

Farklı Tiplerde Optik Fiber Kullanan DWDM-PON Sistem Mimarisi Üzerindeki Birleşik FWM ve SRS Etkisinin Karşılaştırmalı Analizi

Sait Eser KARLIK^{1*} 

Öz

Dalgaboyu bölmeli çoğullama tabanlı pasif optik ağlar (WDM-PON), 5G ağlarının ön bağlantı uygulamaları için önemli bir seçenek oluşturmaktadır. WDM tabanlı optik fiberli sistemlerin performansı üzerindeki baskın doğrusal olmayan etkiler, dört dalga karışımı (FWM) ile uyarılmış Raman saçılmasıdır (SRS). Önceki çalışmalarımızdan birinde, standart tek modlu fiberin (SSMF), 1310 nm ve 1550 nm dalgaboyu bölgelerinde çalışabilme özelliğinden yararlanılarak, hem yukarı yönlü hem aşağı yönlü iletimde yoğun WDM (DWDM) tekniğini kullanan bir PON mimarisi önerilmiştir. Mimarinin 2x15 ve 2x63 kanallı örneklerinde birleşik FWM ve SRS (FWM+SRS) etkisi benzetimlerle incelenmiş; önerilen mimarinin, bazı önemli noktalara dikkat edildiğinde, 23 dB'in üzerindeki işaret-çapraz karışım oranıyla (SXR) çift yönlü iletim potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiberlerin (NZDSF) erişim ağlarında yaygınlaşan kullanımları göz önünde bulundurularak, daha önce önerdiğimiz DWDM-PON mimarisinin SSMF ve NZDSF kullanan 2x31 kanallı örneklerinde FWM+SRS etkisi incelenmiştir. Benzetimlerde, kanallar arası boşluk değerleri, 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz alınmıştır. Öncelikle 25 km uzunluklu ağ mimarilerinde, SXR-kanal giriş gücü benzetimleriyle FWM+SRS etkisi incelenmiştir. Daha sonra, literatürde belirtilen diğer iletim uzunlukları için karşılaştırmalı benzetim sonuçları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, FWM+SRS etkisi altındaki DWDM-PON'larda, tek optik fiber üzerinden güvenilir çift yönlü iletim için NZDSF kullanımının önemine vurgu yapmaktadır.

Anahtar Kelimeler: FWM, SRS, DWDM-PON, SSMF, NZDSF, Optik fiber.

Comparative Analysis of Combined FWM and SRS Impact on DWDM-PON System Architecture Using Different Types of Optical Fiber

Abstract

Wavelength division multiplexing based passive optical networks (WDM-PONs) become an important choice for 5G fronthaul applications. Dominant nonlinear impacts on the performance of WDM-based optical fiber systems are four-wave mixing (FWM) and stimulated Raman scattering (SRS). In one of our previous works, making use of the ability of standard single mode fibers (SSMFs) about operating in 1310 nm and 1550 nm wavelength regions, a PON architecture using dense WDM (DWDM) technique for upstream and downstream transmission was proposed. Combined FWM and SRS (FWM+SRS) impact on 2x15- and 2x63-channel examples of proposed architecture was analyzed with simulations. It was determined that proposed architecture has a bidirectional transmission potential with a signal-to-crosstalk ratio (SXR) over 23 dB when some important points are taken into consideration. In this research, considering the raising usage of non-zero dispersion-shifted fibers (NZDSFs) in access networks, FWM+SRS impact on 2x31-channel examples of formerly proposed DWDM-PON architecture using SSMF and NZDSF is analyzed. Channel spacings are selected as 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz. Firstly, FWM+SRS impact on network architectures with 25 km lengths is analyzed with SXR vs. channel input power simulations. Then, comparative results of simulations performed for other transmission lengths given in the literature are presented. Results emphasize the importance of usage of NZDSFs for reliable bidirectional transmission over single optical fiber in DWDM-PONs under FWM+SRS impact.

Keywords: FWM, SRS, DWDM-PON, SSMF, NZDSF, Optical fiber.

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa Türkiye, ekarlik@uludag.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 06.05.2024

Kabul/Accepted: 28.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM), kullanılabilir iletim kapasitesini artırma, ağ tasarımında esneklik sağlama gibi özellikleri nedeniyle, optik ağlar için önemli bir çoğullama yöntemidir (Brackett, 1990). WDM'in pasif optik ağlarda (PON) kullanımı, literatürde ilk defa önerildiği 1988 yılından (Wagner ve ark., 1988) itibaren araştırmacıların ilgisini çekmiştir (Monnard ve ark. 1997; Maier ve ark., 2000; Hann ve ark., 2004; Park ve ark., 2007; Iannone ve ark., 2008; Zhou ve ark., 2010; Kaur ve ark., 2014; Shahpari ve ark., 2015; Fazea, 2019; Guo ve ark., 2021). 2021 yılında WDM-PON standardı yayınlamıştır (ITU-T, 2021). Günümüzde, 5G ve ötesi ağları için ön bağlantı (fronthaul) mimarilerinde WDM-PON'un kullanıldığı saha testi sonuçlarını bildiren bazı çalışmalar mevcuttur (Song ve ark, 2021; Effenberger ve Zhang, 2022; Yücel ve Açıköz, 2023; Xin ve ark, 2023). Ayrıca hibrit optik fiberli/açık uzay optik haberleşme (FFSO) sistemlerinde de WDM-PON tercih edilmektedir (Elsayed ve ark., 2018; Elsayed ve ark., 2022a; Elsayed ve ark.; 2022b). Dolayısıyla yakın gelecekteki hem 5G ve ötesi ağ uygulamalarında hem de FFSO haberleşme sistem kurulumlarında WDM-PON'un önemli bir seçenek olma potansiyeli mevcuttur.

Yoğun WDM'in (DWDM) uzak mesafe ve erişim ağlarında kullanılmaya başlamasıyla birlikte WDM kanal aralıklarının daralması, optik Kerr ve saçılma etkileri kaynaklı doğrusal olmayan olayları güvenilir optik iletişim sistemlerinin tasarımında göz ardı edilmemesi gereken unsurlar haline getirmiştir (Kaur ve ark., 2010; Sabapathi ve Sundaravadivelu, 2011). Literatürde, doğrusal olmayan olayların WDM/DWDM-PON sistem performansı üzerindeki yalın ya da birleşik etkilerine odaklanan çeşitli çalışmalar mevcuttur (Acharya ve Raja, 2007; Reis ve ark., 2012; Bi ve ark., 2014; Manzoor ve ark., 2015; Vardanyan, 2017; Neto ve ark.; 2017; Ahmet ve Sahu, 2018; Song ve ark., 2021). Ancak, WDM temelli optik haberleşme sistemleri üzerindeki baskın doğrusal olmayan etkilerin dört dalga karışımı (FWM) ile uyarılmış Raman saçılması (SRS) olduğu kaynaklarda belirtilmesine rağmen (Schneider, 2004; Agrawal, 2019; Sabapathi ve Poovitha, 2019; Agrawal, 2021), yakın zamana kadar WDM-PON sistemlerin aşağı yönlü (downstream) ve yukarı yönlü (upstream) iletim kanalları üzerindeki birleşik FWM ve SRS (FWM+SRS) etkisini inceleyen bir çalışma, literatürde bildiğimiz kadarıyla mevcut değildi. Önceki yayınlarımızdan birinde, bu konuya yoğunlaşarak, G.652 standart tek modlu optik fiberin (SSMF) hem 1530 nm hem de 1550 nm dalgaboyu bölgelerinde çalışabilme yeteneğinden yararlanılıp yeni bir WDM-PON mimarisi önerilmiş; bu mimarinin, 2x15 ve 2x63 kanallı örneklerinin aşağı ve yukarı yönlü iletim kanalları üzerindeki FWM+SRS etkileri benzetimler yardımıyla incelenmiştir (Karlık, 2023).

Literatürde, çeşitli WDM-PON mimarilerinin sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiber (NZDSF) kullanılarak gerçekleştirildiği bazı çalışmalar mevcuttur (Gebrewold ve ark., 2017; Aleksejeva ve ark., 2021). İlgili çalışmalardan ilham alınarak, bu makalede, daha önce önerilen WDM-PON

mimarisine sahip SSMF ve NZDSF kullanılan iki farklı sistem örneği üzerinde, FWM+SRS etkisi altındaki sistem performansının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu amaçla, 2x31 kanallı DWDM-PON'ların aşağı ve yukarı yönlü iletim kanalları üzerindeki FWM+SRS etkisi benzetimler yardımıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

FWM ve SRS ile ilgili teorik altyapı ikinci bölümde verilmiştir. Benzetimlerde kullanılan sistem modeli ile SSMF ve NZDSF fiber parametreleri üçüncü bölümde açıklanmıştır. Benzetim sonuçları dördüncü bölümde verilmiş ve yorumlanmıştır.

2. Teorik Altyapı

FWM, optik Kerr etkisinin bir sonucu olarak ortaya çıkan, aynı optik ortamda ilerleyen üç dalganın birbiriyle etkileşerek yeni bir dalga ürettiği doğrusal olmayan olaydır. N kanallı WDM çoğullama ile iletimin yapıldığı optik fiberde, FWM nedeniyle üretilen yeni dalganın frekansı

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

olacaktır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019). f_{ijk} üretilen dalganın frekansı; f_i , f_j ve f_k ise, sırasıyla, N kanallı WDM sistemin i., j. ve k. kanallarlarında yayılan dalgaların frekanslarıdır. Yeni dalga üretiminin gerçekleşebilmesi için, Denklem (1)'de $f_k \neq f_i$ ve $f_k \neq f_j$ koşullarının sağlanması gerekir.

Denklem (1)'den kolayca anlaşılacağı üzere, WDM sistemindeki kanal sayısı arttıkça, FWM nedeniyle, yeni frekanslı daha fazla dalga üretilecektir. Üretilen bu yeni dalgaların herbirine FWM ürünü denir. N kanallı WDM sisteminde üretilen toplam FWM ürün sayısı M ile belirtilirse, M değeri, $M=N^2(N-1)/2$ ile hesaplanabilir. FWM ürünlerinden, frekansı iletilen WDM kanallarının frekanslarına eşit olanlara FWM çaprazkarışımı (FWM crosstalk) denir. FWM çaprazkarışimleri, WDM kanallarında iletilen işaretlerle girişim yaparak, bu işaretler üzerinde bozunmaya sebebiyet verirler. Üretilen FWM ürünlerinden, frekansı iletilen WDM kanallarının frekanslarına eşit olmayanlar ise WDM kanal aralıklarına düştüklerinden toplam sistem gürültüsüne eklenirler. Dolayısıyla, FWM çaprazkarışimleri, işaret üzerindeki bozucu etkileri nedeniyle, iletilen işaret analizinde en çok önem verilen parametrelerdendir. Kanal aralıklarının eşit seçildiği WDM sistemlerinde, FWM çaprazkarışımının oluşma olasılığı, kanal aralıklarının eşit seçilmediği sistemlerdekine göre çok daha yüksek olmaktadır. Ancak, toplam iletim kapasitesini mümkün olduğunca arttırmak ve en yüksek sayıdaki kanaldan veri iletişimini sağlayarak kullanıcı sayısını maksimize edebilmek amacıyla, uygulamada eşit kanal aralıkları daha fazla tercih edilmektedir. Dolayısıyla, WDM temelli sistemlerde, eşit kanal aralıkları nedeniyle artan FWM çaprazkarışım

sayısının sistem performansı üzerindeki bozucu etkileri dikkatle izlenmelidir (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

N kanallı WDM sistemin k. kanalında iletilen işaret ile girişim yapan bir FWM ürününün gücü

$$P_{FWM}(f_{ijk}) = \left(\frac{d_{ijk} \cdot \gamma \cdot L_{eff}}{3} \right)^2 P_i \cdot P_j \cdot P_k \cdot \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta_{ijk}^2} \cdot \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta\beta_{ijk} \cdot L}{2} \right) \right] \quad (2)$$

ile hesaplanabilir (Schneider, 2004; Agrawal, 2019). Denklem (2)'de d_{ijk} dejenerasyon faktörü; γ doğrusalsızlık katsayısı; L_{eff} optik fiberin etkin uzunluğu; P_i , P_j ve P_k FWM ürününü oluşturan i., j. ve k. kanallardaki giriş işaret güçleri; α optik fiberin zayıflama katsayısı; L optik fiberin uzunluğu; $\Delta\beta_{ijk}$ birbirleriyle etkileşerek FWM ürününü oluşturan i., j. ve k. kanallar arasındaki faz uyumsuzluğu faktörüdür (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

γ ve $\Delta\beta_{ijk}$, sırasıyla,

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

ve

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

ile hesaplanır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019). Denklem (3)'te n_2 optik fiberin doğrusal olmayan kırılma indisi; λ iletim kanalının dalgaboyu; A_{eff} optik fiberin etkin alanıdır. Denklem (4)'te λ_k k. kanalın dalgaboyu; D_c kromatik dispersiyon katsayısı; S dispersiyon eğimi ve c ışığın boşluktaki hızıdır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

f_c frekanslı belirli bir WDM kanalındaki toplam FWM çaprazkarışım gücü, ilgili kanala düşen tüm FWM ürünlerinin güçlerinin toplamı olup Denklem (5) ile ifade edilebilir (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

$$P_{FWM}(f_c) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_c} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_i + f_j - f_k) \quad (5)$$

SRS, optik fiberde ilerleyen ışığın, malzemenin moleküler titreşimleriyle etkileşmesi nedeniyle meydana gelen bir elastik olmayan saçılmadır. SRS'nin bir sonucu olarak, düşük ve yüksek frekanslı yeni dalgalar oluşur. WDM temelli sistemlerde, SRS nedeniyle, yüksek frekanslı kanallarda iletilen işaret gücünün bir kısmı, düşük frekanslı kanallara aktarılır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

N kanallı WDM sistemin tüm kanalları arasındaki SRS etkisi göz önüne alındığında, k. kanalda iletilen işaret gücü

$$P_M[k] = P_T[k] - P_T[k] \cdot \sum_{i=k+1}^N D[k, i] + \sum_{j=1}^{k-1} P_T[j] \cdot D[j, k] \quad , \quad k=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

ile bulunabilir (Singh ve Hudiara, 2004). Denklem (6)'da, $P_T[k]$ k. kanal girişindeki işaret gücünü; $P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i]$ SRS etkisi nedeniyle k. kanaldan diğer tüm düşük frekanslı kanallara aktarılan toplam işaret gücünü; $\sum_{j=1}^{k-1} P_T[j] \cdot D[j, k]$ SRS etkisi nedeniyle k. kanala diğer tüm yüksek frekanslı kanallardan aktarılan toplam işaret gücünü göstermektedir. Denklem (6)'da, $i > N$ için $D[k, i] = 0$ ve $k = 1$ için $D[j, k] = 0$ olacaktır (Singh ve Hudiara, 2004).

$(f_i - f_j) \leq 1.5 \times 10^{13}$ Hz ve $j > i$ iken, i. kanaldan j. kanala aktarılan işaret gücü

$$D[i, j] = \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right) \cdot P_T[i] \cdot \left\{ \frac{(f_i - f_j)}{1.5 \times 10^{13}} \right\} \cdot g_{Rmax} \cdot \left\{ \frac{L_{eff} \cdot 10^5}{2 \cdot A_{eff}} \right\} \quad (7)$$

ile hesaplanabilir (Singh ve Hudiara, 2004). Denklem (7)'de λ_i ve λ_j , sırasıyla, i. ve j. kanalların dalga boyları; g_{Rmax} maksimum Raman kazanç katsayısıdır. $(f_i - f_j) > 1.5 \times 10^{13}$ Hz ve $j \leq i$ ise, $D[i, j] = 0$ olur (Singh ve Hudiara, 2004).

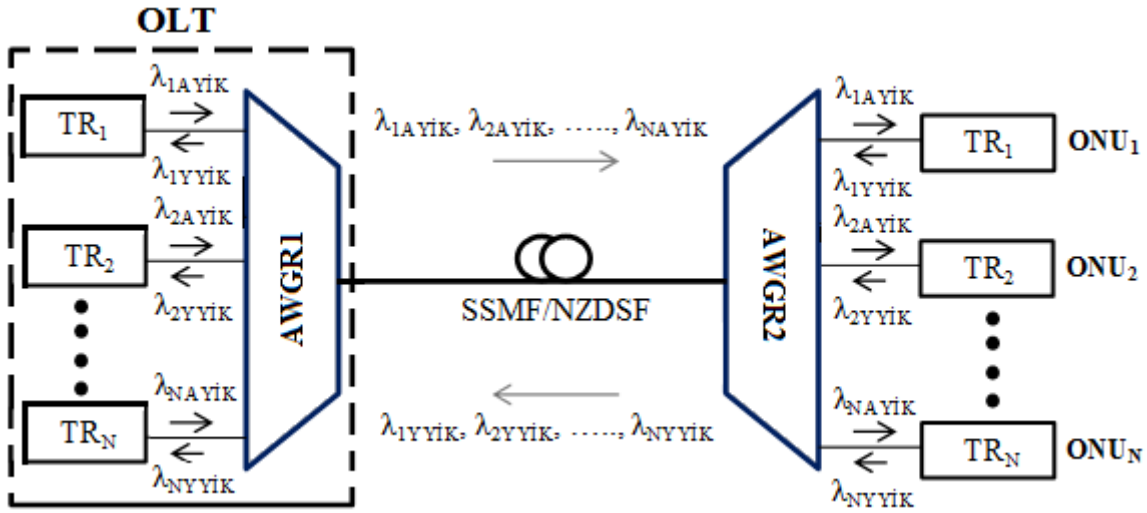
Bu çalışmada, DWDM-PON sistemlerinin performansı üzerindeki FWM+SRS etkisinin incelenmesi, işaret-çaprazkarışım oranı (SXR) değerleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. SXR değeri,

$$SXR = 10 \log_{10} \frac{P_{SRS}}{P_{FWM}} \quad (8)$$

ile hesaplanır. Denklem (8)'de P_{SRS} , incelenen kanaldaki SRS etkisi göz önüne alındığında iletilen güç; P_{FWM} , incelenen kanaldaki toplam FWM çaprazkarışım gücüdür. Dolayısıyla, P_{SRS} ve P_{FWM} , sırasıyla, Denklem (6) ve Denklem (5) ile bulunur.

3. Benzetimlerde Kullanılan Sistem Modeli ve Optik Fiber Parametreleri

Bu çalışmada, önceki çalışmalarımızdan birinde (Karlık, 2023) önerilen WDM-PON mimarisinin temel alındığı DWDM-PON sistem modeli üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. G.652 SSMF tipi optik fiberlerin (ITU-T, 2016) hem 1310 nm hem de 1550 nm dalgaboyu bölgesinde çalışabilme yeteneği temel alınarak, yukarı yönlü iletim kanallarının (YYİK) 1310 nm dalgaboyu bölgesinde, aşağı yönlü iletim kanallarının (AYİK) 1550 nm dalgaboyu bölgesinde çalıştığı sistem modelinde, iki dalgaboyu bölgesi arasında kullanılmayan geniş boşluğun AYİK ve YYİK arasında doğrusal olmayan etkileşimleri önleme özelliğinden de yararlanılmaktadır (Karlık, 2023). Çalışmada kullanılan $2 \times N$ kanallı DWDM-PON sisteminin blok şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. $2 \times N$ kanallı DWDM-PON sistem modeli.

Şekil 1’deki AWGR1 ve AWGR2, dizili dalga kılavuzu ızgara yönlendiriciler olup çift yönlü iletimde bir yönde çoğullama ve diğer yönde yalınlaşma işlemlerini yapabilmeye özelliklerine sahiptir. Sistemin her iki ucundaki TR_x ’ler ($x=1, 2, \dots, N$), belirli dalgaboylarında çalışan AYİK ve YYİK’da iletilen işaretleri gönderen ve alan optik alıcı-vericilerdir. $\lambda_{iAYİK}$ ($i=1, 2, \dots, N$) ve $\lambda_{jYYİK}$ ($j=1, 2, \dots, N$), çift yönlü DWDM iletimde, sırasıyla, AYİK ve YYİK çalışma dalgaboylarıdır. Benzetimler, 2×31 kanallı ve 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz kanallar arası boşluk değerli (Δf) DWDM-PON sistem modelleri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’den görüldüğü üzere, benzetimlerde, optik hat sonlandırıcısı (OLT) ucundaki AWGR1 ile optik ağ birimlerinin (ONU_x) bağlı olduğu AWGR2 arasındaki G652 SSMF (ITU-T, 2016) veya G655 NZDSF (ITU-T, 2009) tipi ana optik fiber kablo üzerinden gerçekleştirilen çift yönlü DWDM iletişime odaklanılmıştır. Aşağı yönlü iletim merkez kanalı (AYİMK) dalgaboyu 1550 nm, yukarı yönlü iletim merkez kanalı (YYİMK) dalgaboyu 1310 nm olarak seçilmiştir. Benzetimlerde kullanılan SSMF ve NZDSF parametreleri, yaygın olarak

kullanılan ticari fiberlerden Corning®SMF-28e® (Corning®SMF-28e® Optical Fiber, 2007) ve Draka Teralight™ (Draka Teralight™ Optical Fiber, 2010) fiberlere ait olup Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Benzetimlerde kullanılan SSMF ve NZDSF parametreleri.

		Optik Fiber Tipi	Parametre		
			Kromatik dispersiyon katsayısı ps/(nm.km)	Doğrusalsızlık katsayısı (W.km) ⁻¹	Zayıflama katsayısı (dB/km)
Dalgaboyu (nm)	1310	SSMF	-0.26	1.64	0.35
		NZDSF	-6.00	2.10	0.40
	1550	SSMF	16.20	1.30	0.20
		NZDSF	8.00	1.73	0.25

SSMF ya da NZDSF kullanılan ve eşit kanal aralıklarına sahip DWDM temelli sistemlerde, FWM çaprazkarışımının büyük bir bölümü merkez iletim kanalına düşmektedir (Harboe ve ark., 2008; Karlık, 2016). Bu nedenle, FWM+SRS etkisi altındaki DWDM-PON’ların en kötü durumdaki performanslarını belirleyebilmek amacıyla, SXR benzetimleri AYİMK ve YYİMK’lerde gerçekleştirilmiştir.

31 kanallı WDM sistemde, üretilen toplam FWM ürün sayısı M , $M=N^2(N-1)/2$ formülü yardımıyla, 14415 olarak bulunur. Bu 14415 adet FWM ürününden 337 tanesi, eşit kanal aralıklarına sahip sistemlerde, merkez iletim kanalına düşmektedir. 2x31 kanallı DWDM-PON sistemlerinde AYİMK ve YYİMK’nın her birinde 337 adet FWM çaprazkarışımına sebebiyet veren kanal kombinasyonları Şekil 2’de verilmiştir. Örnek olarak Şekil 2’de turuncu boyalı hücre göz önüne alındığında; 5. ($i=5$), 23. ($j=23$) ve 12. ($k=12$) AYİK/YYİK etkileşerek, AYİMK/YYİMK’da bir adet FWM çaprazkarışımı oluştururlar.

Literatürde, doğrusal olmayan optik olayların DWDM temelli sistemlerin performansı üzerindeki etkileri incelenirken, referans değer olarak, 20 dB (Nakajima ve ark., 1997), 23 dB (Harboe ve ark., 2008) ve 25 dB (Bogoni ve Poti, 2004) gibi belirli minimum SXR değerleri alınmaktadır. Bu çalışmada, literatürdeki değerlerin ortalaması olan 23 dB, referans değer olarak kabul edilmiştir.

Literatürde, DWDM-PON sistemlerinin incelendiği yayınlarda, iletim uzunlukları olarak genellikle 20 km (Vardanyan, 2017; Garg ve ark., 2019), 25 km (Reis ve ark., 2012; Song ve ark., 2021), 60 km (Reis ve ark., 2012; Manzoor ve ark., 2020) ve 80 km (Bi ve ark., 2014; Shahpari ve ark., 2015) değerleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmada yapılan benzetimlerde, öncelikle, ortalama bir erişim ağı mesafesi olarak 25 km’lik iletim uzunluğuna sahip sistemler için SXR-kanal giriş gücü grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra, belirli bir kanal giriş gücü değeri için, 20 km, 25 km, 60 km ve

80 km iletim uzunluklarına sahip sistemlerde, FWM+SRS etkisi altındaki SXR değerleri elde edilerek sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

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

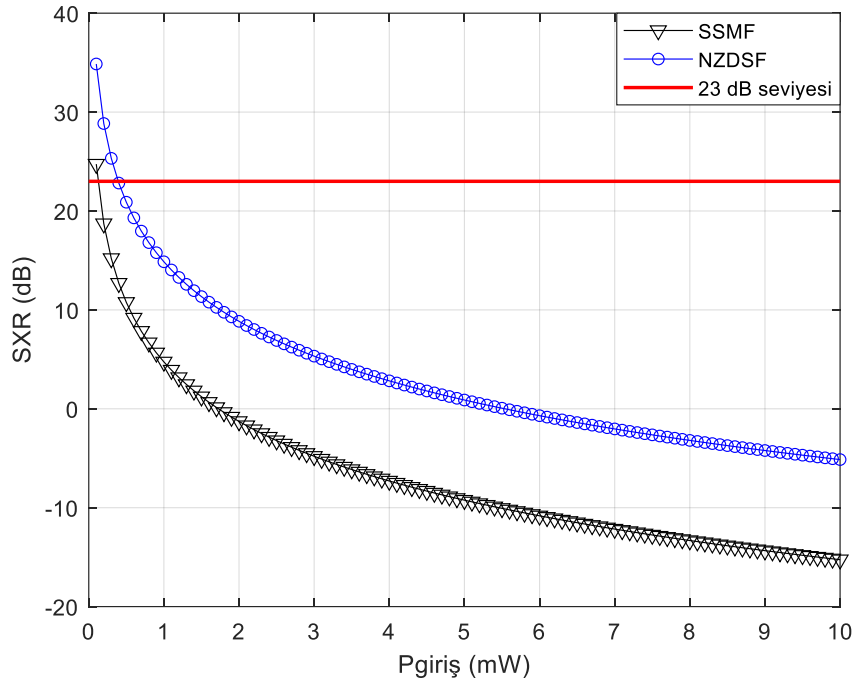
Şekil 2. 2x31 kanallı ve eşit kanal aralıklı DWDM-PON sisteminde AYİMK ve YYİMK'nın her birine düşen 337 adet FWM çaprazkarışımını oluşturan kanal kombinasyonları.

2x31 kanallı DWDM-PON sistem modeli üzerindeki benzetimler, MATLAB R2021a yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Benzetimler için gereken m-file yazımlarında, FWM+SRS etkisi altındaki SXR değerlerinin hesaplanabilmesi için, AYİMK ve YYİMK'da oluşan toplam 2x337 adet FWM çaprazkarışımının her biri için, Denklem (2) ve Denklem (4), katsayılarının değişmesi nedeniyle, ayrı ayrı yazılmak durumunda kalmıştır. İlave olarak, yine kanal dalgaboyu ve frekanslarının değişimi nedeniyle, Denklem (7) ile hesaplanan $D[i,j]$ için 2x31 adet denklem yazılmıştır. Dolayısıyla, modelleme karmaşıklığını daha da arttırmamak için, bu çalışmada, tüm kanalların giriş güçlerinin birbirine eşit alınmasının yanı sıra, iletilen işaretlerde modülasyon formatlarının değişiminin sistem performansı üzerindeki etkisi de incelenmemiş; kanal giriş güçleri olarak modüle edilmiş işaretin ortalama gücü göz önüne alınmıştır.

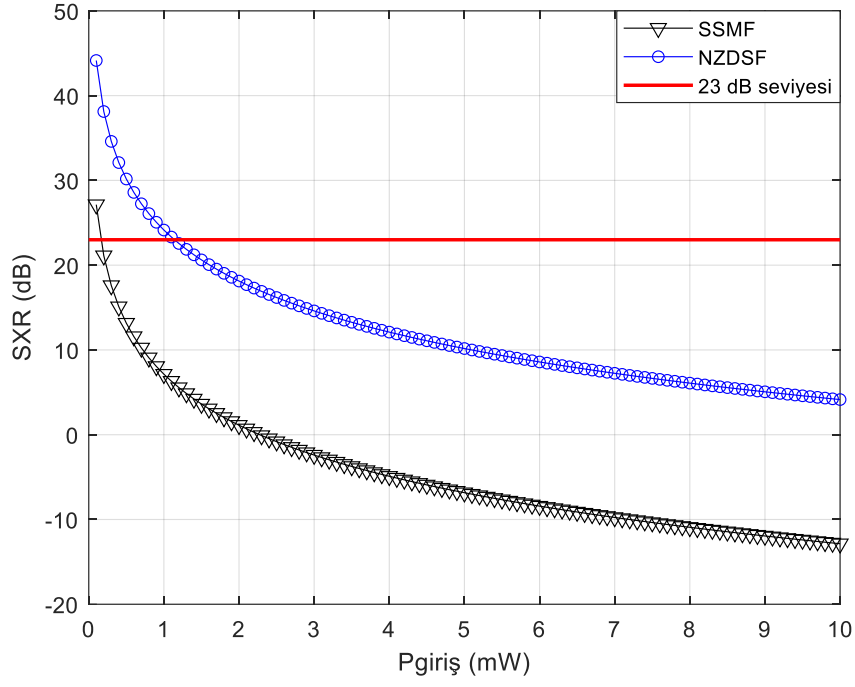
4. Benzetimler

Bölüm 2’de verilen teorik altyapı kullanılarak, Şekil 1’de gösterilen 2x31 kanallı DWDM-PON sistem modeli üzerinde gerçekleştirilen benzetimlerde, FWM+SRS etkisi altında AYİMK ve YYİMK’deki SXR’in değişen kanal giriş gücü değerleri ile değişimi incelenmiş ve yorumlanmıştır. Şekil 3-10’da, 23 dB SXR referans seviyesi, kırmızı renkteki çizgiyle gösterilmiştir.

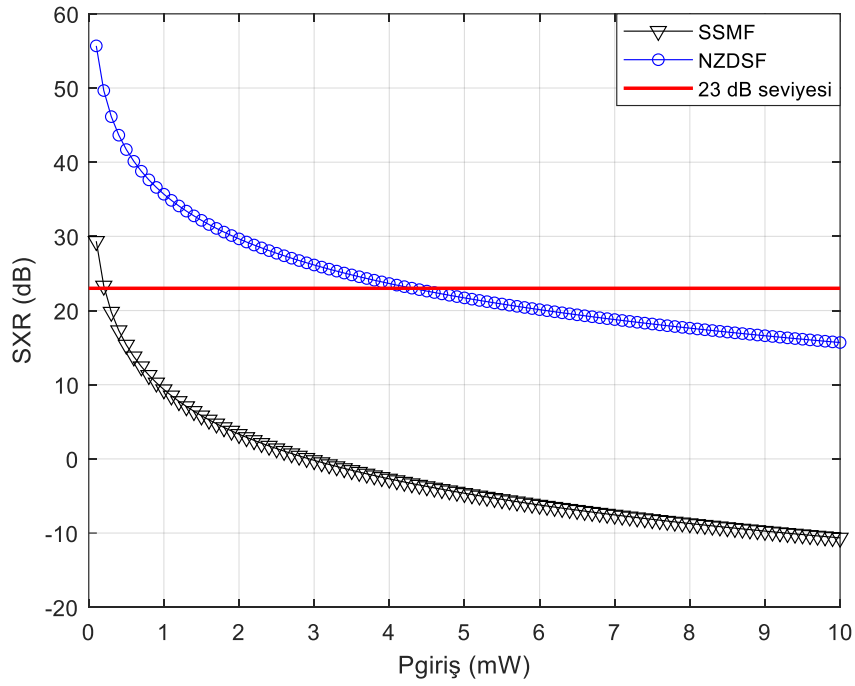
Kanal giriş güçlerinin birbirine eşit alınarak ve 0.1 mW ile 10 mW aralığında değiştirilerek, FWM+SRS etkisi altında SXR değişimlerinin incelendiği benzetim sonuçları, YYİMK için Şekil 3-6’da, AYİMK için Şekil 7-10’da verilmiştir. İlgili benzetimlerde kanal uzunlukları 25 km olarak alınmıştır.



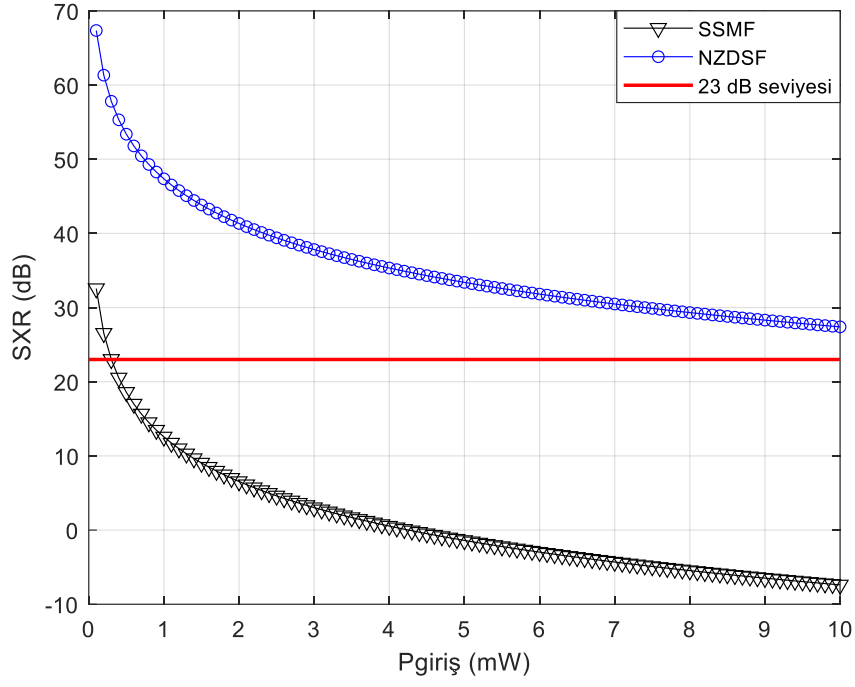
Şekil 3. $\Delta f= 12.5$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİMK’da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



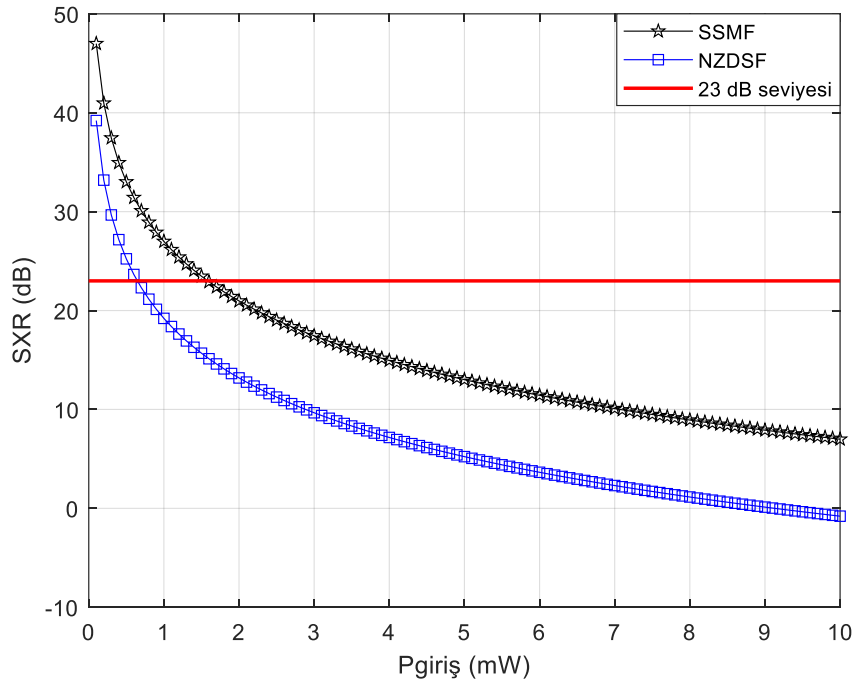
Şekil 4. $\Delta f = 25$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİM K'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



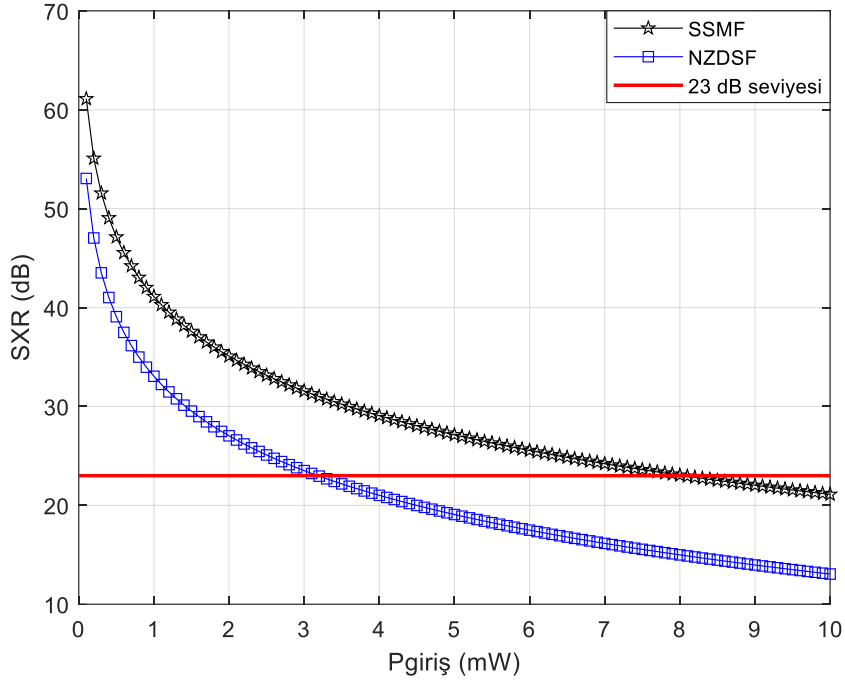
Şekil 5. $\Delta f = 50$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİM K'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



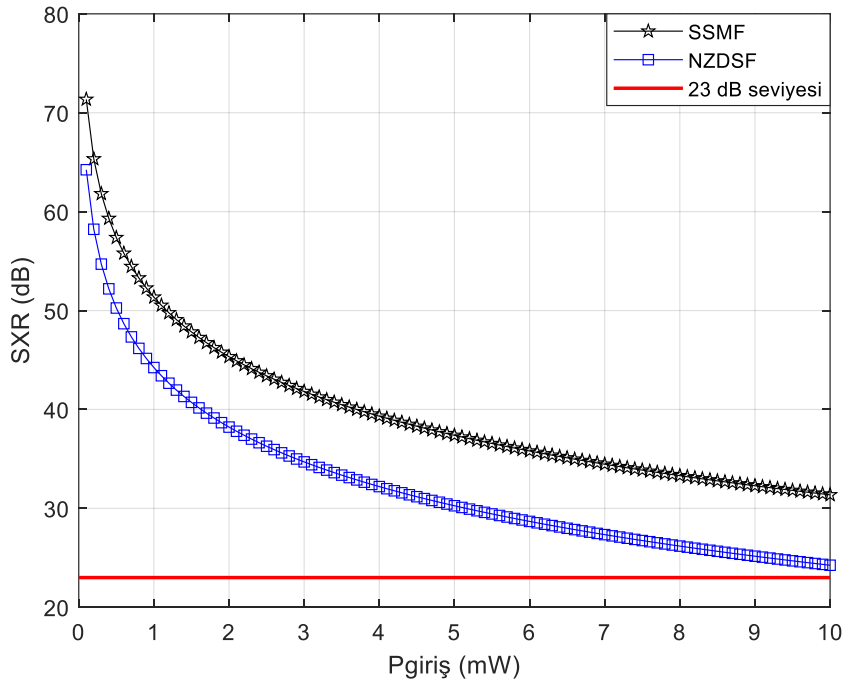
Şekil 6. $\Delta f = 100$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



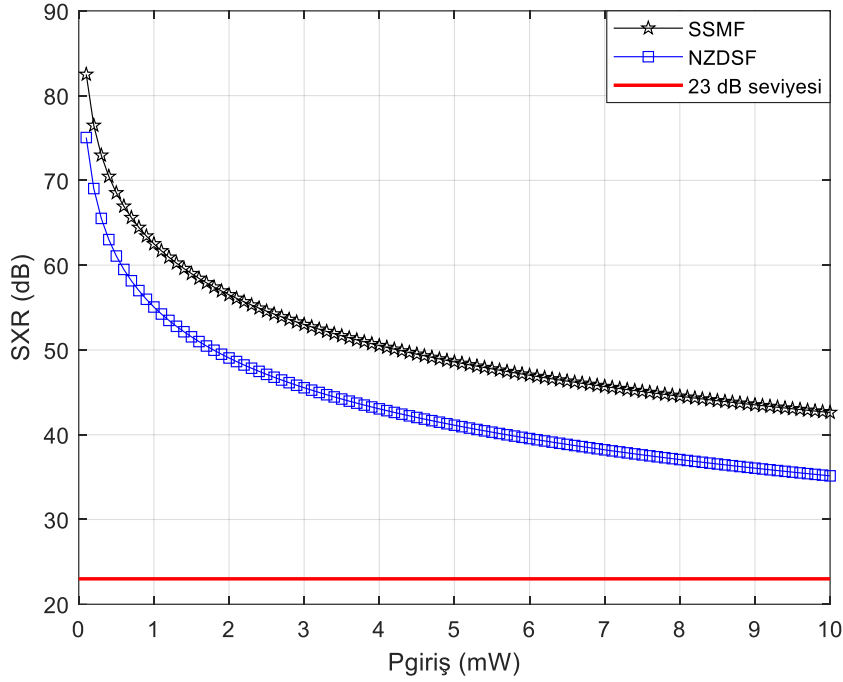
Şekil 7. $\Delta f = 12.5$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



Şekil 8. $\Delta f = 25$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



Şekil 9. $\Delta f = 50$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



Şekil 10. $\Delta f= 100$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.

Şekil 3-10'da verilen benzetim sonuçları toplu olarak değerlendirildiğine, hem NZDSF hem de SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinde YYİMK ve AYİMK'da FWM+SRS etkisi altında SXR değerleri artan kanal giriş gücü ($P_{giriş}$) değerleri ile üstel olarak azalmaktadır. Kanal giriş güçlerinin eşit olduğu DWDM-PON sistemlerinde, Denklem (2)'den de görüleceği gibi, FWM ürün güçleri, $P_{giriş}^3$ ile orantılı bir şekilde artacağı için, Denklem (8) ile verilen SXR, FWM ürün güçlerindeki bu artış nedeniyle eksponansiyel olarak azalmaktadır.

Şekil 3-10'da verilen benzetim sonuçları toplu olarak değerlendirildiğine, hem NZDSF hem de SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinde YYİMK ve AYİMK'da FWM+SRS etkisi altında SXR, artan kanallar arası boşluk (Δf) değerleri ile artmaktadır. Bu durumun nedeni Denklem (4) ile verilen faz uyumsuzluk faktörü $\Delta\beta_{ijk}$ 'nin, Δf 'teki artışla üstel olarak artmasıdır. $\Delta\beta_{ijk}$ 'daki artış, Denklem (2) ile verilen FWM ürün gücünün azalmasına ve dolayısıyla Denklem (8) ile verilen SXR değerinin artmasına neden olur.

Şekil 3-6 ile verilen benzetim sonuçları incelendiğinde, tüm Δf değerlerinde, 0.1 mW-10 mW aralığında tüm kanal giriş gücü değerleri için, NZDSF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin YYİMK'sındaki SXR değerleri, SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin YYİMK'sındaki SXR değerlerinden daha büyüktür. Bu durumun nedeni, Tablo 1'den görüleceği gibi, YYİMK çalışma dalgaboyu olan 1310 nm'de kromatik dispersiyon katsayısının (D_c) mutlak değerinin, NZDSF'de SSMF'den daha büyük olmasıdır. Bu durum, Denklem (4) ile verilen $\Delta\beta_{ijk}$ 'nin NZDF'li sistemde SSMF'li sisteme göre mutlak değerce daha yüksek olmasına sebebiyet verir. $\Delta\beta_{ijk}$ 'nin mutlak değerce yüksek olması, Denklem (2) ile verilen FWM ürün gücünün azalmasına ve dolayısıyla Denklem (8)

ile verilen SXR değerinin artmasına neden olur. Şekil 3-6'da, 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz Δf değerli NZDF'li DWDM-PON sistemleri ile SSMF'li DWDM-PON sistemlerinin YYİMK'larındaki aynı kanal giriş gücü değeri için SXR değerleri arasındaki fark, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü değer aralığında ufak değişimler göstermekle birlikte yaklaşık olarak, sırasıyla, 10.13 dB, 17 dB, 26.33 dB ve 34.4 dB'dir. SXR değerleri arasındaki farkın artan Δf değerleri ile birlikte artmasının nedeni, $\Delta\beta_{ijk}$ 'nın Δf değerlerindeki artış ile birlikte üstel olarak artması ve müteakip olarak FWM ürün güçlerinin azalmasıdır.

Şekil 7-10 ile verilen benzetim sonuçları incelendiğinde, tüm Δf değerlerinde, 0.1 mW-10 mW aralığında tüm kanal giriş gücü değerleri için, SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin AYİMK'sındaki SXR değerleri, NZDSF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin AYİMK'sındaki SXR değerlerinden daha büyüktür. Bu durumun nedeni, Tablo 1'den görüleceği gibi, AYİMK çalışma dalgaboyu olan 1550 nm'de D_c 'nin SSMF'de NZDSF'den daha büyük olmasıdır. Bu durum, Denklem (4) ile verilen $\Delta\beta_{ijk}$ 'nin SSMF'li sistemde NZDSF'li sisteme göre daha yüksek olmasına sebebiyet verir. $\Delta\beta_{ijk}$ 'nin yüksek olması, Denklem (2) ile verilen FWM ürün gücünün azalmasına ve dolayısıyla Denklem (8) ile verilen SXR değerinin artmasına neden olur. Şekil 7-10'da, 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz Δf değerli SSMF'li DWDM-PON sistemleri ile NZDSF'li DWDM-PON sistemlerinin AYİMK'larındaki aynı kanal giriş gücü değeri için SXR değerleri arasındaki fark, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü değer aralığında ufak değişimler göstermekle birlikte yaklaşık olarak, sırasıyla, 7.78 dB, 8.06 dB, 7.12 dB ve 7.46 dB'dir. SXR değerleri arasındaki bu farklar, YYİMK'da elde edilen SXR farkları ile kıyaslandığında belirgin bir şekilde daha düşüktür. Bu durumun birincil nedeni, Tablo 1'den de görüleceği üzere, 1310 nm dalgaboyunda D_c parametresinin NZDSF'de SSMF'ye göre mutlak değerce yaklaşık 23 kat daha büyükken; 1550 nm dalgaboyunda D_c parametresinin SSMF'de NZDSF'ye göre yaklaşık 2.03 kat daha büyük olmasıdır. Bu durumun ikincil nedeninin 1550 nm dalgaboyu bölgesinde 1310 nm dalgaboyu bölgesine göre, Denklem (7)'deki dalgaboyu oranlarından görüleceği üzere, SRS etkisindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, AYİMK'da artan Δf değerleri ile birlikte SXR değerleri arasındaki farklarda meydana gelen değişimin, YYİMK'dakine benzer bir yapı göstermemesi de, iletilen işaretler üzerindeki SRS etkisinin, 1550 nm dalgaboyu bölgesinde, 1310 nm dalgaboyu bölgesinden daha kuvvetli olduğunu belirtmektedir.

Şekil 3-6'da, güvenilir haberleşme için seçilen sınır referans değeri olan 23 dB'in üzerindeki SXR değerleri, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü aralığının tamamında, sadece $\Delta f = 100$ GHz iken NZDSF'li DWDM-PON YYİMK'sında elde edilebilmiştir. Diğer tüm DWDM-PON mimarilerinin YYİMK'larında, belirli bir kanal giriş gücü değeri aşıldığında, SXR, 23 dB değerinin altına düşmüştür.

Şekil 7-10'da, güvenilir haberleşme için seçilen sınır referans değeri olan 23 dB'in üzerindeki SXR değerleri, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü aralığının tamamında, Δf 'in 50 GHz ve 100 GHz olduğu SSMF'li ve NZDSF'li DWDM-PON AYİMK'lerinde elde edilebilmiştir. Diğer tüm DWDM-PON mimarilerinin AYİMK'lerinde, belirli bir kanal giriş gücü değeri aşıldığında, SXR, 23 dB değerinin altına düşmüştür.

SSMF'li ve NZDSF'li DWDM-PON sistemlerinde, FWM+SRS etkisi altındaki YYİMK ve AYİMK'da, SXR>23 dB şartının sağlandığı maksimum kanal giriş güçleri, Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'deki verilerden de görülebileceği gibi, hem SSMF'li hem de NZDSF'li DWDM-PON'larda çift yönlü iletimin 23 dB sınır referans değerinin üzerinde bir SXR değerinde gerçekleşebilmesi için uygulanabilecek maksimum kanal giriş gücünü YYİMK belirlemektedir. Bu duruma göre, FWM+SRS etkisi altında, Δf değişim aralığının 12.5 GHz-100 GHz olduğu, 25 km kanal uzunluğuna sahip 2x31 kanallı DWDM-PON mimarilerinin hepsinde, 23 dB değerinden yüksek bir SXR ile çift yönlü güvenilir iletişim sağlayabilmek için, maksimum kanal giriş güçlerinin SSMF'li sistemlerde 0.13 mW'ı, NZDSF'li sistemlerde 0.39 mW'ı aşmaması gerekmektedir.

Tablo 2. SSMF ve NZDSF kullanılan DWDM-PON sistemlerinde, FWM+SRS etkisi altında YYİMK ve AYİMK'da SXR>23 dB şartının sağlandığı maksimum kanal giriş güçleri.

	Fiber Tipi	Δf (GHz)			
		12.5	25	50	100
YYİMK' da SXR≥23 dB için maksimum $P_{giriş}$ (mW)	SSMF	0.13	0.17	0.21	0.30
	NZDSF	0.39	1.14	4.31	>10
AYİMK' da SXR≥23 dB için maksimum $P_{giriş}$ (mW)	SSMF	1.58	8.04	>10	>10
	NZDSF	0.65	3.18	>10	>10

Tablo 3. $P_{\text{giriş}} = 0.1$ mW iken farklı fiber tiplerine ve uzunluklarına sahip DWDM-PON sistemlerinde FWM+SRS etkisi altındaki YYİMİK ve AYİMİK'daki SXR değerleri.

	Fiber ve Kanal Tipi	Fiber Uzunluğu (km)	Δf (GHz)			
			12.5	25	50	100
$P_{\text{giriş}}=0.1$ mW için SXR değerleri (dB)	SSMF'li YYİMİK	20	25.22	27.35	29.34	32.55
		25	24.74	27.14	29.35	32.56
		60	24.20	27.09	29.59	32.86
		80	24.19	27.10	29.57	32.87
	NZDSF'li YYİMİK	20	34.77	43.97	55.32	67.42
		25	34.87	44.15	55.68	67.35
		60	35.01	44.28	55.68	67.58
		80	35.02	44.29	55.68	67.59
	SSMF'li AYİMİK	20	46.36	58.15	70.46	84.66
		25	46.99	61.11	71.35	82.51
		60	47.47	59.44	71.35	83.70
		80	47.52	59.39	71.60	83.57
	NZDSF'li AYİMİK	20	39.01	50.21	62.16	75.65
		25	39.21	53.05	64.24	75.06
		60	39.73	50.83	62.81	74.88
		80	39.75	50.88	62.87	74.93

Bölüm 3'te, literatürdeki çalışmalarda DWDM-PON iletim uzunlukları olarak 20 km, 25 km, 60 km ve 80 km değerlerinin dikkate alındığı belirtilmiştir. Bölüm 4'te şu ana kadar 25 km iletim uzunluklu DWDM-PON sistemleri için elde edilen benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmada incelenen 2x31 kanallı DWDM-PON sistem modelinin, literatürde göz önüne alınan diğer iletim uzunluklarına sahip olması durumunda, FWM+SRS etkisi altındaki sistem performansını incelemek için de benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerden elde edilen SXR değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3'te sonuçları verilen benzetimlerde, hem NZDSF'li hem de SSMF'li DWDM-PON sistemlerinde 23 dB sınırının altına düşmeyen güvenilir bir çift yönlü iletişim için kanal giriş güçleri 0.1 mW olarak seçilmiştir.

Tablo 3'te görüldüğü gibi, tüm kanal uzunlukları için, NZDSF'li ve SSMF'li DWDM-PON'ların hem YYİMİK hem de AYİMİK'lerinde sistemdeki kanal uzunlukları sabit tutulup Δf 12.5 GHz-100 GHz değişim aralığında arttırıldıkça, SXR değeri artmaktadır. SXR değerindeki maksimum

artış, fiber uzunluğuna bağlı olarak, SSMF'li YYİMK'da 7.33 dB-8.68 dB; NZDSF'li YYİMK'da 32.48 dB-32.57 dB; SSMF'li AYİMK'da 35.52 dB-38.30 dB; NZDSF'li AYİMK'da 35.15 dB-36.64 dB aralığındadır. SSMF'li YYİMK'daki SXR değerindeki maksimum artış miktarlarının, diğerlerindeki maksimum artış miktarlarına göre belirgin ölçüde daha düşük olmasının sebebi, 1310 nm dalgaboyunda SSMF'deki D_c parametresinin değerinin mutlak değerce sıfıra yakın olması sebebiyle, SXR üzerindeki FWM etkisinin maksimuma yakın değerlerde seyretmesinden kaynaklanmaktadır. Tablo 3'te görüldüğü üzere, NZDSF'li ve SSMF'li DWDM-PON'ların hem YYİMK hem de AYİMK'larında, sistemdeki Δf değeri sabit tutulup kanal uzunlukları arttırıldıkça, SXR değeri değişmektedir. Bu değişim, değişen kanal uzunluklarına bağlı olarak, SXR üzerindeki SRS'nin pozitif etkisi FWM'in negatif etkisini kompanze edecek durumda iken artış; SRS'nin pozitif etkisi FWM'in negatif etkisini kompanze edemeyecek durumda ise ya da SRS de işaret iletimini negatif yönde etkiliyorsa azalış şeklinde kendisini göstermektedir. Δf değerinin sabit tutulup kanal uzunluklarının 20 km-80 km aralığında değiştirildiği durumda, SXR'deki maksimum değişim, Δf değerine bağlı olarak, SSMF'li YYİMK'da 0.25 dB-1.03 dB; NZDSF'li YYİMK'da 0.24 dB-0.36 dB; SSMF'li AYİMK'da 1.14 dB-2.96 dB; NZDSF'li AYİMK'da 0.74 dB-2.84 dB aralığındadır. Dolayısıyla, 0.1 mW kanal giriş gücü değerleri için, FWM+SRS etkisi altındaki 2x31 kanallı DWDM-PON sistemlerindeki çift yönlü iletimde, kanal uzunluğunun 20 km-80 km aralığındaki değişiminin SXR oranı üzerindeki maksimum etkisinin 3 dB'in altında olduğu görülmektedir. Tablo 3'te verilen benzetim sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde; 2x31 kanallı DWDM-PON mimarilerindeki FWM ve SRS'nin sistem performansına birleşik etkisi üzerinde, Δf değerlerindeki değişimin kanal uzunluğundaki değişime kıyasla daha baskın bir role sahip olduğu söylenebilir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, daha önce yazar tarafından önerilen tek optik fiber üzerinden çift yönlü DWDM iletişime imkân sağlayan PON mimarisini kullanan, 2x31 kanallı DWDM-PON sistem modeli üzerinde, SSMF ve NZDSF fiberlerin kullanıldığı durumda, FWM ve SRS'nin sistem performansına birleşik etkisi benzetimler yardımıyla incelenmiştir.

SSMF'li ve NZDSF'li DWDM-PON sistemlerindeki en kötü hal analiz sonuçlarını elde etmek için hem yukarı yönlü hem de aşağı yönlü iletimdeki merkez kanallara odaklanılan çalışmada, öncelikle 25 km uzunluklu DWDM-PON sistemlerinde kanal giriş güçlerinin 0.1 mW-10 mW aralığında değiştirildiği durumlarda, FWM+SRS etkisi altında SXR değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm kanallar arası boşluk değerleri için, 23 dB'in üzerinde bir SXR değeriyle güvenilir çift yönlü iletişimin sağlandığı maksimum kanal giriş gücü değerlerinin, hem SSMF hem de NZDSF kullanan sistemlerde yukarı yönlü iletim merkez kanalı tarafından belirlendiğini

göstermektedir. İlgili değerler, benzetim sonuçlarına göre, SSMF'li sistemlerde 0.13 mW, NZDSF'li sistemlerde 0.39 mW olarak tespit edilmiştir.

Kanal uzunlukları literatürde göz önüne alınan diğer değerlere göre değiştirilerek gerçekleştirilen benzetimlerden elde edilen sonuçlar, FWM+SRS etkisi altındaki 2x31 kanallı DWDM-PON sistemlerinde, kanal uzunluğunun SXR oranı üzerindeki maksimum etkisinin 3 dB'in altında olduğunu göstermiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, tek optik fiber üzerinden çift yönlü DWDM çoğullamalı iletimin gerçekleştirildiği PON sistemlerinde, 1310 nm dalgaboyu bölgesinde çalışan yukarı yönlü iletim kanalları üzerindeki doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki birleşik etkisinin, 1550 nm dalgaboyu bölgesinde çalışan aşağı yönlü iletim kanalları üzerindeki doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki birleşik etkisine göre, güvenilir çift yönlü iletimin sağlanabilirliği açısından belirleyici role sahip olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Bu bağlamda, yukarıda açıklanan kritik öneme sahip yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR benzetim sonuçlarına göre, FWM+SRS etkisi altında, DWDM-PON sistemlerinde tek optik fiber üzerinden çift yönlü güvenilir iletişimin sağlanması için NZDSF kullanımı önemli bir seçenek olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Yazarların Katkısı

Sait Eser KARLIK, makalenin tek yazarı olarak, çalışmanın tüm aşamalarını kendisi gerçekleştirmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, makalenin değerlendirme sürecini etkileyebilecek herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkarı bulunmadığını onaylamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

Acharya, K., and Raja, M. Y. A., (2007, November). SRS crosstalk mitigation in WDM-PON using quadrature amplitude modulation. *International Symposium on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET2007)*. Dubai, United Arab Emirates.
<https://doi.org/10.1109/HONET.2007.4600253>

- Agrawal, G.P., (2019). *Nonlinear fiber optics* (6th ed.). Academic Press.
- Agrawal, G.P., (2021). *Fiber-optic communication systems* (5th ed.). Wiley.
- Ahmed, M. T., Sahu, P. K., (2018, October). Performance improvement in BUCSA spaced UDWDM-PON system by differential input power scheme (DIPS). *International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing and Communication (AESPC2018)*. Bhubaneswar, India. <https://doi.org/10.1109/AESPC44649.2018.9033306>
- Aleksejeva, M., Lyashuk, I., Kudojars, R., Prigunovs, D., Ortiz, D., Braunfelds, J., Salgals, T., Spolitis, S., Bobrovs, V., (2021, November). Research on Super-PON communication system with FWM-based comb source. *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS2021)* (pp. 2940-2946). Hangzhou, China. <https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9694669>
- Bi, M., Xiao, S., Li, J., and He, H., (2014). A bandwidth-efficient channel allocation scheme for mitigating FWM in ultra-dense WDM-PON. *Optik*, 125, 1957–1961. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.11.004>
- Bogoni, A., and Poti, L., (2004). Effective channel allocation to reduce inband FWM crosstalk in DWDM transmission systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 10 (2), 387-392. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2004.825952>
- Brackett, C.A., (1990). Dense wavelength division multiplexing networks: principles and application. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 8 (6), 948-964.
- Corning® SMF-28e® Optical Fiber, (2007). *Product information*. Corning Inc. www.corning.com/opticalfiber
- Draka TeraLight™ Optical Fiber, (2010). Draka Communications. www.draka.com/communications
- Effenberger, F. J., and Zhang, D., (2022). WDM-PON for 5G wireless fronthaul. *IEEE Wireless Communications*, 29 (2), 94-99. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2100420>
- Elsayed, E. E., Yousif, B. B., and Alzalabani, M. M., (2018). Performance enhancement of the power penalty in DWDM FSO communication using DPPM and OOK modulation. *Optical and Quantum Electronics*, 50, 282. <https://doi.org/10.1007/s11082-018-1508-y>
- Elsayed, E. E., Yousif, B. B., and Singh, M., (2022). Performance enhancement of hybrid fiber wavelength division multiplexing passive optical network FSO systems using M-ary DPPM techniques under interchannel crosstalk and atmospheric turbulence. *Optical and Quantum Electronics*, 54, 116. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03485-8>
- Elsayed, E. E., Alharbi, A. G., Singh, M., and Grover, A., (2022). Investigations on wavelength-division multiplexed fiber/FSO PON system employing DPPM scheme. *Optical and Quantum Electronics*, 54, 358. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03717-5>
- Fazea, Y., (2019). Mode division multiplexing and dense WDM-PON for fiber-to-the-home. *Optik*, 183, 994-998. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.072>
- Garg, A.K., Janyani, V., Singh, G., Ismail, T., and Selmy, H., (2019). Dedicated and broadcasting downstream transmission with energy-efficient and latency-aware ONU interconnection in WDM-PON for smart cities. *Optical Fiber Technology*, 52, 101949. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.101949>
- Gebrewold, S. A., Bonjour, R., Brenot, R., Hillerkuss, D., and Leuthold, J., (2017). Bit- and power-loading – A comparative study on maximizing the capacity of RSOA based colorless DMT transmitters. *Applied Sciences-Basel*, 7 (10), 999. <https://doi.org/10.3390/app7100999>
- Guo, Y., Gan, C., and Zhan, N., (2021). Cost-effective WDM-PON for flexible ONU-communication featuring high wavelength utilization and low latency. *Optical Fiber Technology*, 67, 102709. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102709>
- Hann, S., Kim, D. H., and Park, C. S., (2004). Uni-lambda bidirectional 10/1.25GbE access service based on WDM-PON. *Electronics Letters*, 40 (3), 194-195. <https://doi.org/10.1049/el:20040121>
- Harboe, P. B., da Silva, E., and Souza, J. R., (2008). Analysis of FWM penalties in DWDM systems based on G.652, G.653, and G.655 optical fibers. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2 (12), 2674-2680. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1333622>
- Iannone, E., Franco, P., and Santoni, S., (2008). WDM-PON architecture for FTTx networks. *Fiber and Integrated Optics*, 27 (4), 176-182. <https://doi.org/10.1080/01468030802189498>
- ITU-T, (2009). *G.655 (11/2009): Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. ITU. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-I/en>
- ITU-T, (2016). *G.652 (11/2016): Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ITU. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en>
- ITU-T, (2021). *G.9802.1 (08/2021): Wavelength division multiplexed passive optical networks (WDM PON): General requirements*. ITU. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9802.1/en>

- Karlık, S. E., (2016). Analysis of the four-wave mixing impact on the most heavily affected channels of dense and ultra-dense wavelength division multiplexing systems using non-zero dispersion shifted fibers. *Optik*, 127 (19), 7469–7486. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.077>
- Karlık, S. E., (2023). Modelling and numerical analysis of combined dual impact of SRS and FWM on the performance of upstream and downstream channels of a novel UDWDM/DWDM-PON. *Optical Fiber Technology*, 81, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103586>
- Kaur, G., Singh, M. L., and Patterh, S. M., (2010). Impact of fiber nonlinearities in optical DWDM transmission systems at different data rates. *Optik*, 121 (23), 2166-2171. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2009.11.001>
- Kaur, K. P., Randhawa, R., and Kaler, R. S., (2014). Performance analysis of WDM-PON architecture using different receiver filters. *Optik*, 125, 4742-4744. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.04.070>
- Maier, G., Martinelli, M., Pattavina, A., and Salvadori, E., (2000). Design and cost performance of the multistage WDM-PON access networks, *Journal of Lightwave Technology*, 18 (2), 125-143. <https://doi.org/10.1109/50.822785>
- Manzoor, H. U., Hussain, A., Yu, C. X., and Manzoor, T., (2015). Complete suppression of FWM in ultra dense WDM-PON optical networks using centralized light source. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, 24 (4), 1550053-1 – 1550053-9. <https://doi.org/10.1142/S0218863515500538>
- Manzoor, H. U., Zafar, M., Manzoor, S. U., Khan, T., Liu, S. Z., Manzoor, T., Saleem, S., Kim, W. Y., and Ali, M., (2020). Improving FWM efficiency in bi-directional ultra DWDM-PON networking centered light source by using PMD emulator. *Results in Physics*, 16, 102922. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102922>
- Monnard, R., Zirngibl, M., Doerr, C. R., Joyner, C. H., and Stulz, L. W., (1997). Demonstration of a 12x155 Mb/s WDM PON under outside plant temperature conditions. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9 (12), 1655-1657. <https://doi.org/10.1109/68.643302>
- Nakajima, K., Ohashi, M., Miyajima, Y., and Shiraki, K., (1997). Assessment of dispersion varying fibre in WDM system. *Electronics Letters*, 33 (12), 1059-1060. <https://doi.org/10.1049/el:19970699>
- Neto, B., Shahpari, A., Vujicic, Z., Barros, A., Pinho, J., Pavlovic, N., and Teixeira, A. L. J., (2017, September). Impairment assessment due to Raman crosstalk in coexistence of coherent UDWDM-PON with GPON Technologies. *European Conference on Optical Communication (ECOC2017)*. Gothenburg, Sweden. <https://doi.org/10.1109/ECOC.2017.8346022>
- Park, J., Baik, J., and Lee, C., (2007). Fault detection technique in a WDM-PON. *Optics Express*, 15 (4), 1461-1466. <https://doi.org/10.1364/OE.15.001461>
- Reis, J. D., Neves, D. M., and Teixeira, A. L., (2012). Analysis of nonlinearities on coherent ultradense WDM-PONs using Volterra series. *Journal of Lightwave Technology*, 30 (2), 234-241. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2180698>
- Sabapathi, T., and Sundaravadivelu, S., (2011). Analysis of bottlenecks in DWDM fiber optic communication system. *Optik*, 122 (16), 1453–1457. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.08.023>
- Sabapathi, T., and Poovitha, R., (2019). Mitigation of nonlinearities in fiber optic DWDM system. *Optik*, 185, 657-664. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.073>
- Schneider, T., (2004). *Nonlinear optics in telecommunications*. Springer.
- Shahpari, A., Ferreira, R., Riberio, V., Sousa, A., Ziaie, S., Tavares, A., Vujicic, Z., Guiomar, F. P., Reis, J. D., Pinto, A. N., and Teixeira, A., (2015). Coherent ultra dense wavelength division multiplexing passive optical networks. *Optical Fiber Technology*, 26, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.07.001>
- Singh, M. L., and Hudiara, I. S., (2004). A piece wise linear solution for nonlinear SRS effect in DWDM fiber optic communication systems. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 3 (4), 29-37. <http://www.jmoe.org/index.php/jmoe/article/view/121>
- Song, Y., Yu, P., Xu, Y., and Li, Z., (2021). Simulation and experimental investigation of nonlinear effects in 5G fronthaul transmission system based on WDM-PON architecture. *Optical Fiber Technology*, 65, 102628. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102628>
- Vardanyan, V. A., (2017). Effect of four-wave mixing interference on spectrally separated channels in passive optical networks. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53 (1), 51-58. <https://doi.org/10.3103/S8756699017010083>
- Wagner, S. S., Lemberg, H. L., Kobrinski, H., Smoot, L. S., and Robe, T. J., (1988 November). A passive photonic loop architecture employing wavelength-division multiplexing. *IEEE Global Telecommunications Conference and Exhibition (GLOCOM1988)* (pp.1569-1573). Hollywood, FL, USA. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1988.26086>

- Xin, L., Xu, X., Du, L., Sun, C., Gao, F., and Zhao, J., (2023). Suppression of nonlinear optical effects in DWDM-PON by frequency modulation non-coherent detection. *Photonics*, 10 (3), 323. <https://doi.org/10.3390/photonics10030323>
- Yücel, M., and Açıkgöz, M., (2023). Optical communication infrastructure in new generation mobile networks. *Fiber and Integrated Optics*, 42 (2), 53-92. <https://doi.org/10.1080/01468030.2023.2186811>
- Zhou, Y., Gan, C., Chen, B., and Ma, X., (2010). An upgradeable WDM-PON for broadcast and LAN services. *Optical and Quantum Electronics*, 42, 157-163. <https://doi.org/10.1007/s11082-011-9441-3>