



# NZDSF Optik İletim Ortamı Uzak Mesafe DWDM Haberleşme Sisteminin SPM, XPM, FWM ve SRS Birleşik Etkisi Altındaki Performans Analizi

## Performance Analysis of Long-Haul DWDM Communication System Having NZDSF Optical Transmission Medium under the Combined Impact of SPM, XPM, FWM and SRS

Abbas YILDIRIM<sup>1</sup>, Kübra KILINÇARSLAN<sup>2</sup>, Sait Eser KARLIK<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
<sup>1</sup>[511805003@ogr.uludag.edu.tr](mailto:511805003@ogr.uludag.edu.tr), <sup>2</sup>[kubrakilincarslan@uludag.edu.tr](mailto:kubrakilincarslan@uludag.edu.tr), <sup>3</sup>[ekarlik@uludag.edu.tr](mailto:ekarlik@uludag.edu.tr)

### Özet

Öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM), dört dalga karışımı (FWM) ve uyarılmış Raman saçılması (SRS) optik fiberli haberleşme sistemlerinin performansını sınırlayan önemli doğrusal olmayan etkilerdir. Bu bildiride, SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altında, sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiber (NZDSF) kullanan yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM) uzak mesafe haberleşme sisteminin performansı incelenmiştir. Performans analizi için doğrusal olmayan etkiler altındaki işaret-çapraz karışım oranı (SXR) değişimlerinden yararlanılmıştır. Benzetimler, 13 kanallı ve kanallar arası boşluk değerleri 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olan DWDM haberleşme sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. En kötü hal analizi yapabilmek amacıyla ilgili sistemin merkez kanalına odaklanılmıştır. Benzetim sonuçları, SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altında minimum 23 dB SXR kriterini sağlayan güvenilir sistem tasarım ve gerçeklemeleri açısından önemlidir.

### Abstract

Self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM), four-wave mixing (FWM) and stimulated Raman scattering (SRS) are important nonlinear impacts limiting the performance of optical fiber communication systems. In this paper, the performance of long-haul dense wavelength division multiplexing (DWDM) communication system with non-zero dispersion shifted fiber (NZDSF) has been analyzed under the combined impact of SPM, XPM, FWM and SRS. Signal-to-crosstalk ratio (SXR) variations due to nonlinear impacts have been used for performance analysis. Simulations have been performed on 13-channel DWDM communication system having channel spacing values of 25 GHz, 50 GHz and 100 GHz. The center channel of the related system has been focused on to achieve a worst-case analysis. Simulation results are important for reliable system design and implementation satisfying a minimum 23 dB SXR criterion under the combined impact of SPM, XPM, FWM and SRS.

### 1. Giriş

Dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM), toplam iletim kapasitesini artırmakta ve esnek optik ağ tasarımına olanak sağlamaktadır [1]. Öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM) ve dört dalga karışımı (FWM) gibi kırılma

indisine bağlı doğrusal olmayan etkiler ile uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) gibi elastik olmayan saçılma etkileri, WDM tabanlı haberleşme sistemlerinin performansını sınırlamaktadır [2-4]. Kanal giriş güçleri, kanal sayısı ve iletim uzunluğu gibi sistem parametreleri, kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda arttıkça, doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki olumsuz etkileri de artmaktadır [5]. Bu bildiride, SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki işaret-çapraz karışım oranının (SXR) kanal giriş gücü ve kanallar arası boşluk değerleriyle değişimi, MATLAB2021a kullanılarak analiz edilmiştir. İkinci bölümde, WDM tabanlı haberleşme sistemlerindeki doğrusal olmayan olaylarla ilgili teorik altyapı verilmiştir. Üçüncü bölümde benzetim modeli ve benzetimlerde kullanılan sistem parametreleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altında elde edilen SXR benzetim sonuçları sunulmuş ve yorumlanmıştır.

### 2. Teorik Altyapı

Optik fiber iletim ortamında yayılan  $f_i$ ,  $f_j$  ve  $f_k$  frekanslı üç optik dalganın, ortamın üçüncü dereceden suseptibilitesinden kaynaklanan etkileşim nedeniyle,  $f_{ijk}$  frekanslı yeni bir optik dalga üretmesi olayı, dört dalga karışımı (FWM) olarak adlandırılır. Optik fiberde üretilen yeni dalganın  $f_{ijk}$  frekansı

$$f_{ijk}=f_i+f_j-f_k \quad (1)$$

ile hesaplanır [6]. WDM tabanlı sistemler için (1)'deki  $i, j, k$  indisleri,  $i, j,$  ve  $k$ . kanalı ifade eder. FWM etkisiyle  $f_{ijk}$  frekanslı dalganın üretilmesi için  $i \neq j \neq k$  ya da  $k \neq i, j$  şartının sağlanması gerekir. WDM tabanlı haberleşme sistemlerinde üretilen FWM işaretinin gücü

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

olarak tanımlanır [6]. Burada,  $d_{ijk}$  dejenerasyon faktörü;  $\gamma$  doğrusalsızlık katsayısı;  $L_{eff}$  fiberin etkin uzunluğu;  $P_i, P_j$  ve  $P_k$  sırasıyla  $i, j$  ve  $k$ . kanalın giriş gücü;  $\alpha$  fiberin zayıflama katsayısı;  $L$  toplam iletim uzunluğu ve  $\eta_{ijk}$  FWM etkinliğidir.

FWM etkinliği

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta B_{ijk}^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \sin^2 \left( \frac{\Delta B_{ijk} L}{2} \right) \right] \quad (3)$$

ile ifade edilir [6]. Burada,  $\Delta B_{ijk}$  faz uyumsuzluğu faktörü olup

$$\Delta B_{ijk} = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \left[ D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} \frac{dD_c(\lambda_k)}{d\lambda} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (4)$$

ile tanımlanır [6]. Burada,  $\lambda_k$ , k. kanalın dalgaboyu;  $D_c$  kromatik dispersiyon katsayısı;  $dD_c(\lambda_k)/d\lambda$  kromatik dispersiyon eğimi ve  $c$  ışığın boşluktaki hızıdır.

Uyarılmış Raman saçılmasında (SRS), fotonlar maddenin moleküler titreşimleriyle etkileşime girerek saçılmaya neden olur. Bu etkileşim sonucunda fotonlar, hem daha yüksek enerjili hem de daha düşük enerjili fotonlara dönüştürülür. WDM tabanlı iletim sistemlerinde, enerjisi daha yüksek (yüksek frekanslı ve düşük dalgaboylu) kanallardan, enerjisi daha düşük (düşük frekanslı ve yüksek dalgaboylu) kanallara güç aktarımı gerçekleşir.

SRS sonucunda, ilgili kanaldaki modifiye işaret gücü

$$P_M[k] = P_T[k] - P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i] + \sum_{j=1}^{k-1} P_T[j].D[j, k] \quad (5)$$

için  $k=1, 2, \dots, N$   
 $D[k, i]=0$  için  $i>N$   
 $D[j, k]=0$  için  $k=1$

ile tanımlanır [7]. (5) eşitliğinin sağ tarafındaki ilk terim ( $P_T[k]$ ), k. kanalda iletilen toplam güç; ikinci terim ( $P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i]$ ), k. kanaldan daha düşük enerjili kanallara aktarılan toplam güç; üçüncü terim ( $\sum_{j=1}^{k-1} P_T[j].D[j, k]$ ), daha yüksek enerjili kanallardan k. kanala aktarılan toplam güçtür.

j. kanalın i. kanaldan tükettiği toplam güç oranı  $D[i, j]$ ,

$$D[i, j] = \left( \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right) \cdot P_T[j] \left\{ \frac{(f_i - f_j)}{1.5 \times 10^{13}} \right\} g_{Rmax} \left\{ \frac{L_{eff} \times 10^5}{b \cdot A_{eff}} \right\} \quad (6)$$

için  $(f_i - f_j) \leq 1.5 \times 10^{13}$  Hz ve  $j > i$   
 $D[i, j] = 0$   
için  $(f_i - f_j) > 1.5 \times 10^{13}$  Hz ve  $j \leq i$

ile ifade edilir [7]. Burada,  $\lambda_j$  ve  $\lambda_i$  sırasıyla j. ve i. kanalların dalgaboyu;  $g_{Rmax}$  maksimum Raman kazancı;  $A_{eff}$  fiberin etkin alanı ve  $b$  farklı dalgaboyuna sahip kanallardaki polarizasyona göre 1 ve 2 arasında değişen bir sabittir.

FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki bir WDM haberleşme sistemi kanalındaki SXR değeri

$$SXR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{SRS}}{P_{FWM}} \right) \quad (7)$$

ile ifade edilebilir [5]. Burada,  $P_{SRS}$ , alıcı girişindeki, SRS etkisiyle değişen işaret gücü;  $P_{FWM}$ , FWM gürültü gücüdür.

SPM, darbenin kendi yoğunluğundan dolayı spektrumunu genişletmesidir [8]. SPM nedeniyle fiber sonunda oluşan spektral genişleme

$$\Delta\omega_{SPM} = -\frac{d\varphi_{SPM}}{dt} = -\gamma L_{eff} \frac{dP}{dt} \quad (8)$$

ile verilir [9]. XPM, SPM'e benzer şekilde, optik yoğunluk değişiminin kırılma indisi değişimine neden olduğu bir olaydır. XPM'de en az iki optik işaretin etkileşimi söz konusudur. XPM etkisiyle j. kanalda meydana gelen spektral genişleme

$$\Delta\omega_{XPM} = -2\gamma L_{eff} \frac{d(\sum_{m \neq j} P_m)}{dt} \quad (9)$$

ile tanımlanır [9].

SPM ve XPM birleşik etkisi altındaki faz uyumsuzluğu faktörü ( $\Delta\beta'$ )

$$\Delta\beta' = \Delta\beta - \gamma(P_i + P_j - P_k) \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}} \right] \quad (10)$$

olarak tanımlanır [10]. Burada  $\Delta\beta$ , SPM ve XPM birleşik etkisinin ihmal edildiği durumdaki faz uyumsuzluğu faktörüdür. (10) eşitliği (3)'te yerine konulduğunda, SPM ve XPM birleşik etkisi altındaki FWM etkinliği ( $\eta'$ ),

$$\eta' = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta')^2} \left[ 1 + \frac{4\exp(-\alpha L)\sin^2(\Delta\beta' L/2)}{(1 - \exp(-\alpha L))^2} \right] \quad (11)$$

olarak tanımlanır. Dolayısıyla, SPM ve XPM birleşik etkisi altındaki FWM gücü, (11) eşitliği (2)'de yerine konulup gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$P'_{FWM} = \frac{\eta'}{9} d_{ijk}^2 \gamma^2 P_i P_j P_k \exp(-\alpha L) \left[ \frac{(1 - \exp(-\alpha L))^2}{\alpha^2} \right] \quad (12)$$

ile verilebilir.

SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki bir WDM haberleşme sistemi kanalındaki SXR değeri

$$SXR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{SRS}}{P'_{FWM}} \right) \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir [10].

### 3. Benzetim Modeli

Benzetimler, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında, hem FWM ve SRS birleşik etkisi hem de SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alınarak yapılmıştır. Tek modlu fiber (SSMF) ve sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiber (NZDSF) kullanan WDM tabanlı sistemlerde, doğrusal olmayan olaylardan en çok etkilenen kanallar merkez kanallar olduğu için; en kötü hal analizi yapabilmek amacıyla, benzetimlerde merkez kanallara odaklanılmıştır. Tüm kanalların giriş güçlerinin ve kanallar arası boşluk değerlerinin eşit olduğu varsayılmıştır. Kanallar arası boşluk değerleri 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz, toplam iletim uzunluğu 100 km olarak kabul edilmiştir. 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez

kanalının çalışma dalgaboyu 1550 nm olarak alınmıştır. Benzetimlerde, Tablo 1’de verilen NZDSF parametreleri kullanılmıştır.

**Tablo 1.** 1550 nm çalışma dalgaboyu için NZDSF parametreleri

Dc (ps/nm.km)	S (ps/nm <sup>2</sup> .km)	$\gamma$ (W.km) <sup>-1</sup>	$\alpha$ (km) <sup>-1</sup>	A <sub>eff</sub> ( $\mu$ m <sup>2</sup> )
8	0.052	1.730	0.0576	63

13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında (7. kanal) üretilen FWM ürünleri, Tablo 2’de verilmektedir. Tablo 2’deki  $f_i$  frekanslı i. kanal,  $f_j$  frekanslı j. kanal ve  $f_k$  frekanslı k. kanal etkileşime girerek, merkez kanaldaki FWM ürünlerini oluşturmaktadır. Örneğin 13 kanallı DWDM sistemde, 8. kanal (i=8), 10. kanal (j=10) ve 11. kanal (k=11) etkileşime girerek, merkez kanalda yeni bir dalga üretmektedir.

**Tablo 2.** 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında üretilen FWM ürünleri

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

Doğrusal olmayan olayların DWDM haberleşme sistem performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için literatürde seçilen minimum SXR değerleri, 20-25 dB aralığındadır [11, 12]. Bu çalışmada, minimum SXR değeri 23 dB olarak seçilmiştir.

#### 4. Benzetimler

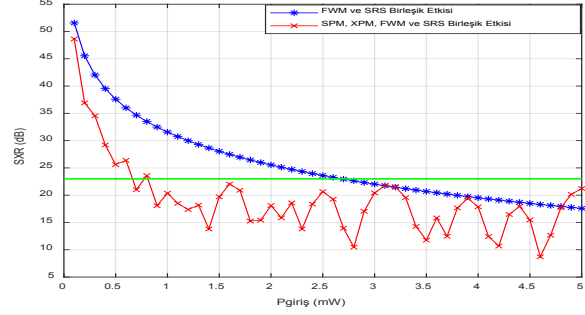
SXR değerlerinin kanal giriş gücü ve kanallar arası boşluk değerleri ile değişimini, hem FWM ve SRS birleşik etkisi altında hem de SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altında gösteren, MATLAB2021a kullanılarak elde edilmiş benzetim sonuçları, bu bölümde sunulmuş ve yorumlanmıştır.

##### 4.1. SXR-Kanal Giriş Gücü Benzetim Sonuçları

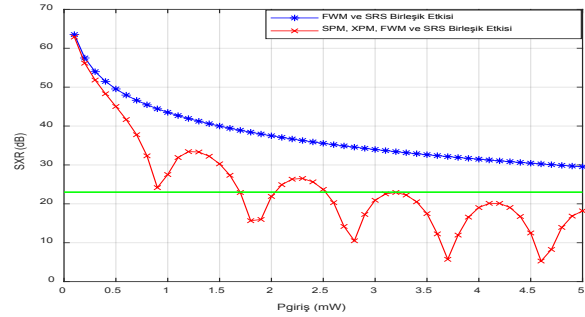
Kanal giriş güçleri ( $P_{giriş}$ ) 0.1-5 mW aralığında değiştirilerek, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında elde edilen SXR- $P_{giriş}$  benzetim sonuçları, Şekil 1-3’te verilmektedir. Kanallar arası boşluk değerleri ( $\Delta f$ ), 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz olarak kabul edilmiştir.

Şekil 1-3’te verilen benzetimlerde, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, kanal giriş gücü arttıkça SXR değeri üstel olarak azalmaktadır. Bunun nedeni, (2) ile verilen FWM işaret gücü denkleminde de görüldüğü gibi, eşit kanal giriş güçleri için, FWM işaret gücünün  $P_{giriş}^3$  ile orantılı olarak artmasıdır. FWM işaret gücünde görülen bu artış, SXR değerlerinde üstel azalışa neden olmaktadır.

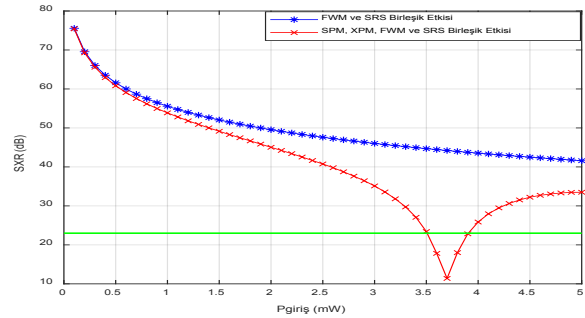
Şekil 1-3’te verilen benzetimlerde, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, SXR değerleri salınımlı azalma davranışı göstermektedir.



**Şekil 1.**  $\Delta f=25$  GHz için 13 kanallı DWDM sistemin merkez kanalında FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki SXR- $P_{giriş}$  değişimleri



**Şekil 2.**  $\Delta f=50$  GHz için 13 kanallı DWDM sistemin merkez kanalında FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki SXR- $P_{giriş}$  değişimleri



**Şekil 3.**  $\Delta f=100$  GHz için 13 kanallı DWDM sistemin merkez kanalında FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki SXR- $P_{giriş}$  değişimleri

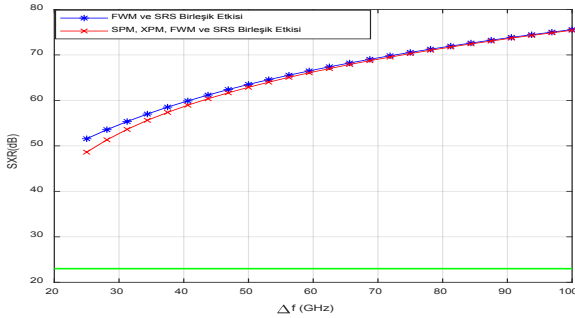
Bunun nedeni, SPM ve XPM’in FWM üzerindeki etkileri dikkate alındığında, (10) denkleminde de görüldüğü gibi, kanal giriş gücü arttıkça faz uyumsuzluğu faktörünün ( $\Delta\beta'$ ) azalmasıdır. Dolayısıyla, (11) denkleminde de görüleceği üzere,  $\Delta\beta'$ 'nin kanal giriş gücündeki artışı azalması, FWM verimliliğinde ( $\eta'$ ) salınımlı değişimlere neden olmakta ve bu durum, SXR değerlerinin salınımlı azalmasıyla sonuçlanmaktadır.

Ayrıca, 0.1-5 mW giriş gücü aralığında, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerleri, SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerlerine göre daha yüksek olup 25 GHz kanallar arası boşluk değeri ( $\Delta f$ ) için 0.1-2.68 mW giriş gücü aralığında,  $\Delta f=50$  GHz ve  $\Delta f=100$  GHz için 0.1-5 mW giriş gücü aralığında minimum 23 dB SXR kriterini sağlamaktadır. Ancak SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, 0.1-5 mW giriş gücü aralığında, minimum 23 dB SXR kriterinin sağlandığı giriş gücü değerleri, salınım davranışına bağlı olarak değişmektedir.

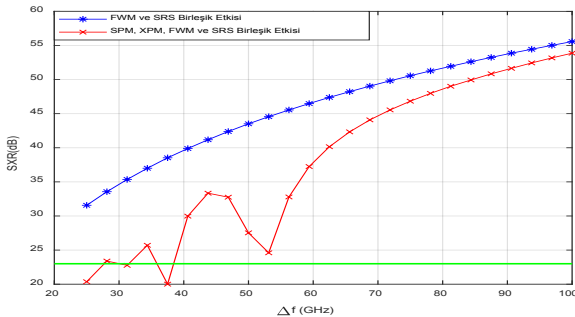
Şekil 1-3'te verilen SXR- $P_{giriş}$  benzetimlerine göre, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, SXR değerlerinin salınım sıklığı,  $\Delta f$  değeri arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni, (4) ile verilen faz uyumsuzluğu faktörünün ( $\Delta B_{ijk}$ ),  $\Delta f$  değeri arttıkça artmasıdır.  $\Delta B_{ijk}$ 'daki bu artış, (10) ile verilen  $\Delta\beta'$ 'nin, giriş gücü değişimlerinden daha az etkilenmesini sağlamakta ve SXR değerlerinin salınım sıklığını azaltmaktadır.

#### 4.2. SXR-Kanallar Arası Boşluk Değeri Benzetim Sonuçları

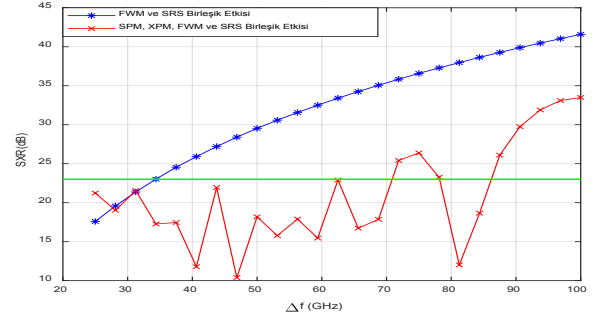
$\Delta f$ , 25-100 GHz aralığında değiştirilerek, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalında elde edilen SXR- $\Delta f$  benzetim sonuçları, Şekil 4-6'da verilmektedir. Benzetimlerde, kanal giriş güçleri, sırasıyla 0.1 mW, 1mW ve 5 mW olarak kabul edilmiştir. İlgili giriş güçlerinde, 25 GHz, 50 GHz ve 100 GHz  $\Delta f$  değerleri için, FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi ayrı ayrı dikkate alındığında elde edilen SXR değerleri, Tablo 3-5'te verilmektedir.



**Şekil 4.**  $P_{giriş}=0.1$  mW için 13 kanallı DWDM sistemin merkez kanalında FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki SXR- $\Delta f$  değişimleri



**Şekil 5.**  $P_{giriş}=1$  mW için 13 kanallı DWDM sistemin merkez kanalında FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki SXR- $\Delta f$  değişimleri



**Şekil 6.**  $P_{giriş}=5$  mW için 13 kanallı DWDM sistemin merkez kanalında FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altındaki SXR- $\Delta f$  değişimleri

Şekil 4'te görüldüğü gibi, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki FWM ve SRS birleşik etkisinin ve SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisinin dikkate alındığı her iki durumda da,  $\Delta f$  değeri arttıkça SXR değerleri artış göstermektedir. Tablo 3'te sunulduğu gibi, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerleri, SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerlerine göre daha yüksektir. Ayrıca,  $\Delta f$  değeri arttıkça, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerleri ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerleri arasındaki fark azalmaktadır. 25-100 GHz aralığındaki tüm  $\Delta f$  değerlerinde minimum 23 dB SXR kriteri sağlanmaktadır.

Şekil 5-6'da 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında,  $\Delta f$  değeri arttıkça, SXR değerleri artış göstermektedir.  $\Delta f$  arttıkça, (4) ile verilen  $\Delta\beta_{ijk}$  arttığı ve (3) ile ifade edilen  $\eta_{ijk}$  azaldığı için; bu durum, SXR değerlerinin artışına sebep olmaktadır.

Şekil 5'te,  $\Delta f$ 'in 25-53 GHz aralığında, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, SXR değerleri salınım davranışı gösterirken; 53-100 GHz aralığında,  $\Delta f$  değeri arttıkça SXR değerleri artış göstermektedir.  $\Delta f$ 'in 25-53 GHz aralığında,  $\Delta\beta_{ijk}$  yeterince yüksek değerlerde olmadığı için, (10) ile ifade edilen  $\Delta\beta'$ ,  $\Delta f$  değişimlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu durum,  $\Delta f$ 'in 25-53 GHz aralığında, SXR değerlerinin salınım yapmasına neden olur. Ancak, 53-100 GHz aralığında,  $\Delta\beta_{ijk}$  yeterince yüksek değerlere sahip olduğundan, FWM etkisinin yanısıra, SPM ve XPM'in FWM üzerindeki etkisi de artan  $\Delta f$  değerleriyle azalmakta, dolayısıyla SXR değerleri de artış göstermektedir.

Şekil 6'da, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, SXR değerleri salınım davranışı göstermektedir; çünkü kanal giriş gücü 5 mW seviyesine artırıldığında, (10) ile verilen  $\Delta\beta'$ 'nin kanal giriş gücündeki artışla azalması,  $\eta'$  ve SXR değerlerinde salınımlı değişimlere neden olmaktadır.

Ayrıca Şekil 4-6 birlikte incelendiğinde, SXR değerlerinin salınım davranışının, kanal giriş gücü arttıkça şiddetlendiği

görülmektedir. (10) ile verilen  $\Delta\beta'$ , hem  $P_{\text{giriş}}$  hem de  $\Delta f$  değerlerinden etkilenmektedir.  $P_{\text{giriş}}$  ve  $\Delta f$  değerlerinin birlikte artması  $\Delta\beta'$  ve  $\eta'$  değerlerinde değişimlere neden olmakta ve bu durum, SXR değerlerinin salınım davranışının artmasıyla sonuçlanmaktadır.

Şekil 5 ve Tablo 4'te görüldüğü üzere, SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında, 25-27.72 GHz, 30.10-31.50 GHz ve 35.85-38.44 GHz aralıkları haricinde kalan tüm  $\Delta f$  değerlerinde, minimum 23 dB SXR kriteri sağlanmaktadır. Şekil 6 ve Tablo 5'te görüldüğü gibi, 13 kanallı DWDM haberleşme sisteminde, SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerleri,  $\Delta f$ 'in 25-100 GHz aralığının 25-70.8 GHz ve 78.2-86.2 GHz alt aralıklarında, minimum 23 dB kriterini sağlamamaktadır.

**Tablo 3:**  $P_{\text{giriş}}=0.1$  mW için, 13 kanallı DWDM sisteminde, FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi ayrı ayrı dikkate alındığında, merkez kanalda elde edilen SXR değerleri

DWDM Sistem	$\Delta f$ (GHz)	25	50	100
FWM ve SRS birleşik etkisi altında	SXR (dB)	51.57	63.51	75.56
SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altında		48.63	62.88	75.42

**Tablo 4:**  $P_{\text{giriş}}=1$  mW için, 13 kanallı DWDM sisteminde, FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi ayrı ayrı dikkate alındığında, merkez kanalda elde edilen SXR değerleri

DWDM Sistem	$\Delta f$ (GHz)	25	50	100
FWM ve SRS birleşik etkisi altında	SXR (dB)	31.57	43.51	55.57
SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altında		20.36	27.53	53.87

**Tablo 5:**  $P_{\text{giriş}}=5$  mW için, 13 kanallı DWDM sisteminde, FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi ayrı ayrı dikkate alındığında, merkez kanalda elde edilen SXR değerleri

DWDM Sistem	$\Delta f$ (GHz)	25	50	100
FWM ve SRS birleşik etkisi altında	SXR (dB)	17.59	29.53	41.59
SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi altında		21.23	18.19	33.50

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, FWM ve SRS birleşik etkisi ile SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi ayrı ayrı dikkate alındığında, 13 kanallı DWDM uzak mesafe haberleşme sisteminin merkez kanalında elde edilen SXR'in, kanal giriş gücü ( $P_{\text{giriş}}$ ) ve kanallar arası boşluk değeri ( $\Delta f$ ) ile değişimi incelenmiş ve değişimlerin nedenleri yorumlanmıştır. Minimum 23 dB SXR kriterini sağlayan uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir. SXR- $P_{\text{giriş}}$  benzetim sonuçları,  $P_{\text{giriş}}$  arttıkça, DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değerinin azaldığını ve SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında

elde edilen SXR değerinin salınım yaptığını göstermektedir. Ayrıca,  $\Delta f$  arttıkça, bu salınım sıklığının azaldığı görülmektedir. SXR- $\Delta f$  benzetim sonuçlarında,  $\Delta f$  arttıkça, DWDM haberleşme sisteminin merkez kanalındaki FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değeri artmaktadır. SPM, XPM, FWM ve SRS birleşik etkisi dikkate alındığında elde edilen SXR değeri,  $P_{\text{giriş}}$  düşük iken  $\Delta f$  arttıkça artışı gösterirken;  $P_{\text{giriş}}$  yüksek iken  $\Delta f$  arttıkça salınım davranışı göstermektedir. Ayrıca  $P_{\text{giriş}}$  arttıkça, bu salınım davranışının şiddetlendiği görülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, DWDM uzak mesafe haberleşme sistemlerinin doğrusal olmayan etkiler altındaki performans analizlerinde, SPM ve XPM'in FWM üzerindeki etkisini de göz önünde bulundurmanın gerekliliğini göstermektedir.

## 6. Kaynaklar

- [1] Kaur, G. & Singh, M. L., "Effect of four-wave mixing in WDM optical fibre systems," *Optik*, 120 (6): 268–273, 2009, doi: 10.1016/j.ijleo.2007.08.007.
- [2] Sabapathi, T. & Poovitha, R., "Combating the effect of nonlinearities in DWDM system," *4th Int. Conf. Electron. Commun. Syst. (ICECS 2017)*, 17: 38–42, 2017, doi: 10.1109/ECS.2017.8067876.
- [3] Liu, X., Wu, Q., Liu, J. & Jiang, L., "Analysis of factors affecting FWM inter-channel crosstalk based on VPI," *J. Phys. Conf. Ser.*, 1607 (1): 1–6, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1607/1/012064.
- [4] Bhattacharjee, R., Dey, P. & Saha, A., "Implementation of an enhanced 32 channel 256 Gbps DWDM based Radio over Fiber optical system for constricted channel spacing employing fiber Bragg grating," *Optik*, 253 (2022) 168598, 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.168598.
- [5] Kılıncarslan, K. & Karlık, S.E., "Combined impact of SRS, FWM and ASE noise in UDWDM/DWDM long-haul communication systems using EDFAs," *Optics & Laser Technol.*, 157 (2023) 108695, 2023, doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108695
- [6] Schneider, T., *Nonlinear optics in telecommunications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH Advanced Texts in Physics*, 2004.
- [7] Singh M. L. & Hudiara, I. S., "A piece wise linear solution for nonlinear SRS effect in DWDM fiber optic communication systems," *J.Microwaves Optoelectron.*, 3 (4): 29-38, 2004.
- [8] Hiçdurmaz, B., Karlık, S. E. & Yılmaz, G. "Doğrusal olmayan etkiler altındaki bir WDM sistemin farklı veri iletim hızları için performans analizi," *ELECO'2012 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, pp. 366–371, 2012.
- [9] Keiser, G., *Optical fiber communications*, 4. Basım, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2008.
- [10] Song, S., Allen, C. T., Demarest K. R. & Hui, R., "Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers," *J. Light. Technol.*, 17 (11): 2285–2290, 1999, doi: 10.1109/50.803021.
- [11] Harboe, P. B., da Silva, E. & Souza, J. R., "Analysis of FWM penalties in DWDM systems based on G.652, G.653, and G.655 optical fibers," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, 4 (10): 653–659, 2009.
- [12] Bogoni, A. & Poti, L., "Effective channel allocation to reduce inband FWM crosstalk in DWDM transmission systems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 10 (2): 387–392, 2004, doi: 10.1109/JSTQE.2004.825952.