

## Doğrusal Olmayan Etkiler Altındaki Bir WDM Sistemin Farklı Veri İletim Hızları İçin Performans Analizi

### Performance Analysis of a WDM System under the Influence of Nonlinear Effects for Various Data Transmission Rates

Bahadır Hiçdurmaz<sup>1</sup>, Sait Eser Karlık<sup>2</sup>, Güneş Yılmaz<sup>3</sup>

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü  
16059 Görükle/BURSA

[bhicdurmaz@uludag.edu.tr](mailto:bhicdurmaz@uludag.edu.tr), [ekarlik@uludag.edu.tr](mailto:ekarlik@uludag.edu.tr), [gunesy@uludag.edu.tr](mailto:gunesy@uludag.edu.tr)

#### Özet

*Bu çalışmada, dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) tekniğini kullanan dispersiyonu kaydırılmış fiberli (DSF, ITU-T G.653) bir haberleşme sisteminin performansı, öz-faz modülasyonu (SPM), çapraz-faz modülasyonu (XPM) ve dört-dalga karışımı (FWM) gibi üç önemli fiber doğrusalsızlığının birleşik etkisi altında ve farklı bit hızları için OptSim programıyla analiz edilmiştir. Yapılan benzetimlerde, üç kanallı bir sistemin orta kanalının bit hata oranı (BER) değerlendirilmesi yapılmıştır. Farklı bit hızları için, BER'in, iletim uzunluğuyla değişimi, fiberin efektif çekirdek alanı ile değişimi ve kanal giriş gücü ile değişimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, doğrusalsızlıkların BER üzerindeki birleşik etkisinin, iletim mesafesini, fiberin efektif çekirdek alanını ve kanal giriş güçlerini sınırladığını göstermektedir. Bu sınırlamalar altında, WDM sistemi için, ilgilenilen parametrelerin sistem performansı açısından en uygun değerleri tespit edilmiştir.*

#### Abstract

*In this study, performance of a dispersion-shifted fiber (DSF, ITU-T G.653) communication system using wavelength division multiplexing (WDM) technique has been analyzed with OptSim simulation program for various bit-rates under the combined effect of three important fiber nonlinearities, i.e. self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM). In simulations, the bit error rate (BER) of the middle channel in a three-channel system has been evaluated. For various bit rates, variations of BER with the transmission length, the effective core area of the fiber and the channel input power have been investigated. The obtained results show that the combined effect of nonlinearities on BER limit the transmission length, the effective core area of the fiber and channel input powers. Under these limitations, the most appropriate values of the concerned parameters in terms of system performance have been also determined for the WDM system.*

#### 1. Giriş

Hat içi optik yükselticiler kullanan yüksek bit hızlı dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemlerinde, öz-faz modülasyonu (SPM), çapraz-faz modülasyonu (XPM), dört-dalga karışımı

(FWM), uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) gibi önemli doğrusal olmayan olaylar meydana gelmektedir [1,2]. Bu doğrusalsızlıklar, veri iletiminde çeşitli bozucu sonuçlar ortaya çıkarmakta ve sistem performansını sınırlamaktadır.

Optik fiberdeki doğrusal olmayan olaylar, iki kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategori, ortamın kırılma indisinin optik fiberde yol alan işaretin gücüne bağımlılığını ifade eden Kerr etkisi ile ilgilidir. Bu kategoriye giren doğrusalsızlıklar, SPM, XPM ve FWM'dir. İkinci kategori ise, yayılan optik işaretin gücünün bir kısmını doğrusal olmayan ortama aktardığı uyarılmış inelastik saçılmadan meydana gelir. Bu kategoriye giren olaylar, SRS ve SBS'dir [1-3].

SPM ve XPM'nin haricindeki sözü edilen diğer etkiler, bazı kanallara diğer kanallardan tükenen güç miktarlarında kazanç sağlarlar. SPM ve XPM ise sadece işaretlerin fazını etkileyerek spektral genişlemeye sebep olabilmektedir. Bu da dispersiyonun artmasına yol açmaktadır [4]. SRS ve SBS'nin oluşması için, diğer etkilerin ortaya çıkmasını sağlayacak optik güce oranla daha büyük bir optik güç eşiği gerekmektedir.

Doğrusal iletim durumunda, optik fiberdeki en önemli sorun, dispersiyon nedeniyle oluşan darbe genişlemesidir. Bu sorun iletim hızını ve mesafesini sınırlamaktadır. Bunun üstesinden gelmek için dispersiyonu kaydırılmış fiberler (DSF'ler) geliştirilmiştir. Ancak WDM sistemlerinde düşük dispersiyondan kaynaklanan XPM ve FWM gibi doğrusal olmayan perturbasyonlardaki ciddi artış, DSF'lerin kullanımını kısıtlamıştır.

WDM sistemlerinde, fiber doğrusalsızlıklarının her birinin ayrı ayrı neden olduğu performans azalması, çeşitli bilgisayar benzetimleri ve deneylerle araştırılmıştır [4-8].

Önceki çalışmalarımızda, SPM, XPM ve FWM'nin her birinin bağlı olduğu sistem parametreleri ve sistem performansı üzerindeki etkileri Matlab programı yardımıyla ayrı ayrı analiz edilmiştir [4, 7]. Bu çalışmada ise, SPM, XPM ve FWM'nin birleşik etkisi altındaki, üç kanaldan oluşan bir WDM sistemin performansı, OptSim benzetim programıyla incelenmiştir. Öncelikle, doğrusal olmayan etkilerin teorisi açıklanmıştır.

Daha sonra benzetimi yapılacak sistemin modeli tanımlanmıştır. Son olarak elde edilen benzetim sonuçları sunulmuş ve yorumlanmıştır. Benzetimlerde, orta kanalın BER'i, farklı bit hızları için değerlendirilmiştir. BER'in iletim uzunluğuyla değişimi, fiberin efektif çekirdek alanı ile değişimi ve kanal başına giriş gücü ile değişimi incelenmiştir.

## 2. Teorik Temeller

Yoğun elektromanyetik alanlar için, optik fiberler de dahil olmak üzere, herhangi bir dielektriğin, ışığa karşı tepkisi doğrusal değildir. Temel anlamda, doğrusal olmayan tepkinin meydana gelişi, uygulanan bir alanın etkisi altındaki bağlı elektronların uyumsuz hareketlerine dayanır. Bu uyumsuz hareketten dolayı, elektrik dipollerin indüklediği toplam polarizasyon vektörü  $\vec{P}$ ,  $\vec{E}$  elektrik alanında doğrusal değildir ve (1) no'lu eşitliği sağlar [1].

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \cdot \vec{E} + \chi^{(2)} : \vec{E}\vec{E} + \chi^{(3)} : \vec{E}\vec{E}\vec{E} + \dots) \quad (1)$$

Burada,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti ve  $\chi^{(j)}$  ( $j=1, 2, 3, \dots$ ) j'inci mertebeden suseptibilitedir. Genelde  $\chi^{(j)}$ , j+1 ranklı bir tensördür. Doğrusal suseptibilite  $\chi^{(1)}$ , toplam polarizasyon  $\vec{P}$ 'ye baskın katkı yapmaktadır.  $\chi^{(2)}$ , ikinci harmonik oluşumu ve toplam frekans oluşumu gibi doğrusal olmayan etkilerden sorumludur. Ancak, sadece, moleküler düzeyde simetrik bir tersine dönüşmenin bulunmadığı ortam için sıfır değildir. Örneğin, SiO<sub>2</sub> simetrik bir molekül olduğundan,  $\chi^{(2)}$  silika fiberler için mevcut değildir. Yani, optik fiberler normalde ikinci derece doğrusal olmayan etkiler sergilemezler. Yine de elektrik-kuadropol ve manyetik-dipol momentleri, ufak ikinci derece doğrusal olmayan etkiler oluşturabilirler. Ayrıca fiber özü içerisindeki kusurlar da, bazı koşullar altında ikinci harmonik oluşumuna katkı sağlayabilir. Optik fiberdeki en düşük mertebeli doğrusal olmayan etkiler  $\chi^{(3)}$ 'ten kaynaklanır [1,2].

Bir ışık darbesinin yavaşça değişen  $A(z,t)$  zarfının optik fiber boyunca yol alması, (2)'deki doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemle ifade edilir.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + i\beta_2 \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (2)$$

Burada  $v_g = 1/\beta_1$  darbenin grup hızı,  $\beta_2$  grup hızı dispersiyon katsayısı,  $\alpha$  zayıflama katsayısı ve  $\gamma$  (3) ile tanımlanan doğrusal olmayan etkilerin büyüklüğünü belirleyen doğrusalsızlık katsayısıdır.

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{eff}} \quad (3)$$

Burada  $n_2$  doğrusal olmayan kırılma indisi veya Kerr sabiti,  $\lambda$  ışık darbesinin merkez dalgaboyu ve  $A_{eff}$  fiberin efektif çekirdek alanıdır.

Darbenin grup hızında ilerlemesi referans alınarak  $\tau = t - (z/v_g)$  dönüşümü yapılır ve fiber kaybı ihmal edilirse, (2) denklemi (4) halini alır.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i\beta_2 \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} = i\gamma |A|^2 A \quad (4)$$

Bu denklem, kuantum mekaniğindeki Schrödinger denklemiyle benzer olduğundan, doğrusal olmayan

Schrödinger (NLS) denklemi şeklinde adlandırılmaktadır. Denklem sol tarafındaki ikinci terim, dalga kılavuzundaki dispersiyonun doğrusal etkilerini gösterirken, denklemin sağındaki terim, darbe üzerindeki doğrusalsızlıkların etkisini ifade etmektedir. Sözü edilen doğrusal olmayan etkilerin matematiksel ifadeleri, NLS denkleminde yararlanılarak türetilmektedir.

Optikte, doğrusallık ve doğrusalsızlık terimleri sırasıyla ışık yoğunluğundan bağımsızlık ve ışık yoğunluğuna bağımlılık anlamına gelmektedir. Optik fiberdeki doğrusal olmayan etkiler, ortamın kırılma indisinin ışık yoğunluğu ile değişmesinden ve elastik olmayan saçılmadan meydana gelmektedir. Optik Kerr etkisi, kırılma indisinin ışık yoğunluğu ile orantılı olarak değişmesidir. Optik Kerr etkisi göz önüne alındığında, kırılma indisi (5) ile ifade edilir.

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + n_2 \left( \frac{P}{A_{eff}} \right) \quad (5)$$

Burada  $n_0$  doğrusal kırılma indisi,  $I$  optik yoğunluk ve  $P$  optik güçtür.  $n_2$  ve  $A_{eff}$  ise (3)'te tanımlanmıştır.

Buna göre  $L$  uzunluğuna sahip fiberde ilerleyen ışığın fazındaki doğrusal olmayan bir kayma, fiberin çıkışında (6) ile ifade edilir.

$$\phi_{NL} = \gamma PL \quad (6)$$

Eğer zayıflamanın göz önünde bulundurulduğu etkin uzunluk  $L_{eff}$  dikkate alırsa, (6) ifadesi (7)'teki gibi yazılabilir.

$$\phi_{NL} = \gamma PL_{eff} \quad (7)$$

Etkin uzunluk,

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha \quad (8)$$

ile belirlenir. Burada,  $\alpha$  zayıflama katsayısıdır.

### 2.1. Öz Faz Modülasyonu (SPM)

SPM, darbenin kendi yoğunluğundan dolayı spektrumunu genişletmesi durumudur. Bu spektral genişleme, malzeme dispersiyonuyla beraber darbenin zamansal genişliğinde bir değişime yol açabilir. Bu doğrusal olmayan spektral genişleme, fiberin kromatik dispersiyonu sayesinde ya kompanse edilir ya da değeri daha da büyür.

SPM nedeniyle fiber sonunda oluşan spektral genişleme ya da frekans cıvıdaması (frequency chirping), SPM'den kaynaklanan faz kaymasının zamana göre türevi alınarak, (9) eşitliğindeki gibi tanımlanır.

$$\Delta\omega_{SPM} = -\frac{d\phi_{SPM}}{dt} = -\gamma L_{eff} \frac{dP}{dt} \quad (9)$$

(9) eşitliği, işaret gücündeki değişimle taşıyıcı frekanstaki kayma arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

SPM, grup hızı dispersiyonu (GVD) ile beraber normal dispersiyon bölgesinde ( $\beta_2 > 0$ ), iletim hızını sınırlamaktadır. Ancak, anormal dispersiyon bölgesinde ( $\beta_2 < 0$ ), SPM ile GVD birbirinin etkisini yok edebilirler ve uzun bir mesafede bozulmadan yol alabilen soliton dalga paketlerini oluşturabilirler.

## 2.2. Çapraz Faz Modülasyonu (XPM)

XPM, SPM'ye benzer bir etkiye sahiptir. Fakat XPM durumunda bir yerine en az iki adet optik ışına ihtiyaç vardır. XPM'de ışınlardan birinin yoğunluk modülasyonu, diğerinde faz modülasyonu meydana getirir. Yani XPM, WDM tekniği kullanılarak bir optik fiber içerisinde iki ya da daha fazla kanalın eş zamanlı iletiminde oluşur. Bu tür sistemlerde, bir kanalın doğrusal olmayan faz kayması sadece ilgili kanalın gücüne bağlı olmayıp aynı zamanda diğer kanalların gücüne de bağlıdır. Fiber içerisinde etkileşen bütün optik ışınlar aynı polarizasyon durumuna sahip ise, j. kanalın faz kayması (10) ile verilebilir.

$$\phi_{NL,j} = \gamma L_{eff} \left( P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right) \quad (10)$$

Bu eşitliğin sağ tarafındaki  $\gamma L_{eff} P_j$  ifadesi SPM etkisini,  $2\gamma L_{eff} \sum_{m \neq j} P_m$  ifadesi de XPM etkisini tanımlar. Buna göre, j. kanalın XPM'den dolayı oluşan spektral genişlemesi ya da frekans cıvıdaması (11)'deki gibi olur.

$$\Delta\omega_{XPM,j} = -2\gamma L_{eff} \frac{d \left( \sum_{m \neq j} P_m \right)}{dt} \quad (11)$$

Buradan anlaşılacağı gibi eşit miktarda ve örtüşen iki güç için XPM'nin etkisi SPM'nin etkisinin iki katıdır.

Ancak kromatik dispersiyondan dolayı, optik darbeler arasındaki doğrusal olmayan etkileşim, hızlı yol alan darbe yavaş yol alan darbeyi geçtikten sonra sona erer. Bu özellik uzaklaşma (walk-off) parametresi  $d_{jk}$  ile ifade edilir ve (12) ile tanımlanır.

$$d_{jk} = v_g^{-1}(\lambda_j) - v_g^{-1}(\lambda_k) \quad (12)$$

Burada  $\lambda_j$  ve  $\lambda_k$  sırasıyla j. ve k. darbelerin merkez dalgaboylarıdır.  $v_g(\lambda_j)$  ve  $v_g(\lambda_k)$  ise sırasıyla  $\lambda_j$  ve  $\lambda_k$  dalgaboylarındaki darbelerin grup hızlarıdır. Yüksek mertebe dispersiyon etkilerinin ihmal edildiği doğrusal bir yaklaşım kullanılarak, uzaklaşma parametresi  $d_{jk} = D_c \Delta\lambda_{jk}$  şeklinde ifade edilebilir. Burada  $D_c$  fiberin kromatik dispersiyon katsayısı ve  $\Delta\lambda_{jk}$  ise  $\lambda_j$  ve  $\lambda_k$  dalgaboyları arasındaki boşluktur. XPM etkisini değerlendirmek için,  $T_0$  genişlikli bozucu darbelerin uzaklaşma (walk-off) ya da etkileşim uzunluğu  $L_w$  (13) ile tanımlanır.

$$L_w = \frac{T_0}{|d_{jk}|} \quad (13)$$

Buradan, minimum dispersiyon durumunda, darbeler arasındaki uzaklaşma parametresinin çok düşük olduğu ve dolayısıyla etkileşim uzunluğunun ve XPM etkisinin daha güçlü olduğu söylenebilir.

## 2.3. Dört-Dalga Karışımı (FWM)

FWM, dört dalga ya da fotonun, malzemenin üçüncü mertebe  $\chi^{(3)}$  doğrusalsızlığından kaynaklanan bir optik etkidir. Bu etkinin sonucunda, orijinal işaretlerin toplam ve fark frekanslarında yeni işaretler üretilir. FWM, komşu kanallarda gürültüye sebep olarak sistem performansını azaltır [7].

Optik fiber içerisinde,  $f_i$ ,  $f_j$  ve  $f_k$  frekanslı üç optik işaret yol aldığı anda, bu işaretler fiberin  $\chi^{(3)}$  suseptibilitesi nedeniyle etkileşebilir ve FWM işlemi ile frekansı (14)'te verilen yeni işaretleri üretebilir.

$$f_{i,j,k} = f_i + f_j - f_k \quad (14)$$

Yeni üretilen dalgaların etkin bir şekilde oluşması, bu üç optik işaretin aralarındaki faz uyumuna son derece bağlıdır. Bu yüzden DSF kullanan WDM sistemlerinde, FWM önemli bir doğrusal olmayan etkidir.

Yükselticisiz bir WDM sisteminde, FWM nedeniyle üretilen  $f_{i,j,k}$  frekanslı işaretlerin gücü, fiber uzunluğu  $L$ 'nin fonksiyonu olarak (15) ile verilir.

$$P_{i,j,k}(L) = \left( \frac{D}{3} \gamma L_{eff} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta \quad (15)$$

Burada,  $P_i$ ,  $P_j$  ve  $P_k$  fibere giren işaretlerin giriş güçleri,  $D$  dejenerasyon faktörü olup, dejenere FWM ( $f_i = f_j \neq f_k$ ) ve dejenere olmayan FWM ( $f_i \neq f_j \neq f_k$ ) için sırasıyla 3 ve 6'dır.  $\eta$  FWM'nin etkinliğini ifade eden bir niceliktir ve (16) ile tanımlanır.

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta k^2} \left( 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta k L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right) \quad (16)$$

Burada,  $\Delta k$  faz uyumsuzluk faktörüdür ve (17) ile tanımlanır.

$$\Delta k = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[ D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \frac{dD_c(\lambda_k)}{d\lambda} \right] \quad (17)$$

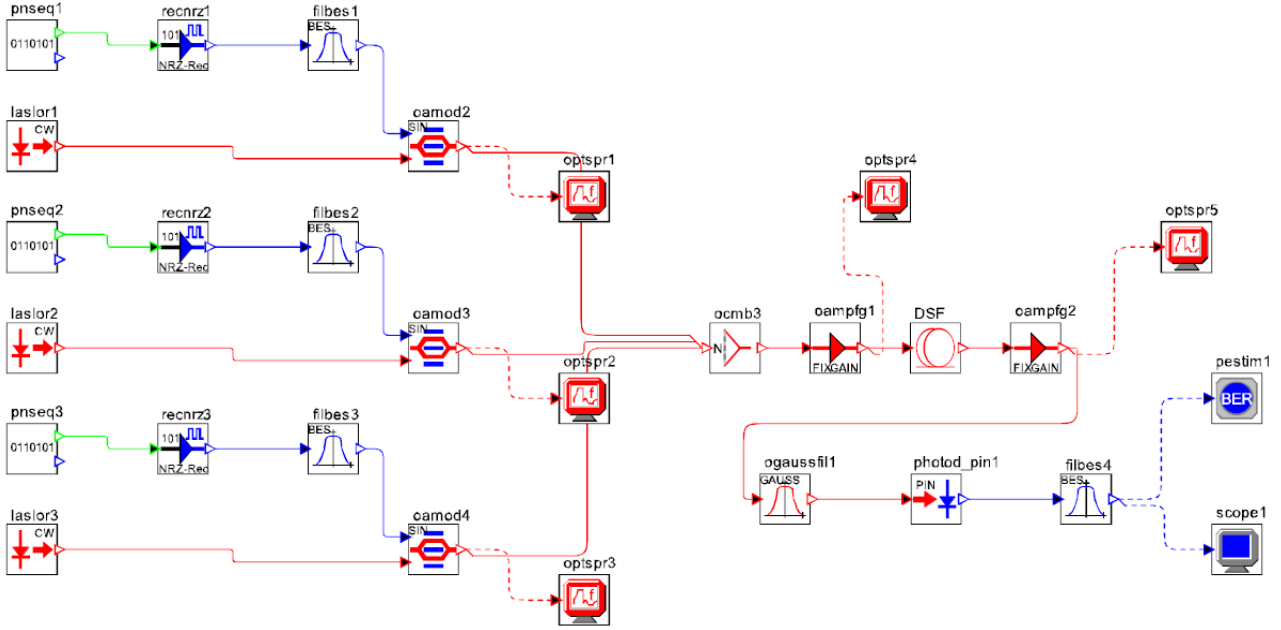
Burada,  $\lambda_k$  k. işaretin dalgaboyu,  $c$  ışığın boşluktaki hızı,  $\Delta f$  frekans cinsinden kanallar arası boşluk,  $D_c$  fiberin kromatik dispersiyon katsayısı ve  $dD_c(\lambda_k)/d\lambda$  kromatik dispersiyon eğimidir.

## 3. WDM Sisteminin Benzetim Modeli

Bu bölümde, Rsoft OptSim benzetim programı [9] kullanılarak analizi gerçekleştirilecek sistemin modeli tanıtılmıştır. OptSim ile oluşturulan sistem modeli, Şekil 1'de verilmiştir. Burada, kanallar arası boşluğun 100 GHz olduğu üç kanallı bir sistem ele alınmıştır. Kanalların dalgaboyları sırasıyla 1549.2 nm, 1550 nm ve 1550.8 nm'dir. Doğrusal olmayan etkilerin en şiddetli durumunu görmek amacıyla, benzetimler DSF kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Performans analizi için BER değerlendirmesi yapılmıştır. 10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps ve 50 Gbps veri hızları için, BER'in sırasıyla fiber uzunluğu  $L$ , efektif çekirdek alanı  $A_{eff}$  ve eşit kanal giriş güçleri için kanal başına düşen güçle değişimi incelenmiştir. Oluşturulan sistem, verici kısmı, fiber kısmı ve alıcı kısım olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır.

### 3.1. Verici Kısım

Sistemdeki üç adet vericiden her biri, çeşitli bit hızlarında sözde rassal bit dizileri (PRBS) üretebilen bir PRBS üretici içermektedir. Üretilen bit dizisi, sıfıra-dönüşsüz (NRZ) kodlanmış işaret üretmek için NRZ kodlayıcıya gönderilir. Kodlayıcıdan elde edilen işaret, yüksek frekans bileşenlerinin süzülmesi amacıyla, bir alçak geçiren filtreden geçirilir. Filtre çıkışındaki elektriksel darbeleri optik darbelere dönüştürmek için, sürekli dalga (CW) lazeri, bir modülatör vasıtasıyla elektriksel darbeler ile modüle edilir. Her bir CW lazerinin dalgaboyları sırasıyla 1549.2 nm, 1550 nm ve 1550.8 nm'dir.



Şekil 1: WDM Haberleşme Sisteminin Benzetim Modeli

Elde edilen işaretler, bir çoğullayıcı kullanılarak çoğullanır. Çoğullanmış işaret, kuvvetlendiriciden geçirilip fibere verilir.

### 3.2. Fiber Kısım

Benzetim modelinde kullanılan fiber DSF'dir. BER analizi için, fiberin uzunluğu  $L$  ve efektif çekirdek alanı  $A_{eff}$  değiştirilmiştir. Fiberin diğer sabit parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Fiber Parametreleri

Parametre	DSF
1550 nm'de fiber kromatik dispersiyon katsayısı $D$ (ps/nm.km)	0
1550 nm'de kromatik dispersiyon eğimi (ps/nm <sup>2</sup> .km)	0.07
Doğrusal olmayan kırılma indisi $n_2$ (m <sup>2</sup> /W)	$2.6 \times 10^{-20}$
Zayıflama katsayısı $\alpha$ (dB/km)	0.2

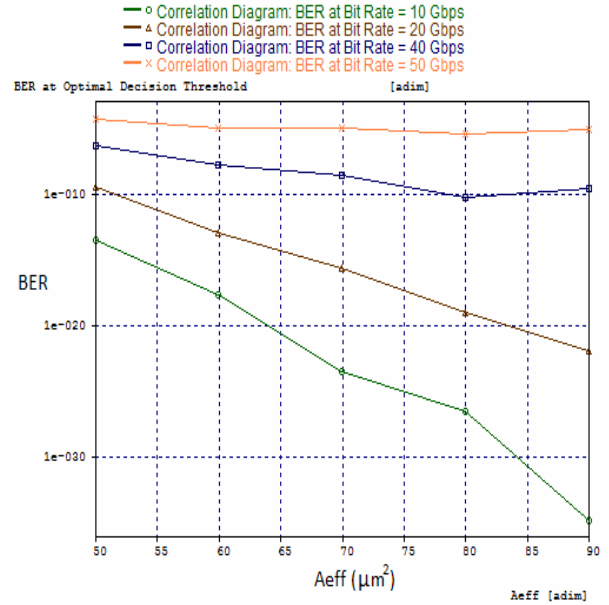
### 3.3. Alıcı Kısım

Bu kısımda, fiberin çıkışından alınan çoğullanmış işaret kuvvetlendiriciden geçirilir. Kuvvetlendirilmiş işaretten orta kanalı süzen optik band geçiren filtrenin çıkışı, PIN fotodiyota bağlanır. Fotodiyot, optik işareti elektriksel işarete dönüştürür. Elektriksel işaret, yüksek frekanslı gürültü bileşenlerini süzmek amacıyla alçak geçiren filtreden geçirilir. Alıcı kısmın çıkışından ölçüm almak için osiloskop ve BER kestirici kullanılmıştır.

## 4. Benzetim Sonuçları ve Tartışma

Üç kanallı WDM sistemi benzetim modelinde, her bir kanalın giriş gücü 1 mW, DSF uzunluğu 100 km ve fiber çıkışında kullanılan yükselticinin kazancı 20 dB seçildiğinde, farklı bit

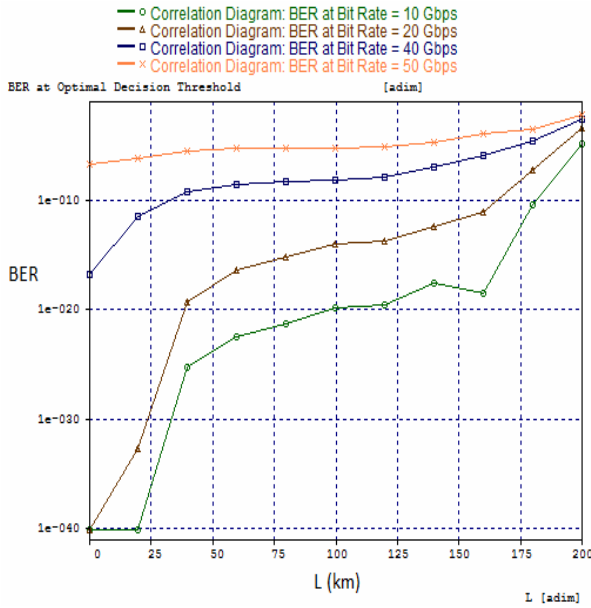
hızları için elde edilen ve BER'in fiberin efektif çekirdek alanı  $A_{eff}$  ile değişimini gösteren benzetim sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Çeşitli Veri Hızları için Bit-Hata Oranının Efektif Çekirdek Alanıyla Değişimi

Beklenildiği gibi, bit hızları arttıkça BER değerlerinde artış meydana gelmiştir. 50 Gbps veri hızında, uygulama açısından gerekli olan maksimum  $10^{-9}$ 'luk BER değerine hiçbir  $A_{eff}$  için ulaşılamamaktadır. 40 Gbps'lik veri hızı için, pratik açıdan en uygun  $A_{eff}$  değerinin 75 - 90  $\mu\text{m}^2$  arasında olduğu açıktır. 10 Gbps ve 20 Gbps veri hızlarında ise 50 - 90  $\mu\text{m}^2$  arasındaki  $A_{eff}$  değerlerinin pratik açıdan uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 3'te, farklı bit hızları için BER'in, fiber uzunluğu L ile değişimi verilmiştir. Bu benzetimde, her bir kanalın giriş gücü 1 mW, fiberin efektif çekirdek alanı  $A_{eff}$   $70 \mu m^2$  seçilmiş ve fiber çıkışındaki yükselticinin kazancı, fiber zayıflamasını giderecek şekilde ayarlanmıştır.

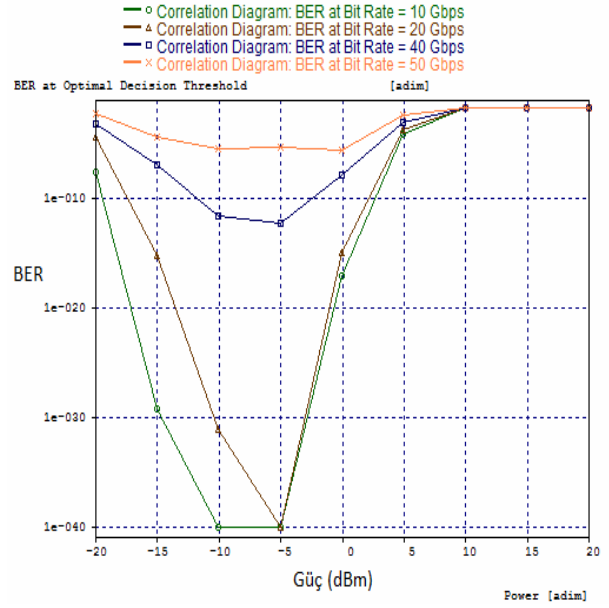


Şekil 3: Çeşitli Veri Hızları için Bit-Hata Oranının Fiber Uzunluğuyla Değişimi

Görüldüğü gibi, sistem 50 Gbps'lik veri hızında çalışma için uygun değildir; çünkü fiberin başlangıcında ( $L = 0$  km) bile, bu veri hızı için  $10^{-9}$ 'luk BER sınır değerinin çok üzerinde değerler elde edilmiştir. Bu durumun gösterdiği başka bir önemli sonuç, sistemdeki diğer elemanların da 50 Gbps'lik iletme uygun olmadığıdır. 50 Gbps haricindeki veri hızları için elde edilen sonuçlar, iletim mesafesinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sınır değerleri, 40 Gbps veri hızı için yaklaşık 50 km, 20 Gbps veri hızı için yaklaşık 170 km ve 10 Gbps veri hızı için de yaklaşık 185 km'dir.

Şekil 4'te, fiber uzunluğunun 100 km, fiberin efektif çekirdek alanının  $70 \mu m^2$ , alıcı ön-yükseltici kazancının 20 dB ve kanal giriş güçlerinin de eşit olduğu sistemde, farklı veri hızları için, BER'in kanal giriş gücüyle değişiminin incelendiği benzetim sonuçları verilmiştir.

Şekil 4'teki sonuçlara göre, 50 Gbps veri hızı için pratik açıdan uygun bir kanal giriş gücü görülmemektedir. 40 Gbps'lik hızda, -13 dBm ile -3 dBm arası giriş güçlerinin seçilebileceği, ancak en uygun kanal giriş gücünün -5 dBm olduğu anlaşılmaktadır. 20 Gbps için, uygun kanal giriş gücünün -18.5 dBm ile 3 dBm aralığında bulunduğu, ancak performans açısından en uygun giriş gücü değerinin -5 dBm olduğu görülmektedir. 10 Gbps'lik iletimde ise, kanal giriş gücünün -19.5 dBm ile 3.5 dBm aralığında seçilebileceği, BER açısından en uygun kanal giriş gücü aralığının ise -10 dBm - 5 dBm olduğu aşıkardır.



Şekil 4: Çeşitli Veri Hızları için Bit-Hata Oranının Kanal Giriş Gücüyle Değişimi

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, SPM, XPM ve FWM doğrusalsızlıklarının varlığında, DSF tabanlı üç kanallı bir WDM haberleşme sisteminin performansı, çeşitli veri hızları için OptSim benzetim programı yardımıyla analiz edilmiştir. Benzetim programının esnekliğinden yararlanılarak diğer bozucu etkiler (SRS, SBS, PMD v.b.) ihmal edilmiş, sadece SPM, XPM ve FWM doğrusalsızlıklarının birleşik etkisine odaklanılmıştır. Performans değerlendirmesinde kriter olarak BER alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar, seçilen WDM sisteminin, doğrusalsızlıklar nedeniyle, 50 Gbps iletim hızı için uygun olmadığını; 10 Gbps, 20 Gbps ve 40 Gbps hızlarında ise, doğrusalsızlıkların BER'i etkileyerek, iletim mesafesini, fiberin efektif çekirdek alanını ve kanal giriş güçlerini sınırladığını göstermektedir. Benzetim sonuçlarından yararlanılarak, 10 Gbps, 20 Gbps ve 40 Gbps hızlarında çalışan WDM sistemi için, ilgilenilen parametrelerin sistem performansı açısından en uygun değerleri tespit edilmiştir.

Benzetim sonuçlarının deneysel sonuçlarla bire bir örtüşmeyeceği aşıkardır. Ancak, optik fiberli haberleşme sistemi tasarımında etkinliği kanıtlanmış OptSim programı kullanılarak elde edilen sonuçlar, sistem tasarımcısına bir öngörü vermekte ve incelenen etkilerden kaynaklanacak problemlerin çözümüyle ilgili çalışmalara yön göstermektedir.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma, Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından UAP(M)-2011/31 proje numarası ile desteklenmektedir.

## 7. Kaynaklar

- [1] Agrawal, G. P., *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [2] Schneider, T., *Nonlinear Optics in Telecommunications*, Springer, 2004.
- [3] Agrawal, G. P., *Fiber-Optic Communication Systems*, John Wiley&Sons Inc., 2010.
- [4] Hiçdurmaz, B., Karlık, S. E. ve Yılmaz, G., "Optik Fiberli Haberleşme Sistemlerinde SPM ve XPM Olaylarının Analizi", *ELECO2010 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bildiriler CD'si, 2010.
- [5] Kaur, G., Singh, M. L., Patterh, M.S., "Analysis of Significant Factors in DWDM Optical Communication Systems", *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 8, No. 1, 2010.
- [6] Paradiso, L., Boffi, P., Marazzi, L., Vecchia, N. D., Artiglia, M., Martinelli, M., "Experimental XPM, SPM, FWM Penalty Evaluation in Very Dense WDM Optical Systems", *CLEO2005 Conference on Lasers & Electro-Optics*, 2005.
- [7] Ergüney, N., Hiçdurmaz, B., Karlık, S. E., Yılmaz, G., "Analysis of Four-Wave Mixing Phenomena on Transmission Performance of Wavelength Division Multiplexing Systems". *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, vol. 8, pp. 263-275, 2011.
- [8] Bogoni, A., Poti, L., "Effective Channel Allocation to Reduce Inband FWM Crosstalk in DWDM Transmission Systems", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, pp. 387-392, 2004.
- [9] OptSim, *Application Notes and Examples*, Rsoft Design Group, Inc.