

## Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama Sistemlerinde Dört Dalga Karışımı Olayının İletim Performansına Etkisinin Analizi

Nazlı Ergüney<sup>1</sup>, Bahadır Hiçdurmaz<sup>1</sup>, Sait Eser Karlık<sup>2,\*</sup> ve  
Güneş Yılmaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı,  
16059 Görükle, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
16059 Görükle, Bursa, Türkiye

\*Corresponding author: ekarlik@uludag.edu.tr

**Özet.** Doğrusal olmayan olaylar, optik fiber içerisinde iletilen işaretlerde bozulmalara ve zayıflamalara sebebiyet verir. Bu olaylardan dört dalga karışımı (FWM), dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemlerinde doğrusal olmayan çapraz karışımın en önemli nedenlerinden biridir. WDM sistemlerinde iletim mesafesini arttırmak için kullanılan kuvvetlendiriciler, FWM etkisini de arttırmakta ve buna bağlı olarak uzak mesafe haberleşme sistemlerinin performansı olumsuz yönde etkilenmektedir.

Bu çalışmada, WDM haberleşme sistemlerinde FWM'i etkileyen parametreler ve FWM'in iletim performansı üzerindeki etkileri, G.652 standartlarına uygun basamak indisli tek modlu optik fiber için incelenmiştir. Yapılan benzetimlerle, kanallar arası boşluğun farklı değerlerindeki FWM gürültü gücü seviyesi, kanal gücü değişiminin birinci ve ikinci dereceden FWM çapraz karışımına etkisi, FWM gücünün farklı iletim mesafeleri ve kromatik dispersiyon değerlerine göre değişimi, FWM etkinliği-iletim mesafesi ilişkisi ve FWM gürültüsünün işaret gürültü oranına (SNR) etkisi irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler.** FWM, WDM, optik fiber, SNR.

**Abstract.** Nonlinear phenomena cause distortions and attenuations on signals transmitted in an optical fiber. Four-wave mixing (FWM) of these phenomena is one of the most important reasons for nonlinear crosstalk in wavelength division multiplexing (WDM) systems. Amplifiers used for extending the transmission distance of WDM systems increase the FWM effect and therefore the performance of long-haul communication systems is negatively affected.

In this study, parameters affecting FWM in WDM communication systems and effects of FWM on transmission performance are analyzed for G.652 step-index single mode optical fiber. In simulations performed, the level of FWM noise power for different values of channel spacing, the effect of channel power variation on first and second order FWM crosstalk, the variation of FWM power with respect to different values of transmission distance and chromatic dispersion, the relation of FWM efficiency and transmission distance and the effect of FWM noise on signal to noise ratio (SNR) are investigated.

**Keywords.** FWM, WDM, optical fiber, SNR.

## 1. Giriş

Dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM), optik işaretlerin iletiminde yaygın olarak kullanılan bir çoğullama tekniğidir. Bu teknik, iletim kapasitesi ve veri hızının artırılmasının yanı sıra esnek optik ağ tasarımına da imkan sağlar. Gönderilen işaretler, dalga boyu seçici kuplör kullanılarak fiber üzerinde çoğullanıp tekrar ayrıştırılabilirler. Optik kuvvetlendiriciler kullanılarak hat uzunluğu yüzlerce kilometreye uzatılabilir, daha şeffaf ve uygulanabilir optik ağ konsepti oluşturulabilir. WDM sisteminin toplam iletim uzunluğu, kanal sayısı, kanal boşluğu, her kanalda iletilen güç, kuvvetlendirici aralıkları gibi çeşitli sistem parametrelerine bağlı olup fiber doğrusalsızlıklarından etkilenir [1]. WDM haberleşme sistemlerinde iletim kapasitesi işaret gürültü oranının (SNR) artması ile artar. Bunun için de, optik fiberin girişine yüksek güçlü bir işaretin verilmesi gerekir. Ancak büyük SNR için yüksek güç kullanılması, fiber doğrusalsızlıklarından kaynaklanan işaret bozulmalarının artmasına sebep olur [2].

Optik fiberde veri hızı, kanal sayısı, optik güç seviyeleri arttıkça doğrusal olmayan olayların etkisi artar. Bu olayların birkaçı öz faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM), uyarılmış Raman saçılması (SRS), uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) ve dört dalga karışımıdır (FWM). SPM ve XPM haricinde sözü edilen diğer etkiler, bazı WDM kanallarına diğer kanallardan tükenen güç miktarlarıyla orantılı kazanç sağlar. SPM ve XPM ise iletilen işaretlerin fazını etkileyerek spektral genişlemeye neden olabilmektedir. Kısaca, doğrusal olmayan olaylar, optik fiberde iletilen işaretlerde bozulmalara ve zayıflamalara sebep olur [3, 4].

FWM, temel olarak farklı frekanslardaki üç dalganın karışımı sonucunda değişik frekanslı bir dalganın oluşması şeklinde tanımlanabilir. FWM nedeniyle,  $m$  kanallı bir WDM sisteminde iletilen işaretler, çok sayıda farklı frekanslı yeni işaretler oluştururlar. Ayrıca, üretilen bu yeni işaretler (FWM ürünleri), kanaldaki işaretlerle veya birbirleri ile karışarak yüksek mertebeli FWM ürünleri oluşturup çapraz karışıma sebebiyet verirler. Kanallar arası boşlukların dar ve kanal giriş güçlerinin yüksek olduğu sistemlerde, FWM ürünleri sistem performansını ciddi biçimde düşürürler. FWM çapraz karışımını bastırmak için, kanallar arası boşluklar farklı değerlerde seçilerek FWM ürünlerinin oluşumu ve kanallara etkisi önlenmeye çalışılır [5].

Bu çalışmada, FWM'in teorik temelleri açıklanmış ve yapılan benzetimlerle FWM'i etkileyen parametreler ve FWM gürültüsünün SNR'a etkisi analiz edilmiştir. Özellikle kanallar arası boşluk, iletim mesafesi, kromatik dispersiyon ve kanal giriş gücü

parametrelerindeki değişimlerin FWM'e etkileri üzerinde durulmuştur. Ayrıca WDM sistemlerinde kullanılan G.652 fiber (tek modlu optik fiber, SMF) için FWM-SNR ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, WDM sistemlerinde, FWM kaynaklı çapraz karışım etkisinin azaltılmasını sağlayacak optimum giriş parametrelerinin seçimi ile ilgili çalışmalarda kullanılabilir.

## 2. FWM'in Teorik Temelleri

Üç elektromanyetik alanın etkileşerek dördüncü bir alan meydana getirmesi, dördüncü dalga karışımı (FWM) olayının tanımlanmasına temel teşkil eder. Yoğun elektromanyetik alanlar için herhangi bir dielektriğin, optik fiberler de dahil olmak üzere, ışığa karşı tepkisi doğrusal değildir. Temelde doğrusal olmayan tepkinin oluşumu, bir alanın etkisi altındaki bağlı elektronların hareketiyle ilişkilidir. Sonuç olarak, elektrik dipoller tarafından indüklenmiş toplam polarizasyon  $\vec{P}$ ,  $\vec{E}$  elektrik alanında doğrusal değildir ve (1)'i sağlar.

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

Burada  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti ve  $\chi^{(j)}$ , ( $j = 1, 2, \dots$ ) ifadesi  $j$ 'inci mertebeden suseptibilitedir. Optik fiberlerdeki en düşük mertebeli doğrusal olmayan etkiler, FWM de dahil olmak üzere,  $\chi^{(3)}$ 'ten kaynaklanır [4].

FWM, frekansları  $f_i$ ,  $f_j$  ve  $f_k$  olan üç işaretin birbirini etkilemesi sonucu frekansı  $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$  olan dördüncü bir işaret meydana gelmesidir. Optik fiberli WDM sistemleri için  $i$ ,  $j$ ,  $k$  harfleri, çok kanallı sistem yapısındaki üç farklı kanalı ifade etmektedir. WDM kanallarından gönderilen işaretlerle yeni üretilen işaretlerin farklı kombinasyonları sonucu çok sayıda yeni işaret oluşabilmektedir. Bu duruma WDM sistemlerindeki FWM etkisi denir [4].

Kanallar arasındaki boşlukların eşit olması durumunda, oluşan yeni frekanslar mevcut kanal frekansları ile çakışarak bu kanallardaki işaretlerle FWM ürünlerinin faz uyumlu girişimine sebebiyet verirler. Bu girişim, alıcıda elde edilen işaretle önemli değişimler oluşturabilir. Kanallar arası boşluk değerlerinin farklı olması durumunda ise, çoğu FWM ürünü bu boşluklara düşer ve toplam gürültüye eklenir. Sistem performansı her iki durumdan da olumsuz etkilenir. Ancak, çapraz karışımın faz uyumlu yapısından dolayı, kanallar arasındaki boşlukların eşit olması durumunda güç azalması daha şiddetli olmaktadır [6].

Frekansı  $f_{ijk}$  olan FWM işaretinin gücü, kanallardaki giriş güçleri  $P_i$ ,  $P_j$  ve  $P_k$  olmak üzere,

$$P(f_{ijk}) = \left( \frac{1024\pi^6}{n^4\lambda^2c^2} \right) \left( \frac{d_{ijk}\chi L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (2)$$

ile hesaplanabilir [3]. Burada  $\chi$  terimi  $\chi^{(3)}$ 'ün skaler bir bileşenidir.

Doğrusalsızlık katsayısı

$$\gamma = \frac{\omega n_2}{c A_{\text{eff}}} \quad (3)$$

ve

$$\chi = \frac{cn^2}{48\pi^2} n_2 \quad (4)$$

ile tanımlandığında, (2)'de verilen FWM işaretinin gücü

$$P(f_{ijk}) = \left( \frac{d_{ijk}\gamma L_{\text{eff}}}{3} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta \quad (5)$$

şeklini alır.

FWM etkinliği, kanallar arası faz uyumsuzluğu ve  $L_{\text{eff}}$  sırasıyla

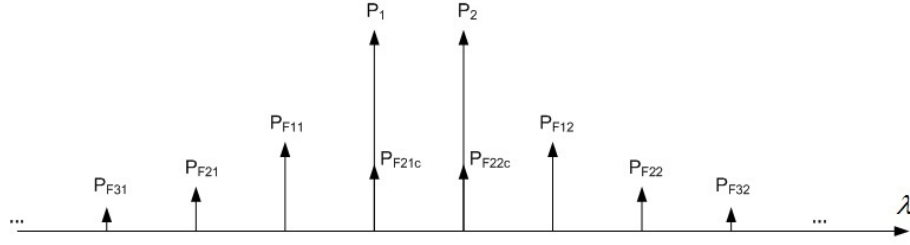
$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta B_{ijk}^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \sin^2(\Delta B_{ijk} L/2) \right] \quad (6)$$

$$\Delta B_{ijk} = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} (|f_i - f_k| |f_j - f_k|) \times \left[ D + \frac{\lambda_k^2}{2c} \frac{dD(\lambda_k)}{d\lambda} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (7)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (8)$$

ile ifade edilebilir. (2)-(8)'de  $n$  fiber kırılma indisi,  $n_2$  doğrusal olmayan kırılma indisi,  $\lambda_k$   $f_k$  frekanslı dalga boyu,  $\alpha$  fiber zayıflama katsayısı,  $L_{\text{eff}}$  etkin iletim mesafesi,  $A_{\text{eff}}$  fiberin etkin alanı,  $D$  kromatik dispersiyon katsayısı,  $c$  ışığın uzay boşluğundaki hızı,  $\eta$  FWM etkinlik katsayısıdır.  $d_{ijk}$  dejenerasyon faktörü olup,  $i = j \neq k$  için  $d_{ijk} = 3$ ,  $i \neq j \neq k$  için  $d_{ijk} = 6$ 'dır.

Yüksek mertebeli FWM, çok kanallı sistemlerde karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durumu basitleştirmek için modellemelerde iki kanal kullanılabilir. İki kanallı sistemde oluşan yüksek mertebeli FWM ürünleri Şekil 1'de gösterilmiştir.  $P_1$  ve  $P_2$ , sırasıyla birinci ve ikinci kanalın giriş güçleridir. Bu güçler,  $P_{F11}$  ve  $P_{F12}$  olarak gösterilen birinci mertebeden FWM ürünlerini üretirler. İkinci mertebeden FWM ürünleri, birinci mertebeden FWM ürünleri ( $P_{F11}$  ve  $P_{F12}$ ) ve kanal işaretleri tarafından üretilirler. Yüksek mertebeli tüm FWM ürünleri, kanal işaret güçlerine ve kendilerinden daha düşük mertebeli FWM ürünlerine bağlıdır [7].



ŞEKİL 1. İki kanallı sistemde oluşan yüksek mertebeli FWM ürünlerinin gösterimi.

Birinci mertebeden FWM güçleri

$$\begin{aligned} P_{F11} &= \eta_{11} P_1^2 P_2 \\ P_{F12} &= \eta_{12} P_1 P_2^2 \end{aligned} \quad (9)$$

ikinci mertebeden FWM güçleri

$$\begin{aligned} P_{F21} &= \eta_{21-1} \eta_{12} P_1^3 P_2^2 + \eta_{21-2} \eta_{11} P_1^3 P_2^2 \\ P_{F22} &= \eta_{22-1} \eta_{11} P_1^2 P_2^3 + \eta_{22-1} \eta_{12} P_1^2 P_2^3 \end{aligned} \quad (10)$$

ile tanımlanabilir. Burada  $\eta_{mn}$ , FWM etkinliğidir ve (6)'dan elde edilebilir.  $m$  indisi karışan ürünün mertebesini,  $n$  indisi ise FWM ürünlerinin sayısını ifade etmektedir.  $\eta_{mn-k}$  ifadesindeki  $k$  indisi de  $P_{Fmn}$  gücüne katkı yapan  $k$ . birincil FWM ürünü anlamındadır. Kanal giriş güçlerinin eşit olduğu varsayılırsa ( $P_1 = P_2 = P_0$ ), birinci ve daha yüksek mertebeli FWM'ler için güç formülü

$$P_{Fmn} = \bar{\eta}_{mn} P_0^{2m+1} \quad (11)$$

şeklinde genelleştirilebilir. Burada  $\bar{\eta}_{mn}$ , (9)-(10) formüllerinde tanımlanan efektif FWM etkinliğidir [7].

FWM çapraz karışımı, FWM gücünün çıkış işaret gücüne oranı olarak ifade edilmektedir. Genellikle merkez kanaldaki çapraz karışım, kenar kanallardaki çapraz karışımından farklıdır ve diğerlerine göre daha büyüktür. Bu sebeple, SNR analizi, çapraz karışımından en kötü etkilenen kanalların (merkez kanalların) durumları dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Kanal giriş güçleri, SPM, XPM, SBS ve SRS gibi diğer doğrusal olmayan olayların etkilerini önemsiz yapacak derecede düşük seçildiğinde, fiberin çıkışındaki işaret-gürültü oranı (SNR), (12) ile ifade edilir.

$$\text{SNR(dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{işaret}}}{P_{\text{FWM}}} \right) \quad (12)$$

$m$ . frekanstaki ( $f_m$ ) toplam FWM gücü ise

$$P_{\text{top}}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P(f_i + f_j - f_k) \quad (13)$$

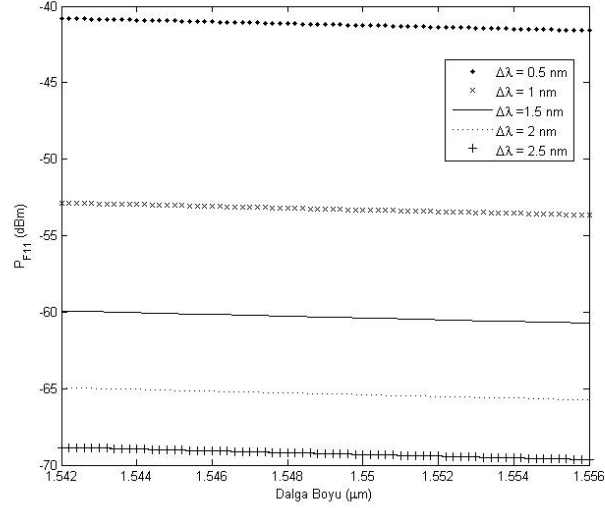
ile bulunabilir [8].

### 3. Benzetimler

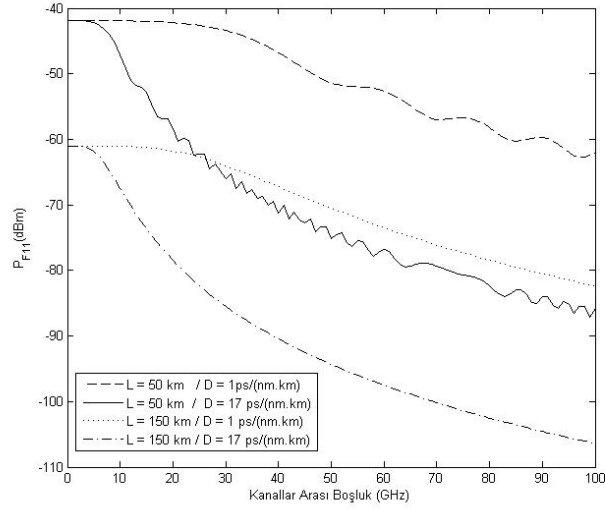
Bu bölümde, Matlab programı kullanılarak, öncelikle FWM oluşumunu etkileyen kanallar arası boşluk, iletim mesafesi, kromatik dispersiyon, kanal giriş gücü değişimi gibi etkenler ele alınmış ve bunların FWM gürültü gücü, FWM etkinliği, birinci ve ikinci mertebeden FWM çapraz karışımı ile ilişkisi benzetimler yardımıyla yorumlanmıştır. Benzetimlerde, 1550 nm çalışma dalga boyu bölgesinde zayıflama katsayısı ( $\alpha$ ) 0.205 dB/km, doğrusalsızlık katsayısı ( $\gamma$ )  $1.3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , çekirdek kırılma indisi ( $n$ ) 1.49 ve mod alan çapı  $9.1 \mu\text{m}$  olan tek modlu basamak indisli optik fiber seçilmiştir. Her bir kanaldaki giriş gücü ( $P$ ), uyarılmış Raman ve Brillouin saçılmalarının meydana geleceği eşik güç seviyesinden daha düşük olacak şekilde 1 mW alınmıştır.

Şekil 2'de gösterilen ilk benzetimde, iki kanallı bir sistemde, kanallar arası boşluğun 5 farklı değeri (0.5 nm, 1 nm, 1.5 nm, 2 nm, 2.5 nm) için, FWM'den kaynaklanan yeni frekanslı  $P_{F11}$  gücü değerlendirilmiştir. Bu benzetimde, iletim mesafesi ( $L$ ) 150 km, kromatik dispersiyon katsayısı ( $D$ ) 17 ps/(nm.km), kromatik dispersiyon eğimi  $dD/d\lambda$  0.09 ps/(nm<sup>2</sup>.km) olarak alınmıştır. Şekil 2'den görüldüğü gibi, kanallar arası boşluk değeri arttıkça  $P_{F11}$  gücü azalmaktadır. Kanallar arası mesafenin artması, faz uyumsuzluğunu arttırıp kanallarda iletilen işaretlerin birbirleri ile olan etkileşimini azalttığından FWM gücünü de düşürmektedir.

Şekil 3'te, farklı iletim mesafeleri ve kromatik dispersiyon değerleri ( $L=50$  km ve  $D=1$  ps/(nm.km),  $L=50$  km ve  $D=17$  ps/(nm.km),  $L=150$  km ve  $D=1$  ps/(nm.km),  $L=150$  km ve  $D=17$  ps/(nm.km)) için,  $P_{F11}$  gücünün değişimi gösterilmiştir.  $D=1$  ps/(nm.km) iken, iletim mesafesi 50 km'den 150 km'ye arttırıldığında  $P_{F11}$  gücü azalmaktadır.  $D=17$  ps/(nm.km) iken, iletim mesafe 50 km'den 150 km'ye arttırıldığında  $P_{F11}$  gücünde daha şiddetli düşüşler gözlemlenmektedir. Dolayısıyla,  $P_{F11}$  gücü üzerindeki kromatik dispersiyon etkisinin, iletim mesafesi etkisine kıyasla daha büyük olduğu söylenebilir.



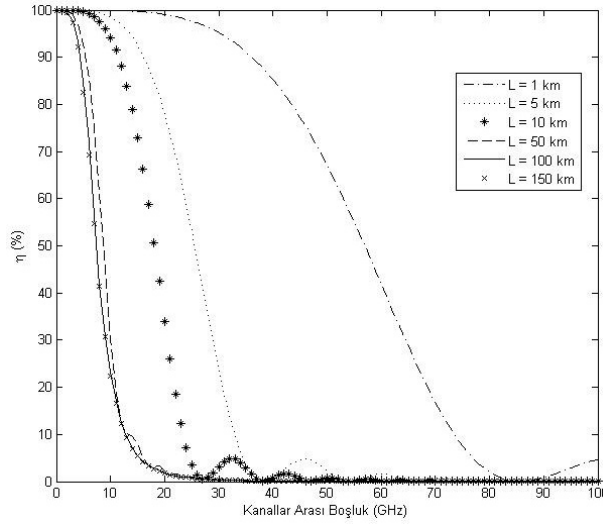
ŞEKİL 2.  $P_{F11}$  gücünün kanallar arası boşluğun farklı değerleri için değişimi.



ŞEKİL 3. Farklı iletim mesafesi ve kromatik dispersiyon değerleri için  $P_{F11}$  gücünün değişimi.

Şekil 4'te FWM etkinliğinin ( $\eta$ ), farklı iletim mesafelerine ( $L=1$  km,  $L=5$  km,  $L=10$  km,  $L=50$  km,  $L=100$  km,  $L=150$  km) göre değişimi gösterilmiştir. İletim mesafesi arttıkça, kanallar arası boşluk değerindeki küçük değişimlerde, FWM etkinliğinin hızlı bir düşüş gösterdiği açıktır. Ayrıca, 100 km ve üzerindeki iletim mesafeleri için FWM etkinliği doyuma ulaşmaktadır. İletim mesafesi azaldıkça,

FWM etkinliğinin sıfıra eriştiği kanallar arası boşluk değeri de artmaktadır. Özellikle 5 km'den daha düşük mesafelerde, FWM etkinliği 70 GHz üzerindeki boşluk değerlerinde bile devam etmektedir. Ayrıca kanallar arası boşluğun 10 GHz'den düşük değerlerinde, FWM etkinliğinin tüm iletim mesafeleri için yüksek olduğu görülmektedir.



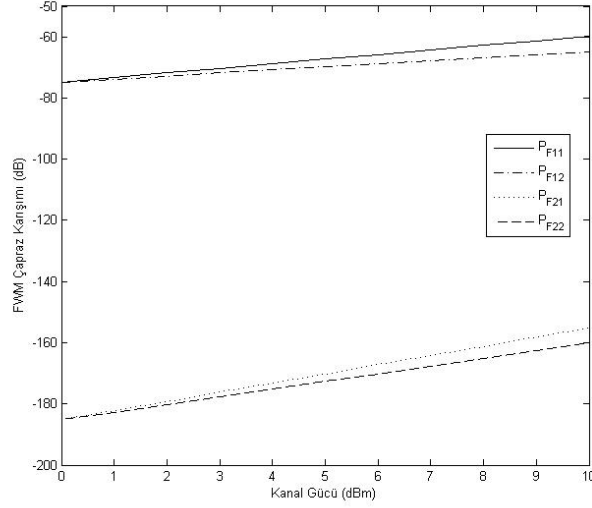
ŞEKİL 4. FWM etkinliğinin farklı iletim mesafelerine göre değişimi.

FWM çapraz karışımının giriş gücüne göre değişimi Şekil 5'te irdelenmiştir. Bu benzetimde yine iki kanallı sistem yapısı kullanılmıştır.  $P_1$  ve  $P_2$  kanal giriş güçleri, başlangıçta birbirine eşit ( $P_1 = P_2 = 0$  dBm) ve daha sonra  $P_1$ (dBm) =  $2P_2$ (dBm) olacak şekilde alınmıştır. Grafik birinci kanalın giriş gücüne ( $P_1$ ) göre çizdirilmiştir. Kanallar arası boşluk 0.8 nm alınmıştır. Grafikten de anlaşılacağı gibi, birinci mertebeden FWM çapraz karışım ürünleri ( $P_{F11}$  ve  $P_{F12}$ ), ikinci mertebeden FWM çapraz karışım ürünlerinden ( $P_{F21}$  ve  $P_{F22}$ ) daha yüksek değerlidir. Ancak, kanal giriş gücü arttırıldığında, ikinci mertebeden FWM çapraz karışım etkisi, birinci mertebeden çapraz karışım etkisine kıyasla daha hızlı artmaktadır.

Benzetimlerin bundan sonraki bölümünde, SMF optik fiber kullanılan WDM sistemlerinde FWM-SNR ilişkisi incelenmiştir. Bu benzetimlerde, öncelikle 25 GHz ve 75 GHz kanallar arası boşluk değerlerinde 3, 5 ve 7 kanallı sistemler ele alınmıştır. İkinci aşamada ise 3 kanallı sistemde 25 GHz, 50 GHz, 75 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerleri için FWM-SNR ilişkisi irdelenmiştir.

5 ve 7 kanallı sistemlerde orta kanala düşen FWM ürünleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.





ŞEKİL 5. Birinci mertebeden ve ikinci mertebeden FWM çapraz karışımının kanal giriş gücüne göre değişimi.

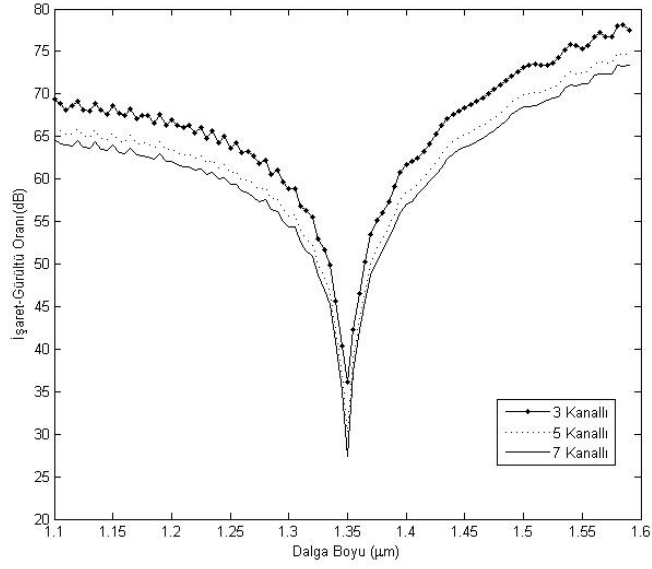
TABLO 1. 5 kanallı bir sistemde orta kanala düşen FWM ürünleri.

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

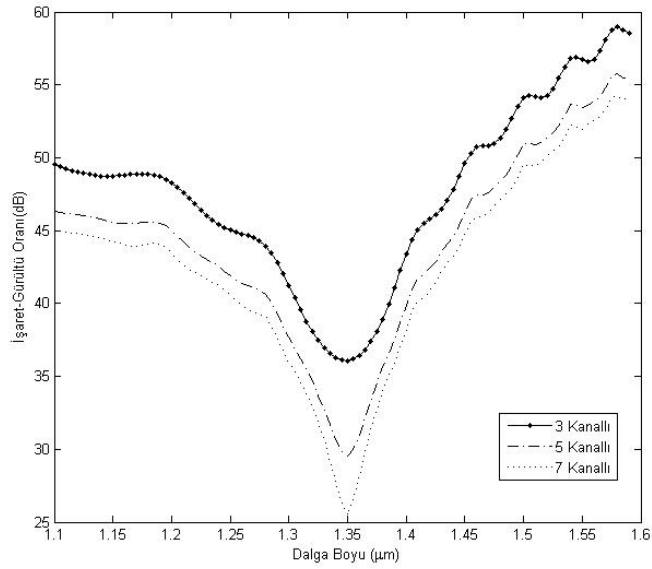
TABLO 2. 7 kanallı bir sistemde orta kanala düşen FWM ürünleri.

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

Şekil 6a ve Şekil 6b'de, 3, 5 ve 7 kanallı SMF optik fiberli WDM sisteminde, sadece FWM ürünlerinin etkisiyle oluşan SNR değişimi gösterilmiştir. Kanallar arası boşluk değeri sırasıyla 75 GHz ve 25 GHz alınmıştır. Benzetimler esnasında, orta kanalın dalga boyu 1100 nm-1600 nm arasında kaydırılmıştır.



(a)

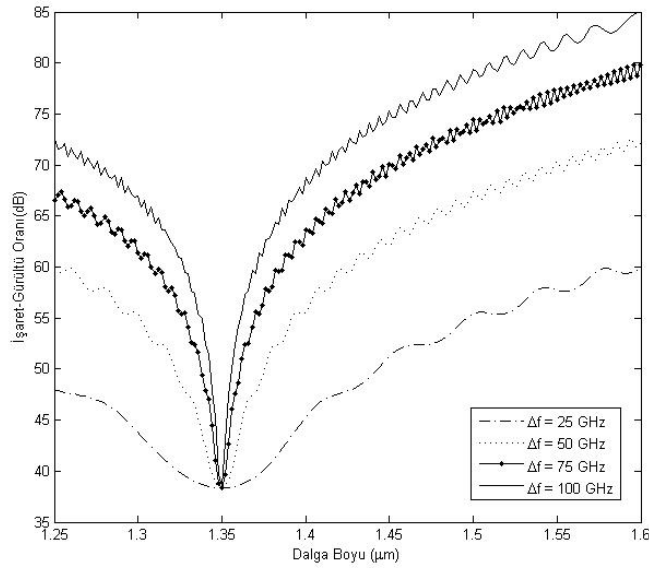


(b)

ŞEKİL 6. (a) Kanallar arası boşluk değeri 75 GHz iken SMF optik fiberli sistemin 3, 5 ve 7 kanal için SNR-dalga boyu değişimi, (b) Kanallar arası boşluk değeri 25 GHz iken SMF optik fiberli sistemin 3, 5 ve 7 kanal için SNR-dalga boyu değişimi.

Şekil 6a ve Şekil 6b'de, her iki kanallar arası boşluk değeri için, kanal sayısı arttırıldığında elde edilen SNR değerinde düşüş görülmüştür. Orta kanaldaki SNR değeri, SMF fiber için dispersiyon değerinin sıfır civarında olduğu 1350 nm'de en düşüktür. 1350 nm'den sonra, kanalın çalışma dalga boyu arttıkça SNR değeri artmaktadır. 25 GHz'lik kanallar arası boşluk değerine sahip sistemde SNR'ın en düşük olduğu dalga boyu aralığı, 75 GHz'lik kanallar arası boşluk değerine sahip sistemdekine göre daha büyüktür. Ayrıca, 75 GHz'lik kanallar arası boşluk değeri için, SNR değişiminde sık dalgalanmalar gözlemlenmiştir. 1550 nm'de SNR, kanal sayısına ve kanallar arası boşluk değerine göre 50 dB-75 dB arasında değişmektedir.

Şekil 7'de SMF optik fiberli 3 kanallı WDM sisteminde, 25 GHz, 50 GHz, 75 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerleri için, SNR-dalga boyu değişimi değerlendirildiğinde, beklenildiği üzere, aynı dalga boyunda, 100 GHz değerindeki SNR en yüksek 25 GHz değerindeki SNR ise en düşük çıkmıştır. Kanallar arası boşluk değeri düştükçe SNR değişimi giderek azalmaktadır. Ayrıca, dispersiyonun sıfır civarında olduğu dalga boyu (1350 nm) değerinde, incelenen tüm kanallar arası boşluk değerleri için SNR değerinin eşit ve yaklaşık 40 dB olduğu görülmüştür.



ŞEKİL 7. SMF optik fiberli 3 kanallı WDM sisteminde 25 GHz, 50 GHz, 75 GHz ve 100 GHz kanallar arası boşluk değerleri için SNR-dalga boyu değişimi.

## 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, WDM haberleşme sistemlerinde FWM'i etkileyen parametreler ve FWM-SNR ilişkisi incelenmiştir. FWM'in teorik temelleri açıklanmış, WDM sistem mimarisinde FWM'in oluşumuna sebebiyet veren öğelere değinilmiş, son olarak da yapılan benzetimler sunulup yorumlanmıştır.

FWM gürültü gücünün kanallar arası boşluğun farklı değerlerine göre değişimi incelendiğinde, kanallar arası boşluk değeri arttıkça FWM gürültü gücünün azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla, kanallar arası boşluğun eşit seçildiği sistemlerde, FWM gücünün etkisi arttığı için, bu etki kanal boşluklarının büyük tutulması ile azaltılabilir. WDM sistemlerinde, FWM etkisini azaltmak için önerilen çeşitli yaklaşımlardan en uygun olanı, kanallar arası boşluk değerlerinin farklı seçilmesidir.

FWM gücünün kromatik dispersiyon ve iletim mesafesine göre değişimi incelendiğinde, kromatik dispersiyonun iletim mesafesine kıyasla FWM gücünü daha fazla etkilediği tespit edilmiştir. Dispersiyon katsayısının ve mesafenin artması, düşük kanallar arası boşluk değerlerinde bile, FWM gücünde ani azalmalara sebebiyet vermektedir. Bu sebeple, özellikle dispersiyonu kaydırılmış fiberlerde, FWM etkisi son derece önemlidir.

Elde edilen sonuçlara göre, FWM etkinliğinin kısa iletim mesafelerinde daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi FWM etkinliğinin fiber zayıflamasıyla orantılı olarak azalmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle 5 km'den daha düşük mesafelerde, FWM etkinliğinin 70 GHz üzerindeki boşluk değerlerinde bile devam ettiği gözlenmiştir. 100 km ve üzerindeki iletim mesafelerinde ise FWM etkinliği küçük değerli kanallar arası boşluklarda doyuma ulaşmıştır. İletim mesafesi azaldıkça, FWM etkinliğinin sıfır olduğu kanallar arası boşluk değeri de artmaktadır.

FWM çapraz karışımının birinci mertebeden FWM ürünlerinde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu etki mertebeler arttıkça giderek azalmaktadır. Kanal giriş gücü arttıkça FWM çapraz karışımı da artmaktadır.

SMF optik fiberli WDM sistemlerinde, kanal sayısı arttırıldığında, oluşan FWM ürünlerinin etkisi nedeniyle, SNR değerinde düşüş gözlenmiştir. Ayrıca, kanallar arası boşluk değeri 100 GHz'ten 25 GHz'e düşürüldüğünde de SNR değeri azalmıştır. WDM sistemlerinde FWM-SNR ilişkisi, kanal sayısı ve kanallar arası boşluk değerinin yanı sıra, optik fiberin dispersiyon karakteristiğine ve optik giriş gücüne de bağlıdır. Dolayısıyla, bu sistemlerde kanallar arası boşlukların düşük değerli olmaması ve optik güç seviyesinin de çok yüksek olmaması gerekmektedir.

## Kaynaklar

- [1] G. Kaur and M. L. Singh, Effect of four-wave mixing in WDM optical fibre systems, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **120** (2009), 268–273.
- [2] P. B. Harboe, E. Silva and J. R. Souza, Analysis of FWM penalties in DWDM systems based on G.652, G.653 and G.655 optical fibers, *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology* **48** (2008), 77–83.
- [3] T. Schneider, *Nonlinear Optics in Telecommunications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2004.
- [4] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, New York 2001.
- [5] G. P. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, New York 2001.
- [6] F. Forghieri, R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, WDM systems with unequally spaced channels, *Journal of Lightwave Technology* **13** (1995), 889–897.
- [7] S. Song, Higher-order four-wave mixing and its effect in WDM systems, *Optics Express* **7** (2000), 166–171.
- [8] M. W. Maeda, W. B. Sessa, W. I. Way, A. Yi-Yan, L. Curtis, R. Spicer and R. I. Laming, The effect of four-wave mixing in fibers on optical frequency-division multiplexed systems, *Journal of Lightwave Technology* **8** (1990), 1402–1408.

