

ERBİYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİ İÇİN KOMPLEKS ETKİLERİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Barış ALTINER¹

N. Özlem ÜNVERDİ²

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Yıldız Teknik Üniversitesi, 34349, Beşiktaş, İstanbul

¹ e-posta: baris1297@hotmail.com

² e-posta: unverdi@yildiz.edu.tr

Anahtar sözcükler : Optik haberleşme, erbium katkıli fiber kuvvetlendirici (EDFA), WDM, OptiSystem, optimizasyon

ÖZET

Bu çalışmada, erbium katkıli fiber kuvvetlendirici (EDFA) tasarım parametreleri, simülasyon ve optimizasyon perspektifinden incelenecektir. Kazanç ve gürültü karakteristiğinin optimizasyonu sırasında meydana gelen kompleks etkiler, Optisystem adı verilen optik ortam tasarım yazılımı ile simüle edilerek optimize edilmiştir. Pratik ortam koşullarının da belirlenebildiği optik ortam tasarım yazılımı yardımıyla optimizasyon ve simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, erbium katkıli fiber kuvvetlendiricilerde kazanç modellemesi için gerekli olan prensipler değerlendirilerek geliştirilmiştir. Bu prensipler ışığında, kuvvetlendiricilerin kazanç ve gürültü modelleri belirlenmiştir.

Kazanç süreci, bağlantılı atomal yoğunluk ve ışık akısının yayılım denklemlerinden oluşmaktadır. 1,5 μm 'deki erbium katkıli fiber için uygun olan üç seviyeli sistem incelenmiş ve üç seviyeli sistemin belirli varsayımlar altında eşdeğer iki seviyeli sisteme nasıl indirildiği gösterilmiştir [1].

Çalışmanın 2. Bölümü'nde, kesit soğurma ve salımının önemi açıklanmış ve verilen iki adet geçiş dalga boyu arasında var olan farkı belirlenmiştir. 3. Bölüm'de, erbium iyon dağılımı ve ışık şiddetinin enine profili arasında meydana gelen geometrik örtüşme parametresi kavramından detaylandırılmış ve kuvvetlendirme işleminin bütün yönleri açısından kuvvetlendirilerek uyarılmış salımın önemi açıklanarak erbium katkıli fiber kuvvetlendirici analitik olarak modellenmiştir. 4. Bölüm'de, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

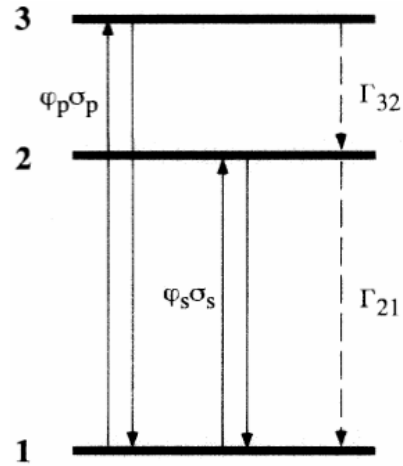
2. ERBİYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİ

Çoğu erbium katkıli fiber kuvvetlendirici incelemesi, salt olarak üç seviyeli atomik modelin veya sistemin

elde edilmesi ile mümkün olur [2]. Kuvvetlendiricilerin en önemli özellikleri bu basit modelden belirli varsayımlar altında elde edilebilir.

1. seviye ile 3. seviye arasındaki geçiş oranları, bu geçiş seviyelerindeki yoğunlukları ve pompalama akısı φ_p ile pompalama kesiti σ_p için oransaldır.

1. seviye ile 2. seviye arasındaki geçiş oranları, bu geçiş seviyelerindeki yoğunlukları ve sinyal akısı φ_s ile sinyal kesiti σ_s için oransaldır. Kendiliğinden meydana gelen iyon geçiş oranları Γ_{32} ve Γ_{21} şeklinde verilebilir.



Şekil-1 : Erbium katkıli fiber için üç seviyeli sistem modeli.

Bahsedilen parametrelerle birlikte üç seviyeli sistem Şekil-1'de belirtildiği gibi düşünülebilir. Toprak seviyesi 1. seviye ile, enerjinin pompalandığı 3. seviye ile, ortadaki seviye ise 2. seviye ile temsil edilmiştir. Verimli bir kuvvetlendirici olduğu düşünülürse, 2. seviye genelde uzun bir ömüre sahiptir ve bazen yarı kararlıdır. 2. seviye kuvvetlendirme geçişinin üst seviyesi olmakla birlikte 1. seviye ise alt seviyesidir. Seviyelerin yoğunlukları N_1 , N_2 ve N_3 olarak

belirtmiştir. Bahsedilen üç seviyeli bu sistem, kuvvetlendirme işlemine bağlı olarak Er^{+3} iyonlarının enerji seviye yapısını temsil etmektedir. 1. seviye toprak seviyesinde olduğu için, kuvvetlendirme işlemini başlatabilmek için, 1. seviye ve 2. seviye arasında yoğunluk evirtimi gereklidir. Yoğunluk evirtimi için toplam erbiyum iyon yoğunluğunun en az yarısı 2. seviyeye uyarılmalıdır. Bu durum kuvvetlendirme işlemi için eşik pompalama gücünü artırır ve aynı zamanda üç seviyeli lazer ve kuvvetlendirme sistemlerinin en zor kısmı olarak bilinir.

1. seviyeden 3. seviyeye geçiş arasındaki soğurma kesiti σ_p , 2. seviyeden 1. seviyeye salım kesiti σ_s olarak gösterilebilir. Zaman geçtikçe soğurma ve salım kesitleri, bozulmamış olan seviyeler arasındaki geçiş olarak farzedilir. Bu nedenle, pratik açıdan erbiyum iyon seviyeleri, soğurma ve salım kesitleri farklı olan durumlardan oluştuğu söylenebilir. Bu seviyeler ısı yoğunluk dağılımını da içermektedir. Seviyeler arasındaki yoğunluk değişimi için eşdeğer denklemler [1],

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (2)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p + (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (3)$$

formundadır. Kararlı durumda, zaman türevlerinin hepsi sıfır olacaktır:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0 \quad (4)$$

Toplam yoğunluk N ise,

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (5)$$

dür. N_3 yoğunluğu,

$$N_3 = \frac{1}{1 + \frac{\Gamma_{32}}{\phi_p\sigma_p}} N_1 \quad (6)$$

dir. Γ_{32} , 3. seviyedeki efektif pompalama oranına göre karşılaştırıldığında büyük bir değere sahiptir, $\phi_p\sigma_p$, N_3 sifıra yaklaştığı için yoğunluk, genellikle 1. ve 2. seviyededir. (6) eşitliği, (2) eşitliğinde kullanılarak,

$$N_2 = \frac{(\phi_p\sigma_p/\Gamma_{32}) + \phi_s\sigma_s}{\Gamma_{21} + \phi_s\sigma_s} N_1 \quad (7)$$

eşitliği elde edilir. (5) eşitliğinden faydalanılarak N_1 ve N_2 yoğunlukları türetilebilir ve yoğunluk evirtimi olan $N_2 - N_1$,

$$N_2 - N_1 = \frac{\phi_p\sigma_p - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\phi_s\sigma_s + \phi_p\sigma_p} N \quad (8)$$

olarak bulunur. Yoğunluk evirtimi, 2. seviyeden 1. seviyeye geçiş kazancı için, $N_2 \geq N_1$ 'dir. Eşik değer olarak ise $N_2 = N_1$ 'dir ve pompalama akısı ϕ_{th} ,

$$\phi_{th} = \frac{\Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{1}{\tau_2\sigma_p} \quad (9)$$

formunda elde edilir.

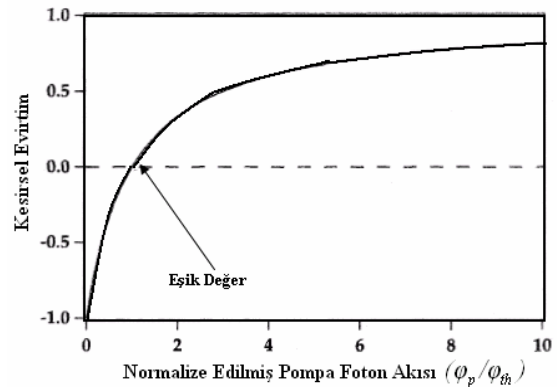
Sinyal şiddetinin değerinin küçük olması durumunda, sönüm süresi Γ_{32} , pompalama alanının neden olduğu geçiş oranıyla karşılaştırıldığında çok büyüktür, yoğunluk evirtimi,

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{\phi_p' - 1}{\phi_p' + 1} \quad (10)$$

olarak verilir. Burada,

$$\phi_p' = \frac{\phi_p}{\phi_{th}} \quad (11)$$

dir. (10) eşitliği ile Şekil-2'deki gibi kesirsel yoğunluk evirtimi çizilebilir [2]. Pompalama eşliğinin altında evirtim negatif, pompalama eşliğinin üzerinde ise pozitifdir. Evirtim negatif olduğunda, sinyal dalga boyunda soğurma geçişleri salım geçişlerinden daha fazladır ve sinyal negatif kazanç ve kayıpları görür. Tersine, evirtim pozitif olduğunda, sinyal pozitif kazançları görür.



Şekil-2 : Üç seviyeli sistem için kesirsel yoğunluk evirtimi $(N_2 - N_1) / N$.

3. KUVVETLENDİRME AŞAMASINDA MEYDANA GELEN KOMPLEKS ETKİLERİN EDFA İÇİN SİMÜLASYONU VE OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, sırasıyla, kompleks etkiler arasında yer alan uyarılmış seviyedeki soğrulma (ESA, Excited State Absorption) ile homojen uyarılma etkisi (HUC, Homogeneous Upconversion Effect)'nin EDF kazancı üzerindeki etkisi simüle edildikten sonra optimizasyon yazılımı aracılığı ile optimizasyonu yapılmıştır.

3.1 UYARILMIŞ SEVİYEDEKİ SOĞRULMANIN ERBIYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİNİN PERFORMANSINA ETKİSİ

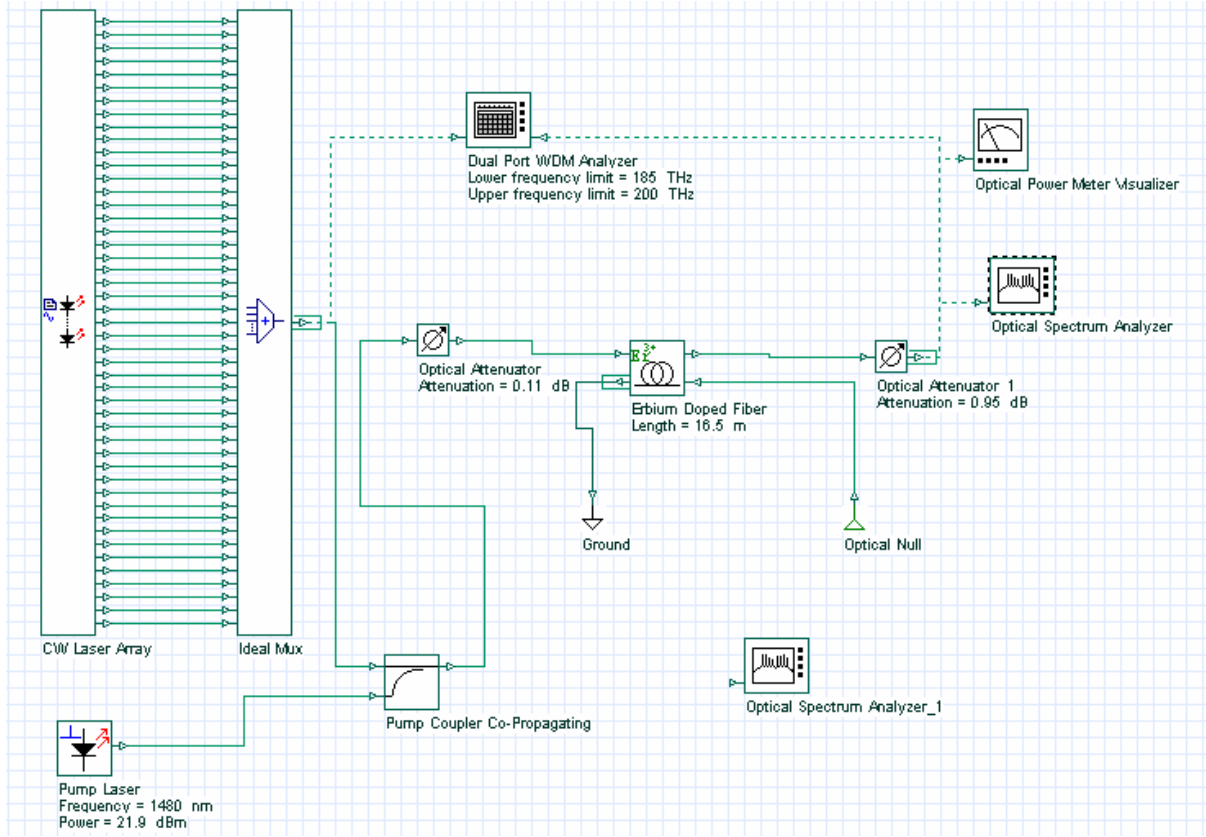
Bu bölümde, uyarılmış durumdaki soğrulma sinyalinin erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin performansını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Bir sinyal fotonu, uyarılmış seviyedeki erbiyum iyonu tarafından soğrulduğu için uyarılmış durumdaki soğrulma sinyalinin etkisi meydana gelir; bu yüzden, daha yüksek bir enerji seviyesine ulaşırsa bile kuvvetlendiricinin veriminde indirgemeye neden olacaktır. Bu etki, dalga boyuna bağlıdır, çünkü, foton enerjileri, geçiş enerjisi ile uyarılmış durumdaki Er^{+3} iyonlarının enerji seviyelerine dayanmaktadır [3]. Uyarılmış durumdaki soğrulma sinyalinin, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin performansı üzerindeki etkisinin simülasyonu, Şekil-3'deki sistemde yapılmıştır [4].

Giriş sinyali, ideal bir çoğullayıcı tarafından çoğullanan 47 adet sinyal kümesinden oluşmaktadır. Sistem içindeki kayıplar optik zayıflatıcı ile örneklendirilmiş olup, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici 1480 nm'deki sinyal pompasını yaymaktadır. Kazanç ve gürültü faktörü, çift çıkışlı dalga boyu bölmeli çoğullamalı analizör kullanılarak her kanal için hesaplanmıştır.

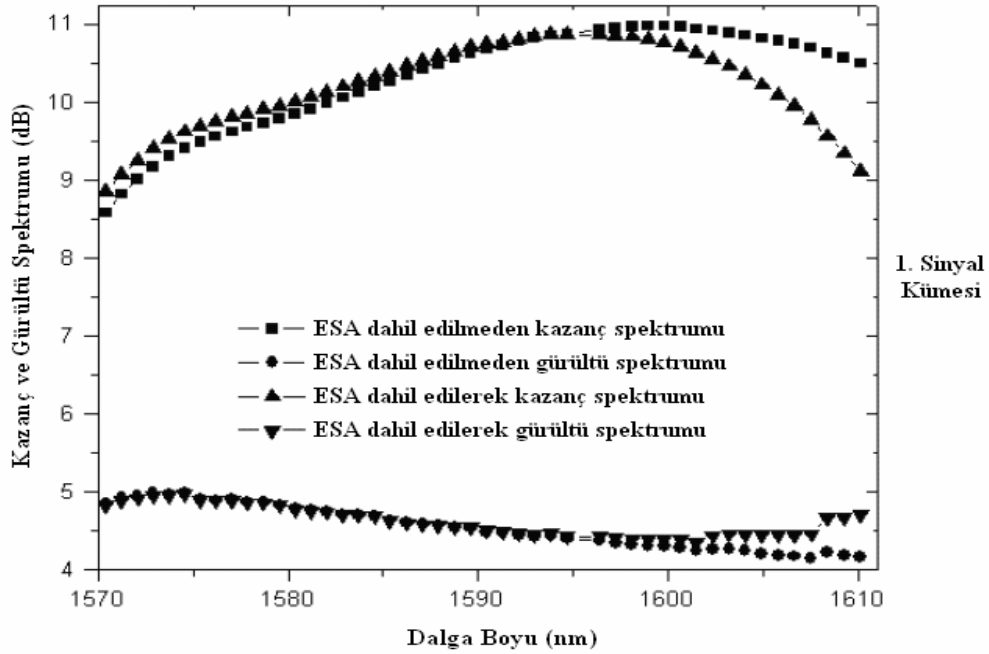
Simülasyonlar, üç değişik sinyal giriş güçleriyle yapılmıştır. Tablo-1'de üç değişik sinyal için 47 kanaldaki dalga boyu ve giriş güçleri verilmiştir. Üç değişik sinyal giriş gücü için, uyarılmış durumdaki soğrulma etkisi göz önüne alınarak ve alınmadan iki simülasyon yapılmıştır. Bu sayede, uyarılmış durumdaki soğrulmanın sonuçlardaki etkisi daha belirgin olarak gösterilmiştir. Şekil-4'te, Tablo-1'de verilen 1. sinyal girişi için kazanç ve gürültü spektrumu verilmiştir.

Tablo-1 : Üç değişik sinyal için 47 adet ayrı kanaldaki dalga boyu ve giriş güçleri.

| Dalga boyu (nm) | 1.Giriş Sinyalinin Gücü (dBm) | 2.Giriş Sinyalinin Gücü (dBm) | 3.Giriş Sinyalinin Gücü (dBm) |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1570.444 | -7.4 | -17.5 | -27.6 |
| 1571.267 | -7.6 | -17.8 | -27.8 |
| 1572.089 | -7.5 | -17.6 | -27.6 |
| 1572.911 | -8.3 | -18.4 | -28.5 |
| 1573.756 | -6.5 | -16.6 | -26.6 |
| 1574.578 | -6.4 | -16.5 | -26.6 |
| 1575.400 | -6.4 | -16.5 | -26.5 |
| 1576.200 | -7.1 | -17.1 | -27.1 |
| 1577.067 | -6.5 | -16.6 | -26.6 |
| 1577.867 | -6.5 | -16.6 | -26.6 |
| 1578.711 | -6.6 | -16.6 | -26.6 |
| 1579.556 | -6.5 | -16.5 | -26.5 |
| 1580.378 | -6.9 | -17.0 | -27.0 |
| 1581.200 | -6.7 | -16.7 | -26.7 |
| 1582.044 | -6.5 | -16.6 | -26.6 |
| 1582.889 | -6.6 | -16.7 | -26.7 |
| 1583.711 | -6.6 | -16.6 | -26.6 |
| 1584.556 | -6.5 | -16.5 | -26.5 |
| 1585.356 | -6.7 | -16.7 | -26.7 |
| 1586.244 | -6.7 | -16.7 | -26.7 |
| 1587.089 | -6.8 | -16.8 | -26.8 |
| 1587.911 | -6.5 | -16.5 | -26.5 |
| 1588.778 | -6.7 | -16.7 | -26.7 |
| 1589.600 | -5.9 | -16.0 | -25.9 |
| 1590.444 | -6.6 | -16.6 | -26.5 |
| 1591.289 | -6.7 | -16.7 | -26.6 |
| 1592.133 | -6.4 | -16.4 | -26.4 |
| 1592.956 | -6.0 | -16.0 | -26.0 |
| 1593.822 | -5.8 | -15.8 | -25.8 |
| 1594.689 | -6.2 | -16.2 | -26.2 |
| 1596.378 | -6.2 | -16.2 | -26.1 |
| 1597.222 | -6.9 | -17.0 | -26.9 |
| 1598.089 | -6.9 | -16.9 | -26.8 |
| 1598.933 | -6.9 | -16.9 | -26.8 |
| 1599.778 | -6.8 | -16.8 | -26.7 |
| 1600.622 | -6.6 | -16.6 | -26.5 |
| 1601.467 | -6.7 | -16.7 | -26.6 |
| 1602.333 | -6.6 | -16.6 | -26.6 |
| 1603.200 | -7.5 | -17.5 | -27.4 |
| 1604.022 | -6.8 | -16.8 | -26.7 |
| 1604.911 | -6.8 | -16.7 | -26.7 |
| 1605.778 | -6.7 | -16.7 | -26.6 |
| 1606.622 | -6.9 | -16.9 | -26.8 |
| 1607.489 | -6.6 | -16.6 | -26.5 |
| 1608.356 | -6.8 | -16.8 | -26.7 |
| 1609.222 | -6.8 | -16.9 | -26.8 |
| 1610.089 | -6.8 | -16.8 | -26.7 |



Şekil-3 : Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici performans analizinin sistem şeması.



Şekil-4 : Uyarılmış durumdaki soğrulma göz önüne alınarak ve alınmadan 1. giriş sinyali için kazanç ve gürültünün spektrumu.

3.2 ERBIYUM İYON ETKİLEŞİMİNİN EDFA KUVVETLENDİRME PERFORMANSINA ETKİSİ

Bu bölümde, EDFA üzerinde gerçekleşen iyon etkileşimleri incelenmiştir. EDFA üzerindeki iyon etkileşimi,

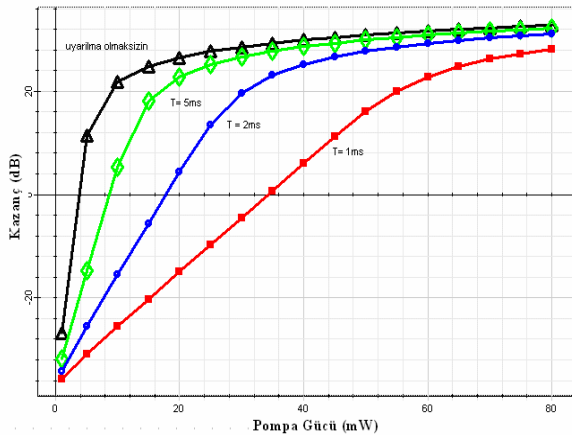
- 1) Homojen Uyarılma Etkisi (Homogeneous Upconversion Effect - HUC),
- 2) Homojen Olmayan Eş Uyarılmış Bastırma (Inhomogeneous Pair-Induced Quenching - PIQ) olmak üzere iki şekilde olur.

Yukarıdaki tanımlamalarda açıklandığı gibi, iyon etkileşimleri katılan iyonlar arasındaki enerji transferi durumuna bağlıdır. İyonların yerel konsantrasyonu yeterince yüksek seviyede olduğunda, artık bu iyonların diğer komşu iyonlardan izole olduğu farz edilebilir. Bu durum, üst seviyede meydana gelecek olan enerji transferinin tükenmesi nedeniyle kuvvetlendiricinin performansında negatif bir etkiye sahiptir.

3.2.1 HOMOJEN UYARILMA ETKİSİ

Homojen uyarılma etkisi, aslında $Er^{+3} - Er^{+3}$ etkileşim etkisidir ve EDFA üzerindeki bu etki aynı zamanda fiber üzerindeki konsantrasyonu bağlantılıdır. Yüksek seviyede erbiyum iyon konsantrasyonuna sahip olan bir fiberde ($n_t > 5 \cdot 10^{24} m^{-3}$) homojen uyarılma etkisi, düşük seviyede erbiyum iyon konsantrasyonuna sahip olan fiberde olandan daha fazla olarak kuvvetlendiricinin performansını düşürmeye eğilimlidir. Simülasyonlar, bütün fiberler için aynı erbiyum iyon konsantrasyonu öngörülerek aşağıda açıklanan dört durum için gerçekleştirilmiştir [4]. τ , ömür zamanı olmak üzere üç farklı değer seçilmiştir:

- 1) Homojen uyarılma etkisi olmadan
- 2) $\tau_{UP_1} = 1 ms$
- 3) $\tau_{UP_2} = 2 ms$
- 4) $\tau_{UP_3} = 5 ms$.



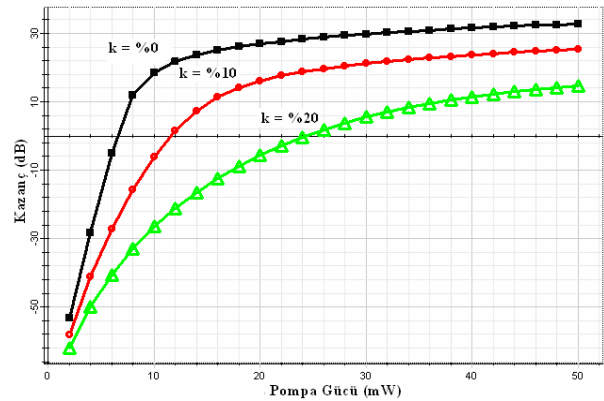
Şekil-5 : 1550 nm'de farklı uyarılma ömür zamanları için sinyal kazançları.

Simülasyonlardan sonra, pompalama gücü eğrilerine karşın kazanç, her fiber için Şekil-5'de çizilmiştir. Bu sonuçlar, uyarılma etkisinin EDFA'nın performansında azalmalara neden olduğunu göstermektedir. Kazançtaki azalmayı dengelemek için pompalama gücü artırılmalıdır. Simülasyon sonuçlarının gösterdiği gibi, iyon konsantrasyonuna bağlı olarak homojen uyarılma düşük konsantrasyonlarda göz ardı edilebilir.

3.2.2 HOMOJEN OLMAYAN EŞ UYARILMIŞ BASTIRMA

İki veya daha fazla iyon arasındaki enerji transfer oranı denilen homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi, pompalama oranından belirli bir zaman ölçeğinden oldukça fazladır; bu yüzden, pompalama gücünün, uyarılan bütün iyonları pompalayamadığı düşünülebilir. Yazılımda kullanılan bu etki, erbiyum katkılı fiber bileşeni iyileştirme menüsünde iyon-iyon etkileşimi parametresi altındaki homojen olmayan opsiyonu ile altındadır. Bu durumda, yazılımdaki göreceli demet numarasının (k) ve her demet için olan iyon sayısı (m_k)'nin fiber bileşeninde belirtilmesi gerekir. Bu çalışmada, $k = \% 1.4$ ve $m_k = 2$ örnek olarak seçilmiştir.

Simülasyonlar, homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisinin EDFA'nın performansında neden olduğu azalmayı göstermek için yapılmıştır. Giriş sinyal gücü -20 dBm seviyesinde, pompalama gücü ise 980 nm'de 2 mW'tan 50 mW'a değişen seviyelerde sabit tutulmuştur. Yapılan simülasyonlarda, her eğri için farklı olan göreceli demet sayısı dışında bütün fiber parametreleri sabit tutulmuştur. Simülasyonlardan elde edilen üç eğri, pompanın verimindeki düşmeyi göstermektedir. Şekil-6'da, farklı iki demet sayısı ($k=\%10$ ve $k=\%20$) için hesaplanan eğriler görülmektedir. Burada, aynı zamanda homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisinin olmadığı durum da ($k= \%0$) yer almaktadır.



Şekil-6 : Demet sayısının fonksiyonu olarak 1530 nm'deki kuvvetlendirici kazançlarının pompa gücüne göre değişimleri.

Simülasyon sonucunda, Şekil-6'da görüldüğü gibi, homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi, EDFA'nın performansında yüksek seviyede azalmalara neden olmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Uyarılmış Durumdaki Soğrulma (ESA) sinyalinin, optik haberleşmenin temel elemanları arasında yer alan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Uyarılmış durumdaki soğrulma etkisinin 1600 nm'de hissedildiği görülebilir ve bu etki, beklenildiği gibi, 1600 nm'den düşük dalga boylarında kazancı düşürmektedir.

Çalışmada, EDFA üzerinde meydana gelen erbiyum iyon etkileşiminin kazanca olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu etkilerden birincisi olan homojen uyarılma etkisi, EDFA'nın performansında azalmalara neden olmaktadır. Kazançtaki bu azalmayı dengelemek için pompalama gücünün artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi denilen ikinci etki ise, birinci etkide olduğu gibi, EDFA'nın performansında yüksek seviyede azalmalara neden olmaktadır. Çalışmada, demet sayısının oransal olarak azaltılması ($k = \%0$)

ile homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi, EDFA kazancı üzerinde en az seviyeye indirgenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] P. C. Becker, N. A. Olsson and J. R. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*, Academic Press, San Diego, 1999.
- [2] S. F. Su, R. Olshansky, D. A. Smith and J. E. Baran, "Flattening of erbium-doped fiber amplifier gain spectrum using an acousto-optic tunable filter", *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 5, pp. 477-478, 1993.
- [3] E. L. Goldstein, L. Eskilden, V. da Silva, M. Andrejco and Y. Silberberg, "Inhomogeneously broadened fiber-amplifier cascades for transparent multiwavelength lightwave networks", *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 782-790, 1995.
- [4] B. Altuner, *Erbiyum Katkılı Fiberlerin Modellenmesi ve Simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.