eden unsurların analizi
- FWM bastırma yöntemleri

Yapılan literatür araştırması sonucu, tezin amacı, dört dalga karışımının fotonik WDM ağlarda iletim başarımı üzerindeki etkisinin incelenmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, kanallar arası boşluğun farklı değerlerindeki FWM gürültü gücü, kanal gücü değişiminin birinci ve ikinci dereceden FWM çapraz karışımına etkisi, FWM gücünün farklı iletim mesafeleri ve kromatik dispersiyon değerlerine göre değişimi, FWM etkinliği-iletim mesafesi ilişkisi, DWDM sisteminde SMF, DSF, NZDSF, DCF fiber tipleri için farklı kanal boşlukları ve kanal sayılarına göre FWM gücü ve FWM etkisi ile oluşan işaret gürültü oranları (SNR) irdelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde üçüncü dereceden doğrusal olmayan ortamlardaki optik özellikler ve bu özellikler kullanılarak çeşitli optik etkileşimlerin nasıl oluştuğu incelenecektir. Daha sonra fiberlerdeki optik etkileşimlerden dört dalga karışımının (FWM) nasıl oluştuğu ve sistem başarımını nasıl etkilediği anlatılacaktır.

3.1. Doğrusal Olmayan Optik

Doğrusal olmayan optik ilk olarak 1960 yılında yapılan lazer gelişim çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Yaklaşık olarak monokromatik özellik gösteren kolay elde edilebilir evre uyumlu optik ışınım yeni bir olay olarak rapor edilmiş ve profesyonel literatürde yerini almıştır. 1961'den itibaren de doğrusal olmayan optik muazzam bir hızda gelişmeye devam etmektedir

(Thiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf> 2010).

Doğrusal olmayan optik, bir ortamda yüksek şiddette ışığın neden olduğu doğrusal olmayan etkileri ve bu etkilerin optik alanları doğrusal olmayan şekilde değiştirmesini inceler. Aslında her madde belli bir dereceye kadar doğrusal olmayan özellik taşır. Işık doğrusal olmayan bir ortamdan geçerken frekansı değişir, fotonları kendi aralarında etkileşime girerler ve süperdurum ilkesi tutarlı olmayabilir. Optik bir dalganın ilerlediği dielektrik ortamın özelliklerinin tamamı kutuplanma yoğunluk vektörü \vec{P} ile elektrik alan vektörü \vec{E} arasındaki ilişki ile tanımlanabilir (Hünerli 2009).

3.1.1. Doğrusal Olmayan Kutuplanma

Işık belirli bir ortamda ilerlerken elektrik alan, ortamda bir miktar elektriksel kutuplanmanın oluşmasına yol açar. Bu elektrik alan yeterince küçük olduğunda kutuplanma ile uygulanan elektrik alan birbirleriyle doğru orantılıdır.

$$\vec{P}_L = \epsilon_0 \epsilon^{(1)} \cdot \vec{E} \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada $\chi^{(1)}$ doğrusal duyarlılık tensörü, ϵ_0 ise boşluğun dielektrik sabitidir. Eğer yeterince büyük bir elektrik alan uygulanırsa kutuplanmanın, elektrik alana olan bağımlılığını doğrusal olmayan bir ilişki ile ifade etmek gerekir. Bu ilişki elektrik alanın kuvvet serisi olarak ifade edilebilir.

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \left(\mathbf{c}^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{c}^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \mathbf{c}^{(3)} \mathbf{M}\mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \right) \quad (3.2)$$

Burada $\chi^{(2)}$ ve $\chi^{(3)}$ sırasıyla 2. ve 3. dereceden doğrusal olmayan duyarlılık tensörüdür. İkinci dereceden duyarlılığın etkisi genellikle daha üst dereceli tensörlerin etkisinin ihmal edilmesine sebep olur. Fiberlerde ise silika moleküllerinin simetrik olması nedeniyle çift dereceli kutuplanma elemanları yok olur ve üçüncü dereceden doğrusal olmayan duyarlılık tensörünün etkisi önem kazanır. Bu durum fiberlerde \mathbf{P}_L doğrusal ve \mathbf{P}_{NL} doğrusal olmayan kutuplanma olmak üzere

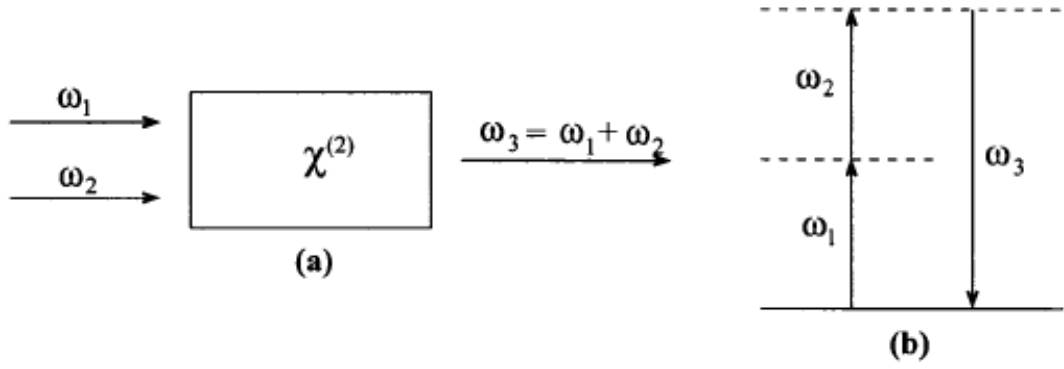
$$\mathbf{P}_L = \epsilon_0 \mathbf{c}^{(1)} \cdot \mathbf{E} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{P}_{NL} = \epsilon_0 \mathbf{c}^{(3)} \mathbf{M}\mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} \quad (3.4)$$

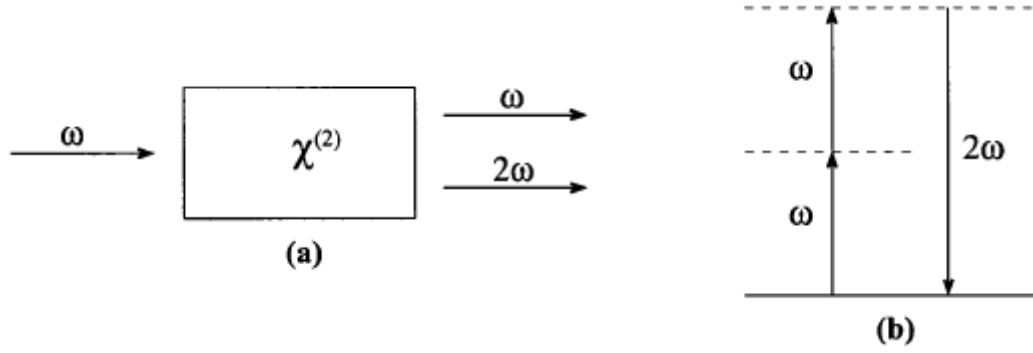
şeklinde özetlenebilir. Üçüncü harmonik üretimi ve dört dalga karışımı gibi doğrusal olmayan etkiler üçüncü derece duyarlılıktan $\chi^{(3)}$ kaynaklanmaktadır.

3.1.2. $\chi^{(2)}$ Kaynaklı Doğrusal Olmayan Etkileşimler

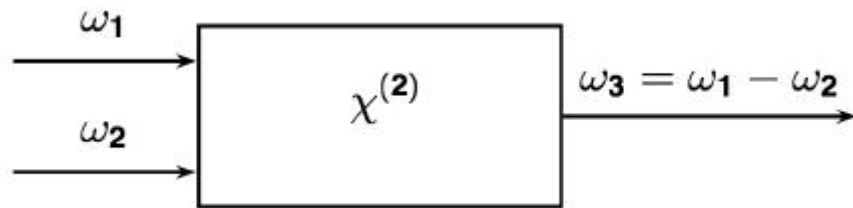
İkinci derece doğrusal olmayan duyarlılık tensörü olan $\chi^{(2)}$, üçüncü seviyeden bir tensördür ve merkezi-simetrik olmayan ortamlarda baskındır. Toplam kutuplanma yazılırken sadece $P^{(1)}$ ve $P^{(2)}$ hesaba katılır.



Şekil 3.1. a) $\chi^{(2)}$ ortamında toplam frekans üretimi b) Enerji seviyesi diyagramı (Bang 2006)



Şekil 3.2. a) $\chi^{(2)}$ ortamında ikinci harmonik üretimi b) Enerji seviyesi diyagramı (Bang 2006)



Şekil 3.3. $\chi^{(2)}$ ortamında frekans farkı üretimi (Bang 2006)

İkinci harmonik üretimi toplam frekans üretimi, frekans farkı üretimi ve elektro-optik etki gibi optik etkileşimlerden sorumludur.

3.1.3. Doğrusal olmayan Schrödinger Eşitlikleri

Doğrusal olmayan Schrödinger eşitliği doğrusal olmayan fiber tiplerinin kullanılması durumunda band içi etkilerin tanımlanmasında kullanılır. Dispersiyon ve doğrusalsızlık, sistemde önemli bir rol oynar ve eşitlik (3.5)'te gösterilmiştir. $\underline{E}(z,t)$ ışığın elektrik alanının yavaş değişen karmaşık zarfını belirtir ve gücü karakterize eder. $\underline{\hat{D}}$ dispersiyon değişkeni, $\underline{\hat{N}}$ doğrusal olmayan değişkeni gösterir (MIR 2007).

$$\frac{\partial \underline{E}(z,t)}{\partial z} = [\underline{\hat{D}} + \underline{\hat{N}}] \underline{E}(z,t) \quad (3.5)$$

$$\underline{\hat{D}} = j \frac{b_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{b_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} - \frac{a}{2} \quad (3.6)$$

$$b_2 = -\frac{I_{ref}^2}{2pc} D_1 \quad (3.7)$$

$$b_3 = -\frac{I_{ref}^2}{(2pc)^2} (I_{ref}^2 S_1 + 2I_{ref} D_1) \quad (3.8)$$

$$\underline{\hat{N}} = -jg |\underline{E}(z,t)|^2 \quad (3.9)$$

$$g = \frac{2pn_2 f_{ref}}{cA_{eff}} \quad (3.10)$$

b_2 [s^2/m], birinci dereceden grup hız dispersiyonunu (GVD) tanımlar ve kaynak dalga boyundaki dispersiyon değişkeni ile ilişkilidir. b_3 [s^2/m], ikinci dereceden GVD eğimidir ve dispersiyon eğimi $S_1 = dD_1 / d\lambda$ ile ilişkilidir. γ doğrusalsızlık katsayısı, n_2 doğrusal olmayan kırılma indisi, A_{eff} , etkin alan, f_{ref} kaynak alınan frekanstır.

3.2. Doğrusal Olmayan Optik Fiber

Optik fiberde veri hızının, kanal sayısının, güç seviyesinin, fiber mesafe etkilerinin artması, fiberde doğrusal olmayan olaylara sebebiyet verir. İşaret iletimini etkileyen bozucu etkenler sadece fiber zayıflaması ve dispersiyon değildir. Bu tip bozucu etkilerin üstesinden çeşitli dengeleyici teknikler sayesinde gelinebilir. Optik fiber doğrusalsızlıkları ise girişim, bozulma, işaretle aşırı zayıflama ve sistem başarımında azalmalara sebebiyet verir. Optik fiberdeki doğrusal olmayan özellikler iki kategoride incelenebilir. Bunlardan birincisi, kırılma indisinin optik güce göre değişimi ile alakalı optik Kerr etkisi, diğeri ise uyarılmış saçılmadır. Buna göre bu etkiler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

* Uyarılmış saçılmaya bağlı etkiler

- Brillouin saçılması
- Raman saçılması

* Kırılma indisine bağlı etkiler

- Öz faz modülasyonu (SPM)
- Çapraz faz modülasyonu (XPM)
- Dört dalga karışımı (FWM)

Burada uyarılmış saçılma, optik alan şiddetine bağlı kazanç ve kayıptan sorumluyken, doğrusal olmayan kırılma indisi ise optik alan şiddetine bağlı optik işaretledeki faz kaymasından sorumludur (Hünerli 2009).

Doğrusal olmayan etkiler, DWDM sistemleri gibi uzak mesafe iletim sistemleri olan yüksek güçlü optik fiberli iletim sistemlerinde önemlidir. Doğrusal olmayan etkileşim

iletim mesafesine bağlıdır. Uzak mesafeli hatlarda daha fazla etkileşim ve doğrusalsızlıktan daha fazla etkilenme söz konusudur.

3.2.1. Doğrusal Olmayan Kırılma İndisi

Optik fiberlerde görülen doğrusal olmayan etkilerin çoğu, doğrusal olmayan kırılmadan kaynaklanmaktadır. Kırılma indisinin, optik alan şiddetine ve frekansına bağlılığı mevcuttur. Fiberlerde doğrusal olmayan kırılma indisi üçüncü dereceden duyarlılık tensörü olan $\chi^{(3)}$ tarafından indüklenir. İzotropik bir ortamda $\chi^{(3)}$ sadece dört tane sıfır olmayan eleman içerir: c_{xxyy}^3 , c_{xyxy}^3 , c_{xyyx}^3 , c_{xxxx}^3 . Genel permütasyon simetrisi de işin içine katıldığı zaman geriye sadece bir tane sıfır olmayan eleman kalır. $\chi^{(3)}$, çoğu durum için pozitif değer alır ve gerçel ve sanal kısımlardan oluşur (Hünerli 2009).

Gerçel kısım, doğrusal olmayan kırılma indisi katsayısı olan n_2 'den, sanal kısım ise iki foton soğrulma katsayısı ve Raman saçılmasından sorumludur. Bu ilişkiler aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$n = n(w) + n_2 I \quad (3.11)$$

$$a = a(w) + \beta I \quad (3.12)$$

Burada $n(w)$, kırılma indisinin doğrusal kısmı, I ışık şiddeti, α toplam soğrulma katsayısı, $a(w)$ soğrulma katsayısının doğrusal kısmı, β ise iki-foton soğrulma katsayısıdır. Doğrusal olmayan kırılma indisi ile duyarlılık tensörü $\chi^{(3)}$ arasındaki ilişki

$$n_2 = \frac{3}{8n(w)} \text{Re}(c^{(3)}) \quad (3.13)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada Re , $\chi^{(3)}$ fonksiyonunun gerçel kısmını göstermek için kullanılmıştır. Kırılma indisinin doğrusal kısmı olan $n(w)$ 'yi bulmak için Sellmeier denklemi kullanılır ise

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (3.14)$$

Burada ω_j , salınım frekansı, B_j ise salınım kuvvetidir. Silika için bu değerler $B_1 = 0.696166$, $B_2 = 0.407942$, $B_3 = 0.897479$, $\lambda_1=0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2=0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3=9.896161 \mu\text{m}$ şeklindedir. n_2 silikanın en küçük kayıp gördüğü frekans çevresinde yaklaşık değeri $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ' dir. Birbirlerine yakın frekanslarda $n(\omega)$ 'daki değişimin ihmal edilebilecek kadar az olduğu kabul edilebilir. Bu durumda ilgilenilen frekanslarda kırılma indisinin doğrusal olmamasını sağlayan en önemli etken olarak optik alan şiddeti kalır.

3.2.2. Optik Kerr Olayı

Üçüncü dereceden doğrusal olmayan bir ortamın karşılığı biri ω , diğeri 3ω frekansında bir bileşen içeren $P_{NL}(t)$, doğrusal olmayan kutuplanmadır.

$$\mathbf{P}_{NL}(\omega) = 3c^{(3)}|\mathbf{E}(\omega)|^2 \mathbf{E}(\omega) \quad (3.15)$$

$$\mathbf{P}_{NL}(3\omega) = c^{(3)}\mathbf{E}^3(\omega) \quad (3.16)$$

ise ω frekansında kutuplanma bileşeni

$$e_0 \Delta c = \frac{P_{NL}(\omega)}{E(\omega)} = 3c^{(3)}|E(\omega)|^2 = 6c^{(3)}hI \quad (3.17)$$

eşitliği ile verilen ω frekansındaki $\Delta\chi$ sonsuz küçük tensör değişimine karşılık gelir. Burada, $I = |E(\omega)|^2 / 2h$ başlangıç dalgasının optik şiddeti, η ortamın empedansıdır. $n^2=1+\chi$ olduğundan bu $\Delta n = (\partial n / \partial c)\Delta c = \Delta c / 2h$ sonsuz küçük kırılma indisine özdeşir. Öyle ki Δn

$$\Delta n = \frac{3h}{e_0 n} c^{(3)} = n_2 I \quad (3.18)$$

olur. Böylece kırılma indisindeki değişim optik şiddetle orantılıdır. Kırılma indisinin tamamı I optik şiddetinin doğrusal bir fonksiyonudur.

$$n(I) = n + n_2 I \quad (3.19)$$

burada

$$n_2 = \frac{3h_0}{n^2 e_0} c^{(3)} \quad (3.20)$$

şeklindedir. Bu olay elektro-optik Kerr olayına (Δn 'nin kararlı elektrik alanın karesi ile orantılı olduğu durum için) benzerliğinden dolayı optik Kerr olayı olarak bilinir. Optik Kerr olayı, dalğanın faz hızının dalğanın sahip olduğu şiddete bağlı olduğu, kendiliğinden meydana gelen bir olaydır (Çeliker 2006).

n_2 katsayısının büyüklüğünün derecesi (cm^2/W) camlarda 10^{-16} - 10^{-14} arasında, katkılı camlarda 10^{-14} - 10^{-7} arasında, organik maddelerde 10^{-8} - 10^{-10} arasında ve yarı iletkenlerde 10^{-10} - 10^{-2} arasındadır.

3.2.3. $\chi^{(3)}$ Kaynaklı Doğrusal Olmayan Etkileşimler

Üçüncü seviyeden tensör olan $\chi^{(3)}$ merkezi simetrik ortamlarda çift dereceli kutuplanma bileşenlerinin yok olmasından dolayı daha baskındır.

Uyarılmış doğrusal olmayan kutuplanma tarafından üretilen elektrik alan, faz eşleşmesi doyumuna ulaştığı durumda hızlı bir şekilde artar. Fiber boyunca farklı noktalardaki doğrusal olmayan kutuplanma tarafından yönlendirilen alan diğer bir alan ile girişime uğrar. Bunun sonucunda oluşan fonksiyon $\Delta k.L$ dir. Δk doğrusal olmayan etkileri içeren bütün dalgaların yayılım sabitlerinin toplamıdır. L fiber uzunluğudur. $\Delta k.L = 0$

olduğunda alan sonucu en büyüktür. $\Delta k.L=(2n+1)\pi$ $n=0,1,2\dots$ durumunda sifıra düşer. Toplam üretilen alan, sadece frekans şartları (enerji dönüşümü) ve faz eşleştirme şartları (moment değişimi) doyumuna ulaştığında büyük olur (Xiang 2000).

$$\begin{aligned}\Delta w &= 0 \\ \Delta k &= 0\end{aligned}\tag{3.21}$$

3.2.3.1. Uyarılmış Brillouin Saçılması

Optik dalga ve akustik dalganın fiber içinde etkileşimi uyarılmış Brillouin saçılmasının (SBS) oluşmasına yol açar. Akustik dalganın oluşmasına çeşitli kaynakların yanı sıra yüksek ışık şiddeti de yol açabilir. SBS, sistemdeki işaret gücünün azalmasına ve gürültünün artmasına sebep olur. Bu yüzden de SNR değerinin düşmesinden ve sistem BER' inin artmasından sorumludur. SBS'nin eşik değeri aşılsa, işaret gücü artmaz ve bütün fazla güç geri saçılır. Bu yüzden SBS optik haberleşme sistemlerinde en büyük başlangıç gücünü tanımlar (Schneider 2004).

3.2.3.2. Uyarılmış Raman Saçılması

Fotonların, fiber moleküllerinin titreşimlerine göre davranışının değişimine dayanır. Işık, atom veya molekülden saçılmaya uğrarken genelde elastik olarak saçılır (Rayleigh Saçılması) Bu fotonlar aynı enerji ve frekanstadır. Eğer saçılan fotonların enerji seviyeleri birbirinden farklı olursa elastik olmayan saçılma meydana gelir ve buna Raman saçılması denir (Hünerli 2009). Bu fotonlar yöntemli olarak saçılmaya zorlanırsa buna uyarılmış Raman saçılması (SRS) denir. Bir WDM optik haberleşme sisteminde Raman saçılması kanallar arasında çapraz karışıma sebep olur ve sistem başarımını düşürebilir.

3.2.3.3. Öz Faz Modülasyonu

Kırılma indisinin optik şiddete bağımlılığı fiber içinde yayılan dalganın, doğrusal olmayan bir faz kaymasına uğramasına neden olur. Bu faz kayması gönderilen bir darbenin spektrumunun genişlemesine yol açar. Bu kayma, darbenin kendi şekline

bağımlı olduğu için buna öz faz modülasyonu (SPM) denir. Kırılma indisindeki değişiklik aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Forghiery 1997).

$$\Delta n = n_2 I \quad (3.22)$$

I, optik yoğunluktur. Faz kaymasına geçici bağımlılık, öz faz modülasyonunda göz önünde bulundurulur. SPM 'nin neden olduğu faz kayması ise

$$f_{SPM} = \frac{2p}{l} n_2 I(t) z \quad (3.23)$$

şeklinde bulunabilir.

3.2.3.4. Çapraz Faz Modülasyonu

Optik fiber içinde iki veya daha fazla optik darbe var ise bunlar birbirleri ile etkileşime girebilirler. Bu etkileşimden oluşan doğrusal olmayan faz kaymasına çapraz faz modülasyonu (XPM) denir. Optik fazdaki değişim (Forghiery 1997).

$$\Delta n(\lambda_2) = 2n_2 I(\lambda_1) \quad (3.24)$$

ile ifade edilir.

XPM oluştuğunda her zaman SPM de ona eşlik eder. SPM' e benzer olarak XPM'de de darbe spektrumunda genişlemeler meydana gelir. SPM'de simetrik olan bu genişleme XPM'de diğer frekans bileşenlerinin etkisiyle asimettiktir. XPM'in sebep olduğu faz kayması aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Hünerli 2009).

$$f_{XPM} = \frac{2p}{l} n_2 I_P(t) z \quad (3.25)$$

3.3. Dört Dalga Karışımı (FWM)

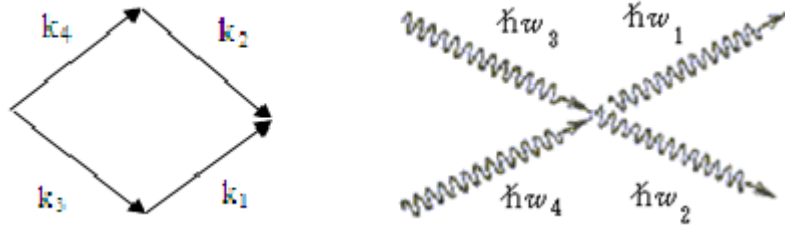
Optik malzemelerin doğrusal olmayan cevaplarının matematiksel modellenmesi, elektrik alan kuvvetinin güç serisindeki uyarılmış kutuplanmayı genişletir. Kutuplanmadaki üçüncü basamak doğrusal olmayan $c^{(3)}$ tensörü dört dalga karışımı olaylarından sorumludur.

OFDM sisteminde optik dalgalardan biri farklı dalga boyları ile yeniden üretilir. FWM etkisi frekansları f_i , f_j ve f_k olan üç işaretin birbirini etkilemesi sonucu frekansı f_{ijk} olan $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ frekanslı dördüncü işareti üretir. Çok kanallı bir WDM sisteminde i, j, k kanal çeşitleridir. Orijinal işaretlerin ve yeni oluşmuş işaretlerin birbirleri ile etkileşimi sonucu çok sayıda yeniden üretilmiş işaret oluşabilir. Bu olaya FWM denir (Kaur 2007). Her bir yeni üretilen işaret kendi yayılım yönüne, kutuplanmaya ve frekansa sahiptir. Öyle ki FWM dalgası aynı zamanda $\vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4 - \vec{k}_1$ dalga vektörüne sahip bir düzlem dalgadır. Burada dört dalga karışımı için faz uyum koşulu

$$\vec{k}_3 + \vec{k}_4 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 \quad (3.26)$$

şeklindedir.

Dört dalga karışımı dört foton arasındaki etkileşim olarak da yorumlanabilir. Biri ω_1 diğeri ω_2 frekanslı iki fotonun oluşumu için ω_3 frekanslı bir foton ω_4 frekanslı bir foton ile birleşir.



Şekil 3.4. Dört dalga karışımı a) faz uyum koşulu b) dört foton etkileşimi (Çeliker 2006)

3.3.1. FWM' in Matematiksel Tanımı

Değişken işlemlerin başlangıcı, malzemelerin bağlı elektronlarının uygulanan optik alana doğrusal olmayan cevabında yatmaktadır. Değişken işlemler ikinci ve üçüncü derece işlemler olarak sınıflandırılabilirler.

Üçüncü dereceden değişken işlemler genel olarak dört optik dalğanın aralarındaki doğrusal olmayan etkileşimi kapsar. Üçüncü harmonik üretim, FWM, değişken kuvvetlendirme gibi olayları içerir. Ana özelliği üçüncü nesil kutuplanma göz önüne alınarak anlaşılabilir.

$$\mathbf{P}_{NL} = \epsilon_0 X^{(3)} \mathbf{M} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} \quad (3.27)$$

E, elektrik alan, \mathbf{P}_{NL} , uyarılmış doğrusal olmayan kutuplanma ve ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitidir.

w_1 w_2 w_3 ve w_4 frekanslarında salınım yapan dört optik dalga aynı x eksenini boyunca doğrusal olarak kutuplanmıştır. Toplam elektrik alan:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{j=1}^4 E_j \exp[i(k_{jx} - w_j t)] + c.c. \quad (3.28)$$

Yayılmı sabiti $k_j = n_j w_j / c$, n_j kırılma sabiti, dört dalğanın da yayılımının aynı yönde olduğu varsayılmaktadır. Eğer kutuplanma denklemi elektrik alan formülüne göre tekrar yazılırsa:

$$P_{NL} = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{j=1}^4 P_j \exp[i(k_{jx} - w_j t)] + c.c. \quad (3.29)$$

P_j (j=1 - 4) üç elektrik alanının ürünlerini kapsayan geniş sayıda terimlerden meydana gelmektedir.

Örneğin P_4 için:

$$P_4 = \frac{3e_0}{4} X_{xxxx}^{(3)} [|E_4|^2 E_4 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2) E_4 + 2E_1 E_2 E_3 \exp(iq_+) + 2E_1 E_2 E_3^* \exp(iq_-) + \dots]$$

q_+ ve q_- aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$q_+ = (k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z - (w_1 + w_2 + w_3 - w_4)t \quad (3.30)$$

$$q_- = (k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z - (w_1 + w_2 + w_3 - w_4)t \quad (3.31)$$

E_4 'ü içeren ilk dört terim SPM ve XPM etkilerinden sorumludur. Kalan terimler FWM sonucudur (Agrawal 2001 b).

Eğer faz uyumsuzluğu kaybolmuş ise belirgin FWM meydana gelir. Bu durumda dalga vektörlerinde olduğu gibi frekanslarda da eşleştirme gereklidir. Daha sonraki gereklilik ise faz eşleşmesidir. Kuantum mekaniğinde FWM, bir veya daha fazla dalgadan fotonlar yok olduğunda ve değişken etkileşim boyunca net enerji ve momentumun korunduğu farklı frekanslarda yeni fotonlar oluştuğunda meydana gelir.

Frekansı w_F olan FWM elemanın genliği A_F aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\frac{dA_F}{dz} = -\frac{a}{2} A_{F+} d_F g A_i A_j A_k^* \exp(-i\Delta kz) \quad (3.32)$$

Frekansları f_i , f_j ve f_k olan üç dalganın birbirleri ile etkileşimi sonucu frekansı f_{ijk} olan FWM işaretinin L uzunluğundaki fiber boyunca gücü,

$$P(f_{ijk}) = (1024p^6 / n^4 I^2 c) (d_{ijk} c^3 L_{eff} / A_{eff})^2 P^3 e^{-\alpha L} h_{ijk} \quad (3.33)$$

n fiber kırılma indisi, λ dalga boyu, $\chi^{(3)}$ üçüncü derece doğrusal olmayan tensör, L_{eff} etkin iletim mesafesi, A_{eff} fiberin etkin alanı, α fiber zayıflama katsayısı, c ışığın ortamdaki hızı, h_{ijk} FWM etkinliği, d_{ijk} bozulma etkenidir. $d_{ijk} = 1, 3$ veya 6 değerlerini,

frekansların üçünün veya ikisinin aynı olması veya üç frekansın da birbirinden farklı olması durumlarına göre alır.

$$L_{eff} = (1 - e^{-aL}) / a \quad (3.34)$$

$\chi_{1111}, \chi^{(3)}$ ün skaler formudur ve ışığın kutuplanma durumuna uygundur.

$$c_{1111} [esu] = \frac{cn^2}{480p} n_2 [m^2 / W] \quad (3.35)$$

Doğrusalsızlık katsayısı

$$g = wn_2 / cA_e \quad (3.36)$$

ise

$$P(f_{ijk}) = (d_{ijk} / 3)^2 (gL_{eff})^2 P^3 e^{-aL} h_{ijk} \quad (3.37)$$

FWM etkinliği h_{ijk} yeni üretilen dalgaların faz uyumsuzluğuna bağlıdır ve aşağıdaki gibi formüle edilir

$$h_{ijk} = \frac{a^2}{a^2 + \Delta k^2} \left(1 + \frac{4e^{-aL} \sin^2(\Delta kL / 2)}{(1 - e^{-aL})^2} \right) A \quad (3.38)$$

A sistemde kuvvetlendiriciler arası boşluk var ise göz önünde bulundurulur.

$$A = \left(\frac{\sin(N_A \Delta kL / 2)}{\sin(\Delta kL / 2)} \right)^2 \quad (3.39)$$

Kanallar arası faz uyumsuzluğu

$$\Delta k_{ijk} = (2pI^2 / c)(|f_i - f_k| |f_j - f_k|) \times \left[D + (dD / dI)(I^2 / 2c)(|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (3.40)$$

$$\Delta k = k_{ijk} + k_k - k_i - k_j = \frac{2pI^2}{c} \Delta f^2 \left(D + \Delta f \frac{I^2}{c} \frac{dD}{dI} \right) \quad (3.41)$$

N_A kuvvetlendiriciler arası boşluk sayısı, D kromatik dispersiyon katsayısı, $\Delta f = |f_i - f_k|$ kanallar arası boşluktur. FWM etkinliği, faz uyumsuzluğuna, fiber dispersiyon katsayısına ve kanallar arası boşluğa bağlıdır (Ergüney 2010).

3.3.2. FWM'in WDM Kanalları Arasındaki Etkileşimi

FWM oluşumuna sebep olan üç bileşen 27 olası çeşitliliğe sebep olur. Eğer üçüncü frekans f_k birinci veya ikinci frekansa (f_i veya f_j) eşit ise bu iki frekans üzerinde yeni frekanslar oluşmaz ($f_i + f_j - f_i = f_j$). Ayrıca ilk iki frekans yerlerini değiştirirse yeni frekanslar oluşmaz ($f_i + f_j - f_k = f_j + f_i - f_k$). Bu nedenle yan şart $k \neq i, j$ ' dir.

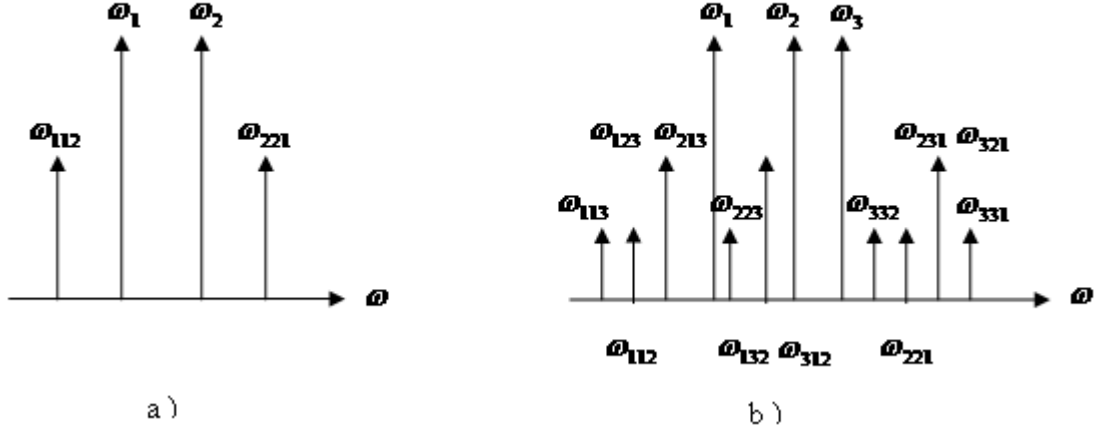
Yan şartın olması durumunda 27 değişken durumdan 9 durum yok olur. Bu durumda üç farklı frekanslı dalga karışarak 9 yeni farklı frekansta dalga üretir ve bu dalgalar tam olarak orijinal kanalların üzerine düşmezler.

Eğer orijinal kanallar, eşit kanallar arası boşluğa sahip ise yeni üretilen dalgalar aynı boşluğa sahip olurlar ve çoğu üretilen dalga orijinal kanallara düşer ve üretilen dalgalar orijinal dalgaların gösterdiği gibi aynı frekans durumlarını gösterir. N adet orijinal kanalın birbirleri ile karışımı (etkileşimi) sonucu üretilen olası ürün sayısı

$$M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2) \quad (3.42)$$

Eğer yeni üretilen dalgaların şiddeti yeterince güçlü ise birbirleriyle veya orijinal dalgalar ile yeniden etkileşime girerek yeni ürünler üretilir. Birinci etkileşim sonucu oluşan 9 yeni dalganın şiddeti yeterli olursa ikinci etkileşimde 324 ürün üretilebilir.

Ancak ikinci 147 ürün eşit frekans boşluklu olarak ikinci aşamada üretilebilir. Yeni üretilen ürünlerin etkinliği farklı dalgalar arasındaki faz uyumsuzluk şartlarına bağlıdır.



Şekil 3.5. a) Kısmen bozunmuş FWM ürünleri b) bozunmamış FWM ürünleri (Mir 2007)

3.3.3. Bozunmuş Dört Dalga Karışımı

Bozunma durumunda $\omega_1 + \omega_3 = \omega_2 + \omega_4$ genel durumunda $\omega_2 = \omega_4$ 'dür. Bu durumda ω_2 frekansındaki iki foton yok olur ω_1 ve ω_3 frekansındaki iki foton enerjinin korunmasını sağlayacak şekilde

$$\omega_1 + \omega_3 = 2 \omega_2 \quad (3.43)$$

olur. Bu işlemin oluşması için gerekli faz uyumu ise

$$\Delta k = k_1 + k_3 - 2k_2 = (n_1 \omega_1 + n_3 \omega_3 - 2n_2 \omega_2) / c = 0 \quad (3.44)$$

şeklindedir. Optik fiberde bu bozunma durumu için faz uyumunu yaratmak daha kolaydır.

3.3.4. Bozunmamış Dört Dalga Karışımı

Dört dalga karışımının genel halidir. ω_2 ve ω_4 frekanslarındaki iki foton enerjilerini ω_1 ve ω_3 frekanslarındaki fotonlara aktarır. Enerjinin korunumunu sağlamak için

$$\omega_2 + \omega_4 = \omega_1 + \omega_3 \quad (3.45)$$

durumunun sağlanması gerekir. Ayrıca faz uyumu için

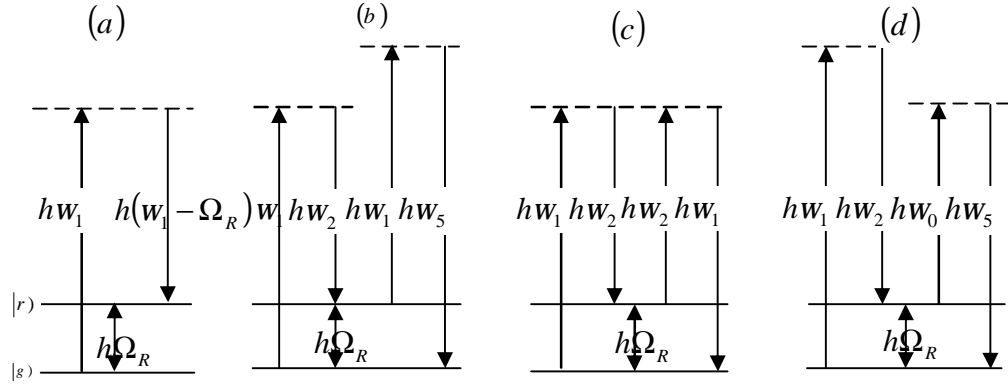
$$\Delta k = k_2 + k_4 - k_1 - k_3 = (n_2 \omega_2 + n_4 \omega_4 - n_1 \omega_1 - n_3 \omega_3) / c = 0 \quad (3.46)$$

denklemini sağlaması gerekir.

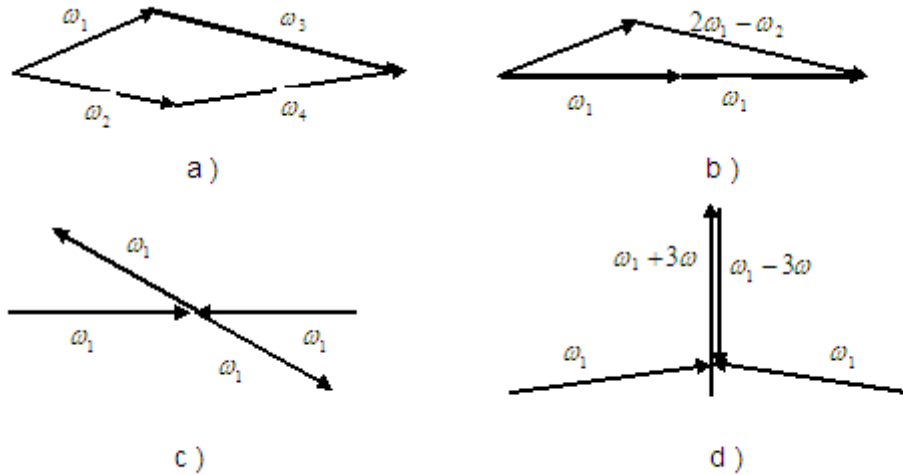
3.3.5. Dört Dalga Karışımı İşlemleri

3.3.5.1. CARS- ‘Evre Uyumlu Anti Stokes Raman Spektroskopisi (Tayfölcümü)’:

CARS bütün dört dalga karışımı işlemlerinde yaygındır. CARS işlemi frekansları ω_1 ve ω_2 ($\omega_1 > \omega_2$) olan iki alanı kapsar. ω_1 frekansının iki fotonu ω_2 frekansının tek fotonu ile etkileşime girerek frekansı $\omega_s = 2\omega_1 - \omega_2$ olan alanı oluşturur. Bu işlemde iki giriş frekansı seçilmiştir. Bu durumda $\omega_1 - \omega_2$ yalıtkan ortam değişimidir. Bu olay RAMAN saçılmasının evre uyumlu tipidir. Evre uyumlu ışınlarının yönlendirilmesi ve enerjinin işaret alanlarına verimli şekilde geçişinden dolayı CARS kendiliğinden olan RAMAN saçılmasından (COOR) daha hassastır. CARS’ın ana olumsuzluğu, titreşimsiz koşulda işarete kaçınılmaz katkısıdır. Bu etki titreşim işaretini belirsizleştiren değişken bir temel işarete sebep olabilir. Tipik CARS diyagramı Şekil 3.6’da verilmiştir (Thiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf>, 2010).



Şekil 3.6. Foton etkileşimlerinin gösterimi a) COORS oluşumuna sebebiyet veren kendiliğinden saçılım mekanizması b) CARS işlemi, $w_1 < w_2$ durumu için CSRS ifade eder c) SRS, TIRE, RIKE işlemleri d) Genel dört dalga karışımı
(Thiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf>, 2010)



Şekil 3.7. Çeşitli dört dalga karışımı işlemleri için tipik faz eşleştirme geometrisi a) Genel dört dalga karışımı b) CARS veya CSRS c) Bozulmuş dört dalga karışımı (DFWM) d) İki foton emilimi (TPA)
(Thiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf>, 2010)

3.3.5.2. CSRS-‘Evre Uyumlu Stokes Raman Spektroskopisi’:

CSRS $\omega_1 < \omega_2$ durumu hariç CARS ile aynıdır. Çıkış Stokes frekansındadır.

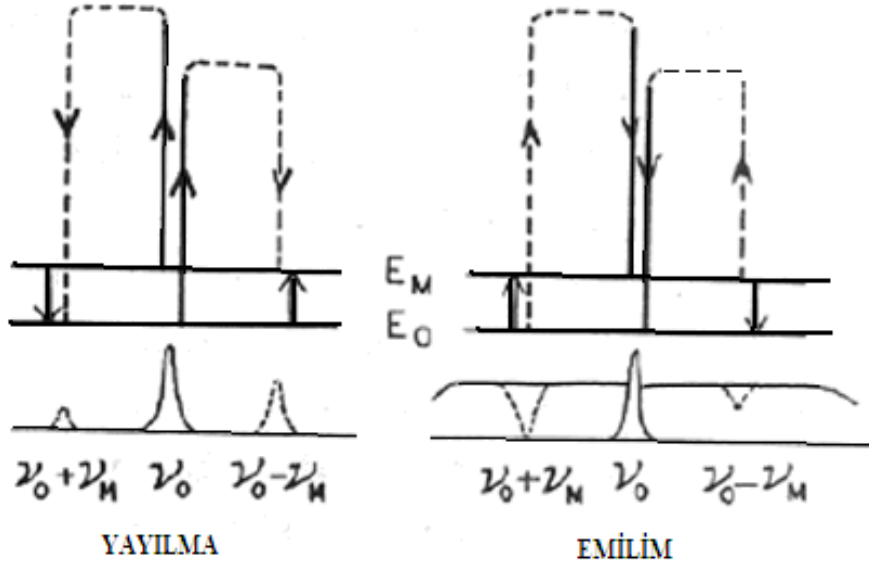
3.3.5.3. SRS-‘ Uyarılmış Raman Kazanç Spektroskopisi’:

SRS'nin modern tekniklerinde ikinci pompa lazer tarafından indüklenen uyarılmış Raman kazancından dolayı oluşan gerilimdeki küçük değişiklikleri (milyonda bir) algılamak için kararlı sürekli dalga (cw) prop lazer kullanılır. Bu teknik pompa alanın prop alanına birleşimindeki titreşim artışına dayanmaktadır. Bu birleşim daha sonra bir fotodiyot tarafından algılanabilecek prop ışınım kazancına sebep olur. İşlemin üstünlüğü CARS içindeki çınlamasız temel işarete duyarsız olmasıdır. Gözlenen işaret, alanların kutuplanma olmayan durumlarına karşı duyarsızdır. Diğer bir üstünlüğü ise karışmış frekansların bozulmalarından dolayı faz eşleştirmesini SRS'nin otomatik olarak yerine getirmesidir. SRS'nin ana olumsuzluğu ise yüksek kararlı spektrum sağlamak için oldukça kararlı cw prop lazere gerek duyulmasıdır.

(Thiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf>, 2010).

3.3.5.4. TIRES-‘Ters Raman Etkisi Spektroskopisi’:

TIRES, Raman kazancı tarafından indüklenen pompa varlığını algılamada kullanılan alternatif bir yöntemdir. TIRES'in en genel yönteminde bir lazer ve geniş bandlı bir kaynak olan prop kullanılır. Lazer, SRS'de kullanılan prop ile aynı rolü oynar. Lazer alanındaki enerji birleşimi, genişbandlı kaynak spektrumundaki titreşim frekanslarında belirgin kayıplara sebep olur. SRS'ye göre en önemli üstünlüğü bir defada bütün Raman spektrumunu sağlayabilmesidir.

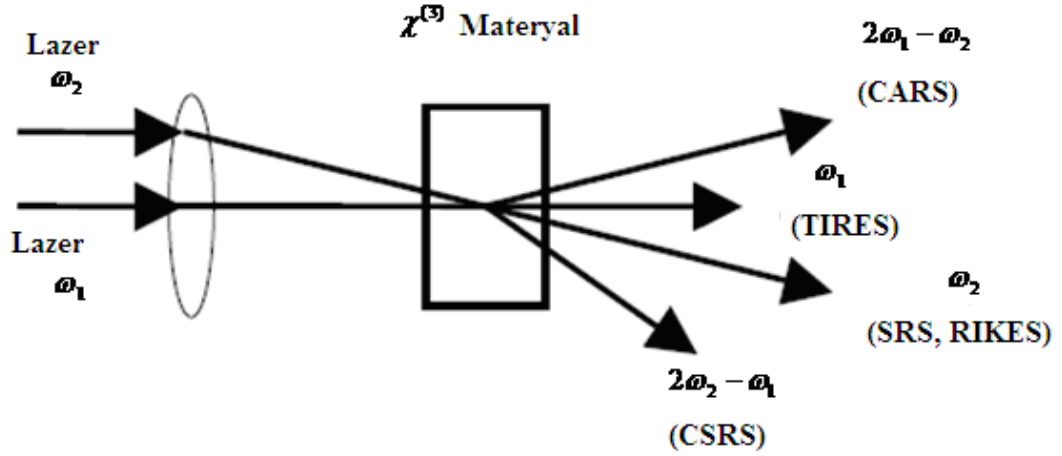


Şekil 3.8. TIRES tarafından sağlanan Raman emilim ve yayılımları gösterimi. Merkez pik lazer kaynağı göstermektedir

(Thiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf>, 2010)

3.3.5.5. RIKES- 'Raman Uyarılmış Kerr Etkisi Spektroskopisi':

Kuvvetli elektrik alanının ortamda çift kırılımı uyarması Optik Kerr etkisi olarak bilinir. Dört dalga karışımı malzemede çift kırılımı uyarma potansiyeline sahiptir. Bu durum RIKES'in esasıdır. Bu işlem üçüncü derece hassasiyetin tensör özelliğinden tahmin edilebilir. Genellikle uyarılmış kutuplanma, giriş alanının kutuplanmasını dikey yapan elemana sahiptir. Yüksek hassasiyetli ölçüm çapraz kutuplanmalı iletimlerde algılanabilir. Bu işlemin en önemli olumsuzluğu ise ortamdaki uyarılmış çiftkırılım gerginliğine hassasiyetidir.



Şekil 3.9. Evre uyumlu Raman işlemlerinin diyagramı ve çıkış işaretlerinin ilişkisi

3.3.6. Dört Dalga Karışımı Uygulamaları

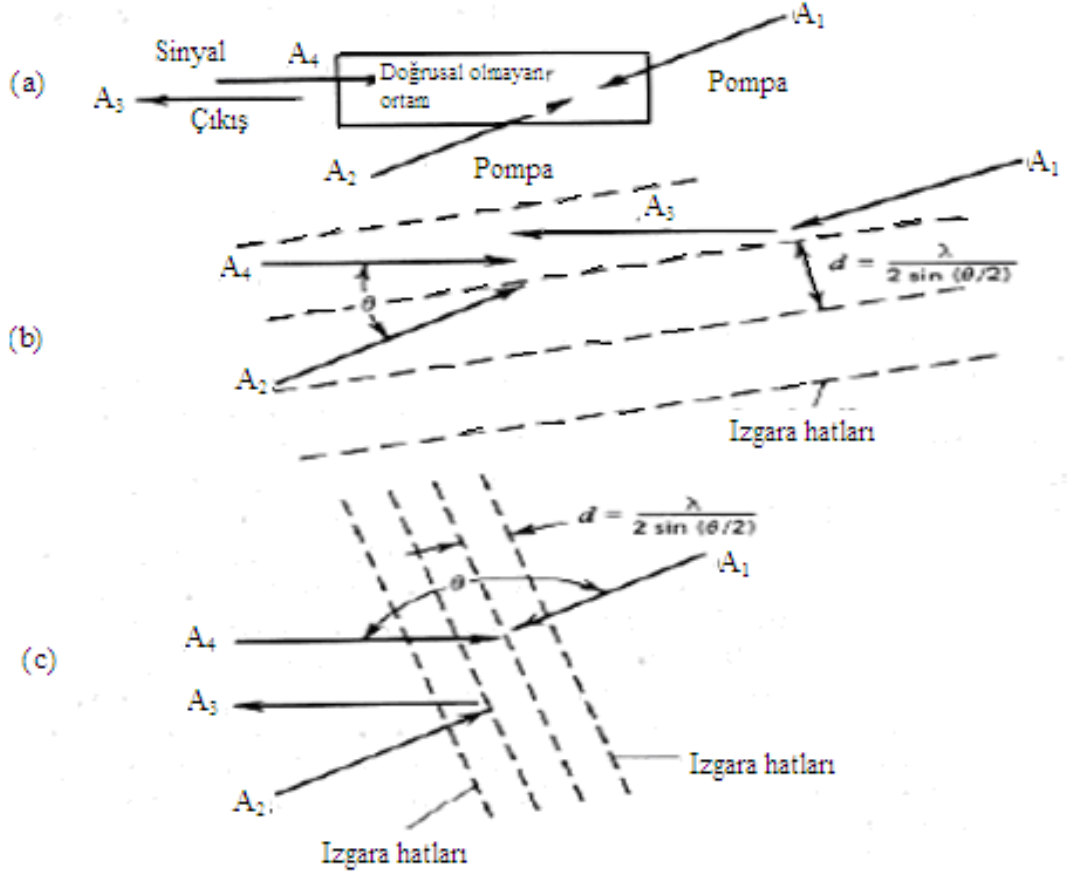
3.3.6.1. Faz-Şekillendirmesi:

Faz şekillendirmesi bir elektromanyetik alanın fazının ters çevrilme işlemine verilen addır. Bu durum dalganın zamansal ve uzaysal işaretlerini ters döndürmeye eşdeğerdir. Fazı şekillendirilmiş dalga zamanda belirir ve geriye doğru ilerler. Bu işlemin faydası, dalga homojen olmayan ortamda ilerlerken bozulursa artar. Eğer bozulmuş işarete faz şekillendirmesi olursa, ortamda ilerleyen fazların gidişatları ters döndürülür ve dalga orijinal bozulmasız haline geri döner. Optik haberleşme sistemlerinde dispersiyon dengelemesi için kullanılır

(Thiel <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf>, 2010).

Gelen dalgada faz şekillendirmesi yapan yöntemlerden biri de FWM'dir. Bir uygulamada FWM faz şekillendirme reflektörü, lazer sistemin iç boşluk bileşenidir. Faz şekillendirme aynası lazer boşluğunda arka yansıtıcı olarak kullanılır. Lazer işlemi esnasında herhangi bir bozulma meydana geldiğinde bu ayna çapraz yapılarak bozulma ortadan kaldırılabilir. Eğer faz şekillendirme fiber hattının ortasında olursa GVD sıfır olur (Agrawal 2001).

Faz şekillendirme başka potansiyel uygulamalara da sahiptir. Homodin ve heterodin algılaması olmadan optik işaretlerde faz algılaması, Raman saçılması tarafından indüklenen solitonlarda frekans kaymasını silmek, kuvvetlendiriciler tarafından indüklenen zaman seğirmesini azaltmak örnek olarak verilebilir.



Şekil 3.10. FWM boyunca faz şekillendirmenin geleneksel geometrisi (Thiel)

3.3.6.2. Dalgaboyu Dönüştürme

Değişken kuvvetlendiriciler işareti kuvvetlendirmek için kullanılırlar. Bu kuvvetlendiriciler frekansı $2\omega_p - \omega_s$ olan idler dalgası üretirler. Pompa ve işaret frekansları (ω_p ve ω_s) dalga boyu değiştirme için de kullanılabilir. Yeni dalga boylarındaki güç, giriş işaret gücü ile kıyaslandığında daha fazladır.

Eğer sürekli dalga (cw) pompa ışını, 0 ve 1 bitlerinin rastgele sırasından oluşan işaret darbesi ile beraber değişken kuvvetlendirici içine enjekte edilirse, pompa ve işaret de

eşzamanlı olarak görüldüğünde FWM' den idler dalgası üretilir. Sonuçta idler dalgası 0 ve 1 bitlerinden oluşan darbe formunda görülür. Bu durumun etkisi ile FWM yeni dalga boylarında işaret verilerini idlere gönderir. Yoğunluk gürültüsü azalarak işaret kalitesi arttırılabilir.

3.3.6.3. Sıkıştırma

Sıkıştırma ile bazı frekanslardaki gürültü dalgalanmaları kuantum gürültü seviyesinin altına düşürülür. FWM, sıkıştırma işleminde işaret ve idler frekansını fiber doğrusalsızlığı boyunca birleştiren gürültü elemanı olarak kullanılabilir. Fiziksel yaklaşımda, sıkıştırma iki dalga arasındaki bağıl fazın kesin değeri için işaret ve idler dalganın azaltılması olarak anlaşılabilir. FWM, işaret-idler foton çiftlerinin sayısını bu fotonların bağıl fazlarına bağılı olarak arttırır veya azaltır.

3.3.6.4. Süpersüreklik Üretimi

Optik fiberdeki çok kısa optik darbe yayılımlarında FWM, dispersiyon etkili SPM, XPM gibi doğrusal olmayan etkilere eşlik eder. Bütün bu doğrusal olmayan işlemler darbe spektrumunda yeni frekanslar üretebilir. Yeterli şiddetteki darbeler için dalga spektrumu çok geniş olabilir ve frekans aralığını 10THz' i aşan seviyeye büyütebilir. Bu uygulama süpersüreklik üretimi olarak adlandırılır.

GVD optik fiberlerdeki süpersüreklik oluşmasında önemli role sahiptir. Büyük spektral band genişliği süpersüreklik ile ilişkilidir. β_2 sabit gibi davranmaz ve dalga boyu bağıllığı göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer giriş darbesi cıvıltısız ise fiber uzunluğu boyunca normal GVD'li ($\beta_2 > 0$) bir fiber kullanılabilir. Dispersiyonu yassılaştırılmış fiber kullanılır ise bu fiberlerde β_3 yaklaşık 0 iken β_2 süpersüreklik band genişliği boyunca yaklaşık olarak sabittir. Nitekim, küçük pozitif β_2 değerli, dispersiyonu yassılaştırılmış fiberde yayılan ve modu kilitlenmiş fiber lazerden 0.5 ps cıvıtlı serbest darbeler elde edildiğinde, 280 nm genişlikli düz süpersüreklik (10 dB band genişlikli) üretilir.

3.3.6.5. Gerçek zamanlı Holografik Görüntü:

Bozulmuş FWM gerçek zamanlı holografik görüntüde kullanılabilir. Şekil 3.10'da b ve c şıklarında görüldüğü gibi iki dalga etkileşimi, optik ortamdaki gerçek-zaman ızgara yapısında davranır. İndis ızgara, alanlar ve yalıtkan ortam arasındaki doğrusal olmayan etkileşimden dolayı tensör modülasyonuna bağlı şiddet gibi görünebilmektedir. Bu ızgaradan Bragg dağılımlı olan üçüncü dalga dördüncü dalgayı üretir. Geleneksel holografide giriş ışının uzaysal ve faz bilgileri, girişim modelinde depolanmış objeden yansır. Bu özellik, girişim modelindeki üçüncü dalganın kırılarak dağılması ile orijinal dalganın yeniden oluşturulmasında kullanılabilir.

3.3.6.6. Gerçek zamanlı Görüntü İşleme:

FWM ve holografi arasındaki benzeşimi kullanan diğer bir teknik de gerçek zamanlı görüntü işlemedir. Mercekten bir görüntü geçtiği durumda Fourier optik öngöründe bulunur. Görüntünün Fourier dönüşümü merceğin odak noktasında şekil alır. Merceğin ortasında herhangi bir doğrusal olmayan ortam oluşursa uzaysal bilgileri içeren üç dalga mercede odaklanır ve indüklenen kutuplanma orijinal dalgaların Fourier dönüşüm ürünü ile orantılı olan dördüncü dalgayı yayacaktır. Eğer dördüncü dalga mercekten geri dönerse sonuçta elde edilen dalganın uzaysal değişimi, giriş dalgalarının Fourier dönüşüm ürününün ters Fourier dönüşümü olacaktır. Temel Fourier analizinde, çıkış dalgası üçüncü dalga ile ilişkili iki dalganın konvolüsyonudur.

3.3.6.7. Vakum Morötesi (VUV) ve Kızılötesi (IR)'inde Evre Uyumlu Kaynakların Üretimi:

FWM ve bağıntılı Raman saçılması kullanılarak spektrumun uç bölgelerinde evre uyumlu ışık kaynakları üretilebilir. Titreşimli Raman değişimli FWM, genellikle Stokes dalgasındaki ayarlanabilir bir renk lazerinden enerji iletimi için kullanılır. Bu durum evre uyumlu IR ışınımın ayarlanabilir kaynağını üretir. Üçüncü harmonik üretim, bozunmuş FWM' in özel durumudur.

3.3.6.8. Uyarılmış Durum Ömürlerinin Ölçümü ve Dephasing Hızları:

Dört dalga karışımının en verimli spektroskopik uygulamasıdır. Bu uygulamayı kapsayan bir yöntem; geçici olarak üç ışının ayrılması ve çıkış sonucunun ölçülmesidir. Evre uyumları korunan uygulanmış alanlar ile atomik durumların birbirlerini etkilemesi sonucu bir FWM çıkışı meydana gelir böylece Dephasing oranı belirlenebilir.

Homojen Dephasing hızının belirlenmesinde ikinci bir yöntem de faz eşleştirme durumunun spektral seçiciliğine dayanır. FWM işleminin etkileşim uzunluğu arttığında Δk , giriş alanlarını çıkış alanlarına etkili şekilde bağlamak amacı ile küçülmelidir. Yeterli L uzunluğu seçilmesi ile FWM işaretinin spektral genişliği, homojen hat genişliği sınırına düşmelidir.

3.4. Çok Kanallı Sistemlerde Başarım Değişkenleri

WDM sistemi tasarımında en önemli unsur kanallar arası çapraz karışımdır. Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkilerden dolayı iletimin meydana gelebilmesi durumunda sistem başarımı, çapraz karışımın bir kanaldan diğerine güç iletimine öncülük etmesi durumuna indirgenmiştir. Bu olay doğrusal olmayan çapraz karışım olarak adlandırılır ve haberleşme kanallarındaki doğrusalsızlık etkilerine bağlıdır. Ancak bazı çapraz karışımlar optik süzgeç, işaret çözücü ve anahtarlar gibi çeşitli WDM elemanlarının kusurlu doğasından dolayı çok iyi doğrusal kanallarda da görülebilir (Agrawal 2002).

Doğrusal ve doğrusal olmayan çapraz karışım, mekanizmalarının WDM sistemine etkilerine bakıldığında ikiye ayrılmaktadır.

3.4.1. Heterodalgaboyu Doğrusal Çaprazkarışım:

Doğrusal çapraz karışım iki kategoriye ayrılabilir. Optik işaretler ve işaret çözücüler işaret gücünün komşu kanallar arasına sızmasına ve algılamada karışım oluşmasına yol açarlar. Böyle durumlara heterodalgaboyu veya band dışı çapraz karışım denmektedir. Heterodalgaboyu, çoklu düğümlerdeki WDM işaretin yönlendirilmesi esnasında meydana gelen homodalgaboyu veya band içi çapraz karışımın evre uyumlu olmayan yapısından dolayı daha az problemlidir.

Ayarlanabilir optik süzgeç N tane kanaldan bir tek kanal seçmede kullanılır. Eğer optik süzgeç m. kanalı geçmek için ayarlanırsa, fotoalıcıya ulaşan optik güç $P = P_m + \sum_{n \neq m} T_{mn} P_n$ dür. P_m m. kanal gücü, T_{mn} , m. kanal seçildiğinde n kanal süzgeç aktarıcılığıdır. $T_{mn} \neq 0$ ve $n \neq m$ iken çapraz karışım görülür. Buna band dışı çapraz karışım denir. Evre uyumsuz yapısından dolayı sadece komşu kanal gücüne bağlıdır (Agrawal 2002).

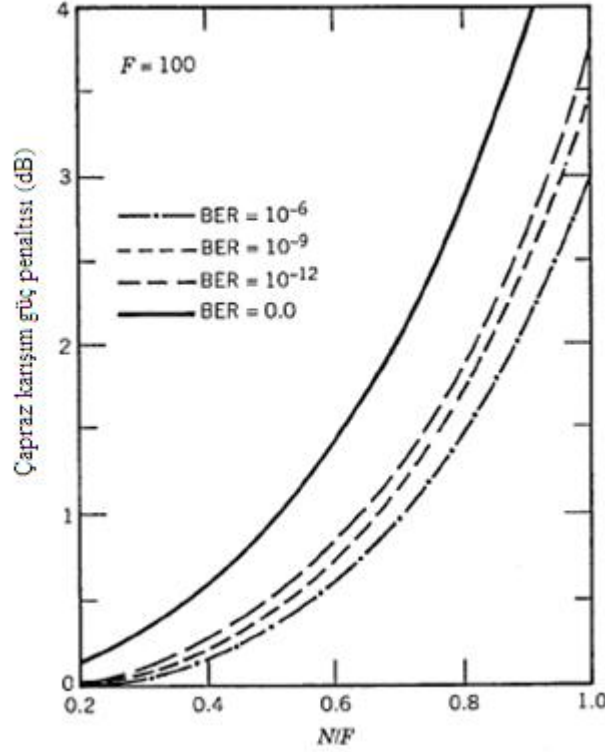
Sistem başarımındaki çapraz karışımların etkileri değerlendirilirse, bir tanesi güç cezasıdır ve göz önünde bulundurulmalıdır. Güç cezası, alıcıda çapraz karışımın etkilerini azaltmak için gerekli ek güç olarak tanımlanmaktadır. Optik güç cevabında üretilen fotoakım:

$$I = R_m P_m + \sum_{n \neq m} R_n T_{mn} P_n = I_{ch} + I_X \quad (3.47)$$

Optik frekansı ν_m ve kuantum etkisi h_m olan m kanal için fotoalıcı cevabı $R_m = h_m q / h \nu_m$ dir. I_X , alıcı akımı olan I'ya eklenmiş çapraz karışım etkisidir. Değeri bit değerine bağlıdır ve bütün karışmış kanallar aynı anda 1 biti taşırsa değeri en büyük olur. Bu durum en kötü durum olarak değerlendirilir.

Çapraz karışımın güç cezasını hesaplamanın kolay bir yaklaşımı da çapraz karışım sonucunda meydana gelen göz kapanmasıdır. I_X 'in en büyük olduğu durumda (en kötü durum) göz kapanması artar. Pratikte I_{ch} , sistem başarımının sürdürülebilirliğini artırır. Eğer I_{ch} , d_X etkeninin artırılması gerekirse, tepe akımı gözün tepe noktası ile ilişkilidir, değeri ise $I_1 = d_X I_{ch} + I_X$. Eşik değer $I_D = I_1 / 2$ olarak ayarlanır. I_D , göz açıklığının en yüksek seviyesidir. Eğer $(d_X I_{ch} + I_X) - I_X - 1/2(d_X I_{ch} + I_X) = 1/2 I_{ch}$ ise veya $d_X = 1 + I_X / I_{ch}$ durumunda orijinal değeri olan $I_{ch} / 2$ olan seviyesini koruyacaktır. d_X sayısı, m. kanal güç cezasıdır. I_X ve I_{ch} kullanıldığı durumda d_X 'in dB değeri aşağıdaki gibidir.

$$d_x = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\sum_{n \neq m}^N R_n T_{mn} P_n}{R_m P_m} \right) \quad (3.48)$$



Şekil 3.11. F=100 için 4 farklı BER değerinin çapraz karışım güç cezaları (N kanal sayısı, F FP süzgecin inceliği)

Eğer bütün kanallar için tepe değerinin aynı olduğu farz edilirse, güç cezası güçten bağımsızdır. Ayrıca eğer fotoalıcı cevabı bütün kanallar için hemen hemen aynı ise ($R_m \approx R_n$) d_x değeri yaklaşık $d_x = 10 \log_{10} (1 + X)$ dir. $X = \sum_{n \neq m}^N T_{mn}$ band dışı çapraz karışımın ölçümüdür. X, bütün diğer kanallardan özel bir kanala sızan toplam gücün bölümünü göstermektedir. X'in nümerik değeri, özel optik süzgecin iletim karakteristiğine bağlıdır. Bir FP süzgeç için X kapalı formda elde edilebilir.

Çapraz karışımın önceki analizlerinin temeli bit hata oranından (BER) ziyade göz kapanmasına dayanmaktadır. Eğer 3.47 eşitliğindeki I_x rastgele değişken gibi davranırsa, BER için bir ifade sağlanabilir. Özellikle BER, yok durumda $I_{ch}=0$ olarak

farz edilirse $I_1 = I_{ch} + I_x$ ve $I_0 = I_x$ ifadesi ile var-yok durum akımlarında verilir. Eşik değer, en kötü durum olan bütün komşu kanalların var konumunda olduğu duruma karşılık gelen $I_D = I_{ch}(1 + X)/2$ ye ayarlanır. Sonuncu BER, I_x rastgele değişkeninin dağılımının ortalamasından elde edilir. I_x dağılımı FP filtreler için hesaplanır ve genellikle Gauss dağılımına yakındır. Çapraz karışım güç cezası d_x , BER'in kesin değerinin devam ettirilmesi için gerekli I_{ch} artışını bularak hesaplanabilir.

Şekil 3.11'de de farklı BER değerleri için güç cezası hesabı sonucu gösterilmektedir. F=100 alınmıştır. Kesiksiz olan eğim BER=0 olduğu durumu göstermektedir. N/F değerinin 0.33 den daha geniş olduğu durum için BER değerinin 10^{-9} da devamlılığını sağlayan güç cezası 0.2 dB'in altında tutulabilir.

3.4.2. Homodalgaboyu Doğrusal Çapraz Karışım:

Homodalgaboyu optik hat boyunca yönlendirme ve anahtarlama için kullanılan WDM elemanlarında band içi çapraz karışım meydana gelir. Esası, WGR gibi statik dalga boyu yönlendiriciler dikkate alınarak anlaşılabilir. NxN' lik yönlendirici için N^2 durum N-dalgaboylu WDM işaretlerini ayırabilir. Bir dalga boyu çıkış olarak ele alınır ve I_m denir. N^2-1 girişim işaretleri arasında istenen işaret ile birlikte iletilenler olabilir. N-1 işaret aynı taşıyıcı işarete (I_m) sahiptir. Arta kalan farklı taşıyıcı dalga boyuna sahip $N(N-1)$ işaret diğer WDM elemanlarından geçerken yok edilir. Aynı dalga boyundaki N-1 çapraz karışım işareti (band içi çapraz karışım) WGR'den geçerken eksik süzme sonucu meydana gelir çünkü bu işaretler iletimin tepe noktaları ile kısmi olarak örtüşür. Sadece band içi çapraz karışımı içeren toplam optik alan aşağıdaki gibi yazılabilir (Agrawal 2002).

$$E_m(t) = (E_m + \sum_{n \neq m}^N E_n) \exp(-iw_m t) \quad (3.49)$$

E_m istenen işaret, $w_m = 2\pi c / I_m$. Band içi çapraz karışımın evre uyumlu yapısı bu formülde bellidir.

Band içi çapraz karışımın sistem başarımına etkilerini görmek için güç cezası tekrar göz önünde bulundurulmalıdır. Alıcı akımın $I = R|E_m(t)|^2$ olduğu durum, girişimleri veya optik kuvvetlendiriciler kaynaklanan durumlara benzer darbe koşullarını kapsar. Darbe koşullarının iki tipi; $E_m E_n$ durumu olan işaret-çapraz karışım darbesi, $k \neq n$ ve $m \neq n$ için $E_k E_n$ durumunda çapraz karışım-çapraz karışım darbesidir. Son koşullar pratikte ihmal edilebilir. Alıcı akımı da yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$I(t) \approx RP_m(t) + 2R \sum_{n \neq m}^N \sqrt{P_m(t)P_n(t)} \cos[f_m(t) - f_n(t)] \quad (3.50)$$

$P_m(t) = |E_m(t)|^2$ güç, $f_n(t)$ fazdır. Pratikte $P_n \ll P_m$ $n \neq m$ için WGR çapraz karışımı düşürmek için sistemde vardır. Fazlar gelişli güzel dalgalandığında yukarıdaki akım formülü $I(t) = R(P_m + \Delta P)$ olur ve güç cezası hesaplamada kullanılır. Gerçekte sonuç:

$$d_x = -10 \log_{10}(1 - r_x^2 Q^2) \quad (3.51)$$

$$r_x^2 = (\Delta P)^2 / P_m^2 = X(N-1) \quad (3.52)$$

$X = P_n / P_m$ çapraz karışım seviyesi, WGR'den geçen kaçak güç oranı tanımlanır. Güçler, eşit farzedilen evre uyumlu band içi çapraz karışımın bütün N-1 kaynakları için aynı kabul edilmiştir.

Çapraz karışım cezası hesaplamaları, dinamik dalga boyunun optik çapraz bağlantı boyunca yönlendirilmesi durumunda biraz karmaşıktır. Çünkü WDM ağlarda çapraz karışımına sebep olan elemanlar fazladır. Çapraz karışım elemanlarının sayısı 25'ten fazla ve her bir elemanın çapraz karışım seviyesi sadece -40 dB ise kötü durum analizi geniş güç cezası (>3dB) öngörür. Dolayısıyla doğrusal çapraz karışım, WDM ağların tasarımında birincil derecede endişe verici durumdur ve kontrol edilmelidir.

4. BULGULAR

4.1. WDM Haberleşme Sistemlerinde FWM'yi Oluşturan Etkenlerin Matlab Çalışması ile Elde Edilen Analiz Sonuçları

Benzetimlerde tek modlu fiber kullanılmış, merkez frekansı 1550 nm alınmıştır. Giriş gücü, sistem uzunluğu, kuvvetlendiriciler arası boşluk, alıcı hassasiyeti gibi değişkenler sabit girişler olarak alınmıştır. Kanallar arası boşluk değişken tutulmuştur. 5 farklı kanallar arası boşluk değerine göre FWM'den dolayı oluşan gürültü gücü hesaplanmış ve çizdirilmiştir. Kanallar arası boşluk 0.5 nm alınmış ve her seferinde 0.5 nm arttırılarak 2.5 nm ye kadar çıkarılmıştır. Hesaplamalarda

Her bir kanaldaki giriş gücü=1 mW

Fiber zayıflama katsayısı= 0.205 dB/km

Kanal sayısı=5

Sistem uzunluğu= 150 km

Fiber etkin alanı= $5.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$

Fiber kırılma indisi= 1.49

$\chi = 5 \times 10^{-14}$

Kromatik dispersiyon katsayısı= 17 ps/(nm \times km)

Bozulma etkeni= 6

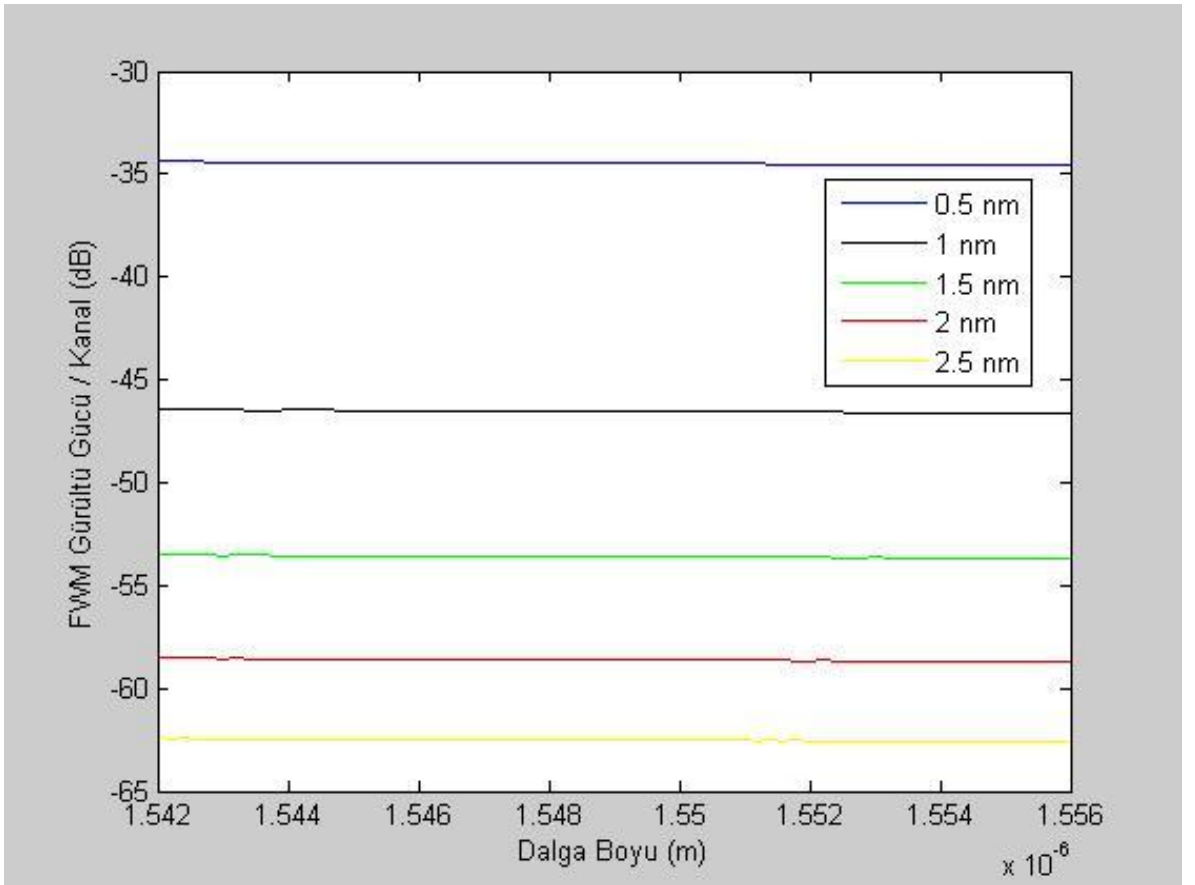
dD/d λ = 0.09 ps/(nm 2 \times km)

Tekrarlayıcılar arası mesafe= 25 km

Doğrusalsızlık katsayısı= $1.3 \text{ W}^{-1} \times \text{km}^{-1}$

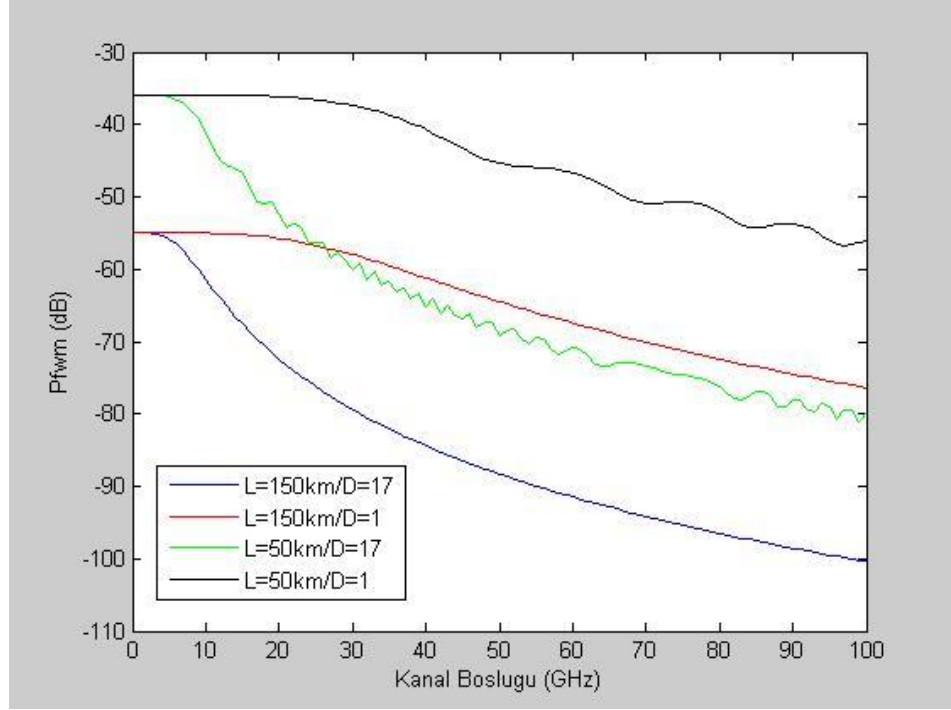
4.1.1. WDM Sisteminde FWM Gürültü Gücünün Kanal Boşluklarına Göre Değişimini Gösteren Sonuçlar

Şekil 4.1’de WDM sisteminde FWM gürültü gücünün kanal boşluklarına göre değişimi incelenmiştir. Görüldüğü gibi kanal boşlukları arttıkça FWM gürültü gücü azalmaktadır. Bu durum (3.37) formülünde de verildiği gibi teorik olarak beklenen bir durumdur. Kanallar arası boşluk değerleri eşit seçildiği için kanalda iletilen işaretler arası mesafe arttıkça işaretlerin birbirlerine olan etkileşimi azalır, buna bağlı olarak kanallara düşen FWM ürünleri sayısı ve FWM gücü düşmektedir. Çünkü FWM etkinliği faz uyumsuzluğuna, faz uyumsuzluğu ise (3.41) formülünden de anlaşılacağı üzere kanallar arası boşluklara bağlıdır.



Şekil 4.1. WDM sisteminde FWM gürültü gücünün farklı kanal boşluklarına göre değişimi

4.1.2. FWM Gücünün Farklı Kromatik Dispersiyon Değerleri ve Farklı İletim Uzaklığına Göre Değişimini Gösteren Sonuçlar



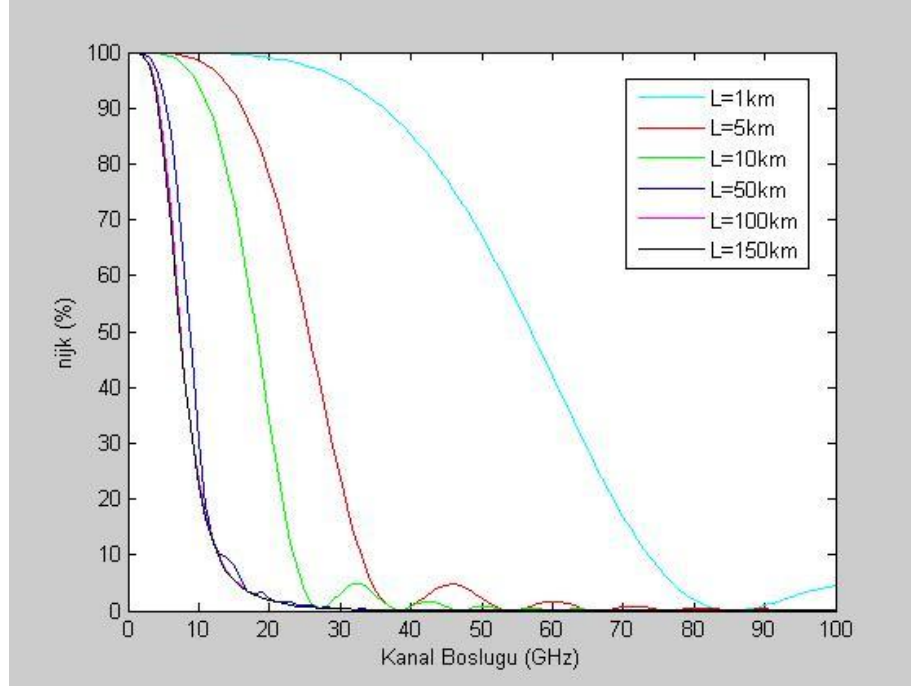
Şekil 4.2. FWM gücünün L=50km/150 km ve D=1/ 17 ps/nm.km durumlarının kanal boşluklarına karşılık gelen değişimleri

Şekil 4.2’de farklı iletim mesafeleri ve kromatik dispersiyon değerleri (L=50 km ve D=1 ps/(nm.km), L=50 km ve D=17 ps/(nm.km), L=150 km ve D=1 ps/(nm.km), L=150 km ve D=17 ps/(nm.km)) için, FWM gücünün değişimi gösterilmiştir.

D=1 ps/(nm.km) iken, iletim mesafesi 50 km’den 150 km’ye arttırıldığında FWM gücü azalmaktadır. Çünkü iletim mesafesi arttıkça giriş gücü azalmaktadır. FWM giriş gücüne bağlı olduğu için, iletim mesafesi arttıkça FWM güç değeri azalmaktadır. D=17 ps/(nm.km) iken, iletim mesafe 50 km’den 150 km’ye arttırıldığında, FWM gücünde küçük kanallar arası boşluk değerlerinde (20 GHz’e kadar) daha şiddetli düşüşler gözlemlenmektedir. İletim mesafesinin ve dispersiyonun yüksek olduğu şartlarda (D=17 ps/(nm.km), L=150 km). FWM etkinliğinin en az olduğu saptanmaktadır. Yüksek dispersiyonun FWM etkinliğini azalttığı görülmektedir. Dolayısıyla, FWM gücü üzerindeki kromatik dispersiyon etkisinin, iletim mesafesi etkisine kıyasla daha büyük olduğu söylenebilir. Ayrıca kanallar arası boşluklar arttıkça

FWM gücündeki düşüşler bu grafikte de gözlemlenmektedir. Faz uyumsuzluğu arttıkça FWM gücü daha küçük kanal boşluklarında ani azalma göstermektedir.

4.1.3 FWM Etkinliğinin Farklı Mesafelere Göre Değişimini Gösteren Sonuçlar



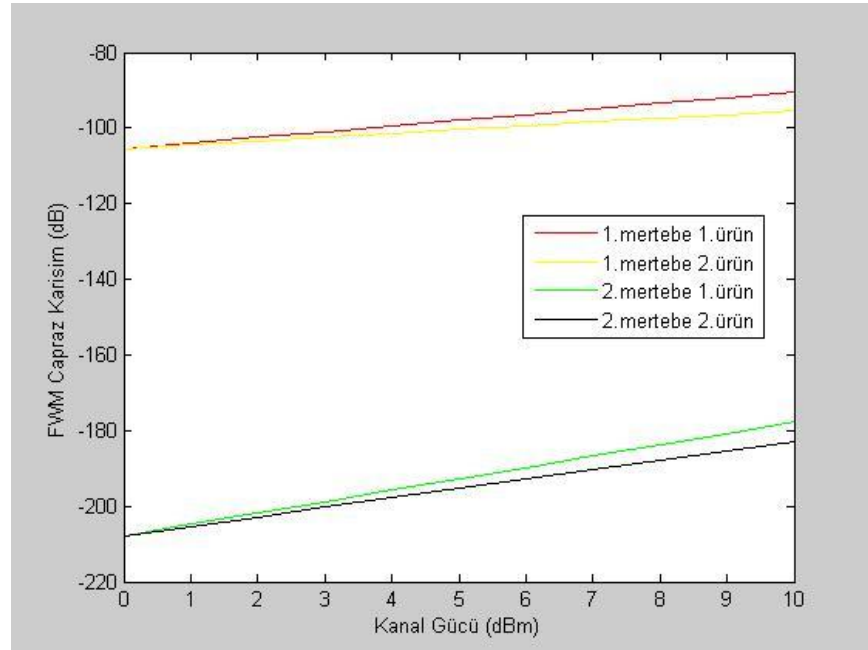
Şekil 4.3. FWM veriminin (etkinliğin) farklı iletim mesafelerine (L=1 km, 5 km, 10 km, 50 km, 100 km, 150 km) ve kanal boşluklarına göre değişimi

Şekil 4.3'te FWM etkinliğinin farklı mesafelere göre değişimi gösterilmiştir. FWM etkinliği şekilden görüleceği üzere mesafenin artmasıyla beraber kanal boşluklarının artması ile daha hızlı bir düşüş göstermiştir ve L=100 km ve L= 150 km için FWM etkinliği aynı değerlerde düşüşler göstermiştir. Yani, uzun mesafeler için (L>100 km) FWM verimliliği doyuma ulaşmaktadır. FWM'in verimliliği (n_{ijk}) L=10 km ve daha uzun mesafelerde yaklaşık 28 GHz kanal boşluklarında sıfıra düşerek salınım girmiştir. L=10 km ve daha az mesafeler için ise n_{ijk} , giderek artan büyük kanal boşluklarında sıfıra düşmüş ve salınım girmiştir. Özellikle 5 km'den daha az mesafelerde FWM etkinliğinin 70 GHz ve üzerine kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca düşük kanal boşluklarında (<20 GHz) etkinliğin tüm mesafeler için yüksek olduğu görülmektedir. Küçük kanallar arası boşluklarda işaretlerin birbirleri ile etkileşimi çok olacağı için,

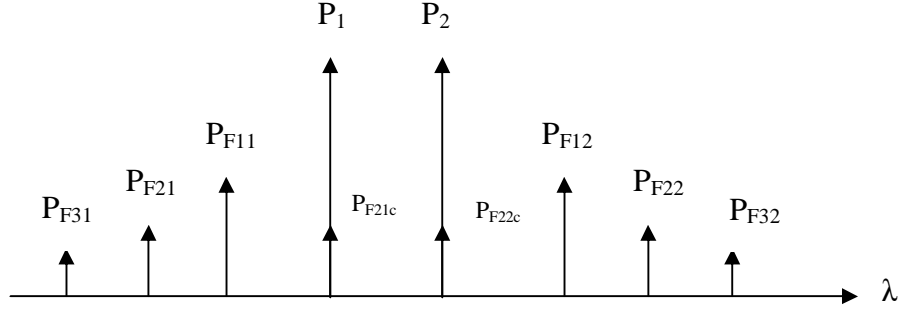
daha fazla FWM ürünleri oluşacak ve sistemde etkinlik artacaktır; ayrıca bu durumda sistemde çapraz karışım ihtimali yüksek olacaktır. Bu durum sebebiyle elde edilen grafik teori ile uyumludur ve beklenen sonuçlar elde edilmiştir.

4.1.4. Birinci Kanal Giriş Gücü Değişimine Göre Birinci Dereceden ve İkinci Dereceden FWM Çapraz Karışımı Değişimini Gösteren Sonuçlar

FWM çapraz karışımının giriş gücüne göre değişimi Şekil 4.4'te irdelenmiştir. Tek modlu fibere ve iki kanala göre yapılan bu çalışmada kanal güçleri olan P1 ve P2 birbirinden farklı alınmış ve grafik birinci kanal gücüne göre çizdirilmiştir. Kanallar arası boşluk 0.8 nm ve iletim mesafesi 150 km alınmıştır. Grafikten de anlaşılacağı gibi birinci dereceden FWM çapraz karışım ürünleri, ikinci dereceden FWM çapraz karışım ürünlerinden daha yüksektir. Çünkü her yeni oluşan FWM ürünlerinin güç değerleri birinci dereceden FWM ürünlerinin güç değerinden küçüktür. Bu durum Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Buna göre yüksek dereceli FWM ürünlerinin çapraz karışım değerleri giderek düşmektedir. Ayrıca giriş kanal gücü arttıkça FWM gücü artmaktadır.



Şekil 4.4. Birinci kanal giriş gücü değişimine göre birinci dereceden ve ikinci dereceden FWM çapraz karışımı değişimi



Şekil 4.5. İki kanallı sistemde oluşan yüksek dereceli FWM ürünlerinin gösterimi

4.2. DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri İçin Kanal Sayısı Değişimine Göre FWM-SNR Analizinin Matlab Çalışması ile Elde Edilen Sonuçları

Bu bölümde, Matlab programı kullanılmıştır. Benzetimlerde SMF, DSF, NZDSF ve DCF fiber kullanılan sistemlerde 3, 5, 7 kanal için FWM'in işaret gürültü oranına (SNR) etkisi irdelenmiştir. Uygulamalarda merkez dalga boyu olan 1550 nm kaydırılmıştır.

FWM etkisinin sistem başarımına etkisini incelemeyen önce hangi kanalın daha fazla etkilendiğini belirlemek gerekir. Eşit kanallar arası boşluklu sistemlerde DSF fiberler için en kötü durum, kanal sayısından bağımsız olarak sıfır dispersiyon ile çakışan kanaldır. SMF ve NZDSF fiberler için en kötü durum ise FWM ürünlerinin çakıştığı merkez kanallardır. Örneğin üç kanallı bir sistemde 9 FWM ürünü oluşur ve orta kanal (2. kanal) ile çakışır.

5 ve 7 kanallı sistemde orta kanala düşen FWM ürünleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de gösterilmektedir (Simetrik olan k değerlerinden bir tanesi alınmaktadır) (Maeda ve ark. 1990).

Çizelge 4.1. 5 kanallı bir sistemde orta kanala düşen FWM ürünleri

j/i	1	2	3	4	5
1	x	x	x	k=2	k=3
2	x	k=1	x	k=3	k=4
3	x	x	x	x	x
4			x	k=5	x
5			x	x	x

Çizelge 4.2. 7 kanallı bir sistemde orta kanala düşen FWM ürünleri

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

Çizelgelerden de anlaşılacağı üzere $i=j=k$ durumunda FWM ürünleri oluşmamaktadır. Yeni oluşan FWM ürünleri için kombinasyona giren işaretlerden iki işaretin birbirleri ile aynı veya farklı olması durumuna göre bozulma etkeni 3 veya 6 alınmıştır. Bantlardaki FWM ürünleri toplanır. m . frekanstaki (f_m) toplam FWM gücü (Maeda ve ark. 1990).

$$P_{top}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P(f_i + f_j - f_k) \quad (4.1)$$

Genellikle merkez kanaldaki çapraz karışım, kenar kanallardaki çapraz karışımdan farklıdır. Bu sebeple SNR analizi kanallardaki en kötü durum göz önünde bulundurularak hesaplanır. FWM tarafından üretilen gürültü ve fiber zayıflamasından kaynaklı işaret güç kaybı göz önünde bulundurulduğunda gerekli en küçük SNR değeri 20 dB'dir. Tanımlanan işaret gürültü oranı ise

$$SNR(dB) = 10 \log_{10}(P_{işaret} / P_{FWM}) \quad (4.2)$$

ile hesaplanır. Uygulamalarda sistemde sadece FWM gürültüsü göz önüne alınmış diğer gürültüler ihmal edilmiştir.

Farklı fiber tipleri için alınan değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir (Zou ve ark. 1996, Harboe ve ark. 2008). Doğrusal olmayan kırılma indisi bütün fiber tipleri için $2.35 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ alınmıştır.

Çizelge 4.3. Farklı fiber tiplerinin karakteristik özellikleri

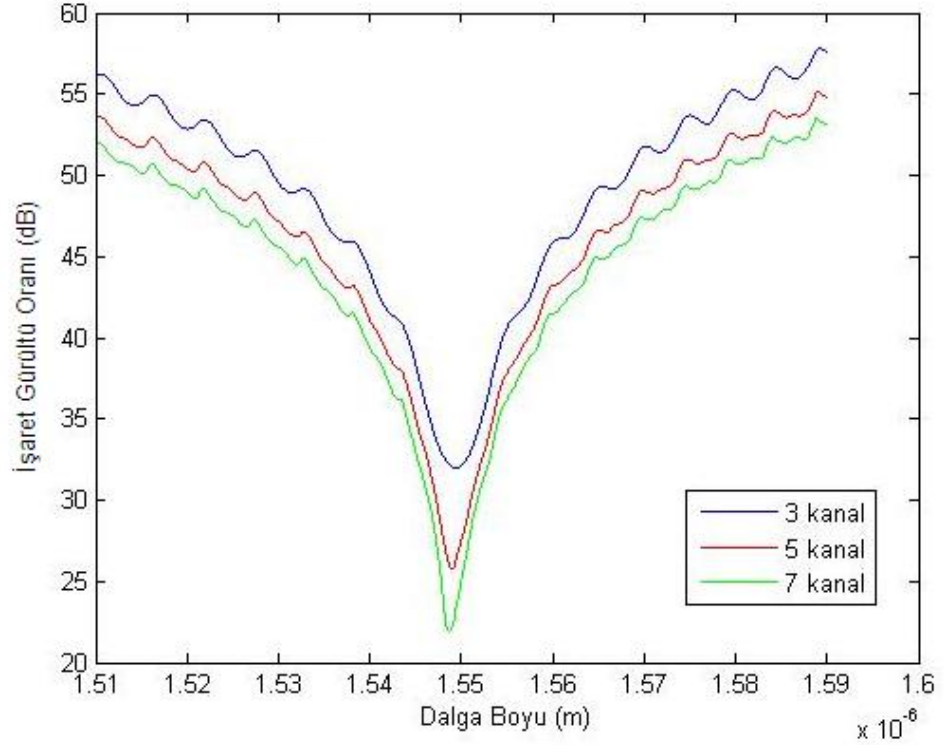
Fiber Tipi	Kayıp (dB/km)	Aeff (μm)	Dispersiyon (ps/nm.km)	Dispersiyon Eğimi (ps/nm ² .km)	Doğrusalsızlık Katsayısı (1/W.km)
SMF	0.23	65	17	0.085	1.2
DSF	0.23	50	0	0.085	1.76
NZDSF	0.23	50	3.7	0.07	1.76
DCF	0.5	22	-85	-0.3	0.43

4.2.1. DSF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar

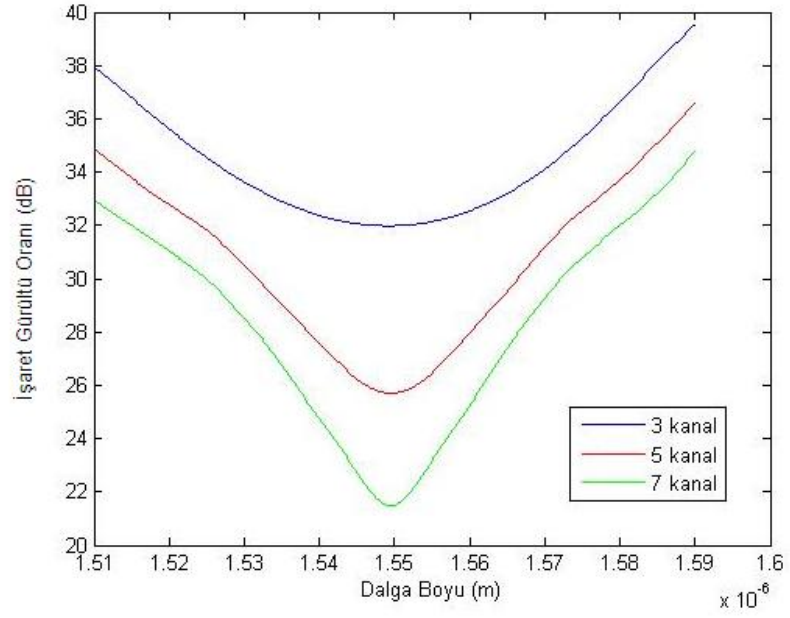
Şekil 4.6'da 3, 5, 7 kanallı bir WDM sistemin dalga boyu ile değişen SNR değişkenliği gösterilmiştir. Kanallar arası boşluk 75 GHz-25 GHz olarak alınmıştır. Giriş kanal gücü 1mW olarak alınmıştır. 1550 nm'de DSF fiber için $D=0 \text{ ps/nm.km}$, $dD/d\lambda=0.085 \text{ ps/nm.km}$ $\alpha=0.23 \text{ dB/km}$ fiber uzunluğu 50 km alınmıştır. Orta kanal olarak 1550 nm seçilmiştir. Uygulama esnasında orta kanal 1500-1600 nm arasında kaydırılmıştır.

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere DSF fiber için SNR değeri kanal sayısından bağımsız olarak 1550 nm'de en düşüktür. Orta kanal dalga boyunda kaydırıldığı zaman SNR değeri artmaktadır. FWM gücü, orta kanal kaydırıldığında düşmektedir. Ancak kanal sayısı arttırıldığı zaman SNR değeri daha hızlı düşüş göstermiştir. Birçok FWM ürünü orta kanalda üretilmektedir. Bu sebeple de orta kanalda SNR değeri en düşük çıkmıştır. 1530-1565 nm dalga boylarında FWM gücünün zayıflamasına bağlı olarak SNR'ın azalması belirgin ve hızlı olur. 1550 nm işlem bölgesindeki sistemde FWM sebebiyle ortaya çıkan ceza oldukça fazladır.

Kanallar arası boşluk değeri 75 GHz den 25 GHz'e düşürülünce kanallar arası boşluk değeri düştüğü için FWM gücü artmış buna bağlı olarak da SNR değerleri aynı dalga boyları için daha düşük çıkmıştır. Kanal sayısı 3'ten 7'ye çıkarılınca bile en küçük SNR değeri olan 20 dB'nin sağlandığı görülmektedir. 75 GHz kanallar arası boşluk değerinde, kanal sayısı artırıldığında 25 GHz'e göre SNR değerleri birbirlerine biraz daha yakın çıkmıştır. Kanal sayısı arttıkça FWM ürün sayısı arttığı ve SNR değeri düştüğü için DSF fiber kullanımı tavsiye edilmemektedir.

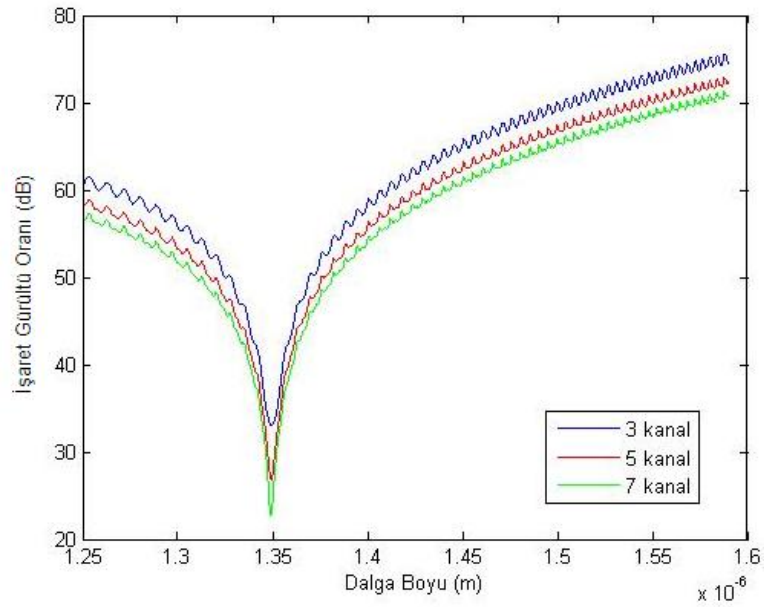


Şekil 4.6. a) DSF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalgaboyu değişimi (kanallar arası boşluk 75 GHz alınmıştır.)

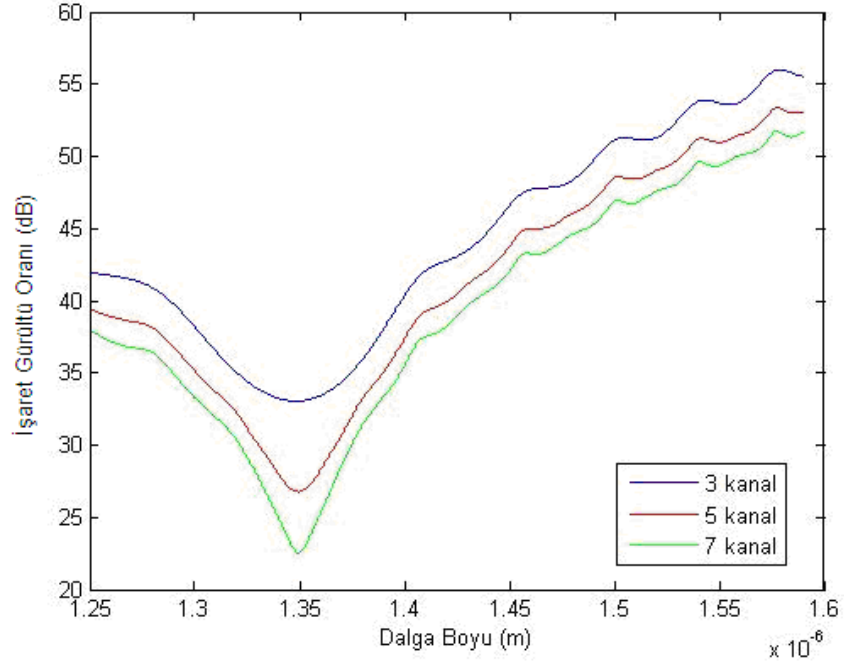


Şekil 4.6. b) DSF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalgaboyu değişimi (kanallar arası boşluk 25 GHz alınmıştır.)

4.2.2. SMF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar



Şekil 4.7. a) SMF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalgaboyu değişimi (kanallar arası boşluk 75 GHz alınmıştır.)

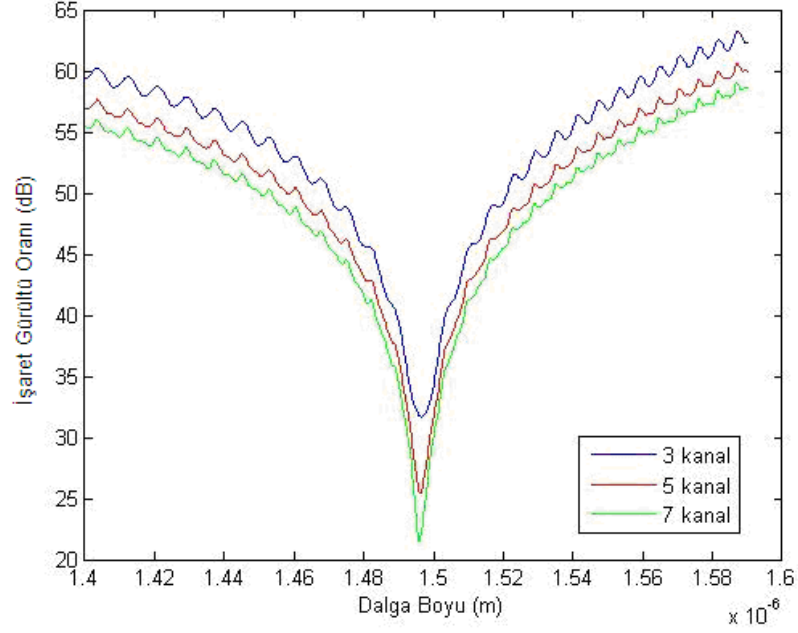


Şekil 4.7. b) SMF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalgaboyu değişimi (kanallar arası boşluk 25 GHz alınmıştır.)

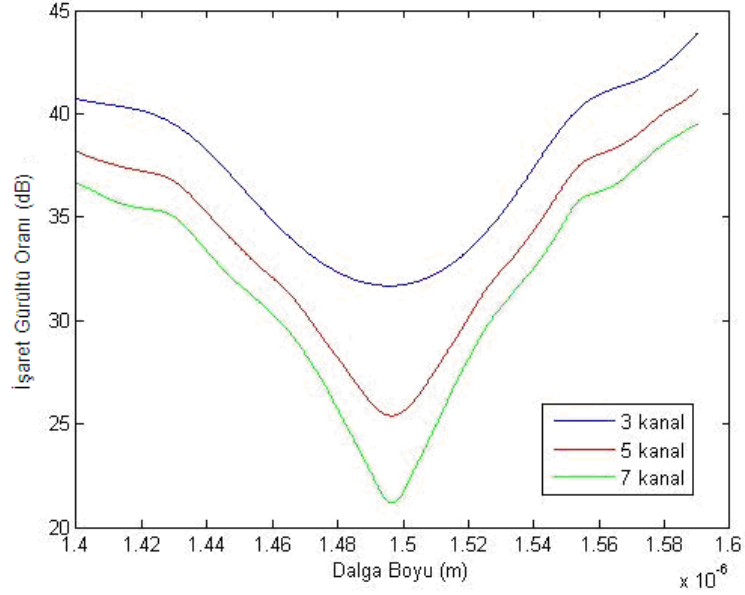
Şekil 4.7.'de 3, 5, 7 kanallı bir SMF fiberli WDM sistemin SNR değişkenliği gösterilmiştir. Kanallar arası boşluk 75 GHz-25 GHz olarak alınmıştır. Giriş kanal gücü 1 mW olarak alınmıştır. 1550 nm'de SMF fiber için $D=17$ ps/nm.km, $dD/d\lambda=0,085$ ps/nm² km alınmıştır. Diğer özellikler DSF fiberli sistem ile aynı alınmıştır. Uygulama esnasında merkez dalga boyu olarak alınan 1550 nm 1250 nm-1600 nm dalga boyları arasında kaydırılmıştır.

SMF fiberli sistemde kanal sayısı arttırıldığında oluşan FWM ürünlerinin etkisinden dolayı hem 75 GHz hem de 25 GHz kanallar arası boşluk değerleri için SNR değerinde düşüş görülmüştür. Orta kanal SMF dispersiyon değerinin sıfır olduğu 1350 nm penceresinde en düşüktür. Orta kanal kaydırıldığında dalga boyu arttıkça SNR değeri artmaktadır. Her durumda beklenen en küçük SNR değeri sağlanmıştır. SNR değeri 75 GHz kanallar arası boşluk değeri için daha sık değişmektedir. 1550 nm dalga boyunda DSF fiberli sisteme göre, her üç kanal sayısı (3, 5, 7 kanal) için oldukça büyük SNR değerlere sahiptir.

4.2.3. NZDSF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar



Şekil 4.8. a) NZDSF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalgaboyu değişimi (kanallar arası boşluk 75 GHz alınmıştır.)



Şekil 4.8. b) NZDSF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalgaboyu değişimi (kanallar arası boşluk 25 GHz alınmıştır.)

Şekil 4.8.'de 3, 5, 7 kanallı bir NZDSF fiberli WDM sistemin SNR değişkenliği gösterilmiştir. Kanallar arası boşluk 75 GHz-25 GHz olarak alınmıştır. 1550 nm'de NZDSF fiber için $D=3.7$ ps/nm.km, $dD/d\lambda=0.07$ ps/nm² km alınmıştır. Diğer özellikler DSF fiberli sistem ile aynı alınmıştır.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere NZDSF fiberli sistemde DSF fiberli sistem ile benzer grafik elde edilmiştir. Bu fiber tipi için 1500 nm çalışma bölgesinde dispersiyon değerlerinin düşük olması sebebiyle en düşük SNR değeri gözlemlenmiştir. FWM etkisinin olduğu dalga boyu aralığı yüksek kanallar arası boşluk için daha dardır. 1500 nm'ye kadar SNR değeri 75 GHz'lik kanallar arası boşluk için daha hızlı düşüş göstermiştir. Kanallar arası boşluk değeri azaldığında ve kanal sayısı arttığında SNR değeri teorik olarak da beklendiği üzere düşmüştür. Dispersiyon değeri az olduğu için, FWM ürünlerinin etkisi NZDSF fiberli sistemde DSF fiber kullanılan sisteme oranla daha az, SMF fiberli sisteme göre ise daha çok olmuştur. FWM etkinliği dalga boyu yükseldikçe azalmaktadır. Ancak çalışma esnasındaki kaybın en küçük olduğu 1550 nm çalışma bölgesinde en uygun özellik gösteren fiber NZDSF fiberdir.

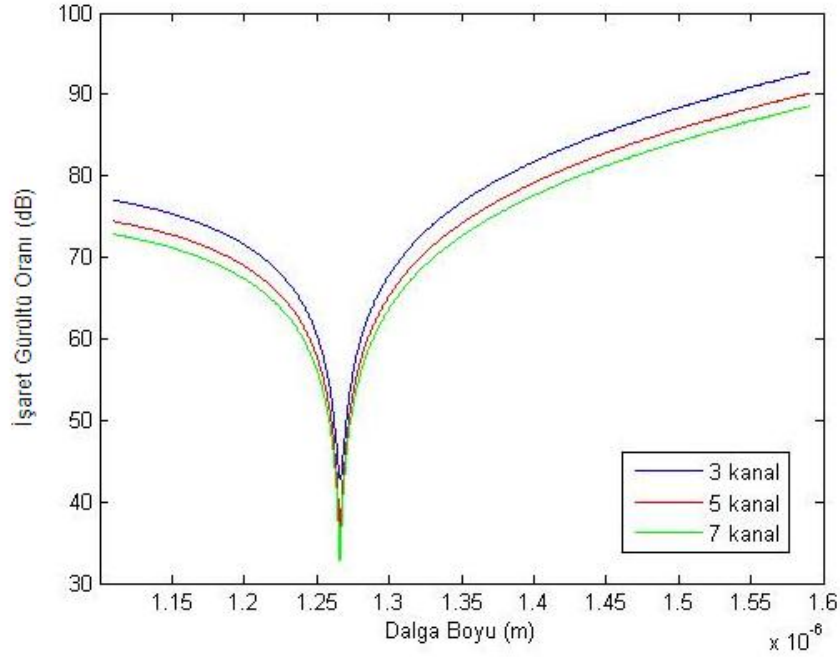
4.2.4. DCF Fiberli Sistemin Kanal Sayısı Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar

Şekil 4.9'da 3, 5, 7 kanallı bir DCF fiber kullanılan WDM sistemin dalga boyu-SNR değişkenliği gösterilmiştir. Kanallar arası boşluk 75 GHz-25 GHz olarak alınmıştır. Giriş kanal gücü 1 mW olarak alınmıştır. 1550 nm de DCF fiber için $D=-85$ ps/nm.km, $dD/d\lambda=-0.3$ ps/nm² km $\alpha=0.5$ dB/km fiber uzunluğu 50 km alınmıştır. Orta kanal olan 1550 nm 1100-1600 nm arasında kaydırılmıştır.

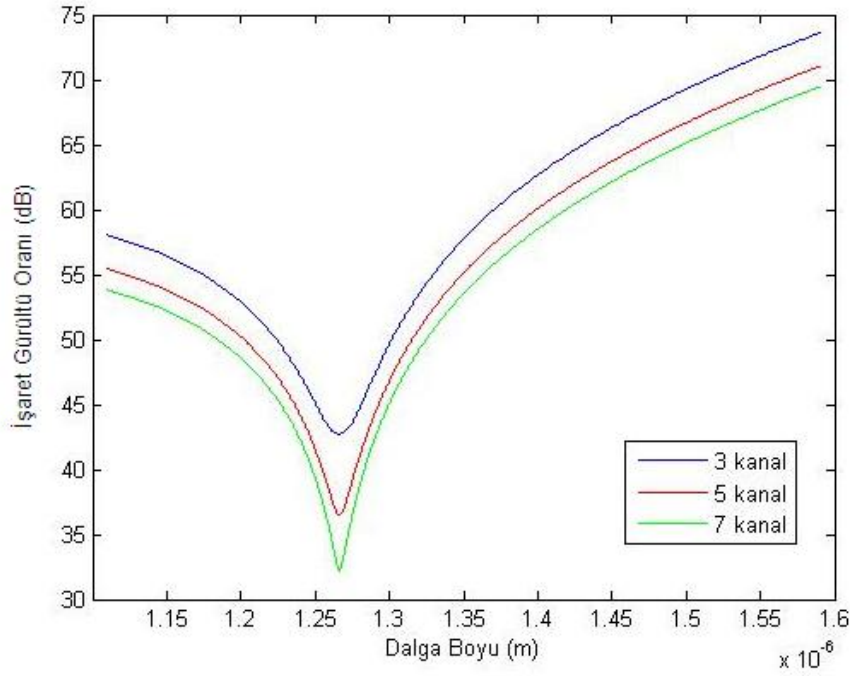
DCF fiber dispersiyon değişkenliğini bastırmak için geliştirilmiş bir fiber tipi olduğu için negatif eğime ve dispersiyona sahiptir. Bu özellikleri sonucu Şekil 4.9'da da görüldüğü gibi 1550 nm çalışma bölgesinde en yüksek SNR değerlere sahip fiberdir. Çünkü bu çalışma bölgesinde dispersiyon değeri en yüksek fiber tipidir. Dispersiyon değerinin en düşük olduğu 1260 nm bölgesinde FWM etkinliği en büyüktür; buna bağlı olarak FWM'in gürültü etkisi sonucu SNR değeri bu bölgede en düşüktür. Kanal sayısı arttırıldığında, bu fiber tipinin kullanıldığı sistemde de diğer fiber tiplerinde olduğu gibi

SNR değerinde azalma görülmüştür. Kanallar arası boşluk değeri 25 GHz'e düşürüldüğünde ise SNR değerleri azalmıştır. Ayrıca her iki grafikte de görüldüğü gibi SNR değerlerinin, üç kanal sayısı için de dalgaboyu arttıķa yükseldiği aşıkardır.

DCF fiberin sistemde oluşan FWM ürünlerini en iyi bastırabilecek fiber tipi olduğu görülse de, 1550 nm dalga boyunda kayıp, en fazla bu fiber tipinde görülmektedir. Bu sebeple WDM sistemlerde en uygun iletim için NZDSF fiberin tercih edilmesi gerektiği ancak mevcut sistemde fiberlerin sahip olduğu dispersiyonu bastırmak için DCF fiber kullanılmasının faydalı olacağı görülmektedir.



Şekil 4.9. a) DCF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalgaboyu değişimi (kanallar arası boşluk 75 GHz alınmıştır.)



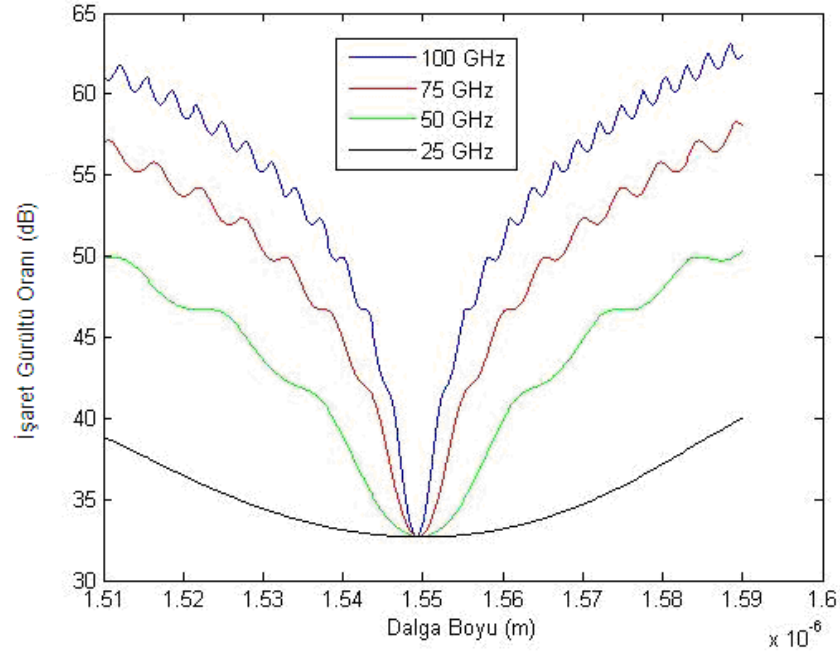
Şekil 4.9. b) DCF fiberli sistemin 3, 5, 7 kanal için SNR-dalga boyu değişimi (kanallar arası boşluk 25 GHz alınmıştır.)

4.3. DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri İçin Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre FWM-SNR Analizinin Matlab Çalışması ile Elde Edilen Sonuçları

Bu bölümde, Matlab programı kullanılarak SMF, DSF, NZDSF ve DCF fiber tipleri için kanal boşluklarının FWM güç değişimine etkisi incelenmiştir. Uygulamalarda 3 kanal ve 100, 75, 50, 25 GHz kanal boşlukları kullanılmıştır.

4.3.1. DSF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar

Şekil 4.10'da 3 kanallı DSF fiber kullanılan bir sistemde kanallar arası boşluk değeri 100 GHz'ten 25 GHz'e kadar düşürüldüğünde SNR değerinin de düştüğü, 1550 nm'de en düşük değere ulaştığı görülmüştür. En küçük SNR değeri olan 23 dB'nin elde edilebilmesi için orta kanal, dispersiyon değeri sıfır olan dalga boyundan en az 5 nm uzakta olmalıdır.

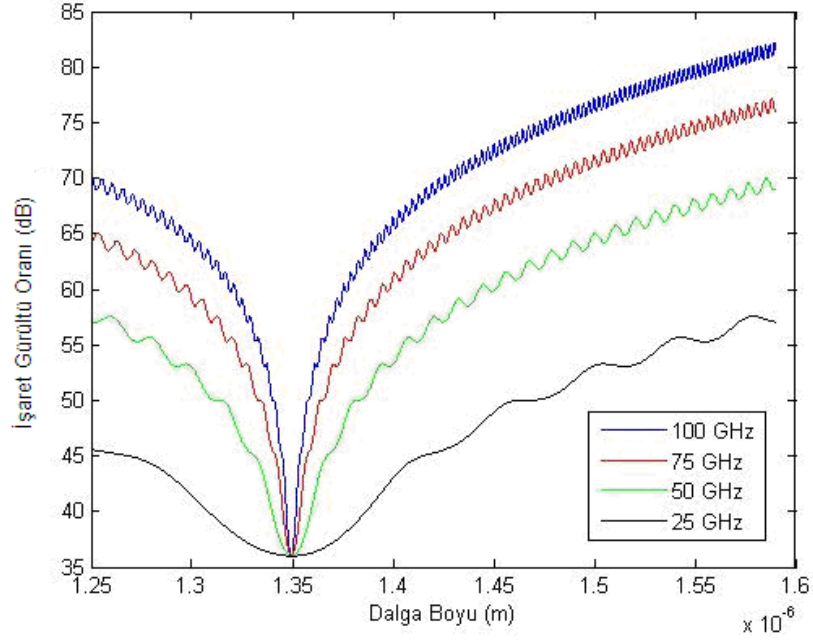


Şekil 4.10. DSF fiberli sistemde kanallar arası boşluğun değişimine göre SNR-
dalgaboyu değişimi

DSF fiber, 1550 nm penceresinde, optik haberleşme sistemlerinde WDM uygulamaları için ideal değildir. TDM ve tek kanal uygulamaları için uygundur. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki 1550 nm’de sıfır dispersiyon DWDM uygulamalar için negatif bir durumdur. Kromatik dispersiyonun yokluğu sadece FWM’i yükseltmez aynı zamanda çapraz faz modülasyonu gibi (XPM) kritik doğrusal olmayan bozulmalara da sebep olur. Bu da sistem başarımını olumsuz etkiler.

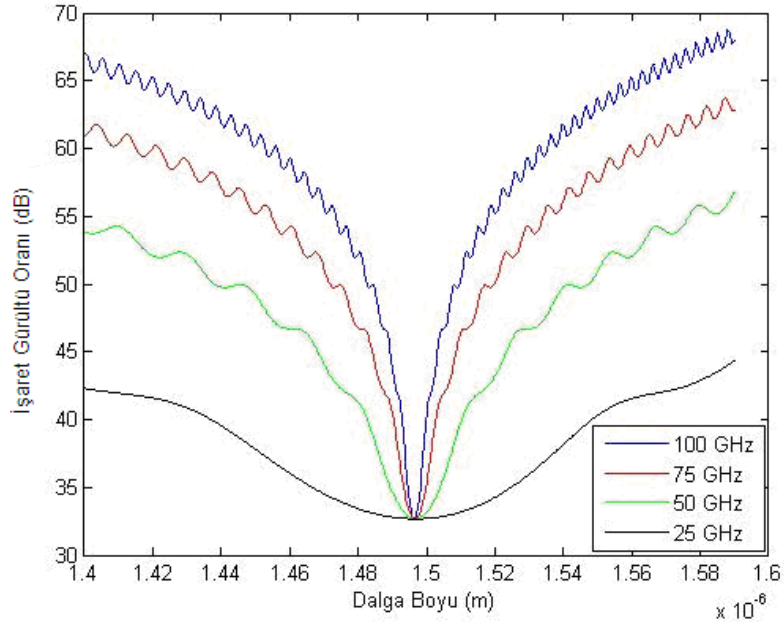
4.3.2. SMF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR- Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar

Şekil 4.11.’de SMF fiber kullanılan sistem için SNR değeri değerlendirildiğinde, beklenildiği üzere kanallar arası boşluk değeri 100 GHz iken en yüksek, 25 GHz iken en düşük çıkmıştır. Kanallar arası boşluk değeri düştükçe SNR değişimi giderek yavaşlamaktadır. Genel davranışı NZDSF fiberli sistem ile aynı görülmektedir. Ancak SMF fiberli sistemde dispersiyon etkisi daha fazla görülmüştür.



Şekil 4.11. SMF fiberli sistemde kanallar arası boşluğun değişimine göre SNR-dalgaboyu değişimi

4.3.3. NZDSF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar



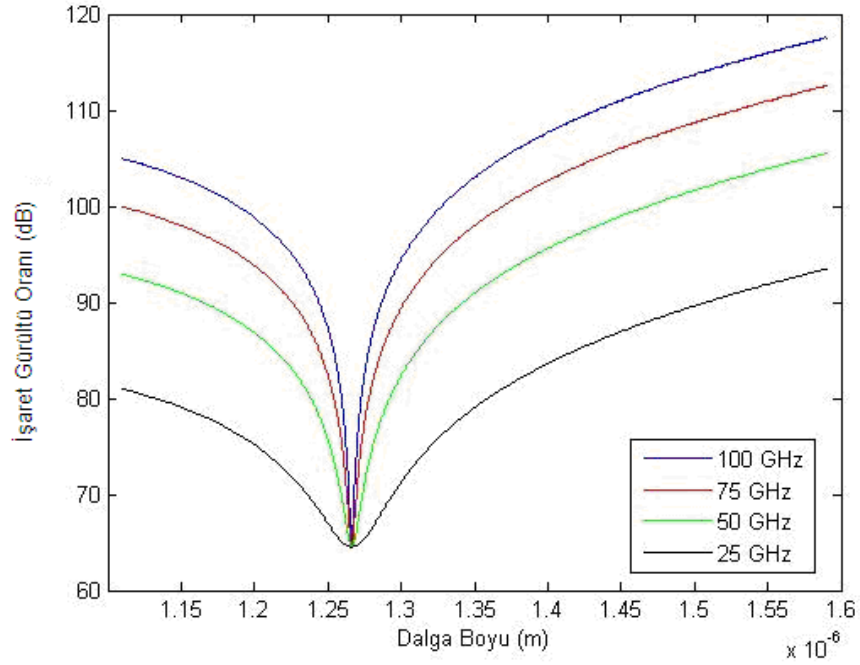
Şekil 4.12. NZDSF fiberli sistemde kanallar arası boşluğun değişimine göre SNR-dalgaboyu değişimi

DWDM sistemlerinde doğrusal olmayan etkilere karşı koymak için 1500 nm'de dispersiyonu düşürmek faydalı olmaktadır. Bunun için yeni bir fiber geliştirilmiştir. Bu fiber, sıfır olmayan kaydırılmış dispersiyonlu fiber (NZDSF) olarak adlandırılmıştır. FWM etkilerini azaltmak için kromatik dispersiyon arzu edilen seviyede tutulmuştur.

Şekil 4.12'de de görüldüğü üzere kanallar arası boşluk değerindeki azalma ile SNR değerindeki azalma doğru orantılıdır. 25 GHz kanallar arası boşluk değeri için FWM'in etkin olduğu dalga boyu aralığının daha geniş, 100 GHz için ise oldukça dar olduğu gözlemlenmektedir. Dispersiyon değişkeni değerinin daha düşük olması sebebiyle SMF fiberli sisteme göre SNR değerleri daha düşük çıkmıştır. Ancak DSF fiberli sisteme göre daha iyi başarımlar sergilemektedir.

4.3.4. DCF Fiberli Sistemde Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre SNR-Dalgaboyu Değişimini Gösteren Sonuçlar

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere sistemde DCF fiber kullanıldığı zaman, DCF fiberin özellikleri gereği, kanallar arası boşluk değerleri 100 GHz'ten 25 GHz'e kadar düşürüldüğünde diğer fiber tiplerine göre en iyi SNR başarımı sergilemesi beklenen bir durumdur. Yine kanallar arası boşluk değeri azaldıkça SNR değeri de azalmıştır. Dalgaboyu 1260 nm'de en küçük SNR değerlerine sahiptir. FWM değişkenliğinin etkisi kanallar arası boşluk değeri azaldıkça, dalga boyundaki artışla orantılı biçimde artmaktadır. DCF fiberin dispersiyonunun sıfır olduğu dalga boyunda bütün kanallar arası boşluklar için FWM etkinliği hemen hemen aynı değerdedir.

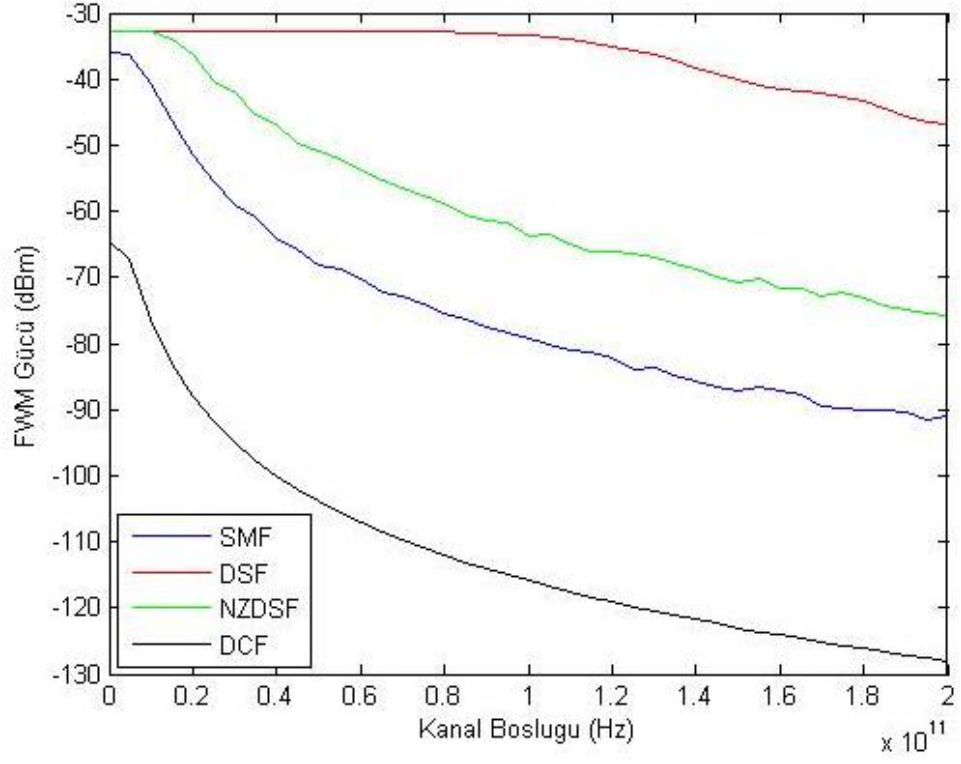


Şekil 4.13. DCF fiberli sistemde kanallar arası boşluğun değişimine göre SNR-dalgaboyu değişimi

4.4. DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri için Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre FWM Güç Değişimini Gösteren Sonuçlar

Şekil 4.14'te 3 kanallı bir sistemde, SMF, DSF, NZDSF ve DCF fiberlerin kanal boşluklarının değişimine göre FWM güç değişimi gösterilmiştir. Şekilde FWM gücü DSF fiber için en büyük çıkmıştır. Kanal boşluğu artmasına rağmen az bir değişim göstermiştir ve 1.4 GHz kanal boşluğuna kadar yaklaşık olarak -32 dBm değerinde sabit kalmıştır. 1.4 GHz kanal boşluğundan sonra FWM gücü DSF fiber için yavaş bir düşüş göstermiş ve 200 GHz kanal boşluğunda -45 dBm değerine ulaşmıştır. SMF ve NZDSF fiberler için FWM güç değişimi DSF fibere göre biraz daha sert düşüşler göstermiştir. Kanal boşluğu arttıkça kanalların birbirlerini etkilemeleri ve FWM etkinliğinin azalması sebebiyle bütün fiber tipleri için FWM gücünde düşüşler izlenmektedir. DCF fiberde FWM gücü 4 GHz kanallar arası boşluk değerine kadar daha hızlı düşüş göstermiş ve 20 GHz kanallar arası boşluk değeri için FWM gücü -130 dBm gibi çok düşük değerlere inmiştir. Buna göre tasarlanan sistemlerde negatif dispersiyonundan ve düşük FWM etkinliğinden dolayı en iyi başarıyı DCF fiberin sergileyeceği anlaşılmaktadır. Ancak

DCF fiber dispersiyon dengelemesi için kullanıldığından sistem genelinde iletim için kullanılmamaktadır.



Şekil 4.14. DWDM haberleşme sistemlerinde SMF, DSF, NZDSF, DCF fiber tipleri için kanallar arası boşluğun değişimine göre FWM güç değişimi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışmasında fotonik WDM ağlar için FWM etkisi incelenmiştir. Yapılan benzetimler iki ana grupta toplanabilir.

1. WDM Haberleşme Sistemlerinde FWM’i Tetikleyen Etkenlerin İncelenmesi: Tez çalışmasında FWM’i tetikleyen etkenler analiz edilmiştir. Özellikle kanallar arası boşluk, iletim mesafesi, kromatik dispersiyon ve kanal giriş gücü değişkenlerindeki değişimlerin FWM’e etkileri üzerinde durulmuştur. Buna göre elde edilen sonuçlar şunlardır:

a) FWM gürültü gücünün kanal boşluklarına (0.5 nm, 1 nm, 1.5 nm, 2 nm, 2.5 nm) göre değişiminde kanal boşlukları arttıkça FWM gürültü gücü (0.5 nm için -34 dB, 2.5 nm için -63 dB) azalmaktadır. Kanallar arası boşluk değerleri eşit seçildiği için kanalda iletilen işaretler arası mesafe arttıkça birbirlerine olan etkileşim azalır, FWM gücü düşmektedir.

Kanallar arası boşluğun eşit seçildiği sistemlerde, FWM gücünün etkisi arttığı için, bu etki kanal boşluklarının büyük tutulması (2.5 nm) ile azaltılabilir. Kuvvetlendirilmiş WDM sistemlerinde, FWM etkisini azaltmak için önerilen çeşitli yaklaşımlardan en uygun olanı, kanallar arası boşluk değerlerinin farklı seçilmesidir.

b) FWM gücünün değişimi farklı mesafeler ve kromatik dispersiyon değerlerine göre incelenmiştir. $D=1$ ps/(nm.km) iken, iletim mesafesi 50 km’den 150 km’ye arttırıldığında FWM gücü azalmaktadır. Çünkü iletim mesafesi arttıkça giriş gücü azalmakta bu durumda da doğrusal olmayan etki olan FWM güç değeri azalmaktadır. $D=17$ ps/(nm.km) iken, iletim mesafesi 50 km’den 150 km’ye arttırıldığında FWM gücünde küçük kanallar arası boşluk değerlerinde (20 GHz’e kadar) daha şiddetli düşüşler gözlemlenmiştir.

Dispersiyon katsayısının ve mesafenin artması, düşük kanallar arası boşluk değerlerinde bile, FWM gücünde ani azalmalara sebebiyet vermektedir. FWM gücü üzerindeki kromatik dispersiyon etkisinin, iletim mesafesi etkisine kıyasla daha büyük olduğu

söylenbilir. Sistem başarımı açısından dispersiyon değışkeni en uygun değerde olacak şekilde seçilmelidir.

c) FWM etkinliğinin farklı iletim mesafelerine göre değışimine bakıldığında, uzun mesafeler için ($L > 100$ km) FWM etkinliği doyuma ulaşmaktadır. FWM'in etkinliği $L = 10$ km ve daha kısa mesafeler için giderek artan büyük kanal boşluklarında sıfıra düşmüş ve salınımına girmiştir. Ayrıca düşük kanal boşluklarında (< 20 GHz) etkinliğin tüm mesafeler için yüksek olduğu görülmektedir. İletim mesafesi azaldıkça, FWM etkinliğinin sıfır olduğu kanallar arası boşluk değeri de artmaktadır.

d) FWM çapraz karışımının giriş gücüne göre değışiminin incelenmesi tek modlu fibere ve iki kanala göre yapılmış ve bu çalışmada kanal güçleri olan P1 ve P2 birbirinden farklı alınmıştır. FWM çapraz karışımının birinci dereceden FWM ürünlerinde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu etki dereceler arttıkça giderek azalmaktadır. Kanal giriş gücü arttıkça FWM çapraz karışımı da artmaktadır.

2. DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri İçin Kanal Sayısının ve Kanallar Arası Boşlukların Değışimine Göre FWM-SNR Analizi: Benzetimlerde SMF, DSF, NZDSF ve DCF fiber tabanlı sistemlerinde 1550 nm penceresindeki kanalların (3, 5, 7) işaret gürültü oranına etkisi irdelenmiştir. Uygulamalarda merkez dalga boyu (1550 nm) kaydırılmıştır. 3, 5, 7 kanal için orta kanala düşen FWM ürünleri bulunmuş ve güçleri toplanmıştır.

DSF fiber için SNR değeri, kanal sayısından bağımsız olarak 1550 nm'de en düşüktür. Orta kanal dalga boyunda kaydırıldığı zaman SNR değeri artmaktadır. Kanallar arası boşluk değeri 75 GHz'ten 25 GHz'e düşürüldüğünde FWM gücü artmış; buna bağılı olarak da SNR değerleri aynı dalga boyları için daha düşük çıkmıştır. Sistemde kanallar arası boşluk değeri 100 GHz'ten 25 GHz'e kadar düşürüldüğünde SNR değerinin de düştüğü, 1550 nm'de en düşük değere ulaştığı görülmüştür. 1550 nm'de sıfır dispersiyon DWDM uygulamalar için negatif bir durumdur. Kanal sayısı arttıkça FWM ürün sayısı arttığı ve SNR değeri düştüğü için DSF fiber kullanımı WDM sistemler için tavsiye edilmemektedir.

SMF fiberli sistemde kanal sayısı arttırıldığında, oluşan FWM ürünlerinin etkisinden dolayı, hem 75 GHz hem de 25 GHz kanallar arası boşluk değerleri için SNR değerinde düşüş görülmüştür. Orta kanal SMF dispersiyon değerinin sıfır olduğu 1350 nm penceresinde en düşüktür. Orta kanal kaydırıldığında dalga boyu arttıkça SNR değeri artmaktadır. Kanallar arası boşluk değeri 100 GHz'den 25 GHz'e kadar düşürüldükçe SNR değeri azalmıştır.

NZDSF fiberli sistemde kanallar arası boşluk değeri azaldığında ve kanal sayısı arttığında SNR değeri teorik olarak da beklendiği üzere düşmüştür. Dispersiyon değişkeni değerinin daha düşük olması sebebiyle SMF fiberli sisteme göre SNR değerleri daha düşük çıkmıştır.

DCF fiberli sisteme bakıldığında en yüksek SNR değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Kanal sayısı arttırıldığında bu fiber tipinin kullanıldığı sistemde de diğer fiber tiplerinde olduğu gibi SNR değerinde azalma görülmüştür. Kanallar arası boşluk değeri 25 GHz'e düşürüldüğünde ise SNR değerleri azalmıştır. DCF fiber, özellikleri gereği, kanallar arası boşluk değerleri 100 GHz'ten 25 GHz'e kadar düşürüldüğünde diğer fiber tiplerine kıyasla en iyi SNR başarımını sergilemiştir.

Sonuçlarda 1550 nm'de dispersiyon değeri düşük (3.7 ps/nm.km) fakat sıfır olmayan, aynı zamanda geniş etkin alanlı NZDSF fiberin, kanallar arası doğrusal olmayan çapraz karışımı azaltabileceği görülmüştür. SMF fiber için yüksek faz uyumsuzluğundan dolayı FWM problemi önemsizdir. Ancak SMF tabanlı sistemler, fiber hattı boyunca birikmiş dispersiyonu bastırmak için pahalı ve karmaşıktır. DSF fiber 1550 nm çalışma bölgesinde sıfır dispersiyon sonucu en fazla FWM etkisine sahip olduğu için WDM sistemleri için uygun bulunmamıştır.

Sistem SNR'ı daha çok optik fiberin dispersiyon karakteristiğine, kanal boşluğuna ve giriş kanal gücüne bağlıdır. Bu sebeple WDM/DWDM sistemlerde kanallar arası boşlukların yakın (0.5 nm), dispersiyon değerinin sıfır (0 ps/nm.km), güç seviyesinin de yüksek **olmaması** gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G. P. 2001 a.** Application of Nonlinear Fiber Optics, Academic Press.
- Agrawal, G. P. 2001 b.** Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, San Diego, 466 p
- Agrawal, G. P. 2002.** Fiber-Optic Communication Systems, Wiley-Interscience, New York, 546 pp.
- Bang, S. W. 2006.** Analysis of optical communication systems employing dense wavelength division multiplexing in the presence of fiber nonlinearities. *Ph.D. Thesis*, New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey.
- Boyd, R. W., 1992.** Nonlinear Optics. Academic Press, 439 pp.
- Breuer, D., Obermann, K., Petermann, K. 1998.** Comparison of Nx40 Gb/s and 4Nx10 Gb/s WDM transmission over standard single mode fiber at 1.55 μ m. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(12): 1793-1795.
- Chang, K. D., Yang, G. C., Kwong, W. C. 2000.** Determination of FWM products in unequal spaced channel WDM lightwave systems. *Journal of Lightwave Technology*, 18(12): 1113-.2122.
- Chiang, T.K., Datta, D., Kazovsky, L. G. 1993.** Statistical distribution of four wave mixing interference of ASK optical WDM systems. *LEOS 1993 Summer Topical Meeting Digest*, 125-126.
- Çeliker, E., 2006.** Fiber optiklerde doğrusal olmayan olaylar. *Yüksek Lisans Tezi*, Fizik Anabilim Dalı, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Datta, D., Chiang, T. K., Kazovsky, L. G. 1993.** Impact of four wave mixing on optical FSK WDM communication systems. *LEOS 1993 Summer Topical Meeting Digest*, 127-128.
- Ergüney, N., Hiçdurmaz B., Karlık S.E., Yılmaz G., 2010.** WDM haberleşme sistemlerinde dört dalga karışımı olayını tetikleyen etkenlerin analizi, 3. *Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, 29-30.04.2010, Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- Faisal, M., Islam, M. N., Majumder, S. P. 2005.** Performance comparison of wavelength shift keying WDM system and conventional on-off WDM system in presence of four wave mixing. *Optics*, 117: 555-562.
- Franken, P.A., Hill, A. E., Peters, C. W., Weinreich, G. 1961.** Generation of optical harmonics. *Physical Review Letters*, 7: 118-119.
- Forghieri, F., Tkach, R. W., Chraplyvy, A. R. 1993.** Power limitations due to four wave mixing depletion in WDM systems with unequally spaced channels. *LEOS 1993 Summer Topical Meeting Digest*, 129-130.

Forghiery, F. 1997. Fiber nonlinearities in high capacity optical network. *Ph.D. Thesis*, The Faculty of Princeton University in Candidacy.

Gao, S., Yang, C., Jin, G. 2002. Comparison of interchannel pulses four wave mixing in SMF, NZDSF and HNLF. *Optics Communications*, 206(2002): 439-443.

Georges, E. S. 1997. Experimental study of four wave mixing on dispersion shifted fiber and low dispersion fibers with a dense multiwavelength source. *OFC'97*, 67-69.

Harboe, P. B., de Silva, E., Sauza, J.R. 2008. Analysis of FWM penalties in DWDM systems based on G.652, G.653 and G.655 optical fibers. *World Academy of Science Engineering and Technology*, 48: 77-83.

Hünerli, H. V. 2009. Optik fiberlerde dejenere dört dalga karışımı ve kuvantum gürültüsü analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara.

Hwang, B., Tonguz, O. K. 1995. Unequally channel spacings to reduce four wave mixing crosstalk in WDM networks. 8th Annual Meeting Conference Proceeding, 30-31.10.1995, San Francisco, CA.

Iannone, E., Sabella, R., Stefano L., Valeri F. 1996. All optical wavelength conversion in optical multicarrier networks. *IEEE Transactions on Communications*, 44(6): 716-724.

Judy, A. F. 1997. Optimizing fiber dispersion for DWDM systems. *OFC'97*, 16-21.02.1997, 272-273.

Kaur, G., Singh, M. L. 2007. Effect of four wave mixing in WDM optical fibre systems. *Optics*, 120(2009): 268-273.

Kikuchi, N., Sasaki, S. 1993. Noise analysis for optical frequency conversion using nearly degenerate four wave mixing in semiconductor optical amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 11(5/6): 819-828.

Lee, J., Song, G. H. 2002. Coherence effect of four wave mixing in a dispersion managed fiber link. *Optical Fiber Technology*, 9(2003): 37-56.

Maeda, M. W., Sassa, W. B., Way, W. I., Yi-Yan, A., Curtis, L., Spicer, R., Laming, R. I. 1990. The effect of four wave mixing in fibers on optical frequency division multiplexed systems. *Journal of Lightwave Technology*, 8(9): 1402-1408.

Marcus, D., Craphlyvy, A. R., Tkach, R. W. 1991. Effect of nonlinearity on long distance transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 9(1): 121-128.

Mir, W. A. F. B. E. 2007. The effect of four wave mixing on the performance of high bit rate WDM systems. *MS. Thesis*, Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas, San Antonio.

Pasquale, F. Di., Bayvel, P., Midwinter, J. E. 1995. Performance limits in amplified dense WDM networks in the presence of four wave mixing and gain peaking. *Electronics Letters*, 31: 998-1000.

Randhawa, R., Sohal, J. S., Kaler, R. S. 2008. Optimum algorithm for WDM channel allocation for reducing four wave mixing effects. *Optics*, 120(2009): 898-904.

Schneider, T. 2004. Nonlinear Optics in Telecommunications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 415 pp.

Sekine, K., Kikuchi, N., Sasaki, S., Aoki, M. 1994. 10 Gbit/s four channel WDM transmission experiment over 500 km with technique for suppressing four wave mixing. *Electronics Letters*, 30: 1150-1151.

Singh, A., Sharma, A. K., Kamal, T. S. 2008. Four wave mixing analysis in WDM optical communication systems with higher order dispersion. *Optics*, 119(2008): 788-792.

Singh, A., Sharma, A. K., Kamal, T. S. 2009. Investigation on modified FWM suppression methods in DWDM communication systems. *Optics Communications*, 282(2009): 392-395.

Song, S., Allen, C. T., DemaresT, Hui, K. R. 1999. Intensity dependent phase matching effects on four wave mixing in optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 17(11): 2285-2290.

Song, S. 2000. Higher order four wave mixing and its effect in WDM systems. *Optics Express*, 7(4): 166-171.

Ten, S., Ennsner, K. M., Grochocinski, J. M., Burtsev, S. P., da Silva, B. L. 1999. Comparison of four wave mixing and cross phase modulation penalties in dense WDM systems. Optical fiber communication conference 99, 21-26.02.1999, 3: 43-45.

Thiel, C.W. Four wave mixing and it's applications.
<http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/FWMixing.pdf> -
(Erişim tarihi: 05.04.2010)

Wang, L., Ban, W., Song, Y., Chen, J., Zhang, X. 2009. Effect of FWM output power induced by phase modulation in optical fiber communication. *PIERS Proceedings*, 18-21 Ağustos 2009, Moskova, Rusya.

Wegener, L. G. L., Povinelli, M. L., Green, A. G, Mitra, P. P., J. B., Stark, Littlewood, P. B. 2004. The effect of propagation nonlinearities on the information capacity of WDM optical fibre systems: cross-phase modulation and four wave mixing. *Physica D*,189(2004): 81-99.

Wehmann, C. F., Fernandes, L. M., Sobrinho, C. S., Lima, J. L. S., da Silva, M. G., de Almeida, E. F., Neto, J. A. M., Somra, A. S. B. 2005. Analysis of the four wave mixing in a dispersion decreasing fiber for a WDM system. *Optical Fiber Technology*, 11(2005): 306-318.

Wilson, J., HawkeS, J. F.B. 2000. Çeviri: İbrahim Okur, Optoelektronik, Değişim Yayınları, 518.

Xiang, C. 2000. Wavelength shift keying technique to reduce four wave mixing crosstalk in WDM. *MS.Thesis*, Master of Science, Rice University, Texas.

Zeiler, W., Di Pasquale, F., Bayvel, P., Midwinter, J. E. 1996. Modeling of four wave mixing and gain peaking in amplified WDM optical communication systems and networks. *Journal of Lightwave Technology*, 14(9): 1933-1942.

Zou, X. Y., Hayee, M. I., Hwang, S. M., Willner, A. E. 1996. Limitations in 10 Gb/s WDM optic on fiber transmission when using a variety of fiber types to manage dispersion and nonlinearities. *Journal of Lightwave Technology*, 14(6): 1144-1152.

EKLER. BENZETİMLERİN MATLAB KODLARI

FWM veriminin (etkinliğin) farklı iletim mesafelerine (L=1 km, 5 km, 10 km, 50 km, 10 km, 150 km) ve kanal boşluklarına göre değişimi

```
clc
P = 1*10^-3;
alpha = 0.2/4.343*10^-3 ;
y = 5 ;
L = 1*10^3 ;
Ae = 5.3*10^-11 ;
n = 1.49 ;
D = 17*10^-6;
Le = (1-exp(-alpha*L))/alpha;
dijk = 6;
Lambda_c = 1.55*10^-6 ;
Turev = 0.09*10^3;
M = 8;
X = 5*10^-14;
La = 100*10^3;
c = 3*10^8 ;
DeltaF = 0*10^9:1*10^9:100*10^9;
Lambda = 1.542*10^-6:0.002*10^-6:1.556*10^-6;
renk = ['b', 'k', 'g', 'r'];

for j=1:length(DeltaF)
    Bijk(j) = (2*pi*(Lambda_c)^2/c)*DeltaF(j)^2*(D+Turev*DeltaF(j)*(Lambda_c)^2/c);
    nijk(j) = 100*(alpha^2/(alpha^2+Bijk(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-alpha*L))^2])*(sin(Bijk(j)*L/2))^2);
end

plot(10^-9*DeltaF,nijk,'c');
hold on

xlabel('Kanal Boslugu (GHz)');
ylabel('nijk (%)')
```

Birinci kanal giriş gücü değişimine göre birinci dereceden ve ikinci dereceden FWM çapraz karışımı değişimi

```
clear all
clc
P1dBm = 0:1:10;
P2dBm = 0:.5:5;
alpha = (0.2/4.343)*10^-3 ;
L = 150*10^3 ;
D = 17*10^-6;
Le = (1-exp(-alpha*L))/alpha;
dijk = 6;
Lambda_c = 1.551*10^-6 ;
gamma = 1.3*10^-3;
Turev = 0.09*10^3;
c = 3*10^8 ;
DeltaF = 100*10^9;
Bijk = ((2*pi*(Lambda_c)^2/c)*DeltaF^2)*(D+Turev*DeltaF*(Lambda_c)^2/c);
nijk = (alpha^2/(alpha^2+Bijk^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-alpha*L))^2])*(sin(Bijk*L/2))^2;
for i=1:length(P1dBm)
    P1(i)=10^-3*10^(P1dBm(i)/10);
    P2(i)=10^-3*10^(P2dBm(i)/10);
    Pf1(i)=nijk*P1(i)^2*P2(i);
    Pf2(i)=nijk*P1(i)*P2(i)^2;
    Pfwm(1,i)=Pf1(i)/P1(i);
    Pfwm(2,i)=Pf2(i)/P1(i);
    PfwmdB(1,i)=10*log10(Pfwm(1,i));
    PfwmdB(2,i)=10*log10(Pfwm(2,i));
    Pf(1,i)=2*nijk^2*P1(i)^3*P2(i)^2;
    Pf(2,i)=2*nijk^2*P1(i)^2*P2(i)^3;
    Pfwm2(1,i)=Pf(1,i)/P1(i);
    Pfwm2(2,i)=Pf(2,i)/P1(i);
    PfwmdB2(1,i)=10*log10(Pfwm2(1,i));
    PfwmdB2(2,i)=10*log10(Pfwm2(2,i));
end

plot(P1dBm,PfwmdB(1,:),'r');
hold on
plot(P1dBm,PfwmdB(2,:),'y');
plot(P1dBm,PfwmdB2(1,:),'g');
plot(P1dBm,PfwmdB2(2,:),'k');

xlabel('Kanal Gücü (dBm)');
ylabel('FWM Capraz Karisim (dB)');
```

WDM sisteminde FWM gürültü gücünün farklı kanal boşluklarına göre değişimi

```
clc
P = 1*10^-3;
alpha = (0.2/4.343)*10^-3 ;
L = 150*10^3 ;
D = 17*10^-6;
Le = (1-exp(-alpha*L))/alpha;
dijk = 6;
Lambda_c = 1.55*10^-6 ;
gamma = 1,3*10^-3;
Turev = 0.09*10^3;
c = 3*10^8 ;
DeltaF = 62.5*10^9:62.5*10^9:312.5*10^9;
Lambda = 1.542*10^-6:0.0002*10^-6:1.556*10^-6;
renk = ['b', 'k', 'g', 'r', 'y'];
for i = 1:1:length(DeltaF)
    for j = 1:1:length(Lambda)
        Bijk(j) = ((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*DeltaF(i)^2)*(D+Turev*DeltaF(i)*(Lambda(j))^2/c);
        nijk(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-alpha*L))^2])*sin(Bijk(j)*L/2)^2;
        Pijk(j) = (dijk*gamma*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk(j);
        Pout = P*exp(-alpha*L);
        Poran(j) = Pijk(j)/Pout;
        PorandB(j) = 10*log10(Poran(j));
        PijkdB(j) = 10*log10(Pijk(j)/10^-3);
    end
    nijk
    Pijk
    Pout
    Poran
    plot(Lambda, PijkdB, renk(i));
    hold on
xlabel('Dalga Boyu (m)');
ylabel('FWM Gürültü Gücü / Kanal (dB)')

end
```


FWM gücünün L=50 km/150 km ve D=1 ps/nm.km / 17 ps/nm.km durumlarının kanal boşluklarına karşılık gelen değişimleri

```
clear all
clc
P = 1*10^-3; % W
alpha = (0.2/4.343)*10^-3 ;
L =50*10^3 ;
D =1*10^-6;
Le = (1-exp(-alpha*L))/alpha;
dijk = 6;
Lambda_c =1.55*10^-6 ;
gamma=1.3*10^-3;
Turev =0.09*10^3;
c = 3*10^8 ;
DeltaF = 0*10^9:1*10^9:100*10^9;
for j=1:length(DeltaF)
    Bijk(j) = ((2*pi*(Lambda_c)^2/c)*DeltaF(j)^2)*(D+Turev*DeltaF(j)*(Lambda_c)^2/c);
    nijk(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L)/(1-exp(-alpha*L))^2)]*(sin(Bijk(j)*L/2))^2);
    Pijk(j)=(dijk*gamma*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk(j);
    Pout=P*exp(-alpha*L);
    Poran(j)=Pijk(j)/Pout;
    PorandB(j)=10*log10(Poran(j));
    PijkdB(j)=10*log10(Pijk(j)/10^-3);
end

plot(10^-9*DeltaF,PijkdB,'k');

xlabel('Kanal Boslugu (GHz)');
ylabel('Pfwm (dB)');

hold on
```

DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri İçin Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre FWM-SNR Analizi

```
clear all
clc
P = 1*10^-3;
alpha = (0.23/4.343)*10^-3 ;
L = 50*10^3 ;
Le = (1-exp(-alpha*L))/alpha;
dijk = 6;
Lambda_c = 1.55*10^-6 ;
gamma = 1.2*10^-3;
Turev = 0.085*10^3;
c = 3*10^8 ;
DeltaF = 25*10^9;
Lambda = 1.250*10^-6:0.0002*10^-6:1.590*10^-6;
for j=1:length(Lambda)
D(j)=(Lambda(j)-Lambda_c)*Turev+(17*10^-6);
Bijk(j) = ((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-alpha*L))^2])*sin(Bijk(j)*L/2)^2);
Pijk(j)=(dijk*gamma*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk(j);
PFWM(j)=2*Pijk(j);
SNRdB(j)=10*log10(P/PFWM(j));
Pout=P*exp(-alpha*L);
Poran(j)=Pijk(j)/Pout;
PorandB(j)=10*log10(Poran(j));
PijkdB(j)=10*log10(Pijk(j)/10^-3);

end
plot(Lambda*10^6,SNRdB,'-');
Pijk
D
PFWM
xlabel('Dalga Boyu (m)');
ylabel('İşaret-Gürültü Oranı(dB)');

hold on
```

DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri İçin Kanal Sayısı

Değişimine Göre FWM-SNR Analizi

```
clear all
clc
P = 1*10^-3;
alpha = (0.23/4.343)*10^-3 ;
L = 50*10^3 ;
Ae = 6.5*10^-11 ;
n2 = 2.35*10^-20;
Le = (1-exp(-alpha*L))/alpha;
dijk1 = 6;
dijk2 = 3;
Lambda_c = 1.55*10^-6 ;
Turev = 0.085*10^3;
c = 3*10^8 ;
DeltaF = 75*10^9;
Lambda = 1.100*10^-6:0.0002*10^-6:1.590*10^-6;
for j=1:1:length(Lambda)
gamma(j) = 2*pi*n2/(Lambda(j)*Ae);
D(j)=(Lambda(j)-Lambda_c)*Turev+(17*10^-6);
Bijk1(j) = ((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nij1(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk1(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-alpha*L))^2])*sin(Bijk1(j)*L/2)^2;
Pijk1(j)=(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nij1(j);
PFWM1(j)=2*Pijk1(j);
SNRdB1(j)=10*log10(P/PFWM1(j));

end

plot(Lambda*10^6,SNRdB1,'*');

hold on

for j=1:1:length(Lambda)
D(j)=(Lambda(j)-Lambda_c)*Turev+(17*10^-6);
gamma(j) = 2*pi*n2/(Lambda(j)*Ae);
Bijk2a(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*2*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*(3/2)*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nij2a(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk2a(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-alpha*L))^2])*sin(Bijk2a(j)*L/2)^2;
Pijk2a(j)=4*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nij2a(j);
Bijk2b(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*4*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*(2)*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nij2b(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk2b(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-alpha*L))^2])*sin(Bijk2b(j)*L/2)^2;
Pijk2b(j)=2*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nij2b(j);
```

```

Bijk2c(j) = ((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk2c(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk2c(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk2c(j)*L/2))^2);
Pijk2c(j)=2*(dijk2*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk2c(j);
Bijk2d(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk2d(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk2d(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk2d(j)*L/2))^2);
Pijk2d(j)=2*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk2d(j);

PFWM2(j)=Pijk2a(j)+ Pijk2b(j)+ Pijk2c(j)+ Pijk2d(j);
SNRdB2(j)=10*log10(P/PFWM2(j));

end

plot(Lambda*10^6,SNRdB2,'-.');

hold on

for j=1:length(Lambda)
D(j)=(Lambda(j)-Lambda_c)*Turev+(17*10^-6);
gamma(j) = 2*pi*n2/(Lambda(j)*Ae);
Bijk3a(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*3*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*(2)*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk3a(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk3a(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk3a(j)*L/2))^2);
Pijk3a(j)=4*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk3a(j);
Bijk3b(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*6*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*(5/2)*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk3b(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk3b(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk3b(j)*L/2))^2);
Pijk3b(j)=4*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk3b(j);
Bijk3c(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*9*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*3*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk3c(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk3c(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk3c(j)*L/2))^2);
Pijk3c(j)=2*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk3c(j);
Bijk3d(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*2*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*(3/2)*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk3d(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk3d(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk3d(j)*L/2))^2);
Pijk3d(j)=8*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk3d(j);
Bijk3e(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*4*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*(2)*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk3e(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk3e(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk3e(j)*L/2))^2);
Pijk3e(j)=2*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk3e(j);
Bijk3f(j) = ((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);

```

```

nijk3f(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk3f(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk3f(j)*L/2))^2);
Pijk3f(j)= 2*(dijk2*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk3f(j);
Bijk3g(j) =
((2*pi*(Lambda(j))^2/c)*DeltaF^2)*(D(j)+Turev*DeltaF*(Lambda(j))^2/c);
nijk3g(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk3g(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L))/(1-exp(-
alpha*L))^2])*(sin(Bijk3g(j)*L/2))^2);
Pijk3g(j)=2*(dijk1*gamma(j)*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk3g(j);

PFWM3(j)=Pijk3a(j)+ Pijk3b(j)+ Pijk3c(j)+ Pijk3d(j)+ Pijk3e(j)+ Pijk3f(j)+ Pijk3g(j);
SNRdB3(j)=10*log10(P/PFWM3(j));

end

plot(Lambda*10^6,SNRdB3,'-');

xlabel('Dalga Boyu (m)');
ylabel('Sinyal-Gürültü Orani(dB)');

hold on

```

DWDM Haberleşme Sistemlerinde Farklı Fiber Tipleri için Kanallar Arası Boşluğun Değişimine Göre FWM Güç Değişimi

```
clear all
clc
P = 1*10^-3;
alpha = (0.5/4.343)*10^-3 ;
L = 50*10^3 ;
D = -85*10^-6;
Le = (1-exp(-alpha*L))/alpha;
dijk = 6;
Lambda_c = 1.55*10^-6 ;
gamma = 0.43*10^-3;
Turev = -0.3*10^3;
c = 3*10^8 ;
DeltaF = 0*10^9:5*10^9:200*10^9;
for j=1:1:length(DeltaF)
    Bijk(j) = ((2*pi*(Lambda_c)^2/c)*DeltaF(j)^2)*(D+Turev*DeltaF(j)*(Lambda_c)^2/c);
    nijk(j) = (alpha^2/(alpha^2+Bijk(j)^2))*(1+[(4*exp(-alpha*L)/(1-exp(-alpha*L))^2)]*(sin(Bijk(j)*L/2))^2);
    Pijk(j)=(dijk*gamma*Le/3)^2*P^3*exp(-alpha*L)*nijk(j);
    PFWM(j)=2*Pijk(j);
    SNRdB(j)=10*log10(P/PFWM(j));
    Pout=P*exp(-alpha*L);
    Poran(j)=Pijk(j)/Pout;
    PorandB(j)=10*log10(Poran(j));
    PFWMdBm(j)=10*log10(PFWM(j)/10^-3);
end

plot(DeltaF,PFWMdBm,');
xlabel('Kanal Boslugu (Hz)');
ylabel('FWM Gücü (dBm)');

hold on
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nazlı ERGÜNEY
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara/ 10.07.1984
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Alpaslan Anadolu Lisesi, 1998-2001
Lisans : Uludağ Üniversitesi, 2001-2005
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, 2007- 2011

Çalıştığı Kurum

: OYAK-RENAULT Otomobil Fabrikaları A.Ş.

İletişim

: nazlionalan@hotmail.com

Yayımları

: Ergüney, N., Hiçdurmaz B., Karlık S.E., Yılmaz G., 2010, WDM haberleşme sistemlerinde dört dalga karışımı olayını tetikleyen etkenlerin analizi, 3. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, 29-30.04.2010, Çankaya Üniversitesi, Ankara.