

L BANDINDA ÇALIŞAN ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK AMPLİFİKATÖRLERDE POMPA LAZERİ DALGA BOYUNUN KAZANÇ VE GÜRÜLTÜ SPEKTRUMLARINA ETKİSİ

Ahmet ALTUNCU Arif BAŞGÜMÜŞ

Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

ÖZET

980 nm ve 1480 nm’de ileri, geri ve çift yönlü pompalanmış uzun dalgaboyu bandı (L-Bandı) erbiyum katkılı fiber amplifikatörlerin spektral kazanç ve gürültü faktörü karakteristikleri kıyaslanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar, L-Bandı EDFA’nın kazanç bandgenişliği ve spektral gürültü faktörü karakteristiklerinin pompalama dalgaboyu ve erbiyum katkılı fiber uzunluğuna bağlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler : Erbiyum Katkılı Fiber Amplifikatör, L-Bandı EDFA.

THE EFFECT OF PUMPING WAVELENGTH ON GAIN AND NOISE SPECTRA IN L-BAND ERBIUM DOPED FIBER AMPLIFIERS

ABSTRACT

Spectral gain and noise figure characteristics of long wavelength band (L-band) erbium doped fiber amplifiers pumped at 980 nm and 1480 nm are compared for different pumping configurations: forward, backward and bidirectional. Simulations performed show that gain bandwidth and spectral noise figure characteristics of L-band EDFAs strongly depend on pumping wavelength and erbium doped fiber length.

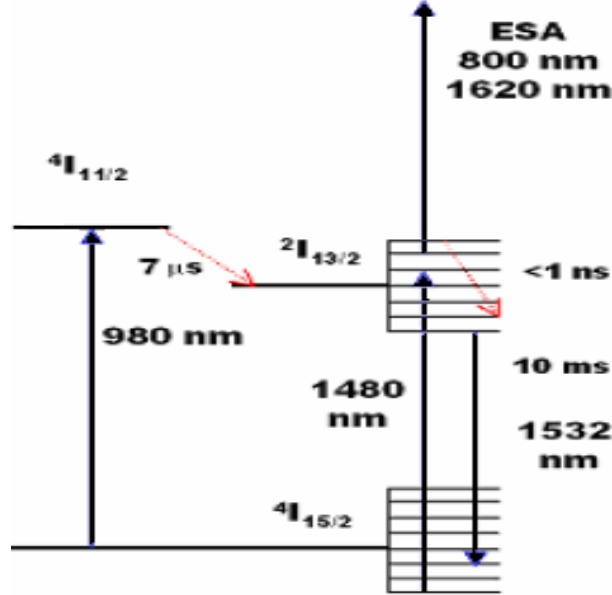
KeyWords : Erbium Doped Fiber Amplifier, L-Band EDFA

1. GİRİŞ

Erbiyum Katkılı Fiber Amplifikatörler (EDFA), 1,55 µm penceresinde çalışan optik haberleşme sistemlerinde fiber kaybını gidermek için kullanılmaktadırlar. Başlangıçta C bandı için [1520-1565 nm] geliştirilen EDFA teknolojisi, günümüzde L bandını [1565-1620 nm] da kapsayacak şekilde genişletilerek iletim kapasitesi artırılmaya çalışılmaktadır [1-5]. EDFA’nın spektral kazanç ve gürültü faktörü performansı, erbiyum katkılı fiberin geometrisi ve katılama özelliklerinin yanında, pompa ve sinyalin dalgaboyu ve gücüne de bağlıdır [1,2]. Yüksek pompalama verimi ve düşük ESA (uyarılmış seviye absorblaması) nedeniyle çoğunlukla 980 nm veya 1480 nm’de pompalama tercih edilmektedir [3]. L bandında nisbeten düşük pompa dönüşüm verimi nedeniyle, C bandına göre yaklaşık olarak on katı uzunlukta ve daha yüksek oranda erbiyumla katılanmış fiberler gerekmektedir [1]. Diğer taraftan 980 nm dalgaboyunda daha yüksek fiber ön-sonu ters birikimi sağlandığı ve bu sayede gürültü faktörünün daha düşük olduğu, 1480 nm dalgaboyunda ise daha yüksek pompa dönüşüm verimi sağlandığı bilinmektedir [1]. Bunun dışında, L-bandındaki pompa dönüşüm verimini artırmak için pompa dalgaboyunun 980 nm etrafında ±20 nm uzağa kaydırılması, geri yöndeki ASE’nin ve/veya ikinci bir C-bandı (1550-1560 nm) pompa sinyalinin kullanılması önerilmiştir [4,5]. Bu çalışmada, 980 nm ve 1480 nm pompalama yöntemleri için L bandı EDFA’nın kazanç ve gürültü faktörü spektrumları simülasyon yoluyla ayrıntılı biçimde karşılaştırılmıştır.

2. SİMÜLASYON MODELİ

Optiwave OptiAmplifer 4.0 yazılımı kullanılarak yapılan simülasyonlar, ileri, geri ve çift yönlü pompalama konfigürasyonları için L bandı EDFA'da kazanç ve gürültü faktörü spektral değişimlerini içermektedir.



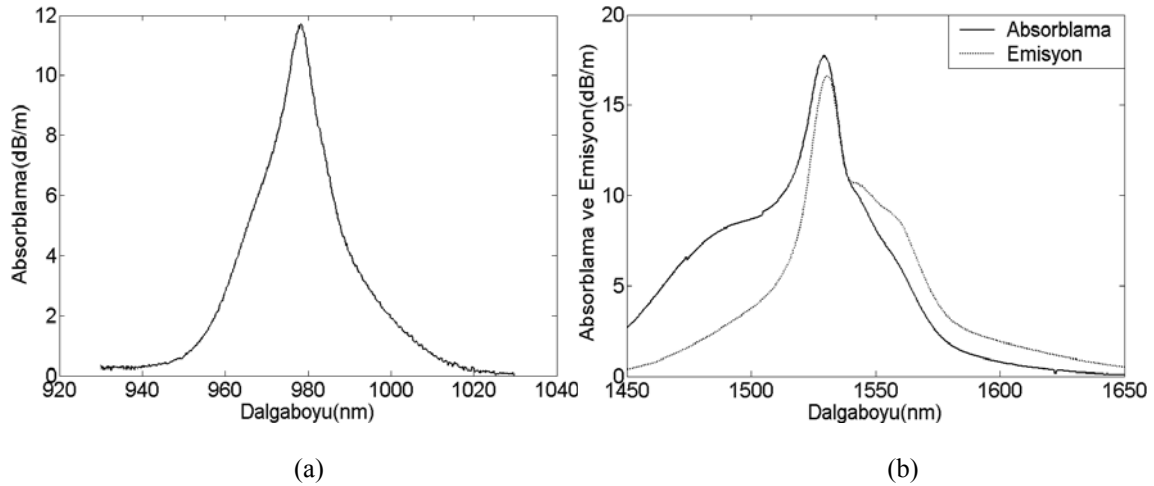
Şekil 1. Erbiyum enerji seviyeleri.

Şekil 1'de erbiyum iyonunun amplifikasyon için kullanılan enerji seviyeleri görülmektedir. 980 nm'de pompalamanın $4I_{11/2} - 2I_{13/2}$ geçişi hızlı ve ışınımsız gerçekleştiği için yaklaşık olarak 1480 nm'de olduğu gibi iki seviyeli enerji modeli kullanılabilir. Şekil 1'de ayrıca uyarılmış seviye absorblaması da (ESA etkisi) görülmektedir. Bu çalışmada yapılan simülasyonlarda Fibercore firmasının üretmiş olduğu Metro-12 erbiyum katkılı fiberin parametreleri kullanılmıştır. Tablo 1 de Metro-12 EDF'nin önemli parametreleri görülmektedir.

Tablo 1. Metro-12 erbiyum katkılı fiber parametreleri.

NA	0.21
Kesim dalgaboyu	960 nm
İyon konsantrasyonu	$1.6e25$ iyon/m ³
Öz yarıçapı	1.75 μm
Arkaplan kaybı	8 dB/km @ 1310 nm
Absorblama	10.46 dB/m @ 980 nm 7.28 dB/m @ 1480 nm 17.70 dB/m @ 1530 nm
Emisyon	2.01 dB/m @ 1480 nm 16.59 dB/m @ 1530 nm

EDFA'nın simülasyonu, erbiyum iyonunun enerji seviyeleri arasındaki geçişleri tanımlayan oran denklemleri ile, aktif fiber boyunca sinyal, pompa ve ASE güçlerinin değişimlerini karakterize eden yayılım denklemlerinin birlikte çözümlenmesini gerektirir. Simülasyonlarda Er^{3+} için iki seviyeli enerji band modeli kullanılmıştır.



Şekil 2. Metro-12 EDF için absorblama ve emisyon spektrumları: (a) 980 nm pompa bandında absorblama spektrumu, (b) 1480 nm pompa ve 1550 nm sinyal bandı için absorblama ve emisyon spektrumu.

Şekil 2 de, Fibercore firması tarafından üretilen ve simülasyonlarda kullanılan Metro-12 erbiyum katkılı fiberin 980 nm ve 1480 nm pompa ile 1550 nm sinyal bandı için absorblama ve emisyon spektrumları görülmektedir. EDFA'nın kazanç ve gürültü faktörü simülasyonlarında ASE ve ESA etkilerini dikkate alan Giles modeli [6] kullanılmıştır. Giles modelinde propagasyon denklemleri absorblama ve emisyon katsayıları cinsinden yazılabilir:

$$\frac{\partial P_k(z)}{\partial z} = u_s P_s(z) (N_2 \alpha_k - N_1 g_k) \quad (1)$$

Burada α_k ve g_k , λ_k dalgaboyundaki absorblama ve emisyon katsayıları olup:

$$\alpha(\lambda_k) = \Gamma(\lambda_k) \bar{N}_t \sigma_k^a(\lambda_k) \quad (2)$$

$$g(\lambda_k) = \Gamma(\lambda_k) \bar{N}_t \sigma_k^e(\lambda_k) \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır. i.inci seviyenin çakışma integrali veya erbiyum iyonlarını fiber özünde yoğunlaştırma faktörü fiber koordinatlarının fonksiyonu (r, ϕ, z) olup:

$$\Gamma_{s,i}(P_s, z) = \frac{A_{eff} \int I_k(r, \Phi, z) N_i(r, \Phi, z) dA}{P_s(z) \int N_i(r, \Phi, z) dA} \quad (4)$$

şeklinde dir. Katkılama iyonlarının efektif alanı ise:

$$A_{eff} = \frac{\int N_i(r, \Phi, z) dA}{N_i(0)} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır. Katkılama yarıçapı b olan düzgün katkılanmış bir fiberde $A_{eff} = \pi b^2$ 'dir. Oran denklemlerinin kararlı hal için çözümü, fiber boyunca ortalama populasyon ters birikimini verir:

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau_2}{A_{eff}} \sum \frac{P_k \alpha_k}{h \nu_k}}{1 + \sum \frac{P_k}{P_k^{IS}}} \quad (6)$$

Burada P_k^{IS} iç saturasyon gücü olup:

$$P_k^{IS} = \frac{h\nu A_{eff}}{\Gamma_{k,2} \tau_2 (\sigma_k^a + \sigma_k^e)} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. σ_k^e ve σ_k^a emisyon ve absorblama kesit alanını, τ_2 ise 2.seviyeden 1. seviyeye geçiş zamanını gösterir. $N_2(z)$ 'nin tam sonucunu elde etmek için, iç saturasyonu etkileyen faktörler her bir adımda yeniden hesaplanmalıdır. Verilen $N_2(z)$ eşitliği, ASE dahil tüm ileri ve geri yönlü sinyallerin toplamından oluşur.

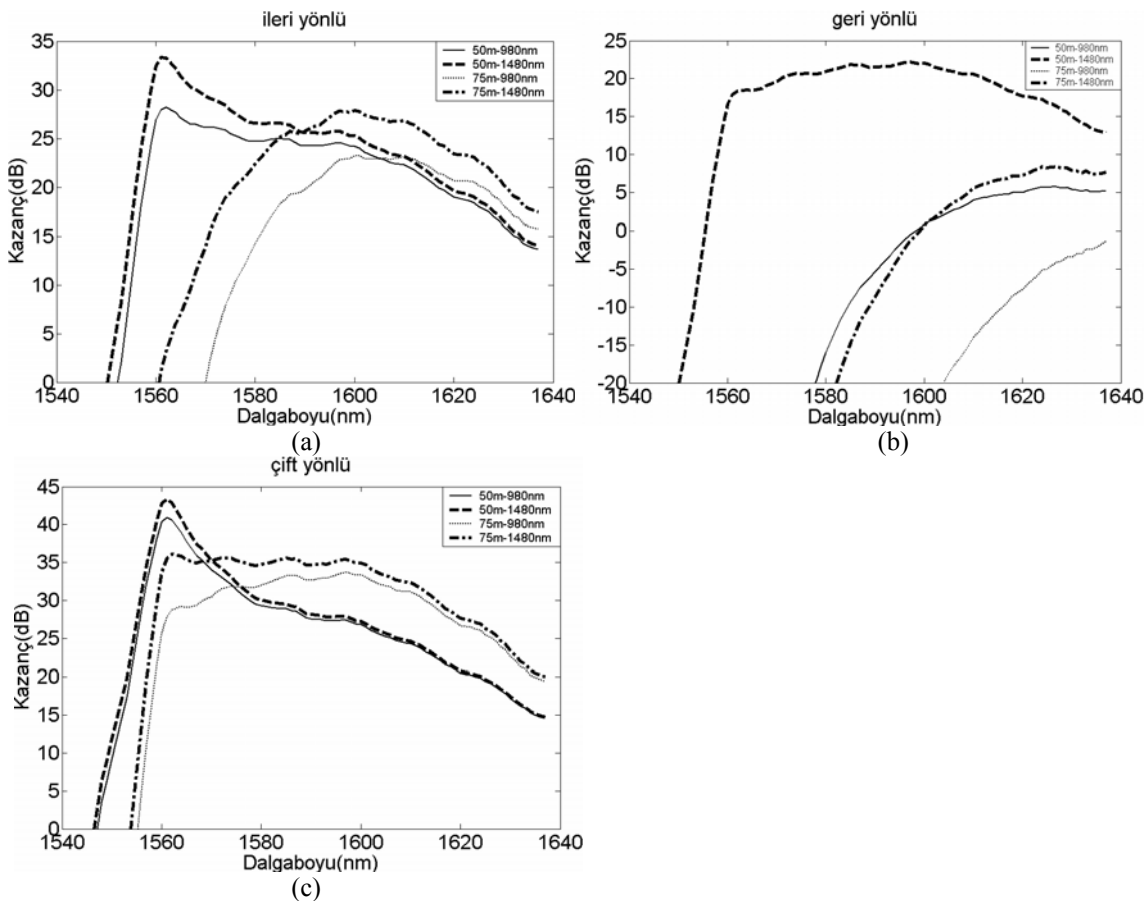
Sinyal dalgaboyuna bağımlı gürültü faktörü:

$$NF(dB) = 10 \log \left[\frac{1}{G} + \frac{S_{out}(\lambda_s)}{G h \nu} - \frac{S_{in}(\lambda_s)}{h \nu} \right] \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $S_{out}(\lambda_s)$ ve $S_{in}(\lambda_s)$ sinyal dalgaboyundaki çıkış ve giriş ASE spektral yoğunluklarıdır (W/Hz).

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Simülasyonlarda pompa gücü 150mW, sinyal giriş gücü $1\mu W$ (-30dBm) olarak alınmış ve 1540-1640 nm arasında 100 kanallı WDM sinyal uygulanmıştır. Şekil 3 de ileri, geri ve çift yönlü olarak 980nm ve 1480nm'de pompalanmış 50 ve 75 m uzunluklarında L bandı EDFA için elde edilen kazanç spektrumları görülmektedir.

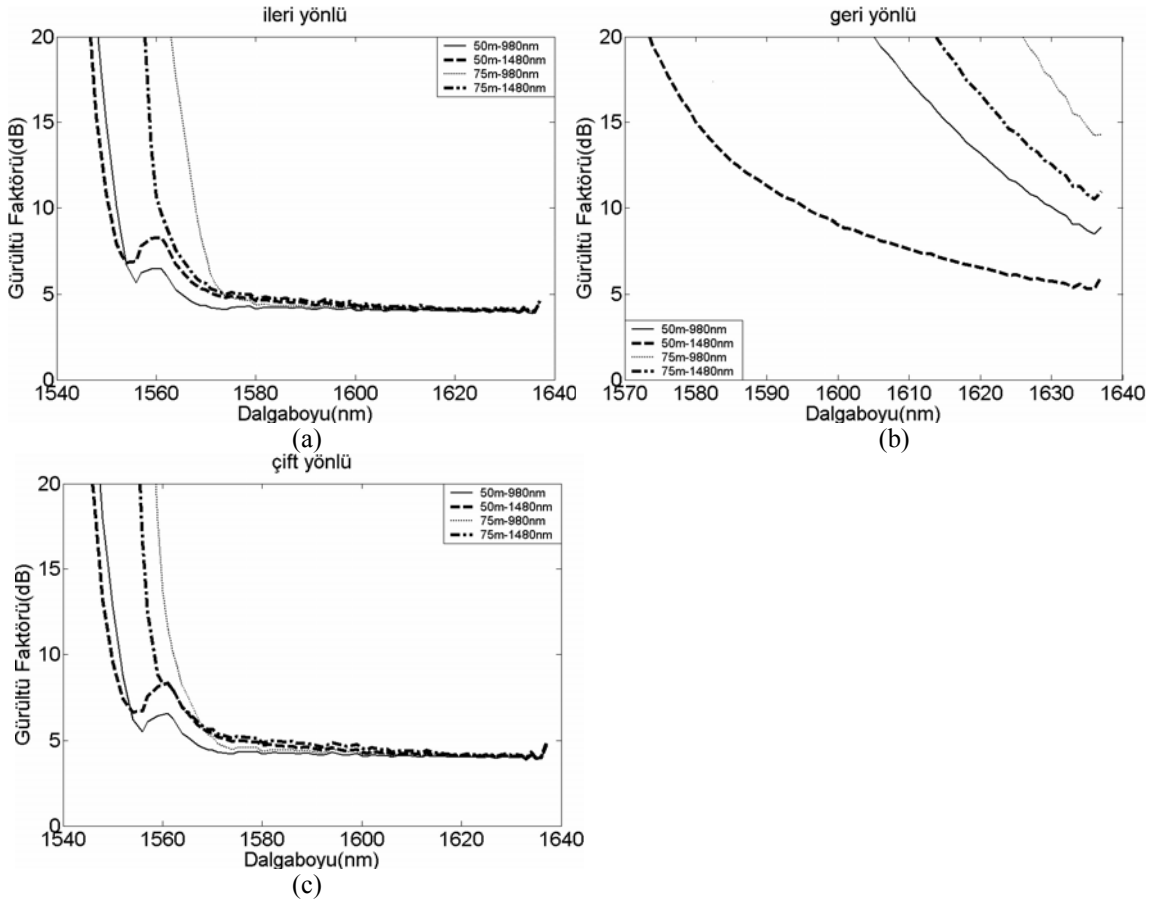


Şekil 3. 980 nm ve 1480 nm'de pompalanan 50 m ve 75 m uzunlukta L bandı EDFA'nın kazanç spektrumları (a) ileri yönlü, (b) geri yönlü ve (c) çift yönlü pompalama.

Şekil 3.a'da görülen ileri yönde pompalama için beklenildiği gibi 75 m EDF için kazanç spektrumu 50 m 'lik EDF'e göre daha uzun dalgaboylu bölgeye kaymıştır. 20 dB kazanç bant genişliği, 50 m EDF için 980 nm'de 1559-1616 nm arası 57 nm, 1480 nm'de 1557-1618 nm arası 61 nm olarak gerçekleşmiştir. EDF uzunluğu 75

m'ye çıkartıldığında, 980 nm'de 1592-1625 nm arası 33 nm, 1480 nm'de 1576-1630 nm arası 54 nm olarak gerçekleşmiştir. Buna göre 980 nm 'ye göre 1480 nm'de bulunan kazanç bandgenişiği 50 m'lik fiber için 4 nm, 75m'lik fiber için ise 21 nm daha geniştir. Bunun dışında, 1480'de pompalama 980 nm'ye göre daha yüksek kazanç sağlamaktadır. Kazanç farkı 50 m EDF için 1560 nm'de 5 dB civarında iken 1600 nm'de 1-2 dB civarında olmaktadır. 75m EDF için ise kazanç spektrumu boyunca sürekli olarak yaklaşık 5 dB daha yüksektir. Şekil 3.b'de görülen geri yönde pompalama için 50 m lik EDF'nın 1480 nm'de pompalanması dışında diğer konfigürasyonlarda kazanç 20dB'nin oldukça altında olup kazanç spektrum merkezi 1600 nm'nin ötesine kaymıştır. 50 m EDF'nın 1480 nm 'de pompalanması durumu için 20 dB kazanç bandgenişiği 1571-1612 nm arasında 41 nm'dir.

Şekil 3.c'de görülen çift yönlü pompalama için, beklenildiği gibi kazanç performansı ileri ve geri yönlü konfigürasyonlara nisbeten oldukça yüksek elde edilmiştir. 980 nm ve 1480 nm pompalama için kazanç bandgenişlikleri yaklaşık aynı olup, 1480 nm için elde edilen kazanç değerleri 980 nm'ye göre bir miktar daha yüksektir. 20 dB kazanç bangeişiği 50 m EDF için 980 nm'de 1554-1623 nm arası 69 nm, 1480 nm'de 1554-1624 nm arası 70 nm olarak gerçekleşmiştir. EDF uzunluğu 75 m'ye çıkartıldığında, 980 nm'de 1559-1634 nm arası 75 nm, 1480 nm'de 1559-1636 nm arası 77 nm olarak gerçekleşmiştir. Diğer taraftan, 75 m'lik EDF için 30 dB kazanç bandgenişiği de 980 nm için 43 nm 1480 nm için 55 nm 'dir. Bu sonuçla 1480 nm'de çift yönlü pompalanmış 75 m uzunluktaki EDF'nın en geniş kazanç spektrumuna sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3.c'den ayrıca görülebilir ki, 50 m EDF için bandgenişliğinde 10 dB'den fazla kazanç değişimi elde edilirken 75 m EDF için elde edilen kazanç spektrumu oldukça düzdür.



Şekil 4. 980 nm ve 1480 nm'de pompalanan 50 m ve 75 m uzunlukta L bandı EDFA'nın gürültü faktörü spektrumları (a) ileri yönlü, (b) geri yönlü ve (c) çift yönlü pompalama.

Şekil 4'te, 980 nm ve 1480 nm'de ileri, geri ve çift yönlü pompalanan 50 m ve 75 m uzunluktaki L bandı EDFA'nın gürültü faktörü spektrumları görülmektedir. Şekil 4.a'da ileri yönde pompalama için elde edilen gürültü spektrumlarında görüldüğü gibi, 50 m fiber için elde edilen gürültü faktörü değerleri 75 m'ye göre özellikle 1550-1570 nm aralığında daha düşüktür. Gürültü faktörünün 5 dB 'nin altına düştüğü eşik sinyal dalgaboyları 50 m EDF için 980 nm'de 1567 nm ve 1480 nm'de 1572 nm'dir. Buna göre kullanılabilir 20 dB

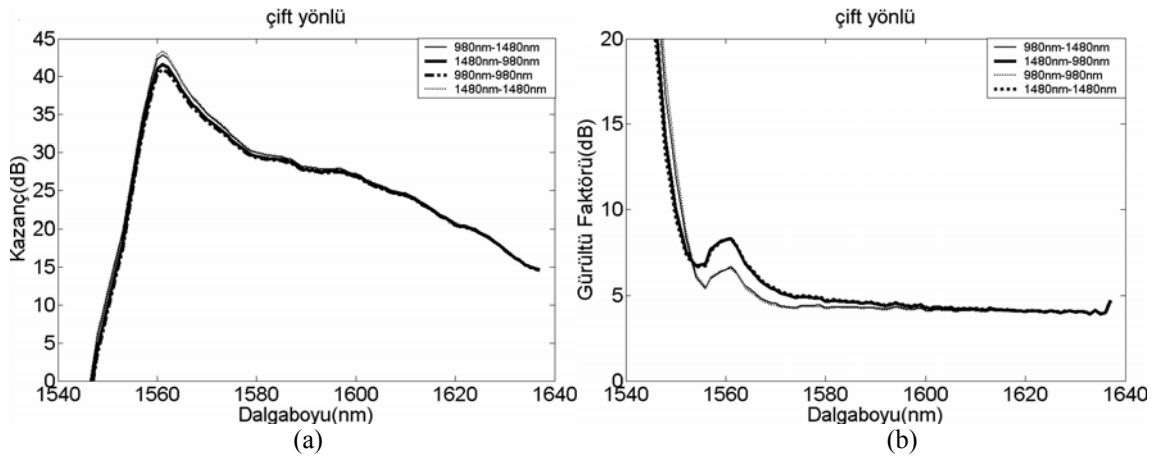
kazanç bandgenişliği ileri yönde pompalama için 980 nm'de 49 nm'ye 1480 nm için 46 nm'ye düşmektedir. Diğer taraftan 75 m EDF için gürültü faktörünün 5 dB 'nin altına düştüğü eşik sinyal dalgaboyları 980 nm'de 1574 nm ve 1480 nm'de 1578 nm'dir. Buna göre kullanılabilir 20 dB kazanç bandgenişliği ileri yönde pompalama için 980 nm'de 51 nm'ye 1480 nm için 52 nm'ye azalmıştır.

Şekil 4.b'de görülen geri yönde pompalama için gürültü spektrumları, her iki pompa dalgaboyu ve fiber uzunluğu için 5 dB nin çok üzerindedir. 75 m EDF için gürültü performansı 50 m EDF 'e göre daha kötü gerçekleşmiştir.

Şekil 4.c'de çift yönlü pompalama için elde edilen gürültü spektrumlarında görüldüğü gibi, gürültü faktörünün 5 dB 'nin altına düştüğü eşik sinyal dalgaboyları 50 m EDF için 980 nm'de 1567 nm ve 1480 nm'de 1576 nm'dir. Buna göre kullanılabilir 20 dB kazanç bandgenişliği ileri yönde pompalama için 980 nm'de 56 nm'ye 1480 nm için 48 nm'ye düşmektedir. Diğer taraftan 75 m EDF için gürültü faktörünün 5 dB 'nin altına düştüğü eşik sinyal dalgaboyları 980 nm'de 1571 nm ve 1480 nm'de 1583 nm'dir. Buna göre kullanılabilir 20 dB kazanç bandgenişliği ileri yönde pompalama için 980 nm'de 63 nm'ye 1480 nm için 53 nm'ye azalmıştır.

Sonuç olarak, 1480 nm de pompalama her ne kadar daha yüksek kazanç bandgenişliği sağlasa da daha düşük gürültü performansı nedeniyle, kullanılabilir bandgenişliği 980 nm'de daha yüksektir.

Bu çalışmada ayrıca 50 m EDF nin çift yönlü pompalanması için hibrit konfigürasyonlarda simüle edilmiştir. Şekil 5 de, ileri ve geri pompa lazeri için 980 nm ve 1480 nm'nin değişik konfigürasyonlarının kullanıldığı kazanç ve gürültü spektrumların görülmektedir.



Şekil 5. İleri ve geri pompa lazeri için 980 nm ve 1480 nm'nin değişik konfigürasyonlarının kullanıldığı (a) kazanç spektrumu ve (b) gürültü spektrumu

Şekil 5a'da görülen kazanç spektrumlarından, iki dalgaboyunun farklı konfigürasyonda kullanılmasının, tepe kazanç değerini bir miktar değiştirmesine rağmen, kazanç spektrumlarında önemli bir farklılık meydana getirmediği anlaşılmıştır. Diğer taraftan şekil 5b'de, 980 nm-980 nm ve 980 nm-1480 nm (ileri-geri) konfigürasyonlarının en düşük gürültü faktörü değerlerini verdiği görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada L bandı EDFA'nın kazanç ve gürültü spektrumlarına pompa dalgaboyu ve EDF uzunluğunun etkisi incelenmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, 1480nm'de pompalama için L bandı EDFA'nın kazanç bandgenişliğindeki artışa rağmen, gürültü performansının ve dolayısıyla kullanılabilir bandgenişliğinin 980 nm'de daha yüksek olduğunu göstermiştir. Yüksek gürültü performansı ile birlikte, yüksek kazanç bandgenişliği elde etmek için L-EDFA'nın çift yönlü 980-980 nm veya 980-1480 nm konfigürasyonlarından biriyle pompalanması gerektiği anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Felton A.Flood, “L-band erbium doped fiber amplifiers”, **Tech.Digest OAA’99**, WG1, page 102-104, 1999
2. Jung Mi Oh et al., “Demonstration of highly efficient flat-gain L-band erbium-doped fiber amplifiers by incorporating a fiber bragg grating”, **IEEE Photonics Technology Letters**, Vol.14, No.9, September 2002.
3. E. Desurvire, “Erbium Doped Fiber Amplifiers : Principles and Applications”, **New York John Wiley & Sons**, 1994.
4. F.A. Flood, C.C. Wang, “ 980 nm pump band wavelengths for long wavelength band erbium doped fiber amplifiers”, **IEEE Photonics Technology Letters**, Vol.11 No.10, pp.1232-32, 1999.
5. H. Chen, M. Leblanc, G.W. Schinn, “Gain enhanced L-band optical fiber amplifiers and tunable lasers with erbium-doped fibers” **Optics Communications**, Vol.216, pp.119-125, 2003.
6. C.R. Giles and E. Desurvire, “Modeling erbium doped fiber amplifiers”, **Journal of Lightwave Technology Letters**, Vol.9, pp.271-283, February 1991.