

**T. C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NADİR TOPRAK–KATKILI TEK-MODLU FİBER
KUVVETLENDİRİCİLERİN TASARIM VE
OPTİMİZASYONUNA SICAKLIĞIN ETKİSİ**

**Tezi Hazırlayan
Cüneyt BERKDEMİR**

**Tezi Yöneten
Prof. Dr. Sedat ÖZSOY**

**Fizik Anabilim Dalı
Doktora Tezi**

Ağustos 2005

KAYSERİ

**T. C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NADİR TOPRAK–KATKILI TEK-MODLU FİBER
KUVVETLENDİRİCİLERİN TASARIM VE
OPTİMİZASYONUNA SICAKLIĞIN ETKİSİ**

**Tezi Hazırlayan
Cüneyt BERKDEMİR**

**Tezi Yöneten
Prof. Dr. Sedat ÖZSOY**

**Fizik Anabilim Dalı
Doktora Tezi**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FBT-04-17 kodu ile desteklenmiştir.**

Ağustos 2005

KAYSERİ

Bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

03 / 08 / 2005

JÜRİ:

Üye : Prof. Dr. Abdullah VERÇİN

Üye : Prof. Dr. Mustafa KESKİN

Üye : Prof. Dr. Mehmet GÜNDÜZ

Üye : Prof. Dr. Sedat ÖZSOY

Üye : Doç. Dr. Ayhan GÜLDESTE

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 02/09/2005 tarih ve 30/15 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

02 / 09 / 2005



Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü
Mühür ve İmza

TEŞEKKÜR

Hazırlamaktan büyük mutluluk duyduğum bu Doktora tez çalışmamda;engin bilgi ve tecrübeleri doğrultusunda tezin oluşumuna katkıda bulunan, güler yüzlü yaklaşımları ile her konuda yardımlarını esirgemeyen ve çalışmalarına yön verip her zaman beni destekleyen, değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Sedat ÖZSOY’a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen sevgili eşim ve aileme gösterdikleri anlayıştan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında FBT-04-17 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan Erciyes Üniversitesi Araştırma Fonu Başkanlığı’na ve yardımlarından dolayı tüm arkadaşlarıma en içten dileklerle teşekkür ederim.

**NADİR TOPRAK–KATKILI TEK-MODLU FİBER
KUVVETLENDİRİCİLERİN TASARIM VE OPTİMİZASYONUNA
SICAKLIĞIN ETKİSİ**

Cüneyt BERKDEMİR
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Ağustos 2005
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedat ÖZSOY

ÖZET

Erbiyum-katkılı fiber kuvvetlendirici (EKFK)’ler fiber-optik haberleşme sistemleri için üçüncü pencere olarak adlandırılan 1550 nm dalgaboyunda geniş-bandlı (~ 30 nm) bir ışıma kuvvetlendirmesi sağlarlar. Bu çalışmada, 1480 nm ve 980 nm’de pompalanan bir EKFK’nin sinyal kazancının sıcaklığa bağlılığı için analitik bir ifade, kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım (KKY)’ın eklendiği sıcaklık-hassasiyetli yayınım denklemlerini çözerek elde edildi. Bu ifadede, amacımız, EKFK’lerin sıcaklık-bağımlı kazanç karakteristiklerinin sadece tesir kesitlerindeki değişimden değil, aynı zamanda Stark etkisi ile yarılan yarı kararlı seviyedeki ($^4I_{13/2}$) iyon doluluklarının Boltzmann dağılımından meydana geldiğini göstermektir. Nümerik hesaplamalar, -20 °C’den $+60$ °C’a kadar değişen sıcaklık bölgesi ve çeşitli fiber uzunlukları için yapıldı. Kazancın, 1480 nm pompalama şartları altında 24 m’lik ve 980 nm pompalama konfigürasyonunda 13 m’lik bölge içerisinde sıcaklığın artması ile azaldığı görüldü.

Diğer, ilgi çekici nadir-toprak katkılı fiber kuvvetlendirici, dalgaboyları ikinci pencerede ve hemen hemen tüm uzun mesafeli optik haberleşme ağlarında kullanılan 1300 nm iletim sistemlerinde başlıca cihaz olan praseodimyum-katkılı fiber kuvvetlendirici (PKFK)’lerdir. Fluorid konakçıya katkılanan Pr^{3+} ’nın enerji seviyeleri sıcaklık-hassasiyetli oran denklemleri aracılığı ile modellendi. 1017 nm’de pompalanan bir PKFK’nin sinyal kazancının sıcaklığa bağımlılığı için analitik ifadeler oran denklemlerini çözerek elde edildi. Kazancın sıcaklığa bağımlılığının $^3F_4 \leftrightarrow ^3F_3$ seviyelerindeki Pr^{3+} iyonlarının doluluk dağılımına kuvvetlice bağımlı olduğu görülmüştür. Nümerik sonuçlar 0 °C, 20 °C ve 40 °C için verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nadir-toprak elementleri, Erbiyum, Praseodimyum, Optik kuvvetlendirici, Optimizasyon.

EFFECT OF THE TEMPERATURE TO DESIGN AND OPTIMIZATION OF THE RARE-EARTH-DOPED SINGLE-MODE FIBER AMPLIFIERS

Cüneyt BERKDEMİR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph. D. Thesis, August 2005

Thesis Supervisor: Prof. Sedat ÖZSOY

ABSTRACT

Erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) provide a broadband (~ 30 nm) amplification of radiation whose wavelengths are in the so-called third window for fiber-optic communication systems at 1550 nm. In this study, an analytical expression for the temperature dependence of the signal gain of an EDFA pumped at 1480 nm and 980 nm is obtained by solving the temperature-sensitive propagation equations including the amplified spontaneous emission (ASE). In this expression, our motivation is shown that the temperature-dependent gain characteristics of EDFAs result from not only the changes in cross sections but also the Boltzmann distribution of ion population in the metastable level ($^4I_{13/2}$), which is split by the Stark effect. Numerical calculations are carried out for the temperature range from -20 to $+60$ °C and the various fiber lengths. It is shown that the gain decreases with increasing temperature within the range of 27 m under the condition of 1480 nm pumping and the range of 13 m at 980 nm pumping configuration.

Other type interesting rare-earth-doped fiber amplifiers is praseodymium-doped fiber amplifiers (PDFAs), whose wavelengths are in the so-called second window and the leading devices in 1300 nm transmission systems that are used in almost all terrestrial optical communication networks. The energy levels of Pr^{3+} doped to fluoride host are modelled by means of the temperature-sensitive rate equations. Analytical expressions for the temperature dependence of the signal gain of a PDFA pumped at 1017 nm are obtained by solving the rate equations. It is seen that the temperature dependence of the gain strongly depends on the distribution of population of Pr^{3+} -ions in the $^3F_4 \leftrightarrow ^3F_3$ levels. Numerical results are given for 0 °C, 20 °C and 40 °C.

Keywords: Rare-earths elements, Erbium, Praseodymium, Optical amplifier, Optimization.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
KAPAK	I
ONAY	II
TEŞEKKÜR	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
İÇİNDEKİLER	VI
SEMBOL VE ŞEKİLLER LİSTESİ	VII

BÖLÜM 1

GİRİŞ	1
-------	---

BÖLÜM 2

**ÜÇ VE DÖRT SEVİYELİ SİSTEMLERDE ORAN DENKLEMLERİ VE
SICAKLIK BAĞIMLI TERS DOLULUK İFADELERİ**

2.1. Giriş	14
2.2. Üç Seviyeli Sistemler için Oran Denklemleri	16
2.2.1. 980 nm Pompalama Konfigürasyonunda Sıcaklığa Bağımlılık	23
2.2.2. 1480 nm Pompalama Konfigürasyonunda Sıcaklığa Bağımlılık	25
2.2.3. Sıcaklığa Bağımlı Ters Doluluk İfadelerinin Pompalama Konfigürasyonları için Karşılaştırılması	27
2.3. Dört Seviyeli Sistemler için Oran Denklemleri	32

BÖLÜM 3

**ERBİYUM VE PRASEODİMYUM KATKILI TEK MODLU FİBER
KUVVETLENDİRİCİLERDE KAZANCIN SICAKLIK
BAĞIMLI MODELLENMESİ**

3.1. Giriş	39
3.2. Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile EKFK'lerin Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi	41
3.3. Modifiye Edilmiş Yayınım Denklemleri ile EKFK'lerin Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi	47
3.4. Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile PKFK'lerin Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi	59

BÖLÜM 4

NÜMERİK SONUÇLAR

4.1. EKFK için Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile Elde Edilen Sonuçlar	64
4.2. EKFK için Modifiye Edilmiş Yayınım Denklemleri ile Elde Edilen Sonuçlar	78
4.3. PKFK için Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile Elde Edilen Sonuçlar	87

BÖLÜM 5

TARTIŞMA VE SONUÇ	89
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	110

SEMBOLLER LİSTESİ

EKFK	: Erbiyum–Katkılı Fiber Kuvvetlendirici,
PKFK	: Praseodimyum–Katkılı Fiber Kuvvetlendirici,
UDS	: Uyarılmış Durum Soğurumu,
KKY	: Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım,
DBÇ	: Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama,
YDBÇ	: Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama,
YOK	: Yarıiletken Optik Kuvvetlendirici,
ZBLAN	: ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - NaF ,
R_p	: 1-3 ve 3-1 seviyeleri arasındaki atomların, sırasıyla, pompalanma ve zorlamalı yayınım olasılıkları,
R_s	: 1-2 ve 2-1 seviyeleri arasındaki atomların, sırasıyla, zorlamalı soğurum ve zorlamalı yayınım olasılıkları,
τ	: Yarı kararlı seviyenin yaşam süresi,
β	: Sıcaklık bağımlı Boltzmann faktörü,
η	: Sinyal yayınım tesir kesitinin sinyal soğurum tesir kesitine oranı,
$R_p \tau$	: Normalize pompalama oranı,
$R_p^e \tau$	: Eşik pompalama oranı,
S_{12}	: Sinyal soğurum olasılığı,
S_{21}	: Sinyal yayınım olasılığı,
P_p	: Pompa gücü,
P_s	: Sinyal gücü
$P_{KKY}^{\pm}$	: İleri ve geri yönlü kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım gücü,
Γ_p, Γ_s	: Pompa ya da sinyal ışınına ait optik şiddet dağılımı ile iyon dağılımı arasındaki mod örtüşme faktörü,
$\sigma_{12,21}$	: EKFK için sinyal soğurum ve yayınım tesir kesitleri,
$\sigma_{13,31}$	: EKFK için pompa soğurum ve yayınım tesir kesitleri,
G (dB)	: Desibel (dB) cinsinden sinyal kazancı,
P_{p0}	: Maksimum dönüşüm verimine karşılık gelen pompa gücü,
$P_s^{\text{öz}}$	: Sinyal ışınının öz doyum gücü.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Genel üç seviyeli kuvvetlendirme sistemi.	16
Şekil 2.2.	Silika camda Er^{3+} iyonunun olası bağ yapısı. D_3 simetrisine bükülen oktahedral yapının konik eksen şeklini aldığı görülmektedir [114].	18
Şekil 2.3.	$^4I_{15/2}$ ve $^4I_{13/2}$ seviyeleri arasındaki 12 Stark geçişini gösteren enerji diyagramları. a) Soğurum spektrumu ölçümlerinden alınan geçişleri (A: soğuruma ait 12 farklı geçiş temsil etmektedir) b) Yayınım spektrumu ölçümlerinden alınan geçişleri (F: yayınıma ait 12 farklı geçiş temsil etmektedir) göstermektedir. $^4I_{13/2}$ seviyesinde parantez içerisinde görülen rakamlar, ilgili seviyenin başlangıç enerji değerinden olan farklılığı göstermektedir [115].	19
Şekil 2.4.	Her iki pompalama durumunu gösteren ve erbiyum elementine karşılık gelen temel üç seviyeli kuvvetlendirme sistemi.	23
Şekil 2.5.	Er^{+3} -katkılı fiber kuvvetlendiricilerde dikkate alınan ve iki seviyeye indirgenmiş gibi düşünülebilen çok katlılığa sahip kuvvetlendirme sisteminin enerji seviyeleri.	25
Şekil 2.6.	980 nm pompalama durumunda bağıl ters doluluğun normalize pompalama oranına göre değişimi ($R_s\tau = 0$; sisteme uygulanan herhangi bir normalize sinyalin olmadığı durumu temsil etmektedir).	27
Şekil 2.7.	1480 nm pompalama durumunda normalize pompalama oranı ($R_s\tau = 0,55$)'na göre bağıl ters doluluğun değişimi. Sıcaklığın $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 'dan $+40\text{ }^\circ\text{C}$ 'a kadar artması durumunda bağıl ters doluluğun azaldığı görülmektedir.	30
Şekil 2.8.	Oda sıcaklığında pompalama konfigürasyonlarının karşılaştırılması. (1a) ve (1b) eğrilerindeki davranış, sırasıyla, $R_s\tau = 0$ ve $R_s\tau = 0,55$ değerleri için 980 nm'de pompalanan sisteme aittir. Benzer şekilde 1480 nm'de pompalanan sistem için de (2a) ve (2b) eğrileri geçerlidir.	31
Şekil 2.9.	Pr^{3+} 'ya ait temel dört seviyeli kuvvetlendirme sistemi.	32
Şekil 2.10.	1017 nm pompalama konfigürasyonunu gösteren praseodimyum elementine karşılık gelen temel dört seviyeli enerji diyagramı (kesikli çizgili oklar seviyeler arasındaki kendiliğinden yayınıma temsil etmektedir).	34
Şekil 2.11.	Pr^{3+} için 1017 nm pompalama durumunda bağıl ters doluluğa göre normalize pompalama oranı.	37
Şekil 3.1.	Çeşitli camsı konakçı malzemelere katkılanmış Er^{3+} iyonuna ait üç seviyeli kuvvetlendirme sistemi.	42

Şekil 3.2.	Fiber kuvvetlendirici ekseni boyunca ileri ve geri yönlü KKY gürültüsü gücünün konuma bağlı değişimi [139].	58
Şekil 3.3.	1017 nm pompalama durumunu gösteren Pr^{3+} -katkılı sistem için dört seviyeli enerji diyagramı.	60
Şekil 3.4.	1G_4 seviyesinin yaşam süresinin sıcaklığa bağımlılığı [67].	63
Şekil 4.1.	$P_p = 50 \text{ mW}$ için 980 nm pompalama durumunda KKY gücünün sinyal dalgaboyuna göre değişimi. Sinyal dalgaboyunun a) 1531 nm b) 1544 nm olduğu durum için spektral dağılım şekilleri (OptiAmplifier 4.0 yazılım programından).	67
Şekil 4.2.	$P_p = 50 \text{ mW}$ için 1470 nm pompalama durumunda sinyal kaynağının çalışma dalgaboyunun a) 1531 nm b) 1544 nm olduğu durum için, KKY güçlerinin 1500-1600 nm dalgaboyu aralığında spektral dağılımları (OptiAmplifier 4.0 yazılım programından).	68
Şekil 4.3.	980 nm pompalama durumu için farklı sıcaklık değerlerindeki bağıl ters doluluğun normalize pompalama oranına göre değişimi.	69
Şekil 4.4.	980 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki 1544 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.	70
Şekil 4.5.	980 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki 1531 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.	71
Şekil 4.6.	1470 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki EKFK için bağıl ters doluluğun normalize pompalama oranına göre değişimi.	73
Şekil 4.7.	1470 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki EKFK için 1544 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.	74
Şekil 4.8.	1470 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki EKFK için 1531 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.	75
Şekil 4.9.	Pompa gücüne karşı sinyal kazancının değişimi. Giriş sinyal gücünün artması durumunda kazancın azalmakta olduğu görülmektedir [120].	77
Şekil 4.10.	$\lambda_s = 1530 \text{ nm}$ için farklı sıcaklık değerlerinde 1480 nm pompa kaynağı ile pompalanan fiber kuvvetlendiricide sinyal kazancının EKFK uzunluğu ile değişimi.	80
Şekil 4.11.	$\lambda_s = 1530 \text{ nm}$, $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$, $P_s^g = 10 \mu\text{W}$ ve $P_p^g = 30 \text{ mW}$ için KKY gücünün EKFK uzunluğu ile değişimi.	81

Şekil 4.12.	$\lambda_s = 1558 \text{ nm}$ için farklı sıcaklık değerlerinde 980 nm pompa kaynağı ile pompalanan fiber kuvvetlendiricide sinyal kazancının EKFK uzunluğu ile değişimi.	84
Şekil 4.13.	$\lambda_s = 1558 \text{ nm}$, $\lambda_p = 980 \text{ nm}$, $P_s^g = 10 \text{ } \mu W$ ve $P_p^g = 30 \text{ mW}$ için KKY gücünün EKFK uzunluğu ile değişimi.	85
Şekil 4.14.	PKFK için pompa gücüne (mW) göre sinyal kazancı (dB)'nin değişimi.	88
Tablo 2.1.	Er^{3+} -katkılı fiber kuvvetlendirici için farklı sıcaklık değerlerinde β parametresinin aldığı değerler.	29
Tablo 2.2.	Pr^{3+} -katkılı fiber kuvvetlendirici için farklı sıcaklık değerlerinde β parametresinin aldığı değerler.	37
Tablo 4.1.	980 ve 1470 nm'de pompalama için gerekli fiber parametreleri.	65
Tablo 4.2.	Sıcaklık bağımlı β ve η parametrelerinin farklı sıcaklıklardaki değerleri.	66
Tablo 4.3.	1480 nm pompalama durumu için sıcaklık bağımlı model kapsamında optimizasyon hesaplarında kullanılacak parametreler ve onların değerleri.	79
Tablo 4.4.	980 nm pompalama durumu için sıcaklık bağımlı model hesaplarında kullanılacak parametreler ve onların değerleri.	82
Tablo 4.5.	Maksimum kazanca karşılık optimum fiber kuvvetlendirici uzunluklarının farklı sıcaklık değerlerindeki değişimi.	86

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Fiber optik teknolojisinde yapılan araştırmaların yaklaşık son yirmi yılından sonra, keşfedilecek başka ne tür yeniliklerin kaldığı sorusu sorulmalıdır! Şu nokta oldukça açıktır ki, optik fiberlerin tasarımı çok fazla iyileştirilememektedir. Günümüz teknolojisinde, fiberler kilometre başına %5'lik minimum güç kaybına sahip ve dispersiyon etkisiz tek bir elektromanyetik mod içerisindeki kızıl ötesi (1,5 μm dalga boyu) ışık palslarını taşıyabilmektedir. Fakat optik fiberlerin kullanım alanları pek çok sürprizler içermektedir. Gerçekte, beş on yıl öncesine kadar nadir toprak–katkılı fiber kuvvetlendiriciler üzerinde yapılan yararlı çalışmalar ile ilgili gelişmeler şaşırtıcı boyutlara ulaşmıştır [1].

Optik sinyallerin taşınmasında gerekli olan iletim hattı uzunluğunun artırılması için gerekli olan optik kuvvetlendirmenin yararı, bir optik kuvvetlendirici olan gaz lazerler ile 1960'lı yılların başlarında deneysel olarak gösterilmişti. Neodimyum gibi nadir toprak-iyonları ile katkılı optik fiber kuvvetlendiriciler tasarlama çalışmaları 1964'lü yıllarda ilk olarak Charles Koester ve Elias Snitzer tarafından gerçekleştirilmişti [2]. Böyle bir fiber kuvvetlendirici, palslı modda çalışan flaş lambalar ile pompalanmıştı. Düşük iletim hattı kayıplarına sahip ilk optik fiber kuvvetlendirici 1970'lerin başlarında gösterildi. Fakat 1970'li yılların ortalarında yarıiletken lazerlerin hızlı gelişiminin bir sonucu olarak, bu tür lazer kaynak uygulamalarına doğru yönelimin artması nedeniyle

nadir toprak–katkılı fiberler unutulma noktasına gelmişti. 1980’li yılların ortalarında bu durum değişerek, Southamton Üniversitesinden (İngiltere) David N. Payne’nin gözetimindeki bir araştırma grubu tarafından, nadir toprak elementlerinden Erbiyum’un iyonlarının fiber içerisine katkılanması ile haberleşme sistemleri için en uygun dalga boyu olan 1,5 μm ’de optik kazancın yükseltilebileceği gösterildi [3]. 1989’a gelindiğinde, erbiyum–katkılı fiber kuvvetlendiriciler, (EKFK; Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) üzerine yapılan araştırmaların kesinlikle yararlı olduğu anlaşıldı. Bu dönemde pek çok araştırma grubunun EKFK içerikli sistemler üzerine yapmış oldukları deneysel çalışmaları rapor ettikleri görülmektedir. Özellikle, Japonya’dan NTT’deki araştırmacılar ilk kez 1,48 μm dalga boyu yakınlarında pompalama yapmak için pompa kaynağı olarak geliştirmiş oldukları InGaAsP lazer diyotları kullandılar [4].

Bu gelişmelerin yanında pek çok yönden üstünlükleri olan EKFK’lerin fiziksel özelliklerini de dikkate almak oldukça önemli bir araştırma konusu olmaktadır. EKFK’nın kazancının gerçekte ışık kutuplanmasından etkilenmemesi oldukça önemli bir avantajdır. Kazancın 100 °C’lik bir bölge civarında kararlı olması da bir başka üstünlük olarak sayılabilmektedir. Bununla birlikte, pratik uygulamalarda oldukça önemli bir özellik olarak, EKFK’ların haberleşme sistemlerindeki fiberlere bağlanma veya çiftlenme kayıpları da çok düşüktür.

Nadir-toprak elementleri yardımı ile yapılması düşünülen kuvvetlendirme işleminde, dalga boyu seçimini nadir-toprak elementi-iyonunun enerji seviyelerine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. EKFK’lerin en verimli çalışma durumu ancak 1,5 μm dalga boyuna sahip sinyallerde görülmektedir. Bunun sebebi ise, bu sinyal dalga boyu civarında, üç seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren erbiyum-iyonlarının enerji seviyelerinin, cam ya da kristalimsi konakçı (host)’lar içerisinde en az bozulmalara uğramasıdır. Özellikle, EKFK’lerin optik haberleşme için üçüncü pencere olarak isimlendirilen dalga boyunda yaklaşık 30 nm’lik geniş bir bant aralığında ışımının kuvvetlendirilmesi olayını sağlaması dikkat çekicidir.

Aktif bir fiberde, yani fiber haberleşme ağında kuvvetlendirici olarak görev alan bir fiberde, erbiyum iyonlarını üst enerji seviyelerine pompalamak için sinyal ışımından daha kısa dalga boyuna sahip pompa ışımını kullanılır. Kuvvetlendirme konusunun ilk

araştırılma aşamasında pompa kaynağı görünür bölge dalga boyunda çalışmaktaydı. Günümüzde ise, 980 nm veya 1480 nm dalga boyunda çalışan pompa kaynakları kullanılmaktadır. Böylece, iyi bir pompalama etkinliği sağlanmakta ve “uyarılmış durum soğurumu (UDS; Excited State Absorption, ESA)” etkisinden kaçınılmaktadır [1-4].

Fiber kuvvetlendirici veriminin analizi için pek çok teorik çalışma yapılmıştır. Kuvvetlendirme mekanizmasında yer alan kazanç, gürültü faktörü, “kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım” (KKY; Amplified Spontaneous Emission, ASE) ve UDS üzerinde çeşitli çalışmalar vardır. Bu çalışmalarda, genellikle, fiber boyunca katkılama konsantrasyonunun ve alan dağılımlarının düzgün olduğu kabulü yapılmıştır. Düzgün olmayan katkı dağılımları ve fiber içerisinde ilerleyen modların şiddet dağılımları sadece küçük sinyal şartlarında göz önüne alınan durumlardır. Burada, erbiyum iyonlarının enerji seviye doluluklarının indüklenen sinyal ile değişimi ihmal edilmiştir. Bu durumlar, oran denklemleri nümerik olarak çözülerek incelenmektedir [5, 6].

Son yıllarda erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerde kazancı modellemek için çeşitli analitik çalışmalar yapılmaktadır [7]. Burada, giriş güçleri ve fiber uzunluğu cinsinden fiber kuvvetlendiricinin kazancının tanımlanması yoluna gidilmektedir [8, 9]. Analitik ya da matematiksel bir tanımlama için başta gelen zorluk, fiber kuvvetlendiricinin enine özelliklerinin, yani mod alan profilleri ve erbiyum dağılımının, tam olarak üst üste getirilememesinden kaynaklanmaktadır. Yine de bazı yaklaşımlar ile bu zorlukları aşmak mümkündür. Oran denklemleri yaklaşımı ile, maksimum kazancı elde etmek için en azından fiber uzunluğu üzerine sinyal ve pompa güçlerinin bağımlılığı araştırılarak optimum uzunluk belirlenebilir. Ancak, tam bir analiz için maksimum kazanç üzerinde sıcaklığın da etkisi olduğunu hesaba katmak gerekir [10, 11].

Sıcaklığın etkisiyle erbiyum-katkılı kuvvetlendiricinin kazanç katsayısındaki % 1’lik değişim, 30 dB’lik kazançla sahip tipik bir EKFK’de 0.3 dB’lik bir kazanç farkına neden olduğu dikkate alınacak olursa, sıcaklık faktörünün ne kadar önemli olduğu anlaşılabilir [12]. Bu değişim, bir EKFK’de 1 dB’lik kazanç elde etmek için gerekli olan limit koşulların önemli bir kısmını oluşturur. 1.5 μ m haberleşme sistemleri için bir EKFK’nin en iyi çalışma performansı -40 ile +65 °C’lık sıcaklık bölgesinde gerçekleşmektedir.

Özellikle, 980 nm pompalama dalga boyunda sıcaklıktan bağımsız EKFK tasarımları da dikkat çekmektedir [13, 14]. Bu çalışmalarda, 980 nm bandındaki pompa dalgaboyu optimize edilerek, geniş bir sıcaklık bölgesinde sıcaklıktan bağımsız EKFK geliştirme düşüncesi oldukça önemli başarılar sağlamıştır. 980 nm pompa dalga boyunda EKFK'nın kazanç spektrumunun sıcaklığa bağımlı değişimi incelenerek, özellikle 1540 nm'den daha küçük sinyal dalgaboylarında performans analizleri yapılmıştır. Bir EKFK'nın sıcaklıktan bağımsız çalışması için 975,7 nm dalgaboyunda pompalanması gerektiği belirlenmiştir. Sıcaklık aralığının 0-65 °C olmasına rağmen kazanç spektrumundaki değişimin 0,18 dB olması önemli bir aşama olarak kabul edilmektedir. EKFK'ların en verimli çalışma dalgaboylarından birisi de 1480 nm'dir. 980 nm'de pompalama durumundan farklı olarak, bu dalgaboyunda çalışmak kazanç ve gürültü faktörü bakımından daha baskındır [15-17]. Yani, kazanç ve gürültü karakteristiklerinin sıcaklığa bağımlılığı ihmal edilemez olmaktadır. Bunun nedeni ise, pompa ve sinyal kaynaklarından kuvvetlendiriciye gönderilen enerjilerin birbirine yakınlığından ve taban seviye ile yarı-kararlı seviye içerisindeki erbiyum iyonlarının dağılımlarının sıcaklığa bağımlılığından ileri gelmektedir. Pekçok EKFK sisteminin çalışma sıcaklık aralığı olan -40 ile +60 °C sıcaklık bölgesinde yapılan deneysel çalışmalarda 1480 nm pompalama konfigürasyonunda kazanç değişiminin 1,5 dB olduğu belirlenmiştir. O halde, 980 nm ile karşılaştırıldığında 1480 nm'de pompalama yapmak sıcaklığa bağımlılık bakımından yararlı olmamaktadır. Ancak, fiberin konakçı malzemesini değiştirerek daha kullanışlı kuvvetlendiriciler tasarlamak da mümkündür.

Optik haberleşme alanının gelişiminin yeni tip fiberlere bağlı olduğu düşünüldüğünde [18], konakçı malzemenin önemi biraz daha artmaktadır. Son otuz yıldır SiO₂-cam fiberlerin geliştirilmesi üzerinde durulmuş ve kazanç bakımından en verimli EKFK tasarımı için teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmaların daha çok kısa uzunluklu Er³⁺-katkılı alüminyum-silika fiber kuvvetlendiriciler ile yapıldığı yıllarda 980 nm pompa kaynakları kullanılmıştı [19-21]. Gücün fiber öz bölgesine hapsedildiği modal güç dağılım teknikleri ile yapılan teorik çalışmalar, 1480 nm'de pompalama yapılabileceğini belirledi [22, 23]. Daha sonra, bu pompa dalgaboyunda pompalamanın yapılabildiği deneysel çalışmalarla gösterildi [24]. Ancak, daha verimli çalışan fiber kuvvetlendirici arayışı son bulmadı. Bu amaçla, farklı konakçı malzemelerden oluşan fiber yapılar üzerinde duruldu. Geniş bantlı dalgaboyu bölmeli

çoğullama (DBÇ; Wavelength Division Multiplexing, WDM) sistemleri için optik kuvvetlendirici olarak fluoride-bazlı erbiyum-katkılı fiber kuvvetlendiriciler tasarlandı [25]. Bu tip kuvvetlendiriciler 80 °C'nin civarındaki sıcaklıklarda oldukça verimsiz çalışmakta ve kazanç değerini düşürücü etkisi olan gürültü faktörü de oldukça yüksek değerlerdeydi. En düşük gürültü değeri 1480 nm pompalama ile 6-7 dB olarak rapor edildi. Halbuki, bu değer daha düşük olması gerekmektedir. Bu durumda, 970 nm'de pompalama ile gürültü değeri $3,5 \pm 0,5$ dB'e kadar düşürüldü. Fakat beklenen, gürültü faktörünün 3 dB'nin altındaki değerlere çekilmesiydi. Bunun için daha farklı fiber yapı arayışlarına gidildi. DBÇ iletim sistemlerinin artan kapasiteleri nedeni ile, $1,55 \mu\text{m}$ 'de geniş yayılım bandı özelliği gösteren Er^{3+} -katkılı $43\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-xB}_2\text{O}_3\text{-(57-x)SiO}_2$ cam yapılar üzerinde duruldu. Ayrıca, potasyum bizmut gallate ($\text{K}_2\text{O-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$) camlar daha yüksek sıcaklık bölgelerinde çalışan ve daha düşük gürültü değerlerine sahip optik kuvvetlendiriciler tasarlamayı sağladı [26]. Sıcaklıktan bağımsız çalışan tasarımların hız kazandığı günümüzde, Er^{3+} -katkılı boro-tellurite camlar dikkat çekmektedir. Er^{3+} -katkılı tellurite cama boron-oksit'in katılması ile fonon enerjisinin artırıldığı ve böylece daha geniş bantlı kuvvetlendiriciler tasarlanabileceği rapor edilmiştir. Bu tip camlar, optik, ısı ve kimyasal dayanıklılık gibi özelliklerini kaybetmeden yüksek fonon enerjileri sağlamaktadır [27]. Optik band genişliğinin artırılmasına yönelik çalışmalardan bir diğeri ise tellurite camlarda Er_2O_3 konsantrasyonunun artırılması konusudur [28]. Er^{3+} iyonlarının konakçı malzeme içerisindeki yerel konumunun etkisi ve spektroskopik değişimleri, çizgi genişlemesi olarak bilinen band yapısını açıklamak için dikkate alınır. Er^{3+} iyonu etrafındaki kristalimsi alanın etkisiyle meydana gelen homojen olmayan genişlemeler soğurum spektrumu üzerinde çok az etkiye sahiptir ve böylece kazanç değerini azaltıcı etki olarak bilinen homojen olmayan çizgi genişlemeleri de gözlemlenmez. Bu bakımdan, tellurite camlar gittikçe artan bir öneme sahiptir [29-30]. Tellurite camlar kadar dikkat çeken diğer konakçı malzemeler ise sodyum fosfat ve galyum lantanyum sülfid camlardır. Bu malzemeler de yüksek konsantrasyonlu Er^{3+} iyonları ile katkılандığı zaman yüksek kazanç değerlerine sahip EKFK tasarımında kullanılmaktadırlar [31-33].

EKFK tasarımından önce belirlenmesi gereken önemli bir aşama ise modelleme kısmıdır. Yapılacak cihazın hangi şartlarda ne tür kazanç değerlerine sahip olacağı bilgisi bu kısımda planlanmaktadır. Bu amaçla, pek çok teorik ve nümerik çalışma

yapılmaktadır. EKFK'lar için genel bir bilgisayar modeli hem kazanç hem de gürültü değerlerini hesaplayabilmektedir [34]. Bu nedenle bir fiber kuvvetlendiricinin davranışını tanımlamak için basit bir yayılım denklemi modeli kullanılmaktadır. Alışıl gelmiş metotlarla yapılan çalışmalarda, maksimum kazanç analizi için oran ya da yayılım denklemlerinin çözülmeye çalışıldığı bir gerçektir. Enerji durumlarındaki doluluklar üzerine sinyal gücünün etkisi ile KKY'nin ilave edildiği analitik çalışmalar geliştirilmiştir. Sadece kazanç karakteristikleri üzerine incelemelerin yapıldığı çalışmaların yanı sıra, optimum şartlarda çalışan EKFK tasarımı üzerinde de durulmuştur [35, 36]. Geniş bantlı EKFK'nin optimum şartlarda çalışması için gerekli tasarım bilgisi, tek ya da çok kanallı sistem uygulamaları sırasında en az kazanç değişimi ile sabit kazanç değerini elde etmek üzerine kurulmuştur [37]. Çalışmaların büyük bir kısmı geniş-band yapısına sahip silika-bazlı erbiyum-katkılı fiberlerin en iyi çalışma şartlarını belirlemek için yapıldı. Birim uzunluk başına 1,58 dB'lik kazanç değerine sahip EKFK'lerin üretilmesi oldukça başarılı sayıldı. Sinyal dalga boyunun 1570 nm seçilmesi ile bu değer 18 m uzunluklu bir EKFK için 42,26 dB olarak rapor edilmesi (birim uzunluk başına 2,34 dB) başarılı sayıldı. Bu raporda, yüksek konsantrasyonlu Er^{3+} iyonlarına yine yüksek konsantrasyonlu alüminyum (Al) elementinin katkılı olduğu belirtilmişti [38]. Erbiyum-katkılı fiber uzunluğunun kısaltılması ile en iyi kazanç değerine ulaşılabildiği ve kazanç karakteristiklerini belirleyen denklemlerin daha basit analitik şeklini elde etmek için moda bağlı şiddet profili olarak dikdörtgen alan yaklaşımının seçilmesi gerektiği üzerine pek çok deneysel, teorik ve nümerik çalışmalar yapılmaktadır [39-46].

Son yıllarda yapılan araştırmaların sonuçlarına göre kuvvetlendirme verimliliği bakımından dikkat çeken bir diğer nadir toprak elementi de dört seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren praseodimyum'dur. Praseodimyum-katkılı fiber kuvvetlendiriciler (PKFK; Praseodmium-doped Fiber Amplifier, PDFA), haberleşme sistemlerinde kullanılan diğer standart dalga boyu olan 1,3 μm dalga boyunda çalışmaktadır. Bu tip kuvvetlendiricilerde Pr-iyonları bir lazer kaynağından çıkan 1,03 μm pompa ışık şiddeti ile $^3\text{H}_4$ -taban seviyeden $^1\text{G}_4$ seviyesine pompalanır. 1,3 μm civarındaki sinyalin kuvvetlendirilmesi olayı, $^1\text{G}_4$ - $^3\text{H}_5$ geçişleri sırasında meydana gelir. Dolayısı ile, $^1\text{G}_4$ - $^3\text{H}_5$ geçişleri bakımından en verimli konakçı malzemenin Pr-iyonları ile katkılanması gerekmektedir. ZrF_4 -tabanlı florid camlarda Pr^{3+} 'nın spektroskopik özellikleri ve $^1\text{G}_4$

seviyesindeki dolulukları etkileyen faktörler üzerine çalışılmaktadır. PKFK'ler daha karmaşık yapılarda cam konakçılar (fluoride) ve yüksek güçlerdeki pompa kaynakları gerektirmelerine rağmen, özellikleri ve üstünlükleri EKFK'lere çok benzemektedir. Bu nedenle, nadir-toprak katkılı fiber kuvvetlendiriciler optik haberleşme için son derece önemli bir yere sahiptir [47, 48].

1080 nm'de Praseodimyum-katkılı silika fiberlerin kuvvetlendirme verimliliklerinin rapor edildiği çalışmaları dikkate alacak olursak, konakçı malzemelerin seçimine ne kadar dikkat edilmesi gerektiği de anlaşılabacaktır [49]. Optik haberleşme band genişliğinin SiO₂-tabanlı optik fiberlerde iletim penceresinin artması ile sınırlandırılmasının ardından yeni konakçı yapılar üzerinde durulmaya başlandı. 1,3 µm bandında çalışan Pr³⁺-katkılı flüorozirkonat fiber kuvvetlendiricide deneysel olarak 0,022 dB/mW pompalama etkinliğine karşılık gelen 13 dB'lik optik kazanç elde edildi. Fiber için kullanılan cam 200 ppm ile katkılanan standart ZBLAN kompozisyon bileşiminden oluşmaktaydı. 2 m uzunluklu fiber kuvvetlendirici, fiber eksenine ile aynı doğrultuda Ti-safir lazer kaynağı ile 1.017 µm'de pompalandı [50, 51]. Pompalama verimliliğini artırmak için pompa dalga boyunun 1.017 µm'nin altına çekilmesi düşüncesi ile yardımcı katkı elementi olarak Yb³⁺ kullanılması gerektiği rapor edildi. Bu tip bir kuvvetlendiricinin çalışma ilkesi, temelde Yb³⁺'den Pr³⁺'e enerji aktarımına dayanmaktadır. Yb³⁺'ün $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ geçişinden dolayı flüoresans bandı ve Pr³⁺'ün $^3H_4 \rightarrow ^1G_4$ geçişinden dolayı soğurum bandı kuvvetlendirici tasarımı için oldukça uygun bulunmuştur [52].

Optik haberleşmede kullanılan sistemlerin yerel ve kıtalar arası haberleşmeyi sağlamak için önem kazanmaya başlaması ile iletim hatlarının uzunlukları maliyet bakımından yeniden gözden geçirildi. Bu bakımdan, bilginin iletim kapasitesi düşürülmeden bir PKFK modülü kullanılarak 100 Mb/s'lik işaret 27,4 km'lik mesafeye taşındı. 40 m uzunluğa sahip PKFK'ler 500 ppm'lik Pr³⁺ konsantrasyonuna ve 1,3 µm'de yaklaşık 0,05 dB/m iletim hattı kayıplarına sahipti. Bu kuvvetlendiricinin kazanç performansı 14,9 dB'lik değeri ile oldukça iyi kabul edildi [53]. Kazanç performansını artırmak için yapılan deneysel çalışmalar daha çok camsı konakçı malzemelerin özelliklerini araştırmaya yöneldi. Bu amaçla, 1,3 µm'de optik haberleşme için lityum-borat ve lityum-flüoroborat camlarda Pr³⁺ iyonlarının spektrumuna bakıldı. Yüzde 1 mol Pr³⁺

katkılı lityum-borat ve lityum-flüoraborat camların optik soğurum ve yayılım spektrumunda f-f geçişlerinin şiddetleri belirlendi. Böylece, Pr^{3+} katkılı fiber kuvvetlendiriciler için en yararlı camsı konakçı malzeme seçiminde bir adım daha öteye gidildi ve $\text{InF}_3/\text{GaF}_3$ yardımcı katkılı flüorid camsı fiberlere ve Ga-La-S camsı fiberlere göre daha fazla verim elde edilebileceği rapor edildi [54-58]. Bu tarihlerde yapılan pek çok çalışma, kuvvetlendirme verimliliği bakımından en uygun camsı konakçı malzemenin belirlenmesini amaçlamaktaydı. Yapılan deneysel çalışmaların yanı sıra pek çok teorik çalışma sayesinde farklı tipteki camsı malzemelerin kazanç için ne kadar uygun olup olmadığı da incelenmekteydi. Özellikle, Pr^{3+} katkılı; ZBLAN fiber kuvvetlendiriciler için yeniden gözden geçirilmiş Gauss biçimli alan fonksiyonları kullanılarak kazanç ifadeleri yeniden çıkartıldı [59-63]. Böylece, daha doğru teorik sonuçlar kullanılarak sistem uygulamaları yapılabilirdi. Bu amaçla, çift yönlü ve 40-kanallı AM-SCM video iletim sistemlerinde praseodimyum- Pr^{3+} katkılı flüorid fiber kuvvetlendiricilerin sinyal bozunumu ve gürültü faktörü ölçüldü. Çift yönlü iletim sistemleri ya da pompalama konfigürasyonları ile kazanç katsayısının 0,21'den 0,24 dB/mW'a arttığı, teorik varsayımın yanı sıra deneysel olarak da doğrulandı ve bu pompalama şeklinin Pr^{3+} -katkılı flüorid fiberlerin verimliliğini belirlemede karakteristik olduğu görüldü [64-66].

PKFK'lerin kuvvetlendirme karakteristikleri üzerine yapılan bir dizi incelemede sıcaklık faktörünün de oldukça önemli etkilere sebep olduğu belirlendi. Pr^{3+} 'ün $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$ yayılım spektrumu ve $^1\text{G}_4$ seviyesinin yaşam süresi farklı sıcaklık bölgelerinde ölçüldü ve PKFK'lerin sıcaklığa bağımlı kazanç karakteristikleri çıkartıldı. Böylece, ilk kez, sinyal çıkış gücündeki bozulmaların sıcaklıktaki artıştan dolayı meydana geldiği açıklandı. Sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren karakteristik parametrelerin $^1\text{G}_4$ seviyesinin yaşam süresi ve $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$ geçişini tanımlayan yayılım tesir kesiti olduğu rapor edildi. Bu gelişmelere paralel olarak Pr^{3+} -katkılı GeS_x camlarda fotoluminesans etkiler incelenerek sıcaklığa bağımlı yaşam süreleri belirlendi. Benzer bir inceleme, nadir-toprak elementlerinden olan Dispersiyum (Dy^{3+}) üzerinde de yapılarak, Praseodimyum ile benzerlikleri incelendi. Pr^{3+} -katkılı bir kuvvetlendirici için 1 μm yakınlarında pompalama yapmak gerekirken, Dy^{3+} -katkılı bir kuvvetlendiricide pek çok olası pompalama dalga boyunun yer aldığı görüldü. 1240 nm dalga boyunda çalışmayı gerektiren pratik uygulamalarda özellikle bu tip kuvvetlendiriciler tercih edildi [67-71].

Ancak, 1.3 μm flüoresans yayınımlı elde etmek için $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ cam yapılara Pr^{3+} ya da Dy^{3+} katkılanarak yapılan kuvvetlendiriciler de rapor edilmeye başlandı. Böylece, $^1\text{G}_4$ seviyesinin yaşam süresini artırma çalışmaları da hız kazanmış oldu. Praseodimyum-katkılı In/Ga Flüorid katkılı fiber kuvvetlendirici ve 1,01 μm bandlı bir lazer diyod pompa kaynağı ile yapılan deneysel çalışmada, optik haberleşme için uygun görülen ikinci haberleşme penceresi civarında bir ışıma elde edildi. 16,2 dBm'lik (42 mW) sinyal çıkış gücünün elde edildiği bu deneysel çalışmada, 2,5 Gb/s'lik bilginin 100 km'den daha uzak mesafelere iletebileceği de gösterildi [72-74]. İlerleyen yıllarda, SiO_2 -konakçı katkılı fiberlerin iletim penceresi için bazı sınırlandırmalar içermesinden ve optik haberleşme band genişliğinin artırılması ihtiyacından dolayı, farklı yapılardaki camsı konakçı malzemelerin arayışları başladı [75, 76]. Bu amaçla, Pr^{3+} -katkılı As-S kalkojen fiberler, çift potalı eritme metodu kullanılarak üretildi. Bu camsı yapının ısı ve spektroskopik özellikleri açıklanarak Pr^{3+} -katkılı fiber kuvvetlendiricilerin daha verimli çalışması için gerekli konakçı malzeme yapısında olduğu görüldü. Benzer şekilde, praseodimyum-katkılı flüorid ve sülfid fiber kuvvetlendiricilerin modellenmesi de gerçekleştirilerek daha verimli ve yüksek kazanç değerlerine sahip PKFK'lerin kullanımına geçildi [77-83]. Farklı bir araştırma olarak, 1,6 μm 'de optik kuvvetlendirme için camsı Selenid (BaInGaGaSe) konakçılar önerildi. Geleneksel 1480 nm pompa kaynakları ile rahatlıkla pompalanabilen $\text{Pr}^{3+}\text{-Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -katkılı selenid camlarda ($^3\text{F}_3, ^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$) geçişlerinde 1,6 μm 'de foton yayınımlı gözlemlenmesi ile bu tip kuvvetlendirici üretimi çalışmalarına geçildi [84, 85].

Optik haberleşme alanında en etkili yenilikleri gündeme getiren Nippon Telegraf ve Telefon (NTT) şirketi (Tokyo, Japonya) kısa mesafeli haberleşme ağlarında kullanılmak üzere 1300 nm bandında düşük gürültü ve yüksek çıkış güçleri sağlayan optik fiber kuvvetlendirici geliştirdiğini açıkladı. Bu açıklamanın ardından ülke sınırları içerisinde internet ve haberleşme ağlarının verimini artırmak için PKFK'lerin kullanıldığı bir proje hazırlanarak 2010 yılına kadar bilginin aktarımı bakımından ihtiyaçların karşılaması planlandı. Günümüzde, Japon haberleşme endüstrisinin en büyük harcamalarından biri olan fiber kuvvetlendiricilerin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar için NTT şirketinin yaklaşık olarak 290 Milyon Yen (yaklaşık olarak 3,4 Milyon Dolar) harcadığı düşünülürse, EKFK ve PKFK'lerin haberleşme alanında ne kadar önemli oldukları da anlaşılabilir.

NTT şirketinin geliştirmiş olduğu kuvvetlendirici, elektriksel sinyale dönüşüm yapılmaksızın optik sinyalin kuvvetlendirilmesi için florid (zirkonyum flüorid ya da baryum flüorid) camı konakçı malzemeye praseodimyum elementinin katkılı olduğu özel bir fiberdir. Bu sayede, 10 Gb/s sayısal ve 40-kanallı optik analog görüntü 110,8 km'lik mesafeye iletildi. Daha uzun mesafelere de görüntü iletimi yapılması gereğinden dolayı ilk denemede 500 km'lik mesafede 80 Gb/s'lik sinyallerin iletimi gerçekleştirildi. Bu iletim sırasında karşılaşılan iki önemli problem; öncelikle 10.000 km'den daha uzak mesafelerdeki deniz aşırı ülkeler ile haberleşme yapmak için gerekli olan iletim hızının 5 ile 40 Gb/s arasında sınırlı olması, ikincisi ise 1000 km civarındaki kısa mesafeli haberleşmelerde 100 Gb/s'lik iletim hızına gereksinim olmasıdır [86].

PKFK'lerin bir diğer uygulama alanı ise pek çok sayısal iletim hattında yer almasıdır. İlk sistem uygulaması 2,5 Gb/s'de iletim yapabilen ve Ti-Safir lazer kaynak ile pompalanan Pr^{3+} -katkılı flüoride fiber kuvvetlendiricidir. Bu kuvvetlendiricideki verimlilik analizi, 18 dB'de doygunluğa ulaşmış çıkış pompa gücüne ve 1,3 μm 'de 24 dB'lik sinyal kazancına sahip olmasıdır. Bu kuvvetlendirici, güç kuvvetlendirici olarak kullanıldığında yaklaşık 17 dBm güç üretmekte, hat arasında kullanıldığında 19 dB'e kadar kazanç sağlamak ve hat sonunda kullanıldığında alıcı hassasiyetini -37,3 dBm (bit başına 490 foton)'ye kadar artırmaktadır. 100 Mb/s'deki diğer güç kuvvetlendirici uygulamalarında iletim mesafesi 27 km'ye kadar artırılabilir. Nd:YLF lazer kaynağı ile pompalanan kuvvetlendiricilerin kullanıldığı uygulamalarda iletim mesafesi 110 km'ye kadar artırılmakta ve 39 dB'lik kazanç sağlayan PKFK, 10 Gb/s'lik bilgiyi hat üzerinde kuvvetlendirebilmektedir. Bir diğer uygulama ise güç kuvvetlendirici olarak kullanılan PKFK'nin 110.8 km uzunluklu standart tek-modlu fiberde 10 Gb/s'lik bilgiyi başarılı bir şekilde kuvvetlendirmesidir. Bu iletim sırasında 1,315 μm 'de çalışan MQWDFB lazer kaynağı kullanılmıştır [87].

Nadir-toprak elementleri ile ortak katkılı diğer kuvvetlendiricilerin de optik haberleşme alanında kullanılabileceği düşüncesi, özellikle iterbiyum (Yb^{3+}) elementinin dikkat çekmesine neden olmuştur. He-Ne lazer kaynağında gözlemlenen dolaylı ışıma yöntemine benzer olarak, iterbiyum ile ön katkılı erbiyumlu fiber kuvvetlendiricilerin tasarımı gündeme gelmişti. Beş seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren bu mekanizma sayesinde, Er^{3+} - Yb^{3+} katkılı fiber kuvvetlendiricilerin daha az enerjilerde pompalanması

sağlanmıştır. Yb^{3+} ön katkılı EKFK’lerde pompa kaynağının enerjisi Yb^{3+} iyonları tarafından soğurulur ve Yb^{3+} ile Er^{3+} iyonları arasında enerji alış verişi oluşur. Yüksek kazanç değerleri elde etmek için Yb^{3+} ’nin yoğunluğu Er^{3+} ’den daha yüksek ayarlanır ve yaklaşık olarak 800 ile 1100 nm dalgaboyu bölgesinde pompalama yapılabilir. Bu bölgede çalışan pompa kaynakları üretmek maliyet bakımından daha avantajlı olduğu için tercih edilmektedir. Sadece Yb^{3+} ile katkılanarak yapılan kuvvetlendirici örnekleri de günümüzde yer almaktadır. Bu tip kuvvetlendiricilerin konakçı malzemeleri daha çok fotonik kristallerden meydana gelmektedir. 35 μm mod alan çapına sahip tek-modlu fotonik kristal fiberde 10 ps’lik sinyalin kuvvetlendirilmesi deneyi yapıldı. Farklı amaçlar için geliştirilen fotonik kristal fiber kuvvetlendiriciler 1557 nm’de 700 fs (47-Mhz)’lik sinyali kuvvetlendirmek için kullanıldı. Malzeme bilimindeki yeniliklerin dikkate alındığı deneysel çalışmalarda “kuantum nokta yarıiletken optik kuvvetlendiriciler” de haberleşme alanında yer almaya başladı [89-92]. Özellikle, DBÇ ağları için önemli bir cihaz olan optik kuvvetlendiriciler sınıfında kazanç bakımından daha verimli yarıiletken optik kuvvetlendiriciler (YOK, Semiconductor Optical Amplifier, SOA) kullanılmaya başlandı. Bir YOK 20 dB’in üstünde kazanç ve 3 dB’in altında gürültü değerine sahiptir. Buna ek olarak, 80 km’lik mesafeye iletilen 10 Gb/s’lik sinyali başarılı bir şekilde kuvvetlendirebilmektedir [93]. Teknolojinin büyük bir hızla ilerlemesinin ardından yeni malzemelerinde kullanılabilirliği artmaktadır. Böylece, daha yüksek verimde çalışan cihazlar üretebilmekte kolaylaşmaktadır. Bu tür cihazlardan olan yüksek konsantrasyonda Tm^{3+} (tulyum: thulium)- Yb^{3+} -katkılı tellürit fiber kuvvetlendiriciler 980 nm’de pompalanabilen yeni bir cihaz olarak kullanılmaktadır. 24 cm uzunluğa sahip bu kuvvetlendiricide ağırlıkça yüzde 0,5 Tm^{3+} ve ağırlıkça yüzde 1,5 Yb^{3+} iyonları yer almaktadır. 1490 nm’de yayınlanan fotonlar yaklaşık 6 dB’lik kazanç sağlamaktadır [94].

Teknolojik bakımdan oldukça önemli bu cihazların uygun koşullar altında çalışmasını sağlamak için hem üretim tekniği hem de maliyet bakımından bazı ayarlamaların yapılmasını gerektirir. Bu ayarlamalar, kuvvetlendiricinin kullanılacağı hattaki uzunluğunun ne olması gerektiğinden başlar, iletilecek bilginin kapasitesine kadar bir dizi düzenlemeler içerir. Özellikle, mühendislik bakımından bir hata yapılmaması için teorik alt yapının çok iyi tanımlanmış olması gerekir. Kuvvetlendiricilerin hangi sınıf sinyali, hangi tür pompa kaynağı ve hangi sıcaklık bölgelerinde kuvvetlendireceği

bilgisi temelde en önemli konudur. Günümüzde dikkat çeken yaygın kullanımlı iki kuvvetlendirici EKFK ve PKFK'lerdir. Sıcaklığa bağlı modeller olarak bilinen birkaç teorik çalışmada, sadece soğurum ve yayılım spektrumlarının tesir kesitlerinin sıcaklığa bağımlılığı üzerinde durulmuştur. Halbuki, fizikten çok iyi bildiğimiz Boltzmann yasası, farklı enerji seviyeleri arasındaki geçişlerin, yüksek sıcaklıklarda birbirlerine şiddetle bağlı olduğunu söylemektedir. Bu düşünceden hareketle, bu çalışmada erbiyum ve praseodimyum elementlerinin enerji seviyelerinde Stark yarılmaları ile meydana gelen alt enerji seviyelerindeki geçişlerin Boltzmann dağılım yasası yardımı ile sıcaklığa bağlı hale getirilmesi sağlanacaktır.

Öncelikle, EKFK ve PKFK'lerin kuvvetlendirme mekanizmaları incelenecek ve Boltzmann dağılım yasası ile sıcaklığa bağımlı modeller geliştirilecektir. Bunun için başlangıç düzeyinde üç ve dört seviyeli lazer sistemlerinde oran denklemleri çıkartılacaktır. Erbiyum elementi gibi üç seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren kuvvetlendirme mekanizmalarında, her bir enerji seviyesindeki geçişlerin zamana bağlı değişimlerinin çıkartılmasının ardından, bağıl ters doluluk bağıntısı çıkartılacaktır. Bu inceleme yapılırken, EKFK'ler için karakteristik olan 980 nm ve 1480 nm dalgalı boyundaki farklı iki pompalama konfigürasyonu üzerinde durulacak ve Boltzmann faktörünün etkisi incelenecektir. Özellikle, 1480 nm dalgalı boyunda pompalama yapıldığında, ikinci seviyedeki iyon dolulukları sıcaklık bağımlı modellenecektir. Üç seviyeli sistemler için, ikinci ve birinci seviyeler arasında gözlemlenen 1550 nm civarındaki ışımalı geçişlerin kuvvetlendirme olayındaki önemi vurgulanacaktır. Praseodimyum gibi dört seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren kuvvetlendirme mekanizmaları için de benzer analizler yapılacaktır. Ancak, PKFK'ler için karakteristik pompalama konfigürasyonu 1070 nm dalgalı boyunda gerçekleşmektedir ve Boltzmann faktörü, ikinci seviye olarak tanımlanan ve birbirine yakın iki alt enerji seviyesi arasında geçerli olmaktadır. Bu seviyelerden birinci seviyeye olan geçişlerde 1300 nm dalgalı boyu civarında karakteristik bir ışıma gözlemlenmektedir.

EKFK ve PKFK'lerin bağıl ters doluluklara göre pompalama hızları bakımından birbirlerine göre üstünlüklerinin tartışıldığı bölümde, EKFK'lerin sıcaklık bağımlı modellenmesi kapsamında "güç yayılım denklemleri" kullanılarak daha hassas analitik incelemeler yapılacaktır. Üç seviyeli sistem incelenirken önce ihmal edilen

“Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayılım (KKY)” faktörü daha sonra modele dahil edilecektir. Böylece, bir EKFK’nin kazanç ve kuvvetlendirici uzunluğu bakımından en yararlı değerlerini belirleyeceğimiz bağıntılara ulaşılabacaktır. Maksimum kazanç için optimum ya da en uygun fiber kuvvetlendirici uzunluğu, farklı sıcaklık değerlerinde belirlenecektir. Literatürde yer alan teorik çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılarak, sıcaklık bağımlı modelin geçerliliği tartışılacaktır. Gerçek bir deneysel sistemin sonuçları ile uyumluluğu kanıtlanmış OptiAmplifier 4.0 yazılım programı, EKFK parametreleri ile kullanılarak KKY’nin değeri belirlenecek ve daha sonra bu değer nümerik hesaplarda kullanılacaktır.

PKFK’lerin de sıcaklık bağımlı modellendiği aynı bölüm içerisinde, öncelikle, sabit uzunluklu bir kuvvetlendirici için kazanç-pompa gücü ilişkisi kurulacaktır. Daha sonra güç yayılım denklemlerinden yararlanarak maksimum kazanç karşılık kuvvetlendirici uzunluğu belirlenecektir. Elde edilen analitik bağıntıların geçerliliğini test etmek için daha önceden yapılmış deneysel çalışmaların ilgili fiber kuvvetlendirici verileri kullanılarak karşılaştırmalar yapılacaktır.

Sonuç ve tartışmaların yer aldığı bölümde ise, optik haberleşme alanının vazgeçilmez elemanlarından olan nadir-toprak katkılı optik fiber kuvvetlendiricilerin sıcaklık bağımlı modellenmesinden elde edilen sonuçlar tartışılacak ve sıcaklık bağımlı modelin geçerliliği üzerinde durulacaktır.

BÖLÜM 2

ÜÇ VE DÖRT SEVİYELİ SİSTEMLERDE ORAN DENKLEMLERİ VE SICAKLIK BAĞIMLI TERS DOLULUK İFADELERİ

2.1. Giriş

Son yıllarda, nadir-toprak katkılı fiber lazer ve kuvvetlendiriciler konusu uluslararası bilimsel konferanslarda ve teknik literatürde artan bir dikkatle incelenmektedir. Bu cihazların yararları üzerine yapılan çalışmalar, düşük maliyeti, kolay üretim teknikleri ve hem günümüz hem de gelecek için önemli olan dalgaboylarında kuvvetlendirme yapabilmeleri nedeni ile hız kazanmıştır. Haberleşme sistemleri için en önemli nadir-toprak elementi olarak erbiyum dikkat çekmektedir. Bu elementin ışımalı geçişi $1.5\ \mu\text{m}$ yakınlarında yer almaktadır. Fakat, Er^{3+} 'nin üç seviyeli sistem özelliği göstermesi nedeni ile belirli bir kazanç değeri elde etmek için yüksek güçlerde pompa kaynakları kullanmak gerekmektedir. Ayrıca, kazanç elde etmek için gereken yeterli miktardaki erbiyum iyonunun ters doluluğunu sağlamak için de yüksek güç değerlerine ihtiyaç vardır. Bundan dolayı, düşük eşik değerli lazer ve kuvvetlendirici üretme düşüncesi ile fiber tasarımını iyileştirme yolları aranmaktadır. Fiberin öz bölgesine katkılanan Er^{3+} iyonları ve daha etkili pompa güçleri ile yüksek kazanç değerleri elde edilebileceği teorik olarak gösterilmiştir [95].

Nadir-toprak katkılı fiber kuvvetlendiricilerin optik haberleşme sistemleri için önemli bir eleman olduğunun anlaşılmasından sonra, ilk olarak EKFK'lerin tasarımı konusunda çalışmalar yapıldı. EKFK'lerin yüksek kazanç ve düşük gürültü sağlamaları nedeni ile

dalgaboyu bölmeli çoğullama (DBÇ) ve yoğun-dalgaboyu bölmeli çoğullama (YDBÇ; Dense-Wavelength Division Multiplexing, DWDM) uygulamalarında kullanımı hız kazandı. Böylece, kuvvetlendiricinin sağlamış olduğu geniş bandlı dalgaboyu ile düzgün bir çıkış spektrumu elde edildi. Daha iyi kuvvetlendirme sağlamak için fiber konakçı malzemenin bileşenlerinin değiştirildiği çalışmalar yapıldı. Böylece, farklı tasarımlara sahip EKFK'lerin tipik C-band (1530-1565 nm) uygulamaları L-band (1570-1620 nm) bölgelerine uygulanabildi [96-99]. 1610-1650 nm dalgaboyu bölgesinde kuvvetlendirme yapabilen L-band EKFK'li bir deneyde, 18 m uzunluğunda alüminyum-germano silika EKFK 980nm/160 mW LD pompa kaynağı ile pompalandı. Böylece, 1450-1650 nm'lik band spektrumunda giriş sinyalleri üretildi ve kazanç ölçümleri yapıldı [100].

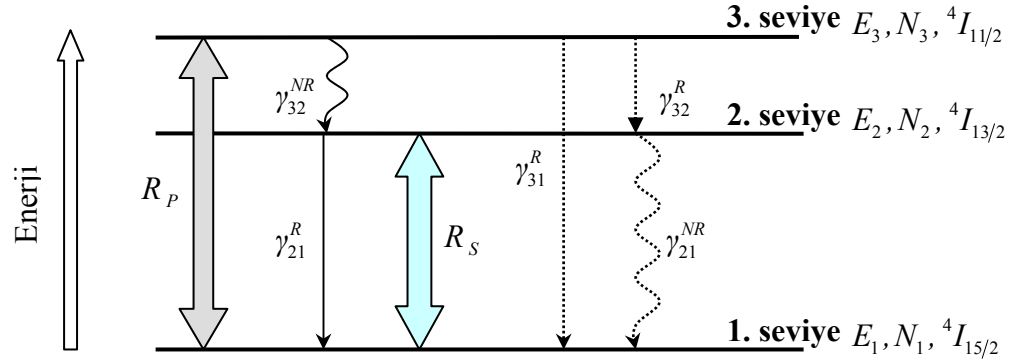
Tüm bu incelemelerin ardında üç seviyeli kuvvetlendirme sistemlerinin teorik olarak modellenmesi fikri yer almaktadır. Ancak, teorik çalışmalar nümerik hesaplamalarla desteklenerek deneysel çalışmalarla uyumlu modeller geliştirilmektedir. Kuvvetlendiricilerin verimliliği bakımından en önemli çalışma konusu kazanç ve fiber kuvvetlendirici uzunluğu arasındaki ilişkinin bu modellerden yararlanılarak elde edilmesidir. Erbiyum elementi kadar önemli bir diğer nadir-toprak elementinin de dört seviyeli sistem özelliği gösteren praseodmiyum olduğundan bahsedilmiştir. Pr^{3+} iyonunun ışıma ile ilgili seviyeleri arasındaki geçişlerden yararlanarak ve bu seviyeler arasında sıcaklığa bağımlı bir ilişki kurarak daha tam modellemeler yapılabilir. Pr^{3+} -katkılı kuvvetlendirmede sıcaklığa bağımlılık, hem seviyeler arasındaki geçişlerden hem de yarı kararlı seviyenin yaşam süresinden yararlanılarak kurulurken, Er^{3+} -katkılı kuvvetlendirmede sadece seviyeler arasındaki geçişler önemli olmaktadır.

Katkılı fiber optik kuvvetlendiricilerin çalışma şartlarının belirlenmesinde dikkat çeken pek çok analitik ve nümerik model vardır. Bu amaçla oran denklemleri modelleri, spektral modeller ve geometrik modeller incelenmektedir. Böylece, ne tür katkı elementlerinin ne tür çalışma şartlarını belirlediği anlaşılabacaktır. Bu noktada yapılması gereken, lazer fiziğinde kazanç ortamı olarak tanımlanan ortamlarda sistemin kazanç katsayısının belirlenmesini sağlamaktır. Bunun için başlangıç düzeyinde üç ve dört seviyeli lazer sistemlerinde oran denklemleri çıkartılmalıdır. Kazanç bağıntısını elde etmek için yararlı olan bir diğer ifade ise bağıl ters doluluktur. Farklı sıcaklık

değerlerinde kazancın pompa gücüne ya da fiber kuvvetlendirici uzunluğuna göre değişimini incelemeye oldukça önemli olan bu ifadeler, hem üç seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren erbiyum elementi için hem de dört seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren praseodmiyum elementi için elde edilecektir.

2.2. Üç Seviyeli Sistemler için Oran Denklemleri

Bu bölümde, genel üç seviyeli kuvvetlendirme sistemleri için ilgili enerji seviyelerindeki dolulukların, ısıl denge durumu da dikkate alınarak, zamana bağlı değişimi incelenecektir. Dikkate alınan oran denklemleri, üç seviyeli sistem özelliği gösteren erbiyum iyon için genelleştirilecektir. E_1, E_2, E_3 ve N_1, N_2, N_3 , sırasıyla, enerji ve doluluklara karşılık gelmektedir. Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi, üç seviyeli sistemlerde kuvvetlendirme mekanizması lazer sistemlerindeki ile benzerlik göstermektedir. Lazer sistemleri pek çok enerji seviyesinden meydana gelmesine rağmen, kuvvetlendirme mekanizmalarında sadece birkaç enerji seviyesi ışıma olayında incelenmektedir [101-104].



Şekil 2.1. Genel üç seviyeli kuvvetlendirme sistemi.

Şekil 2.1'de 1. seviyeyi taban seviye, 2. seviyeyi yarı kararlı seviye ve 3. seviyeyi de pompa seviyesi olarak tanımlayalım. Bu durumda oran denklemleri,

$$\frac{dN_3}{dt} = R_p (N_1 - N_3) - \gamma_3 N_3; \quad \gamma_3 = \gamma_{31}^R + \gamma_{32}^R + \gamma_{32}^{NR}, \quad (2.1a)$$

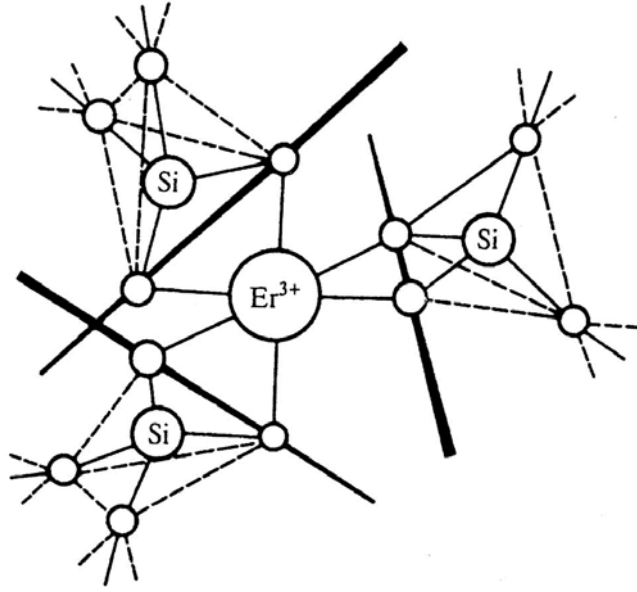
$$\frac{dN_2}{dt} = -R_s (N_2 - N_1) - \gamma_2 N_2 + (\gamma_{32}^R + \gamma_{32}^{NR}) N_3; \quad \gamma_2 = \gamma_{21}^R + \gamma_{21}^{NR}, \quad (2.1b)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_p (N_1 - N_3) + \gamma_2 N_2 + R_s (N_2 - N_1), \quad (2.1c)$$

olacaktır. Burada $\gamma_{31}^R, \gamma_{32}^R$ ve γ_{32}^{NR} , sırasıyla, uyarılmış seviyeden ilgili seviyeye ışımalı ve ışımasız geçiş olasılıklarını temsil etmektedir. R_p , 1-3 ve 3-1 seviyeleri arasındaki atomların, sırasıyla, pompalanma ve zorlamalı yayınım olasılıkları; R_s , 1-2 ve 2-1 seviyeleri arasındaki atomların, sırasıyla, zorlamalı soğurum ve zorlamalı yayının olasılıklarını temsil etmektedir. Er^{3+} 'nın taban durumu için $^4I_{15/2}$ gösterimi j, l, s ; 15/2, 6, 3/2 terimlerine karşılık gelir. Burada, j, l ve s sembolleri çok elektronlu bir atomun olası geçiş durumlarını göstermektedir ve $^{2s+1}L_j$ sembolü ile tanımlanmaktadır. $L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ rakamları, sırasıyla, S, P, D, F, G, H, I, ...harflerine karşılık gelmektedir. Er^{3+} 'nın elektronik konfigürasyonun $[\text{Xe}]6s^2 4f^{12}$ olduğu bilidiğine göre L 'yi belirlemek için gereken, s orbitallerinin en büyük değere sahip katsayıdır. Bu durumda, $L = 6$ için seçilen harf I olacaktır. Erbiyum iyonunun serbest elektron sayısı 3 olduğu için spin sayısı $s = 3/2$, açısal momentum sayısı $l = 6$ ve buradan toplam açısal momentum sayısı $j = l + s = 6 + 3/2 = 15/2$ 'dir. Spin konfigürasyonlarının sayısı için $2s+1 = 4$ eşitliğini de kullanırsak, Er^{3+} için birinci seviyeyi $^{2s+1}L_j$ sembolü yardımı ile $^4I_{15/2}$ olarak gösterebiliriz. İkinci ve üçüncü seviyeler için açısal momentum sayıları, sırasıyla, $l = 5$ ve $l = 4$ olacağı için sembolik gösterim, sırasıyla, $^4I_{13/2}$ ve $^4I_{11/2}$ olacaktır [105-111].

Silisyum tabanlı konakçı malzemeye katılan nadir toprak elementlerinden erbiyumun ışıma ile ilgili seviyelerinde gözlemlenen bazı geçişler vardır. Erbiyum iyonunun etrafını saran camsı konakçı malzemenin kendi kristal yapısına ait olan elektrik alanı (ligand alan) nedeni ile iyonun l sj enerji seviyelerinin çok katlılığı kaldırılır ve Stark yarılmalrı olarak adlandırılan çizgi genişlemeleri gözlemlenir [112, 113]. Camsı konakçı malzemede konakçı atomları ile erbiyum iyonlarının bağ yaptığı bölgeden bir başka bağ grubuna gidildiğinde ligand alanının rastgele değiştiği görülür ve bu durumda enerji seviyeleri arasındaki Stark yarılmalrı da rasgele gerçekleşmektedir. İlgili seviyelerin yarılmayla oluşan alt enerji seviyelerinin

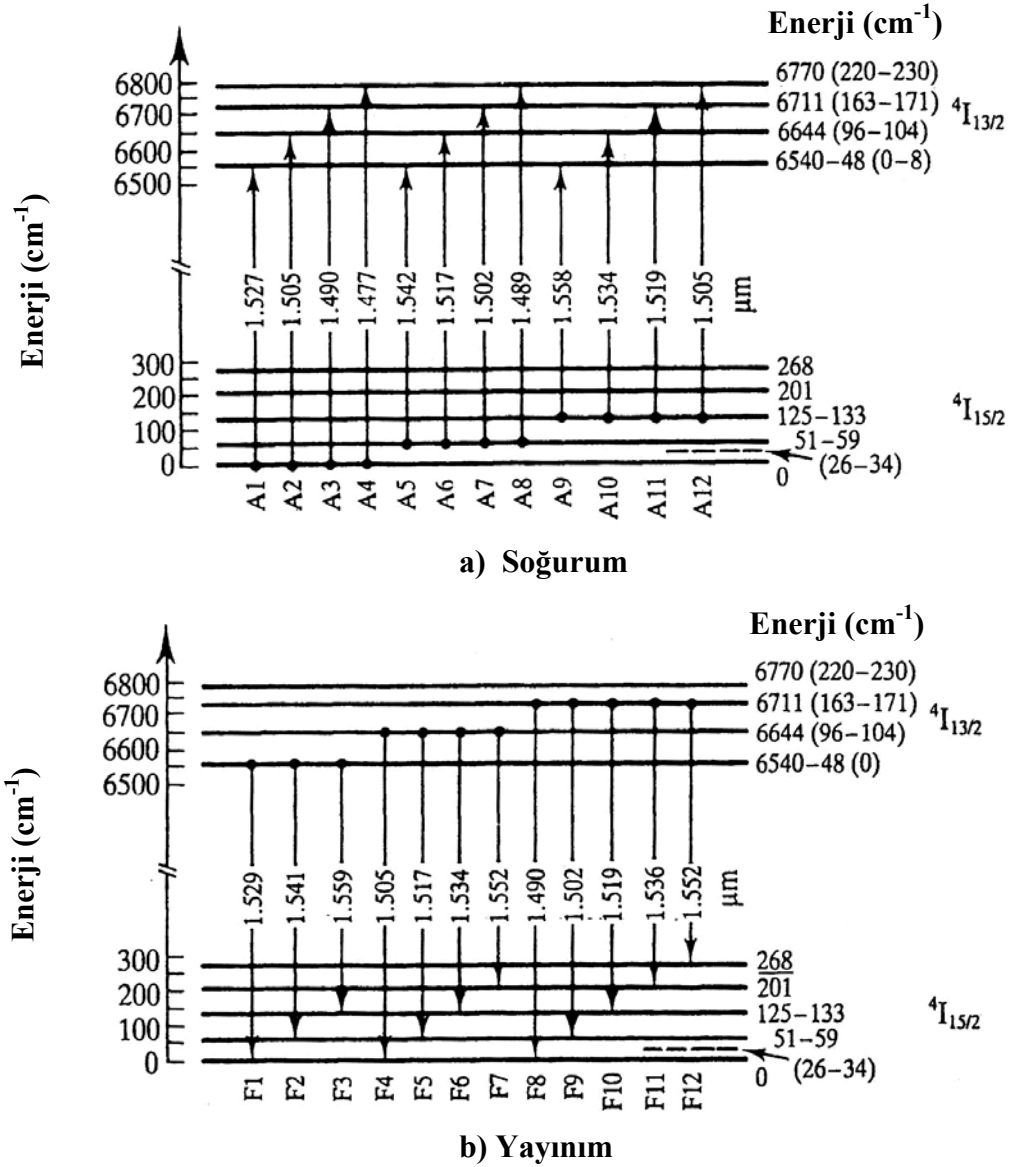
maksimum sayısını $j + 1/2$ Stark bileşenlerinden yararlanarak hesaplayabiliriz. Bu durumda, taban ($^4I_{15/2}$), yarıkararlı ($^4I_{13/2}$) ve uyarılmış ($^4I_{11/2}$) seviyelerin maksimum alt enerji seviyelerinin sayıları, sırasıyla, 8, 7 ve 6 olacaktır. Teorik olarak yapılan bu hesabın aksine, gerçekte Stark seviyelerinin sayısı ligand alanın simetri şekline bağlıdır ve simetrisinin azalması ile artmaktadır. Şekil 2.2’de silika camda Er^{3+} iyonunun olası bağ yapısı ve simetri eksenleri görülmektedir.



Şekil 2.2. Silika camda Er^{3+} iyonunun olası bağ yapısı. D_3 simetrisine bükülen oktahedral yapının konik eksen şeklini aldığı görülmektedir [114].

Er^{3+} -katkılı alkali silika camlarda flüoresans çizgisindeki daralmaların düşük-sıcaklıklı spektroskopik metotlar ile incelenmesi sonucunda $^4I_{15/2}$ ve $^4I_{13/2}$ seviyelerindeki Stark bileşenlerinin konumlarının farklı ve sayısının da, sırasıyla, beş ve dört olduğu görülmüştür. O halde, silika, flüorid ve flüorofosfat gibi farklı tipteki cam konakçılarda Stark seviyelerinin konumunun ve sayısının farklı olacağı söylenebilmektedir. Şekil 2.3’de erbiyum-katkılı alüminosilikat cam fiberde $^4I_{15/2}$ ve $^4I_{13/2}$ Stark-seviyelerinin enerjileri gösterilmektedir. Bu seviyelerin konumları sıcaklık bağımlı soğurum ve yayınım spektrumlarının analizi ile elde edilebilir. Bu ölçüm tekniği yardımı ile $^4I_{15/2}$ seviyesindeki beş ve $^4I_{13/2}$ seviyesindeki dört Stark yarılmalarını

gözlemleyebiliriz. Bu seviyeler arasında en az 12 Stark geçişi olduğu ve farklı tip cam konakçılarda Stark yarılmalarına karşılık gelen toplam enerjilerin $^4I_{15/2}$ ve $^4I_{13/2}$ için, sırasıyla, 400 cm^{-1} ve 500 cm^{-1} arasında değiştiği görülmektedir [115].



Şekil 2.3. $^4I_{15/2}$ ve $^4I_{13/2}$ seviyeleri arasındaki 12 Stark geçişini gösteren enerji diyagramları. **a)** Soğurum spektrumu ölçümlerinden alınan geçişleri (A: soğuruma ait 12 farklı geçiş temsil etmektedir) **b)** Yayınım spektrumu ölçümlerinden alınan geçişleri (F: yayınıma ait 12 farklı geçiş temsil etmektedir) göstermektedir. $^4I_{13/2}$ seviyesinde parantez içerisinde görülen rakamlar, ilgili seviyenin başlangıç enerji değerinden olan farklılığı göstermektedir [115].

Yukarıdaki (2.1) denklem takımlarının kararlı durum çözümleri $\frac{dN_i}{dt} = 0$ ($i = 1, 2, 3$) şartını gerektirir. Bu durumda, Denklem (2.1a)'dan,

$$R_p (N_1 - N_3) = \gamma_3 N_3, \quad (2.2)$$

$$N_3 = \frac{R_p N_1}{(R_p + \gamma_3)} = \frac{N_1}{(1 + \gamma_3/R_p)}, \quad (2.3)$$

Denklem (2.1c)'den,

$$R_p (N_1 - N_3) = \gamma_2 N_2 + R_s (N_2 - N_1), \quad (2.4)$$

$$N_1 (R_p + R_s) - R_p N_3 = N_2 (R_s + \gamma_2), \quad (2.5)$$

ve N_3 için Denklem (2.3)'ün kullanılması ile,

$$N_1 (R_p + R_s) - \frac{R_p N_1}{(1 + \gamma_3/R_p)} = N_2 (R_s + \gamma_2), \quad (2.6)$$

$$N_1 \left(R_p - \frac{R_p}{(1 + \gamma_3/R_p)} + R_s \right) = N_2 (R_s + \gamma_2), \quad (2.7)$$

elde edilir. Her bir seviyedeki doluluklar cinsinden toplam doluluk,

$$N = N_1 + N_2 + N_3, \quad (2.8)$$

ile verilir. Denklem (2.3)'ün Denklem (2.8)'de yeniden kullanılması ile,

$$N = N_1 + N_2 + \frac{N_1}{(1 + \gamma_3/R_p)}, \quad (2.9)$$

$$N = N_1 \left(1 + \frac{1}{(1 + \gamma_3/R_p)} \right) + N_2, \quad (2.10)$$

eşitliğine ulaşılır. Bu son eşitlikten yararlanarak N_2 cinsinden bir ifade elde etmek istersek,

$$N_2 = N - N_1 \left(1 + \frac{I}{(I + \gamma_3/R_p)} \right), \quad (2.11)$$

yazılabilir. Bu eşitlik Denklem (2.7)'de kullanılacak olursa,

$$N_1 \left(R_p - \frac{R_p}{(1 + \gamma_3/R_p)} + R_s \right) = \left[N - N_1 \left(1 + \frac{1}{(1 + \gamma_3/R_p)} \right) \right] (R_s + \gamma_2), \quad (2.12)$$

ve gerekli düzenlemeler aşağıdaki gibi yapılırsa, N_1 cinsinden,

$$N_1 \left[R_p \left(1 - \frac{1}{(1 + \gamma_3/R_p)} \right) + R_s \left(2 + \frac{1}{(1 + \gamma_3/R_p)} \right) + \gamma_2 \left(1 + \frac{1}{(1 + \gamma_3/R_p)} \right) \right] = N(R_s + \gamma_2), \quad (2.13)$$

$$N_1 = N \frac{(R_s + \gamma_2)}{\left[R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p) \right) + R_s \left(2 + 1/(1 + \gamma_3/R_p) \right) + \gamma_2 \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p) \right) \right]}, \quad (2.14)$$

elde edilir. Denklem (2.14)'de elde edilen N_1 değeri Denklem (2.11)'de yerine yazılarak, N_2 cinsinden,

$$N_2 = N \left\{ 1 - \frac{(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p))(R_s + \gamma_2)}{\left[R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p) \right) + R_s \left(2 + 1/(1 + \gamma_3/R_p) \right) + \gamma_2 \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p) \right) \right]} \right\}, \quad (2.15)$$

$$N_2 = N \left\{ \frac{R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + R_s \left(2 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + \gamma_2 \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) - R_s \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) - \gamma_2 \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right)}{\left[R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + R_s \left(2 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + \gamma_2 \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) \right]} \right\} \quad (2.16)$$

$$N_2 = N \left\{ \frac{R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + R_s}{\left[R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + R_s \left(2 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + \gamma_2 \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) \right]} \right\}, \quad (2.17)$$

yazabiliriz. Şimdi, üç seviyeli sistem için kazanç ifadesine ulaşmamızı sağlayacak olan “Bağıl Ters Doluluk” bağıntısını $\frac{\Delta N}{N} = \frac{N_2 - N_1}{N}$ eşitliğinden yararlanarak çıkartabiliriz. O halde, genel bir bağıntı olarak Denklem (2.14) ve Denklem (2.17)’den,

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) - \gamma_2}{\left[R_p \left(1 - 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + R_s \left(2 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) + \gamma_2 \left(1 + 1/(1 + \gamma_3/R_p)\right) \right]} \quad , \quad (2.18)$$

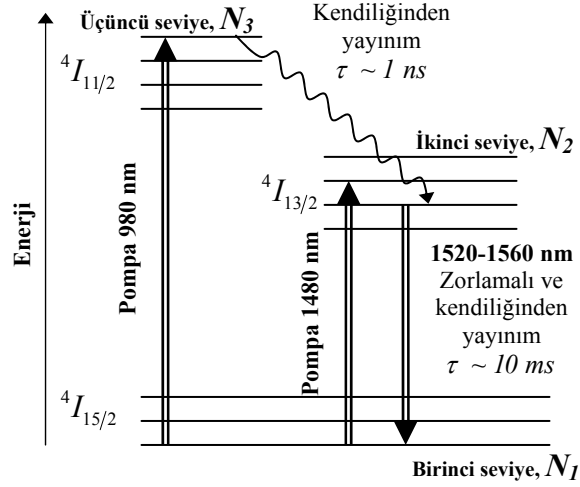
eşitliği elde edilir. Bu bağıntı, temel üç seviyeli lazer sisteminde kuvvetlendirmenin yapılabilmesi için gerekli olan koşulları belirlemede oldukça önemli bir rol üstlenmektedir.

Erbiyum-katkılı fiber kuvvetlendiricilerin kuvvetlendirme mekanizmaları temelde pek çok farklı pompalama konfigürasyonu altında incelenebilmektedir. Bu amaçla 532, 670, 800, 980 ve 1480 nm pompalama konfigürasyonları EKFK’ler için kullanılan pompa kaynakları olarak bilinmektedir. Ancak, ilk üç pompa kaynağı ile yapılan deneysel çalışmalar EKFK’lerin kazanç bakımından performansını azaltıcı bir etki olarak bilinen UDS’yi ortaya çıkartmaktadır ve ayrıca bu tip pompa kaynakları daha fazla maliyetlidir. Dolayısı ile, bilinen en ideal pompalama konfigürasyonu, katkılı fiberin 980 nm ve 1480 nm dalgaboylu pompa kaynakları tarafından pompalanmasını gerektirmektedir.

Bağıl ters doluluk bağıntısında yapılacak yaklaşımlar, erbiyum-katkılı fiber kuvvetlendiriciler üzerine yapılan deneysel çalışma verilerine dayanmaktadır.

2.2.1. 980 nm Pompalama Konfigürasyonunda Sıcaklığa Bağımlılık

EKFK'nin 980 nm dalga boyunda pompalanması sonucunda Denklem (2.18)'de yer alan bazı terimlerin ihmalı mümkün olmaktadır. Cam konakçıya bağlı olarak değişen seviyeler arasındaki bozunum hızları ile ilgili deneysel çalışmalar, özellikle silisyum içerikli camlarda 1,53 μm dalga boyu yakınlarında $^4I_{13/2} - ^4I_{15/2}$ geçişinin temelde baskın olarak ışımalı geçişler şeklinde olduğunu göstermiştir. $^4I_{13/2}$ seviyesinde bu ışımalı geçiş hızı $\gamma_{21}^R = 100 \text{ s}^{-1}$ 'dir. Buna karşılık gelen yaşam süresi ise $\tau_{21} = 1/\gamma_{21}^R = 10 \text{ ms}$ 'dir. Aynı seviyeden ışımasız geçiş hızı $\gamma_{21}^{NR} < 1 \text{ s}^{-1}$ olduğu için γ_{21}^R geçişi baskındır [116, 117].



Şekil 2.4. Her iki pompalama durumunu gösteren ve erbiyum elementine karşılık gelen temel üç seviyeli kuvvetlendirme sistemi.

Aynı cam konakçı malzemede, $^4I_{11/2} - ^4I_{13/2}$ geçişi sırasında görülen ışımasız geçiş $\gamma_{32}^{NR} = 5,53 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 'lik bozunum hızına sahiptir. $^4I_{11/2}$ seviyesi için toplam ışımalı bozunum hızı $\gamma_{31}^R + \gamma_{32}^R \approx 125 \text{ s}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda $^4I_{11/2}$ seviyesinden $^4I_{13/2}$ seviyesine geçişlerde ışımasız bozunum ışımalı bozunuma göre daha baskın

olacaktır. Kısaca özetlemek gerekirse, Erbiyum katkılı cam konakçılarda ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$ geçişleri temelde ışımalı, ${}^4I_{11/2} - {}^4I_{13/2}$ geçişleri de temelde ışımasız olmaktadır. EKFK'ler için bir başka önemli deneysel veri, ışımasız geçişlerin pompalama etkinliğine göre daha baskın olduğu yönündedir, yani $\gamma_{32}^{NR} \gg R_p$ olmaktadır.

Bu açıklamaların ardından, şimdi 980 nm pompalama konfigürasyonunu dikkate alarak, Denklem (2.18)'deki bağıl ters doluluk bağıntısını yeniden düzenleyebiliriz. Bu incelemede, $\gamma_3 = \gamma_{31}^R + \gamma_{32}^R + \gamma_{32}^{NR}$ eşitliğinde $\gamma_{32}^{NR} \gg \gamma_{31}^R + \gamma_{32}^R$ olduğu için $\gamma_3 \cong \gamma_{32}^{NR}$ ve $\gamma_2 = \gamma_{21}^R + \gamma_{21}^{NR}$ eşitliğinde $\gamma_{21}^R \gg \gamma_{21}^{NR}$ olduğu için $\gamma_2 \cong \gamma_{21}^R$ yaklaşımı yapılabilir. Bununla birlikte $\gamma_3 \cong \gamma_{32}^{NR} \gg R_p$ koşulu da dikkate alınacak olursa, Denklem (2.18)'de parantez içerisindeki $1/(1 + \gamma_3/R_p)$ ifadesi 1'in yanında ihmal edilebilecek duruma gelir. Aynı şekilde, Denklem (2.9)'daki son terimde ihmal edilecektir. O halde, 980 nm pompalama durumu için bağıl ters doluluk bağıntımız,

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{R_p - \gamma_2}{R_p + 2R_s + \gamma_2}, \quad (2.19)$$

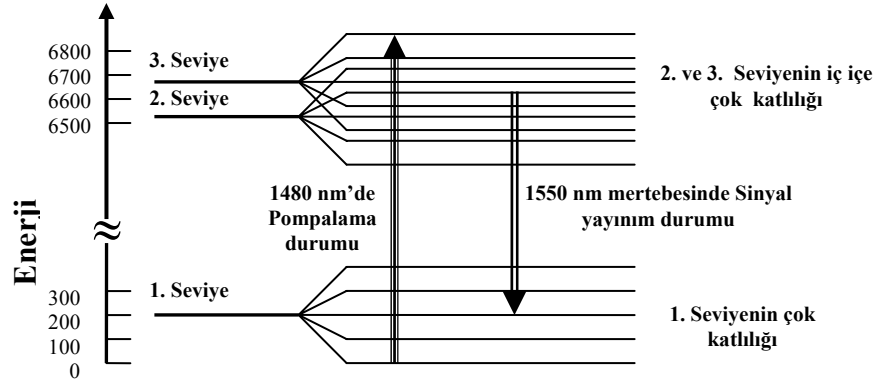
olacaktır. Denklem (2.19), $\gamma_2 = \gamma_{21}^R = \frac{1}{\tau}$ ilişkisi kullanılarak ${}^4I_{13/2}$ seviyesinin yaşam süresi “ τ ” cinsinden,

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{R_p \tau - 1}{R_p \tau + 2R_s \tau + 1}, \quad (2.20)$$

biçiminde yazılabilir. Bu denklemden de görüldüğü gibi, EKFK için 980 nm pompalama konfigürasyonunda bağıl ters doluluk ifadesi enerji seviyeleri arasındaki geçişler bakımından sıcaklık hassasiyeti göstermemektedir. Ancak, R_p ve R_s parametreleri içerisinde yer alan soğurum ve yayınım tesir kesitleri, sıcaklığa bağımlı olarak farklı değerler almaktadır ve bu nedenle de zayıfta olsa sıcaklığa bağımlılık ortaya çıkmaktadır.

2.2.2. 1480 nm Pompalama Konfigürasyonunda Sıcaklığa Bağımlılık

1480 nm dalga boyunda pompalama durumunda ise, temel üç seviyeli lazer sisteminin iki seviyeli lazer sistemine indirgenmesi söz konusu olur. Böyle bir pompalama konfigürasyonunda, pompalama seviyesi ile sinyal ışıma seviyesi iç içe bir görünüm oluşturur. 1480 nm pompalama konfigürasyonunun yaklaşık 1550 nm sinyal ışıma seviyesi yakınlarında ayrı bir pompalama seviyesi oluşturarak erbiyumlu sistem için iki seviyeli kuvvetlendirme mekanizmasını yaklaşımını dikkate almamıza neden olur. (Şekil 2.5). Dolayısıyla, ikinci seviyenin çok katlılığı aynı zamanda üçüncü seviyenin çok katlılığını da içerecektir. Böylece, belirli bir çok katlılık içerisinde oluşturulan ısı denge sayesinde, üçüncü ve ikinci seviyelerin dolulukları arasındaki ilişki Boltzmann Dağılım Yasası ile incelenebilecektir. Bu durumda, pompalama seviyesi olan üçüncü seviyenin doluluğunun sıfır olamayacağı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.5. Er^{+3} -katkılı fiber kuvvetlendiricilerde dikkate alınan ve iki seviyeye indirgenmiş gibi düşünülebilen çok katlılığa sahip kuvvetlendirme sisteminin enerji seviyeleri.

980 nm pompalama konfigürasyonu için yapılan incelemelerin 1480 nm pompalama durumu için de yapılabileceği açıktır. Bu durumda 980 nm pompalama durumu için üç seviyeli davranan kuvvetlendirme sistemi, 1480 nm için iki seviyeli sisteme indirgenmiş gibi kabul edilebilmektedir. Üçüncü seviyenin ikinci seviyenin yakınına ya da içine girmiş olduğu düşünülünce bu iki seviyenin alt katmanlarının da iç içe olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumu Stark yarılmalı alt katmanlar olarak tanımlayıp, her bir alt katmanın doluluğunu “Boltzmann Dağılım Yasası” yardımı ile tanımlayabiliriz.

O halde, üçüncü ve ikinci seviyelerin birbirlerine göre doluluklarının sıcaklığa bağlı olarak değişimi,

$$\frac{N_3}{N_2} = \exp(-\Delta E_3 / k_B T), \quad (2.21)$$

bağıntısı ile verilir [118]. Burada, $\Delta E_3 = E_3 - E_2$; k_B , Boltzmann sabiti ($k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) ve T , Kelvin derece cinsinden sıcaklıktır.

$$\beta = \frac{N_3}{N_2}, \quad (2.22)$$

şeklinde bir “Boltzmann Faktörü” tanımlayarak. Denklem (2.8),

$$N = N_1 + N_2(1 + \beta), \quad (2.23)$$

biçimine dönüştürülebilir. Kararlı durum şartı altında ($dN/dt = 0$) Denklem (2.1c)’den,

$$R_p(N_1 - \beta N_2) = \gamma_2 N_2 + R_s(N_2 - N_1), \quad (2.24)$$

$$R_p N_1 - R_p \beta N_2 = \gamma_2 N_2 + R_s N_2 - R_s N_1, \quad (2.25)$$

$$N_1(R_p + R_s) = N_2(\gamma_2 + R_s + R_p \beta), \quad (2.26)$$

şeklinde N_1 ve N_2 arasında β cinsinden bir ilişki elde edilir. Denklem (2.23), Denklem (2.26)’da N_1 için kullanılacak olursa,

$$(N - N_2(1 + \beta))(R_p + R_s) = N_2(\gamma_2 + R_s + R_p \beta),$$

$$N(R_p + R_s) = N_2(\gamma_2 + R_s + R_p \beta + (1 + \beta)(R_p + R_s)),$$

$$N(R_p + R_s) = N_2(R_p(1 + 2\beta) + R_s(2 + \beta) + \gamma_2),$$

$$N_2 = N \frac{R_p + R_s}{R_p(1 + 2\beta) + R_s(2 + \beta) + \gamma_2}, \quad (2.27)$$

olarak yazılır. Bu sonucun Denklem (2.23)'de kullanılması ile,

$$\begin{aligned}
 N &= N_I + N \frac{(R_p + R_s)(1 + \beta)}{R_p(1 + 2\beta) + R_s(2 + \beta) + \gamma_2}, \\
 N_I &= N - N \frac{(R_p + R_s)(1 + \beta)}{R_p(1 + 2\beta) + R_s(2 + \beta) + \gamma_2}, \\
 N_I &= N \left(\frac{R_p(1 + 2\beta) + R_s(2 + \beta) + \gamma_2 - (R_p + R_s)(1 + \beta)}{R_p(1 + 2\beta) + R_s(2 + \beta) + \gamma_2} \right), \\
 N_I &= N \frac{R_p\beta + R_s + \gamma_2}{R_p(1 + 2\beta) + R_s(2 + \beta) + \gamma_2}, \tag{2.28}
 \end{aligned}$$

elde edilir. Şimdi, 1480 nm pompalama durumu için “Bağıl Ters Doluluk” bağıntısını

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N_2 - N_I}{N} \text{ eşitliğinden yararlanarak çıkartabiliriz. O halde, Denklem (2.27) ve}$$

Denklem (2.28)'den ve $\tau (= 1/\gamma_2)$ cinsinden,

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{R_p\tau(1 - \beta) - 1}{R_p\tau(1 + 2\beta) + R_s\tau(2 + \beta) + 1}, \tag{2.29}$$

elde edilir. Böylece, üç seviyeli sistem özelliği gösteren erbiyumlu kuvvetlendiricilerin 1480 nm dalgaboyu yakınlarında pompalanmaları durumunda Boltzmann faktörü ile sıcaklığa bağımlı ters doluluk ifadesi elde edilmiş olur.

2.2.3. Sıcaklığa Bağımlı Ters Doluluk İfadelerinin Pompalama Konfigürasyonları için Karşılaştırılması

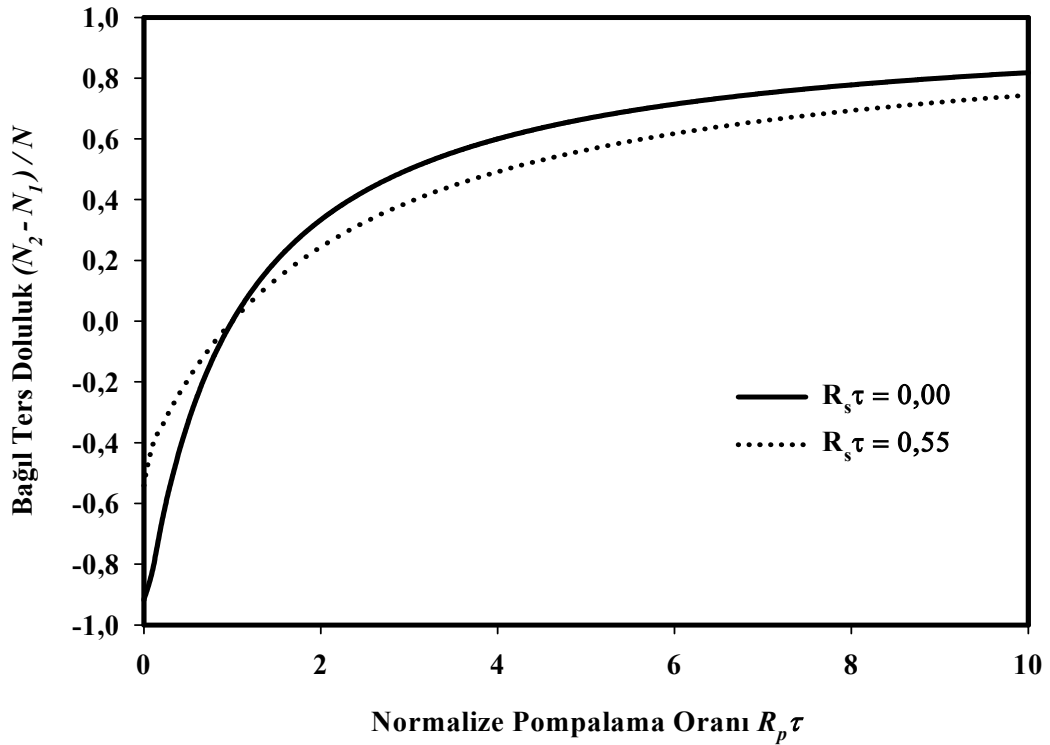
980 nm ve 1480 nm pompalama durumları için elde edilen bağıl ters doluluk bağıntılarını özetlemek gerekirse,

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{R_p\tau - 1}{R_p\tau + 2R_s\tau + 1}, \quad (980 \text{ nm pompalama konfigürasyonu için}) \tag{2.20}$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{R_p \tau (1 - \beta) - I}{R_p \tau (1 + 2\beta) + R_s \tau (2 + \beta) + I}, \quad (1480 \text{ nm pompalama konfigürasyonu için}) \quad (2.29)$$

eşitliklerini yazabiliriz. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici için artık belirli bir $R_s \tau$ normalize sinyal hızında normalize pompalama hızı $R_p \tau$ 'ya göre bağıl ters doluluğun değişimini inceleyebiliriz. Böylece, fiber kuvvetlendiriciye ait erbiyum iyonunun enerji seviyelerinin doluluklarının değişimi bilgisinden yararlanarak kazanç ve pompa gücü arasında daha karşılaştırmacı bir sonuç elde etmiş oluruz. Bir sonraki bölümde inceleyeceğimiz kazanç ve bağıl ters doluluk bağıntıları arasındaki ilişki, erbiyum için yarı kararlı seviyeden taban seviyeye geçiş şartına bağlı olmaktadır. Bu geçiş şartı, bağıl ters doluluk ifadesinde elde edildiği için artık kazanç bakımından da yorum yapılabilecektir.

Denklem (2.20)'nin normalize pompalama hızına göre değişimi $R_s \tau = 0$ ve $R_s \tau = 0,55$ için Şekil 2.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.6. 980 nm pompalama durumunda bağıl ters doluluğun normalize pompalama oranına göre değişimi ($R_s \tau = 0$; sisteme uygulanan herhangi bir normalize sinyalin olmadığı durumu temsil etmektedir).

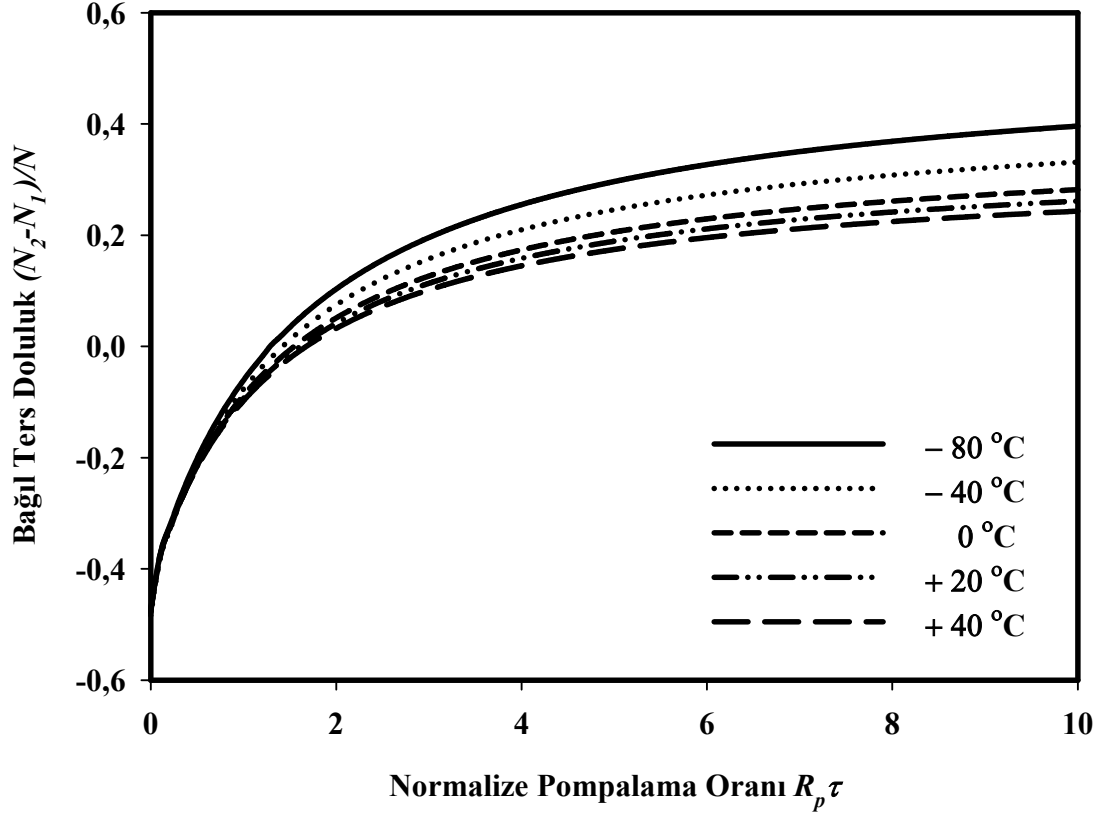
Sisteme her hangi bir sinyal gönderilmediği durumda bağıl ters doluluğun daha yüksek değerde olduğu görülmektedir. Kazanç bölgesine ulaşabilmek için en azından $R_p\tau > 1$ koşulunun gerçekleştirilmesi gerektiği Denklem (2.20)'den hemen görülür. Şekil 2.6'dan yararlanarak, 980 nm dalga boyunda pompa kaynağı kullanarak, pratikte maksimum $R_p\tau = 10$ için yaklaşık olarak %75 oranında ters doluluk elde edebileceğimizi de söyleyebiliriz. Bu durumda, eğer normalize sinyal oranını artıracak olursak, kazanç bölgesinden uzaklaşılacaktır.

Denklem (2.29)'un normalize pompalama hızına göre değişimi de $R_s\tau = 0$ ve $R_s\tau = 0,55$ için incelenecektir. Bu durumda, denklemde yer alan β parametresinin öncelikle belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.5.'den iki seviyeli olarak düşünülebilen 1480 nm pompalama konfigürasyonunda ikinci ve kısmen üçüncü seviyeler arasındaki $\Delta E_3 (= E_3 - E_2)$ enerji farkı oda sıcaklığında yaklaşık olarak 200 cm^{-1} olarak alınabilir [119]. İnceleme bölgemiz olan “ -80°C ile $+40^\circ\text{C}$ ” arasında güçlü lazer pompa kaynakları ile 1480 nm dalga boyunda pompalama yapıldığı için bu enerji farkının hemen hemen sabit kaldığını düşünebiliriz. Ancak, ilgili enerji seviyesinde Stark yarılmalı alt seviyelerin eşit enerji farkı ile dağılım gösterdiğini söylemek mümkün olmayabilir. Bu durum, homojen olmayan Stark yarılmalı kuvvetlendirme sistemlerinde görülmektedir. Denklem (2.29)'a göre “ -80°C , -40°C , 0°C , $+20^\circ\text{C}$ ve $+40^\circ\text{C}$ ’de Boltzmann faktörü olarak tanımladığımız β parametresi farklı değerler alacaktır. Yapmış olduğumuz hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Tablo 1.'de verilmiştir ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J. s.}$, $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J / }^\circ\text{K}$, $T = ^\circ\text{K}$ cinsinden sıcaklık., $\Delta E_3 = 200 \text{ cm}^{-1}$).

Tablo 2.1. Er^{3+} -katkılı fiber kuvvetlendirici için farklı sıcaklık değerlerinde β parametresinin aldığı değerler.

Sıcaklık $^\circ\text{C}$ $^\circ\text{K}$	-80; 193,15	-40; 233,15	0 ; 273,15	+20; 293,15	+40; 313,15
Boltzmann Faktörü (β)	0,230	0,297	0,354	0,380	0,404

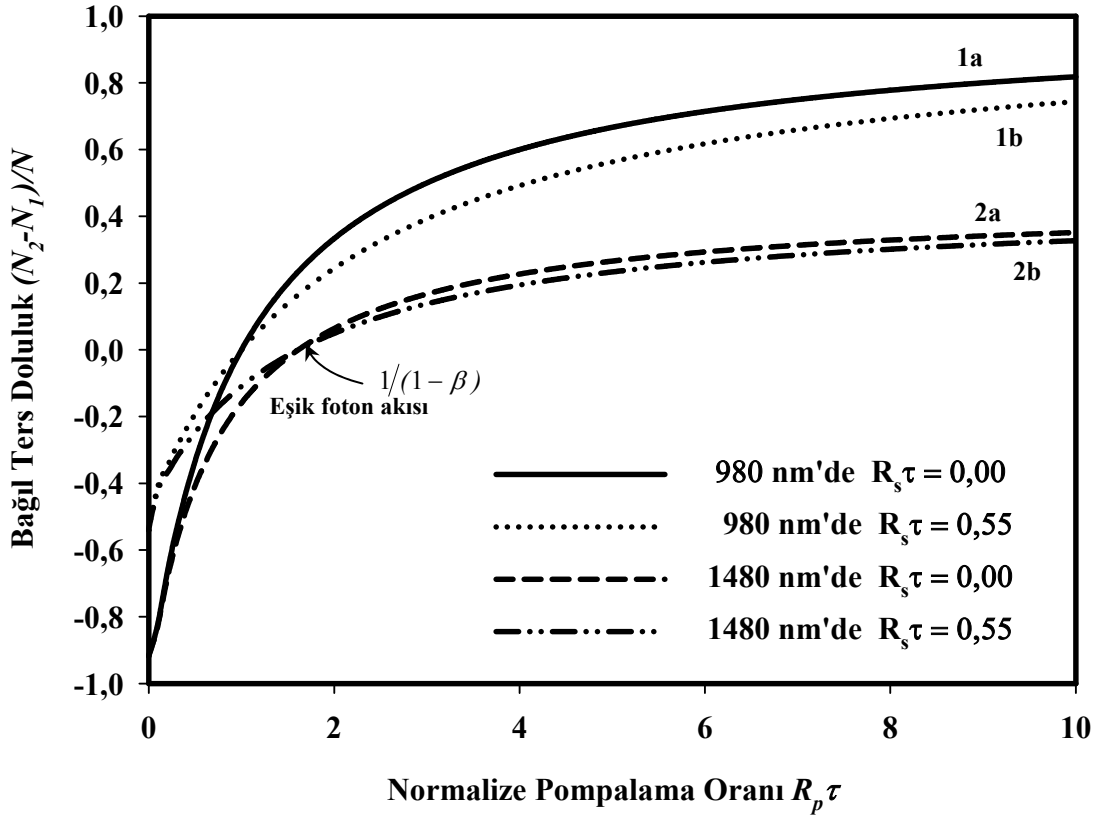
$R_s\tau = 0,55$ olmak üzere bağıl ters doluluğun davranışı farklı sıcaklık değeri için Şekil 2.7’de verilmiştir. Dikkate alacağımız sıcaklık değerleri pratik olarak EKFK’lerin yaklaşık çalışma sıcaklık bölgesinde yer almaktadır.



Şekil 2.7. 1480 nm pompalama durumunda normalize pompalama oranı ($R_s\tau = 0,55$)'na göre bağıl ters doluluğun değişimi. Sıcaklığın -80 °C 'dan $+40\text{ °C}$ 'a kadar artması durumunda bağıl ters doluluğun azaldığı görülmektedir.

Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'nin karşılaştırılmasından, 980 nm'de pompalamanın 1480 nm'de pompalamaya göre daha etkin olduğu görülmektedir. Eşik pompalama oranı ($R_p^e\tau$) bakımından ya da kazanç bölgesine geçmek için gerekli olan minimum pompalama oranı bakımından, 980 nm için $R_p^e\tau = 1,0$, 1480 nm için -80 °C 'da $R_p^e\tau = 1,3$ ve oda sıcaklığında $R_p^e\tau = 1,6$ olmaktadır. Bunun anlamı ise, 980 nm'de çalışan pompa kaynağı yardımı ile daha küçük pompa gücü kullanarak kazanç bölgesine geçilebileceğidir.

Şekil 2.8’de oda sıcaklığındaki değeri bakımından 1480 nm’deki pompalama konfigürasyonunun 980 nm’dekine göre daha zayıf etkinliğe sahip olduğu gösterilmektedir. Denklem (2.29) ve Denklem (2.20)’nin sıfıra eşitlenmesi ile elde edilen eşik foton akısı değerlerinin 1480 nm pompalama konfigürasyonu için sıcaklığa bağımlı; fakat 980 nm için sıcaklıktan bağımsız ve değerinin de 1 olduğu görülmektedir. Böylece, sıcaklığa bağımlılık üzerine yapılan deneysel çalışmalarda başvurulacak teorik modellerdeki eksiklik kısmen de olsa giderilmektedir [120]. Bu amaçla geliştirilen modellere sıcaklığa bağımlılığın eklendiği yeni çalışmalar dikkat çekmektedir [121].



Şekil 2.8. Oda sıcaklığında pompalama konfigürasyonlarının karşılaştırılması. (1a) ve (1b) eğrilerindeki davranış, sırasıyla, $R_s \tau = 0$ ve $R_s \tau = 0,55$ değerleri için 980 nm’de pompalanan sisteme aittir. Benzer şekilde 1480 nm’de pompalanan sistem için de (2a) ve (2b) eğrileri geçerlidir.

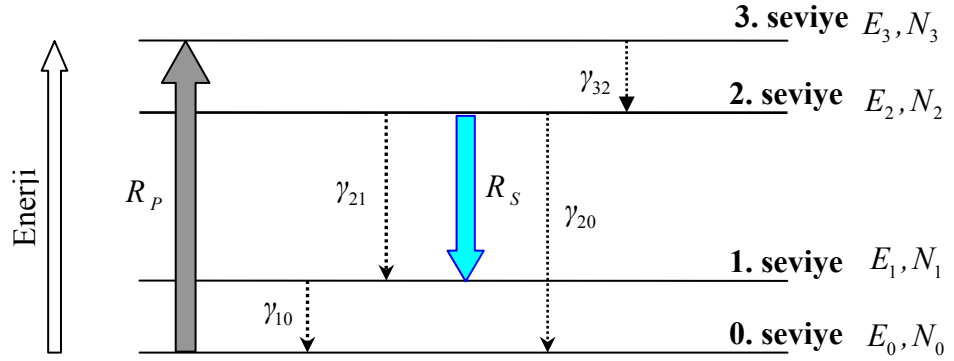
2.3. Dört Seviyeli Sistemler için Oran Denklemleri

Dört seviyeli sistem olarak incelenecek olan praseodmiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (PKFK) için de üç seviyeli sisteme benzer incelemeler yapılabilmektedir. Bu durumu Şekil 2.9 üzerinde inceleyebiliriz. Burada 0'ıncı seviye olarak taban seviye, 1. seviye ve 2. seviye kuvvetlendirme seviyeleri ve 3. seviye sistemin pompalandığı seviye olarak tanımlanmıştır. Çeşitli seviyeler arasında gerçekleşen kendiliğinden geçiş olasılıkları için,

$$\gamma_2 = \gamma_{21} + \gamma_{20}, \quad (2.30)$$

$$\gamma_3 = \gamma_{30} + \gamma_{31} + \gamma_{32} \quad (2.31)$$

yazılabilir.



Şekil 2.9. Pr^{3+} ya ait temel dört seviyeli kuvvetlendirme sistemi.

Oran denklemlerini belirlemek gerekirse,

$$\frac{dN_3}{dt} = R_p N_0 - \gamma_{32} N_3, \quad (2.32a)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -R_s N_2 - N_2 (\gamma_{21} + \gamma_{20}) + R_p N_0 + \gamma_{32} N_3, \quad (2.32b)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = R_s N_2 + \gamma_{21} N_2 - \gamma_{10} N_1, \quad (2.32c)$$

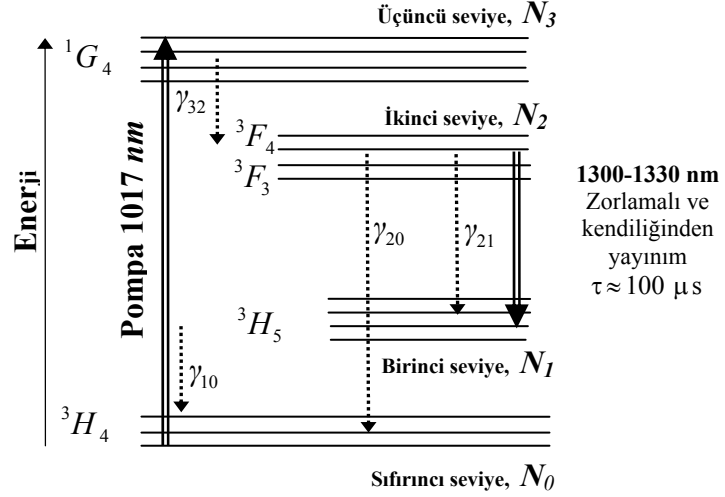
$$\frac{dN_0}{dt} = -R_p N_0 + \gamma_{20} N_2 + \gamma_{10} N_1, \quad (2.32d)$$

elde edilir. Kararlı durum çözümleri için $\frac{dN_i}{dt} = 0$ ($i = 0, 1, 2, 3$) şartı sağlanmalıdır. Bu durumda, Denklem (2.32) takımı doluluklar cinsinden ayrı ayrı çözülebilir. Burada, γ_i ilgili seviyelerden ışımalı geçişleri ($i = 0, 1, 2, 3$), R_p ; 0-3 seviyeleri arasındaki pompalama olasılığı ve R_s ; 2-1 seviyeleri arasındaki zorlamalı yayınım olasılıklarını temsil etmektedir. Kuvvetlendirilmiş ışıma için 2. ve 1. seviyeler arasında bir ters doluluk gerçekleştirilmesi gerektiği açıktır. Eğer birinci seviye, sıfırıncı seviyenin üstünde ısı enerjisi $k_B T$ ’den daha yüksek enerjide olursa, bu durumda birinci seviyeye ısı yolla uyarılan atomların sayısı da oldukça küçük olacaktır. Böylece, ikinci üst enerji seviyesine nispeten daha az sayıda atomu pompalayarak ters doluluk gerçekleştirilecektir. Bu durumda, ikinci ve birinci seviyeler arasında kuvvetlendirme sürecine katılacak fotonların yayınlanması için, üç seviyeli sistemdekine göre daha az pompalama yapılacaktır. O halde, dört seviyeli kuvvetlendirme mekanizmalarının üç seviyelilere göre daha üstün olduğu düşünülebilir. Ancak, bu tür mekanizmaların optik haberleşme bakımından ikinci pencere civarındaki 1300 nm dalgaboyunda ışıma yapmaları ve yerleşmiş haberleşme sistemlerinin pek çoğunda bu dalgaboyu yerine 1550 nm civarında ışıma yapan kuvvetlendiricilerin kullanılması nedeni ile pratik uygulama alanları sınırlıdır. Buna rağmen, gelecekte en yaygın kullanılacak EKFK’lere alternatif olarak görülen PKFK’lerin verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar hızla sürmektedir [122-127]. Camsı konakçı malzemelere farklı oranlarda katılan praseodimyum iyonunun f-d orbitalleri arasındaki geçişlerin teorik ve deneysel analizleri sonucunda Stark yarılmalı enerji seviyeleri arasındaki enerjiler elde edilmektedir. Özellikle, organik ve organik olmayan nanobileşik optik fiber malzemelerle yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir [128-130].

Oran denklemlerinin çözümleri bakımından üç seviyeli sisteme göre biraz daha karmaşık olan dört seviyeli sistemin ayrıntılı olarak incelenmesi ve “Bağıl Ters Doluluk” bağıntısının çıkartılması gerekmektedir. Bu kesimde, oran denklemi modeli olarak dikkate alacağımız incelemede “Boltzmann Faktörü”de işin içerisine dahil edilecektir.

Şekil 2.9’deki dört seviyeli sistemden yararlanarak oran denklemlerini kurmuştuk. Şimdi, nadir toprak elementlerinden dört seviyeli lazer sistemi özelliği gösteren

praseodmiyum elementi için oran denklemlerini analitik olarak çözerek “Bağıl Ters Doluluk” ifadesini elde edebiliriz. Bunun için, Şekil 2.10’dan yararlanarak bağıl ters doluluk bağıntısını çıkartalım:



Şekil 2.10. 1017 nm pompalama konfigürasyonunu gösteren praseodimyum elementine karşılık gelen temel dört seviyeli enerji diyagramı (kesikli çizgili oklar seviyeler arasındaki kendiliğinden yayınımı temsil etmektedir).

Pr^{3+} için uyarım dalga boyu, ${}^3H_4 \rightarrow {}^1G_4$ geçişinin pik dalga boyuna karşılık gelen 1017 nm’dir. Pr^{3+} için ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$ seviyeleri arasındaki yayınım ya da flüoresans dalga boyu yaklaşık 1320 nm’de görülmektedir. $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-NaF}$ (ZBLAN) camda katkılı praseodimyum iyonu için 1G_4 seviyesinden alt seviyelere optik geçişlerin Judd-Ofelt analizi ile elde edilen sonuçları yardımı ile hangi seviyelerdeki geçişlerin daha baskın oldukları belirlenebilmiştir. Buna göre, ZBLAN cam’da 1G_4 seviyesinden 3F_4 ve/veya 3F_3 seviyelerine geçişler çok hızlı gerçekleşmektedir ve 3F_4 (3F_3) seviyesinin ölçülen yaşam süresi $\tau \approx 100 \mu\text{s}$ olmak üzere, %63,9 baskınlıkta 3F_4 (3F_3) $\rightarrow {}^3H_5$ yayınım geçişi gözlenmiştir [47, 51, 65].

Kararlı durum şartları altında Denklem (2.32) takımının dikkate alınması ve her bir seviyedeki dolulukların zamanla değişiminin sabit olduğunun düşünülmesi ile $dN_i/dt = 0$ ($i = 0, 1, 2, 3$) eşitliğini kullanabiliriz. Bu incelemede, 3. seviyeden 2. seviyeye olan geçişlerin çok hızlı olduğunu bilindiğinden 3. seviyenin doluluğunu yaklaşık olarak ihmal edebiliriz, yani $N_3 \cong 0$. Benzer bir yaklaşım, 1. seviye ile 0. seviye arasında da yapılabilir. Bu durumda $N_1 \cong 0$ olarak alınabilmektedir. O halde, 4 seviyeli sistemin toplam doluluğunu,

$$N \cong N_0 + N_2, \quad (2.33)$$

olarak alabiliriz. Kararlı durum çözümlerini aramak için $dN_2/dt = 0$ eşitliğini Denklem (2.32b)'de kullanırsak,

$$\frac{dN_2}{dt} = -R_s N_2 - N_2 (\gamma_{21} + \gamma_{20}) + R_p N_0 = 0,$$

$$-R_s N_2 - N_2 \gamma_2 + R_p (N - N_2) = 0,$$

$$R_p N_2 + R_s N_2 + N_2 \gamma_2 = R_p N,$$

$$N_2 = N \frac{R_p}{(R_p + R_s + \gamma_2)}, \quad (2.34)$$

elde edilir. Denklem (2.34)'ü yarı kararlı seviyenin yaşam süresi τ_2 ($\gamma_2 = 1/\tau_2$) cinsinden yazmak gerekirse,

$$N_2 = N \frac{R_p \tau_2}{(R_p \tau_2 + R_s \tau_2 + 1)}, \quad (2.35)$$

elde edilir. Bu ifadeden, bağıl ters doluluk bağıntımız $\Delta N / N \cong (N_2 - N_1) / N$ 'i oluşturabiliriz. Ancak, 2. seviyeyi oluşturan, 3F_4 ve 3F_3 katmanları arasındaki doluluklar Boltzmann yasası gereği, sıcaklığa bağlı olarak değişecektir. Bu katmanların doluluğu her birinin doluluğu yardımı ile $N_2 = N_{22} + N_{21}$ olarak yazılabilir. O halde, Boltzmann faktörü β 'yı,

$$\beta = \frac{N_{22}}{N_{21}} = \exp(-\Delta E_{22}/k_B T), \quad (2.36)$$

olarak tanımlarsak $(\Delta E_{22} = E_{22(^3F_4)} - E_{21(^3F_3)})$, ikinci seviyenin doluluğu ile ilgili olarak $N_{21} = \frac{N_{22}}{\beta}$ dönüşümü altında,

$$N_2 = N_{21}(1 + \beta), \quad (2.37)$$

eşitliğini elde ederiz. Bu durumda, Denklem (2.35),

$$N_{21} = N \frac{R_p \tau_2}{(1 + \beta)(R_p \tau_2 + R_s \tau_2 + 1)}, \quad (2.38)$$

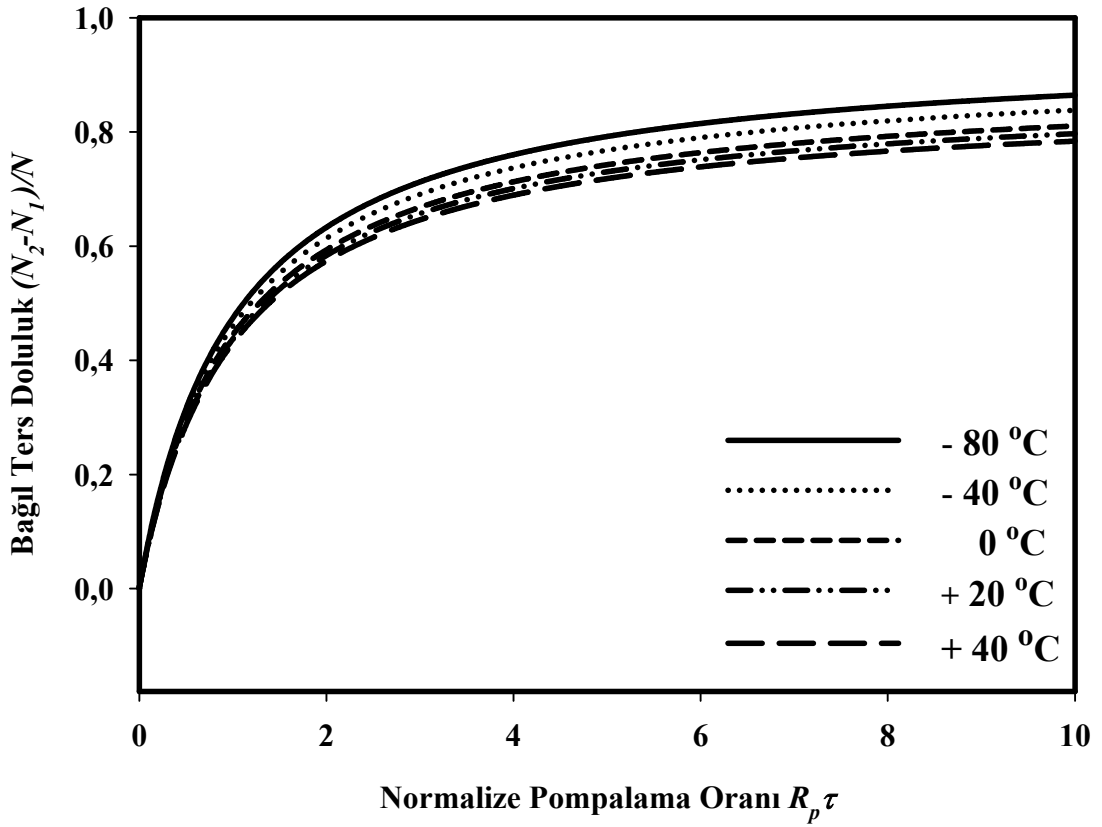
olarak yeniden düzenlenmiş olacaktır. $N_1 \cong 0$ olduğunu hatırlarsak,

$$\begin{aligned} \Delta N &\cong N_{21} - N_1 = N \frac{R_p \tau_2}{(1 + \beta)(R_p \tau_2 + R_s \tau_2 + 1)}, \\ \frac{\Delta N}{N} &\cong \frac{R_p \tau_2}{(1 + \beta)(R_p \tau_2 + R_s \tau_2 + 1)}, \end{aligned} \quad (2.39)$$

bağıntısı elde edilecektir. Dolayısı ile, Denklem (2.39), belirli bir normalize sinyal hızı değerinde, normalize pompalama hızına göre bağlı ters doluluğun nasıl değiştiği ile ilgili bilgi verecektir. Bu noktada, β parametresinin praseodmiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerin çalışma sıcaklık bölgesi olarak alınabilecek “- 80 °C ile + 40 °C ” aralığındaki değerini belirlemeye çalışalım. $^3F_4 \rightarrow ^3F_3$ seviyeleri arasında yaklaşık 400 cm^{-1} ’lik enerji aralığı oluşmaktadır [65]. Bu enerji aralığı içerisindeki doluluklar, dikkate alacağımız sıcaklık değerlerinde farklılaşacağı için β parametresi de farklı değerler alacaktır (Tablo 2.2). $R_s \tau_2 = 6,05 \times 10^{-3}$ olmak üzere, Denklem (2.39)’un grafiği Tablo 2.2’de verilen beş farklı sıcaklık değeri için Şekil 2.11’de verilmiştir. Dikkate alacağımız sıcaklık değerleri pratik olarak PKFK’lerin yaklaşık çalışma sıcaklığı bölgesinde yer almaktadır.

Tablo 2.2. Pr^{3+} -katkılı fiber kuvvetlendirici için farklı sıcaklık değerlerinde β parametresinin aldığı değerler.

Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{K}$	-80; 193,15	-40; 233,15	0 ; 273,15	+20; 293,15	+40; 313,15
Boltzmann Faktörü (β)	0,051	0,084	0,121	0,140	0,159



Şekil 2.11. Pr^{3+} için 1017 nm pompalama durumunda bağıl ters doluluğa göre normalize pompalama oranı.

Üç seviyeli sistem ile dört seviyeli sistemleri karşılaştırmak gerekirse, dört seviyeli sistemde ters doluluk ifadesinin herhangi bir pompalama durumunda pozitif olacağı görülmektedir. Ayrıca, pompa gücünün ya da normalize pompalama oranının sıfır

olduğu durumda, sinyalin hiç bir zayıflama ya da kazanç göstermeyeceği görülür. Dolayısıyla, üç seviyeli fiber kuvvetlendiricilere göre dört seviyeli fiber kuvvetlendiricilerin daha üstün olduğu söylenebilir. Kuvvetlendirme sistemine yeterli pompalama yapılmasa dahi, dört seviyeli fiber kuvvetlendiricide zorlamalı sinyal yayılırken, üç seviyeli fiber kuvvetlendiricide zorlamalı sinyal soğurulmaktadır. Genel olarak söylemek gerekirse, her iki kuvvetlendirme mekanizmasında da Stark seviyeleri arasında sıcaklığa bağlı olarak değişen doluluklar vardır. Ancak, dört seviyeli kuvvetlendirme mekanizmalarının sıcaklığa bağımlılığı üç seviyelilerinkinden daha zayıftır. Bu bölümde yapılan incelemede daha çok Stark yarılmalı sistemlerin alt enerji seviyeleri arasında sıcaklığa bağlı olarak dağılım gösteren dolulukların kuvvetlendirme mekanizmasındaki baskınlığı vurgulanmaktadır. Böylece, gerçek bir nadir-toprak katkılı fiber kuvvetlendirici tasarlamak için gerekli analitik sonuçların sıcaklığın bir fonksiyonu olarak eldesi sağlanmaktadır.

BÖLÜM 3

ERBİYUM VE PRASEODİMYUM KATKILI TEK MODLU FİBER KUVVETLENDİRİCİLERDE KAZANCIN SICAKLIK BAĞIMLI MODELLENMESİ

3.1. Giriş

Nadir-toprak katkılı fiber kuvvetlendiriciler optik haberleşme alanında son derece önemli bir yere sahiptir. Özellikle, Erbiyum-katkılı kuvvetlendiricilerin fiber optik haberleşme için üçüncü pencere olarak isimlendirilen dalga boyunda yaklaşık 30 nm’lik geniş bir bant aralığında ışımının kuvvetlendirilmesi olayını sağlaması dikkat çekicidir. Aktif bir fiberde, yani fiber haberleşme ağında kuvvetlendirici olarak görev alan bir fiberde, erbiyum iyonlarını üst enerji seviyelerine pompalamak için sinyal ışımından daha kısa dalgaboyuna sahip pompa ışımı kullanılır. Kuvvetlendirme konusunun ilk araştırıldığı yıllarda pompa kaynağı olarak görünür bölge dalgaboyunda çalışan lazerler kullanılmaktaydı. Bu tür kaynaklar fazla enerji gerektirmeleri ve maliyetlerinin yüksek olması nedeni ile çok az tercih ediliyordu.

Günümüzde 980 nm veya 1480 nm dalgaboyunda hem az enerji gerektiren hem de düşük maliyetli çalışan iki tür pompa kaynağı kullanılmaktadır. Böylece, iyi bir pompalama etkinliği sağlanmakta ve “uyarılmış durum soğurumu (UDS)” etkisinden kaçınılmaktadır. UDS, daha çok kısa dalgaboylu pompalama durumunda erbiyum

iyonunun üst uyarılma seviyelerinden gelen ve ışımaya katılan faz uyumsuz fotonların oluşmasına neden olur.

Kuvvetlendirme mekanizmasını tanımlamada işe karışan parametreler kazanç, gürültü faktörü, “kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayılım, (KKY)” ve UDS olarak sıralanabilir. Bu konuda yapılan çalışmalarda, genellikle fiber boyunca katkılama konsantrasyonunun ve alan dağılımlarının düzgün olduğu kabulü yapılmıştır. Düzgün olmayan katkı dağılımları ve fiber içerisinde ilerleyen modların şiddet dağılımları sadece küçük sinyal uygulamalarında göz önüne alınan durumlardır [131-134].

Son yıllarda erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerde kazancı modellemek için yapılan analitik çalışmalarda giriş güçleri ve fiber uzunluğu cinsinden fiber kuvvetlendiricinin kazancının tanımlanması yoluna gidilmektedir [135, 136]. Analitik ya da matematiksel bir tanımlama için başta gelen zorluk, fiber kuvvetlendiricinin enine özelliklerinin, yani mod alan profilleri ve erbiyum dağılımının tam olarak üst üste getirilememesinden kaynaklanmaktadır. Yine de bazı yaklaşımlar ile bu zorlukları aşmak mümkündür. “Oran Denklemleri” yaklaşımı ile kazanç ve pompa gücü arasındaki ilişkiden EKFK’lerin verim analizi yapılabilir. Ancak, kuvvetlendiricinin kazanç-pompa gücü ya da kazanç-fiber uzunluğu bakımından optimum şartlarını belirlemede daha duyarlı bir incelemeye ihtiyaç vardır. “Yayılım Denklemleri” olarak bilinen yaklaşımla maksimum kazancı elde etmek için sinyal ve pompa güçlerinin fiber uzunluğuna bağımlılığı araştırılarak en azından optimum uzunluk belirlenebilir. Bu yaklaşımlar yapılırken dikkate alınmayan fakat kuvvetlendirme mekanizmasında oldukça önemli etkilere neden olan sıcaklık parametresi, tam bir analiz için, hesaba katılmalıdır.

1,5 μm haberleşme penceresinde sinyal kuvvetlendirme işlemini başarı ile yapabilen erbiyum-katkılı optik fiber kuvvetlendiricilerin devam eden gelişiminin yanı sıra, şimdilerde uzun mesafeli haberleşme ağlarında 1,3 μm haberleşme penceresinde çalışabilen ve EKFK’lerle benzer kuvvetlendirme özellikleri gösteren praseodmiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler üzerinde durulmaktadır. Özellikle düşük fonon enerjili florid camlara katılan Pr^{3+} iyonları yardımı ile dört seviyeli kuvvetlendirme

mekanizmaları oluşturulmaktadır. PKFK'lerin kazanç verimliliğini belirlemede önemli bir gereksinim olarak görülen florid-tabanlı konakçı malzemeler, EKFK'lerin üretildiği silisyum konakçı malzemelere göre daha düşük fonon enerjisine sahip olması bakımından daha üstün özelliklere sahiptir [137]. Böylece, yüksek saflıkta düşük katkı konsantrasyonlu florid-tabanlı konakçı malzemede kazancın üstel olarak azalmasına neden olan çoklu fonon geçişleri görülmemektedir.

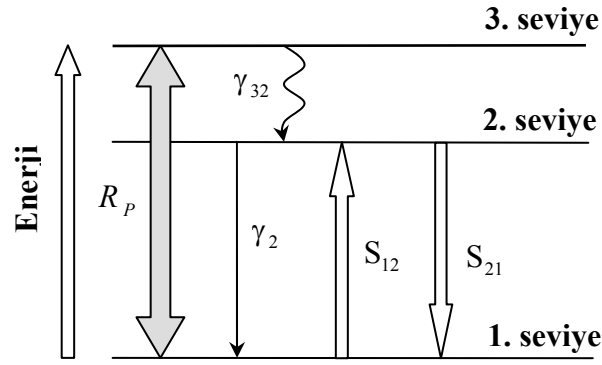
Bu bölümde, oran denklemleri yaklaşımı ile EKFK'lerin farklı sıcaklık değerlerinde çalışma verimi, kazanç ve pompa gücü cinsinden modellenenecektir. Bu incelemeler sırasında KKY gürültüsünün etkisi de işin içine dahil edilerek sıcaklığa bağımlı kazanç bağıntısı elde edilecektir. Yayılım denklemlerinin, EKFK'lerin optimum çalışma şartlarını belirlemede etkin olduğu düşüncesi ile kazanç ve fiber kuvvetlendirici uzunluğu arasındaki ilişki sıcaklığa bağlı olarak tanımlanacaktır. KKY gücünün sayısal değeri OptiAmplifier 4.0 yazılım programı, [138], aracılığı ile elde edilecek ve tezin içeriğini oluşturan sıcaklığa bağımlı model kapsamında analitik ifadelerde kullanılacaktır. Kazanç-pompa gücü arasındaki ilişkinin kurulması ile verim analizi yapılacak olan bir diğer kuvvetlendirici PKFK'lerdir. Daha çok oran denklemleri modelinin kullanılması ile yapılacak olan analitik incelemelerde belirli bir uzunluğa sahip PKFK için kazanç-pompa gücü ilişkisi kurulacaktır.

3.2. Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile EKFK'lerin

Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi

Erbiyum iyonları ile katkılanmış tek modlu fiber kuvvetlendirici durumunda homojen olarak genişletilmiş üç seviyeli lazer ya da kuvvetlendirme sistemleri için oran denklemlerinin çıkartılışını bir önceki bölümde incelemiştik. Kazanç ve pompa gücü arasındaki ilişkiyi, sıcaklık ya da Boltzmann faktörünü de dikkate alarak kurmak için erbiyumlu sistemin yeniden yorumlanması gerekmektedir. Özellikle, pratik uygulamalarda, sinyal soğurum ve yayılım olasılıklarının birbirinden farklı olması, oran denklemlerinin yeniden oluşturulmasını gerektirmektedir. Bunun için ikinci bölümde yapılan analitik işlemlerin benzerleri yapılarak her bir seviyedeki doluluklar elde edilecek ve kazanç bağıntısında kullanılacaktır.

Şekil 3.1'deki gibi bir sistemi silisyum, tellurit ve flüorazirkonat gibi camı konakçılara katkılanmış erbiyum iyonlarının enerji seviyelerini tanımlamada kullanabiliriz [139]. Burada, S_{12} ve S_{21} ; 1-2 ve 2-1 seviyeleri arasında sinyal ışınına eşlik eden, sırasıyla, zorlamalı soğurum ve zorlamalı yayının olasılıklarını, R_p ; 1-3 ve 3-1 seviyeleri arasında, sırasıyla, pompalanma ve zorlamalı yayının olasılıklarını, γ_2 ; ışımalı geçiş olasılığını ve γ_{32} ; ışımaz geçiş olasılığını temsil etmektedir.



Şekil 3.1. Çeşitli camı konakçı malzemelere katkılanmış Er^{3+} iyonuna ait üç seviyeli kuvvetlendirme sistemi.

Şekil 3.1'deki Er^{3+} iyonuna ait sistemi dikkate alarak oran denklemlerini yeniden kuralım: Denklem (2.1a)'da $\gamma_3 \cong \gamma_{32}^{NR} = \gamma_{32}$, $R_s(\text{soğurum}) = S_{12}$ ve $R_s(\text{yayınım}) = S_{21}$ olarak yeniden düzenlemeler yaparsak;

$$\frac{dN_3}{dt} = R_p(N_1 - N_3) - \gamma_{32}N_3, \quad (3.1a)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -S_{21}N_2 + S_{12}N_1 - \gamma_2N_2 + \gamma_{32}N_3, \quad (3.1b)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_p(N_1 - N_3) + \gamma_2N_2 - S_{12}N_1 + S_{21}N_2, \quad (3.1c)$$

elde edilir. Denklem (3.1) takımının kararlı durum şartları ile incelenmesi yani,

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0, \quad (3.2)$$

eşitliklerinin kullanılması ile her bir doluluğun toplam doluluk cinsinden tanımını yapabiliriz. O halde, Denklem (3.1a)'dan

$$\gamma_{32}N_3 = R_p(N_1 - N_3), \quad (3.3)$$

eşitliği Denklem (3.1b)'de kullanılacak olursa

$$-R_pN_3 - R_pN_1 + \gamma_{21}N_2 + S_{21}N_2 - S_{12}N_1 = 0, \quad (3.4)$$

elde edilir. Üçüncü ve ikinci seviyeler arasında Boltzmann dağılımının geçerli olduğunu düşünürsek $N_3 = \beta N_2$ ilişkisi ile Denklem (3.4)'ün yeniden düzenlenmesi gerekecektir;

$$N_2\gamma_{21} = (N_1R_p - N_2R_p\beta) + (N_1S_{12} - N_2S_{21}). \quad (3.5)$$

N_1 ve N_2 arasında, toplam doluluk N ve β cinsinden bir ilişki yazılabilir:

$$N = N_1 + N_2 + N_3,$$

$$N_1 = N - N_2(1 + \beta). \quad (3.6)$$

Bu eşitliğin Denklem (3.5)'de kullanılması ile

$$N_2 = \frac{R_p\tau + S_{12}\tau}{R_p\tau(1 + 2\beta) + S_{12}\tau(1 + \beta + \eta) + I}N, \quad (3.7)$$

elde edilir. Denklem (3.7)'nin Denklem (3.6)'da kullanılması ile

$$N_1 = \frac{\beta R_p\tau + S_{12}\tau\eta}{R_p\tau(1 + 2\beta) + S_{12}\tau(1 + \beta + \eta) + I}N, \quad (3.8)$$

ve buradan da bağıl ters doluluk ifadesi

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{R_p \tau (1 - \beta) + S_{12} \tau (1 - \eta) - 1}{R_p \tau (1 + 2\beta) + S_{12} \tau (1 + \beta + \eta) + 1} N, \quad (3.9)$$

olarak elde edilir. Bu eşitliklerde, $\gamma_2^{-1} = \tau$ ilişkisi kullanılmıştır ve τ ; üst uyarım seviyesinden yarı kararlı seviyeye ışımasız yolla gelen elektronların bu seviyede kalma süreleri yani, “yaşam süresi”dir. η parametresi S_{21}/S_{12} oranını temsil etmektedir. S_{12} ve S_{21} arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntılarla verilmektedir [140]:

$$S_{12} = \frac{\Gamma_s \sigma_{12}}{h \nu_s A_s} (P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-), \quad (3.10)$$

$$S_{21} = \frac{\Gamma_s \sigma_{21}}{h \nu_s A_s} (P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-). \quad (3.11)$$

Burada, Γ_s ; fiberin mod örtüşme faktörüdür ve normalize olmuş sinyal ışınına ait optik şiddet dağılımı ve erbiyum iyon dağılımı arasındaki ilişkiyi tanımlar. Basamak indisli bir fiber için $\Gamma_s = 1 - \exp\left\{-\left(R/w_s\right)^2\right\}$ bağıntısı ile verilir ve 0 ile 1 arasında değerler alır (R ; erbiyum iyonu ile katılanmış bölgenin yarıçapı ve w_s ; sinyal güç dağılımına ait mod alan yarıçapı).

Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)’de görülen diğer parametrelerden, $\sigma_{12,21}$; sinyal ışınına ait soğurum ve yayınım tesir kesitleri, ν_s ; sinyal frekansı, A_s ; fiber öz bölgesinin etkin tesir kesit alanı, h ; Planck sabiti, $P_{KKY}^{\pm}$; kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayınım gücü (“+” işaret sinyal ile aynı doğrultuda üretilen KKY gücünü ve “-” işaret ise sinyal ile zıt doğrultuda üretilen KKY gücünü temsil etmektedir) ve P_s ; temel fiber modu LP_{01} içerisinde ilerleyen sinyal gücü olarak tanımlanır. LP_{01} modu, tek modlu fiberlerde yayılma yönüne dik doğrultudaki alan dağılımı olarak adlandırılır ve sadece bu mod ortaya çıkar. Maksimum ışık dağılımına sahip olan bu modu tasvir etmek için mod alan yarıçapı kavramı tanımlanmıştır. Mod alan yarıçapı, radyal alan genliğinin optik eksen üzerindeki ($r = 0$) maksimum değerinin $1/e$ ’sine (yaklaşık % 37) düştüğü değerdir [141-145].

Fiber uzunluğu boyunca sinyal ve KKY güçlerindeki değişimi aşağıdaki yayılım denklemleri yardımı ile inceleyebiliriz [139];

$$\frac{dP_s^\pm}{dz} = \pm \Gamma_s \sigma_{12} (\eta N_2 - N_1) P_s^\pm, \quad (3.12)$$

$$\frac{dP_{KKY}^\pm}{dz} = \pm 2h\nu_s \Delta\nu \sigma_{21} \Gamma_s \pm \Gamma_s (\sigma_{21} N_2 - \sigma_{12} N_1) P_{KKY}^\pm. \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'ün sağındaki ilk terim; optik sinyaller fibere girse de girmese de fiber boyunca optik gürültünün üretildiğini ve ikinci terim; kuvvetlendirilmiş kendiliğinden yayılım yolu ile üretilen sinyalin fiber boyunca ilerlediğini göstermektedir. $\Delta\nu$; farklı frekans kanallarından gelen sinyallere ait frekans band genişliğidir (yaklaşık olarak 1 nm ya da 125 GHz'lik oldukça küçük bir genişliğe sahiptir). Denklem (3.12)'deki lineer diferansiyel denklemin çözümü sinyal kazanç bağıntısını verirken, Denklem (3.13)'deki lineer olmayan diferansiyel denklemin çözümünde birbirine bağlı ya da çiftlenimli diferansiyel denklemler takımının çözümüne ihtiyaç vardır. Bunun için KKY gücünün hesabında OptiAmplifier 4.0 yazılım programı kullanılacaktır.

Denklem (3.12)'nin fiberin boylamasına doğrultusu z üzerinden integralinin alınması ile sinyal kazanç bağıntısı elde edilir;

$$\int_{P_s(0)}^{P_s(L)} \frac{dP_s}{P_s} = \int_0^L \Gamma_s \sigma_{12} (\eta N_2 - N_1) dz,$$

$$\ln(P_s(L)) - \ln(P_s(0)) = \Gamma_s \sigma_{12} (\eta N_2 - N_1) L,$$

$$\ln\left(\frac{P_s(L)}{P_s(0)}\right) = \Gamma_s \sigma_{12} (\eta N_2 - N_1) L,$$

$$\text{ve } \frac{P_s(L)}{P_s(0)} = G \text{ kazancı}$$

$$\ln(G) = \Gamma_s \sigma_{12} (\eta N_2 - N_1) L,$$

$$G = \exp[\Gamma_s \sigma_{12} (\eta N_2 - N_1) L], \quad (3.14)$$

olarak elde edilir. Kazancı, dB cinsinden ifade etmek gerekirse,

$$G(dB) = 10 \log_{10} \left[\frac{P_s(L)}{P_s(0)} \right], \quad (3.15)$$

eşitliği kullanılmalıdır. Böylece, EKFK tasarımı yapılırken, kazanç ve pompa gücü arasındaki ilişkiden verimlilik hesapları yapılabilir. S_{21}/S_{12} oranını temsil eden “ η ” parametresi, belirli bir λ_s sinyal dalga boyunda Denklem (3.11) ve Denklem (3.10)’un oranından tesir kesitlerinin oranı cinsinden yazılabilir;

$$\eta = \frac{S_{21}}{S_{12}} = \frac{\sigma_{21}(\lambda_s)}{\sigma_{12}(\lambda_s)}. \quad (3.16)$$

Sinyal yayılım ve soğurum tesir kesitleri arasındaki ilişkiyi McCumber bağıntısı [146, 147] yardımı ile kurarak farklı sıcaklık değerlerinde sinyal soğurum ve yayılım spektrumunu teorik olarak belirleyebiliriz;

$$\sigma_{21}(\lambda_s) = \sigma_{12}(\lambda_s) e^{(\varepsilon - h\nu_s)/k_B T}. \quad (3.17)$$

Burada ε ; T sıcaklıkta $^4I_{15/2}$ seviyesinden $^4I_{13/2}$ seviyesine bir Er^{3+} iyonunu uyarmak için gerekli olan serbest enerji ya da sıcaklığa bağımlı uyarım enerjisidir. Denklem (3.17)’nin aşağıdaki daha kullanışlı biçimini kullanarak yapılan teorik hesaplamaların soğurum ve yayılım spektrumundan elde edilen deneysel sonuçlarla olan karşılaştırılmasında % 3 hata ile tutarlı olduğu görülmüştür [148-149];

$$\frac{\sigma_{21}(\lambda_s)}{\sigma_{12}(\lambda_s)} = \exp \left(\frac{hc}{k_B T} \left[\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_s} \right] \right). \quad (3.18)$$

λ_0 'ın teorik hesabı bir zorluk gibi görünse de, belirli bir λ_s sinyal dalga boyunda, sinyal soğurum ve yayılım spektrumlarından alınan bilgiler yardımı ile hesaplanabilmektedir.

EKFK'lerin oran denklemleri yardımı ile sıcaklık bağımlı modellendiği bu bölümde, belirli bir fiber kuvvetlendirici uzunluğunda kazanç ve pompa gücü arasındaki ilişkiyi belirlemek için, Denklem (3.14) kullanıldığından, N_1 ve N_2 ifadesinde gözükten R_p 'nin bilinmesi gerekir:

$$R_p = \frac{\Gamma_p \sigma_p P_p}{h \nu_p A_p}, \quad (3.19)$$

eşitliği ile P_p pompa gücü cinsinden verilir [139] ve normalize sinyal olasılığı eşitliğinde yapılan tanımlamalar “ p ” alt indisine sahip normalize pompa olasılığı için de geçerlidir.

3.3. Modifiye Edilmiş Yayılım Denklemleri ile EKFK'lerin

Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi

Üç seviyeli kuvvetlendirme sistemlerinin davranışını belirlemede başlangıç düzeyinde en yararlı inceleme oran denklemlerini tanımlamak ve böylece EKFK'ler için verim analizi hesaplarına geçmektir. Ancak, daha gerçekçi bir analiz için fiber doğrultusu boyunca güç yayılım bağıntılarından başlamak gerekmektedir. Böylece, hem problemin üç boyutlu özellikleri hem de KKY'den gelen etkiler işin içine katılmış olur. Oran denklemleri modelinde belirli bir fiber uzunluğu için kazanç-pompa gücü ilişkisi daha belirgin açıklanırken, yayılım denklemleri modeli aracılığı ile belirli bir pompa gücünde kazanç-fiber uzunluğu ilişkisi yorumlanabilmektedir. Bu amaçla, hem sinyal hem de pompa güçlerine ait güç yayılım denklemleri dikkate alınarak EKFK'ler için sıcaklık bağımlı kazanç-fiber kuvvetlendirici uzunluğu bağıntıları elde edilecektir.

Kuvvetlendirici kazancının modellenmesinde en önemli parametre yarı kararlı seviyenin gerçek zaman sabitinin katkı elementinin katkılanma konsantrasyonuna,

katkılandığı malzemeye ve Boltzmann faktörüne bağlı oluşudur. Bu durumların dikkate alınması ile daha gerçekçi bir zaman sabiti belirlenip optimum koşulların oluşumunda kullanılmaktadır. Buna ek olarak, yayılım denklemlerine Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Yayınım (KKY)'ın etkisi de dahil edilerek, kazanç ve fiber kuvvetlendirici uzunluğu yeniden yorumlanmaktadır [150, 151]. Ayrıca, kazanç değerinin artırılması yoluna gidildiğinde görülen gürültü faktörünün sınırlandırılması için gerekli limit kazanç değerleri de elde edilmektedir.

Optik kuvvetlendiriciler için önemli bir konunun KKY olduğundan daha önce bahsedilmişti. Gerçekte, lazer iyonlarının ya da uyarılmış durumdaki iyonların kendiliğinden yayınlanmaları sonucu ortaya çıkan KKY olayı, optik kuvvetlendiricilerde “gürültü” olarak bilinen durumla karşılaşmamıza neden olur. Er^{3+} -katkılı cam konakçılarda sonlu uyarılmış durum yaşam süresine sahip iyonların bir kısmının kendiliğinden taban duruma geçmelerinin sonucunda iyon başına bir foton yayınlanır. Bu foton, zorlamalı yayılım yolu ile yayınlanan fotonun aksine, gelen sinyal ışınına göre koherent olmayan karakteristiklere sahiptir. Böylesi kendiliğinden üretilen fotonlar topluluğu fiber kuvvetlendirici tarafından çoğaltılarak gürültü formunu alır ve sinyal ışınına eklenir. Kuvvetlendirmiş kendiliğinden yayınının bir sonucu olarak ortaya çıkan bu gürültü faktörüne “KKY gürültüsü” denir ve herhangi bir EKFK’de, KKY gürültüsü olmaktadır. Bu durumda, yayılım denklemlerinde dikkate almamız gereken bir diğer eşitlik, KKY gürültüsü gücünün de hesaplara katılmasıdır. Böylece, yayılım denklemleri modeli yardımı ile sinyal, pompa ve KKY gürültüsü güçlerine ait yayılım denklemleri aracılığı ile EKFK’ler için daha tam verim hesaplamaları yapılabilecektir.

Maksimum kazanç için, pompa kaynakları yardımı ile taban durumdaki tüm iyonların uyarılmış duruma pompalanmaları gerektiğini biliyoruz. Böyle bir durumda, kazancın KKY gürültüsüne oranı maksimumdur. Silisyum bazlı konakçılarda, maksimum kazanç, 980 nm pompalama yolu ile elde edilirken, 1480 nm pompalama ile (tüm iyonlar uyarılmış seviyeye pompalanamadığı için) elde edilememektedir. Her iki pompalama durumunda, KKY gürültüsü kendiliğinden ya

da rastgele meydana gelebilmekte ve fiber boyunca her iki doğrultuda da yayılabilmektedir [152-162].

Tezin bu kesiminde, keyfi bir katkı dağılımına sahip erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin optimum uzunluğu ve maksimum kazancı için, pompa güçlerinin yayılımını da dikkate alarak sıcaklık bağımlı analitik ifadeler çıkartılacaktır.

Kararlı durum şartları altında Denklem (3.4)'ü yeniden yazalım;

$$-R_p N_3 - R_p N_1 + \gamma_2 N_2 + S_{21} N_2 - S_{12} N_1 = 0 ,$$

ve yine $N_3 = \beta N_2$ ilişkisi ile,

$$N_2 \gamma_2 = (N_1 R_p - N_2 R_p \beta) + (N_1 S_{12} - N_2 S_{21}) . \quad (3.20)$$

yazılabilir. Bu kesimde pompalama olasılığı R_p yeniden tanımlanarak ve KKY gürültüsünü de işin içine katılarak bazı kısaltmalar yapılacak olursa,

$$R_p = \frac{\sigma_{13,31} \Gamma_p P_p}{h\nu_p A_p} ; \quad \frac{\Gamma_p P_p}{A_p} = I_p ; \quad \frac{\Gamma_s P_s}{A_s} = I_s ; \quad \frac{\Gamma_s P_{KKY}^+}{A_s} = I_{KKY}^+ ; \quad \frac{\Gamma_s P_{KKY}^-}{A_s} = I_{KKY}^- \quad \text{ve}$$

$\gamma_2 = 1/\tau$ ilişkileri ile Denklem (3.20)'yi yeniden düzenlersek,

$$\frac{N_2}{\tau} = I_p \left(\frac{N_1 \sigma_{13}}{h\nu_p} - \frac{N_2 \sigma_{31} \beta}{h\nu_p} \right) + \left[I_s + I_{KKY}^+ + I_{KKY}^- \right] \left(\frac{N_1 \sigma_{12}}{h\nu_s} - \frac{N_2 \sigma_{21}}{h\nu_s} \right) , \quad (3.21)$$

elde edilir. Sinyal soğurum (σ_{12}) ve yayılım (σ_{21}) tesir kesitleri için yapılan spektroskopik analizin bir benzeri, pompa soğurum ve yayılım tesir kesitleri için de yapılmaktadır. Bu durumu ifade etmek için, R_p pompalama olasılığı ifadesinde pompa soğurum tesir kesiti için $\sigma_{13}(\lambda_p)$ ve pompa yayılım tesir kesiti için $\sigma_{31}(\lambda_p)$ gösterimleri kullanılmıştır. Burada λ_p , pompa dalga boyuna karşılık gelmektedir. I_p , I_s , I_{KKY}^+ ve I_{KKY}^- , sırasıyla, pompa, sinyal, “+” doğrultuda KKY ve “-” doğrultuda KKY güçleri için optik şiddetleri temsil etmektedir. Denklem (3.21), toplam doluluk $N = N_1 + (1+\beta) N_2$ cinsinden N_2 için çözülürse,

$$N_2 = \frac{\tau\sigma_{13} \frac{I_p}{h\nu_p} + \tau\sigma_{12} \frac{I_s + I_{KKY}^+ + I_{KKY}^-}{h\nu_s}}{1 + \tau[(1 + \beta)\sigma_{13} + \sigma_{31}\beta] \frac{I_p}{h\nu_p} + \frac{\tau[(1 + \beta)\sigma_{12} + \sigma_{21}][I_s + I_{KKY}^+ + I_{KKY}^-]}{h\nu_s}} \times N, \quad (3.22)$$

sonucuna ulaşırız.

Pompa, sinyal ve KKY ışınlarının güç dağılımlarının fiber boyunca alınan “z” doğrultusuna bağlı tanımlanması için, oran denklemleri yerine “yayınım denklemleri”ni kullanacağız. Tesir kesitlerinin daha kullanışlı formunu kullanmak için $\sigma_s^a = \sigma_{12}$, $\sigma_s^e = \sigma_{21}$, $\sigma_p^a = \sigma_{13}$ ve $\sigma_p^e = \sigma_{31}$ gösterimlerini kullanabiliriz. Bu durumda, daha önce Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)’de verilen yayınım denklemlerini, pompa güçlerinin yayınımını da tanımlayan aşağıdaki ifadelerle yeniden yazabiliriz;

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = 2\pi \int_0^\infty I_s(r, z)(\sigma_s^e N_2(r) - \sigma_s^a N_1(r))r dr, \quad (3.23)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \mp 2\pi \int_0^\infty I_p(r, z)(\sigma_p^a N_1(r) - \sigma_p^e N_3(r))r dr, \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{KKY}^\pm(z)}{dz} = & \pm 2h\nu_s \Delta\nu \int_0^\infty 2\pi\sigma_s^e N_2(r) f_{KKY}^\pm(r) r dr \\ & \pm 2\pi \int_0^\infty (\sigma_s^e N_2(r) - \sigma_s^a N_1(r)) P_{KKY}^\pm(z) f_{KKY}^\pm(r) r dr. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Denklem (3.24)’deki “+” ve “-” işaretleri pompa (p) dalgalarının +z ve -z yönlerinde yayılmasını temsil etmektedir. Sinyal (s) dalgaları +z yönünde yayılmaktadır. Denklem (3.25)’deki “+” ve “-” işaretleri, KKY’yi temsil eden gürültü sinyalleri için benzer anlamdadır. $f_{KKY}^\pm(r)$, normlanmış ileri ve geri yönlü KKY gürültü güçleri için enine şiddet profilleridir.

Kazanç bağıntısının elde edilmesinde gereken en temel inceleme pompalama etkinliğinin belirlenmesidir. Denklem (3.23) ve Denklem (3.24)'de, sırasıyla, $I_s(z, r) = P_s(z)f_s(r)$ ve $I_p(z, r) = P_p(z)f_p(r)$ gösterimlerini ve Denklem (3.22) bağıntımızı kullanarak maksimum pompalama etkinliği için bir sonuç elde edilebilir.

EKFK'lerin verimliliği üzerine yapılan pek çok teorik çalışmada üst uyarım seviyelerinden gelen “uyarılmış durum soğurumu (UDS)”nın katkılarının da işin içerisine dahil edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [163-170]. Ancak, erbiyum'un katkılıandığı camlı konakçı malzemenin seçiminde dikkatli olmak UDS'den kaçınmak için yeterlidir. Ayrıca, 980 nm yerine 1480 nm'de pompalama yapılarak da bu etkilerden kaçınmak mümkündür [171].

Uzun-dalga boylu uygulamalar kullanılırsa, enine şiddet profilleri için $f_s(r) = f_p(r) = f_{KKY}^{\pm}(r) = f(r)$ kabulü yapılabilir [172]. $N_1 = N - N_2(1 + \beta)$ ilişkisi dikkate alınırsa, sinyal yayılım denklemleri,

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dz} &= 2\pi \int_0^{\infty} P_s f \left[\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a (N - (1 + \beta)N_2) \right] r dr, \\ \frac{dP_s}{dz} &= 2\pi \int_0^{\infty} P_s f \left[N_2 (\sigma_s^e + \sigma_s^a (1 + \beta)) - \sigma_s^a N \right] r dr, \end{aligned} \quad (3.26)$$

olarak yazılabilir. Gösterim kolaylığı için $I_p^a = \frac{h\nu_p}{\tau\sigma_{13}}$, $I_p^e = \frac{h\nu_p}{\tau\sigma_{31}}$, $I_s^a = \frac{h\nu_s}{\tau\sigma_{12}}$ ve

$I_s^e = \frac{h\nu_s}{\tau\sigma_{21}}$ gösterimleri ve Denklem (3.22), Denklem (3.26)'da kullanılırsa sinyal gücü için,

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dz} &= 2\pi\sigma_s^a P_s \\ &\times \int_0^{\infty} \frac{\left[(\eta P_p / I_p^a - \beta P_p / I_p^e) f - 1 \right] N f}{P_p f \left((1 + \beta) / I_p^a + \beta / I_p^e \right) + \left(P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^- \right) \left((1 + \beta) / I_s^a + 1 / I_s^e \right) f + 1} r dr, \end{aligned} \quad (3.27)$$

elde edilir. Benzer işlemler, pompa gücü için Denklem (3.24)'e de uygulanabilir. Burada da $N_3 = \beta N_2$ ve $N_1 = N - N_2(1 + \beta)$ ilişkileri kullanılacaktır. O halde,

$$\frac{dP_p}{dz} = \mp 2\pi \int_0^\infty I_p \left[\sigma_p^a (N - (1 + \beta)N_2) - \beta \sigma_p^e N_2 \right] r dr ,$$

olarak yazılabilir. Pompalama ile ilgili tesir kesitleri oranı $\sigma_p^e / \sigma_p^a = \xi$ ile gösterilir ve $I_p = P_p(z) f_p(z)$ eşitliği kullanılırsa,

$$\frac{dP_p}{dz} = \mp 2\pi \sigma_p^a P_p \int_0^\infty \left[1 - (1 + \beta + \beta\xi) \frac{N_2}{N} \right] N f r dr ,$$

ve N_2 yerine konularak

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} = \mp 2\pi \sigma_p^a P_p & \int_0^\infty \frac{\left[\left(\left(P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^- \right) / I_s^e - \beta \xi \left(P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^- \right) / I_s^a \right) f + 1 \right] N f}{P_p f \left((1 + \beta) / I_p^a + \beta / I_p^e \right) + \left(P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^- \right) \left((1 + \beta) / I_s^a + 1 / I_s^e \right) f + 1} r dr \\ & \quad (3.28) \end{aligned}$$

bağıntısı elde edilir. Denklem (3.27) ve Denklem (3.28)'in oranlanması ile herhangi bir z noktasında pompa güçlerinin sinyal güçlerine dönüşüm verimi,

$$\frac{dP_s}{dP_p} = \mp \frac{\sigma_s^a}{\sigma_p^a \left(1 + \frac{P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-}{P_s} \right)} \left\{ \frac{\left(\left(\eta / I_p^a - \beta / I_p^e \right) \int_0^\infty N f r dr \right) / \int_0^\infty N r dr - \frac{1}{P_p}}{\left(\left(1 / I_s^e - \beta \xi / I_s^a \right) \int_0^\infty N f r dr \right) / \int_0^\infty N r dr + \frac{1}{\left(P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^- \right) f + 1}} \right\} ,$$

olarak yazılabilir. Bu ifadenin daha kullanışlı biçimini dikkate almak için

$$R = \int_0^\infty N f r dr \Bigg/ \int_0^\infty N r dr , \quad (3.29)$$

ilişkisi kullanılarak,

$$\frac{dP_s}{dP_p} = \mp \frac{\left[(\eta/I_p^a - \beta/I_p^e) - 1/RP_p \right] / \sigma_p^a}{\left[(1/I_s^e - \beta\xi/I_s^a) + 1/R(P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-) \right] \left(1 + \frac{P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-}{P_s} \right) / \sigma_s^a}, \quad (3.30)$$

elde edilir. Buradan “dönüşüm verimi” $|dP_s/dP_p|$ ’nin tüm $P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-$ ve P_p ’ler için R ile artacağını söyleyebiliriz. Erbiyum-katkılı fiberin her hangi bir uzunluğu için Denklem (3.29)’un hem $+z$ hem de $-z$ yönlü pompalama durumu için integralinin alınması gerekmektedir. Bu durumda,

$$\begin{aligned} (1/I_s^e - \beta\xi/I_s^a) \int_g^\zeta \left(1 + \frac{P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-}{P_s} \right) dP_s + \int_g^\zeta \frac{dP_s}{RP_s} = \\ \mp \frac{\sigma_s^a}{\sigma_p^a} \left[(\eta/I_p^a - \beta/I_p^e) \int_g^\zeta dP_p - \int_g^\zeta \frac{dP_p}{RP_p} \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left[(1/I_s^e - \beta\xi/I_s^a)(P_s^\zeta - P_s^g) + \ell n \left(\frac{P_s^\zeta}{P_s^g} \right) \left\{ (P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-)(1/I_s^e - \beta\xi/I_s^a) + \frac{1}{R} \right\} \right] \frac{\sigma_p^a}{\sigma_s^a} \\ = \left[(\eta/I_p^a - \beta/I_p^e)(P_p^g - P_p^\zeta) - \ell n \left(\frac{P_p^g}{P_p^\zeta} \right) \frac{1}{R} \right], \end{aligned} \quad (3.31)$$

eşitliği elde edilir. Burada, g “giriş”, ζ “çıkış” anlamında kullanılmaktadır. Maksimum dönüşüm verimi için $dP_s/dP_p = 0$ olmalıdır. Buna karşılık gelen pompa gücü Denklem (3.30)’dan,

$$P_{p0} = \frac{I}{R \left(\frac{\eta}{I_p^a} - \frac{\beta}{I_p^e} \right)} \neq f(z), \quad (3.32)$$

olur. Böylece, maksimum dönüşüm verimi şartı $P_p^e = P_{p0}$ olur. Daha önce yapılan pek çok çalışmada maksimum dönüşüm verimi sadece η parametresi gereği sıcaklığa bağımlı kabul edilirken [172-175], burada sıcaklığa bağımlılığın β parametresini de içermesi gerektiği görülmektedir. Denklem (3.31)'den yararlanarak maksimum dönüşüm verimine karşılık gelen optimum fiber kuvvetlendirici uzunluğunu elde edebiliriz. Bunun için Denklem (3.31)'den $G = P_s^e / P_s^g$ kazancın maksimum dönüşüm verimine ($P_p^e = P_{p0}$) karşılık gelen değerini G_m ile gösterirsek,

$$\left[(1/I_s^e - \beta \xi / I_s^a) P_s^g (G_m - 1) + \ell n G_m \left(P_{KKY}^+ (1/I_s^e - \beta \xi / I_s^a) + P_{p0} \left(\frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} \frac{\tau \sigma_p^a}{h \nu_p} - \beta \frac{\tau \sigma_p^e}{h \nu_p} \right) \right) \right] \frac{\sigma_p^a}{\sigma_s^a} \\ = P_{p0} \left(\frac{P_p^g}{P_{p0}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} \frac{\tau \sigma_p^a}{h \nu_p} - \beta \frac{\tau \sigma_p^e}{h \nu_p} \right) - \ell n \left(\frac{P_p^g}{P_{p0}} \right) P_{p0} \left(\frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} \frac{\tau \sigma_p^a}{h \nu_p} - \beta \frac{\tau \sigma_p^e}{h \nu_p} \right),$$

$$\left(\left(\frac{1/I_s^e - \beta \xi / I_s^a}{\eta / I_p^a - \beta / I_p^e} \right) \frac{P_s^g}{P_{p0}} \frac{1}{\nu_s} (G_m - 1) + \frac{1}{\nu_p} \ell n G_m \left(\frac{P_{KKY}^+}{P_{p0}} \left(\frac{1/I_s^e - \beta \xi / I_s^a}{\eta / I_p^a - \beta / I_p^e} \right) + 1 \right) \right)$$

$$x \left(\frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} \frac{\tau \sigma_p^a}{h} - \beta \frac{\tau \sigma_p^e}{h} \right) \frac{\sigma_p^a}{\sigma_s^a} = \left(\frac{P_p^g}{P_{p0}} - 1 - \ell n \frac{P_p^g}{P_{p0}} \right) \left(\frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} \frac{\tau \sigma_p^a}{h} - \beta \frac{\tau \sigma_p^e}{h} \right) \frac{1}{\nu_p},$$

elde edilir. I 'lar için açık ifadeleri kullanılırsa,

$$\frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{P_s^g}{P_{p0}} (G_m - 1) + \ell n G_m \left(\frac{\sigma_p^a}{\sigma_s^a} + \frac{P_{KKY}^+}{P_{p0}} \right) = \frac{P_p^g}{P_{p0}} - 1 - \ell n \left(\frac{P_p^g}{P_{p0}} \right), \quad (3.33)$$

bulunur. Bu denklem, farklı sıcaklıklar için Denklem (3.32)'den hesaplanan P_{p0} ve belirli bir giriş pompa gücü P_p^g için çözülerek, verilen uzunluktaki fibere ait G_m 'nin belirlenmesi mümkün olur.

Kazanç için genel bir ifadeyi, Denklem (3.21)'in yeniden dikkate alınması ile inceleyebiliriz;

$$\frac{N_2}{\tau} = \frac{I_p}{h\nu_p} (N_1\sigma_{13} - N_2\sigma_{31}\beta) + \frac{[I_s + I_{KKY}^+ + I_{KKY}^-]}{h\nu_s} (N_1\sigma_{12} - N_2\sigma_{21}).$$

$\Gamma_p = \Gamma_s = \Gamma$ alınabildiğinden [172], yukarıdaki denklemin her iki yanı $f r dr$ ile çarpılır ve $(0, \infty)$ aralığında integrali alınırsa;

$$\begin{aligned} \int_0^\infty N_2 f r dr &= -\tau \frac{\Gamma}{Ah\nu_s} \left[P_s + P_{KKY}^+ + P_{KKY}^- \right] \int_0^\infty (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a) f r dr \\ &\quad - \tau \frac{\Gamma}{Ah\nu_p} P_p \int_0^\infty (N_2\sigma_p^e \beta - N_1\sigma_p^a) f r dr \\ \int_0^\infty N_2 f r dr &= -\tau \frac{\Gamma}{Ah\nu_s} \int_0^\infty (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a) P_s f r dr \\ &\quad - \tau \frac{\Gamma}{Ah\nu_s} \int_0^\infty (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a) [P_{KKY}^+ + P_{KKY}^-] f r dr \\ &\quad - \tau \frac{\Gamma}{Ah\nu_p} \int_0^\infty (N_2\sigma_p^e \beta - N_1\sigma_p^a) P_p f r dr, \quad (3.34) \end{aligned}$$

eşitliği yazılabilir. Burada, Denklem (3.34)'teki ifadenin sağ tarafındaki terimler için Denklem (3.23), Denklem (3.24) ve Denklem (3.25)'in kullanılması ile

$$2\pi \left(1 - \frac{4\tau \Delta \nu \Gamma \sigma_s^e}{A} \right) \int_0^\infty N_2 f r dr = -\tau \frac{\Gamma}{A} \left(\frac{1}{h\nu_s} \frac{dP_s}{dz} + \frac{1}{h\nu_s} \frac{dP_{KKY}^\pm}{dz} \pm \frac{1}{h\nu_p} \frac{dP_p}{dz} \right), \quad (3.35)$$

elde edilir. Sinyal gücüne ait yayılım denklemini daha anlamlı ifade etmek için, Denklem (3.35)'i kullanmak gerekecektir. Bu durumda, öncelikle Denklem (3.23)'ü yeniden inceleyelim:

$$\frac{dP_s}{dz} = 2\pi \int_0^\infty I_s (\sigma_s^e N_2(r) - \sigma_s^a N_1(r)) r dr,$$

$$\frac{dP_s}{dz} = 2\pi \int_0^\infty I_s \left[\sigma_s^e N_2(r) - \sigma_s^a (N - (1+\beta)N_2(r)) \right] r dr ,$$

$$\frac{dP_s}{dz} = 2\pi P_s \int_0^\infty \left[\sigma_s^e + \sigma_s^a (1+\beta) \right] N_2 f r dr - 2\pi P_s \int_0^\infty \sigma_s^a N(r) f r dr ,$$

ve $\alpha_s = 2\pi \sigma_s^a \int_0^\infty N(r) f r dr$ sinyal ışınının soğurum sabiti olduğundan,

$$\frac{dP_s}{dz} = 2\pi P_s \left[\sigma_s^e + \sigma_s^a (1+\beta) \right] \int_0^\infty N_2 f r dr - P_s \alpha_s , \quad (3.36)$$

olarak yazılabilir. Denklem (3.35)'i Denklem (3.36)'daki integralin karşılığı olarak kullanacak olursak;

$$\frac{dP_s}{dz} = -P_s \left[\alpha_s + \left(\frac{1}{h\nu_s} \frac{dP_s}{dz} + \frac{1}{h\nu_s} \frac{dP_{KKY}^\pm}{dz} + \frac{1}{h\nu_p} \frac{dP_p}{dz} \right) \frac{\tau \Gamma \left[\sigma_s^e + \sigma_s^a (1+\beta) \right]}{A - 4\tau \Delta \nu \Gamma \sigma_s^e} \right] , \quad (3.37)$$

bağıntısını elde ederiz. Denklem (3.37)'nin sağındaki son terimi, tasarlanan fiber yapının birim kesitinden saniyede geçen tek bir sinyal fotonuna ait sinyal ışınının “öz doyum gücü”,

$$P_s^{\text{öz}} = \frac{\left(A - 4\tau \Delta \nu \Gamma \sigma_s^e \right) h\nu_s}{\tau \Gamma \left[\sigma_s^e + \sigma_s^a (1+\beta) \right]} , \quad (3.38)$$

cinsinden tanımlamak daha uygun olmaktadır. Dikkat edilirse, Denklem (3.38)'nin de sıcaklığa bağımlı yeni bir terim olduğu görülmektedir. O zaman,

$$\frac{dP_s}{dz} = -P_s \left[\alpha_s + \left(\frac{1}{h\nu_s} \frac{dP_s}{dz} + \frac{1}{h\nu_s} \frac{dP_{KKY}^\pm}{dz} + \frac{1}{h\nu_p} \frac{dP_p}{dz} \right) \frac{h\nu_s}{P_s^{\text{öz}}} \right] , \quad (3.39)$$

yazılabilir. Denklem (3.39) ile verilen diferansiyel denklemin çözümünü yaparak fibere giren ve çıkan sinyal güçleri için bir ifade elde edebiliriz:

$$\begin{aligned}
\int_g^{\zeta} \frac{dP_s}{P_s} &= - \int_{0(g)}^{L(\zeta)} \left[\alpha_s + \left(\frac{1}{\nu_s} \frac{dP_s}{dz} + \frac{1}{\nu_s} \frac{dP_{KKY}^{\pm}}{dz} + \frac{1}{\nu_p} \frac{dP_p}{dz} \right) \frac{\nu_s}{P_s^{\ddot{oz}}} \right] dz, \\
\ell n \left(\frac{P_s^{\zeta}}{P_s^g} \right) &= -\alpha_s L + \left(\frac{P_p^g - P_p^{\zeta}}{\nu_p} + \frac{P_s^g - P_s^{\zeta}}{\nu_s} + \frac{P_{KKY}^{\pm(g)} - P_{KKY}^{\pm(\zeta)}}{\nu_s} \right) \frac{\nu_s}{P_s^{\ddot{oz}}}, \\
P_s^{\zeta} &= P_s^g \exp(-\alpha_s L) \times \exp \left[\left(\frac{P_p^g - P_p^{\zeta}}{\nu_p} + \frac{P_s^g - P_s^{\zeta}}{\nu_s} + \frac{P_{KKY}^{\pm(g)} - P_{KKY}^{\pm(\zeta)}}{\nu_s} \right) \frac{\nu_s}{P_s^{\ddot{oz}}} \right]. \quad (3.40)
\end{aligned}$$

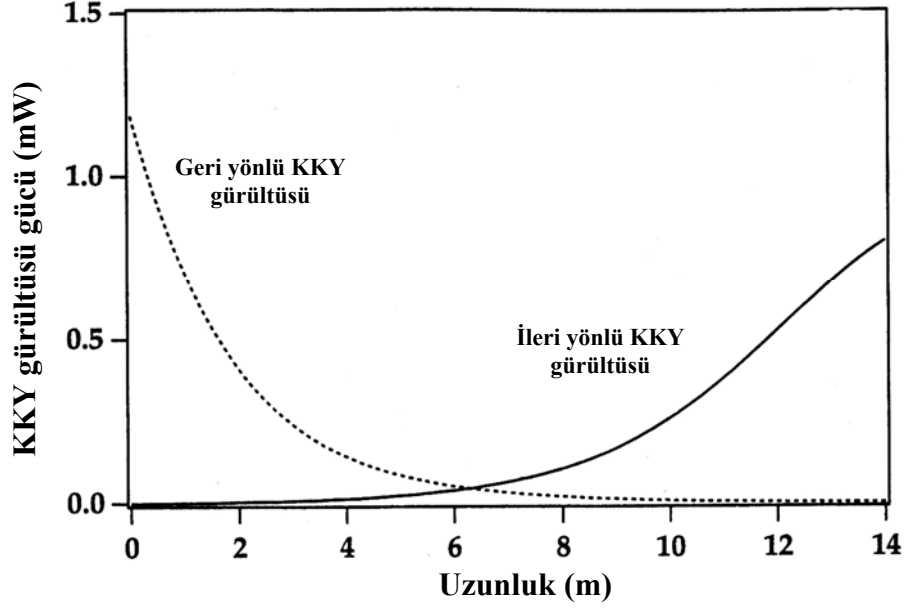
Yukarıdaki son denklemde, $P_p^{\zeta} = P_{p0}$ alınarak ve $G = \frac{P_s^{\zeta}}{P_s^g}$ tanımı ile kazanç hesabı için beklenen aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\begin{aligned}
\frac{P_s^{\zeta}}{P_s^g} &= G = \exp(-\alpha_s L) \\
&\times \exp \left[\left(\frac{P_p^g - P_{p0}}{h\nu_p} - \frac{P_s^g}{h\nu_s} (G-1) + \frac{P_{KKY}^{+g} - P_{KKY}^{+\zeta}}{h\nu_s} - \frac{P_{KKY}^{-g} - P_{KKY}^{-\zeta}}{h\nu_s} \right) \frac{h\nu_s}{P_s^{\ddot{oz}}} \right]. \quad (3.41)
\end{aligned}$$

KKY gürültüsü gücü için başlangıç şartlarını dikkate alarak, $P_{KKY}^{+g} = P_{KKY}^{+}(0) = 0$, $P_{KKY}^{+\zeta} = P_{KKY}^{+}(L)$, $P_{KKY}^{-g} = P_{KKY}^{-}(0)$ ve $P_{KKY}^{-\zeta} = P_{KKY}^{-}(L) = 0$ düzenlemelerini yapabiliriz. İleri yönde pompalama konfigürasyonu için 14 m uzunluğa sahip herhangi bir fiber kuvvetlendiricinin girişinde maksimum, çıkışında ise sıfır KKY gürültüsü görülmektedir. Geri yönde pompalama durumu için fiber kuvvetlendiricinin girişinde minimum, çıkışında ise maksimum KKY gürültüsü görülmektedir. 14 m uzunluklu bir fiber kuvvetlendirici için başlangıç şartlarının bilgisi Şekil 3.2’de verilmiştir. O halde, Denklem (3.41)’i yeniden düzenlersek,

$$\begin{aligned}
\frac{P_s^{\zeta}}{P_s^g} &= G = \exp(-\alpha_s L) \\
&\times \exp \left[\left(\frac{P_p^g - P_{p0}}{h\nu_p} - \frac{P_s^g}{h\nu_s} (G-1) - \frac{P_{KKY}^{-}(0) + P_{KKY}^{+}(L)}{h\nu_s} \right) \frac{h\nu_s}{P_s^{\ddot{oz}}} \right], \quad (3.42)
\end{aligned}$$

olarak yazabiliriz. Böylece, KKY gürültü gücünü de içeren fiber kuvvetlendirici için kazanç-uzunluk arasındaki ilişkiyi belirleyebiliriz.



Şekil 3.2. Fiber kuvvetlendirici eksen boyu boyunca ileri ve geri yönlü KKY gürültüsü gücünün konuma bağlı değişimi [139].

Denklem (3.42)'yi maksimum kazançla göre optimum fiber kuvvetlendirici uzunluğunun değişimi bakımından incelemek gerekirse, $G = G_m$ dönüşümü ile

$$L_{opt} = -\frac{1}{\alpha_s} \times \left\{ \ln G_m + \frac{h\nu_s}{P_s^{öz}} \left(\frac{P_{po} - P_p^g}{h\nu_p} + \frac{P_s^g}{h\nu_s} (G_m - 1) + \frac{P_{KKY}^-(0) + P_{KKY}^+(L)}{h\nu_s} \right) \right\}, \quad (3.43)$$

elde edilir. Optimum uzunluk hesabında izlenecek yöntem, Denklem (3.33)'den elde edilen maksimum kazanç değerinin Denklem (3.43)'de kullanılmasıdır. Böylece, belirli bir EKFK tasarımında maksimum kazançla ulaşmak için gerekli optimum fiber kuvvetlendirici uzunluğu da belirlenmiş olacaktır. Dikkat edilirse, Denklem (3.41)'i 980 nm pompalama durumuna uygulayabilmek için Denklem (3.32)'deki maksimum dönüşüm verimine karşılık gelen P_{p0} çıkış gücü ve Denklem (3.38)'deki öz sinyal

gücü bağıntılarındaki β parametresi sıfır olacaktır. Bu durumda, 980 nm pompalama durumu için kazanç ve fiber kuvvetlendirici uzunluğu arasındaki ilişki bakımından Denklem (3.42) yeniden kullanılabilir.

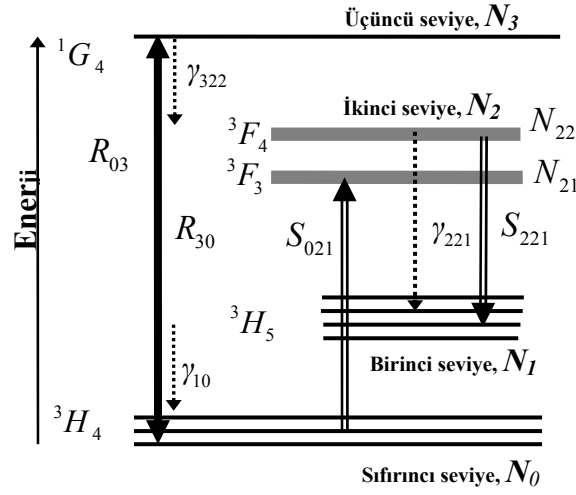
3.4. Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile PKFK' lerin

Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi

1,3 μm dalgaboyunda bilgi aktarımı yapılan optik haberleşme sistemlerinde kullanılan PKFK'lerin deneysel çalışma verimini incelemek için sistemde yer alan diğer cihazlarla olan uyum dikkate alınmalıdır. Haberleşme alanında ikinci pencere olarak bilinen 1,3 μm dalgaboyunda yapılan optik iletim, yarıiletken optik kuvvetlendiricilerden, Raman kuvvetlendiricilerden ve PKFK'lerden alınan/verilen optik sinyal sırasında çoğullayıcı sistemin neden olduğu kayıplardan en az etkilenmektedir. Özellikle, kuvvetlendiricilerin pompalandığı pompa ve sinyal lazer kaynakların PKFK'lerde de görülen KKY gürültüsünü azaltıcı özellikte olması, gelişen teknolojinin bir sonucudur.

Kıtalar arası haberleşmelerde yaklaşık 1,5 μm dalgaboyunda bilgi iletmeye uygun optik haberleşme ağlarında EKFK'ler kullanılmasına rağmen, PKFK'lerin 1,3 μm 'de daha az KKY gürültüsü üretmesi nedeni ile tercih edildiği deneysel sistemlerin sayısı hızla artmaktadır [176, 177]. Bu deneysel sistemlerde, PKFK'lerin sistem veriminin sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği de incelenebilmektedir. Ancak, praseodmiyum katkılı konakçı malzemede Pr^{3+} iyonunun enerji seviyeleri Stark etkisi nedeni ile alt seviyelere ayrılmaktadır. Bu alt seviyeler arasındaki geçişlerin Boltzmann dağılım yasağı gereği sıcaklığa bağlı olarak sürekli değişim gösterdiği bilinmektedir [9, 108, 118]. Özellikle, sinyal soğurum ve yayılım olasılıklarının, sırasıyla, $^3H_4 \rightarrow ^3F_3$ ve $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$ geçişlerinde görülmesi ve bu geçişler sırasında sıcaklığa bağımlılığın daha belirgin olması nedeni ile teorik modellerde dikkate alınmalıdır. Bu geçişler sırasında sinyal güç kaynağından soğurulan fotonlar 3F_3 seviyesindeki Stark alt seviyelerine dolarken, pompalama olayından sonra sinyal yayılımı sonucu ortaya çıkan fotonlar ise 3F_4 Stark alt seviyelerinde birikmeye çalışır ve yaşam süresini belirleyen de bu seviyedeki dolulukların oluşma süresidir.

PKFK'lerin sıcaklık bağımlı modellenmesi için 3F_3 ve 3F_4 seviyeleri arasında Boltzmann dağılım yasası gereği bir ilişki kurulmalıdır. Kesim 2.3'de herhangi bir konakçı malzemeye katkılanmamış Pr^{3+} 'nin enerji seviyeleri arasındaki geçişler ve olasılıklar gösterilmekteydi. Bu kesimde ise, hem pompa yayını hem de sinyal soğurum olasılıklarını dikkate alarak ve ${}^3F_3 - {}^3F_4$ seviyeleri arasında Boltzmann dağılım yasasını kullanarak sıcaklık bağımlı model yapılabilir. Şekil 3.3'de silisyum, florid ve ZBLAN gibi konakçı malzemelere katkılanan Pr^{3+} iyonunun enerji seviyeleri ve çeşitli pompa ve ışıma geçişleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. 1017 nm pompalama durumunu gösteren Pr^{3+} -katkılı sistem için dört seviyeli enerji diyagramı.

Şekil 3.3'den yararlanarak PKFK'lere ait oran denklemlerini yeniden yazabiliriz:

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{03}N_0 - R_{30}N_3 - \gamma_{322}N_3, \quad (3.44a)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_{22}}{dt} + \frac{dN_{21}}{dt} = S_{021}N_0 - S_{221}N_{22} - N_{22}\gamma_{221} + \gamma_{322}N_3, \quad (3.44b)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = S_{221}N_{22} + \gamma_{221}N_{22} - \gamma_{10}N_1, \quad (3.44c)$$

$$\frac{dN_0}{dt} = R_{30}N_3 - R_{03}N_0 - S_{021}N_0 + \gamma_{10}N_1. \quad (3.44d)$$

Burada, R_{03} ve R_{30} ; pompa geçişleri için, S_{021} ve S_{221} ; sinyal geçişleri için zorlamalı soğurum ve yayınım olasılıklarını, γ_{322} ve γ_{10} ; ilgili seviyelerden ışımasız kendiliğinden geçiş olasılıklarını ve γ_{221} ($=1/\tau$); kuvvetlendirmeden sorumlu seviyeler arasındaki ışımalı geçiş olasılığını temsil etmektedir. Pompa gücüne ve sinyal gücüne ait zorlamalı yayınım olasılıklarının diğer geçiş olasılıklarına göre daha az baskın olduğu bilindiğinden, $R_{30}N_3 = 0$ ve $S_{021}N_0 = 0$ olarak alınabilir. Ayrıca, birinci seviyeden sıfırıncı seviyeye geçişler o kadar hızlı gerçekleşir ki, bu seviyedeki doluluklar ihmal edilebilir. O halde, Pr^{3+} -katkılı fiber kuvvetlendirici için enerji seviyelerindeki toplam doluluklar,

$$N = N_0 + N_2, \quad (3.45)$$

olarak alınabilir. N_2 olarak tanımlanan seviye, hem 3F_4 hem de 3F_3 seviyelerindeki dolulukların toplamını temsil etmektedir ($N_2 = N_{22} + N_{21}$). Stark yarılmaları nedeni ile alt seviyelere ayrılan bu iki birbirine yakın seviyenin Boltzmann dağılım yasasından yararlanılarak aralarında bir ilişki kurulabilir. O halde, N_{22} için Denklem (2.36)'nın da dikkate alınması ile Denklem (3.45)'i kullanarak ve Denklem (3.44) takımını çözerek,

$$N_{22} = N \frac{R_{03}\tau}{1 + \tau(R_{03}(1 + 1/\beta) + S_{221})}, \quad (3.46)$$

elde edilir. Denklem (3.46)'dan yararlanarak sıfırıncı seviye için,

$$N_0 = N \frac{1 + S_{221}\tau}{1 + \tau(R_{03}(1 + 1/\beta) + S_{221})}, \quad (3.47)$$

eşitliği elde edilir. Kazanç bağıntısını elde etmek için Denklem (3.14)'ü dikkate almak ve PFKF için yeniden düzenlemek yeterlidir ($N_1 = 0$):

$$G = \exp[\Gamma_s \sigma_{221} N_{22} L], \quad (3.48)$$

burada, σ_{221} ; ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$ seviyeleri arasındaki sinyal yayınım tesir kesitini temsil etmektedir. Denklem (3.46)'da yer alan S_{221} ve R_{03} niceliklerini, sırasıyla, sinyal ve

pompa güçleri cinsinden yazmak gerekirse, Denklem (3.11) ve Kesim 3.3'deki bazı kısaltmaların yeniden dikkate alınması gerekir:

$$S_{221} = \frac{\Gamma_s \sigma_{221}}{h\nu_s A_s} P_s, \quad (3.49)$$

$$R_{03} = \frac{\sigma_{03} \Gamma_p}{h\nu_p A_p} P_p. \quad (3.50)$$

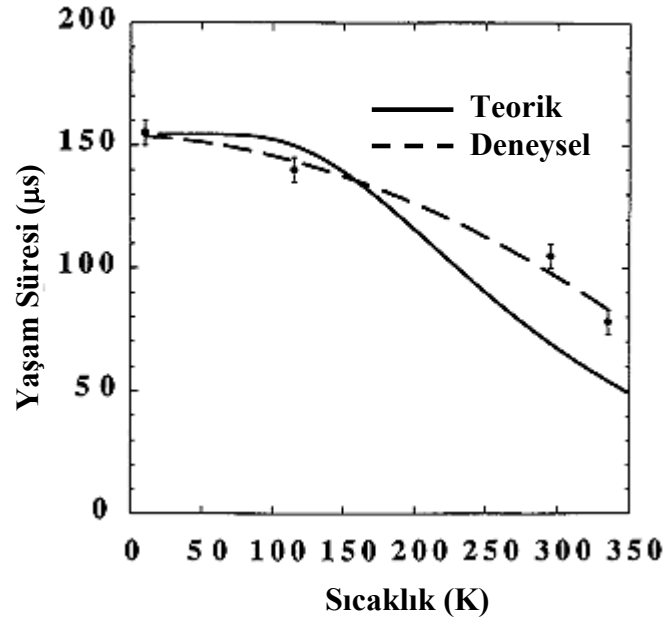
Denklem (3.46)'da yer alan β parametresinden başka dikkate alınması gereken bir diğer sıcaklık bağımlı parametre de yaşam süresi “ τ ” olmaktadır. Özellikle, teorik incelemelerde yüksek sıcaklıklarda etkisi hissedilen yaşam süresi, 100 °C'in altında hemen hemen sabitken, deneysel olarak ölçülen değeri, 100 °C'in altında sıcaklığın azalması ile artmaktadır [67, 68]. Yaşam süresinin sıcaklığa bağımlı değişimini teorik olarak ifade eden eşitlik, ışımalı geçişin bozunma olasılığı (W_i) ile çoklu fonon yayınlanma olasılığının (W_{cf}) toplamı olarak verilir;

$$1/\tau = W_i + W_{cf}, \quad (3.51)$$

ve Pr^{3+} -katkılı ZBLAN'da $W_i = 380 \text{ s}^{-1}$ olarak ölçülmüştür [67]. Ayrıca, çoklu fonon yayınlanma olasılığı;

$$W_{cf}(T) = W_{cf}(0) \left(\left[\exp(\hbar\omega/kT) - 1 \right]^{-1} + 1 \right)^p, \quad (3.52)$$

bağıntısı ile verilir ve burada p ; yasak enerji bandını geçebilen fononların sayısı, $\hbar\omega$; fonon enerjisi, $W_{cf}(0)$; 0 K civarında çoklu fonon yayınlanma olasılığı ve k ; Boltzmann sabitidir. Sıcaklıkla yaşam süresinin değişiminin teorik ve deneysel sonuçları Şekil 3.4.'de gösterilmektedir. 100 °C'in üzerindeki değerlerde sıcaklığın artması ile yaşam süresinde belirgin bir azalmanın olduğu görülmektedir. Şekil 3.4'de; sürekli çizgi, Denklem (3.51) ve Denklem (3.52) aracılığı ile hesaplanan teorik yaşam süresini; kesikli çizgi, deneysel ölçüm sonucu elde edilen yaşam sürelerinin ikinci dereceden bir fonksiyon ile örtüştürüldüğü durumu göstermektedir.



Şekil 3.4. 1G_4 seviyesinin yaşam süresinin sıcaklığa bağımlılığı [67].

Burada yapılan çalışmada ise, yaşam süresinin sıcaklıktan etkilenmediği bölge dikkate alınacak ve PKFK'lerin sıcaklık bağımlı modellenmesi, EKFK'lerde olduğu gibi Stark alt seviyelerinin Boltzmann dağılım yasası gereği sıcaklığa bağlanması ile gerçekleştirilecektir.

BÖLÜM 4

NÜMERİK SONUÇLAR

4.1. EKFK için Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile Elde Edilen Sonuçlar

Modern fiber optik haberleşme sistemlerinin kullanımı yaklaşık 30 yıl önce ilk düşük-kayıplı tek-modlu fiberlerin geliştirilmesi ile başladı. Bu fiberler başlangıçta ikinci haberleşme penceresine karşılık gelen 1,3 μm dalgaboyu uygulamaları için optimize edildi. Ancak, uzun mesafeli uygulamalar için elektronik tekrarlayıcıların band genişliğinin yetersiz kalması nedeni ile yeni arayışlara ihtiyaç duyuldu. Bu amaçla, üçüncü haberleşme penceresi olarak adlandırılan 1,5 μm dalgaboyunda, daha yüksek kazanç değerleri sağlayabilen ve polarizasyon etkisiz fiber kuvvetlendiriciler dönemi başladı. Böylece, elektronik tekrarlayıcıların sağlayamadığı band genişlikleri elde edildi ve daha uzun mesafelerle haberleşme yapılabildi [178].

Haberleşme alanındaki hızlı gelişimi takip ederek teknolojiyi daha az maliyetli ve daha yüksek verimli hale getirmek için pek çok teorik ve deneysel çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların hemen hepsi birbirini tamamlayıcı niteliktedir ve sistem uygulamaları için en uygun fiber kuvvetlendiricinin tasarlanmasını amaçlamaktadır. Bu tezde geliştirilen sıcaklık bağımlı model kapsamında hem EKFK'ler hem de PKFK'ler için, sırasıyla, kazanç-fiber kuvvetlendirici uzunluğu ve kazanç-pompa gücü arasındaki ilişki nümerik hesaplamalar ile belirlenmiştir.

Optik haberleşme sistemlerinin en önemli kısmını oluşturan EKFK'lerin pratik uygulamalar için tasarımı konusunda uygun çalışma şartları belirlenmelidir. Özellikle, kullanılan pompa kaynaklarının ve sinyal dalgaboylarının seçimi hem verimlilik hem de maliyet bakımından oldukça önemlidir. Bilinen en yaygın kullanıma sahip pompa kaynakları 980 ve 1470 nm dalgaboyunda pompalama yapmaktadır. Sinyal dalgaboyları ise 1531 ve 1544 nm olarak seçilmektedir [179-186]. EKFK'nin çalışma sıcaklık bölgesinin 0-50 °C'a uygun olacak şekilde ayarlanması tamamiyle özel bir tercihtir. Farklı sıcaklık bölgelerinde çalışmaya uygun fiber kuvvetlendiriciler tasarlamak da mümkündür.

Modifiye edilmiş oran denklemleri vasıtasıyla elde edilen ters doluluk ve kazanç hesaplamaları için fiber kuvvetlendirici parametreleri Tablo 4.1'de verilmektedir. Toplam Er^{3+} konsantrasyonu $N = 1,0 \times 10^{-25} m^{-3}$ ve yarı kararlı seviyedeki dolulukların yaşam süresi $\tau = 10 ms$ olarak verilmektedir [187]. Çalışma sıcaklık bölgemizde modelin sonuçlarını elde etmek için Tablo 4.1'de verilen ve oda sıcaklığında (20 °C) alınan soğurum ve yayınım tesir kesitleri değerlerini McCumber bağıntısı yardımı ile teorik olarak 0 °C, 25 °C ve 50 °C için yeniden belirlenecektir. Böylece η parametresi her iki sinyal dalgaboyu için hesaplanmış olacaktır.

Tablo 4.1. 980 ve 1470 nm'de pompalama için gerekli fiber parametreleri.

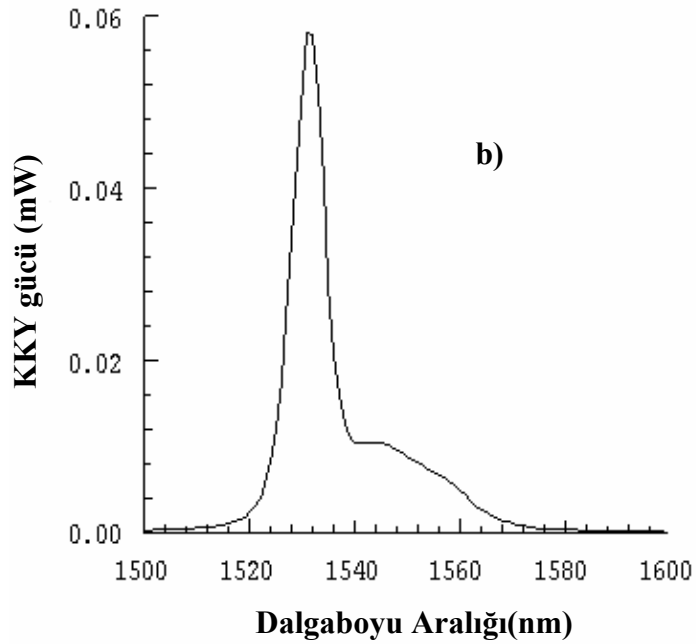
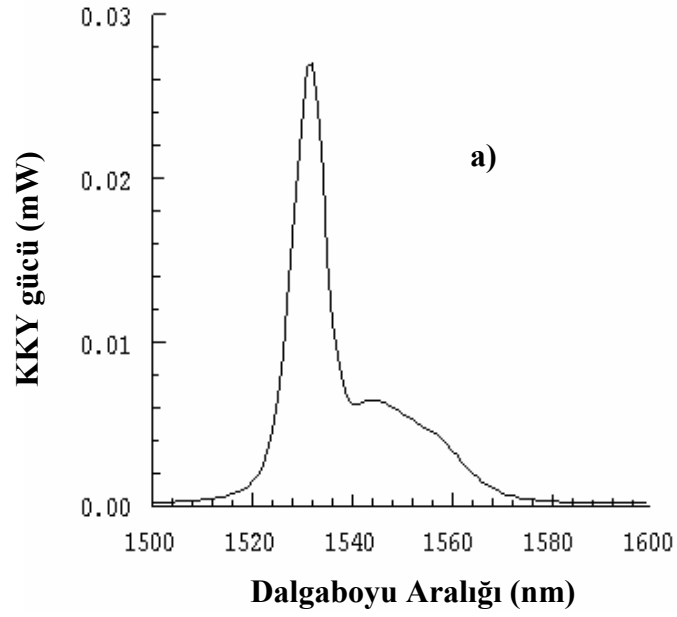
	980 nm pompalama konfigürasyonu	1470 nm pompalama konfigürasyonu	Sinyal dalgaboyu konfigürasyonu
Mod örtüşme faktörü	$\Gamma_p = 0,85$	$\Gamma_p = 0,72$	$\Gamma_s = 0,8$
Fiber öz bölgesi etkin tesir kesiti	$A_p = 33,6 \mu m^2$	$A_p = 49,7 \mu m^2$	$A_s = 52,6 \mu m^2$
Pompa soğurum tesir kesiti	$\sigma_p = 2,58 \times 10^{-25} m^2$	$\sigma_p = 1,64 \times 10^{-25} m^2$	-----
Sinyal soğurum tesir kesiti	$\sigma_{12} = 5,94 \times 10^{-25} m^2$; 1531 nm sinyal dalgaboyu için		
	$\sigma_{12} = 3,26 \times 10^{-25} m^2$; 1544 nm sinyal dalgaboyu için		
Sinyal yayınım tesir kesiti	$\sigma_{21} = 7,04 \times 10^{-25} m^2$; 1531 nm sinyal dalgaboyu için		
	$\sigma_{21} = 4,80 \times 10^{-25} m^2$; 1544 nm sinyal dalgaboyu için		

Bu durumda, Denklem (3.18)'den 1531 nm için $\lambda_0 = 1523$ nm ve 1544 nm için $\lambda_0 = 1525$ nm olarak elde edilir. Bu noktadan sonra yapılması gereken üç farklı sıcaklık değeri için $\eta(T)$ parametrelerini hesaplamaktır. Önemli bir hesap da, Boltzmann faktörü ya da $\beta(T)$ parametresinin belirlenmesidir. Çalışmada Al-yardımcı katkılı EKFK durumu dikkate alınmaktadır. Bu durumda, oda sıcaklığında erbiyum iyonunun ikinci seviyesindeki enerji farkı yaklaşık 200 cm^{-1} olmaktadır [119]. Bu değere karşılık $\beta(T) = 0,380$ bulunur. Diğer sıcaklık değerlerindeki hesaplamalar Tablo 4.2'de verilmektedir. Tablo 4.2'ye dikkat edilirse, sadece 1470 nm pompalama konfigürasyonunda $\beta(T)$ parametresinin hesaplandığı görülmektedir. 980 nm pompalama durumunda, erbiyum iyonunun üçüncü ve ikinci enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı çok büyük olduğu için, bu duruma karşılık gelen $\beta(T)$ 'nin değeri oldukça küçüktür ve hesaplamalarda $\beta(T) = 0$ kabulü yapılmaktadır.

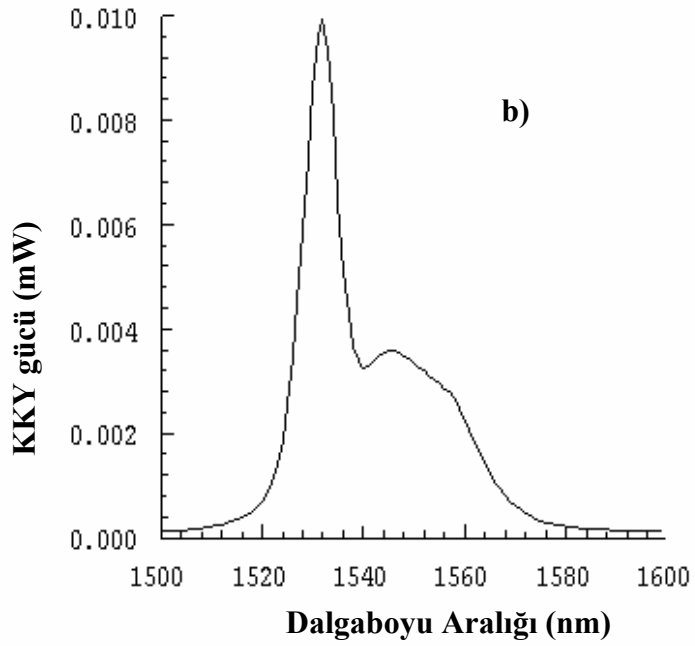
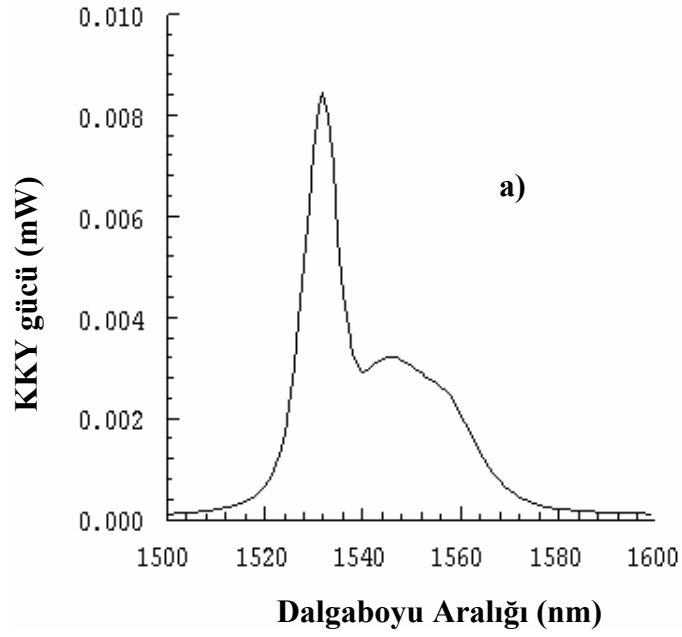
Tablo 4.2. Sıcaklık bağımlı β ve η parametrelerinin farklı sıcaklıklardaki değerleri.

T (°C)	$\beta(T)$ (1470 nm)	$\eta(T)$ (1531 nm)	$\eta(T)$ (1544 nm)
0	0,354	1,198	1,530
25	0,386	1,179	1,476
50	0,416	1,165	1,433

Şimdi, EKFK tasarımı ile ilgili olarak bağıl ters doluluk-normalize pompalama oranı ve kazanç-pompa gücü arasındaki ilişkileri inceleyebiliriz. İlk olarak, göz önüne alınan fiber kuvvetlendirici için KKY gücü hem 980 nm hem de 1470 nm pompalama konfigürasyonlarında OptiAmplifier 4.0 yazılım programı aracılığı ile elde edildi. 980 nm için Şekil 4.1. ve 1470 nm pompalama dalgaboyu için Şekil 4.2.'de program sonucunda elde edilen KKY güç değerleri verilmektedir.

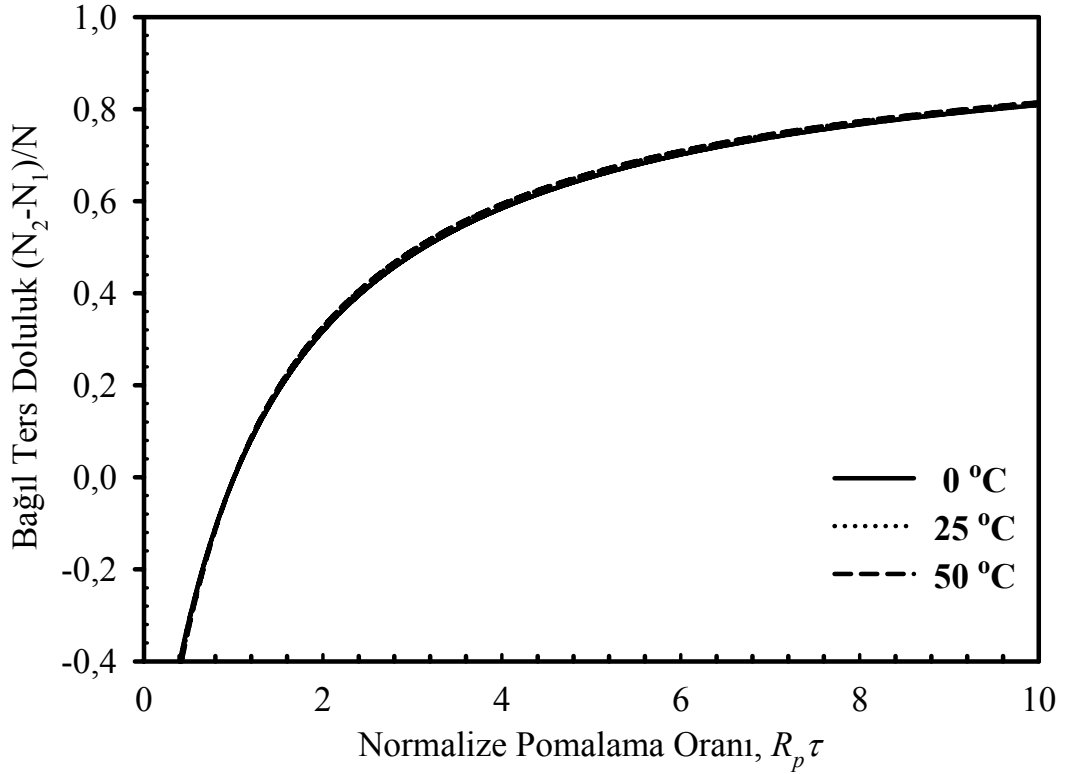


Şekil 4.1. $P_p = 50 \text{ mW}$ 980 nm pompalama durumunda sinyal kaynağının çalışma dalgaboyunun **a)** 1531 nm **b)** 1544 nm olduğu durum için, KKY güçlerinin 1500-1600 nm dalgaboyu aralığında spektral dağılımları (OptiAmplifier 4.0 yazılım programından).

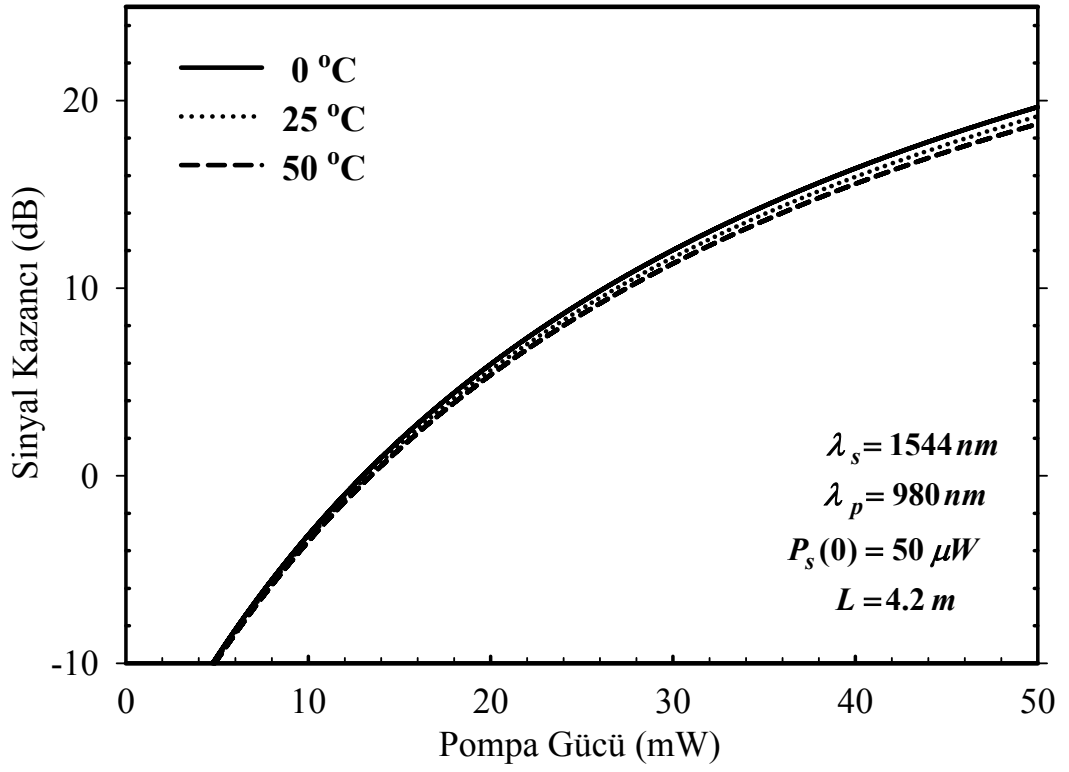


Şekil 4.2. $P_p = 50 \text{ mW}$ için 1470 nm pompalama durumunda sinyal kaynağının çalışma dalgaboyunun **a)** 1531 nm **b)** 1544 nm olduğu durum için, KKY güçlerinin 1500-1600 nm dalgaboyu aralığında spektral dağılımları (OptiAmplifier 4.0 yazılım programından).

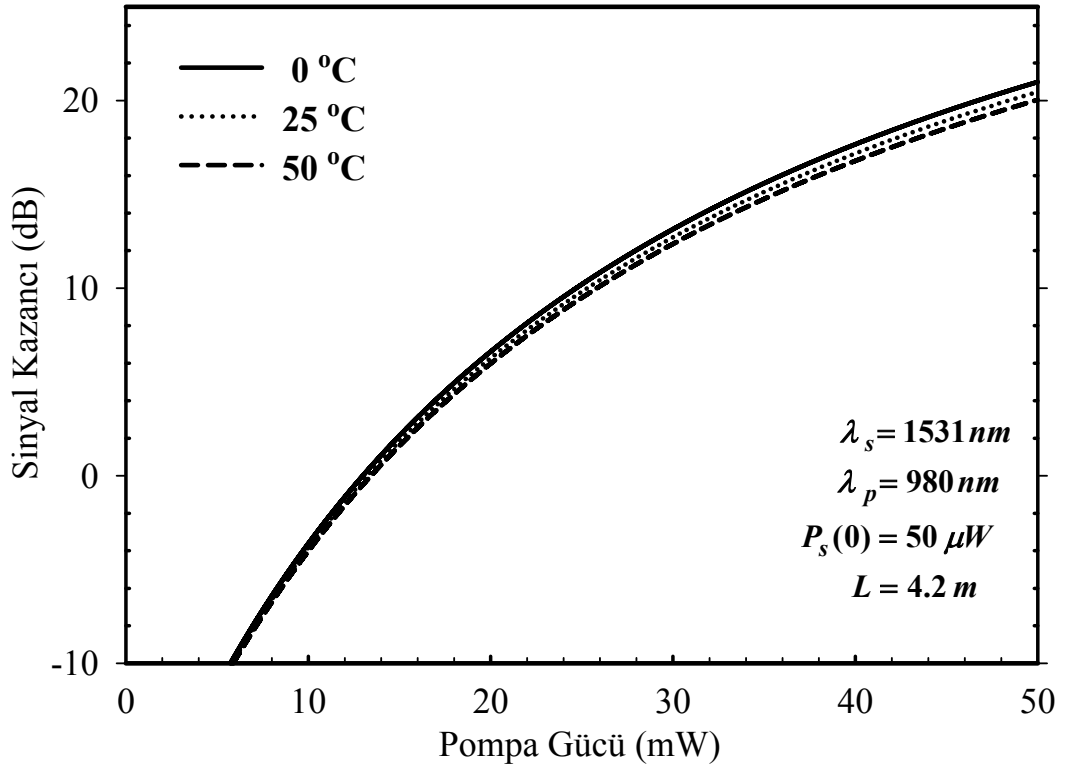
Bu simülasyon hesabında 980 nm pompalama durumu için 4.2 m uzunluğuna ve 1470 nm pompalama durumu için 5.6 m uzunluğuna sahip fiber kuvvetlendiriciler seçildi. Bu seçim, EKFK ile ilgili yapılan deneysel çalışmada, [156], en iyi uzunluk olarak verilmiş olması nedeni ile yapıldı. Böylece, deneysel çalışma ve kurulan model arasındaki uyum karşılaştırılabilecektir. Her iki sinyal dalga boyunda fibere uygulanan sinyal gücü $50 \mu\text{W}$ seçildi. Bu durumda, 980 nm pompalama konfigürasyonunda, 1544 nm için $S_{I2} = 2,32$ ve 1531 nm için $S_{I2} = 5,34$ olarak hesaplandı. 1470 nm pompalama durumunda, 1544 nm için $S_{I2} = 2,06$ ve 1531 nm için $S_{I2} = 4,05$ olarak hesaplandı. Elde edilen bu veriler Denklem (3.9) ve Denklem (3.14)'de kullanılarak bağıl ters doluluk ve kazanç bakımından EKFK'nin farklı sıcaklık değerlerindeki verim analizi yapıldı. 980 nm pompalama durumu için Şekil 4.3'de Denklem (3.9)'daki bağıl ters doluluğun, Şekil 4.4'de 1544 nm ve Şekil 4.5'de 1531 nm sinyal uygulamalarının Denklem (3.14)'den elde edilen kazanç değerlerinde pompa gücüne bağımlı değişimleri farklı sıcaklıklar için verilmektedir.



Şekil 4.3. 980 nm pompalama durumu için farklı sıcaklık değerlerindeki bağıl ters doluluğun normalize pompalama oranına göre değişimi.



Şekil 4.4. 980 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki 1544 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.

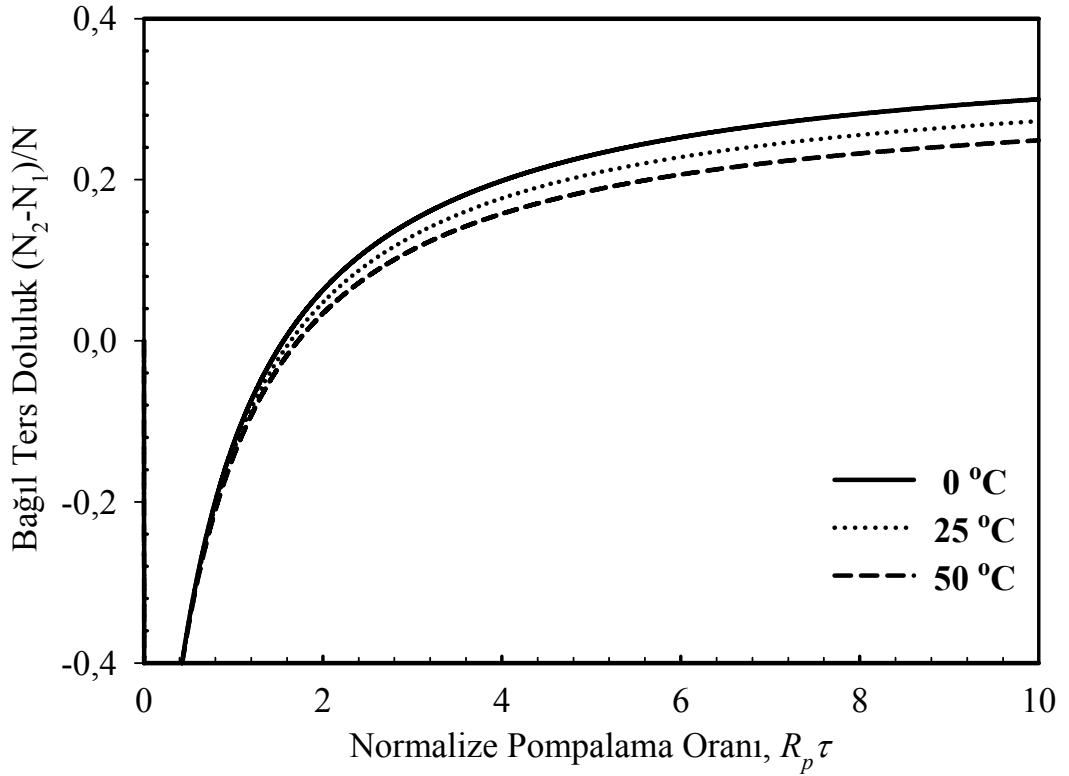


Şekil 4.5. 980 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki 1531 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.

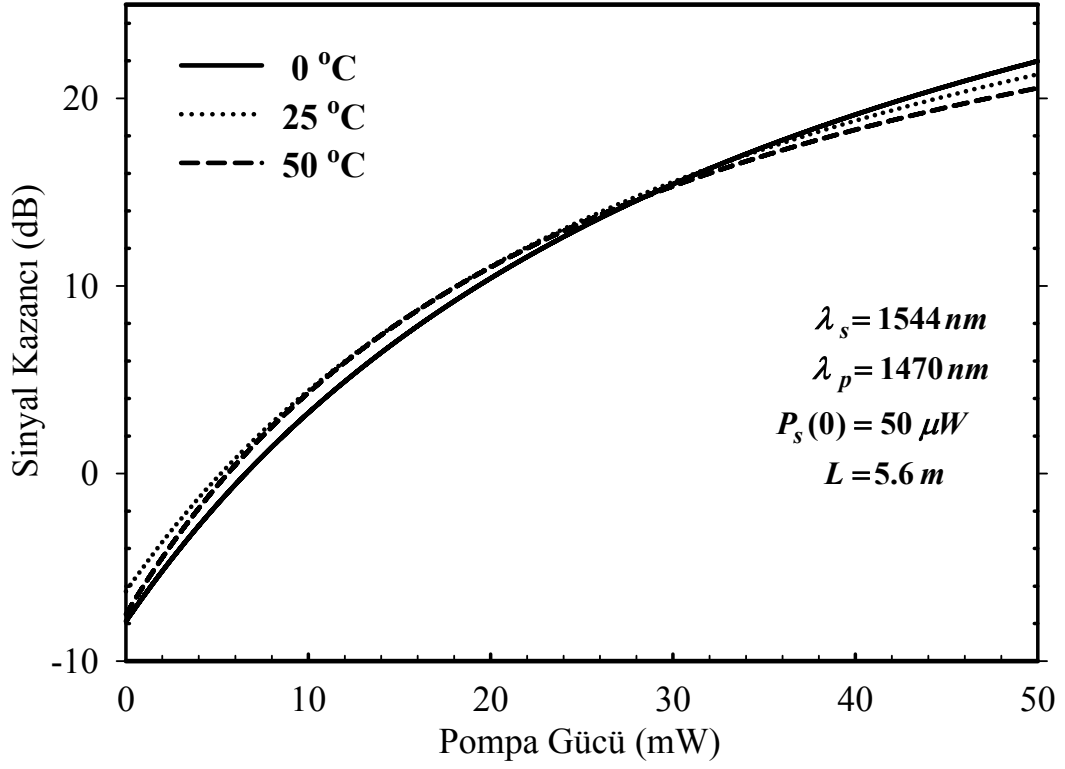
İkinci bölümde üç seviyeli yalın bir sisteme (erbiyum iyonu) ait 980 nm pompalama durumu için bağıl ters doluluk ifadesinin sıcaklıktan bağımsız olduğu sonucu elde edilmişti; erbiyum'un katkı iyonu olma durumunda da sıcaklığa bağımlılığın ihmal edilebileceği Şekil 4.3'den görülmektedir. Pompa güçleri ile taban durumdan uyarılmış seviyeye (üçüncü seviye) çıkartılan Er^{3+} iyonları bu seviyede “*ns*” mertebelerinde çok kısa bir süre kalabilmektedir. Dolayısı ile pratik uygulamalarda üçüncü seviyenin doluluğu sıfır kabul edilebilmektedir. Bu sonucu kullanmanın bir yolu Denklem (3.9)'da β parametresini sıfır almaktır. O halde, 980 nm pompalama konfigürasyonu için Denklem (3.9)'da $\beta = 0$ seçimini yapmak yeterlidir. Bu durumda, Denklem (3.9)'da sıcaklığa bağımlı tek terim η parametresi yani, sinyal yayılım ve soğurum tesir kesitlerinin oranı olacaktır. Bu parametrenin sıcaklığa bağlı değişimi, Denklem (3.9)'un bu yeni durumu üzerinde çok az baskınlığı olacağı için, bağıl ters doluluk ifadesinden yararlanarak 980 nm pompalama konfigürasyonu hakkında yorum yapmak yetersiz olmaktadır. Daha yeterli sonuçlara ulaşmak için aşağıda kazanç bağıntısının sıcaklık bağımlılığı incelenecektir.

Şekil 4.4'de 1544 nm sinyal dalgaboyu uygulamasından da görüldüğü gibi, sıcaklığa bağımlılık belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır ve sıcaklığın artması ile kazancın azaldığı yorumu yapılabilmektedir. Bir diğer sinyal uygulaması olan 1531 nm'de ise Şekil 4.5'deki değişimler ortaya çıkmaktadır. Ancak, görülen bir diğer fark ise, 1531 nm'deki uygulama 1544 nm'dekine göre verim bakımından daha üstün olmaktadır. 50 mW'lık pompalamanın sonunda, 1531 nm durumunda sıcaklığın 0'dan 50 °C'a artması ile yaklaşık 20,9 dB'den 20 dB'e azalan kazançta 0,9 dB'lik değişim gözlemlenmektedir. Aynı pompalama sonunda, 1544 nm durumunda ise sıcaklığın artması ile 19,7 dB'den 18,6 dB'e azalan kazançta 1,1 dB'lik değişim gözlemlenmektedir. Buradan, 980 nm pompalama konfigürasyonunda 1544 nm sinyal uygulamasının 1531 nm'ye göre sıcaklığa bağımlılığının daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Kazanç bölgesi olarak tanımlanabilecek pozitif kazanç değerlerinin başladığı bölgelerde çalışmak için gerekli başlangıç eşik pompa güçleri bakımından 1544 nm'nin 1531 nm'ye göre daha üstün olduğu söylenebilir. Şekil 4.4'de eşik pompa gücü yaklaşık 10,8 mW'ken Şekil 3.6'da bu değer 11,5 mW'a çıkmaktadır.

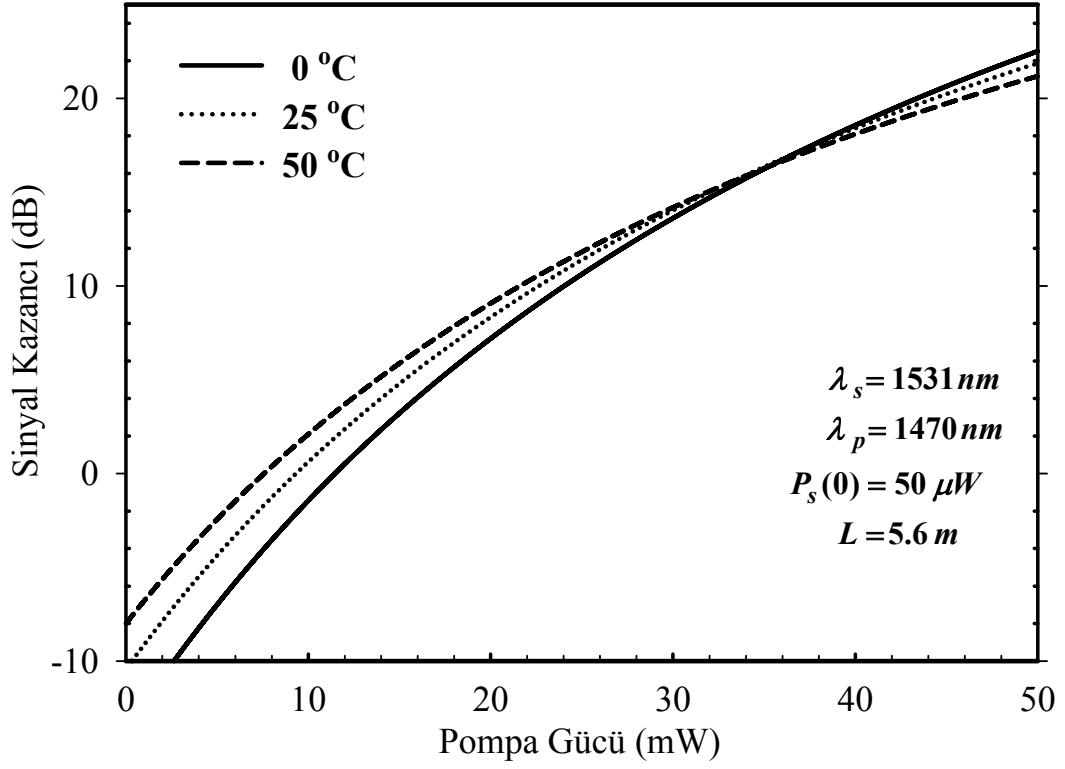
1470 nm pompalama konfigürasyonu için Şekil 4.6'da bağıl ters doluluğun, Şekil 4.7'de 1544 nm ve Şekil 4.8'de 1531 nm sinyal uygulamalarının kazanç bakımından sıcaklığa bağımlı değişimleri verilmektedir. Denklem (3.9)'un dikkate alındığı bağıl ters doluluk ifadesinde, hem β hem de η parametreleri sıcaklığa bağımlılığı vurguladığı için, 1470 nm pompalama uygulamalarının sıcaklığa daha hassas olabileceği tahmin edilebilir. Erbiyum iyonu için 1470 nm pompalama durumunun iki seviyeli lazer sistemine karşılık geldiğinin vurgulandığı ikinci bölümden, pompalama etkinliğinin hiçbir zaman % 50'yi geçemeyeceğini düşünürsek, Şekil 4.6'daki değişimin bunu doğruladığını söyleyebiliriz.



Şekil 4.6. 1470 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki EKFK için bağıl ters doluluğun normalize pompalama oranına göre değişimi.



Şekil 4.7. 1470 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki EKFK için 1544 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.

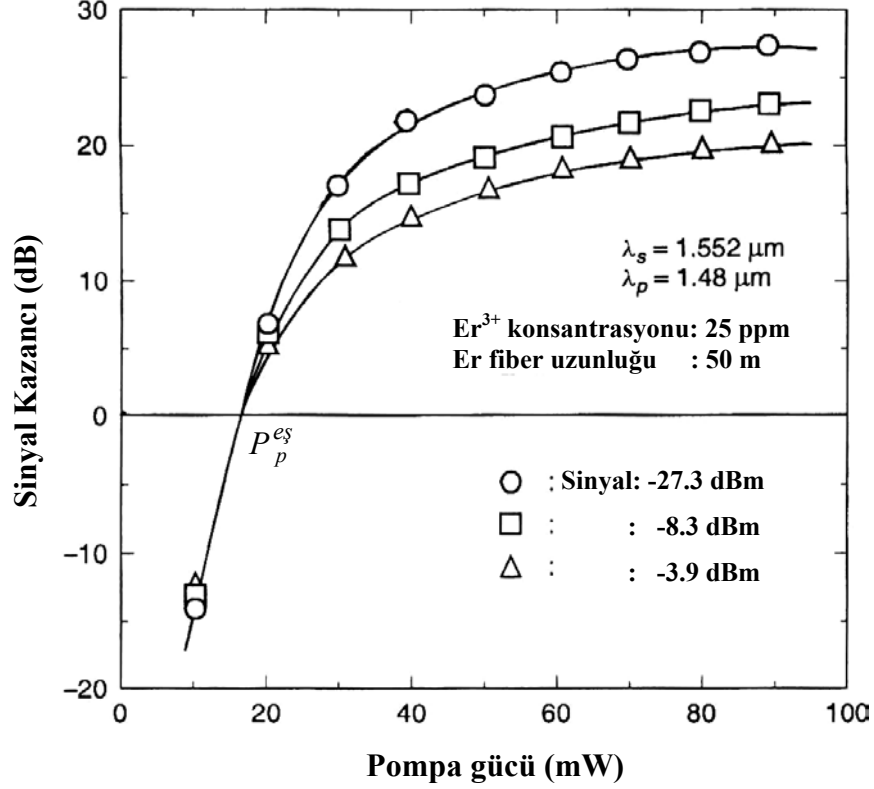


Şekil 4.8. 1470 nm pompalama konfigürasyonuna ait farklı sıcaklık değerlerindeki EKFK için 1531 nm sinyal uygulamasında kazancın pompa gücüne göre değişimi.

Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi bağıl ters doluluk ve normalize pompalama oranı arasındaki ilişki sıcaklığa bağımlılığı belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. 980 nm pompalama durumu için görülmeyen bu etki, 1470 nm pompalama konfigürasyonu için iki seviyeli lazer sistemi yaklaşımı yapılmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, erbiyum iyonu için yarı kararlı seviyenin Stark yarılmalı alt seviyeleri arasındaki dolulukların Boltzmann dağılımı yardımı ile sıcaklığa bağımlı hale getirilmesi sonucunda, bu alt seviyelerdeki dağılım modellenmiş olmaktadır. Şimdiye kadar kurulan sıcaklığa bağımlı pek çok modelde bu dağılım üzerinden işlem yapılmamış olması, bir eksiklik olarak görülmektedir. Bu çalışmada kurulan model ile bu eksiklik giderilmiştir. EKFK'nin pompa gücüne karşılık kazanç verimliliğinin incelendiği Şekil 4.7'den 1544 nm sinyal uygulamalarında yaklaşık 28 mW'ın üstündeki pompalama konfigürasyonları için, sıcaklığın 0'dan 50 °C'a artması ile kazancın azalma eğilimi gösterdiğini, fakat yaklaşık 25 mW'ın altındaki konfigürasyonlarda tersi bir durum gerçekleştiği görülmektedir. 50 mW pompalama değerinde 22 dB'den 20,5 dB'e düşen kazançta 1,5 dB'lik değişim gözlemlenmektedir. Şekil 4.8'den 1531 nm sinyal uygulamalarında ise 35 mW'ın üstündeki pompalama konfigürasyonları için sıcaklığın artması ile kazancın 23,4 dB'den 22 dB'ye 1,4 dB azaldığı görülmektedir.

980 nm pompalama durumu ile 1470 nm'yi karşılaştırmak gerekirse, yüksek pompa gücü gerektiren sistem uygulamalarında her iki sinyal dalgaboyunda da 1470 nm pompalama konfigürasyonunun daha etkin olduğu görülmektedir. Ancak, sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkilenen pompalama şeklinin de 1470 nm olduğu açıktır. Eşik pompa güçleri bakımından inceleme yapılırsa 1470 nm durumunda daha düşük pompa güçleri kullanılarak kazanç bölgesine kolaylıkla geçilmektedir. 1470 nm'de pompalama yapmanın 980 nm'ye göre daha verimli olması pompa soğurum tesir kesitlerine bağlıdır. 980 nm'de pompa soğurum tesir kesiti 1470 nm'den daha büyüktür. Pompa soğurum tesir kesiti sistemi pompalamak ve ters doluluk elde etmek için gerekli enerjiyi belirleyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, daha büyük soğurum tesir kesiti değerlerine sahip pompalama konfigürasyonları net sinyal kazancını azaltıcı bir etki yapmaktadır.

Sıcaklık bağımlı model kapsamında yapılan teorik sonuçların literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile uyumlu olduğunu göstermek için Şekil 4.9 dikkate alınabilir. Ancak, bu çalışma, sadece oda sıcaklığındaki ilişkiler görülmektedir.



Şekil 4.9. Pompa gücüne karşı sinyal kazancının değişimi. Giriş sinyal gücünün artması durumunda kazancın azalmakta olduğu görülmektedir [120].

Şekil 4.9'da gösterilen kazanç-pompa gücü arasındaki ilişki bağıl ters doluluk-normalize sinyal oranı arasındaki ilişki ile de özdeştir. Buradaki karşılaştırma, gerçek bir EKFK sisteminde kazancın pompa gücüne göre değişiminin temel üç seviyeli sistemden alınan bilgiler yardımı ile nasıl yorumlanabildiğini ve teori/deney sonuçlarının birbirine ne kadar benzediğini göstermektedir. Şekil 4.9'da “dBm” olarak gösterilen sinyal değerleri, 1 mW sinyal gücüne göre sisteme uygulanan gerçek sinyal gücünün değerini göstermektedir ve “dBm”= $10 \log(P_s/1 \text{ mW})$ eşitliğinden dB cinsinden hesaplanmaktadır. Buna göre, Şekil 2.9'da - 27.3 dBm'lik sinyal, gerçekte $1.86 \mu\text{W}$ 'lık sinyal gücüne karşılık gelmektedir. Şekil 2.8'de $R_s\tau = 0,55$ değeri, yaklaşık $2 \mu\text{W}$ 'lık sinyal gücü için hesaplanmıştır.

4.3. EKFK için Modifiye Edilmiş Yayınım Denklemleri ile Elde Edilen Sonuçlar

Kazanç ve uzunluk arasındaki ilişkiyi incelemek için Denklem (3.32)'deki R 'yi belirlemek gerekmektedir. Bunun için $f(r)$ fonksiyonumuzu Gauss biçimli seçebiliriz [188-190]:

$$f(r) = \exp(-r^2/w_0^2) / \pi w_0^2. \quad (4.1)$$

Burada w_0 spot büyüklüğü olmak üzere fiberin öz bölgesinin alanı $\pi w_0^2 = 33 \mu m^2$ olarak seçilmiştir. $N(r)$ toplam Erbiyum iyonu dağılımını da Gauss biçimli kabul edebiliriz [191, 192]:

$$N(r) = \exp(-r^2/w^2) / \pi w^2, \quad (4.2)$$

burada w , erbiyum iyonları ile katkılanan bölgenin yarıçapıdır. Genel hesaplamaları Al-Silika Erbiyum-katkılı fiber kuvvetlendiriciler için yapacak olursak, gerekli fiber parametreleri aşağıdaki gibi olacaktır;

1480 nm pompalama konfigürasyonunda (kaynak [172, 193]'den);

Yaşam süresi: $\tau = 10.8 \text{ ms}$,

Erbium-katkılı etkin öz alanı: $A = 5.3 \mu m^2$,

Örtüşme faktörü: $\Gamma_{s,p} = 0.16$ ($w/w_0 = 0.4$),

Sinyal ışınının soğurum sabiti $\alpha = 0.5 \text{ m}^{-1}$

Sinyal soğurum tesir kesiti (1530 nm): $\sigma_{12} = 6.6 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Sinyal yayınım tesir kesiti (1530 nm): $\sigma_{21} = 5.7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Pompa soğurum tesir kesiti (1480 nm): $\sigma_{13} = 2.44 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Pompa yayınım tesir kesiti (1480 nm): $\sigma_{31} = 0.87 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Giriş pompa gücü P_p^g : 30 mW,

Giriş sinyal gücü P_s^g : 10 μ W,

Fiber öz bölgesine hapsedilen Erbiyum iyon yoğunluğu: $3.86 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

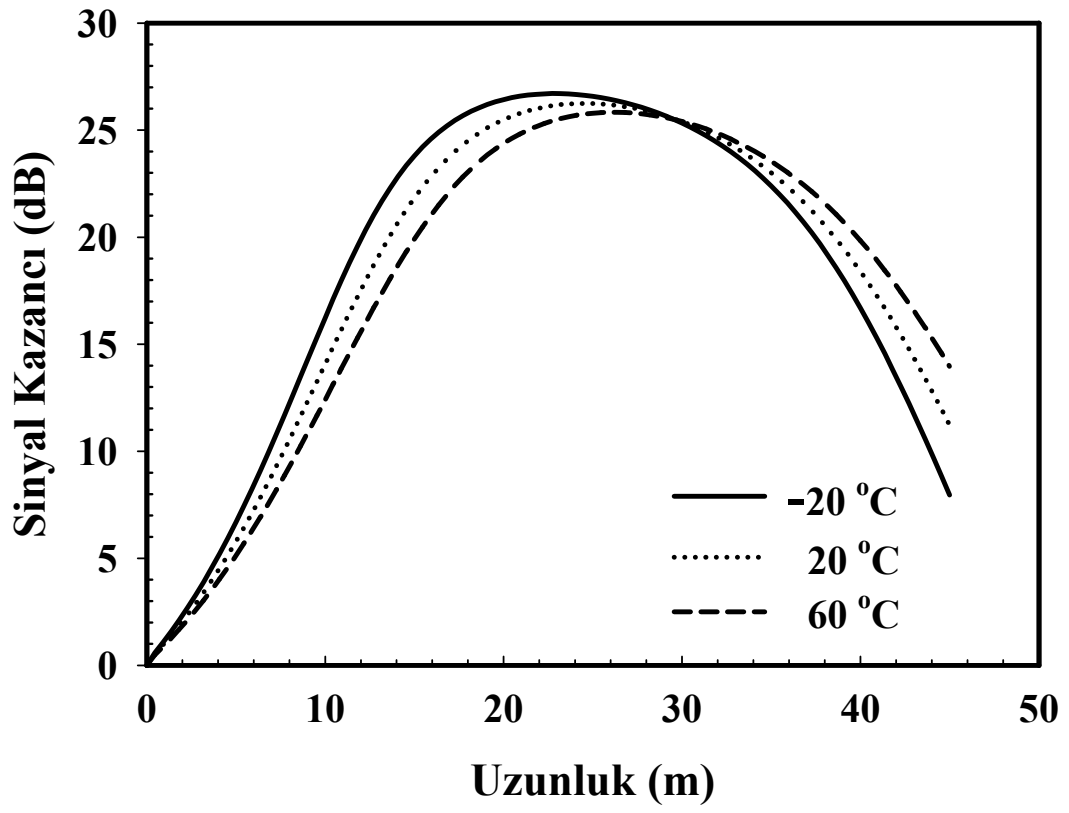
Sıcaklık bağımlı model için gerekli parametreler Tablo 4.3.'de ve sıcaklığa bağımlı model kapsamında sinyal kazancı ile fiber uzunluğu arasında Denklem (3.42)'den elde edilen ilişki Şekil 4.10'da verilmiştir. Ayrıca, Denklem (3.42) hesaplanırken gerekli olan KKY güçleri, OptiAmplifier 4.0'dan yararlanılarak elde edilmiş ve fiber boyunca değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.3. 1480 nm pompalama durumu için sıcaklık bağımlı model kapsamında optimizasyon hesaplarında kullanılacak parametreler ve onların değerleri.

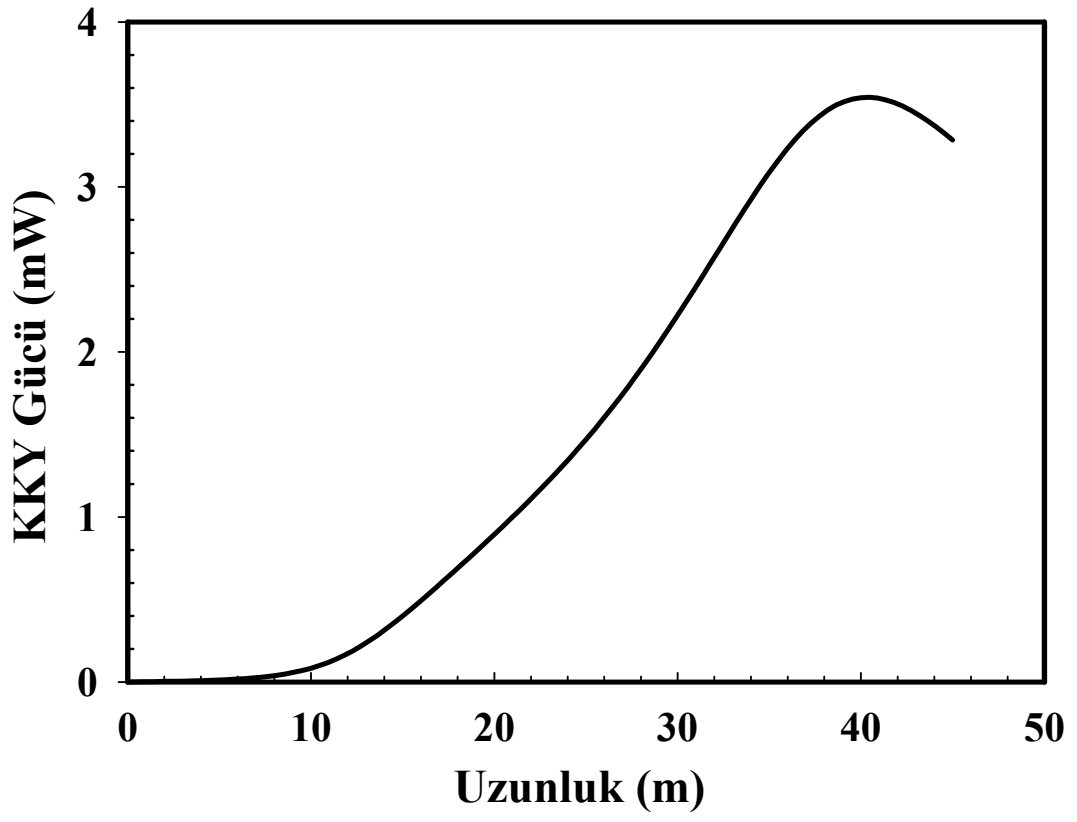
Sıcaklık (°C)	Boltzmann Faktörü (β)	Tesir kesitlerinin oranı (η)	Maksimum dönüşüm verimi için (P_{p0}) (mW)	Öz doyum gücü ($P_s^{\text{öz}}$) (mW)
-20	0,306	0,845	2,308	0,493
20	0,357	0,862	2,311	0,474
60	0,406	0,879	2,314	0,451

Tablo 4.3.'den de görüldüğü gibi farklı sıcaklık değerlerinde Boltzmann faktörü belirli bir oranda değişmektedir. Benzer şekilde tesir kesitlerinin oranlarında da değişim gözlemlenmektedir. Maksimum dönüşüm veriminin bu aralıktaki sıcaklık değişimlerinden fazla etkilenmediğini; ancak, öz sinyal gücünün ihmal edilemeyecek ölçüde sıcaklığa bağlı olduğunu söyleyebiliriz. 1480 nm pompalama konfigürasyonunda belirgin olarak ortaya çıkan sıcaklığa bağımlılığın büyük ölçüde Boltzmann faktöründen kaynaklandığını vurgulayabiliriz. Böylece, 1480 nm pompalama durumunda erbiyum iyonunun Stark seviyeleri arasındaki dolulukların değişiminde sıcaklık faktörünün de oldukça önemli olduğunu söyleyebiliriz.

Şekil 4.10'da dikkat çeken durum, sıcaklığın -20 °C'dan +60 °C'a artışı sırasında sinyal kazancındaki önemli azalmadır. Ancak, Şekil 4.10 dikkatlice incelendiğinde kazançtaki azalmanın gözlemlendiği fiber uzunluk bölgesinin 0 ile 24 m arasında olduğu görülmektedir. Bu bölge içerisinde sıcaklığın artması ile sinyal kazancı azalmakta ancak, elde edilebilecek maksimum kazanç değeri yaklaşık 27 dB olmaktadır. 24 m'den daha büyük fiber uzunluklarında ise kazancın azalma eğilimi gösterdiği ve bu eğilimin sıcaklığın azalması ile daha da aşağılara düştüğü görülmektedir. Tasarlanan EKFK'nin yaklaşık 29 m'de sıcaklıktan bağımsız çalışabilmektedir.



Şekil 4.10. $\lambda_s = 1530 \text{ nm}$ için farklı sıcaklık değerlerinde 1480 nm pompa kaynağı ile pompalanan fiber kuvvetlendiricide sinyal kazancının EKFK uzunluğu ile değişimi.



Şekil 4.11. $\lambda_s = 1530 \text{ nm}$, $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$, $P_s^g = 10 \text{ } \mu W$ ve $P_p^g = 30 \text{ mW}$ için KKY gücünün EKFK uzunluğu ile değişimi.

980 nm pompalama konfigürasyonunda (Kaynak [194]'den);

Yaşam süresi: $\tau = 11.0 \text{ ms}$,

Erbiyum-katkılı etkin öz alanı: $A = 11.88 \mu\text{m}^2$,

Örtüşme faktörü: $\Gamma_p = \Gamma_s = 0.30$ ($w/w_0 = 0.6$),

Sinyal ışınının soğurum sabiti $\alpha = 0.5 \text{ m}^{-1}$,

Sinyal soğurum tesir kesiti (1558 nm): $\sigma_{12} = 5.25 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Sinyal yayınım tesir kesiti (1558 nm): $\sigma_{21} = 5.75 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Pompa soğurum tesir kesiti (980 nm): $\sigma_{13} = 2.00 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Pompa yayınım tesir kesiti (980 nm): $\sigma_{31} = 0$,

Giriş pompa gücü P_p^g : 30 mW,

Giriş sinyal gücü P_s^g : 10 μW ,

Fiber öz bölgesine hapsedilen Erbiyum iyon yoğunluğu: $5.80 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

Sıcaklık bağımlı model için gerekli parametreler Tablo 4.4.'de ve sıcaklığa bağımlı model kapsamında sinyal kazancı ile fiber uzunluğu arasındaki ilişki Şekil 4.12'de verilmiştir. Ayrıca, Denklem (3.42) hesaplanırken gerekli olan KKY güçleri, OptiAmplifier 4.0'dan yararlanılarak elde edilmiş ve fiber boyunca değişimi Şekil 4.13'de verilmiştir.

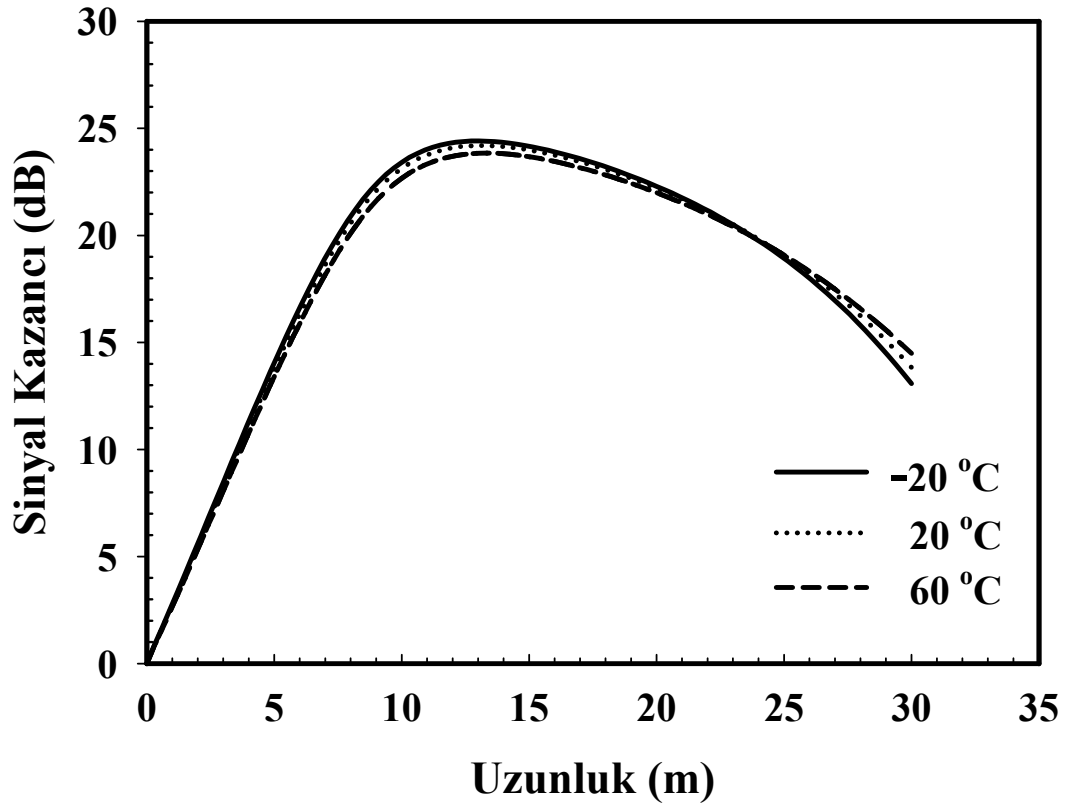
Tablo 4.4. 980 nm pompalama durumu için sıcaklık bağımlı model hesaplarında kullanılacak parametreler ve onların değerleri.

Sıcaklık (°C)	Boltzmann Faktörü (β)	Tesir kesitlerinin oranı (η)	Maksimum dönüşüm verimi için (P_{p0}) (mW)	Öz doyum gücü ($P_s^{\text{öz}}$) (mW)
-20	0,0	1,112	3,177	0,759
20	0,0	1,095	3,230	0,765
60	0,0	1,083	3,265	0,770

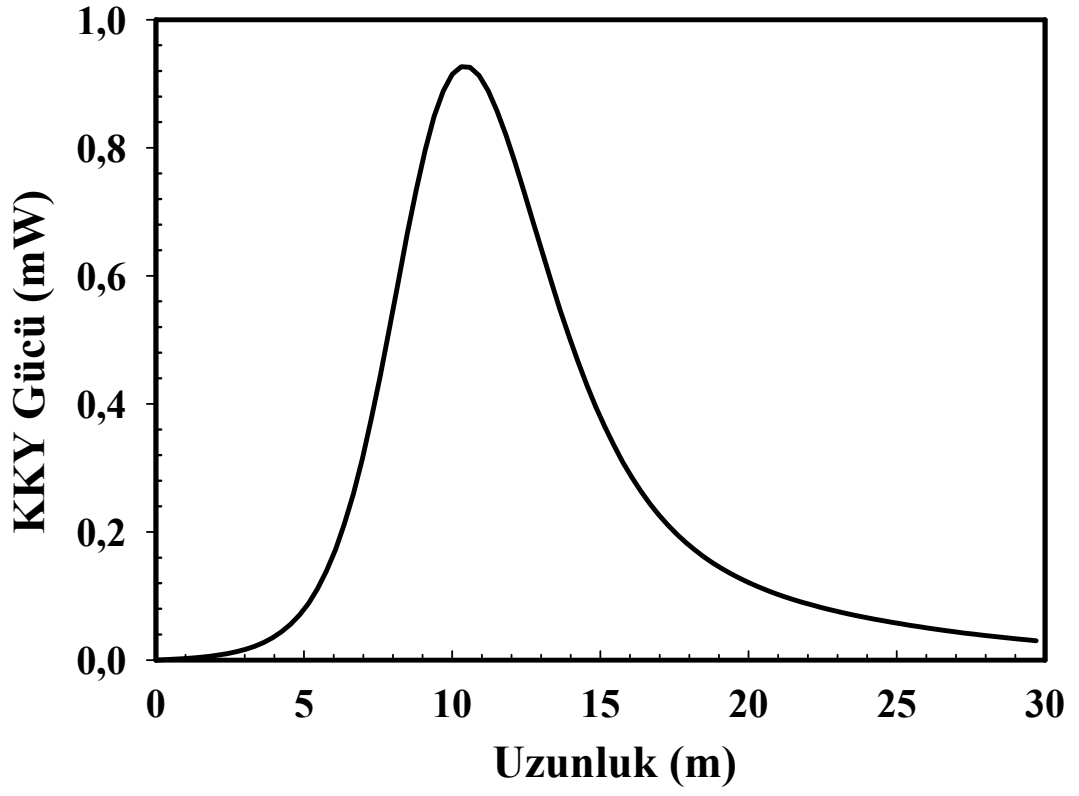
Tablo 4.4.'den de görüldüğü gibi Boltzmann faktörü farklı sıcaklık değerleri için sıfır alınmıştır. Daha detaylı bir inceleme ile, 980 nm pompalama konfigürasyonunda erbiyum iyonunun üçüncü seviyesindeki dolulukların sıcaklığa bağımlı olarak modellenebileceği söylenebilir; ancak, uyarım yolu ile taban seviyeden gelen elektronların üçüncü seviyedeki yaşam sürelerinin nanosaniye mertebelerinde olması nedeni ile, bu seviyede tutunamadıkları ve sonuçta yarı kararlı seviyeye geçtikleri görülmüştür. Bir diğer modelleme, üçüncü ve ikinci seviyeler arasında yapılabilir. Fakat, bu seviyeler arasındaki enerji farkının çok büyük olması nedeni ile Boltzmann faktörü ihmal edilebilmektedir. Böylece, 980 nm pompalama konfigürasyonunda Boltzmann faktörünü dikkate almak gerekmemekte ve sıcaklığa bağımlılığı ifade etmede tesir kesitlerinin oranı belirlemek yeterli olmaktadır. Tablo 4.4.'den görüleceği gibi tesir kesitlerinin oranlarında sıcaklığa bağımlı bir değişim gözlemlenmektedir. Maksimum dönüşüm veriminin ve öz sinyal gücünün bu aralıktaki sıcaklık değişimlerinden önemli miktarda etkilendiklerini ve ihmal edilemeyecek ölçüde sıcaklığa bağımlı olduklarını da söyleyebiliriz.

Şekil 4.12.'de sıcaklığın -20°C 'dan $+60^{\circ}\text{C}$ 'a artışı sırasında sinyal kazancındaki değişimin çok az olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle, 0 ile 13 m arasında sinyal kazancındaki değişim sıcaklığın artması ile artarken, elde edilebilecek maksimum kazanç değerinin yaklaşık 24 dB olduğu görülmektedir. Bu kazanç değerindeki değişimin sıcaklığa zayıf bağımlı olduğu beklenen bir gelişmedir. 13 m'den daha büyük fiber uzunluklarında ise kazancın azalma eğilimi gösterdiği ve bu eğilimin sıcaklığın azalması ile daha da aşağılara düştüğü görülmektedir. İlgili fiber kuvvetlendirici parametre değerlerinde tasarlanan EKFK'nin yaklaşık 23 m'de sıcaklıktan bağımsız çalışabileceği bilgisi de dikkatleri çeken bir diğer özelliktir.

İki farklı pompalama konfigürasyonunun karşılaştırıldığı EKFK'de, sinyal kazancı bakımından en verimli pompalama 1480 nm'de görülmektedir. Yaklaşık 27 dB kazanç değerine ulaşılan bu tarz bir fiber kuvvetlendirici için gerekli uzunluk yaklaşık 24 m'dir. 980 nm'de ise daha kısa uzunlukta fiber kuvvetlendirici ile maksimum kazanç olan 24 dB'e ulaşılabilmesine rağmen, verim karşılaştırmasında asıl olanın sinyal kazançlarının üstünlüğü olarak kabul edilmesidir.



Şekil 4.12. $\lambda_s = 1558 \text{ nm}$ için farklı sıcaklık değerlerinde 980 nm pompa kaynağı ile pompalanan fiber kuvvetlendiricide sinyal kazancının EKFK uzunluğu ile değişimi.



Şekil 4.13. $\lambda_s = 1558 \text{ nm}$, $\lambda_p = 980 \text{ nm}$, $P_s^g = 10 \text{ } \mu W$ ve $P_p^g = 30 \text{ mW}$ için KKY gücünün EKFK uzunluğu ile değişimi.

Denklem (3.42)'den yararlanılarak çizilen Şekil 4.10 ve Şekil 4.12'deki sıcaklığa bağımlı sinyal kazancı-uzunluk değişimi, bir EKFK'de maksimum kazanç karşılık gelen fiber kuvvetlendirici uzunluğunun belirlenmesi için genel olarak bilgi vermektedir. Ancak, daha kullanışlı bir bağıntı olarak Denklem (3.43) dikkate alınmalıdır. Burada, öncelikle, ilgili fiber kuvvetlendirici parametrelerini kullanarak Denklem (3.33)'den maksimum kazanç belirlenir. Daha sonra, bu maksimum değere karşılık gelecek optimum fiber kuvvetlendirici uzunluğu için Denklem (3.43) kullanılmalıdır. Sonuç olarak, farklı sıcaklık değerlerinde hem 1480 nm pompalama hem de 980 nm pompalama konfigürasyonları için maksimum kazanç karşılık gelen optimum fiber kuvvetlendirici uzunlukları belirlenebilir. Tablo 4.5'de bu şekilde elde edilen her iki pompalama durumu için maksimum kazanç ve optimum fiber kuvvetlendirici uzunluğu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 4.5. Maksimum kazanç karşılık optimum fiber kuvvetlendirici uzunluklarının farklı sıcaklık değerlerindeki değişimi.

	1480 nm		980 nm	
Sıcaklık	Maksimum Kazanç (dB)	Optimum Uzunluk (m)	Maksimum Kazanç (dB)	Optimum Uzunluk (m)
-20 °C	26,71	22,72	24,21	13,18
20 °C	26,24	24,54	24,04	13,12
60 °C	25,82	26,36	23,93	13,05

Tablo 4.5.'den görüldüğü gibi 1480 nm pompalama durumunda sıcaklık artarken maksimum kazanç 0,90 dB değişim göstermektedir. Bu değişime karşılık fiber kuvvetlendirici uzunluğunda yaklaşık 3,5 m'lik bir artma olmaktadır. Yani, 60 °C'da 25,82 dB'lik kazanç elde etmek için fiber uzunluğumuzun 26,36 m olması gerekmektedir. Halbuki, -20 °C'da 26,71 dB'lik kazanç elde etmek için fiber uzunluğumuzun 22,72 m olması yeterlidir. 980 nm pompalama durumunda ise sıcaklığın artması ile maksimum kazancın yaklaşık 0,3 dB azaldığı ancak, buna bağlı olarak fiber uzunluğunun da azaldığı görülmektedir. 60 °C'da bu fiberden elde edilecek maksimum kazanç 23,93 dB'ken sıcaklığın -20 °C'da azalması durumunda kazanç 24,21 dB'e çıkmaktadır.

4.4. PKFK için Modifiye Edilmiş Oran Denklemleri ile Elde Edilen Sonuçlar

Son yıllarda yapılan araştırmaların sonuçlarına göre, kuvvetlendirme verimliliği bakımından dikkat çeken bir diğer nadir toprak elementinin de, dört seviyeli lazer ya da kuvvetlendirme sistemi özelliği gösteren Praseodimyum olduğundan söz edilmişti. Praseodimyum-katkılı fiber kuvvetlendiriciler (PKFK), haberleşme sistemlerinde kullanılan diğer standart dalga boyu olan 1,3 μm dalga boyunda çalışmaktadır. PKFK'ler daha karmaşık yapılarda cam konakçılar (silisyum, fluoride, ZBLAN) ve yüksek güçlerdeki pompa kaynakları gerektirmelerine rağmen, özellikleri ve üstünlükleri EKFK'lere çok benzemektedir [74, 195, 196].

Denklem (3.48)'deki kazanç bağıntısının kullanılmasıyla belirli bir sinyal gücü için pompa gücüne göre sinyal kazancının nasıl değiştiği belirlenecektir. $^3F_4 \rightarrow ^3F_3$ seviyeleri arasında yaklaşık 400 cm^{-1} 'lik enerji aralığı oluşmaktadır [47] ve bu enerji aralığı içerisindeki doluluklar, $0-40^\circ\text{C}$ sıcaklık değerlerinde farklılaşacağı için β parametresi de farklı değerler alacaktır. 0°C 'da $\beta = 0,121$; 20°C 'da $\beta = 0,140$ ve 40°C 'da $\beta = 0,159$ olarak hesaplanmıştır. Denklem (3.48)'deki sıcaklık bağımlı kazanç bağıntısından elde edilen sonuçlar Şekil 4.14'de verilmiş. Burada yapılan nümerik hesaplamalarda, fiber nümerik açıklığı $NA = 0,42$ olan ve 36 m uzunluğundaki Pr^{3+} -katkılı fluoride fiber kuvvetlendiriciye ait fiber parametreleri kullanılmıştır [65]:

Yaşam süresi: $\tau = 110 \mu\text{s}$,

Erbiyum-katkılı etkin öz alanı: $A = 8.04 \mu\text{m}^2$,

Örtüşme faktörü: $\Gamma_p = \Gamma_s = 0.6$,

Sinyal soğurum tesir kesiti (1300 nm): $\sigma_{021} = 5.5 \times 10^{-27} \text{ m}^2$,

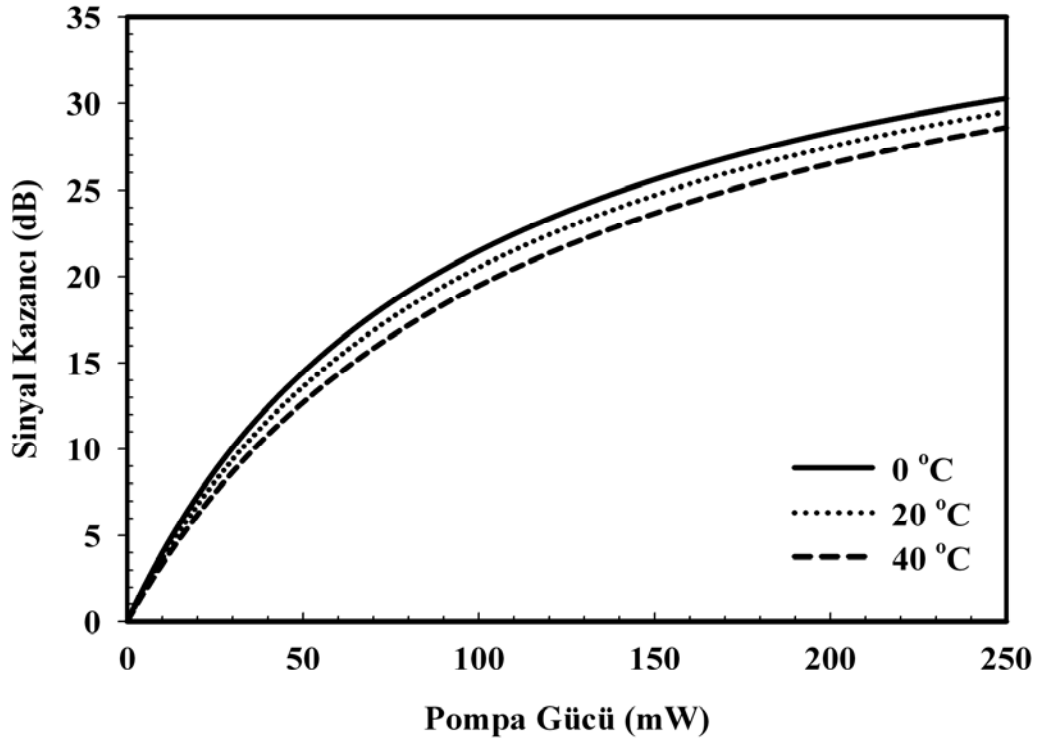
Sinyal yayınım tesir kesiti (1300 nm): $\sigma_{221} = 3.73 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

Pompa soğurum tesir kesiti (1017 nm): $\sigma_{03} = 4.24 \times 10^{-26} \text{ m}^2$,

Pompa yayınım tesir kesiti (1017 nm): $\sigma_{30} = 1.2 \times 10^{-26} \text{ m}^2$,

Giriş sinyal gücü $P_s(0)$: 1 mW,

Fiber öz bölgesine hapsedilen Praseodimyum iyon yoğunluğu: $4.80 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.



Şekil 4.14. PKFK için pompa gücüne göre sinyal kazancının değişimi.

Şekil 4.14'den de görüldüğü gibi pompa gücünün artırılması ile sinyal kazancı artmakta fakat sıcaklığın artırılması ile de azalmaktadır. Pratik uygulamalarda pompa gücünün 100 mW olduğu durumdaki kazanç değeri dikkate alınır ve burada yapılan nümerik hesaplamanın sonucuna göre 100 mW'lık pompa gücü için 0 °C'da 23,6 dB, 20 °C'da 21,3 dB ve 40 °C'da 19,7 dB kazanç değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçların, oda sıcaklığında deneysel olarak yapılan çalışmanın, [65], 100 mW'lık pompa gücünde 21 dB'lik kazanç değeri ile de uyumlu olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5

TARTIŞMA VE SONUÇ

Nadir-toprak katkılı fiber kuvvetlendiriciler ile yapılan kuvvetlendirme işleminin elektronik tekrarlayıcıların yerini almaya başlaması ile fiber optik teknolojisindeki araştırmalar nispeten kısa bir sürede bu alana yönelmeye başladı. Özellikle, nadir-toprak elementlerinin atomik ve optik özelliklerinin kuvvetlendirme mekanizmasına elverişli olmasının anlaşılmasından sonra, cam konakçılardaki katkı yoğunluğuna bağlı olarak spektroskopik özellikleri analiz edildi. Amaç, en verimli kuvvetlendiricinin belirlenmesini sağlayacak parametrelerin elde edilmesi ve böylece haberleşme teknolojisinin gelişiminin sağlanmasıydı. Teknolojik gelişim için gereken en önemli aşama, ikinci ve üçüncü haberleşme penceresi civarında çalışabilen optik sistemlere uygun kuvvetlendiricilerin üretilmesiydi. Bu aşamada, teorik ve deneysel pek çok çalışma yapıldı ve ortalama her yıl binlerce bilimsel çalışma hala bu alandaki gelişimin hızını artırmaya çalışmaktadır [197-200].

EKFK ve PKFK'lerin sinyal kazanç bağıntılarının sıcaklığa bağlı olarak modellendiği bu çalışmada, her iki fiber kuvvetlendirici için pratik çalışma sıcaklık bölgesindeki kazanç-fiber uzunluğu ve kazanç-pompa gücü arasındaki ilişkiler incelendi. Pr^{3+} lı sistemlerde sinyal kazanç değerinin her zaman için pozitif olduğu görüldü. O halde, pompa gücünün sıfır olduğu Pr^{3+} lı sistemlerde sinyalin hiç bir zayıflama ya da kazanç göstermediği söylenebilir. Dolayısıyla, EKFK'lere göre

PKFK'lerin üstünlüğü, sisteme yeterli pompalama yapılmasa dahi, dört seviyeli fiber kuvvetlendiricide zorlamalı sinyal yayılırken, erbiyumlu kuvvetlendiricide zorlamalı sinyalin soğurulmasıdır. Ancak, Pr^{3+} 'lı kuvvetlendiricilerde yaklaşık 30 dB'lik kazanç elde etmek için, 1470 nm'de pompalanan Er^{3+} 'lı kuvvetlendiricilere göre daha fazla pompa gücü kullanmak gerekmektedir. Her iki kuvvetlendirici için de sıcaklığın artması ile kazanç performansının azaldığı görülmektedir. Bu durumda, yapılan sıcaklık bağımlı modellemede, sıcaklığın özellikle yüksek pompa güçlerinde performansı belirleyen etkin bir parametre olduğu söylenebilir.

EKFK'lerin sıcaklık bağımlı modellendiği oran denklemleri kapsamında, 980 nm ve 1470 nm dalgaboylarında pompalamanın yapıldığı incelemelerde, iki farklı sinyal dalgaboyu dikkate alınmıştır. 1531 ve 1544 nm olarak seçilen sinyal dalgaboylarında, 1531 nm olanın verim bakımından daha üstün olduğu belirlenmiştir. Pompalama verimliliği bakımından ise 1470 nm durumunun tercih sebebi olduğu görülmüştür. EKFK'nin çalışma sıcaklık bölgesinin 0-50 °C'a uygun olacak şekilde ayarlanması ile, bu aralıktaki kazanç-pompa gücü arasındaki değişimin sıcaklığın artması ile azaldığı belirlenmiştir.

1470 nm pompalama konfigürasyonun 980 nm pompalama konfigürasyonuna göre daha üstün olmasının nedenini pompa tesir kesitlerine bağlayabiliriz. 980 nm pompalama durumunda sistem tarafından soğurulan enerjinin bir ölçüsü olan pompa tesir kesiti, 1470 nm durumuna göre daha büyüktür. Bu durumda, pompa fotonlarının büyük bir kısmı kuvvetlendirme mekanizmasına karışmaktadır ve 1550 nm dalgaboyu civarında yayınlanan sinyal fotonlarına koharent olmayan bir etki yapmaktadır. 1470 nm durumunda ise, pompa fotonlarının dalgaboyunun hemen hemen sinyal dalgaboyunda olması nedeni ile koherent olmayan etkiler daha az görülmektedir. Her iki pompalama konfigürasyonunda da uyarım seviyesinden yaşam süresini belirleyen yarı kararlı seviyeye olan ışımaz geçişlerde fononların yayınlandığı görülür. Bu fononlar ışıma sürecine katılan fotonlara göre (KKY gürültüsünü üreten fotonlar hariç) sistemin verimini azaltıcı etkiye sahiptirler. Optik ve akustik olmak üzere iki farklı modda yayınlanan bu fononlardan, optik fononlar; sistemden radyasyon etkisi göstererek uzaklaşırken, akustik fononlar; sistemin

tabanına çökerek ısı etkisi gösterirler. Özellikle, elektronik tekrarlayıcıların aşırı ısınmasına neden olan ve böylece kazanç bakımından verimi azaltan bu etki, fiber optik kuvvetlendiricilerde verim bakımından önemli bir kayba neden olmaz.

Yayınım denklemleri modelinden yararlanılarak yapılan incelemede, kazanç-fiber kuvvetlendirici uzunluğu arasındaki ilişkinin hem 980 nm hem de 1480 nm pompa dalgaboylarındaki değişimi incelenmiştir. Nümerik hesaplamalar, Gauss biçimli katkı dağılımı için yapılarak analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.10'da, 1480 nm pompalama durumundaki kazanç-fiber kuvvetlendirici uzunluğu arasındaki ilişkinin verim bakımından Şekil 4.12'deki 980 nm durumundakine göre daha üstün olduğu görülmüştür. Şekil 4.10'da dikkat çeken bir durum, sıcaklığın $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dan $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a artışı sırasında sinyal kazancındaki önemli azalmadır. Şekil 4.12.'de ise, sıcaklığın $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dan $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a artışı sırasında sinyal kazancındaki değişimin çok az olduğu görülmektedir. Bu durum, 980 nm pompalama konfigürasyonunun, sıcaklık bağımlı model kapsamında dikkate alınan yarı kararlı seviye civarında etkin olmayışındandır. Bu konfigürasyonda, sıcaklığa bağımlı değişim, sadece soğurum ve yayınım tesir kesitleri arasındaki sıcaklığa bağımlı ilişkiden gelmektedir.

1480 nm pompalama durumu için Şekil 4.10 incelendiğinde, kazançtaki sıcaklığa bağımlı azalmanın gözlemlendiği bölgenin 45 m uzunluğundaki fiber kuvvetlendirici için ilk 24 m'de olduğu görülmektedir. Bu bölge içerisinde elde edilen maksimum kazanç değeri yaklaşık 27 dB'dir ve sıcaklığa bağımlı kazanç değişimi yaklaşık 1,5 dB'dir. İlgili fiber parametre değerlerinde tasarlanan EKFK'nin yaklaşık 29 m'de sıcaklıktan bağımsız olduğu da dikkatleri çeken bir diğer özelliktir.

980 nm pompalama durumu için Şekil 4.12 incelendiğinde, 30 m uzunluğundaki fiber kuvvetlendiricinin ilk 13 m'si arasında sinyal kazancındaki değişim, sıcaklığın artması ile artmakta ve elde edilen maksimum kazanç değeri yaklaşık 24 dB olmaktadır. Sıcaklığa bağımlı kazanç değişiminin 1 dB'in altında olması, bu kazanç değerindeki değişimin 1480 nm pompalama durumuna göre sıcaklığa daha zayıf bağımlı olduğunu göstermektedir. 980 nm durumu için 13 m'den daha büyük fiber uzunluklarında, kazancın azalma eğilimi gösterdiği ve bu eğilimin sıcaklığın

azalması ile daha da aşağılara düştüğü görülmektedir. Ayrıca, bu dalgaboyunda pompalanan EKFK'nin yaklaşık 23 m'de sıcaklıktan bağımsız çalışabileceği de belirlenmiştir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.12'deki kazanç-fiber kuvvetlendirici uzunluğu arasındaki ilişkiler incelenirken, sırasıyla, Şekil 4.11 ve Şekil 4.13'deki KKY gücü-fiber kuvvetlendirici uzunluğu arasındaki ilişki dikkate alınmalıdır. Şekil 4.11'de KKY'nin yaklaşık 40 m civarında maksimum değer aldığı görülürken, Şekil 4.13'de bu değer yaklaşık 13 m civarında olduğu görülmektedir. Şekil 4.13'de dikkat çeken en önemli durum, KKY'nin maksimum olduğu yerde sinyal kazancının da maksimum değer almasıdır. Bu durumu, sisteme uygulanan giriş pompa fotonlarının çıkış sinyal fotonlarına dönüşümünün bir ölçüsü olan “kuantum verimi (KV)” ile açıklamak mümkündür. Çünkü, $KV, (P_s^f - P_s^g) \lambda_s / P_p \lambda_p$, [139], bağıntısı gereği belirli bir uzunluktaki fiberin çıkış ucundaki sinyal gücünün değerine kuvvetlice bağlıdır. 980 nm pompalama durumunda KKY'nin maksimum olduğu fiber uzunluğu bölgesinde kazancın da maksimum olması, bu uzunluk civarında sinyal pompa gücünün ya da KV'nin maksimum değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bir başka ifade ile, bu uzunluk civarında tüm pompa fotonlarını soğuracak yeterince erbiyum iyonunun cam konakçıya katkılanmış olmasındandır.

Bu durumda, 980 nm pompalama konfigürasyonu için sisteme uygulanan pompa fotonlarının % 65 ya da % 80 oranında sinyal fotonlarına dönüştüğü fiber kuvvetlendirici uzunluğunun yaklaşık 13 m olduğunu söyleyebiliriz. 1480 nm durumunda ise, KV'nin % 40 olduğu bilinmektedir ve bu verimliliğin yaklaşık 24 m civarında maksimum kazanca karşılık geldiği görülmektedir. Eğer, bu pompalama konfigürasyonunda erbiyum iyonlarının konsantrasyonunu artırmış olsaydık daha kısa uzunluklarda maksimum kazanç elde edilebilirdi. Her iki pompalama durumunun erbiyum iyon konsantrasyonunu karşılaştırsak, 980 nm'nin 1480 nm'ye göre daha büyük seçildiğini görürüz. Bu durum, 980 nm'de maksimum kazancın daha kısa uzunluklarda elde edilebileceğini açıklar. Fakat, unutulmamalıdır ki elde edilen maksimum kazanç değerlerine göre yine de 1480 nm pompalama konfigürasyonu kuvvetlendirme mekanizması bakımından daha üstün özelliktedir.

Farklı sıcaklık değerlerinde hem 1480 nm pompalama hem de 980 nm pompalama konfigürasyonları için maksimum kazanca karşılık gelen optimum fiber kuvvetlendirici uzunlukları Tablo 4.5’de verilmiştir. 1480 nm durumu için, eğer EKFK’nin 60 °C’da çalışması isteniyorsa, 25,82 dB’lik maksimum kazanç elde edilecek ve bu değeri sağlayacak fiber kuvvetlendirici için en uygun uzunluk 26,36 m olacaktır. Benzer şekilde, 980 nm durumu için, aynı sıcaklıkta 23,93 dB’lik maksimum kazanç elde edilecek ve bu değeri sağlayacak fiber kuvvetlendirici için en uygun uzunluk 13,05 m olacaktır. Böylece, diğer sıcaklıklardaki değerlerden yararlanılarak, tasarlanması düşünülen EKFK’nin sıcaklık bağımlı verim analizi önceden tahmin edilebilmektedir.

PKFK’lerin sıcaklık bağımlı modellendiği incelemelerde, kazancın 20 dB değeri civarında olduğu görülmüştür. 1480 nm’de pompalanan bir EKFK’den 30 mW’lık pompa gücünde elde edilen yaklaşık 25 dB’lik kazancın eşdeğerinin 36 m uzunluğundaki PKFK’den yaklaşık 220 mW’da elde ediliyor olması, PKFK’lerin sistem uygulamaları için neden çok sık kullanılmadığını da açıklamaktadır. 980 nm’de pompalanan EKFK için de durum değişmemektedir.

İhtiyaçlarımızı karşılayacak önemli gelişmelerin yer aldığı optik haberleşme alanının, teknolojik gelişmelerin ışığı altında beklenenden daha kısa sürede günlük hayata gireceği ve bilgi çağıının yerini alacağı tahmin edilmektedir. Özellikle, nano-teknolojinin hızla gelişmesi, gelecekte cam konakçılara katkılanan nadir-toprak elementleri ile nano-boyutlarda fiber kuvvetlendiricilerin yapılabileceği fikrimizi güçlendirmektedir.

KAYNAKLAR

1. Desurvire, E., The Golden Age of Optical Fiber Amplifiers, *Physics Today*, January, 22-27, 1994.
2. Koester, C. J., Snitzer, E. A., Amplification in a fiber laser, *Appl. Opt.*, 3, 1182-1186, 1964.
3. Mears, R. H., Reeke, L., Jauncey, I. M., Payne, D. N., Low-Noise Erbium-Doped Fibre Amplifier operating at 1.54 μm , *Electron. Lett.*, 23 (19), 1026-1028, 1987.
4. Suzuki, K., Kimura, Y., Nakazawa, M., Pumping wavelength dependence of gain factor of a 0.98 mm pumped Er^{3+} fiber amplifier, *Appl. Phys. Lett.*, 55, 2573-2575, 1989.
5. Reisfeld, R., and Jorgensen, C. K., Excited-state phenomena in vitreous materials, in *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare-earths*, edited by K. A. Gschneider and L. Eyring editors, Elsevier Science Publishers, 1987.
6. Layne, C.B., Lowdermilk, W. H., and Weber, M. J., Nonradiative relaxation of rare earth ions in silicate laser glass, *IEEE J. Quantum Electron.*, 11, 798-799, 1975.
7. Desurvire, E., Simpson, J. R., Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 5 (5), 835-845, 1989.
8. Haixing Z., and Fuxi, G., Investigation of glasses doped with Er^{3+} ions used as laser materials, *Chines Physics*, 6 (4), 978-985, 1986.
9. Yariv, A., *Quantum Electronics*, Second Edition, John Wiley, New York, 1975.
10. Yamada, M., Shimizu, M., Horiguchi, M., and Okayasu, M., Temperature Dependence of Signal Gain in Er^{3+} -Doped Optical Fiber Amplifiers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 28 (3), 640-649, 1992.
11. Kagi, N., Oyobe, A., and Nakamura, K., Temperature Dependence of Gain in Erbium-Doped Fibers, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 9 (2), 261-265, 1991.
12. Bolshtyansky, M., Wysocki, P., and Conti, N., Modeling of Temperature Dependence for Gain Shape of Erbium-Doped Fiber Amplifier, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 18 (11), 1533-1540, 2000.
13. Yamada, M., Shimizu, M., Okayasu, M., and Horiguchi, M., Temperature insensitive Erbium-doped fiber amplifiers, *Electron. Lett.*, 26 (20), 1649-1650, 1990.
14. Nakaji, H., Ishizawa, Y., Ohmura, M., Shibata, T., Inoue, A., Shigematsu, M., A Temperature insensitive Er^{3+} -doped optical fiber amplifier for Terrestrial Wavelength-Division-Multiplexing Systems, *IEEE Photonics Technology Letters*, 15 (11), 1522-1524, 2003.

15. Suyama, M., Laming, R. I., and Payne, D. N., temperature dependent gain and noise characteristic of a 1480 nm-pumped erbium-doped fiber amplifier, *Electron. Lett.*, 26 (21), 1756-11757, 1990.
16. Lee, H. J., and Park, N., Reduction of Temperature-dependent multichannel gain distortion using a Hybrid erbium-doped fiber cascade, *IEEE Photonics Technology Letters*, 10 (8), 1168-1170, 1998.
17. Lee, H. J., Lee, W. J., and Park, N., Comparative study on Temperature-dependent multichannel gain and noise figure distortion for 1.48-and 0.98- μm pumped EDFA's, *IEEE Photonics Technology Letters*, 10 (12), 1721-1723, 1998.
18. Thomas, G. A., Ackerman, D. A., Prucnal, P. R., and Cooper, S. L., Physics in the Whirlwind of Optical Communication, *Physics Today*, September, 30-36, 2000.
19. Barros, M. R. X., Nykolak, G., DiGiovanni, D. J., Bruce, A., Grodkiewicz, W. H., and Becker, P. C., Performance of a High Concentration Er^{3+} -Doped Alumino Silicate Fiber Amplifier, *IEEE Photonics Technology Letters*, 8 (6), 761-763, 1996.
20. Nilsson, J., Blixt, P., Jaskorzynska, B., and Babona, J., Evaluation of parasitic upconversion mechanisms in Er^{3+} -doped silica-glass fibers by analysis of fluorescence at 980 nm, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 13 (3), 341-349, 1995.
21. Jarabo, S., Alvarez, J. M., Evaluation of theoretical model for erbium-doped silica fiber amplifiers, *Fiber and Integrated Optics*, 20 (5), 479-493, 2001.
22. Jarabo, S., Rodriguez, J. M., Experimental determination of saturation power in erbium-doped silica fiber, *Optics Communications*, 154, 196-202, 1998.
23. Escuer, A., Jarabo, S., and Alvarez, J. M., Analysis of theoretical models for erbium-doped silica fiber, *Optics Communications*, 187, 107-123, 2001.
24. Furusawa, K., Kogure, T., Monro T. M., and Richardson D. J., High gain efficiency amplifier based on an erbium doped aluminosilicate holey fiber, *Optics Express*, 12 (15), 3452-3458, 2004.
25. Ohishi, Y., Yamada, M., Kanamori, T., and Sudo, S., Low-noise operation of fluoride-based erbium-doped fiber amplifiers with $^4\text{I}_{11/2}$ -level pumping, *Optics letters*, 22 (16), 1235-1237, 1997.
26. Man, S. Q., Wong, S. F., and Pun, E. Y. B., Erbium-doped potassium bismuth gallate glasses, *J. Optical Society of America B*, 19 (8), 1839-1843, 2002.
27. Hocde, S., Jiang S., Peng, X., Peyghambarian, N., Luo, T., and Morrell, M., Er^{3+} -doped boro-tellurite glasses for 1.5 μm broadband amplification, *Optical Materials*, 25, 149-156, 2004.

28. Chung, W. J., Jha, A., Shen, S., and Joshi, P., The effect of Er^{3+} -ion concentration on the Er^{3+} : $^4\text{I}_{13/2}$ - $^4\text{I}_{15/2}$ transition in tellurite glasses, *Philosophical Magazine*, 84 (12), 1197-1207, 2004.
29. Barbero, A. P. L., Espinoza, W. A. A., Fragnito, H. L., and Figueroa, H. E. H., Tellurite-based optical fiber amplifier analysis using the finite-element method, *Microwave and Optical Technology Letters*, 25 (2), 103-107, 2000.
30. Yang, J., Zhang, L., wen, L., Dai, S., Hu, L., and Jiang Z., Comperative investigation on energy transfer mechanism between Er^{3+} and Ce^{3+} (Eu^{3+} , Tb^{3+}) in tellurite glasses, *Chemical Physics Letters*, 384, 295-298, 2004.
31. Shih, P. Y., Thermal, chemical and structural characteristic of erbium-doped sodium phosphate glasses, *Materials Chemistry and Physics*, 84, 151-156, 2004.
32. Schweizer, T., Brady, D. J., and Hewak, D. W., Fabrication and Spectroscopy of erbium doped gallium lanthanum sulphide glass fibers for mid-infrared laser applications, *Optics Express*, 1(4), 102-107, 1997.
33. Tanabe, S., Rare-earth doped glasses for fiber amplifiers in broadband telecommunication, *C. R. Chimie*, 5, 815-824, 2002.
34. Zhu, L., Ma, Y., Wang, G., Xia, L., and Xie S., General computer model for both Erbium-doped fiber amplifier and fiber Raman amplifier, *Opt. Eng.*, 41 (8), 1805-1808, 2002.
35. Zhang, X., and Mitchell, A., A simple black box model for erbium-doped fiber amplifiers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 10 (1), 28-30, 2000.
36. Jarabo, S., Analytical theoretical model of erbium-doped fibre amplifiers, *Optics Communications*, 181, 303-311, 2000.
37. Hsu, S., Liang T. C., and Chen, Y. K., Optimal design of optically gain-clamped L-band erbium-doped fiber amplifier, *Optics Communications*, 196, 149-157, 2001.
38. Jie, L., and Pelda, Y., High-concentration erbium-doped fiber for efficient L-band EDFA, *Microwave and Optical Technology Letters*, 27 (1), 60-61, 2000.
39. Barnard, C., Myslinski, P., Chrostowskii, J., and Kavehrad, M., Analytical model for rera-earth-doped fiber amplifiers and lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 30 (8), 1817-1830, 1994.
40. Roudas, I., Richards, D. H., Antoniadis, N., Jackel, J. L., and Wagner, R. E., An efficient simulation model of the erbium-doped fiber for the study of multiwavelength optical networks, *Optical Fiber Technology*, 5, 363-389, 1999.

41. Martin, J. C., Erbium transversal distribution influence on the effectiveness of a doped fiber: optimization of its performance, *Optics Communications*, 194, 331-339, 2001.
42. Jain, S. G., and Sharma, E. K., Gain calculations in erbium-doped fibers using field approximations, *Microwave and Optical Technology Letters*, 29 (4), 256-259, 2001.
43. Novak, S., Moesle, A., Analytic model for gain modulation in EDFAs, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 20 (6), 975-985, 2002.
44. Cheng, C., Xu, Z., and Sui, C., A novel design method: a genetic algorithm applied to an erbium-doped fiber amplifier, *Optics Communications*, 227, 371-382, 2003.
45. Cheng, C., a global design of an erbium-doped fiber and an erbium-doped fiber amplifier, *Optics and Laser Technology*, 36 (8), 607-612, 2004.
46. Wei, H., Tong, Z., and Jian, S., Use of a genetic algorithm to optimize multistage erbium-doped fiber amplifier system with complex structures, *Optics Express*, 12 (4), 531-544, 2004.
47. Ohishi, Y., Kanamori, T., Kitagawa, T., and Takahashi, S., Pr^{3+} -doped Fluoride Fiber Amplifier Operating at 1,31 μm , *Optics Letters*, 16 (22), 1747-1749, 1991.
48. Pedersen, B., Miniscalco, W. J., Quimby, R. S., Optimization of Pr^{3+} : ZBLAN Fiber Amplifiers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 4 (2), 446-448, 1992.
49. Percival, R. M., Phillips, M. W., Hanna, D. C., and Tropper, A. C., Characterization of spontaneous and stimulated emission from praseodymium (Pr^{3+}) ions doped into a silica-based monomode optical fiber, *IEEE J. Quantum Electronics*, 25 (10), 2119-2123, 1989.
50. Sugava, T., Miyajima, Y., Gain and output-saturation limit evaluation in Pr^{3+} -doped fluoride fiber amplifier operating in the 1.3 μm band, *IEEE Photonics Technology Letters*, 3 (7), 616-618, 1991.
51. Ohishi, Y., Kanamori, T., Takahashi, S., Pr^{3+} -doped fluoride single-mode fiber laser, *IEEE Photonics Technology Letters*, 3 (8), 688-690, 1991.
52. Ohishi, Y., Kanamori, T., Nishi, T., Takahashi, S. and Snitzer, E., Gain characteristics of Pr^{3+} - Yb^{3+} codoped fluoride fiber for 1.3 μm amplification, *IEEE Transactions Photonics Technology letters*, 3 (11), 990-992, 1991.
53. Tomita, N., Kimura, K., Suda, H., Shimizu, M., Yamada, M., Ohishi, Y., Digital signal transmission experiment using a 1.3 μm -band Pr^{3+} -doped fluoride fiber amplifier, *IEEE Photonics Technology Letters*, 6 (2), 258-259, 1994.

54. Babu, P., Jayasankar, C. K., Spectroscopy of Pr^{3+} ions in lithium borate and lithium fluoroborate glasses, *Physica B* 301, 326-340, 2001.
55. Itoh, K., Yanagita, H., Tawarayama, H., Yamanaka, K., Ishikawa, E., Okada, K., Aoki, H., Matsumoto, Y., Shirakawa, A., Matsuoka, Y., Toratani, H., Pr^{3+} doped $\text{InF}_3/\text{GaF}_3$ based fluoride glass fibers and GaNaS glass fibers for light amplification around 1.3 μm , *Journal of Non-Crystalline Solids*, 256 (257), 1-5, 1999.
56. Nishida, Y., Kanamori, T., Sakamoto, T., Ohishi, Y., Sudo, S., Development of PbF_2 - GaF_3 - InF_3 - ZnF_2 - YF_3 - LaF_3 glass for use as a 1.3 μm -band Pr^{3+} -doped fluoride fiber amplifier host, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 221, 238-244, 1997.
57. Krasteva, V., Machewirth, D., Jr. Sigel, G. H., Pr^{3+} -doped Ge-S-I glasses as candidate materials for 1.3 μm optical fiber amplifiers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 213 (214), 304-310, 1997.
58. Araujo, M.T., Medeiros Neto, J.A., Sombra, A. S. B., Oliveira, A. S., Gouveia-Neto, A. S., Multiwavelength frequency-doubling in bulk gallium-lanthanum-sulphide glasses for optical fiber amplifiers at 1.3 μm , *Optical Materials* 7, 1-7, 1997.
59. Peter, D. S., Hodel, W., and Weber, H. P., Efficient distortion-free amplification of 1.3 μm femtosecond pulses in a Pr^{3+} -doped fluoride fiber amplifier, *Optics Communications*, 130 (1-3), 75-80, 1996.
60. Sharonov, M. Yu., Zhmurova, Z. I., Krivandina, E. A., Bystrova, A. A., Buchinskaya I. I., and Sobolev, B. P., Improved by Yb^{3+} sensitizer fluorite crystals, doped with Pr^{3+} for 1.3 μm optical amplifiers, *Optics Communications*, 124 (5-6), 595-601, 1996.
61. Jha, A., Jordery, S., and Naftaly, M., A review of optical and thermal properties of cadmium-mixed halide glass host for the 1.3 μm Pr^{3+} -doped amplifier, *Journal of Non-Crystalline Solids* 196, 199-203, 1996.
62. Seeber, W., Downing, E. A., Hesselink, L., Fejer M. M., and Ehrt, D., Pr^{3+} -doped fluoride glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 189 (3), 218-226, 1995.
63. Fleming, S. C., Accurate Analytic Expressions for Gain in a Pr^{3+} :ZBLAN Fiber Amplifier Using Modified Gaussian Field Functions, *IEEE J. Quantum Electron.*, 30 (2), 280-283, 1994.
64. Kikushima, K., Yamada, M., Shimizu M., and Temmyo, J., Distortion and Noise Properties of a Praseodymium-Doped Fluoride Fiber Amplifier in 1.3 μm AM-SCM Video Transmission Systems, *IEEE Photonics Technology Letters*, 6 (8), 440-442, 1994.

65. Ohishi, Y., Kanamori, T., Terunuma, Y., Shimizu, M., Yamada, M., and Sudo, S., Investigation of Efficient Pump Scheme for Pr^{3+} -Doped Fluoride Fiber Amplifiers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 6 (2), 195-198, 1994.
66. Hewak, D. W., Medeiros Neto, J. A., Samson, B., Brown, R. S., Jedrzejewski, K. P., Wang J., Taylor, E., Laming, R. I., Wylangowski, G., and Payne D. N., Quantum-Efficiency of Praseodymium Doped Ga-La-S Glass for 1.3 μm Optical Fiber Amplifiers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 6 (5), 609-612, 1994.
67. Ohishi, Y., Yamada, M., Mori, A., Kanamori, T., Shimizu, M., and Sudo, S., Effect of temperature on amplification characteristics of Pr^{3+} -doped fiber amplifiers, *Optics Letters*, 20 (4), 383-385, 1995.
68. Simons, D. R., Faber, A. I., and de Waal, H., Pr^{3+} -doped GeS_x -based glasses for fiber amplifiers at 1.3 μm , *Optics Letters*, 20 (5), 468-470, 1995.
69. Fleming S. C., Crosstalk in 1.3 μm Praseodymium Fluoride Fiber Amplifiers, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 14 (1), 66-71, 1996.
70. Ohishi, Y., Yamada, M., Kanamori, T., Terunuma, Y., and Sudo, S., Analysis of Gain Characteristics of Bi-Directionally Pumped Praseodymium-Doped Fiber Amplifiers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 8 (4), 512-514, 1996.
71. Samson, B. N., Schweizer T., Hewak, D. W., and Laming R. I., Properties of dysprosium-doped gallium lanthanum sulfide fiber amplifiers operating at 1.3 μm , *Optics Letters*, 22 (10), 703-705, 1997.
72. Choi, Y. G., and Heo, J., 1.3 μm Emission and Multiphonon Relaxation Phenomena in $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Glasses Doped with Rare-Earths, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 217, 199-207, 1997.
73. Krzykowski, A., Furmann, B., Stefanska, D., Jarosz, A., Kajoch, A., Hyperfine structures in the configuration $4f^3 5d6s$ of the praseodymium atom, *Optics Communications*, 140, 216-219, 1997.
74. Isshiki, K., Kuze, Y., Kubota, M., Yamaguchi, S., Nakaoka, M., Watanabe, H., Kasahara, K., Reliable 1.01- μm Band Laser Diode Pumped Praseodymium-Doped In/Ga-Based Fluoride Fiber Amplifiers at 1.3 μm , *IEEE J. Lightwave Technol.*, 16 (12), 2373-2377, 1998.
75. Petreski, B. P., Farrell, P. M., Collins S. F., Optical Amplification on the $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{P}_2$ transition in Praseodymium-doped Fluorozirconate Fiber, *Fiber and Integrated Optics*, 18, 21-32, 1999.

76. Schimmel, R. C., Faber, A. J., de Waardt, H., Beerkens, R. G. C., Khoe, G. D., Development of germanium gallium sulphide glass fibres for the 1.31 μm praseodymium-doped fiber amplifier, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 284, 188-192, 2001.
77. Ohishi, Y., Mori, A., Kanamori, T., Fujiura, K., and Sudo, S., Fabrication of praseodymium-doped arsenic sulfide chalcogenide fiber for 1.3 μm fiber amplifiers, *Applied Physics Letters*, 65 (1), 13-15, 1994.
78. Osch, A. W. H., Modelling of praseodymium-doped fluoride fibre and sulfide fibre amplifiers for the 1.3 μm wavelength region, EUT Report, 95-E-294, 1995.
79. Jha, A., Naftaly, M., Jordery, S., Samson, B. N., Taylor, E. R., Hewak, D., Payne, D. N., Poulain, M., and Zhang, G., Design and fabrication of Pr^{3+} -doped fluoride glass optical fibres for efficient 1.3 μm amplifiers, *Pure Appl. Opt.*, 4, 417-424, 1995.
80. Karasek, M., Analysis of a tunable Pr^{3+} -doped fluoride fibre ring laser, *Pure Appl. Opt.*, 7, 61-69, 1998.
81. Kanamori, T., Terunuma, Y., Fujiura, K., Ohishi, K., Sudo, S., Fabrication of low-loss high- Δn , Pr^{3+} -doped fluoride single-mode fiber for 1.3 μm optical amplifiers, *Proceedings of 9th International Symposium on Non-oxide Glasses*, 74-79, 1994.
82. Valles, J. A., Hotoleanu, M., Babota, R., and Voiculescu, E., Modelling of the temporal response of Pr^{3+} -doped fluoride fibre amplifiers, *Pure and Applied Optics*, 6, 9659-9697, 1997.
83. Hector, J. R., Hewak, D. W., Wang, J., Moore, R. C., and Brocklesby, W. S., Quantum efficiency measurements in oxygen containing gallium lanthanum sulfide glasses and fibers doped with Pr^{3+} , *IEEE Photonics Technology Letters*, 9, 443-445, 1997.
84. Shaw, L. B., Harbison, B. B., Cole, B., Sanghera, J. S., and Aggarwal, I. D., Spectroscopy of the IR transitions in Pr^{3+} doped heavy metal selenide glasses, *Optics Express*, 1 (4), 87-96, 1997.
85. Choi, Y. G., Je Park, B., Kim, K. H., and Heo, J., Pr^{3+} -and $\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -Doped Selenide Glasses for Potential 1.6 μm Optical Amplifier Materials, *ETRI Journal*, 23 (3), 97-105, 2001.
86. Mortensen, P., NTT extend praseodymium fiber amplifier into two stages, *News Magazine: Lightwave* 12 (7), 1-8, 1995.

87. Shimizu, M., Yamada, M., Kanamori, T., Ohishi, Y., Terunuma, Y., Sudo, S., Yoshinaga, T., and Miyamoto, Y., High-power, low-noise praseodymium-doped fluoride-fiber amplifiers, *Proc. Opt. Fiber Commun.*, 8, 110-111, 1995.
88. Achtenhagen, M., Beeson, R. J., Pan, F., Nyman, B., Hardy, A., Gain and Noise in Ytterbium-Sensitized Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Measurements and Simulations, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 19 (10), 1521-1526, 2001.
89. Haiyan, C., and Yongzhi, L., Design of Er-Yb co-doped phosphate glass waveguide amplifiers integrated with multilayer medium thin film filter, *Proc. of SPIE*, 5623, 426-431, 2005.
90. Limpert, J., Liem, A., Reich, M., Schreiber, T., Nolte, S., Zellmer, H., Tünnermann, A., Broeng, J., Petersson, A., Lakobsen, C., Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier, *Optics Express*, 12 (7), 1313-1319, 2005.
91. Shirakawa, A., Ota, J., Musha, M., Nakagawa, K., and Ueda, K., Large-mode area erbium-ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier for high-energy femtosecond pulses at 1.55 μm , *Optics Express*, 13 (4), 1221-1227, 2005.
92. Berg, T. W., Mork, J., Hvam, J. M., Gain dynamics and saturation in semiconductor quantum dot amplifiers, *New Journal of Physics*, 6 (178), 1-23, 2004.
93. Lee, H. H., Lee, D., Oh, J. M., Han, J., Chung, H. S., Kim, K., Lee, G. W., Lee, J. S., Yoon, I. K., and Hwang, S. T., An optical amplifier for metro WDM networks, based on a gain clamped semiconductor optical amplifier, *Proc. of SPIE*, 5623, 418-425, 2005.
94. Huang, L., A novel gain-shifted high-concentration Tm^{3+} - Yb^{3+} -codoped tellurite fiber amplifier using 980 nm pumping, *Proc. of SPIE*, 5623, 407-410, 2005.
95. Urquhart, P., Review of rare earth doped fibre lasers and amplifiers, *IEE Proceedings*, 135 (6), 385-407, 1988.
96. Yamada, M., Ona, H., Kanamori, T., Sudo, S., Broadband and gain-flattened amplifier composed of a 1.55 μm -band and a 1.58 μm -band Er^{3+} -doped fiber amplifier in a parallel configuration, *Electronics Letters*, 33 (8), 710-711, 1997.
97. Tanabe, S., Sugimoto, N., Ito, S., Hanada, T., Broad-band 1.5 μm emission of Er^{3+} -ions in bismuth-based oxide glasses for potential WDM amplifier, *Journal of Luminescence*, 87-89, 670-672, 2000.

98. Yamashita, T., Sawada, H., Yoshida, M., Imamura, K., Imada, Y., high efficiency amplification of EDFA using a pump wavelength of the 1.53 μm region, ECOC 2000 Proceedings, 12 117-119, 2000.
99. Kozak, M., M., Caspary, R., Unrau, U. B., Computar Aided EDFA design, Simulation and Optimization, ICTON 2001, We.B.2, 202-205, 2001.
100. Jiang, C., Hu, W., Zeng, Q., Xiao, S., novel split-band erbium-doped fiber amplifier, Optics & Laser Technology, 35, 251-256, 2003.
101. Koester, C. J., Snitzer, E. A., Appl. Opt. 3. 1182, 1964.
102. Mears, R. H., Reeike, L., Jauncey, I. M., Payne, D. N., Electron. Lett. 23, 1026, 1987.
103. Nakazawa, M., Kimura, Y., Suzuki, K., Appl. Phys. Lett., 54, 295, 1989.
104. Morin, V., Taufflieb, E., and Clarke, I., +20 dB praseodymium doped fiber amplifier single-pumped at 1030 μm , Vol. 16, Optical Amplifiers and their Applications, OSA, Washington, DC, 1997, p. 104-107.
105. Reisfeld, R., and Jorgensen, C. K., Excited-state phenomena in vitreous materials, in Handbook on the Physics and Chemistry of Rare-earths, edited by K. A. Gschneider and L. Eyring editors, Elsevier Science Publishers, 1987.
106. Layne, C.B., Lowdermik, W. H., and Weber, M. J., Nonradiative relaxation of rare earth ions in silicate laser glass, IEEE J. Quantum Electron., 11, 798-801, 1975.
107. Haixing Z., and Fuxi, G., Investigation of glasses doped with Er^{3+} ions used as laser materials, Chines Physics, 6 (4), 978, 1986.
108. Yariv, A., Optical Electronics, s. 226, Fourth Edition, Holt, Rinehart and Winston, INC., 1991.
109. Shimodo, K., Introduction to laser Physics, s. 85-87, 93-97, Springer-Verlag, Berlin, 2nd, 1986.
110. Aygün, E., Zengin, D. M., Atom Molekül Fiziği, s. 92-95, Bizim Büro Basımevi, Ankara, 1992.
111. Berkdemir, C., Erbiyum-Katkılı Tek-Modlu Fiberlerde Optik Kuvvetlendirme Olayının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ağustos, 2001.
112. Wilson, J., Hawkes, J. F. B., Lasers Principle and Applications, s. 9-11, 13-21, Prentice Hall, London, 1987.
113. Luxon, J. T., Parker, D. E., Industrial Lasers and Their Applications, s. 88-90, 92-93, Prentice Hall, London, 1984.
114. Snitzer, E., Laser and glass technology, Ceramic Bulletin, 52 (6), 516-519, 1973.

115. Desurvire, E., and Simpson, J. R., Evaluation of $^4I_{15/2}$ and $^4I_{13/2}$ Stark-level energies in erbium-doped aluminosilicate glass fiber, *Optics Letters*, 15 (10), 547-549, 1990.
116. Desurvire, E., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers; Principles and Application*, s. 215, John Willey & Sons, INC, New York, 1994.
117. Desurvire, E., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers; device and System Developments*, Chapter 1, John Willey & Sons, INC, Publication, New York, 2002.
118. Yariv, A., *Quantum Electronics*, s. 220, Third Edition, John Wiley, New York, 1988.
119. Iizuka, Keigo, *Elements of Photonics, Volume II: For Fiber and Integrated Optics*, s. 833-892, John Wiley and Sons, INC., New York, 2002.
120. Nakagawa, K., Nishi, S., Aida, K., Yoneda, E., Trunk and Distribution Network Application of Erbium-Doped Fiber Amplifier, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 9 (2), 198-208, 1991.
121. Berkdemir, C., and Özsoy, S., The Effect of Boltzmann Factor on The Performance of EDFAs whit respect to Pumping Wavelength, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (1-2), 2004.
122. Tanabe, S., Optical transitions of rare earth ions for amplifiers: how the local structure works in glass, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 259, 1-9, 1999.
123. Man, S. Q., Pun, E. Y. B., Chung, P. S., Tellurite glasses for 1.3 μm optical amplifiers, *Optics Communications*, 168, 369-373, 1999.
124. Salzner, U., Theoretical analysis of Poly (difluoroacetylene) PDFA, *Synthetic Metals*, 135 (136), 311-312, 2003.
125. Genova, R. T., Martin, I. R., Rodriguez-Mendoza, U. R., Lahoz, F., Lozano-Gorrin, A. D., Nunez, P., Gonzalez-Platas, J., Lavin, V., Optical intensities of Pr^{3+} ions transparent oxyfluoride glass and glass-ceramic. Applications of the standard and modified Judd-Ofelt theories, *Journal of Alloys and Compounds*, 380, 167-172, 2004.
126. Srivastava, P., Rai, S. B., Rai, D. K., Effect of lead oxide on optical properties of Pr^{3+} doped some borate based glasses, *Journal of Alloys and Compounds*, 368, 1-7, 2004.
127. Ohashi, H., Hachiya, K., Yoshida, K., Yasuda, M., Kondoh, J., Photoluminescence properties in Pr^{3+} -doped chalcogenide glass, *Journal of Alloys and Compounds*, 373, 1-8, 2004.
128. Ishii, T., Fujimura, K., Sato, K., Brik, M. G., Ogasawara, K., First-principle analysis method for the f-d transitions of heavy metal ions, *Journal of Alloys and Compounds*, 374, 18-21, 2004.

129. Guzik, M., Aitasalo, T., Szuszkiewicz, W., Hölsa, J., Keller, B., Legendziewicz, J., Optical spectroscopy of yttrium double phosphates doped by cerium and praseodymium ions, *Journal of Alloys and Compounds*, 380, 368-375, 2004.
130. Ximing, H., Jiacheng, Z., Chuqing, G., Pilot study of organic and inorganic nanocomposite optical fibre materials, *Materials Letters*, 58, 1189-1193, 2004.
131. Peroni, M., and Tamburrini, M., Gain in erbium-doped fiber amplifiers: a simple analytical solution for the rate equations, *Optics Letters*, 15, 842-844, 1990.
132. Mao, Q., Wang, J., Sun, X., Zhang, M., A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifier with single erbium-doped fiber, *Optics Communications*, 159, 149-157, 1999.
133. Suyama, M., Laming, R. I., and Payne, D. N., Temperature variation of gain in a 1480 nm-pumped erbium-doped fiber amplifier, *Proc. Optical Amplifiers and Their Applications*, Monterey, 1990, WD3.
134. Kagi, N., Oyobe, A., and Nakamura, K., Temperature dependence of the Gain in Erbium-Doped Fibers, *IEEE J. Lightwave Technol.* 9 (2), 261-265, 1991.
135. Berkdemir, C., and Özsoy, S., Üç ve Dört Seviyeli Nadir-Toprak Katkılı Optik Fiber Kuvvetlendiricilerde Sinyal Kazancının Boltzmann Faktörü ile Sıcaklığa Bağlanması, *Türk Fizik Derneği (TFD), 22. Fizik Kongresi, Bodrum-Türkiye, 14-17 Eylül 2004*.
136. Berkdemir, C., and Özsoy, S., An investigation of the temperature dependence of the relative population inversion and the gain in EDFAs by the modified rate equations, in press, *Optics Communications*, 2005.
137. Jhat, A., Naftalyt, M., Jorderyt, S., Samson, B. N., Taylor, E. R., Hewakl, D., Paynex, D., Poulain, N. M. and Zhangs, G., Design and fabrication of Pr³⁺-doped fluoride glass optical fibres for efficient 1.3 μ m amplifiers, *Pure Appl. Opt.* 4, 417-424, 1995.
138. OptiAmplifier Version 4.0, *Optical Fiber Amplifier and Laser Design Software*, Copyright©2002, Optiwave Corporation, 2002.
139. Becker, P. C., Olsson, N. A., and Simpson, J. R., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers; Fundamentals and Technology*, s. 131-152, 169-178, Academic Press, San Diego, CA, USA, 1999.
140. Bjarklev, A., Rasmussen, T., Povlsen, H., Lumholt, O., Rottwitt, K., Dahl-Petersen, S., Larsen, C. C., 9 dB gain improvement of 1300 nm optical amplifier by amplified spontaneous emission suppressing fibre design, *Electron letters*, 27, 1701-1702, 1991.

141. Tosca, F., Fiber Optic Communication Handbook, s. 1066-1072, McGraw-Hill, Inc. Torino, Italy, 1990.
142. Jeunhomme, L., Single-Mode Fibre Optics: Principle and Applications, s. 1-5, 9-17, Marcel Dekker, New York, 2nd, 1990.
143. Ungar, S., (Trans. J. C. C. Nelson), Fibre Optics: Theory and Applications, s. 37-42, John Wiley & Sons, New York, 1990.
144. Özsoy, S., Fiber Optik, s. 22-23, 34-44, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
145. Saleh, B. E. A., and Teich, M. C., Fundamentals of Photonics, s. 789-815, John Wiley & Sons, New York, 1991.
146. McCumber, D. E., Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra, Physical Review, 136 (A4), A954-A957, 1964.
147. Zech, H., Measurement technique for the quotient of cross sections $\sigma_{2l}(\lambda_s)/\sigma_{2l}(\lambda_s)$ of erbium-doped fibers, IEEE Photon. Technol. Lett., 7, 986-988, 1995.
148. Miniscalco, W. J., and Quimby, R. S., General procedure for the analysis of Er^{3+} cross sections, Optics Letters, 16 (4), 258-260, 1991.
149. Barnes, W. L., Laming, R. I., Tarbox, E., J., and Morkel, P. R., Absorption and Emission Cross Section of Er^{3+} Doped Silica Fibers, IEEE J. Quantum Electron., 27 (4), 1004-1010, 1991.
150. Desurvire, E., Spectral Noise Figure of Er^{3+} -doped Fiber Amplifiers, IEEE Photon. Technol. Lett., 2 (3), 208-210, 1990.
151. Giles, C. R., and Desurvire, E., Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers, Journal of Lightwave Technology, 9 (2), 147-154, 1991.
152. M. Movassagi and M. K. Jackson, Design and Compact Modeling of Saturated Erbium-Doped Fiber Amplifiers with Nonconfined Doping, Optical Fiber Technology, 7, pp.312-323, 2001.
153. B-H. Choi, H-H. Park and M-J. Chu, New pump wavelength of 1540-nm band for long-wavelength-band erbium-doped fiber amplifier (L-band EDFA), IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.39, No. 10, pp. 1272-1280, 2003.
154. Yu, Q., and Fa, C., Simple Dynamic Model of All-Optical Gain-Clamped Erbium-doped Fiber Amplifiers, Journal of Lightwave Technology, 17 (7), 1166-1171, 1999.

155. Kemtchou, J., Duhamel, M., and Lecoy, P., Gain Temperature Dependence of Erbium-doped Silica and Fluoride Fiber Amplifiers in Multichannel wavelength-Multiplexed Transmission Systems, *Journal of Lightwave Technology*, 15 (11), 2083-2090, 1997.
156. Tomkos, I., Rhee, J. K., Hesse, R., arma, M., Lelic, M., and Kellogg, G., Impact from the use of Erbium-doped Fiber Amplifiers with Transient Gain Control on The Performance of Optical Networks, *National Fiber Optic Engineers Conference*, 2002 Technical Proceedings, 1264-1275, 2002.
157. Cucinotta, A., Poli, F., and Selleri, S., Design og Erbium-doped Triangular Photonic-Crystal-Fiber-Based Amplifiers, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16 (9), 2027-2029, 2004.
158. Veng, T., and Palsdottir, Erbium-doped Fiber Design for Improved splicing Performance, *Proc. of SPIE*, 5623, 438-446, 2005.
159. Wang, B. S., Puc, G., and Andrejco, M., Novel Erbium Doped Fiber for High Power Applications, *Proc. of SPIE*, 5623, 411-417, 2005.
160. Nusinsky, I., and Hardy, A., Analysis of the Effect of Upconversion on Signal Amplification in Erbium-doped Fiber Amplifiers (EDFAs), *IEEE J. Quantum Electron.*, 39 (4), 548-554, 2003.
161. Cucinotta, A., Poli, F., and Selleri, S., and Zoboli, M., Amplification Properties of Er^{3+} -Doped Photonic Crystal Fibers, *Journal of Lightwave Technology*, 21 (3), 782-788, 2003.
162. Prudenazno, F., Erbium-Doped hole-Assisted Optical fiber Amplifier: Design and Optimization, *Journal of Lightwave Technology*, 23 (1), 330-340, 2005.
163. Desurvire, E., Giles, C. R., Gain Saturation Effects in High-Speed, Multichannel erbium-doped Fiber Amplifiers at $\lambda = 1,53 \mu\text{m}$, *Journal of Lightwave Technology*, 7 (12), 2095-2104, 1989.
164. Desurvire, E., Sulhoff, J. W., Zyskind, J. L., Simpson, J. R., Study of Spectral dependence og Gain Saturation and Effect of Inhomogeneous Broadening in Erbium-doped Aluminosilicate Fiber Amplifiers, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2 (9), 653-655, 1990.
165. Zemon, S., Pedersen, B., Lambert, G., Miniscalco, W. J., Andrews, L. J., Davies, R. W., and Wei, T., Excited-State Absorption Cross Sections in the 800-nm Band for Er-Doped, Al/P-silica Fibers: Measurements and Amplifier Modeling, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 3 (7), 621-624, 1991.
166. Nissov, M., extention of Semi-analytical Erbium-doped Fiber Amplifier model to Self-Saturated Regime, *Optical Fiber Technology*, 3, 134-141, 1997.

167. Horowitz, M., Menyuk, C. R., and Keren, S., Modeling the Saturation Induced by Broad-Band Pulses Amplified in an Erbium-Doped Fiber Amplifier, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11 (10), 1235-1237, 1999.
168. Ruzicka, W. R., Dal Forno, A. O., Passy, R., Xavier de Borros, M. R., and von der Weid, J. P., Distributed Gain and Spectral Gain-Saturation effect in Erbium Doped Fibers, *SBMO/IEEE MTT-S IMOC'99 Proceedings*, 290-293, 1999.
169. Movassaghi, m., and Jackson, M. K., Design and Compact Modeling of Saturated Erbium-Doped Fiber Amplifiers with Nonconfined Doping, *Optical Fiber Technology*, 7, 312-323, 2001.
170. Farris, M. C., Excited-State Absorption and Gain in Erbium-doped Amplifiers between 1.05 and 1.35 μm , *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 3 (7), 619-620, 1991.
171. Berkdemir, C., and Özsoy, S., A Novel Approach for the Temperature Dependence of the Saturated Signal Power in EDFAs, in press, *Optical and Quantum Electronics*, 2005.
172. Lin, M. C., and Chi, S., The Gain and Optimal Length in the Erbium-Doped Fiber Amplifiers with 1480 nm Pumping, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 4 (4), 354-356, 1992.
173. Saleh, A. A. M., Jopson, R. M., Evankow, J. D., and Aspell, J., Modeling of Gain in Erbium-Doped Fiber Amplifiers, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2 (10), 714-717, 1990.
174. Pfeiffer, Th., Bülow, H., Analytical Gain Equation for Erbium- Doped Fiber Amplifiers Including mode Field Profiles and Dopant Distribution, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 4 (5), 449-451, 1992.
175. Rühl, F. F., Accurate analytical formulas for Gain-Optimised EDFAs, *Electronics Letters*, 28 (3), 1992.
176. Schimmel, R. C., Sluis, H. J. D., Jonker, R. J. W., and Waardt, H. De, Characterisation and modelling o praseodymium doped fiber amplifiers, in *Proc. of the IEEE/LEOS Benelux*, chapter 2001, Brussels, Belgium, 2001.
177. Jonker, R. J. W., Schimmel, R. C. and Waardt, H. De, Experimental assessment of a Praseodymium Doped fiber Amplifier (PDFA) for amplifier application in the second telecommunication window, *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux*, Chapter 2001, Brussels, Belgium, 2001.
178. Sun, Y., Srivastava, A. K., Zhou, J., and Sulhoff, J. W., Optical Fiber Amplifiers for WDM Optical Networks, *Bell Labs. Technical Journal*, January-March, 187-206, 1999.
179. Huang, C. H., McCaughan, L., and Gill, D. G., Evaluation of Absorption and Emission Cross Sections of Er-Doped LiNbO_3 for Application to Integrated Optic Amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 12 (5), 803-809, 1994.

180. Pedersen, B., Bjarklev, A., Povlsen, J. H., Dybdal, K., Larsen, C. C., The Design of Erbium-doped Fiber Amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 9 (9), 1105-1112, 1991.
181. Dung, J. G., Chi, S., Chen, C. C., Characteristics of the erbium doped fiber amplifier with polarization mode dispersion compensation, *Optics Communications*, 222, 207-212, 2003.
182. Thyagarajan, K., Kaur, J., A novel design of an intrinsically gain flattened erbium doped fiber, *Optics Communications*, 183, 407-413, 2000.
183. Martin, J. C., Rebolledo, M. A., and Alvarez, J. M., Agreement between Experimental and Theoretical Gain and ASE of an Erbium-Doped Fiber Characterized by Dynamic Technique, *Fiber and Integrated Optics*, 20, 257-268, 2001.
184. Ohishi, Y., Yamada, M., Kanamori, T., and Sudo, S., Low-noise operation of fluoride-based erbium-doped fiber amplifiers with $^4I_{11/2}$ -level pumping, *Optics Letters*, 22 (16), 1235-1237, 1997.
185. Habbab, I. M., Saleh, A. A. M., and Runge, P. K., Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Linear Approximation, *Journal of Lightwave Technology*, 13 (1), 33-36, 1995.
186. Wiederhecker, G. S., Rieznik, A. A., and Fragnito, H. L., Experimental validation of a black box model for L-band erbium doped fiber amplifiers, *Optics-XXV ENFMC ANNALS-2002*.
187. Desurvire, E., Zyskind, J. L., Giles, C. R., Design optimization for efficient erbium-doped fiber amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 8 (11), 1730-1741, 1990.
188. Marcuse, D., Gaussian approximation of the fundamental models of graded-index fibers, *Journal of Optical Society of America*, 68 (1), 103-109, 1978.
189. Ohashi, M., Design Consideration for an Er^{3+} -doped Fiber Amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 9 (9), 1099-1104, 1991.
190. Vengsarkar, A. M., DiGiovanni, D. J., Reed, W. A., Quoi, K. W., and Walker, K. L., Measurement of erbium confinement in optical fibers: a differential mode-launching technique, *Optics Letters*, 17 (18), 1277-1279, 1992.
191. Ankiewicz, A., and Peng, G. D., Generalized Gaussian Approximation For Single-mode Fibers, *Journal of Lightwave Technology*, 10 (1), 22-27, 1992.
192. Gallawa, R. L., Goyal, I. C., and Ghatak, A. K., Fiber Spot Size: A Simple Method of Calculation, *Journal of Lightwave Technology*, 11 (2), 192-197, 1993.

193. Berkdemir, C., and Özsoy, S., The temperature dependent performance analysis of EDFAs pumped at 1480 nm: A more accurate propagation equation, *Optics Express*, 13 (13), 5179-5185, 2005.
194. Liu, C. K., Jou, J. J., and Lai, F. S., Second-Order harmonic Distortion and Optimal Fiber Length in Erbium-doped Fiber Amplifiers, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 7 (12), 1412-1414, 1995.
195. Berkdemir, C., and Özsoy, S., Modelling of the Energy Levels of Praseodymium Ion Doped to Glass Hosts for a Practical Fiber Amplifier, submitted to *Optics Express*, 2005.
196. Whitley, T., A review of recent system demonstrations incorporating 1.3- μm praseodymium-doped fluoride fiber amplifiers, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 13, 744-760, 1995.
197. Berkdemir, C., and Özsoy, S., Modeling and Simulation of Er^{3+} - Yb^{3+} -Codoped Fibers for High-Power Optical Amplifiers, submitted to *Journal of Physics: Conference Series*, 2005.
198. Berkdemir, C., and Özsoy, S., Optimum Şartlarda Çalışan Erbiyum (Er^{3+}) Katkılı Fiber Kuvvetlendiricilerin Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi, 6. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 9-10 Aralık 2004.
199. Berkdemir, C., and Özsoy, S., Yb^{3+} (İterbiyum) ile Hassaslaştırılmış Er^{3+} (Erbiyum)-Katkılı Fiber Kuvvetlendiricilerin Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi, 2. URSI-Türkiye 2004 Bilimsel Kongresi, Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 8-10 Eylül 2004.
200. Berkdemir, C., and Özsoy, S., Modeling and Simulation of Er^{3+} - Yb^{3+} -Codoped Fibers for High-Power Optical Amplifiers, 12th Central European Workshop On Quantum Optics-CEWQO 2005, Bilkent University, Ankara, Turkey, 6-9 June 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Adı : Cüneyt
Soyadı : BERKDEMİR
Doğum yeri : KAYSERİ
Doğum tarihi : 01-12-1976

İlk, orta ve lise öğrenimini Kayseri’de tamamladı. Yüksek öğrenimini Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde tamamlayarak 1999 yılında mezun oldu. 1999 yılında Erciyes Üniversitesi Fen-Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans programına ve aynı üniversitede 2001 yılında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2001 yılında, “Erbium-Katkılı Tek-Modlu Fiberlerde Optik Kuvvetlendirme Olayının İncelenmesi” başlıklı çalışmasını sunarak Yüksek Lisansını tamamladı. 2001 yılında Erciyes Üniversitesi Fen-Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora programına başladı. Optics Express, Optics Communications ve Optical and Quantum Electronics dergilerinde birer adet makalesi yayınlandı. Optics Express ve Journal of Physics: Conference Series dergilerinde incelemede olan birer adet makalesi vardır. Union Radio Science Internationale Türkiye Ulusal Komitesi II. URSI-Türkiye 2004 Bilimsel Kongresinde, Türk Fizik Derneğinde (TFD22) ve 6. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısında birer adet ulusal ve 12th Central European Workshop on Quantum Optics konferansında bir adet uluslararası tebliğ sundu.

Adres : MimarSinan Mah. Tuna Cad. No:27/14 38020 Kocasinan / KAYSERİ
Telefon : 0352-2359133
E-mail : berkdemir@erciyes.edu.tr