
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÇOK GEÇİŞLİ ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTECİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI

Emrah YİĞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLİŞİM SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2020

Emrah YİĞİT tarafından hazırlanan “ÇOK GEÇİŞLİ ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTECİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Gazi Üniversitesi Bilişim Sistemleri Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat YÜCEL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Başkan: Prof. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ankara Bilim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Üye: Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Tez Savunma Tarihi: 29/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Aslıhan TÜFEKCİ

Bilişim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Emrah YİĞİT

29/12/2020

ÇOK GEÇİŞLİ ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTECİN BİLGİSAYAR DESTESKLİ TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Emrah YİĞİT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Günümüz dünyasında bilgi ve veri kullanımına duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır. Bu ihtiyaç, haberleşme sistemlerinin daha hızlı, daha yüksek band genişliklerinde kabul edilebilir minimum hata oranıyla kullanılabilmesine yönelik çalışmaları da beraberinde getirmektedir. Fiber optik sistemler, bahse konu haberleşme ihtiyaçlarına en etkin çözümü sunmaktadır. Kıtalararası bağlantıları ve benzer uzun menzilli haberleşme sistemlerini dikkate aldığımızda sinyal zayıflaması ve buna bağlı olarak düşen veri iletimi kalitesi bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Fiber optik yükselteçler, sinyalin mesafeye bağlı zayıflama sorununa yönelik olarak tasarlanmış sistemler olup farklı çeşitleri hali hazırda kullanımdadır. Erbiyum katkılı fiber optik yükselteçler, bahsi geçen optik yükselteç türlerinden biri olarak bu çalışmada ele alınmıştır. Çalışma iki ana aşamadan oluşmakta olup, ilk aşamada iki aşamalı ve üç geçişli sistem; ikinci aşamada ise literatürde daha önce yer almamış olan üç aşamalı ve altı geçişli sistem tasarlanarak ilgili yazılım desteği ile simule edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, bir fiber optik yükseltecin tüm giriş parametreleri optimize edilerek düşük maliyetli, modüler tasarıma uygun, yüksek çıkış kazancı ile düşük gürültü faktörü ve kazanç dalgalanmasına sahip yüksek performanslı sistemler tasarlanarak kullanıma sunulmuştur.

Bilim Kodu	:	90532
Anahtar Kelimeler	:	Erbiyum katkılı fiber optik yükselteç, yüksek kazanç, altı geçiş, çoklu aşama, optimizasyon
Sayfa Adedi	:	63
Danışman	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

COMPUTER AIDED DESIGN OF MULTI-PASS ERBIUM DOPED FIBER AMPLIFIER

(M. Sc. Thesis)

Emrah YİĞİT

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF INFORMATICS

December 2020

ABSTRACT

In today's world, the need for information and data usage is increasing rapidly. This demand, brings along studies to use communication systems faster and with acceptable minimum error rate in higher bandwidths. Fiber optical systems offer the most effective solution to these communication needs. Considering the intercontinental connections and similar long-range communication systems, signal attenuation and the resulting reduced data transmission quality emerge as a problem. Fiber optical amplifiers are systems designed to address the distance-dependent attenuation problem of the signal and different types are currently in use. Erbium doped fiber optic amplifiers are discussed in this study as one of the mentioned optical amplifiers. The study consists of two main stages. In the first stage, a two-stage and three-pass system; in the second stage, a three-stage and six-pass system, which has not been studied in the literature before, was designed and simulated with the aid of relevant software. As a result of this study, by optimizing all input parameters of a fiber optic amplifier, low cost, modular design, high output gain performance systems with low noise factor and gain fluctuation have been designed and put into use.

Science Code	:	90532
Key Words	:	Erbium doped fiber amplifier, high gain, six pass, multi stage, optimization
Page Number	:	63
Supervisor	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, fikir ve tecrübelerini benden esirgemeyen, bana güvenen değerli ve saygıdeğer hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL'e, tüm süreç boyunca yanımda yer alan, her zaman sıkıntılarımı ve mutluluğumu paylaşan, hayat arkadaşım, canım eşim Didem YİĞİT'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. OPTİK YÜKSELTEÇ TÜRLERİ 5

2.1. Yarı İletken Optik Yükselteçler 5

2.2. Fiber Raman Yükselteçler 6

2.3. Fiber Brillouin Yükselteçler 7

2.4. Nadir Toprak Elementi Katkılı Fiber Optik Yükselteçler 8

3. ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK YÜKSELTEÇLER 10

3.1. Erbiyum Atomik Yapısı ve EKFY Çalışma Prensibi 10

3.2. Matematiksel Model 12

3.3. Çok Aşamalı ve Çok Geçişli Uygulama Örnekleri 15

4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR 31

4.1. İki Aşamalı ve Üç Geçişli Tasarım 31

4.2. Üç Aşamalı ve Altı Geçişli Tasarım 38

5. SONUÇ ve ÖNERİLER 49

KAYNAKLAR 56

ÖZGEÇMİŞ 63

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Nadir toprak elementlerinin kullanıldığı cam türleri ve yayılım spektrumları 9
Çizelge 4.1. Fiber türleri parametreleri 32
Çizelge 4.2. I25 fiberin geçiş bazında kazanç değerleri 48
Çizelge 5.1. I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen giriş parametreleri 49
Çizelge 5.2. I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen parametrelere göre sonuçlar 50
Çizelge 5.3. Kaynak [18] ile yapılan çalışmanın karşılaştırılması 50
Çizelge 5.4. I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen giriş parametreleri 52
Çizelge 5.5. Optimize edilen giriş parametrelerine göre I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için çıkış kazanç ve gürültü faktörü değerleri 52
Çizelge 5.6. Literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırma 53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. YOY'un temel yapısı 5
Şekil 2.2. FRY çalışma prensibi 6
Şekil 2.3. FRY'nin silika fiberdeki kazanç bölgesi 7
Şekil 2.4. FBY çalışma prensibi 8
Şekil 2.5. Bazı nadir toprak elementlerinin yayılım bandları ile silika fiberin kayıp karakteristiği 9
Şekil 3.1. Erbiyum iyonlarının enerji seviyesi diyagramı 10
Şekil 3.2. I25 fiberinin soğurum ve yayılım kesitleri 12
Şekil 3.3. 1480 nm ile ileri yönde pompalanmış üç aşamalı ve dört geçişli EKFY düzeneği 16
Şekil 3.4. İleri yönde 980 nm, ters yönde 1480 nm ile pompalanmış tek aşamalı ve çift geçişli C band EKFY düzeneği 16
Şekil 3.5. İleri yönde 980 nm, ters yönde 1480 nm ile pompalanmış çift aşamalı ve çift geçişli C band EKFY düzeneği 17
Şekil 3.6. İleri yönde 1480 nm ile pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli C band EKFY Konfigürasyon A düzeneği 17
Şekil 3.7. İleri yönde 1480 nm ile pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli C band EKFY Konfigürasyon B düzeneği 18
Şekil 3.8. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon A düzeneği 19
Şekil 3.9. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon B düzeneği 20
Şekil 3.10. İleri yönlü pompalanmış üç aşamalı ve üç geçişli EFKY düzeneği 20
Şekil 3.11. İleri yönde pompalanmış iki aşamalı ve dört geçişli ABGF'li EFKY konfigürasyonu 21
Şekil 3.12. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon 1 düzeneği 21
Şekil 3.13. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon 2 düzeneği 22
Şekil 3.14. İleri yönlü pompalanmış üç aşamalı ve üç geçişli C band EFKY düzeneği. 22

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.15. İleri ve geri yönde 980 nm ile pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli L band EFKY düzeneği 23
Şekil 3.16. İleri yönde pompalanmış üç aşamalı ve üç geçişli L band EFKY düzeneği 24
Şekil 3.17. İleri yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren C band EFKY düzeneği 25
Şekil 3.18. Ters yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF'li EKFY tasarımı 26
Şekil 3.19. İleri yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren EKFY tasarımı 27
Şekil 3.20. İleri yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren C band EKFY tasarımı 28
Şekil 3.21. Ters yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren C band EKFY tasarımı 29
Şekil 3.22. Geri yönlü 980 nm ile pompalanmış dört aşamalı ve dört geçişli EKFY düzeneği 30
Şekil 4.1. İki aşamalı ve üç geçişli EKFY düzeneği 31
Şekil 4.2. Optimize edilmemiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-kazanç değişimi 33
Şekil 4.3. Optimize edilmemiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-gürültü faktörü değişimi 33
Şekil 4.4. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-kazanç değişimi 35
Şekil 4.5. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-gürültü faktörü değişimi 36
Şekil 4.6. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal gücü-kazanç değişimi 37
Şekil 4.7. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal gücü-gürültü faktörü değişimi 37
Şekil 4.8. Üç aşamalı ve altı geçişli EKFY tasarımı 39
Şekil 4.9. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş I6 fiber EKF boylarının (4 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi 40
Şekil 4.10. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş I25 fiber EKF boylarının (0,625 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi 41

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.11. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş M5 fiber EKF boylarının (6,75 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi 41
Şekil 4.12. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş M12 fiber EKF Boylarının (1,4 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi 42
Şekil 4.13. I6, I25, M5 ve M12 fiberlerinin optimize edilmiş EKF boyları için 1532 nm dalga boyu ve -40 dBm giriş sinyal gücünde kazanç-pompa lazeri gücü değişimi 43
Şekil 4.14. I6, I25, M5 ve M12 fiberlerinin optimize edilmiş EKF boyları için 1532 nm dalga boyu ve -50 dBm giriş sinyal gücünde kazanç-pompa lazeri gücü değişimi 43
Şekil 4.15. I6, I25, M5 ve M12 fiberlerinin optimize edilmiş EKF boyları için 1532 nm dalga boyu ve -60 dBm giriş sinyal gücünde kazanç-pompa lazeri gücü değişimi 44
Şekil 4.16. 1532 nm giriş sinyal dalga boyu ile optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için kazanç-giriş sinyal gücü değişimi 45
Şekil 4.17. 1532 nm giriş sinyal dalga boyu ile optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için gürültü faktörü-giriş sinyal gücü değişimi 45
Şekil 4.18. -50 dBm giriş sinyal gücünde optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I25 fiberi için her bir geçişten sonraki kazanç – giriş sinyal dalga boyu değişimi 46
Şekil 4.19. -50 dBm giriş sinyal gücü ile optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I25 ve M5 fiberlerinin kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi karşılaştırması 47
Şekil 4.20. 1532 nm dalga boyunda optimize EKF boyları ve pompa lazeri güçleri ile (200 mW) I25 fiber için her tekil geçişin kazanç-giriş sinyal gücü karşılaştırması 48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklama**
A	Erbiyum iyon dağılımının etkili kesit alanı
eV	Elektron volt
E_1	Toprak seviyesi
E_2	Yarı kararlı seviye
E_3	Pompalama seviyesi
Er^{3+}	Erbiyum
h	Planck sabiti
hv	Bir tek pompa fotonunun enerjisi
$h\omega_p$	Pompalama foton enerjisi
$h\omega_s$	Sinyal foton enerjisi
$^4I_{11/2}$	Erbiyum pompalama seviyesi
$^4I_{13/2}$	Erbiyum yarı kararlı seviye
$^4I_{15/2}$	Erbiyum toprak seviyesi
λ_P	Pompa dalga boyu
λ_S	Sinyal dalga boyu
ms	Milisaniye
η_{sp}	Kendiliğinden yayılım faktörü
N_1	E_1 enerji seviyesindeki iyon popülasyonu
N_2	E_2 enerji seviyesindeki iyon popülasyonu
ns	Nanosaniye
σ_{PA}	Pompa ışınının soğurum kesiti
σ_{PE}	Pompa ışınının yayılım kesiti
σ_{SA}	Sinyal ışınının soğurum kesiti
σ_{SE}	Sinyal ışınının yayılım kesiti
Γ_S	Er^{3+} iyonlarının sinyal ışık alanı örtüşme faktörü

Simgeler	Açıklama
Γ_P	Er^{3+} iyonlarının pompa ışık alanı örtüşme faktörü
P_S^+	İleri yönlü sinyal gücü
P_{ASE}^+	İleri yönlü uyarılmış kendiliğinden yayılım gücü
P_{ASE}^-	Geri yönlü uyarılmış kendiliğinden yayılım gücü
R	Pompalama oranı
V_s	Sinyal frekansı
V_p	Pompa frekansı
W_{12}	E_1 ve E_2 arasındaki uyarılmış soğurum oranı
W_{21}	E_2 ve E_1 arasındaki uyarılmış yayılım oranı
ω_p	Pompalama frekansı
ω_s	Sinyal frekansı
τ	İyon ömrü
p	Er^{3+} iyonunun birim hacim başına yoğunluğu

Kısaltmalar	Açıklama
ABGF	Ayarlanabilir band geçiren filtre
C band	Konvansiyonel band (Conventional band)
DBÇK	Dalga boyu bölmeli çoğullayıcı kuplör
dB	Desibel
dBm	1 mW'la ilgili desibel
DBÇ	Dalga boyu bölmeli çoğullama
EKF	Erbiyum katkılı fiber
EKFY	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
FBY	Fiber brillouin yükselteçler
FRY	Fiber raman yükselteçler
GHz	Gigahertz

Kısaltmalar	Açıklama
InP	İndiyum Fosfat
InGaAsP	İndiyum Galyum Arsenit Fosfür
L band	Uzun band (Long band)
MHz	Megahertz
mW	Miliwatt
µm	Mikrometre
NF	Gürültü faktörü
Nm	Nanometre
OSA	Optik spektrum analizör
PL	Pompa lazeri
S band	Kısa band (Short band)
SUO	Serbest Uzay Optiği
THz	Terahertz
UBS	Uyarılmış brillouin saçılma
UBY	Uyarılmış brillouin yükseltimi
URS	Uyarılmış raman saçılması
YDBÇ	Yoğun DBÇ
YKY	Yükseltilmiş kendiliğinden yayılım
YOY	Yarıiletken optik yükselteçler
YUY	Yükseltilmiş uyarılmış yayılım

1. GİRİŞ

Haberleşme, ilk çağlardan beri insanlar arasındaki iletişimi sağlamak için kullanılan farklı tekniklerin genel bir tanımıdır. İlk zamanlarda insan gözünün seçebildiği menzil ile sınırlı olmakla birlikte, 1800'lü yıllardan itibaren bilimde yaşanan gelişmelere bağlı olarak daha uzun mesafelerde haberleşme imkânı üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların ilk aşamalarında elektromanyetik dalgalar ve bunların yayılma karakteristikleri üzerine incelemeler gerçekleştirilmiştir. 1900'lerin ilk yarısında silika fiberler ile yapılan deneyler ve dalga kılavuzu kullanılarak yapılan iletişim, optik sistemlerin [1] haberleşme için taşıyabileceği potansiyele olan ilgiyi artırmıştır.

Artan kapasite ve okyanus ötesi gibi uzun mesafeli haberleşme ihtiyaçlarından dolayı optik sistemlerde zamanla oluşan sinyal zayıflamasına çözüm olarak yükselteçler kullanılmaya başlanmıştır [2]. İlk önceleri elektro-optik dönüştürücüler [3] yardımı ile optik sinyal elektriksel sinyale dönüştürülmekte; bu safhada sinyal gücü yükseltilmekte ve daha sonra elektriksel sinyal tekrar optik sinyale dönüştürülerek kullanılmaya devam edilmekteydi. Bu teknoloji, hem elektro-optik dönüşüm gerektirmesinden hem de maliyeti dolayısı ile yerini zamanla optik yükselteçlere bırakmıştır. Optik yükselteç teknolojisinde haberleşme sinyali herhangi bir dönüşüme girmeden yine optik ortamda yükseltilerek kullanılabilmektedir [4]. Bahse konu yükselteçler temel olarak; Yarıiletken Optik Yükselteçler (YOY), Fiber Raman Yükselteçler (FRY), Fiber Brillouin Yükselteçler (FBY) ve Nadir Toprak Elementi Katkılı Fiber Optik Yükselteçler olarak 4 temel gruba ayrılır.

1960'ların ortalarından itibaren literatüre giren [5] ve 1970'lerde neodmiyum katkılı fiber lazerler ile çalışmaların yoğunlaştığı [6-7] nadir toprak elementi katkılı lazerler, 1980'lerden itibaren haberleşme sistemlerinde ihtiyaç duyulan talebe bir çözüm getirecek düzeyde ele alınmaya başlamıştır [8-11]. Nadir Toprak Elementi Katkılı Fiber Optik Yükselteçler sınıfına dahil olan ve bu çalışmada da kullanılan Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EKFY) günümüzde en çok tercih edilen optik yükselteçtir. Halihazırda kullanımda olan bakır ve koaksiyel kablolar, kablosuz internet erişimi ile geniş band radyo frekansı ve mikrodalga gibi teknolojiler dar spektrum, düşük veri iletim oranı, pahalı lisanslama, güvenlik hususları, yüksek ilk kurulum maliyeti ve herkes tarafından erişilebilirlik gibi kısıtlamalar içermektedir. EKFY hem S band (1460 – 1530 nm), hem C band (1530 nm – 1565 nm) hem

de L bandda (1565-1625 nm) yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü sağlaması, ayrıca oldukça düşük bağlantı kaybı ve bit hatası oranı ile öne çıkmaktadır [12, 31-32].

1987 yılında keşfedilen EKFY [13], temel olarak 980 nm ve 1480 nm dalga boylarındaki pompa lazer sinyalinin erbiyum iyonlarını uyararak daha üst enerji seviyelerine geçmesine ve buradan da tekrar haberleşme sinyali ile aynı dalga boyunda foton üreterek yaptığı ışıma sonucu ile optik sinyali güçlendirme prensibine dayanır.

EFKY'nin doğuşu ile birlikte ele alabileceğimiz,1980'li yıllarda laboratuvar ortamında doğrulanan ve genel olarak ışığın dalga boylarına göre ayrışması prensibine göre çalışan Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (DBÇ) sistemi 1990'lı yılların ikinci yarısından itibaren artan haberleşme talebine karşılık vermiştir. DBÇ ve daha gelişmiş hali olan Yoğun DBÇ (YDBÇ) sistemleri, geniş bant internet erişimi ve hizmetleri için önemli bir etkinleştirici olmanın yanı sıra internet protokol trafiğinin ana taşıyıcısını oluşturmakta olup; bu sistemlerde kullanılan EKFY'nin düz bir kazanca sahip olması önem taşımaktadır. Günümüzde, elektronik yükselteçler birkaç on GHz'lik bir bant genişliği sağlayabilirken, EKFY; tek bir yükselteçte 4 THz bant genişliği sağlayarak, birkaç DBÇ kanalının tek bir yükselteçle güçlendirilmesine izin verir. Yine de YDBÇ sistemlerinin kapasitesi EKFY'nin düz olmayan kazanç profili tarafından sınırlanmaktadır.

Ayrıca, EKFY, yüksek sinyal kazancı, geniş band yükseltmesi, yüksek doygunluk gücü, ideal gürültü performansı, veri bit hızından bağımsız, polarizasyona duyarsız, düşük doğrusal olmayan etki, transmisyon fiberlerine kolay bağlanması ve optik iletim için kullanılan kaynaklara çok benzer bir diyot lazer ile çalıştırılması gibi bir dizi öne çıkan özellik sergiler. Bunlar, sıradan elektronik tabanlı yükselteçlerle elde edilemeyen özelliklerdir ve bu nedenle EKFY'yi YDBÇ ağlarında çok önemli kılar. Genel olarak, EKFY'ler verici gücünü artırmak için güç (son) yükselteci, sinyal erişim mesafesini artırmak için hat yükselteci, alıcı hassasiyetini artırmak için ise ön yükselteç olarak kullanılır.

Hâlihazırda EKFY ile ilgili literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [14-53]. Farklı disiplinlerde yer alan bu çalışmalar incelendiğinde; tek aşamalı ve tek geçişli C band EKFY'nin kazanç düzleştirici bir optik komponent olmadan kullanılabileceği gösterilmiş [40]; tek ve çift geçişli EKFY'ler C bandında deneysel olarak karşılaştırılmış [41]; tek

aşamalı, çift aşamalı, çift geçişli L band EKFY'lerde kazanç düzleştirme konfigürasyonları çalışılmıştır [29].

Uzun dalga boyu spektrumu için yapılan çalışmalarda [43-44, 53], C ve L bandı için EKFY, S bandı için ise FRY'nin kullanıldığı ve 120 nm'lik geniş bir spektrumda çalışabilen kazancı düzleştirilmiş hibrid optik yükselteç tasarlanmıştır [30].

EKFY'lerin sıcaklık-kazanç ilişkisi kapsamında [47-52], C band EKFY'de farklı giriş sinyal güçleri ve sıcaklık ile kazanç ve sıcaklık bağımlı kazanç değişimi gözlenmiş [33] ve C band EKFY'nin gürültü faktörünün sıcaklığa bağımlılığı incelenmiş [34]; C bandda pompa lazeri dalga boyu değişiminin EKFY'nin sıcaklık bağımlılığına etkisi gözlenmiş [35]; tek ve çift aşamalı L band EKFY tasarımlarının çıkış kazancının sıcaklıktan bağımsız olduğu dalga boyu spektrumları belirlenmiştir [36].

Bulanık mantık uygulamaları çerçevesinde [45-46], C band EKFY için bulanık mantık tabanlı otomatik kazanç düzleştirici çalışılmış [37]; L band EKFY'nin sıcaklığa bağımlı fiber boyu ve çıkış kazancı bulanık mantık kullanılarak incelenmiş ve bulanık mantık karar destek sistemi ile simülasyon sonuçlarının %94-99 oranında uyuştuğu görülmüştür [27-28].

Serbest uzay optiği (SUO) uygulamaları kapsamında ise uzun mesafeli iletim yapabilecek EKFY tasarlanmıştır [38].

EKFY'nin ilk dönemlerinde, tek geçişli ve tek aşamalı sistem tasarımları üzerinde çalışılmış olmakla birlikte, ilerleyen zamanlarda çok aşamalı ve çok geçişli sistemler [14-26] daha yüksek performans karakteristikleri nedeni ile tercih edilir olmuşlardır.

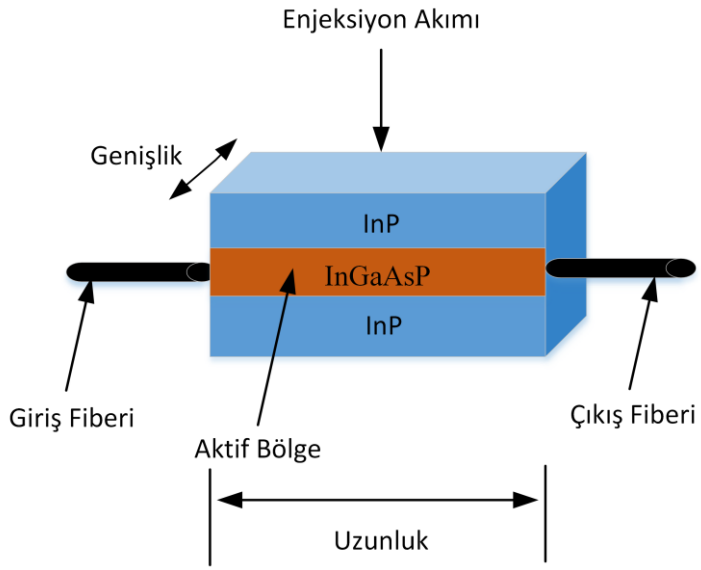
Bu tez çalışması kapsamında yüksek çıkış kazancı ve düşük kazanç dalgalanması sağlayarak farklı sinyal kanalları için uzun mesafeli veri transferine imkân veren iki farklı tasarım üzerinde çalışılmıştır. Tezin 2. bölümünde optik yükselteç türleri tanıtılmış; 3. bölümde Erbiyum elementinin atomik yapısı incelenerek EKFY'nin çalışma prensibi anlatılmıştır. Ardından, EKFY tasarımlarının teorik analizleri gerçekleştirilerek literatürde yapılmış çok aşamalı ve çok geçişli düzenek örnekleri incelenmiştir. 4. bölümde tez çalışmasının da esasını teşkil eden iki aşamalı üç geçişli tasarım ile üç aşamalı altı geçişli konfigürasyonun optimizasyon süreçleri detaylı olarak anlatılmıştır. 5. ve son bölümde ise 4. bölümde yapılan

analiz çalışmaları ışığında elde edilen sonuç verileri literatürdeki benzer çalışmalarla mukayese edilerek değerlendirilmiş ve sonraki muhtemel çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. OPTİK YÜKSELTEÇ TÜRLERİ

2.1. Yarı İletken Optik Yükselteçler

Optik yükselteç sistemlerinden biri olan Yarı İletken Optik Yükselteçler (YOY), temelde aktif bölge içerisinde oluşturulmuş bir oyuk yansımasının yükseltilmesi prensibine dayanır ve bir lazer diyoda benzer [54]. Şekil-2.1'de de görüldüğü üzere, YOY'un yapısında dıştan içe doğru metal elektrot kısımlar, n-tipi ve p-tipi indiyum fosfat (InP) bölümler ile orta kesitte yer alan ve dalga kılavuzu görevini de üstlenen İndiyum Galyum Arsenit Fosfür (InGaAsP) kazanç ortamı sıralanmaktadır. YOY, diğer optik yükselteçlerden farklı olarak sinyal güçlendirme aşamasında elektro-optik bir süreç izler [55]. YOY üzerindeki aktif bölgeye dışarıdan uygulanan enjeksiyon akımı ile, bu bölgeye taşınan sinyaller geniş bir band aralığında yükseltilerek uzun mesafe iletişimlerinde kullanılırlar. Bu yükseltme işleminde, yükseltme ortamından geçen ışıktan gelen fotonlar ile etkileşime giren düşük enerji seviyesindeki (E_1) elektronlar uyarılmış soğurma ile yüksek enerji seviyesine (E_2) geçerler. Aynı fotonlar, iletim bandındaki (E_2) elektronları toprak seviyesine (E_1) gevşemeleri ve toprak seviyesindeki oyuklarla yeniden birleşmeleri için tetikleyebilir. Sonuç olarak, gelen fotonlarla aynı dalga boyuna ve faza sahip fotonlar yayılarak uyarılmış yayılım oluşacak ve optik sinyal güçlendirilecektir. Buradaki pompalama optik veya elektriksel olabilir [56].

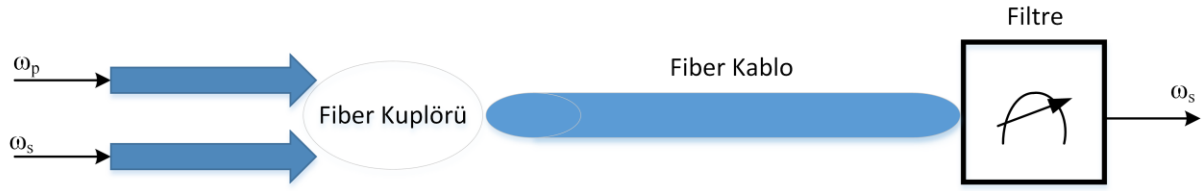


Şekil 2.1. YOY'un temel yapısı

YOY'ların temel avantajları, yüksek bir band genişliğinde, yüksek çıkış kazancı ile düşük akım çekerek çalışabilmeleridir. Bunun yanında, yüksek hızlı anahtarlama yeteneği, yüksek sönüm oranı ve yüksek birleştirme potansiyeline sahip olan YOY; tüm optik dalga boyu dönüşümü ve dalga boyu seçme, tekrarlama, sinyal güçlendirme ve hat yükseltmesi ile optik sistemlerde ön yükseltme yapma yeteneklerine de sahiptir. YOY'ların en büyük dezavantajı ise, diğer fiber optik yükselteçlere geçiş sürecini de hızlandırmış olan yüksek bağlantı kayıplarıdır [57-60].

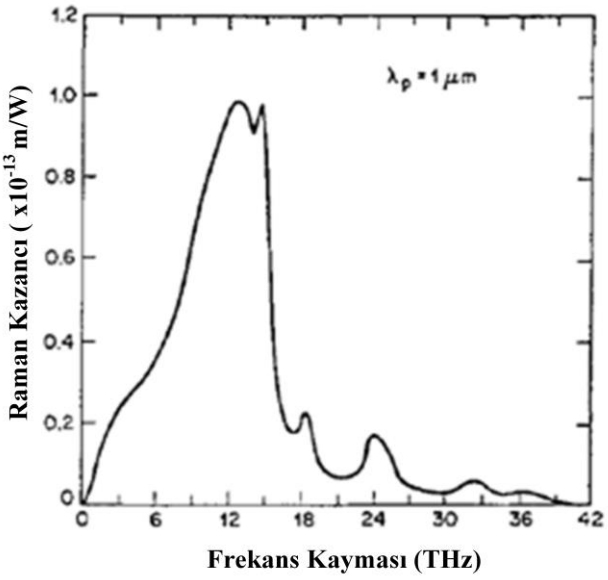
2.2. Fiber Raman Yükselteçler

Fiber Raman Yükselteçler (FRY), silika fiberlerde gerçekleşen Uyarılmış Raman Saçılması (URS) esasına göre çalışırlar. Pompa ve giriş sinyalleri bir fiber kuplör yardımı ile birleştirilerek fiber optik kablo ortamına aktarılır. Şekil-2.2'de ω_s ve ω_p sinyal ve pompa ışınlarının frekanslarını göstermektedir. URS esnasında pompa fotonu, enerjisinin bir kısmını daha düşük enerjili ve giriş sinyali frekansındaki başka bir fotonu oluşturmak için kullanır. Pompa fotonunun kalan enerjisi ise silika malzemesi tarafından moleküler titreşimler olarak emilir. Pompa ve giriş sinyali fiber içinde birlikte yayılırken, enerji pompa için sürekli olarak URS aracılığıyla sinyale aktarılır. Pompalama optik olarak yapılır. [61,64]



Şekil 2.2. FRY çalışma prensibi

İleri yönlü pompalama düzeneklerindeki yayılım ve sinyal yükseltme süreçleri yukarıda anlatılan FRY'lerde; pompa ve sinyal ışınları, pratikte sıklıkla kullanılan geriye doğru pompalama konfigürasyonunda ise ters yönde yayılır. FRY'lerın genel olarak avantajları yüksek kazanç, yüksek band genişliği, düşük gürültü faktörü ve düşük bağlantı kayıpları iken, temel dezavantajı düşük verimlilikle çalışmalarıdır [62].

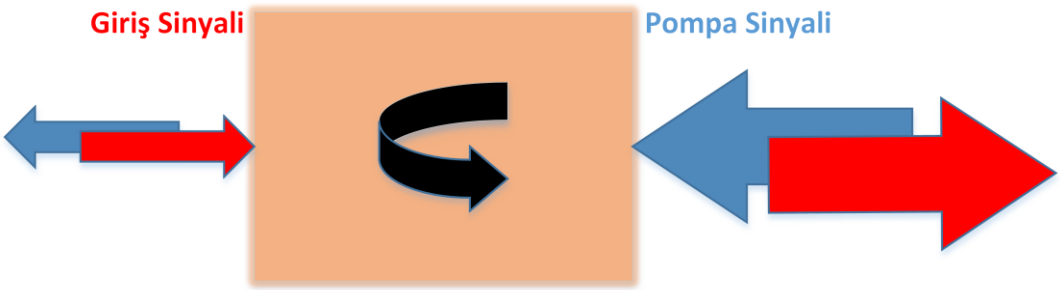


Şekil 2.3. FRY'nin silika fiberdeki kazanç bölgesi [63]

FRY'lerin silika fiberlerdeki kazanç spektrumu Şekil-2.3'te yer almakta olup, genişband özelliği camın amorf yapısının bir sonucudur [63].

2.3. Fiber Brillouin Yükselteçler

Uyarılmış Brillouin Yükseltimi (UBY) dağıtılmış bir süreçtir ve yoğun ışığın uyarılmış akustik fononlarla etkileşimine dayanır. Fiber Brillouin Yükselteçler (FBY)'ın çalışma prensibi FRY'lere benzemekle beraber sinyal güçlendirme işlemi URS yerine Uyarılmış Brillouin Saçılma (UBS) esasına dayanır. Şekil-2.4'te de görüldüğü üzere optik olarak sinyal ışınına ters yönde pompalanan FBY'de, $h\omega_p$ enerjisine sahip pompa fotonu enerjisinin bir kısmını $h\omega_s$ enerjisine sahip sinyal ışınına aktarır ve çıkışta daha yüksek enerjili sinyal oluşmasını sağlar. Pompa fotonunun kalan enerjisi ise akustik bir fotonu uyarmada kullanılır. UBY'nin özellikleri, dar bir bant genişliği ve yüksek bir küçük sinyal kazancıdır. Yaklaşık 10 MHz bant genişliğine sahip Brillouin amplifikasyonunda "yerleşik" dar bir optik (ve yönlü) filtre bulunur. [65-66]

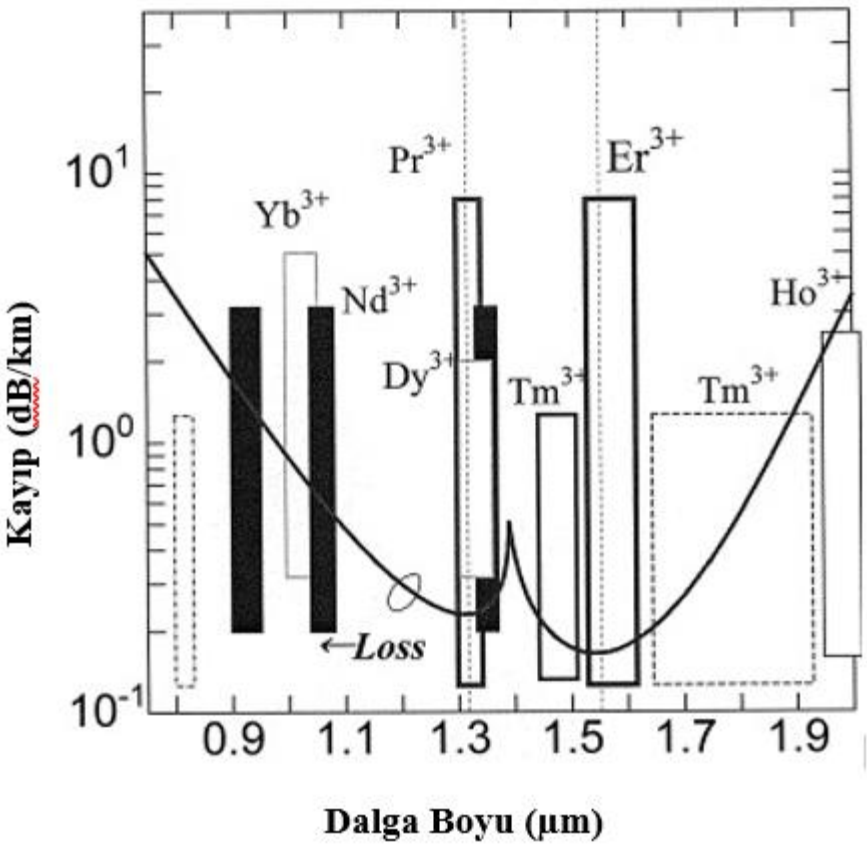


Şekil 2.4. FBY çalışma prensibi

2.4. Nadir Toprak Elementi Katkılı Fiber Optik Yükselteçler

Elektro-optik dönüşüme gerek kalmadan sinyalin direkt olarak yükseltilebilmesi nadir toprak elementlerinin üst enerji seviyelerindeki uyarılmış yayılım sayesinde başarılmıştır. Doğada oldukça az bulunan ve nadir toprak elementi olarak adlandırılan bu yükselteçler optik bir pompalamayla sinyal iyonlarının ışığın güçlendirilmesi prensibine göre çalışır. Pompa fotonunun toprak seviyesindeki (E_1) nadir toprak iyonlarını uyarması ile iyonların E_1 seviyesinden E_2 ve E_3 seviyelerine 'ters birikme' dediğimiz populasyon dönüşümü gerçekleşir. Akabinde, kararsız üst enerji seviyelerinden (E_2 ve E_3), E_1 enerji seviyesine doğru gevşeyen iyonlar açığa çıkan enerjilerinin bir kısmı ile giriş sinyal ışını ile aynı fazda ve aynı dalgaboyunda olan bir foton oluştururlar. Oluşan bu fotonlar sinyal ışığı ile birleşerek yükselteç çıkışında yüksek kazanç oluştururlar [68].

Aktif fiberler olarak da adlandırılan ve Erbiyum, Holmiyum, Neodmiyum, Prasedmiyum, Samariyum, Tulyum ve İterbiyum gibi farklı toprak elementleri ile katkılandırılan fiber optik kablolar, görülebilir ışık bölgesinden kızılötesi ışık bölgesine kadar geniş bir dalga boyu spektrumunda çalışan yükselteç tasarımlarında kullanılmaktadır. Şekil-2.5'te silika fiberin kayıp karakteristiği ile bazı nadir toprak elementlerinin yayılım bandları yer almaktadır. Nadir toprak iyonlarının cam ortam içindeki optik davranışlarını nicel olarak anlamak için, üst enerji seviyelerindeki ışımalı ve ışımasız geçiş sürelerini değerlendirmek oldukça önemlidir. Çizelge 2.1'de en yaygın aktif iyonlar, yer alan camlar ve tipik yayılım dalga boylarının nadir toprak elementi katkılı fiberlerdeki dağılımı gösterilmektedir [69].



Şekil 2.5. Bazı nadir toprak elementlerinin yayılım bandları ile silika fiberin kayıp karakteristiği [67]

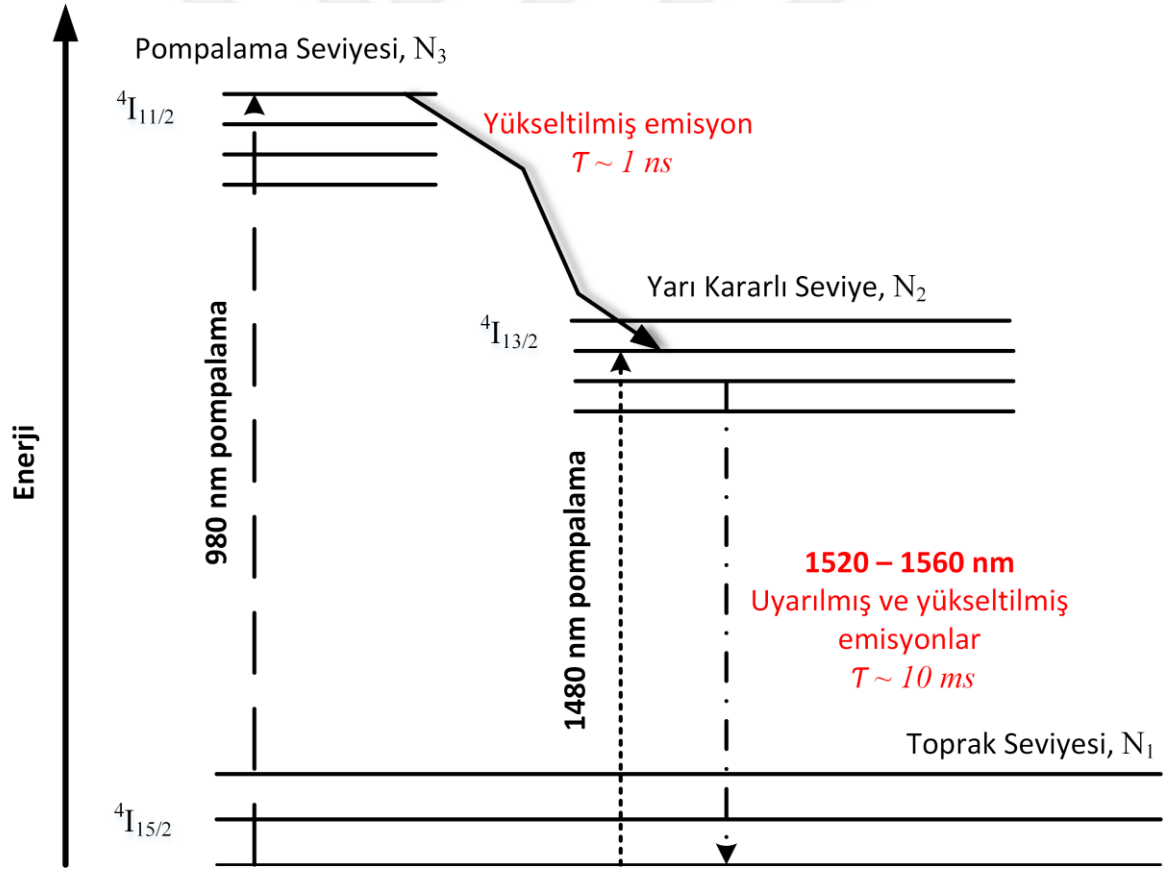
Çizelge 2.1. Nadir toprak elementlerinin kullanıldığı cam türleri ve yayılım spektrumları [69]

İyon	Yaygın Bulunan Camlar	Önemli Yayılım Dalga Boyları
Neodmiyum	Fosfat ve Silikat Camlar	1.03-1.1 µm, 0.9-0.95 µm, 1.32-1.35 µm
İterbiyum	Silikat Camlar	1.0-1.1 µm
Erbiyum	Fosfat, Silikat ve Florür Camlar	1.5-1.6 µm, 2.7 µm, 0.55 µm
Tulyum	Silikat, Germanat ve Florür Camlar	1.7-2.1 µm, 1.45-1.53 µm, 0.48 µm, 0.8 µm
Praseodimyum	Silikat ve Florür Camlar	1.3 µm, 0.635 µm, 0.6 µm, 0.52 µm, 0.49 µm
Holmiyum	Silikat ve Flörozirkonat Camlar	2.1 µm, 2.9 µm

3. ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK YÜKSELTEÇLER

3.1.Erbiyum Atomik Yapısı ve EKFY Çalışma Prensibi

Nadir toprak elementi grubunda yer almakta olan Erbiyum elementini diğer toprak elementlerinden ayıran en temel özelliği, Erbiyum iyonlarının çoğu silika tabanlı fiberin zayıflama karakteristiğinin en düşük olduğu üçüncü iletim penceresinde (1550 nm civarı) yüksek verimlilikle yayılım yapabilme yeteneğidir. Şekil-3.1'de yer alan farklı enerji seviyeleri Erbiyum elementinin atomik yapısının EKFY özelindeki kısmını göstermektedir. EKFY tasarımlarında bu farklı enerji seviyeleri arasındaki popülasyon geçişleri göz önüne alınmaktadır.



Şekil 3.1. Erbiyum iyonlarının enerji seviyesi diyagramı [70]

Yükselteç tasarımlarında pompalama 660 nm, 820 nm, 980 nm ve 1480 nm dalga boylarında yapılabilmekle birlikte; EKFY'lerde genellikle, silika tabanlı fiberlerde çok kayıp içermediği için 980 nm ya da 1480 nm pompa dalga boyları tercih edilmektedir. Bu durumu

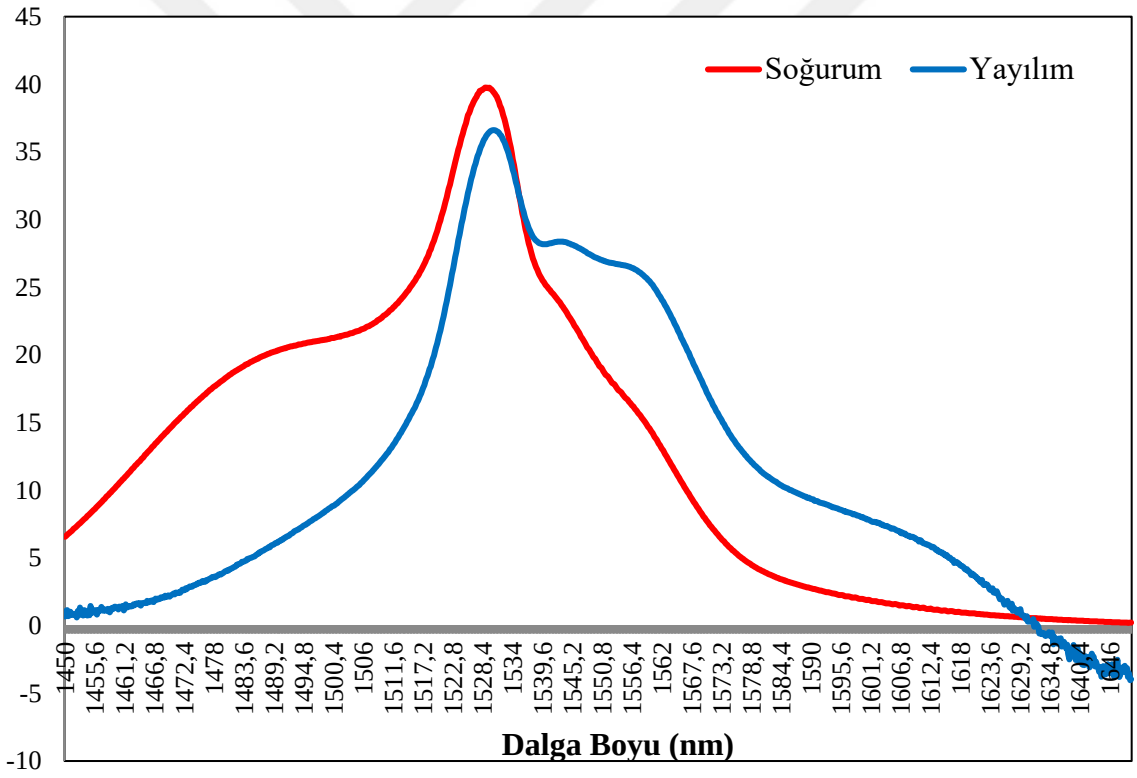
elektriksel yükler, enerji seviyeleri ve oluşan foton dalga boyları bağlamında ele aldığımızda; pompalama seviyesi ($^4I_{11/2}$) ile toprak seviyesinin ($^4I_{15/2}$) alt bandı arasında 1.27 eV kadarlık bir enerji farkı vardır ve bu fark 980 nm dalga boyuna denk düşmektedir. Ayrıca, yarı kararlı $^4I_{13/2}$ seviyesinin üst bandı toprak seviyesinin alt bandından 0.841 eV'luk bir enerji farkı ile ayrılmaktadır, ki bu durum 1480 nm dalga boyu ile örtüşmektedir. İlave olarak, $^4I_{13/2}$ yarı kararlı seviyesinin alt bandı toprak seviyesinin ($^4I_{15/2}$) alt bandından 1600 nm dalga boyuna karşılık gelen 0.775 eV'luk bir enerji farkı ile ayrılmaktadır. Bu durum, 980 nm ve 1480 nm pompalamanın uygun dalga boyları olduğunu göstermekte olup; yarı kararlı ve toprak seviyeleri arasındaki elektronların geçişi sırasında yayılan fotonlar 1530 nm ile 1600 nm aralığında değişir [71].

980 nm pompa dalga boyu incelendiğinde; bahse konu dalga boyunun yüksek popülasyon dönüşümü sağlayarak yüksek çıkış kazancı ile düşük gürültü faktörü elde edilmesini mümkün kıldığı söylenebilir. 980 nm dalga boyundaki pompa lazeri toprak seviyesindeki (E_1) iyonları uyararak bu iyonların pompa bandına (E_3) çıkmasını sağlar. İyon ömrü oldukça kısa olan (1 ns) E_3 bandındaki uyarılmış iyonlar hızlı bir şekilde yarı kararlı banda (E_2) düşerler. Bu düşme sırasında, iyonlardaki fazla enerji atomların fiber içindeki ortak mekanik titreşimleri olarak adlandırabileceğimiz fononlara dönüşür. Uyarılmış iyonların elektronları yarı kararlı bandın alt tarafını doldurma eğilimindedir ve bu enerji seviyesinde 10 ms gibi oldukça uzun bir iyon ömrüne sahiptirler. Yarı kararlı banddaki bu elektronlar ya bir giriş sinyali tarafından uyarılarak E_1 bandına giriş sinyali ile aynı fazda ve dalga boyunda yeni bir foton açığa çıkararak düşerler ya da herhangi bir tetikleyici etken olmadığında zamanla kendi kendilerine toprak seviyesine inerler. İkinci durumda oluşan tüm geçiş YKY olarak sistem çıkışındaki gürültü faktörüne eklenir. Bazı konfigürasyonlarda, 980 nm dalga boyunda pompalama 1480 nm'ye göre daha düşük gürültü ürettiği ve daha yüksek popülasyon dönüşümü sağladığı için tercih edilmektedir [72].

Bu tez çalışmasında ise daha iyi güç dönüşüm verimliliğine sahip olduğu için 1480 nm pompa lazeri tercih edilmiştir. 1480 nm pompa lazeri fotonları, toprak seviyesindeki ($^4I_{15/2}$) elektronları yarı kararlı bandın ($^4I_{13/2}$) az yoğunluklu üst bölgesine uyarır. Bu iyonlar daha sonra E_2 bandının yüksek yoğunluklu alt bölgesine geçiş yapar. Yarı kararlı seviyedeki bazı iyonlar uyarıcı foton akışı yokluğunda toprak seviyesine düşerler. Bu geçiş, yükselteç tasarımlarındaki temel parametrelerden biri olan ve sistem çıkışındaki gürültü faktörüne eklenen YKY'dir. Toprak seviyesi (E_1) ile yarı kararlı seviye (E_2) arasındaki band boşluğu

enerjisine karşılık gelen karşılık gelen seviyede enerji taşıyan sinyal fotonu akışlarında ilk olarak, bu dış fotonların küçük bir kısmı toprak seviyesindeki (E_1) iyonlar tarafından emilir. Akabinde, Yükseltilmiş Uyarılmış Yayılım (YUY) olarak adlandırılan ve yarı kararlı seviyedeki (E_2) uyarılmış iyonun bir sinyal fotonu tarafından tetiklenerek toprak seviyesine (E_1) düşerken gelen sinyal fotonu ile aynı enerji, dalga vektörü ve polarizasyonda yeni bir foton yayması durumu gerçekleşir [73-74].

Herhangi bir çalışma koşulunda bir EKF karakterinin nicel tahminlerini elde etmek için, çalışmada görünen EKF karakteristik parametrelerinin değerlerini bilmek gereklidir. Özellikle sinyal dalga uzunlukları için, Şekil-3.2'de de bir örneği yer alan soğurum ve yayılım kesitleri gereklidir [75].



Şekil 3.2. I25 fiberinin soğurum ve yayılım kesitleri [76]

3.2. Matematiksel Model

Erbiyum iyonları farklı enerji seviyelerine sahiptir. 980 nm pompa lazeri kullanılan sistem tasarımlarında Er^{3+} iyonlarının toprak seviyesi (E_1), yarı kararlı seviye (E_2) ve pompalama

seviyesi (E_3) olmak üzere üç ayrı enerji seviyesi de dikkate alınmak zorundadır. Bu çalışmada, 1480 nm pompa lazeri kullanıldığı için E_1 ve E_2 iyon enerji seviyeleri ile bunlar arasındaki populasyon geçişleri ve ilgili parametreler ele alınmıştır.

Yaygın olarak kullanılmakta olan bir modelin farklı yaklaşımları kapsamında EKF karakteristiği literatürde denklemsel olarak ifade edilmektedir [77]. Bu model, popülasyon dinamiklerini ve dönüşümünü dikkate alarak sistem giriş parametreleri olan giriş sinyal gücü ve dalga boyu, pompa lazeri gücü ve dalga boyu ile YKY'nin fiber boyunca yayılımları için fonksiyon bazında birleşen diferansiyel denklemlerden oluşan bir sistemdir [78]. Genellikle, pompa ve giriş sinyali monokromatik yayılım olarak ele alınabilir, böylece her birinin yayılımı tek bir denklemle tanımlanabilir. YKY'de, biri ileri yönlü YKY diğeri ise geri yönlü YKY olmak üzere iki yayılım denklemi tanımlamak gerekir [79]. Önerilen C band EKFY sisteminin benzetimi yapılırken Giles ve Desurvire'nin kararlı durumlarda kullanılan sistem modeli kullanılmıştır [80-81].

Burada, E_1 enerji seviyesindeki iyon popülasyonu N_1 ile ifade edilmişken, E_2 enerji seviyesindeki iyon popülasyonu N_2 ile gösterilmiştir. Bu yoğunluklar aşağıda yer alan Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 ile hesaplanabilir.

$$N_1 = p\frac{1+W_{21}\tau}{1 + (W_{12}+W_{21})\tau + R\tau} \tag{3.1}$$

$$N_2 = p\frac{1+W_{21}\tau}{1 + (W_{12}+W_{21})\tau + R\tau} \tag{3.2}$$

Eş. 3.1 ve 3.2 içerisinde yer alan W_{12} ve W_{21} sırasıyla E_1 ve E_2 seviyeleri arasındaki uyarılmış soğurum ve yayılım oranlarını ifade etmektedir. Soğurum ve yayılım kesitleri Er^{3+} iyonlarının erbiyum katkılı fiber içindeki ışığı soğurma ve yayma yeteneğini göstermektedir. Her dalgaboyu soğurum (σA) ve yayılım (σE) için özgün kesit değerlerine sahiptir ve bu değer sinyal frekansının bir fonksiyonudur [82-84].

Ayrıca, Eş. 3.1 ve 3.2 denklemlerinde yer alan τ iyon ömrünü, R pompalama oranını ve p = N1 + N2 Er3+ iyonunun birim hacim başına yoğunluğunu ifade etmektedir.

Yapmış olduğumuz üç aşamalı ve altı geçişli çalışmanın ilk çift geçişlik kısmı için W12 ve W21 denklemleri Eş. 3.3 ve 3.4 [80],

$$W_{12} = \frac{\sigma_{SA}(\lambda_S)\Gamma_S}{hV_SA} (P_{S1}^{+} + P_{S1}^{-} + P_{ASE1}^{+} + P_{ASE1}^{-}) \quad (3.3)$$

$$W_{21} = \frac{\sigma_{SE}(\lambda_S)\Gamma_S}{hV_SA} (P_{S1}^{+} + P_{S1}^{-} + P_{ASE1}^{+} + P_{ASE1}^{-}) \quad (3.4)$$

İkinci çift geçişlik kısım için Eş. 3.5 ve 3.6 denklemlerinden,

$$W_{12} = \frac{\sigma_{SA}(\lambda_S)\Gamma_S}{hV_SA} (P_{S2}^{+} + P_{S2}^{-} + P_{ASE2}^{+} + P_{ASE2}^{-} + P_{ASE1}^{-}) \quad (3.5)$$

$$W_{21} = \frac{\sigma_{SE}(\lambda_S)\Gamma_S}{hV_SA} (P_{S2}^{+} + P_{S2}^{-} + P_{ASE2}^{+} + P_{ASE2}^{-} + P_{ASE1}^{-}) \quad (3.6)$$

Üçüncü ve son çift geçiş denklemleri ise Eş. 3.7 ve 3.8 eşitliklerinden

$$W_{12} = \frac{\sigma_{SA}(\lambda_S)\Gamma_S}{hV_SA} (P_{S3}^{+} + P_{S3}^{-} + P_{ASE3}^{+} + P_{ASE3}^{-} + P_{ASE1}^{-} + P_{ASE2}^{-}) \quad (3.7)$$

$$W_{21} = \frac{\sigma_{SE}(\lambda_S)\Gamma_S}{hV_SA} (P_{S3}^{+} + P_{S3}^{-} + P_{ASE3}^{+} + P_{ASE3}^{-} + P_{ASE1}^{-} + P_{ASE2}^{-}) \quad (3.8)$$

elde edilmiştir.

Yukarıda yer alan Eş. 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8 eşitliklerinde, $\sigma_{SA}(\lambda_S)$ ve $\sigma_{SE}(\lambda_S)$ giriş sinyal frekansındaki (V_S) uyarılmış soğurum ve yayılım kesitlerini ifade eder. Pompa sinyal frekansında (V_P) pompa sinyalinin soğurum ve yayılım kesitleri ise $\sigma_{PA}(\lambda_P)$ ve $\sigma_{PE}(\lambda_P)$ simgeleri ile gösterilmektedir.

V_S ve V_P parametreleri sırasıyla giriş sinyal frekansı ve pompa lazer sinyali frekansıdır. A, erbiyum iyonlarının dağılımının etkili kesit alanı; h ise plank sabitidir [85-86]. Γ_S ve Γ_P, erbiyum iyonlarının sinyal ışık alanı ve pompa ışık alanı modlarındaki örtüşme faktörünü temsil etmektedir. P_S^{+}, P_{ASE}^{+}, P_{ASE}^{-} değerleri ise sırasıyla EKFY'nin ileri yönlü giriş sinyal gücü ile ileri ve geri yönlü uyarılmış kendiliğinden yayılım gücüdür.

$\frac{P_P\Gamma}{Ahv}$ denklemi tek bir Er^{3+} iyonunun E_2 seviyesine uyarılma olasılığını ifade eder. (3.9)

Eş. 3.9 denklemindeki P_P pompa sinyali gücünü, hv ise bir tek pompa fotonunun enerjisini belirtir.

Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayılım (YKY) ile yakından alakalı olan ve yükselteç tasarımlarının çıkış etkinliğini direkt olarak etkileyen Gürültü faktörü (NF), sinyalin belirli bir ortamda yayılmasının sonucu olarak ortaya çıkan gürültünün bir ölçüsü olarak kullanılır [87-90].

$$\mathrm{NF}\ (\lambda_S) = \frac{1+2\eta_{SP}(G-1)}{G} \tag{3.10}$$

Çıkış kazancının 20 dB'in üzerinde olduğu durumlarda, Eş. 3.10, NF (λ_S) ~ $2\eta_{SP}$ eşitliğine evrilir. (3.11)

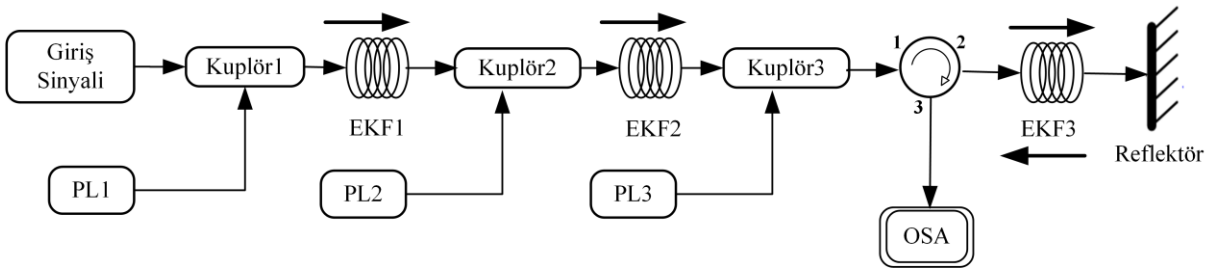
$$\eta_{SP} = \frac{\eta N_2}{\eta N_2 + N_1} \tag{3.12}$$

Burada η_{SP} kendiliğinden yayılım faktörü ve $\eta = \sigma_{SE} / \sigma_{SA}$ olarak ifade edilir.

Sonuç olarak, çok çeşitli değişkenler giriş ve çıkış sinyal güçleri arasındaki farkı etkilemektedir. Bunlardan en önemlileri; EKF'nin soğurum ve yayılım kesit parametreleri, EKF uzunluğu, fiberin öz kısmındaki iyon yoğunluğu, pompalama gücü ile giriş sinyalinin güç ve dalga boyu olarak sıralanabilir.

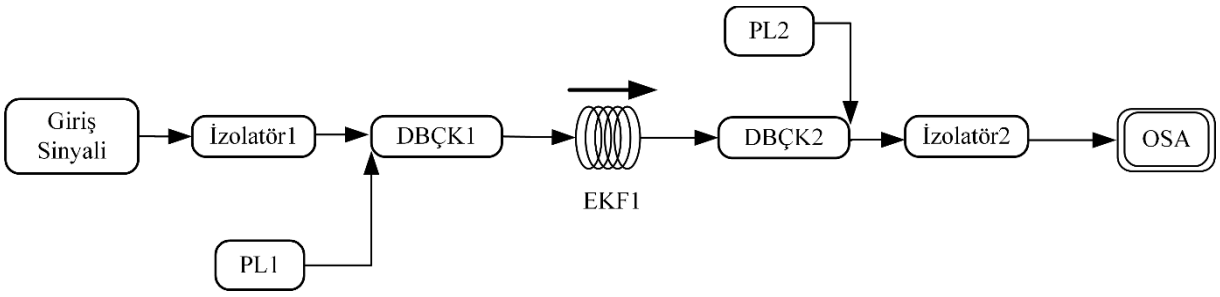
3.3. Çok Aşamalı ve Çok Geçişli Uygulama Örnekleri

Akhter ve arkadaşları tarafından [14], Şekil 3.3.'te yer alan üç aşamalı ve dört geçişli EKFY düzeneği tasarlanmıştır. Sistemde, 1480 nm dalga boyunda üç ayrı pompa lazeri, DalgaBoyu Bölmeli Çoğullayıcı Kuplör (DBÇK), birer adet optik sirkülatör ve yansıtıcı ayna kullanılmış olup, yapılan 5 ayrı test sonucunda -50 dBm giriş sinyali ve 1550 nm dalgaboyunda pompa güçleri sırasıyla 100:190:240 olduğunda, EKFY'nin maksimum verimlilik sağladığı gözlenmiştir. Çıkışta, kazanç ve gürültü faktörü değerleri sırası ile 72.86 dB ve 5.06 dB olarak gözlemlenmiştir. Fiber uzunluklarına yönelik optimizasyonun da yapıldığı bu çalışmada her bir fiberin optimum uzunluğu 15 m gibi oldukça uzun boylarda bulunmuştur. Düzeneğin, 15'er metrelik üç ayrı EKFY kullanıldığı dikkate alındığında toplamda 45 m'lik fiber uzunluğu ile uygun maliyetli bir yükselteç tasarımı olmadığı değerlendirilmektedir.

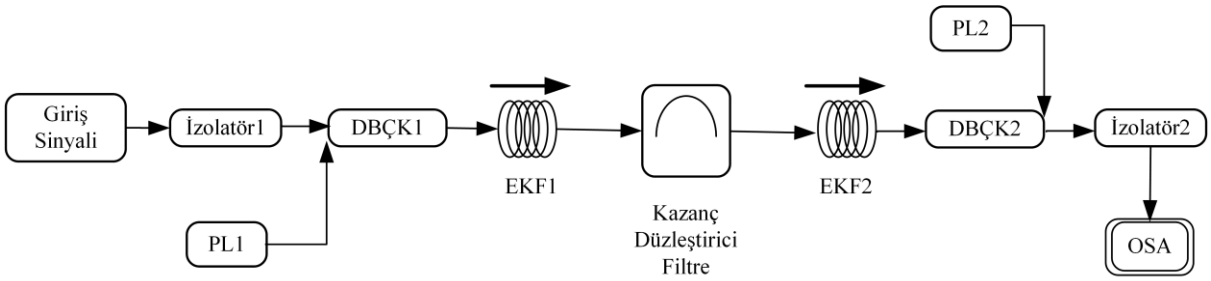


Şekil 3.3. 1480 nm ile ileri yönde pompalanmış üç aşamalı ve dört geçişli EKFY düzeneği

Yücel ve Göktaş; tek aşamalı ve iki geçişli EKFY tasarımını, EKF'ler arasında kazanç düzleştirici filtre bulunan iki aşamalı ve iki geçişli EFKY düzeneği ile karşılaştırmışlardır [39]. Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'teki düzeneklerde de görüldüğü üzere giriş sinyali C band boyunca uygulanmış, pompa lazerleri sırası ile 980 nm ve 1480 nm olarak belirlenmiş olup, her biri 125 mW gücünde seçilmiştir. Farklı dalga boylarında pompa lazeri seçilmesinin nedeni ise ilk geçişte 980 nm pompa lazeri ile yüksek ters birikme sağlayarak düşük gürültü faktörü oluşturmak; akabinde 1480 nm pompa lazeri ile sistem çıkışında daha yüksek kazanç sağlamaktır. Tek aşamalı düzenekte EKF uzunluğu 9 m iken, çift aşamalı tasarımda EKF'ler sırasıyla 4 m ve 5 m olarak optimize edilmiştir. Kazanç düzeltici filtrenin kullanıldığı düzenek daha iyi sonuç verirken 33 nm band genişliği ve 25 dB çıkış kazancı sağlayan bir tasarım elde edilmiştir.

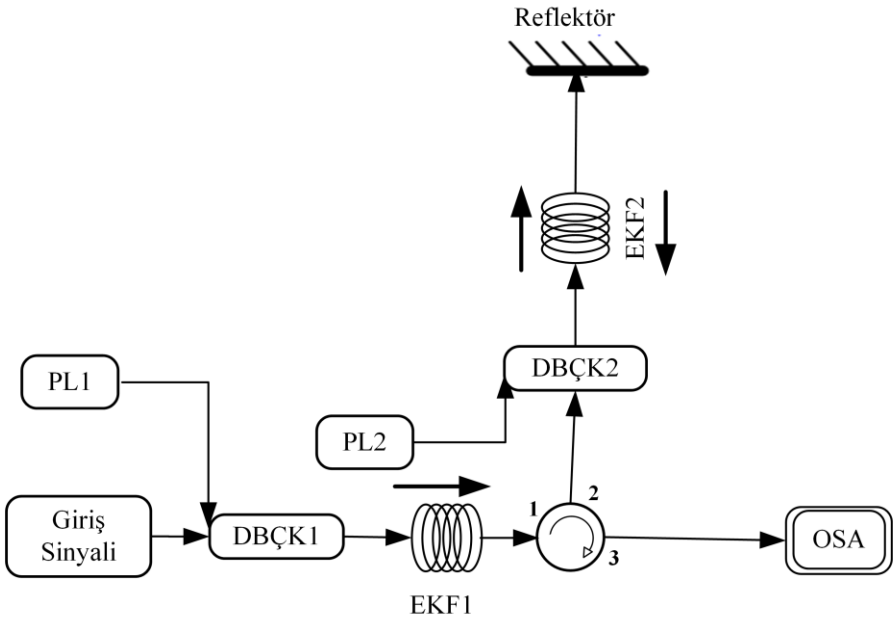


Şekil 3.4. İleri yönde 980 nm, ters yönde 1480 nm ile pompalanmış tek aşamalı ve çift geçişli C band EKFY düzeneği

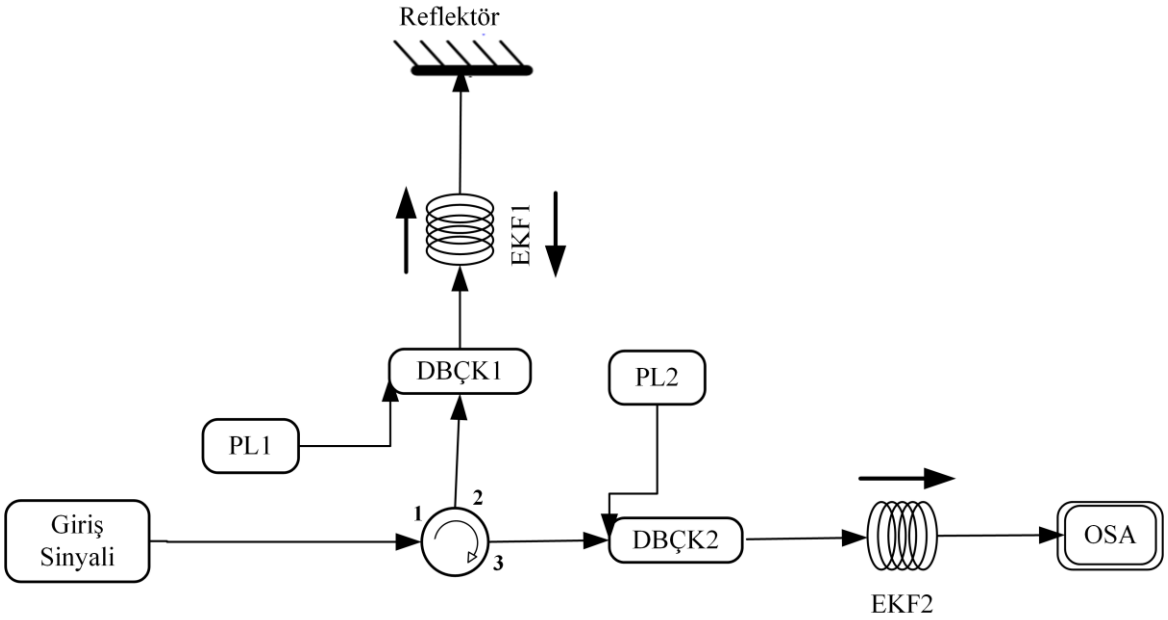


Şekil 3.5. İleri yönde 980 nm, ters yönde 1480 nm ile pompalanmış çift aşamalı ve çift geçişli C band EKFY düzeneği

Naji ve arkadaşları [15], teorik analize de yer verdikleri çalışmalarında Şekil 3.6. ve Şekil 3.7'de yer almakta olan iki farklı konfigürasyonda iki aşamalı ve üç geçişli EKFY test sonuçlarını kıyaslamıştır. Sistemlerde, 1550 nm dalga boyunda giriş sinyali, iki ayrı 100 mW gücünde 1480 nm dalga boyunda pompa lazeri, iki adet DBÇK ile birer adet optik sirkülatör ve yansıtıcı ayna kullanılmıştır. Test sonuçlarında farklı uzunluklardaki EKF'ler için kazanç ve gürültü değerleri ölçülmüştür. En başarılı çıkış kazancı ve gürültü faktörü sonuçları EKF uzunlukları 10'ar m iken sağlanmıştır. Gürültü tarafında A ve B konfigürasyonları neredeyse aynı değerleri vermiş olmasına rağmen (6,71 dB, 6,69 dB); kazanç değerlerinde B konfigürasyonu, A konfigürasyonundan daha yüksek performans göstermiştir (55 dBm, 51 dBm).



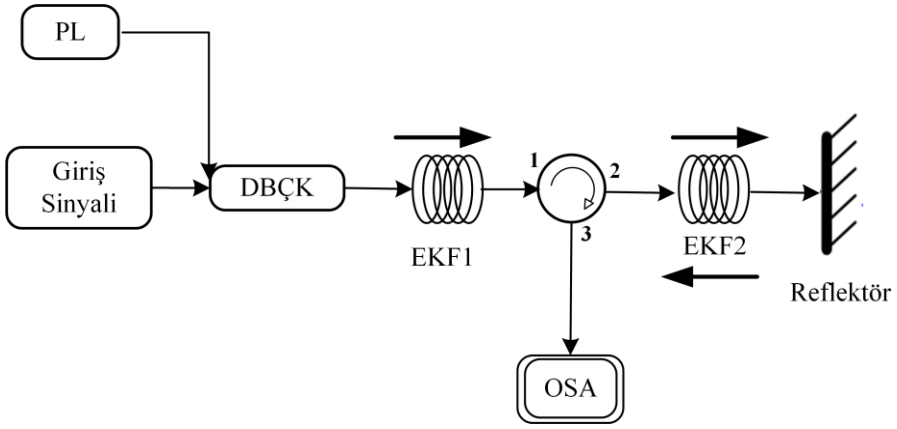
Şekil 3.6. İleri yönde 1480 nm ile pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli C band EKFY Konfigürasyon A düzeneği



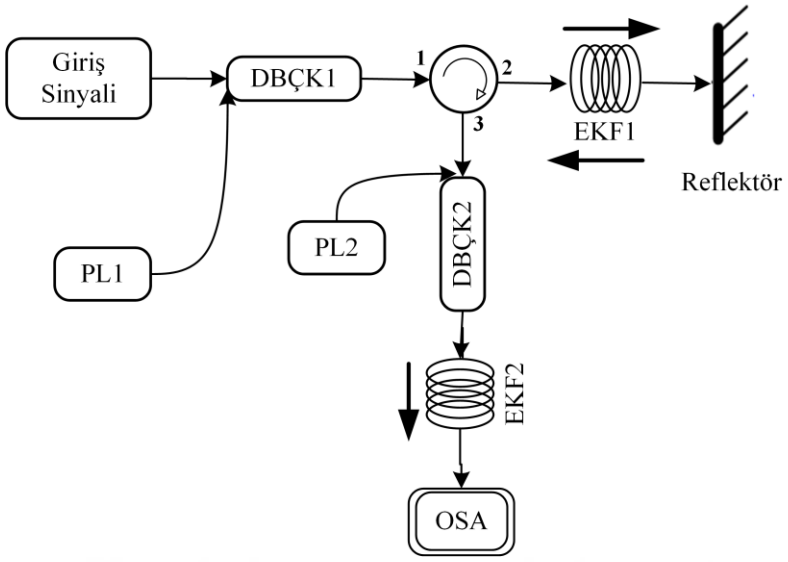
Şekil 3.7. İleri yönde 1480 nm ile pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli C band EKFY Konfigürasyon B düzeneği

Akhter ve arkadaşları bir başka çalışmalarında [16], iki aşamalı ve üç geçişli iki farklı konfigürasyon ile üç aşamalı ve üç geçişli konfigürasyonu karşılaştırmalı olarak ele almıştır. İki aşamalı ve üç geçişli tasarımlarla ilgili olarak; Konfigürasyon A Şekil 3.8.'de, Konfigürasyon B Şekil 3.9.'da, üç aşamalı ve üç geçişli tasarım ise Şekil 3.10.'da yer almaktadır. Çalışmada, pompa lazeri ve giriş sinyal güçleri değiştirilerek kazanç ve gürültü faktörleri incelenmiştir. Ayrıca fiber boyları değiştirilerek optimum fiber uzunluğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Farklı test adımlarının takip edildiği çalışmada, -33 dBm sinyal gücü 1550 nm dalga boyunda pompa güçleri artırıldığında kazanç ve gürültü ilişkisi incelenmiş ve A, B ve C konfigürasyonları için ideal pompa güç aralıkları sırasıyla 80:120, 10:50 ve 70:110:160 mW değerleri olarak elde edilmiştir. Ayrıca, -33 dBm sinyal gücü 1550 nm dalga boyunda pompa güçleri 10:50:100 olduğunda gürültü değerleri sırası ile 3.24, 3.37 ve 3.81 dB olmaktadır. İlave olarak, PL1:10 mW, PL2: 50 mW, PL3:100 mW ve 1550 nm dalga boyunda sinyal gücü ve kazanç eğrisi incelendiğinde en başarılı dizaynlar sırasıyla A, B ve C konfigürasyonlarıdır. Örneğin; -5 dBm giriş sinyali için kazanç değerleri sırası ile 35.14, 21.63 ve 26.62 dBm'dir. Bununla beraber, PL1:10 mW, PL2: 50 mW, PL3:100 mW ve 1550 nm dalga boyunda sinyal gücü ve gürültü eğrisi incelendiğinde -50 dBm sinyal gücünde gürültü değerleri sırası ile 3.10, 3.22 ve 3.19 dBm olarak ölçülmüştür. Her 3 dizayn için de optimum sinyal gücü -50 ile -35 dBm arası olarak belirlenmiştir. Son olarak ise, 10 mW

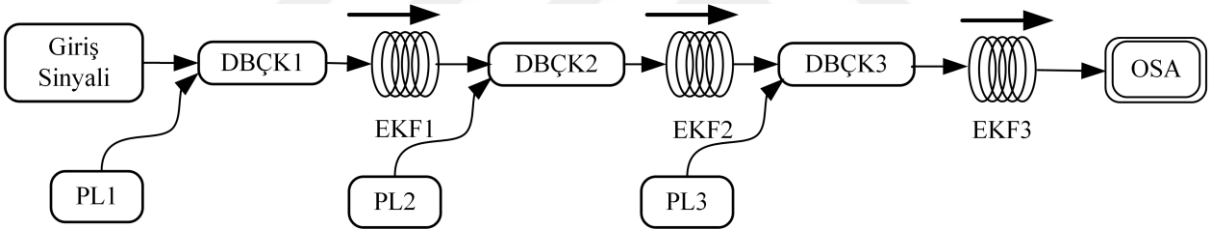
pompa gücü ve 1550 nm dalga boyunda erbiyum iyon yoğunluğu ve EKF uzunluğu eğrisi incelendiğinde sırasıyla Konfigürasyon A'daki tek geçişli ve çift geçişli EKF uzunlukları 15 m ve 14 m; Konfigürasyon B'deki çift geçişli ve tek geçişli EKF uzunlukları 15 m ve 14 m; Konfigürasyon C'deki tek geçişli EKF uzunlukları ise 15 m, 15 m ve 14 m olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, matematiksel modelin de ele alındığı bu çalışmada karşılaştırılan üç sistem içinde kazanç ve gürültü faktörleri ele alındığında en uygun çözümün Konfigürasyon A olduğu belirtilmiştir. Yüksek çıkış kazanç sağlamakla beraber önerilen tasarımın, yüksek fiber uzunlukları nedeni ile (15 m ve 14 m) maliyet etkin bir çözüm olmadığı değerlendirilmektedir.



Şekil 3.8. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon A düzeneği

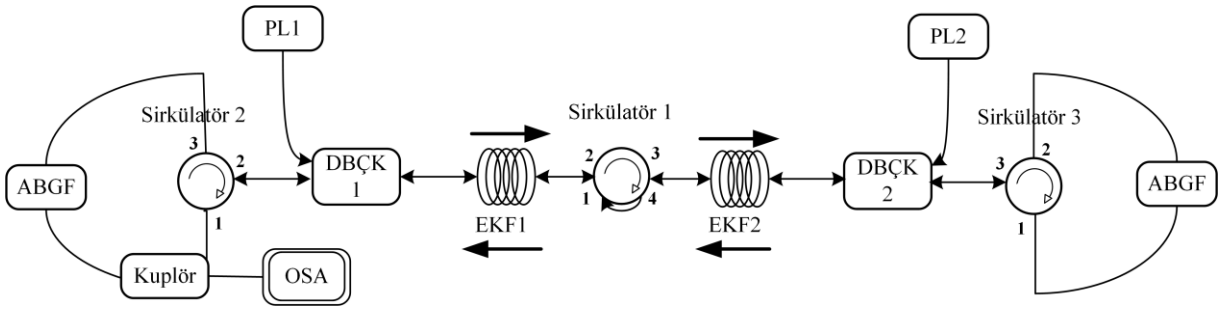


Şekil 3.9. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon B düzeneği



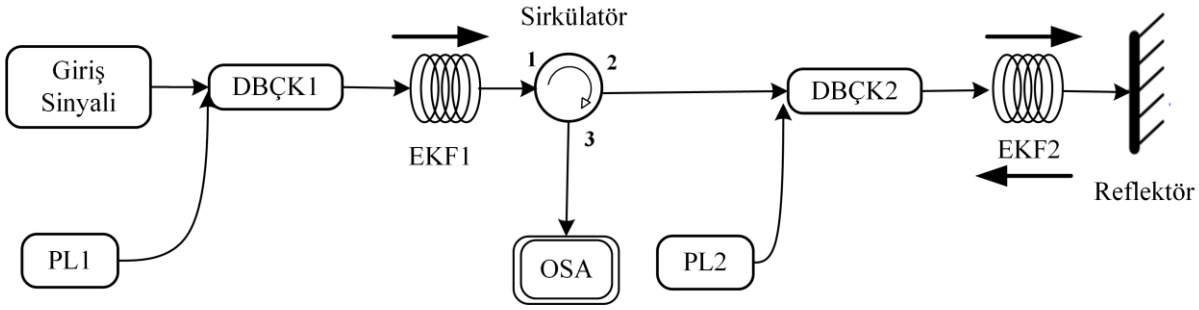
Şekil 3.10. İleri yönlü pompalanmış üç aşamalı ve üç geçişli EFKY düzeneği

Sellami ve arkadaşları [17], iki aşamalı ve dört geçişli bir EKFY sistemi tasarlamıştır. Şekil 3.11'de görülen tasarımda, birer adet 10 m ve 15 m EKF, bir adet 4 portlu sirkülatör, ikişer adet ise 3 portlu sirkülatör, DBÇK, Ayarlanabilir Bant Geçirici Filtre (ABGF) ve pompa lazeri kullanılmıştır. Giriş sinyalinin -50 dBm güç ve 1550 nm dalga boyunda, pompa güçlerinin ise 10 mW olduğu durumda 41 dB kazanç elde edilmiştir. En yüksek kazanç ise, 62 dB ile ikinci aşamadaki pompa gücünün 220 mW ve sinyal gücünün -50 dBm olduğu durumda sağlanmıştır. Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayılım (YKY), iki tane ABGF yardımıyla bastırılmıştır. Çalışmada dikkat çeken nokta, gürültü figürünün 7 dB'den aşağı düşürülememesi ve çok sayıda optik komponent kullanılması nedeni ile oluşan yüksek tasarım maliyetidir.

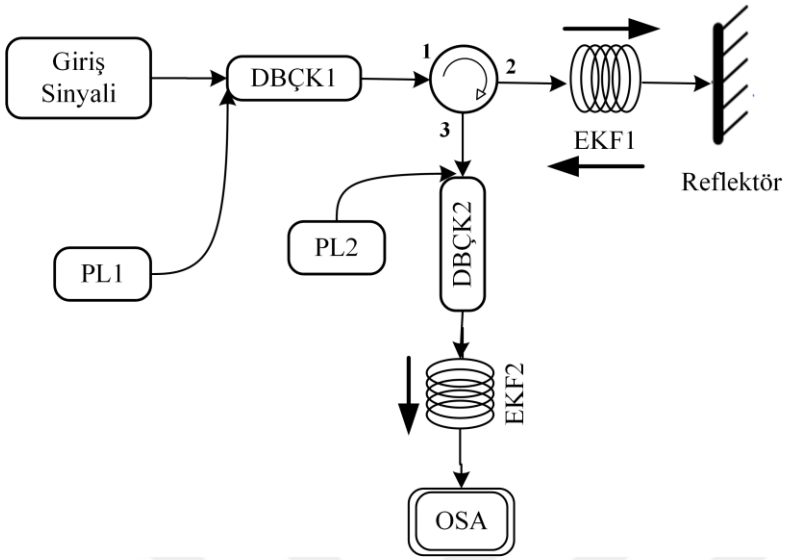


Şekil 3.11. İleri yönde pompalanmış iki aşamalı ve dört geçişli ABGF'li EFKY konfigürasyonu

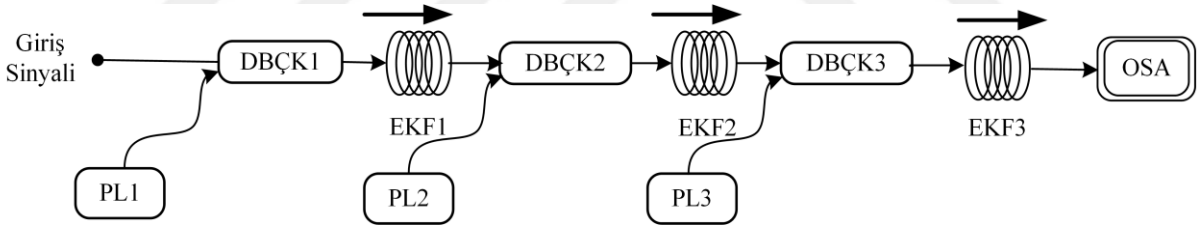
Singh ve Marwaha [18], üç geçişli yükselteç tasarımları kapsamında Şekil 3.12., Şekil 3.13. ve Şekil 3.14'te yer alan üç ayrı EKFY konfigürasyonunu çalışmıştır. Pompa güç oranları değiştirilerek kazanç ve gürültü faktörleri incelendikten sonra sinyal gücü değişimine göre kazanç ve gürültü değişimi gözlenmiştir. Son olarak da erbiyum iyon yoğunluğuna göre optimum EKF uzunlukları hesaplanmıştır. Her bir tasarımda; giriş sinyali, pompa lazeri sinyali, DBÇK, EKF ve sirkülatörler kullanılmıştır. Pompa güç oranları sırasıyla 150:240:290 mW olarak ayarlandığında çıkış kazançları yine sırasıyla 78.72, 59.55 ve 58.47 dBm olarak ölçülürken, en düşük gürültü faktörü değeri 3.29 dBm olarak Konfigürasyon 1 için ölçülmüştür. Ayrıca, sinyal gücü değiştirilerek kazanç faktörü incelendiğinde en iyi sonucu -40 dBm giriş sinyalinde Konfigürasyon 3 verirken; sinyal gücü değiştirilerek gürültü faktörü incelendiğinde en düşük değer Konfigürasyon 2'de gözlenmiştir. Tüm test sonuçları dikkate alındığında üç ayrı dizayn arasından Konfigürasyon 1'in en uygun çözüm olduğu düşünülmüştür. Fakat bu konfigürasyonda tasarım maliyetine direkt etki eden optimum EKF uzunluğu toplamda 30 m (15 m+15 m) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.12. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon 1 düzeneği



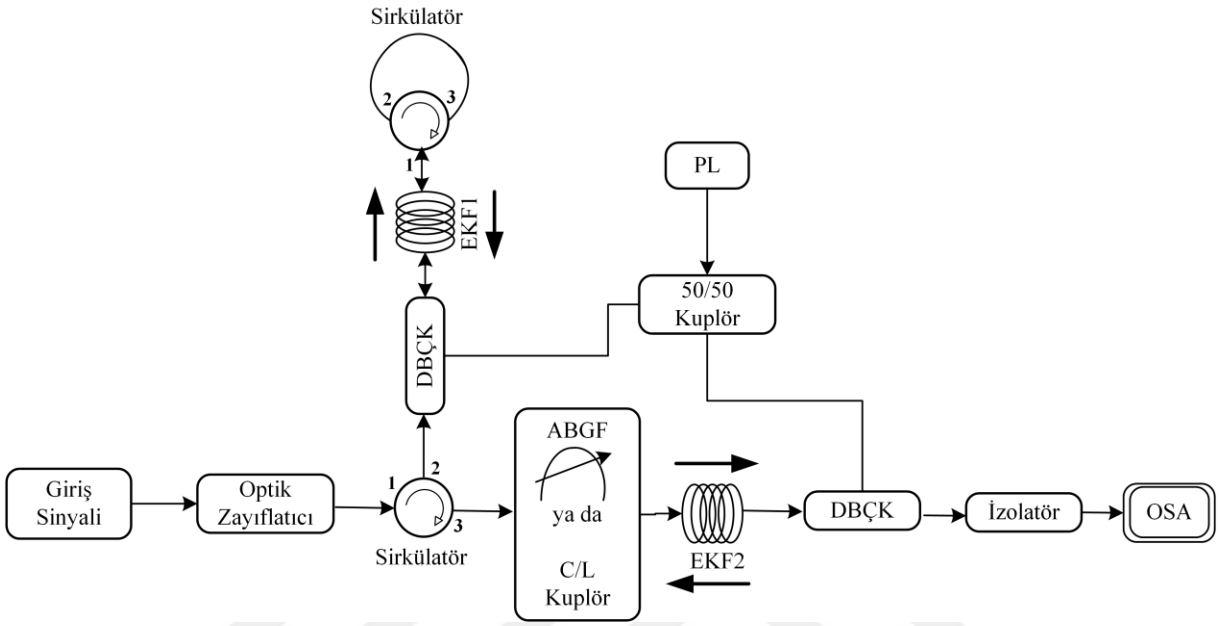
Şekil 3.13. İleri yönlü pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli EFKY Konfigürasyon 2 düzeneği



Şekil 3.14. İleri yönlü pompalanmış üç aşamalı ve üç geçişli C band EFKY düzeneği

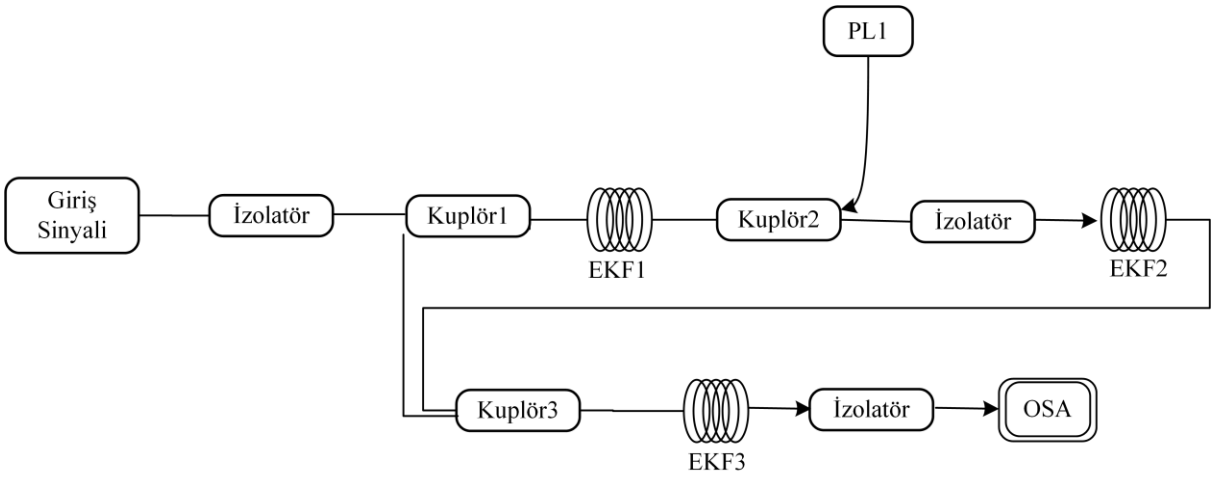
Mansoori ve Al-Ghaithi [19], verimli ve ekonomik bir yüksek kazançlı L-bant EKF yükselteç yapısının performansını deneysel olarak araştırmıştır. Farklı yükselteç yapıları için yükseltecin kazanç ve gürültü faktörü değişimleri incelenmiştir. Şekil 3.15.'te yer alan sistemde, sinyal kaynağı, optik zayıflatıcı, ikişer adet optik sirkülatör ve DBÇK, pompa lazeri, iki adet EKF, 3 dB optik birleştirici, optik izolatör ve kendi kendine doyma etkisini azaltmak ve C-band YKY gürültüsünü bastırmak için optik filtre kullanılmıştır. Tasarlanan yükselteç, yalnızca 8 m uzunluğunda EKF kullanarak -50 dBm giriş sinyali gücünde 4,8 dB gibi düşük bir gürültü faktörü ile 56,6 dB'lik bir sinyal kazancı elde etmiştir. Bu durum, giriş sinyali frekansı olan 1570 nm dalga boyundaki yüksek soğurum ve yayılımdan kaynaklanmaktadır. -50 dB giriş sinyalinde C/L kuplör kullanıldığında hiçbir optik eleman

kullanılmadığı duruma göre 6 dB; ABGF kullanıldığında ise hiçbir optik eleman kullanılmadığı duruma göre 13 dB kazanç artışı gözlenmiştir.



Şekil 3.15. İleri ve geri yönde 980 nm ile pompalanmış iki aşamalı ve üç geçişli L band EFKY düzeneği

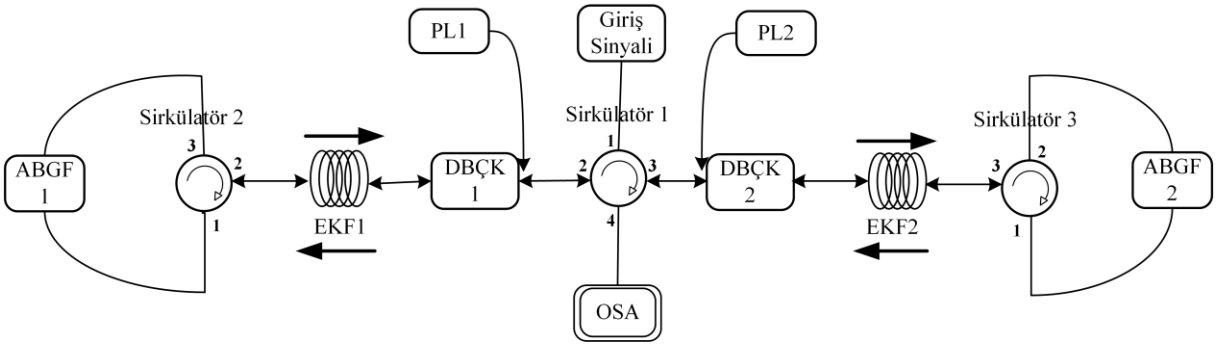
Yücel ve arkadaşları [42], Şekil 3.16'da görülen üç aşamalı ve üç geçişli L band EKFY tasarımında maksimum kazanç, minimum gürültü faktörü ve minimum kazanç dalgalanması için her bir aşamadaki EKF boyları ve pompa lazeri güçlerini optimize etmiştir. EKF boyları 980 nm için sırasıyla, 5.5 m, 66.5 m ve 85 m iken; 1480 nm için sırasıyla 10.4 m, 65.9 m ve 90 m olarak elde edilmiştir. 980 nm-1480 nm pompa dalga boyları için, tüm L bandı boyunca sırasıyla 34.7-37.1 dB ortalama kazanç, 6.28-6.0 dB gürültü faktörü, 2.13-2.28 dB kazanç dalgalanması elde edilmiştir. Tasarımda herhangi bir kazanç düzleştirici pasif malzeme kullanılmaksızın kazanç dalgalanması kabul edilebilir bir değere düşürülmüştür.



Şekil 3.16. İleri yönde pompalanmış üç aşamalı ve üç geçişli L band EFKY düzeneği

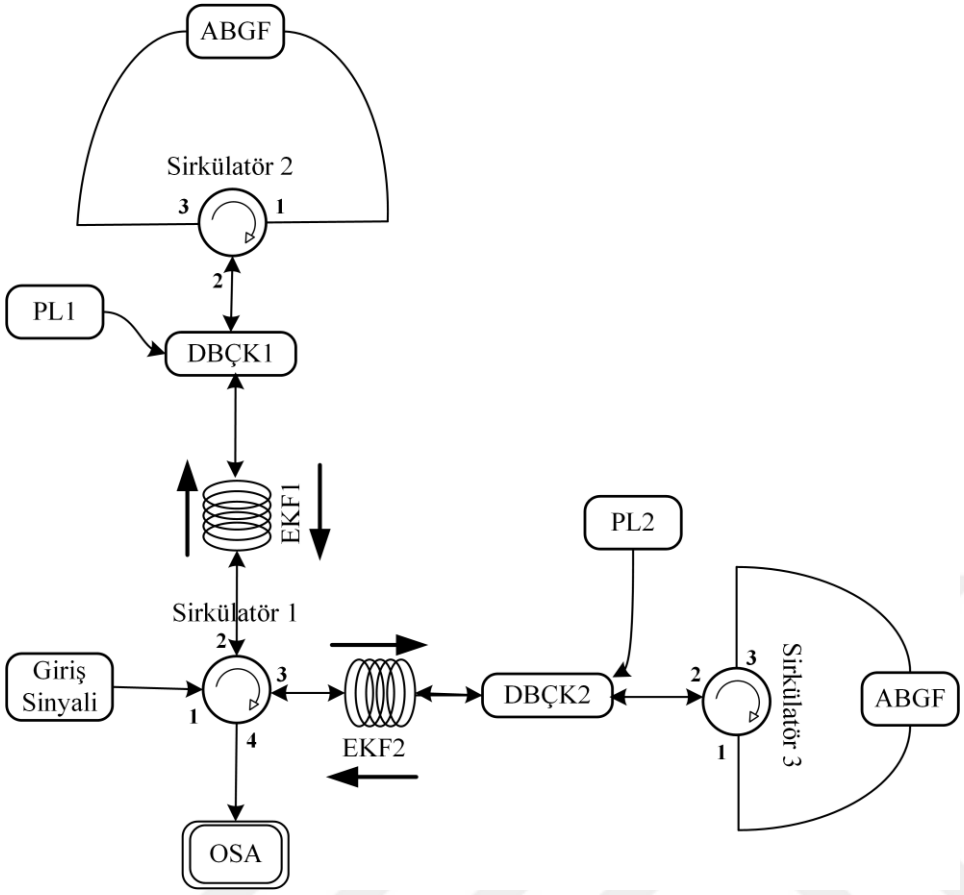
Bouzid [20], EKFY tasarımlarını dört ayrı aşamada ele almıştır. İlk aşamada, erbiyum iyonlarının atomik yapısı incelenirken; ikinci aşamada yükselteç olayını fiziksel olarak anlayabilmek için teorik analiz yapılmıştır. Üçüncü aşamada, tek aşamalı ve tek geçişli sistemden iki aşamalı ve dört geçişli sisteme kadar farklı EKFY konfigürasyonları ve bunların performans çıktıları gözlemlenmiştir. Son aşamada ise, EKFY konusu ile ilgili yapılan çalışmalar ele alınmış olup, geliştirilmeye ihtiyaç duyulan alanlar belirtilmiştir.

Eşit EKF uzunlukları ve pompa lazeri güçlerinde, 1550 nm ve -50 dBm lik giriş sinyalinde tek geçişli sistemde 20 dB olan çıkış kazancı iki aşamalı ve iki geçişli sistemde 40 dB'e yükselerek büyük bir artış göstermiştir. Pompa gücünün artırılması iki konfigürasyon arasındaki sabit farkı etkilememiştir. İki aşamalı ve dört geçişli ABGF'li tasarıma benzer giriş parametreleri uygulandığında ise 62.56 dB kazanç elde edilmiştir. Şekil 3.17'de konfigürasyonları görülen bu çalışmada, gürültü faktörüne yönelik herhangi bir değer paylaşılmamış olup, herhangi bir EKF optimizasyonu da gerçekleştirilmemiştir.



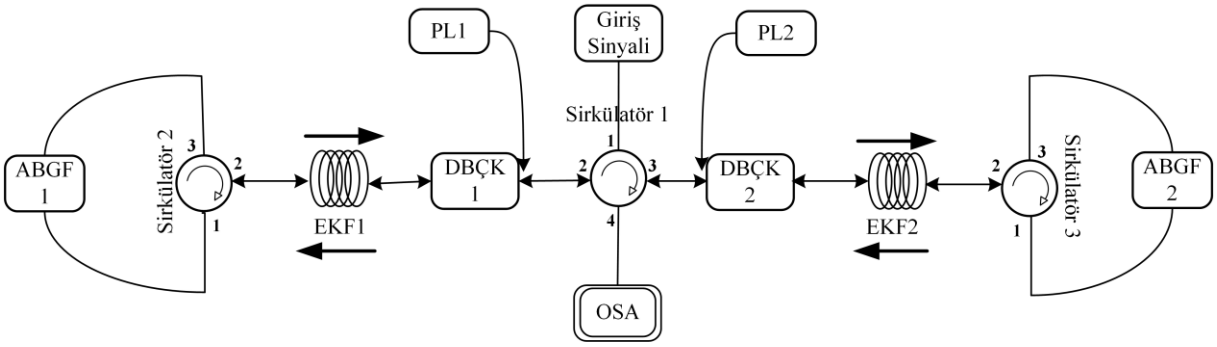
Şekil 3.17. İleri yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren C band EFKY düzeneği

Bouzid ve arkadaşları tarafından [21] iki aşamalı dört geçişli sistemin bir başka örneği Şekil 3.18'de görülen tasarım üzerinde çalışılmıştır. 1550 nm ve -50 dB giriş sinyali ile 10 mW ve 90 mW'lık pompa güçleri ve 7 m ile 10 m'lik EKF uzunluklarında ilk ve üçüncü geçişten sonra, YKY tarafından oluşturulan gürültüyü bastırmak için etkili bir yöntem olan ve konfigürasyonda yer alan ABGF'lerden geçerek Optical Spektrum Analizör (OSA)'ya ulaşan çıkış sinyalinde 54 dB kazanç gözlenmiştir. Gürültü faktörü ise yüksek bir değer olan 6 dB olarak ölçülmüştür.



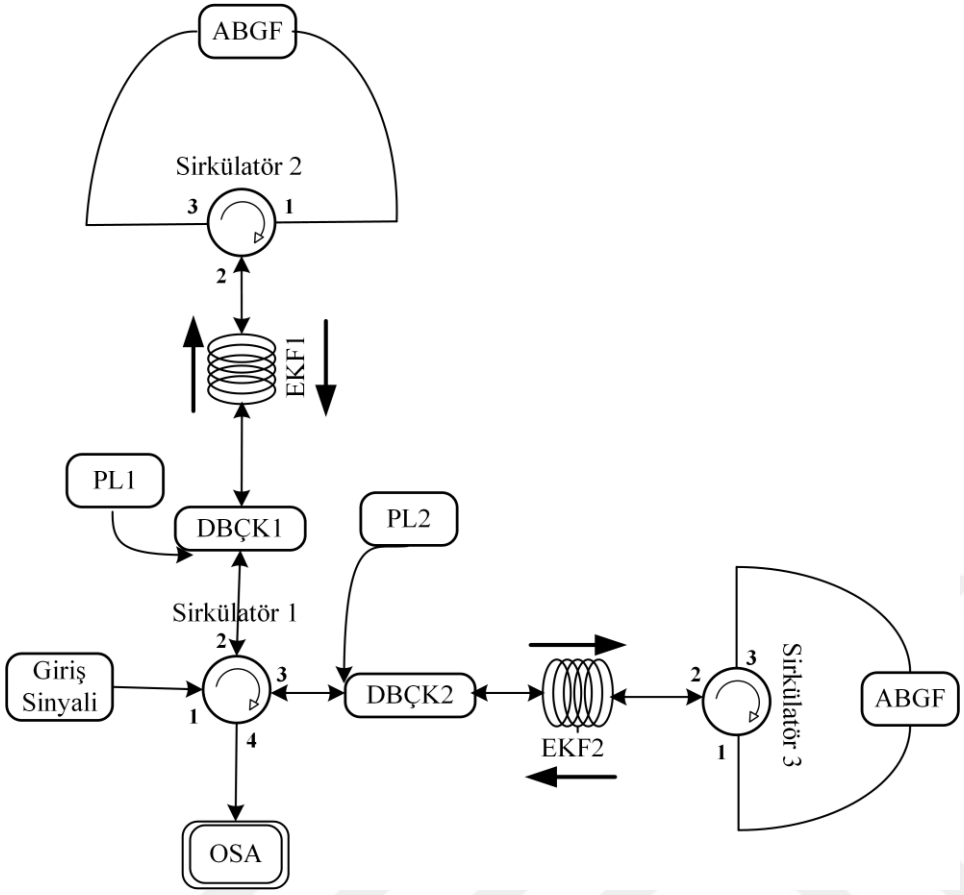
Şekil 3.18. Ters yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF'li EKFY tasarımı

Bouzid B. Tarafından [22] iki aşamalı dört geçişli EKFY örneklerinden bir başkası ayrıca Şekil 3.19'da yer alan düzenek üzerinden çalışılmıştır. Tasarımda, 1550 nm ve -50 dB giriş sinyali, 8 m ve 7 m'lik iki EKF ile 10 mW ve 165 mW'lık pompa güçlerinde 62.56 dB çıkış kazancı ve 3.98 dB gürültü faktörü değeri gözlenmiştir. EKF optimizasyonunun yapılmadığı bu çalışmada kullanılan üç sirkülatör ve iki ABGF tasarımcılar için göz önüne almaları gereken bir maliyet kalemi olarak öne çıkmaktadır.



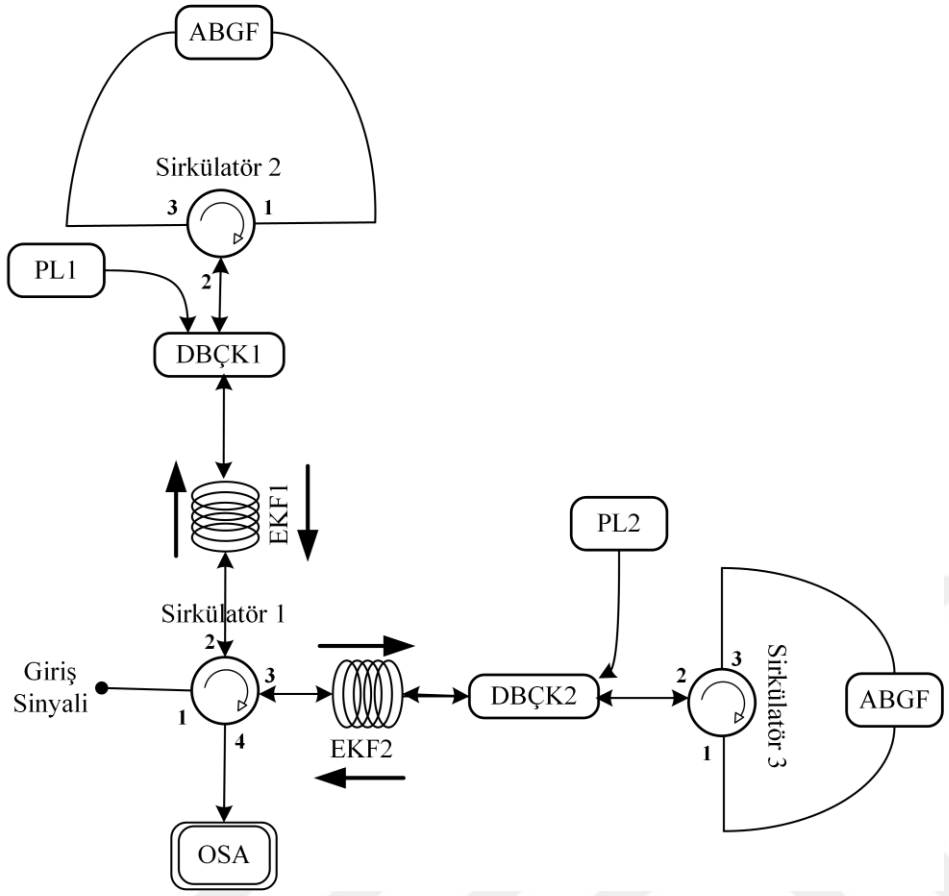
Şekil 3.19. İleri yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren EKFY tasarımı

Naji ve arkadaşları [23], -50 dB ile 0 dB arasında değişen giriş sinyali ve 10 mW ile 220 mW arası değişen tasarım parametrelerini Şekil 3.20'de de görülen iki aşamalı dört geçişli düzeneklerine uygulamışlardır. Üç adet sirkülatör ve ikişer adet ABGF ile DBÇK içeren tasarımda sırasıyla 10 m ve 15 m'lik fiberler kullanılmıştır. EKFY'nin tasarım parametreleri, EKFY'nin performansını optimize etmek için EKFY oran denklemleri modelinin sayısal simülasyonu kullanılarak optimize edilmiştir. Karşılaştırmalı analiz, önerilen teorik modelin, yayınlanan deneysel sonuçlara kıyasla benzer sonuçlara sahip olduğunu göstermiştir. 1550 nm ve -50 dB giriş sinyali ile 220 mW pompa güçlerinde önerilen EKF uzunluklarında 61 dB kazanç ve 6.39 dB gibi yüksek bir gürültü faktörü elde edilmiştir.



Şekil 3.20. İleri yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren C band EKFY tasarımı

Ali ve arkadaşları [24], ABGF ile birleşmiş bir fiber geri döngü çevrimi içeren iki aşamalı dört geçişli tasarımı Şekil 3.21'de yer alan konfigürasyon ile çalışmışlardır. Giriş sinyalinin fiber boyunca yayıldıkça verimli bir yükseltme sağlayabilmesi için YKY orta kısımda filtrelenmiştir. -50 dBm sinyal gücü uygulandığında 61 dB kazanç ve 7 dB gürültü faktörü 1550 nm giriş sinyal dalga boyunda elde edilmiştir. Tasarımdaki pompa lazeri güçleri 10 mW ve 220 mW, EKF uzunlukları ise sırasıyla 10 m ve 15 m olarak belirlenmiştir.

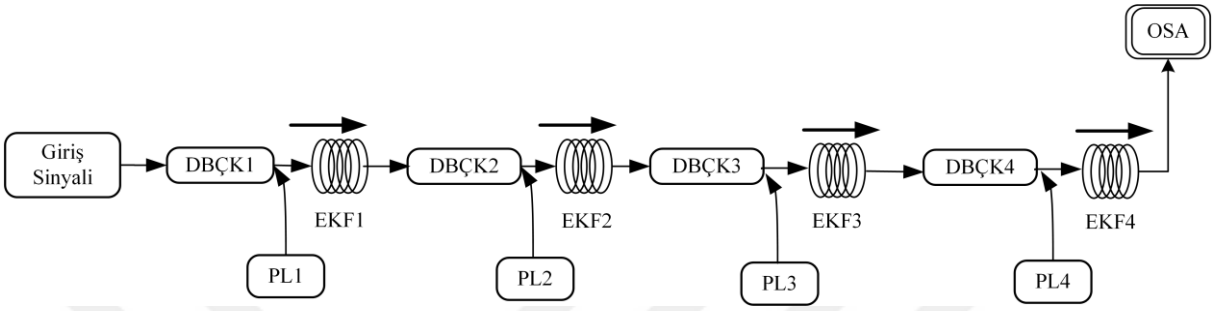


Şekil 3.21. Ters yönde 980 nm ile pompalanan iki aşamalı ve dört geçişli ABGF içeren C band EKFY tasarımı

Bouzid [25], pompa güçleri ve konfigürasyonlara göre kazanç ve gürültü faktörünün davranışsal varyasyonlarını incelediği çalışmasında tek aşamalı tek geçişli sistemden ABGF kullanılan çift aşamalı dört geçişli sistemlere kadar geniş bir konfigürasyon aralığını incelemiş olup, 59.49 dB ile en yüksek çıkış kazancı ABGF içeren çift aşamalı dört geçişli sistem ile elde edilmiş, bununla beraber 4.22 dB gürültü faktörü gözlenmiştir.

Mohamed ve arkadaşları [26], farklı EKF uzunlukları için dört aşamalı ve dört geçişli EKFY performansını matematiksel modelini de içerecek şekilde değerlendirmiştir. Farklı varyasyonların çıkış kazanç ve gürültü faktörü karakteristikleri hesaplanmış ve simülasyon aracılığı ile karşılaştırılmıştır. Sinyal bozulması olmadan en uzun mesafeyi kat edebilecek, en yüksek çıkış sinyal kazancı ve en düşük gürültü faktörü yanında minimum bit hata oranını da sağlayacak optimum sistem parametrelerini belirleyebilmek için yapılan ve Şekil 3.22'de görülen EKFY tasarımında; 1560 nm ve -26 dBm giriş sinyalinde 64.5 dB kazanç elde edilmiştir. Sistemin tasarımcı açısından dezavantaj olabilecek kısımları ise 750 mW'lık 4

adet yüksek güçlü pompa lazerine ihtiyaç duyulması ve ilk aşama için 980 nm'lik pompa lazeri kullanılırken sonraki aşamalarda 1480 nm pompa kullanılmasıdır. Ayrıca, çıkışta 3.4 dB gürültü faktörünün gözlendiği tasarımda EKF uzunlukları sırasıyla 4, 10, 5 ve 5 m olarak ölçülmüştür.



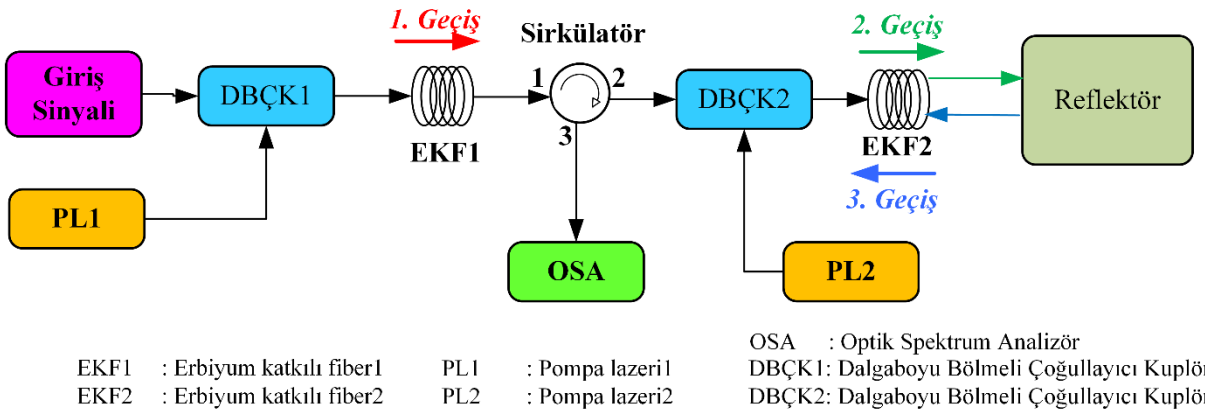
Şekil 3.22. Geri yönlü 980 nm ile pompalanmış dört aşamalı ve dört geçişli EKFY düzeneği

4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1.İki Aşamalı ve Üç Geçişli Tasarım

Tez çalışmasının bu kısmında, iki aşamalı üç geçişli EKFY [18] düzeneği kurulmuş olup, sistemin giriş parametreleri olan giriş sinyal gücü ve dalga boyu, EKF uzunlukları, pompa lazeri gücü 4 farklı ticari fiber türü (I6, I25, M5 ve M12) için de OptiSystem 16 [92] programı kullanılarak optimize edilmiş, sistem çıkışında tüm giriş sinyali spektrumu boyunca yüksek ve düzleştirilmiş kazanç ile düşük gürültü faktörü elde edilmiştir. Çizelge 4.1.'de yer alan tüm fiberlerin yayılma ve soğurma değerleri veri dosyası olarak hazırlanarak simülasyonda kullanılmıştır.

Tasarlanan iki aşamalı ve üç geçişli EKFY düzeneği Şekil 4.1'de yer almaktadır. Sistemin çalışma kurgusu incelendiğinde giriş sinyali ilk olarak 1480 nm dalga boyundaki PL1 sinyali ile DBÇK1'de birleşerek EKF1'den geçiş yapmaktadır. Yükselen sinyal Sirkülatör'ün 1 numaralı portundan girip 2 numaralı portundan çıkış yapmakta, yine 1480 nm dalga boyundaki PL2 sinyali ile DBÇK2'de birleşerek EKF2'den geçiş yapmaktadır. İkinci defa yükselen sinyal EKF2 çıkışında bulunan ve %99 yansıtma oranına sahip Reflektör'den geri dönerek EKF2'den ikinci, düzenekteki ise üçüncü ve son geçişini yapmıştır. Ardından, Sirkülatörün 2 numaralı portundan giren sinyal 3 numaralı porttan çıkarak OSA'ya ulaşmış ve kazanç/gürültü ölçümleri yapılmıştır.



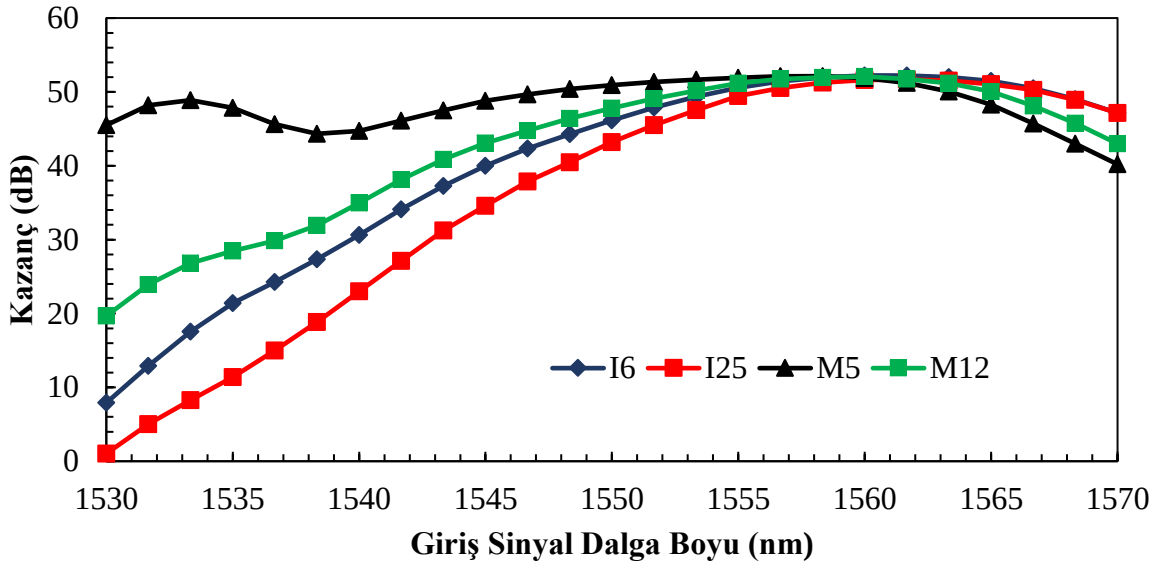
Şekil 4.1. İki aşamalı ve üç geçişli EKFY düzeneği

Çizelge 4.1. Fiber türleri parametreleri [91]

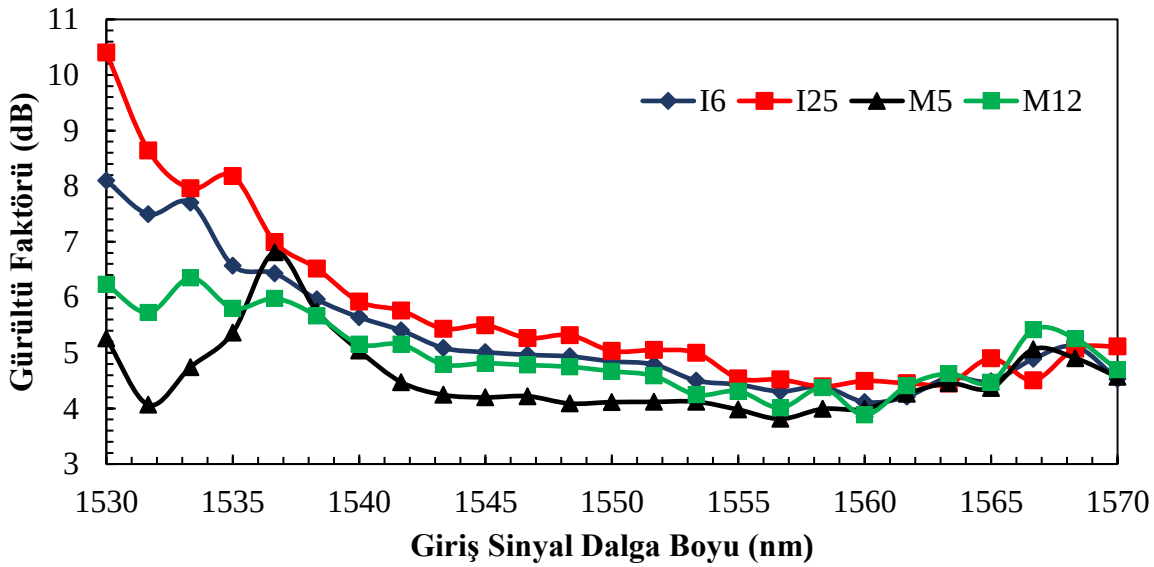
Parametreler	**I6**	**I25**	**M5**	**M12**
Nümerik Açıklık	0,23	0,24	0,23	0,22
İyon Ömrü (ms)	10	10	10	10
Çekirdek Yarıçapı (µm)	1,55	1,4	1,6	1,7
Erbiyum Yarıçapı (µm)	1,45	1,3	1,5	1,6
İyon Yoğunluğu (ppm)	440	2200	400	900
Fiber Uzunluğu (m)	20	5	12	10

Sekiz optimizasyon aşamasından oluşan bu çalışmada, her aşamada bir giriş parametresi uygun görülen değer aralığında değiştirilerek bu durumun çıkış değerleri üzerindeki etkisi gözlenmiş ve optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, dört farklı fiber türünün nümerik açıklık, iyon yoğunlukları, erbiyum yarıçapı ve çekirdek yarıçapı göz önüne alınarak tasarımlardaki fiber uzunluklarına ortalama değerler verilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bir diğer giriş parametresi olan pompa lazeri güçleri için yine ortalama değerler olan 150 mW seçilmiş olup, giriş sinyalinin gücü -30 dBm olarak ayarlanmıştır. 1530 nm – 1570 nm aralığı giriş sinyalinin dalga boyu spektrumu olarak ele alınmış olup, bu kapsamda Şekil 4.2'de yer alan kazanç ve Şekil 4.3'teki gürültü faktörü grafikleri elde edilmiştir. Bu aşamada, 1560 nm dalga boyunda I6 fiber 52,2 dB ile en yüksek çıkış kazancını sağlarken; en düşük gürültü faktörü değeri ise 3,8 dB ile M5 fiberde gözlenmiştir. Optimize edilmemiş giriş parametrelerine göre tüm dalga boyu spektrumu boyunca ortalama kazanç değerleri I26, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 39,6; 35,7; 48,3 ve 42,1 dB olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Optimize edilmemiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-kazanç değişimi



Şekil 4.3. Optimize edilmemiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-gürültü faktörü değişimi

İlk aşamada elde edilen optimum giriş sinyal dalga boyu olan 1560 nm baz alınarak ikinci aşamada giriş sinyalinin gücü -50 dBm ile 0 dBm arası 25 eşit adıma ayrılarak değiştirilmiş

ve sonuçlar gözlenmiştir. Aşamadaki en yüksek çıkış kazancı -50 dBm giriş sinyalinde 57,2 dB ile I6 fiber tasarımında elde edilirken; en düşük gürültü faktörü 0 dBm giriş sinyalinde 3,36 dB ile I25 ve M12 fiberler ile gerçekleştirilen tasarımlarda gözlenmiştir.

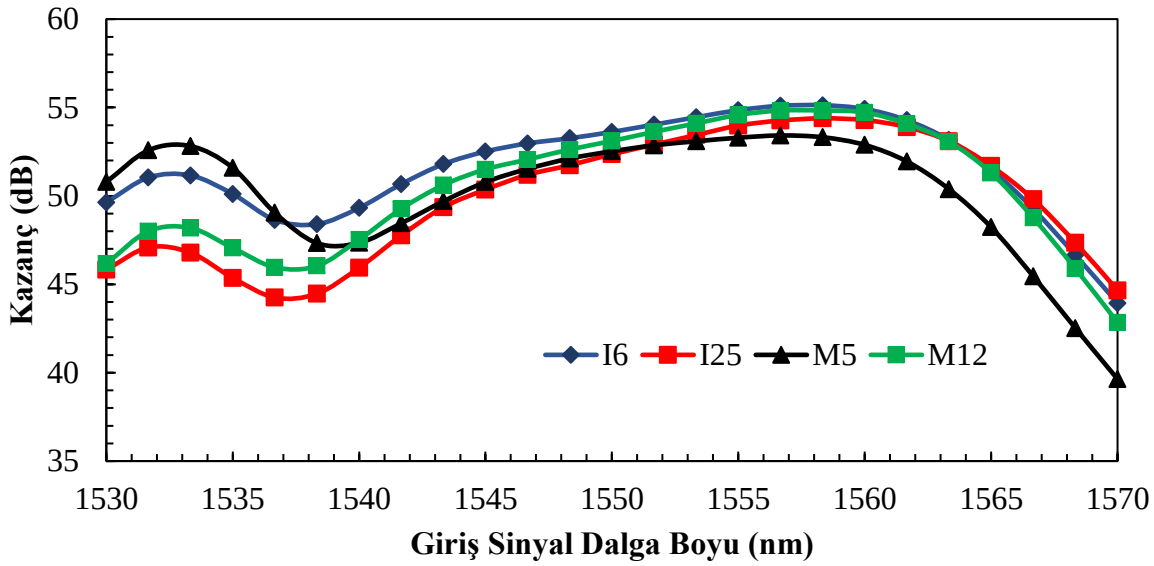
İlk fiberin uzunluğunun belirlendiği sonraki aşamada, 1560 nm dalga boyu ve -30 dBm'lik güce sahip giriş sinyali kullanılmıştır. Farklı fiber türlerinin çekirdek yarıçapı, erbiyum yarıçapı, iyon yoğunluğu ve nümerik açıklıkları göz önüne alınarak optimizasyon aralıkları belirlenmiştir. Optimizasyon öncesi, I6 ve M5 fiberleri için 1-25 m arası, I25 fiber için 1-7 m arası, M12 fiber için ise 1-15 m arası 25 eşit adımda simüle edilecek şekilde belirlenmiştir. Aşama sonunda ideal uzunluklar I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 6 m, 1,5 m, 11 m ve 3 m olarak ölçülmüştür.

Optimize pompa lazer gücünün bulunduğu dördüncü aşamada, 1560 nm ve -30 dBm'lik giriş sinyali ve bir önceki aşamada elde edilen optimize ilk geçiş fiber uzunlukları (I6 için 6 m, I25 için 1,5 m, M5 için 11 m, M12 için 3 m) kullanılmıştır. Pompa lazerinin gücü arttıkça kazancın da arttığı görülmekle birlikte; 10 mW – 1000 mW aralığındaki spektrumda pompa lazer gücü 200 mW üzerine çıktıktan sonra EKFY'lerin doyuma ulaşmaya başladıkları gözlenmiştir. Pompa gücü aralığının alt bandındaki pompa gücü-çıkış kazancı ilişkisine oranla, 200 mW gücün üzerindeki artışlarda sistem çıkışında gözle görülür kazanç artışları elde edilememeye başlamıştır. Bu nedenle bahse konu doyumun başladığı değer olan 200 mW tüm fiber tasarımları için ilk pompa lazerinin optimize değeri olarak alınmıştır.

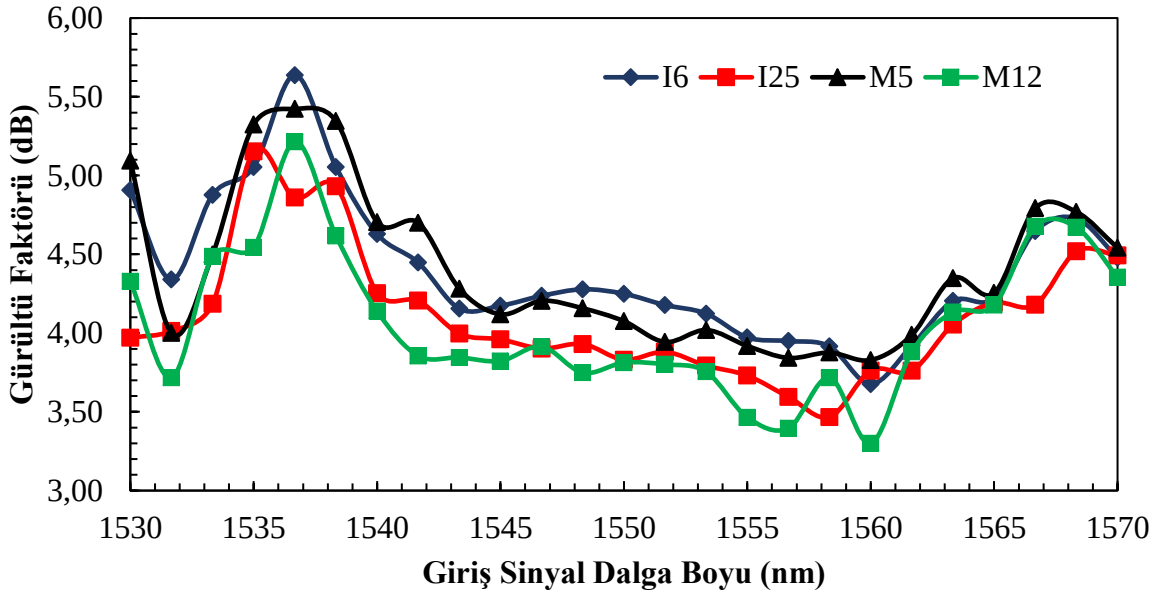
Beşinci aşamada, 1560 nm ve -30 dBm'lik giriş sinyali ve daha önceki aşamalarda belirlenmiş olan ilk geçiş fiber uzunlukları ile ilk pompa lazeri gücü kullanılarak ikinci ve üçüncü geçiş fiber uzunlukları I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 11, 2, 15 ve 4 m olarak elde edilmiştir.

İkinci ve üçüncü geçiş için kullanılan pompa lazerinin gücünün optimize edildiği aşamada, 1560 nm dalgaboyu ve -30 dBm gücünde giriş sinyali ile önceki aşamalarda belirlenen optimize fiber uzunlukları ve ilk pompanın gücü kullanılmıştır. Pompa lazerinin gücü bu aşamada 10 mW – 1000 mW arası artırılarak EKFY'lerin doyuma girdiği bölgeler gözlenmiştir. I6 fiber için 300 mW, I25 ve M5 için 200 mW ve M12 için 250 mW pompa güçleri belirlenmiştir.

Optimize edilen tüm giriş parametreleri (-30 dBm gücündeki giriş sinyali, tüm pompa ve fiber uzunlukları) ışığında gerçekleştirilen yedinci aşamada, giriş sinyali tekrar 1530 nm – 1570 nm aralığında değiştirilerek sonuçlar gözlenmiştir. Tüm fiber türlerinin kazanç grafikleri Şekil 4.4'te; gürültü faktörü grafikleri ise Şekil 4.5'te karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4. incelendiğinde tüm fiber türlerinin çıkış kazanç spektrumları benzer olmakla beraber en yüksek ortalama kazanç 51,61 dB ile I6 fiberinde elde edilmiştir. I25, M5 ve M12 fiberleri için ise spektrum boyunca ortalama çıkış kazancı 49,84; 50,14 ve 50,42 dB olarak ölçülmüştür. M5 fiber için en yüksek kazanç değeri 1555 nm'de, diğer fiber türleri için ise 1560 nm'de tespit edilmiştir. Optimize edilmemiş parametrelere göre alınan ilk aşama sonuçları ile kıyaslandığında I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 11,94; 14,1; 1,83 ve 8,32 dB ortalama kazanç artışları elde edilmiştir. Yine ilk aşamadaki kazanç dalgalanmaları ele alınacak olursa I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için 44,32; 50,65; 11,93 ve 32,41 dB olan değerler; parametreler optimize edildikten sonra sırasıyla 11,19; 10,13; 13,78 ve 11,99 dB olmuştur. Tüm fiber türleri için benzer kazanç spektrumlarının elde edilmesinin temel sebebi ise bütün tasarımlar için EKFY parametrelerinin optimize edilmiş olmasıdır ve EKFY tasarımlarındaki optimizasyonun önemini göstermektedir.



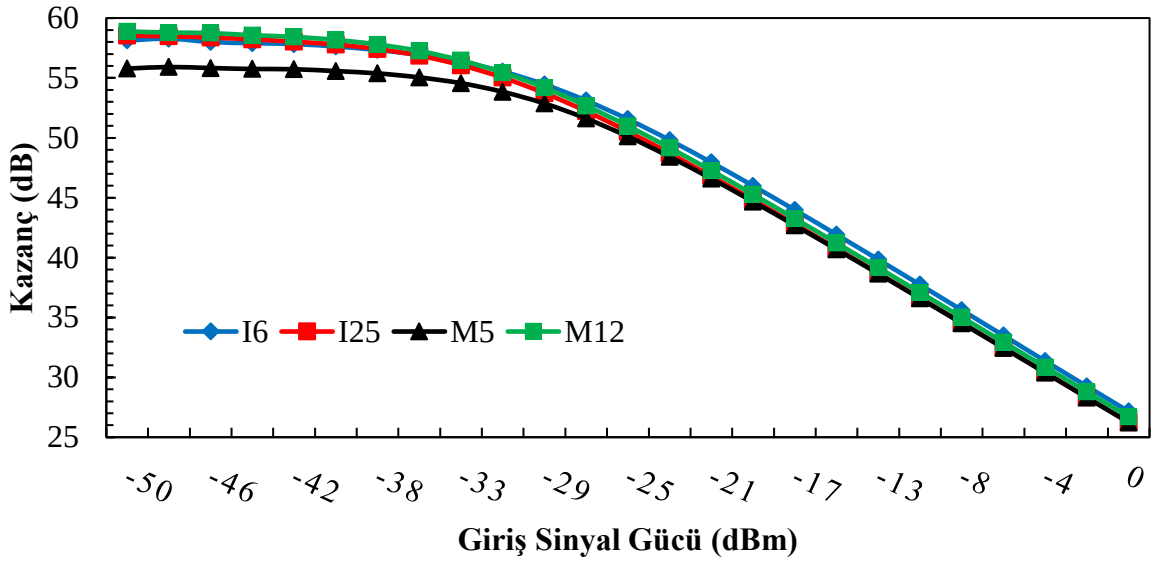
Şekil 4.4. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-kazanç değişimi



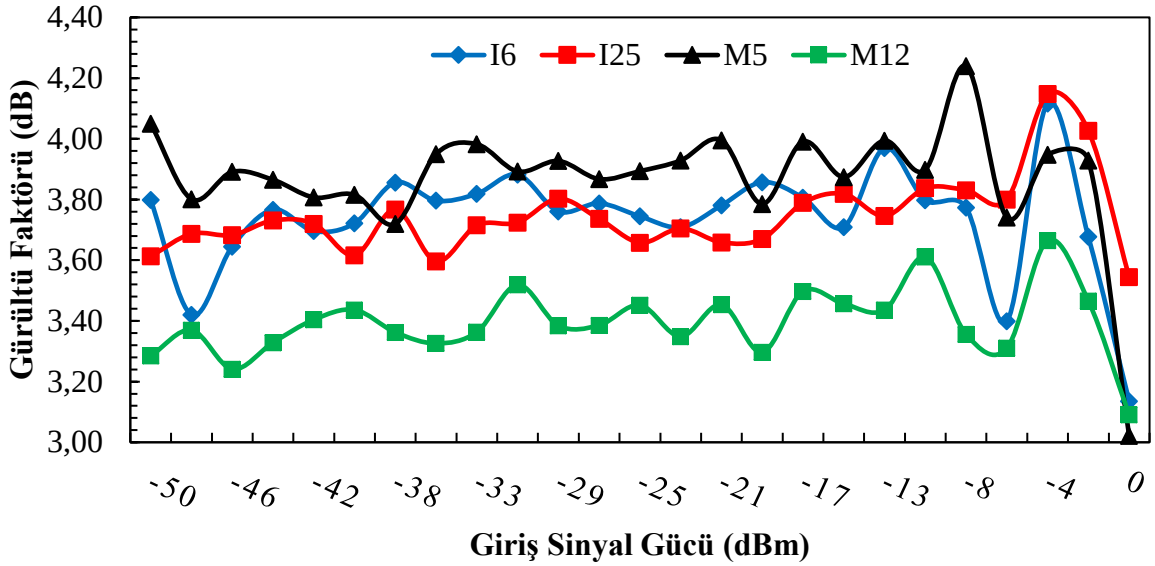
Şekil 4.5. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal dalga boyu-gürültü faktörü değişimi

Şekil 4.5'te gürültü faktörü değişimi görülmektedir. En düşük gürültü faktörü 1560 nm'de 3,29 dB ile M12 fiberinde gözlemlenirken, tüm spektrum incelendiğinde en yüksek ortalama gürültü faktörü değerleri I6 ve M5 fiberlerinde görülmüştür.

Sekizinci ve son aşamada ise optimize edilmiş giriş parametreleri baz alınarak sistemin giriş sinyalinin gücü -50 dBm ile 0 dBm arasında değiştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Simülasyon, EKF türlerinin en yüksek kazanca sahip olduğu giriş sinyali dalga boyları ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6. ve Şekil 4.7'de çıkış kazanç ve gürültü faktörü spektrumları sırasıyla yer almaktadır. Beklendiği şekilde ve Şekil 4.6'da da görüldüğü üzere, giriş sinyal gücü arttıkça çıkış kazancı azalmaktadır. Ayrıca çıkış kazancı 0 dBm'den başlayarak -30 dBm giriş sinyal gücüne kadar doğrusal olarak artış gösterirken; düşük sinyal güçlerinde (< -30 dBm) yükselteç doyum bölgesine yaklaştığı için doğrusal bölgeden çıkıldığı ve kazanç artışının yavaşladığı görülmektedir.



Şekil 4.6. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal gücü-kazanç değişimi

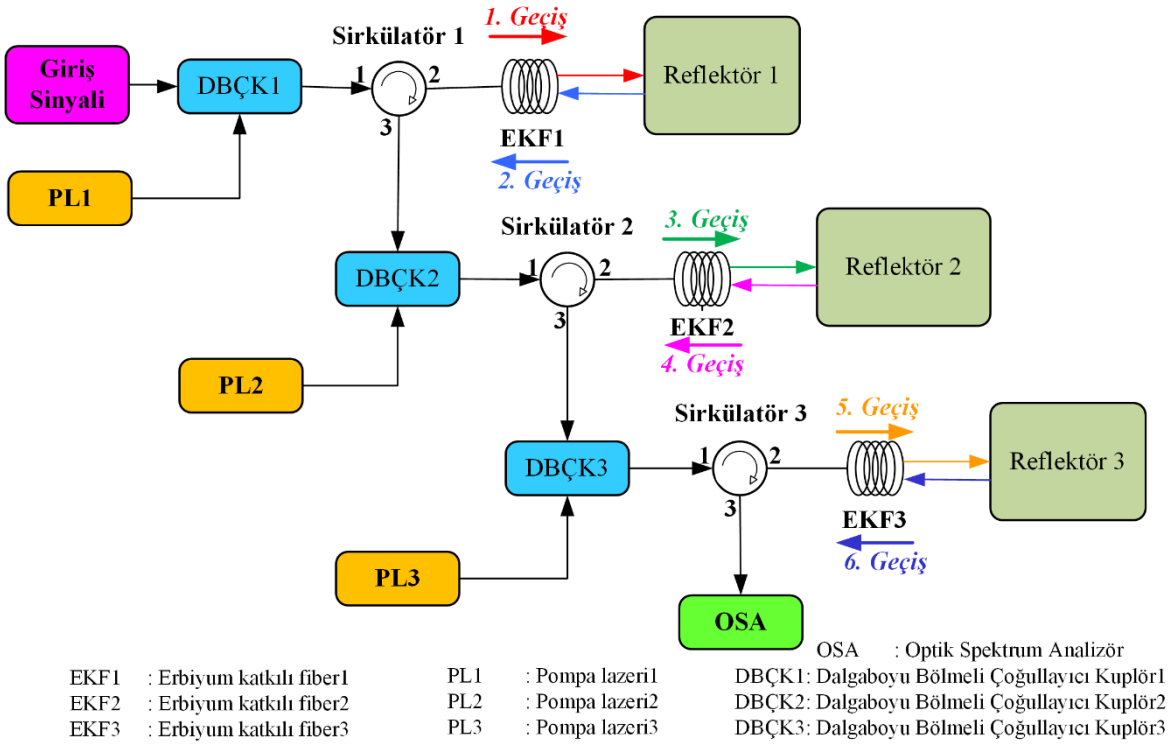


Şekil 4.7. Optimize edilmiş parametrelere göre giriş sinyal gücü-gürültü faktörü değişimi

Şekil 4.7'de ise gürültü faktörü değişimi görülmektedir. Bu grafik incelendiğinde en düşük gürültüye M12 fiberi sahiptir. Buna karşılık M5 fiberinin gürültü faktörü en yüksek değeri almaktadır. Ortalama değerler arasındaki fark ise 0,7 dB gibi düşük bir değerdir.

4.2.Üç Aşamalı ve Altı Geçişli Tasarım

Bu çalışmada, Şekil 4.8'de yer alan üç aşamalı ve altı geçişli EKFY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Matematiksel model, önerilen EKFY konfigürasyonunu karakterize etmek için geliştirilmiştir. Tasarım aşaması esnasında, EKFY'nin giriş sinyal dalgaboyu, EKF uzunlukları ve pompa lazeri güçleri optimize edilmiştir. Dört farklı ticari fiber türü (I6, I25, M5 ve M12) kullanılmış ve simülasyon boyunca sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Tek aşamalı ve çift geçişli tasarım bloğu kaskat olarak bağlanarak üç aşamalı ve altı geçişli konfigürasyon oluşturulmuştur. Herbir çift geçiş bloğunda; birer adet EKF, DBÇK, pompa lazeri, sirkülatör ve reflector kullanılmıştır. Giriş sinyali, pompa lazeri sinyali ile DBÇK1'de birleşerek Sirkülatör1 boyunca ilerleyip EKF1'de yükseltilmiştir. Ardından, yükseltilen sinyal Reflektör1'den yansıtılarak EKF1 üzerinden ikinci geçişini ve Sirkülatör1'den çıkışını yapmıştır. Bu akış şeması üç kez tekrar ederek bu tez çalışmasında önerilen düzeneği oluşturmuştur. Tasarım kapsamında, bütün fiber düzenekleri için 1528 nm – 1566 nm giriş sinyal dalga boyu spektrumu 2 nm aralıklarla uygulanmıştır. Çizelge 4.1.'de yer alan tüm fiberlerin yayılma ve soğurma değerleri veri dosyası olarak hazırlanarak Optisystem 16 yardımıyla simülasyonda kullanılmıştır. 1532 nm dalga boyu ve -60 dBm giriş sinyal gücünde 200 mW'lık 1480 nm pompa lazerleri kullanılarak I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 60,21; 61,45; 62,36 ve 61,30 kazanç ile 3,09; 3,16; 3,09 ve 3,07 gürültü faktörü değerleri elde edilmiştir.



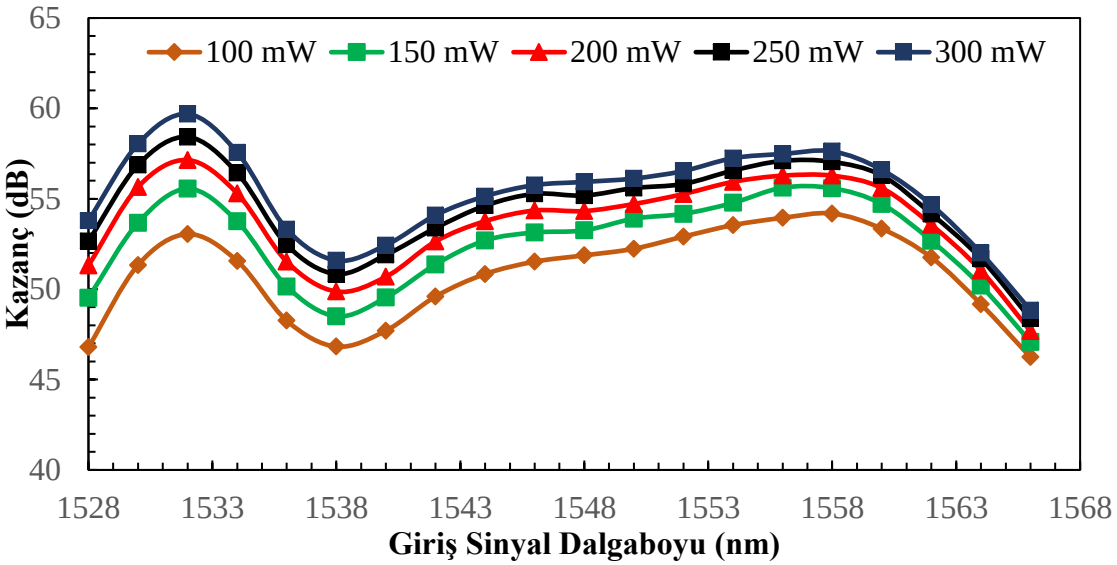
Şekil 4.8. Üç aşamalı ve altı geçişli EKFY tasarımı

Birden fazla optimizasyon aşamasının yer aldığı bu tasarımda; her aşamada bir giriş parametresi optimize edilerek sonraki aşamaya geçilmiştir.

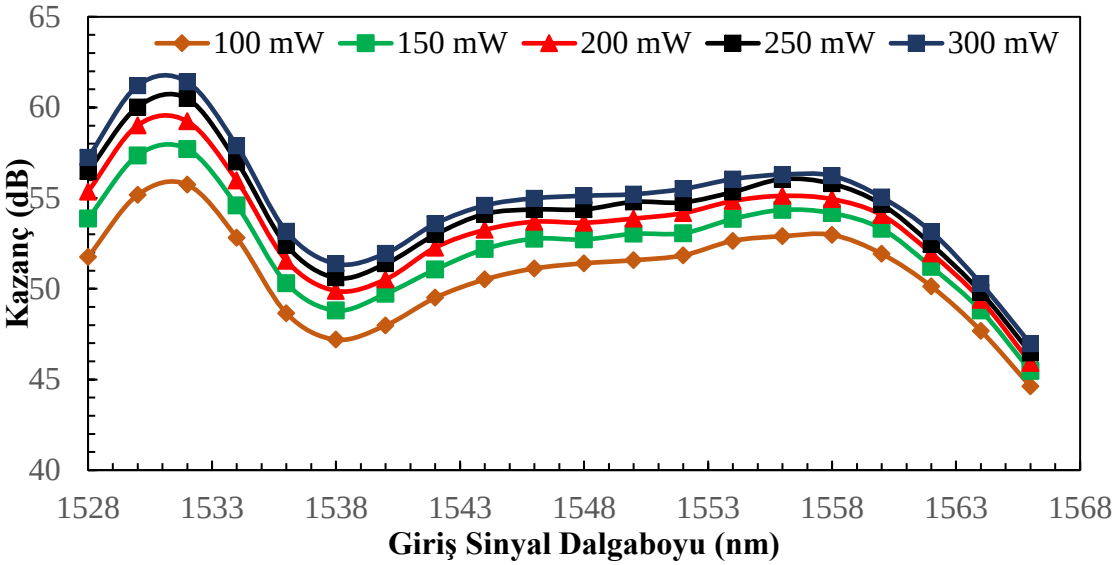
İlk aşamada, tasarımlardaki optimum EKF uzunlukları elde edilmiştir. Fiberlerin ayırt edici özellikleri olan nümerik açıklık, çekirdek ve erbiyum yarıçapları ile iyon yoğunlukları bu optimizasyon esnasında dikkate alınmıştır. Pompa lazeri güçlerinin de benzer tasarımlarda kullanılan ortalama değerler göz önüne alınarak başlangıç güçleri seçilmiştir. 1528 nm – 1566 nm giriş sinyal dalga boyu aralığındaki en yüksek çıkış kazancı EKF uzunluklarının (EKF1, EKF2 ve EKF3) I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 4 m; 0,625 m; 6,75 m ve 1,4 m olarak belirlendiği durumda gözlenmiştir.

Sonraki aşamada, önceden belirlenmiş olan EKF uzunlukları kullanılarak en uygun pompa lazeri güçleri (PL1, PL2 ve PL3) elde edilmeye çalışılmıştır. Tasarımdaki her bir pompa lazeri gücü, giriş sinyal dalga boyunun tüm spektrumu boyunca (1528 nm – 1566 nm), 100 mW ile 300 mW değer aralığında 50 mW'lık adımlarla artırılarak gözlenmiştir. Şekil 4.9., 4.10., 4.11. ve 4.12. farklı pompa lazeri güçleri için 4 farklı fiber türünün kazanç ile giriş sinyal dalgaboyu karakteristiğini göstermektedir. Tüm pompa güçlerinin 300 mW olarak ayarlandığı durumda, I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 59,68; 61,4; 61,56; 61,32

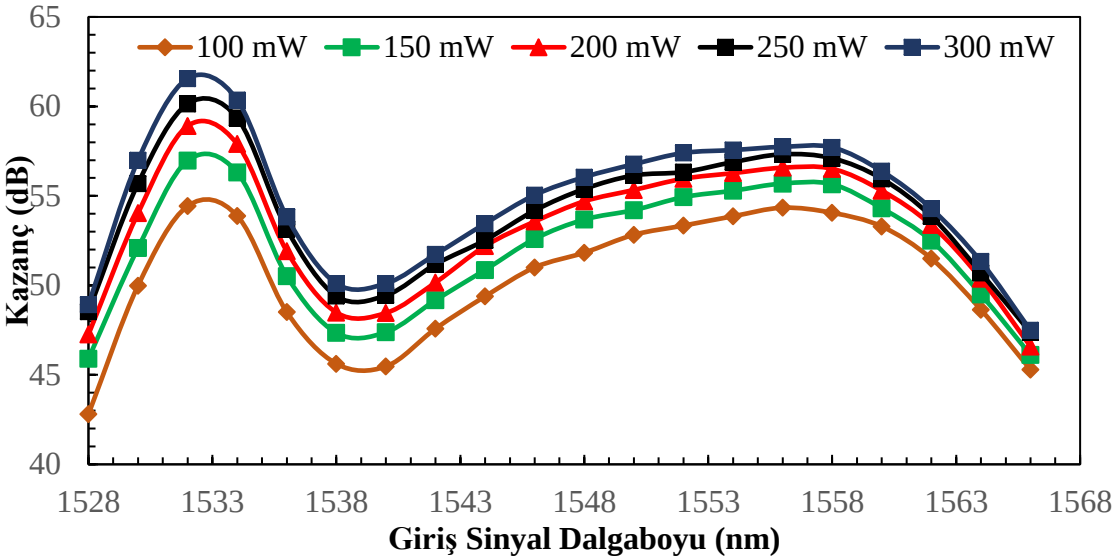
dB maksimum kazanç ve 55,22; 54,85; 54,74; 56,18 dB ortalama kazanç değerleri elde edilmiştir. Sistemdeki üç pompa gücünün de 200 mW seçildiği durumda, en yüksek çıkış kazançları 57,14; 59,23; 58,9; 58,86 dB, tüm band boyunca ortalama kazanç değerleri ise 53,64; 53,43; 53,19; 54,55 dB olarak I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla gözlenmiştir. 200 mW pompa gücü ve 1528 nm – 1564 nm band aralığında -50 dBm giriş sinyal gücünde, I6, I25, M5 and M12 fiber için sırasıyla kazanç dalgalanma değerleri 6,11; 9,84; 8,53 ve 7,9 dB olarak ölçülmüştür. Şekil 4.9. ve Şekil 4.11'de I6 ve M5 fiberleri için 1528 nm'de görece düşük çıkış kazançları elde edilmesinin sebebi ise düşük Er^{3+} iyon yoğunluğu karakteristikleri nedeni ile bahse konu dalga boyunda doyuma oluşmamış olmalarıdır.



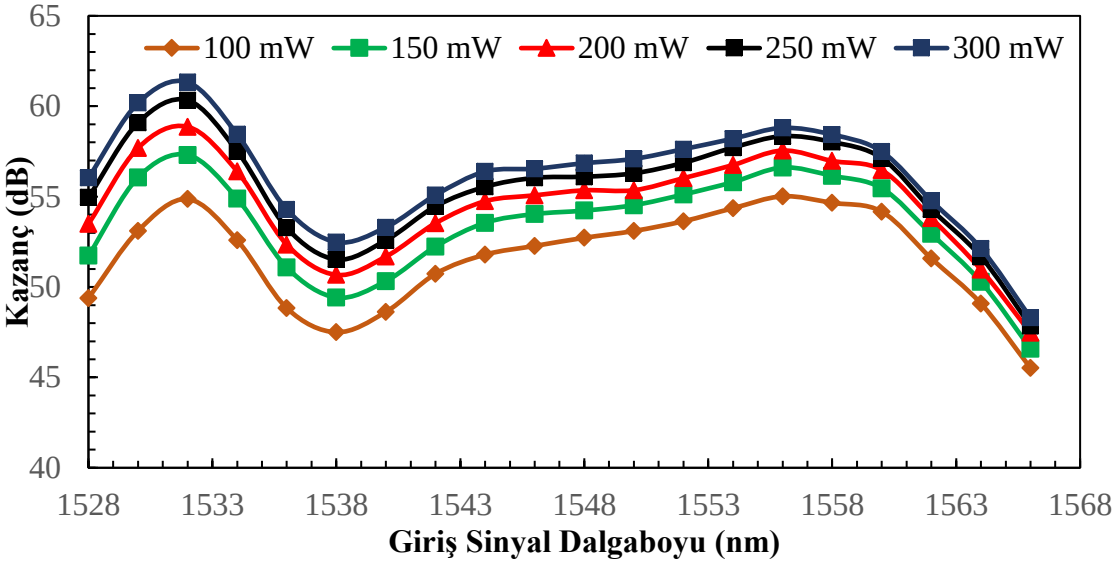
Şekil 4.9. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş I6 fiber EKF boylarının (4 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi



Şekil 4.10. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş I25 fiber EKF boylarının (0,625 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi

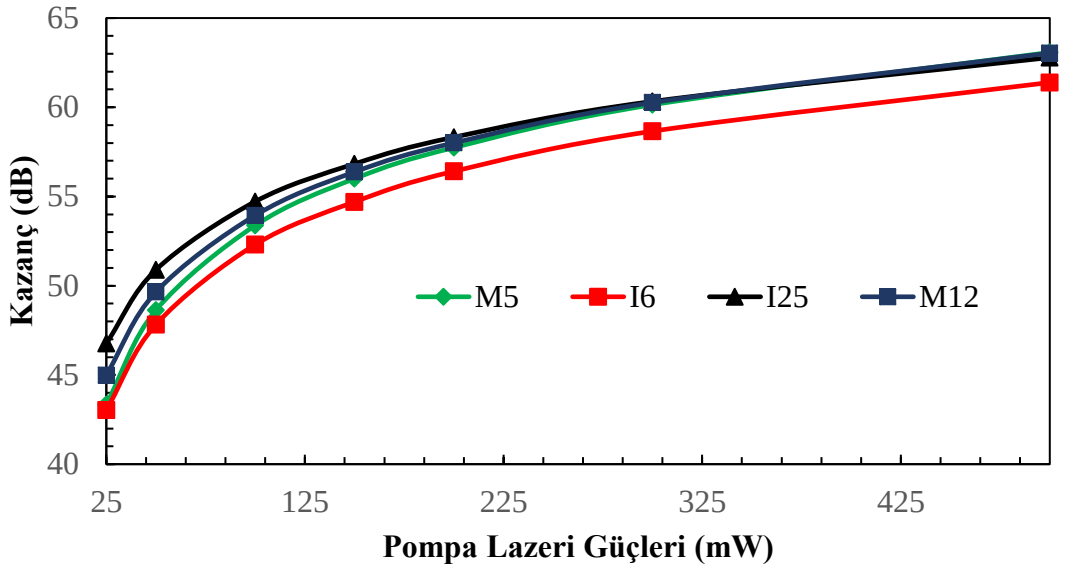


Şekil 4.11. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş M5 fiber EKF boylarının (6,75 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi

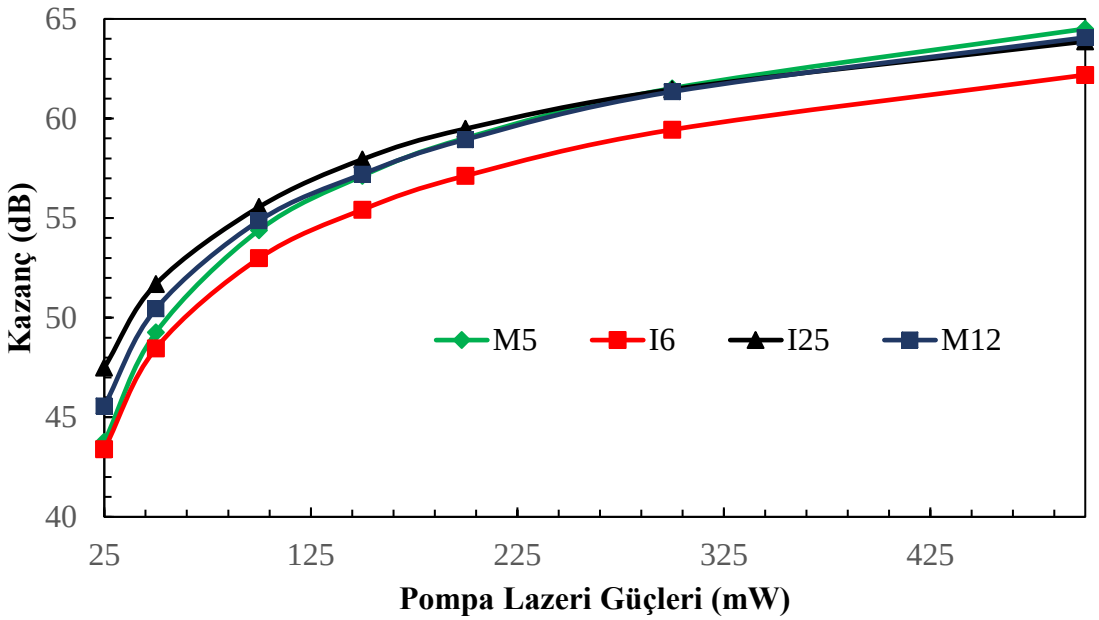


Şekil 4.12. Farklı pompa lazeri güçleri için optimize edilmiş M12 fiber EKF Boylarının (1,4 m) kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi

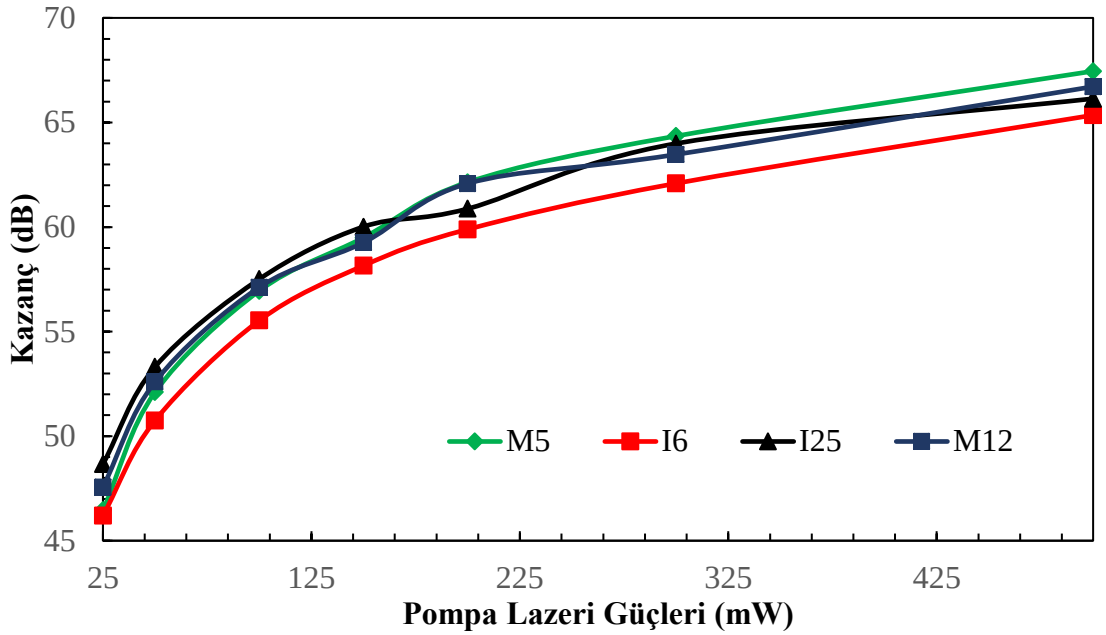
Önceki aşamalardan açıkça görüldüğü üzere, en yüksek çıkış kazancı giriş sinyali 1532 nm dalga boyunda iken elde edilmiştir. Böylece, anılan dalga boyu ilerleyen simülasyon süreçlerinde giriş parameter değeri olarak esas alınmıştır. Bu aşamada, giriş sinyal dalga boyu 1532 nm'ye ayarlanmış olup; -40, -50 ve -60 dBm giriş sinyal güçleri için pompa lazeri güçleri 25, 50, 100, 150, 200, 300 ve 500 mW olarak değiştirilmiştir. Farklı giriş sinyal güçleri için elde edilen kazanç/pompa gücü değişimi Şekil 4.13., 4.14. ve 4.15'te yer almaktadır. Şekillerden de görülebileceği üzere -40 dBm giriş sinyal gücü ve 200 mW pompa lazeri güçlerinde, kazanç değerleri I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 56,41; 58,32; 57,74 ve 58 dB olarak elde edilmiştir. Aynı pompa güçlerinde giriş sinyal gücü -50 dBm olarak uygulandığında I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için kazanç değerleri 57,12; 59,48; 59,01 ve 58,94 olarak ölçülmüştür. I6, I25, M5 ve M12 için -60 dBm giriş sinyal gücü ve 200 mW pompa lazeri güçlerinde ise çıkış kazançları 59,88; 60,87; 62,14 ve 62,08 dB gibi oldukça yüksek seviyelere görece düşük pompa güçleri ile ulaşılmıştır. -60 dBm giriş sinyalinde pompa güçlerini 500 mW seviyesine artırdığımızda ise 65,35; 66,13; 67,45 ve 66,71 dB gibi literatürde daha önce görülmemiş çıkış kazanç değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.13. I6, I25, M5 ve M12 fiberlerinin optimize edilmiş EKF boyları için 1532 nm dalga boyu ve -40 dBm giriş sinyal gücünde kazanç-pompa lazeri gücü değişimi

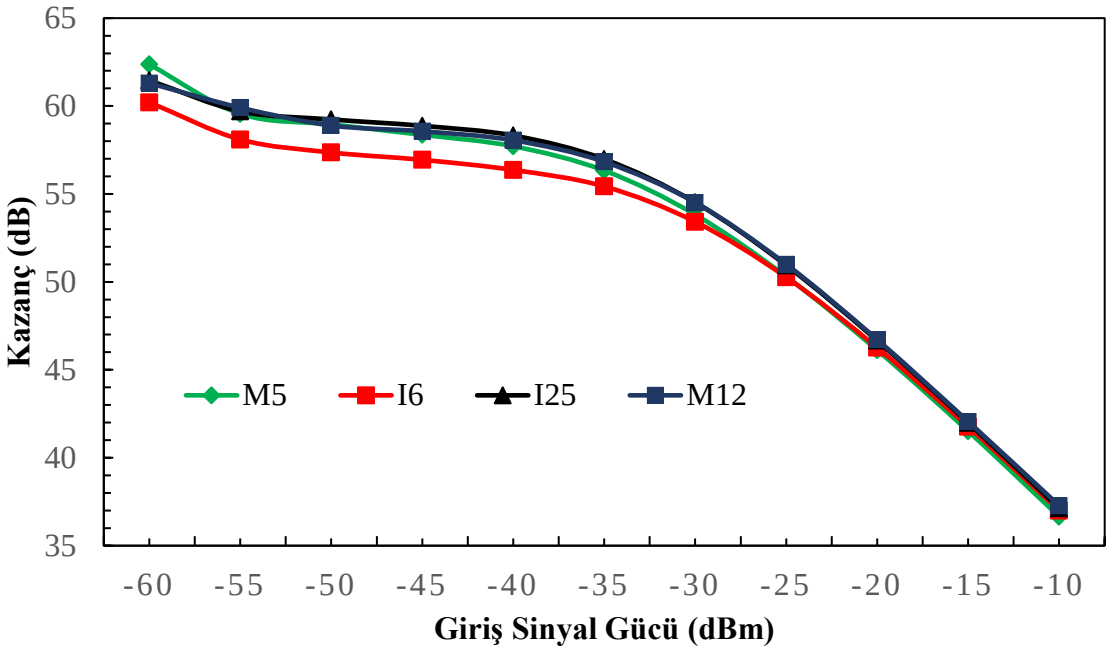


Şekil 4.14. I6, I25, M5 ve M12 fiberlerinin optimize edilmiş EKF boyları için 1532 nm dalga boyu ve -50 dBm giriş sinyal gücünde kazanç-pompa lazeri gücü değişimi

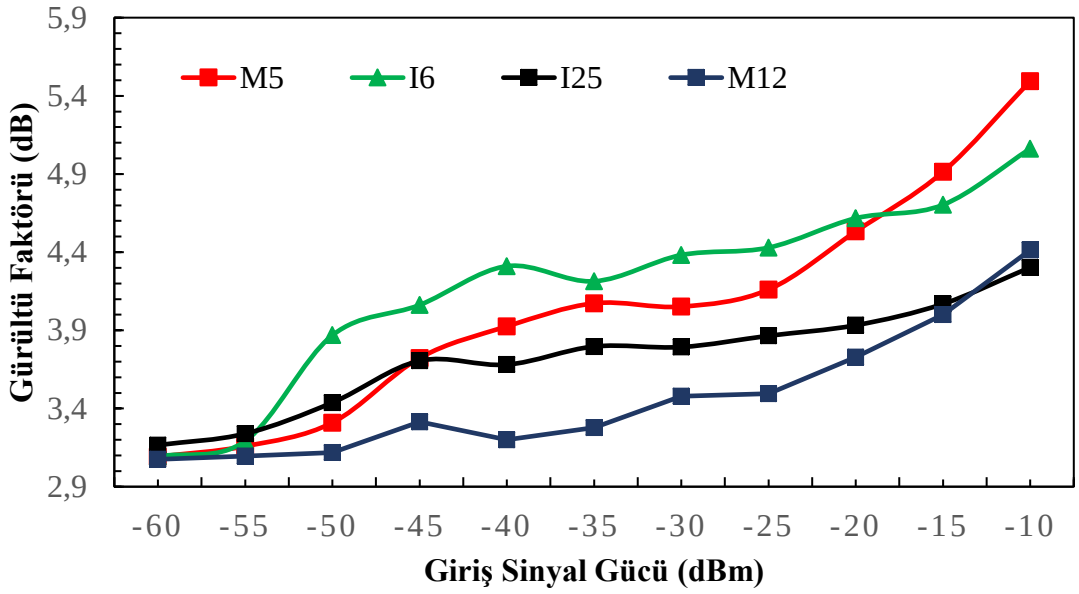


Şekil 4.15. I6, I25, M5 ve M12 fiberlerinin optimize edilmiş EKF boyları için 1532 nm dalga boyu ve -60 dBm giriş sinyal gücünde kazanç-pompa lazeri gücü değişimi

Pompa gücü ile çıkış kazancı arasındaki ilişkiyi analiz ettikten sonra, önceki aşamalarda optimize hale getirilen EKF uzunlukları, pompa güçleri ve giriş sinyal dalgaboyları kullanılarak kazanç ve giriş sinyal gücü değişimi incelenmiştir. Şekil 4.16'dan da görüleceği üzere en yüksek kazançlar -60 dBm giriş sinyal gücünde gözlenmiştir. Giriş sinyal gücü spektrumu -60 dBm ile -10 dBm arasında 5 dB'lik adımlarla değiştirilmiştir. Tüm giriş sinyal gücü değer aralığı ele alındığında, hiçbir fiber türü için ortalama kazanç değeri 52,1 dB'in altına inmemiştir. Şekil 4.17'de yer alan gürültü faktörü ve giriş sinyal gücü korelasyonu incelendiğinde hem en düşük hem de en yüksek gürültü faktörü değerlerinin M5 fiber tarafından sırasıyla -60 dBm ve -10 dBm giriş sinyal güçlerinde elde edildiği görülmektedir.

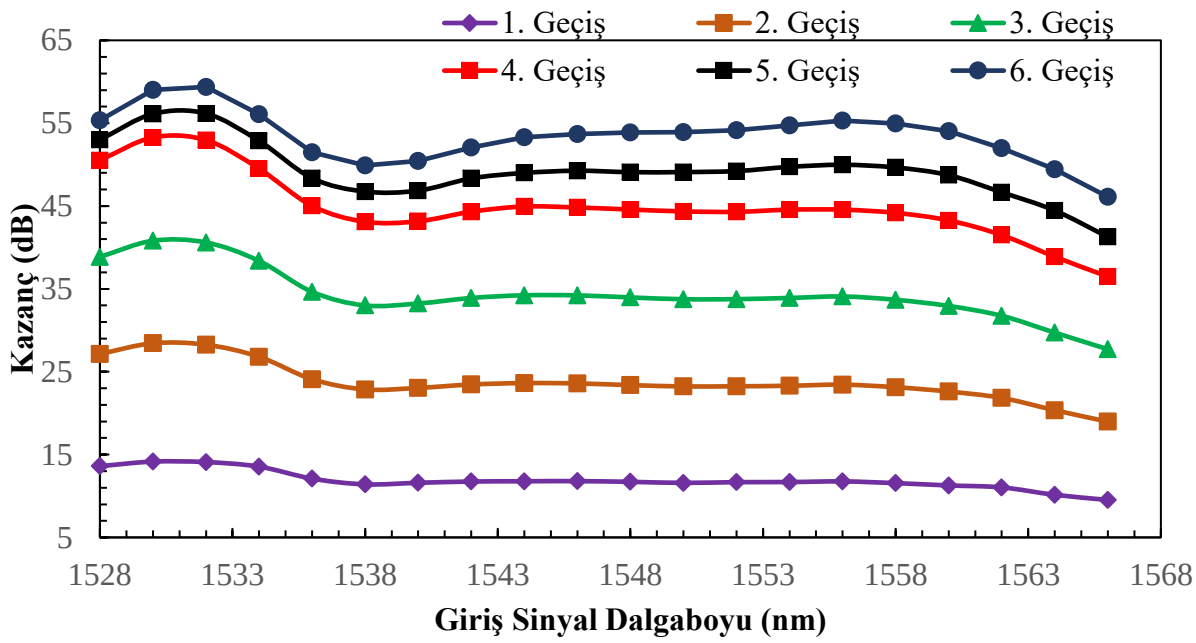


Şekil 4.16. 1532 nm giriş sinyal dalga boyu ile optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için kazanç-giriş sinyal gücü değişimi

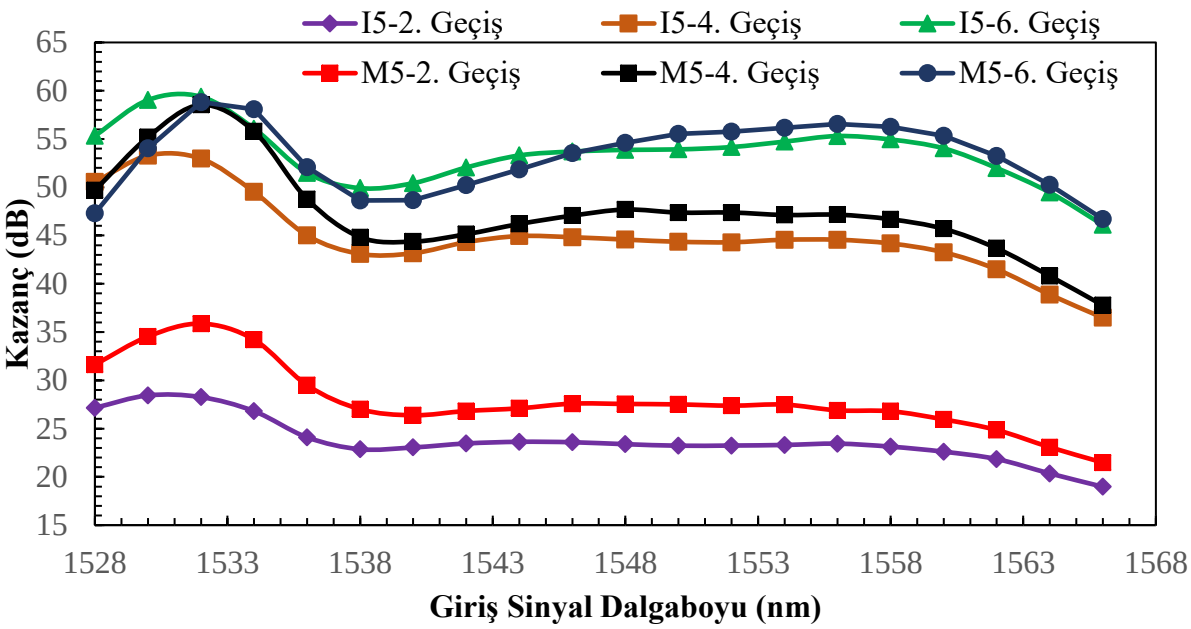


Şekil 4.17. 1532 nm giriş sinyal dalga boyu ile optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için gürültü faktörü-giriş sinyal gücü değişimi

Bu yeni tasarımda, ayrıca tüm sinyal yükseltme aşamaları ve artırılmış kazanç değerleri tek tek ele alınmıştır. Şekil 4.18., I25 fiberinin konfigürasyonundaki ilk geçişten altıncı geçişe kadar olan toplam kazanç artış grafiğini göstermektedir. I25 ve M5 fiberlerinin tasarımlarındaki ikinci, dördüncü ve altıncı geçişlerindeki toplam kazanç değişimlerinin karşılaştırması ise Şekil 4.19'da yer almaktadır. Şekil 4.18. incelendiğinde herbir geçişte çıkış kazancının arttığı görülmektedir. Dördüncü geçişe kadar, her bir geçişin sağladığı kazanç artışı 1532 nm giriş sinyal dalgaboyunda 12,3 dB'den aşağı düşmemiştir. Dördüncü geçiş ve sonrasında ise, herbir geçiş başına yaklaşık 3,21 dB kazanç artışı sağlanmıştır. Şekil 4.19'daki grafik incelendiğinde, ikinci ve dördüncü geçişlerde M5 fiber I25 fibere kıyasla daha iyi toplam kazanç performansı gösteriyorken; altıncı geçişten sonraki sistem çıkışı incelendiğinde tüm dalga boyunda birbirine oldukça benzer kazanç spektrumu sağlandığı görülmektedir.

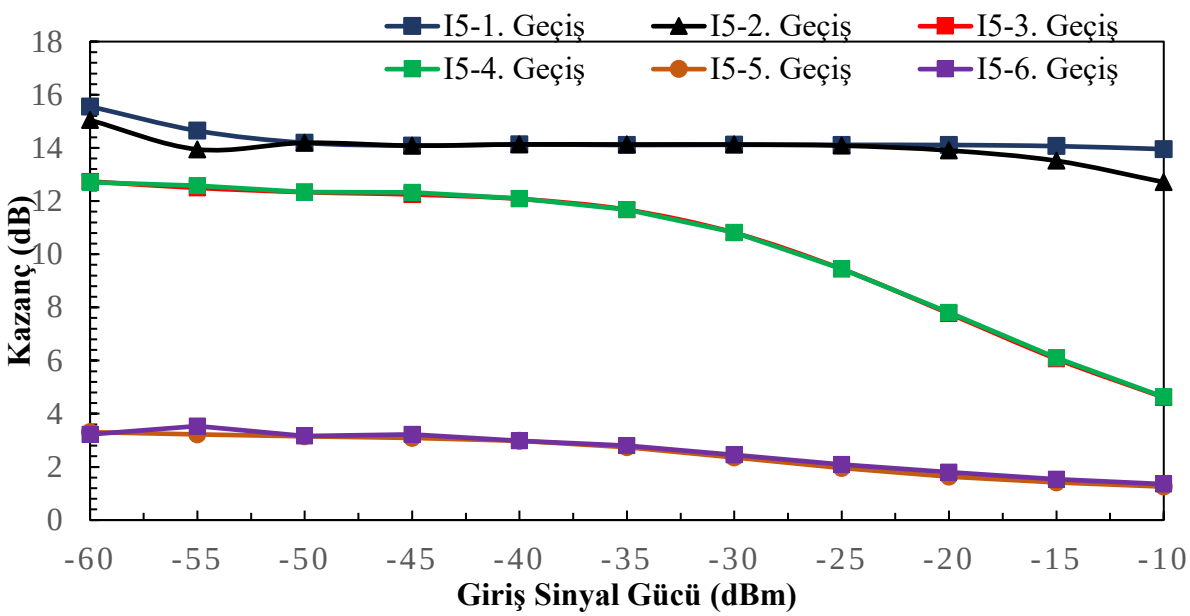


Şekil 4.18. -50 dBm giriş sinyal gücünde optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I25 fiberi için her bir geçişten sonraki kazanç – giriş sinyal dalga boyu değişimi



Şekil 4.19. -50 dBm giriş sinyal gücü ile optimize edilmiş EKF boyları ve pompa lazeri güçlerinde (200 mW) I25 ve M5 fiberlerinin kazanç-giriş sinyal dalga boyu değişimi karşılaştırması

İlave olarak, I5 fiberin kazanç yükseltme davranış modelini daha kapsamlı inceleyebilmek adına her bir geçişin giriş ve çıkış sinyal değerleri tek tek elde edilerek detaylı analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.20. ve Çizelge 4.2. ilk geçişten altıncı geçişe kadarki kazanç değişimini tüm giriş sinyal gücü spektrumu boyunca göstermektedir. Tasarımdaki, en yüksek tekil geçiş kazançları ilk ve ikinci geçişte elde edilmiştir. Bunu, daha düşük kazançlar ile üçüncü ve dördüncü geçişler takip etmiştir. En düşük tekil geçiş kazanç artışı ise beşinci ve altıncı geçişlerde gözlemlenmiştir. Ek olarak, Şekil 4.20. ve Çizelge 4.2. simülasyon sonuçlarını adım adım doğrulamaktadır. İlk geçişteki giriş sinyal ve altıncı geçişteki çıkış sinyalinin toplamı 61,92 dB değerini vermekte olup; bahse konu değer OSA'dan ölçülen toplam çıkış kazancı olan 62,57 dB değerine neredeyse eşittir.



Şekil 4.20. 1532 nm dalga boyunda optimize EKF boyları ve pompa lazeri güçleri ile (200 mW) I25 fiber için her tekil geçişin kazanç-giriş sinyal gücü karşılaştırması

Çizelge 4.2. I25 fiberin geçiş bazında kazanç değerleri

	Giriş Sinyali (dBm)	**Çıkış Sinyali (dBm)**	**Kazanç (dB)**
1. Geçiş	-60,00	-44,44	15,55
2. Geçiş	-44,48	-29,44	15,04
3. Geçiş	-30,19	-17,46	12,73
4. Geçiş	-17,50	-4,79	12,70
5. Geçiş	-4,56	-1,25	3,30
6. Geçiş	-1,29	1,91	3,21

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın ilk etabında; iki aşamalı ve üç geçişli EKFY, 4 farklı ticari fiber türü (I6, I25, M5 ve M12) için optimize edilerek sistem çıkışında yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü değerleri elde edilmiştir. Giriş parametreleri optimize edilmeden giriş sinyalinin dalga boyu ve sinyal gücü değiştirilerek elde edilen kazanç ve gürültü faktörü değerleri; optimize edilen giriş parametreleri ile simülasyon yardımı ile tekrar edilerek kıyaslanmıştır. Düzeneğin tüm giriş parametreleri optimize edilirken giriş sinyali -30 dBm ve 1550 nm – 1560 nm aralığında baz alınmıştır. M5 fiberi özelinde ise, Şekil 4.2'de yer alan grafikte de görüldüğü üzere dalga boyu spektrumunun alt bandında (1530 nm – 1535 nm) yüksek kazanç elde edilmiştir. Bunun esas nedeni, M5 fiberinin tasarımda kullanılan 4 farklı ticari fiber türü içerisinde en düşük Er^{3+} iyon yoğunluğuna sahip olması ve bu durumun bahse konu dalga boylarında doyuma ulaşmamış olması ile açıklanabilir.

Tüm tasarım aşamaları boyunca I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilmiş değerler Çizelge 5.1'de; sistem çıkışında elde edilen maksimum kazanç ve minimum gürültü faktörü değerleri Çizelge 5.2'de yer almaktadır.

Çizelge 5.1. I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen giriş parametreleri

Fiber Türü	**Giriş Sinyali**	**Pompa 1**	**Pompa 2**	**EKF-1**	**EKF-2**
I6	1560 nm -30 dBm	1480 nm 250 mW	1480 nm 300 mW	6 m	11 m
I25	1560 nm -30 dBm	1480 nm 250 mW	1480 nm 200 mW	1,5 m	2 m
M5	1555 nm -30 dBm	1480 nm 250 mW	1480 nm 200 mW	11 m	15 m
M12	1560 nm -30 dBm	1480 nm 250 mW	1480 nm 250 mW	3 m	4 m

Çizelge 5.2. I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen parametrelere göre sonuçlar

Fiber Türü	**Kazanç**	**Gürültü Faktörü**
I6	54,9 dBm	3,7 dBm
I25	54,3 dBm	3,8 dBm
M5	53,3 dBm	3,9 dBm
M12	54,7 dBm	3,3 dBm

Singh ve Marwaha [18] çalışmasına kıyasla giriş parametreleri optimizasyonları bağlamında elde edilen kazanç ve gürültü faktörü karşılaştırması Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Kaynak [18] ile yapılan çalışmanın karşılaştırılması

Parametreler	**Singh ve Marwaha**			**Mevcut Çalışma**		
Giriş Sinyal Gücü (dBm)	-40 dBm	-35 dBm	-30 dBm	-40 dBm	-35 dBm	-30 dBm
Kazanç (dB)	~28 dB	~28 dB	~27 dB	~58,2 dB	~57 dB	~55 dB
Gürültü (dB)	~5,5 dB	~5,6 dB	~5,7 dB	~3,4 dB	~3,3 dB	~3,4 dB

Çizelge 5.3. değerlendirildiğinde; literatürdeki çalışmaya [18] kıyasla daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü faktörü değerleri elde edildiği görülmektedir.

Sonuç olarak; optimizasyonlar sonucunda giriş sinyali dalga boyu I6, I25 ve M12 fiberleri için 1560 nm, M5 fiber için ise 1555 nm olarak elde edilmiştir. Pompa lazeri güçleri her bir fiber düzeneği için birbirine yakın değerler olan ve ortalama güç bandı olarak

değerlendirebileceğimiz 200 mW – 300 mW aralığında elde edilmiştir. Sistem tasarımının kritik öneme haiz parametrelerinden biri olan ve yükselteç maliyetine direkt etki eden EKF uzunlukları ise çekirdek yarıçapı, erbiyum yarıçapı, nümerik açıklık ve iyon yoğunlukları dikkate alındığında her bir sistem özelinde birbirine yakın uzunluklarda ölçülmüştür. Düşük maliyetli ve kolay tasarlanabilen yüksek kazançlı bu düzeneğe ek olarak; sistem çıkışından hemen önce eklenecek ayrı bir EKF ile üç aşamalı ve dört geçişli tasarım denenerek daha yüksek ve düzleştirilmiş kazanç ile daha düşük gürültü faktörü elde edilebilir.

Tez çalışmasının ikinci etabında, üç aşamalı ve altı geçişli EKFY tasarımı dört farklı ticari fiber türü (I6, I25, M5 ve M12) için 1528 nm – 1566 nm sinyal spektrumunda simüle edilmiştir. Optimizasyonda ilk olarak EKF uzunlukları belirlenmiştir. Ardından, farklı pompa lazeri güçleri kullanılarak tüm fiber türleri için hazırlanan tasarımlarda C bandı boyunca kazanç karakteristikleri incelenmiştir. Bu aşamada, en yüksek çıkış kazancı her bir pompa gücü 300 mW ve giriş sinyal dalga boyu 1532 nm iken 61,56 dB ile M5 fiberi ile sağlanmıştır. Ardından, tüm pompa lazeri güçleri 25 mW ve 500 mW arasında eş zamanlı olarak değiştirilerek giriş sinyal gücünün -40 dBm, -50 dBm ve -60 dBm olduğu durumlarda çıkış kazanç değişimleri analiz edilmiştir. Bu aşamada, tüm pompa lazeri güçleri 500 mW değerine yükseltildiğinde -40, -50 ve -60 dBm giriş sinyal güçlerinde M5 fiberi tarafından sırasıyla 63,07 dB; 64,5 dB ve 67,45 dB çıkış kazançları elde edilmiştir.

Tüm tasarım aşamaları boyunca I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilmiş değerler Çizelge 5.4’te; sistem çıkışında elde edilen maksimum kazanç ve minimum gürültü faktörü değerleri Çizelge 5.5’te yer almaktadır.

Çizelge 5.4. I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen giriş parametreleri

Fiber Türü	**Giriş Sinyali**	**Pompa Lazeri 1-2-3**	**EKF 1-2-3**
I6	1532 nm -60 dBm	1480 nm 200 mW	4 m
I25	1532 nm -60 dBm	1480 nm 200 mW	0,625 m
M5	1532 nm -60 dBm	1480 nm 200 mW	6,75 m
M12	1532 nm 650 dBm	1480 nm 200 mW	1,4 m

Çizelge 5.5. Optimize edilen giriş parametrelerine göre I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için çıkış kazanç ve gürültü faktörü değerleri

Fiber Türü	**Kazanç**	**Gürültü Faktörü**
I6	60,21 dBm	3,09 dBm
I25	61,45 dBm	3,16 dBm
M5	62,36 dBm	3,09 dBm
M12	61,30 dBm	3,07 dBm

Çizelge 5.6. önerilen yeni tasarım ile literatürdeki daha önce yapılmış çalışmaların detaylı bir karşılaştırmasını göstermektedir. İki aşamalı ve dört geçişli teknikleri ele alacak olursak, Çizelge 5.6'da yer alan ve ayrıca bu çalışmanın giriş kısmında incelenen tüm tasarımların farklı EKF uzunluklarına sahip oldukları ve neredeyse tamamının kapsamlı bir optimizasyon

içermediği görülmektedir. Uygulamaya geçmeden önce optimum EKF uzunluklarını belirli bir pompa lazeri gücüne göre belirlemek bu tip tasarımlarda önemli bir kriterdir. Tüm giriş parametrelerini optimize etmeden kurulacak olan bir EKFY tasarımı maliyet etkin bir çözüm olmayacaktır. Ayrıca iki aşamalı ve dört geçişli sistemlerde iki adet ABGF geri yönlü YKY'ı bastırmak için kullanılmış olup, bunun sonucu olarak çıkış kazancının arttığı ve gürültü faktörünün azaldığı gözlemlenmiştir. Fakat, aynı zamanda bu iki adet ABGF kullanımı EKFY tasarımının gerçeklenmesini daha pahalı hale getirmektedir. Halbuki, önerilen tasarımı ele alacak olursak neredeyse aynı çıkış kazancı ve gürültü faktörü herhangi bir filtre kullanmadan sağlanmıştır. İlave olarak, I6, I25, M5 ve M12 fiberlerinin boyları sırasıyla 4 m, 1,4 m, 0,625 m ve 6,75 m gibi oldukça kısa uzunluklar olarak optimize edilmiş olup, bu durum önerilen konfigürasyonu maliyet etkin olarak öne çıkarmaktadır.

Çok geçişli bir örnek çalışma [13] ile kıyaslandığında ise, eğer önerilen tasarımda ele alınan düzenek ile aynı pompa lazeri güçleri (750 mW) kullanılmış olsa idi, Şekil 4.15'te 500 mW pompa lazeri gücü ile 67,45 dB kazanç sağlanmışken çıkış kazancının rahatlıkla 70 dB değerini aşabileceği söylenebilir.

Çizelge 5.6. Literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırma

Parametreler	**[14]**	**[17]**	**[21]**	**[22]**	**[23]**	**[24]**	**[20]**	**[25]**	**[26]**	**Önerilen Tasarım**
Tasarım Tipi	Üç Aşama Dört Geçiş	İki Aşama Dört Geçiş	İki Aşama Dört Geçiş	İki Aşama Dört Geçiş	İki Aşama Dört Geçiş	İki Aşama Dört Geçiş	İki Aşama Dört Geçiş	İki Aşama Dört Geçiş	Dört Aşama Dört Geçiş	Üç Aşama Altı Geçiş
Giriş Sinyal Gücü (dBm)	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-26 dBm	-60
PL1 (mW)	100	10	10	10	220	10	180	90	750	200
PL2 (mW)	200	220	90	165	220	220	180	90	750	200
PL3 (mW)	250								750	200
PL4 (mW)									750	

Çizelge 5.6. (devam) Literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırma

Parametreler	**[14]**	**[17]**	**[21]**	**[22]**	**[23]**	**[24]**	**[20]**	**[25]**	**[26]**	**Önerilen Tasarım**
EKF1 (m) EKF2 (m) EKF3 (m) EKF4 (m)	15 15 15	10 15	7 10	8 7	11 15	10 15			4 10 5 5	6,75 6,75 6,75
EKF Boy Optimizasyonu	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Kazanç (dB)	59,94	62	54	62,56	61	61	62.,6	59,49	64,5 (1560 nm)	62,36
Gürültü Faktörü (dB)	11,92	7	6	3,98	6,39	7		4,22	3,4	3,09

Sonuç olarak, literatürü taradığımızda beş ya da altı geçişli herhangi bir tasarım bulunamamıştır. Bu durum, önerdiğimiz üç aşamalı altı geçişli sistemimizi literatürde daha önce hiç çalışılmamış yeni bir yaklaşım haline getirmektedir. Ayrıca, çalışma matematiksel olarak modellenmiş ve sayısal olarak doğrulanmıştır. Burada, tasarımcıya kolaylık sağlayan üç ayrı tek aşamalı ve çift geçişli düzenek tercih edilmektedir. Oldukça kısa EKF uzunlukları, bu tasarımın uygun maliyetli ve kolay uygulanabilir olmasını sağlar. Hem artık pompa gücünden hem de Er^{3+} iyonlarını uyarmak için yeterli kapasiteye sahip olmamaktan kaçınmak için önemli olan optimum pompa güçleri, en iyi ortalama kazanç değerlerini sağlamıştır. Üç ayrı pompa kullanmak yerine sadece bir 600 mW pompa da kullanılabilir ve bir pompa ayırıcı ile her bir çift geçiş bloğuna bölünebilir, bu da tasarımcının düzeneği deneysel olarak daha kolay uygulamasına yardımcı olur. Sonuç olarak, 60 dB çıkış kazancı, düşük giriş sinyali güçleri (<-45 dBm) ve orta düzey pompalama gücü seviyeleri (200 mW) ile kolayca elde edilebilir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm optimizasyon, tasarım ve elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, giriş parametreleri daha performanslı çıkış karakteristikleri elde edebilmek için kolay bir şekilde revize edilerek sistem gerçeklenebilir. Önerilen konfigürasyon ile; modüler yapısı, kolay entegrasyonu ve tasarımcı için hızlı ve efektif

şekilde doğrulanma imkânı sağladığı için, bundan sonraki çalışmalarda oldukça düşük giriş sinyal güçleri (< -60 dBm) ve artırılan pompa lazeri gücüyle 70 dB çıkış kazanç seviyelerinin kısa EKF uzunlukları ve az sayıda optik komponent yardımıyla maliyet etkin olarak aşılabileceği değerlendirilmektedir. Literatürde ilk kez denenmiş olan üç aşama ve altı geçiş tasarımı, dört aşama ve sekiz geçiş olarak -60 dBm ve daha düşük giriş sinyal güçleri uygulanarak ayrıca tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Desurvire, E. (2005). Optical Communications in 2025. *31st European Conference on Optical Communications (ECOC) 2005*, vol 1, 5-6, DOI: 10.1049/cp:20050351.

2. Senior, J. M. (1992). *Optical Fiber Communications Principles and Practice* (2nd edition). New York: Prentice-Hall, 30-35.

3. Yamada, M. and Shimizu, M. (2003). Ultra-Wide Band Amplification Technologies for Optical Fiber Amplifiers. *NTT Technical Review*, 1: 80-84.

4. Becker, P. C., Olsson, N. A., and Simpson, J. R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology.* San Diego: Academic Press, 43-52.

5. Snitzer, E. and Woodcock, R. (1965). Yb3+ - Er3+ glass laser. *Applied Physics Letters*, 6, 45-46.

6. Stone, J. and Burrus, C. (1973). Neodymium-doped silica lasers in end-pumped fiber geometry. *Applied Physics Letters*, 23(7), 388-389.

7. Stone, J. and Burrus, C. A. (1974). Neodymium-doped fiber lasers: room temperature cw operation with an injection laser pump. *Applied Optics*, 13(6), 1256-1258.

8. Poole, S. B., Payne, D. N., and Fermann, M. E. (1985). Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions. *Electronics Letters*, 21, 737-738.

9. Broer, M. M., Golding, B., Haemmerle, W. H., Simpson, J. R., and Huber, D. L. (1986). Low-temperature optical dephasing of rare-earth ions in inorganic glasses. *Physical Review*, 33(6), 4160.

10. Mears, R. J., Reekie, L., Jauncey, I. M., and Payne, D. N. (1987, January). *High gain rare-earth doped fibre amplifier operating at 1.55 μm.* Paper presented at the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication/Conference on Optical Fiber Communication (IOOC/OFC), Reno, United States.

11. Townsend, J. E., Poole, S. B., and Payne, D. (1987). Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibres. *Electronics Letters*, 23(7), 329-331.

12. Keiser, Gerd. (2000). *Optical Fiber Communications*. Singapore: McGraw-Hill, 2,5.

13 Mears, R. J. (1987). *Optical Fibre Group*, Ph. D. thesis, Southampton University Department of Electronics, 13-14.

14. Akhter, F., Ibrahimy, M. I., Naji, A.W., and Siddiquei, H. R. (2012). Design and Characterization of a New Three-Stage Quadruple Pass EDFA. *Journal of Applied Sciences*, 12(19), 2071-2076, DOI: 10.3923/jas.2012.2071.2076.

15. Naji, A.W., Ibrahim, H.F.H., Ahmed, B., Harun, S.W. and Mahdi, M.A. (2010, May). *Theoretical Analysis of Triple-pass Erbium-doped Fiber Amplifier.* Paper presented at the International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2010), Kuala Lumpur, Malaysia.

16. Akhter, F., Ibrahimy, M. I., Naji, A.W., and Siddiquei, H. R. (2012). Modeling and characterization of all possible triple pass EDFA configurations. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(18), 2656-2663, 9 May 2012, DOI: 10.5897/IJPS12.172.

17. Sellami, M., Sellami, A. and Berrah, S. (2014). Characterization and Modeling of Dual Stage Quadruple Pass Configurations. *Physics Procedia*, 55, 416 – 420.

18. Singh, G. and Marwaha, V. A (2014). Review Paper on Characterization of Triple Pass Erbium-Doped Fiber Amplifiers. *Indo Global College of Engineering*, Abhipur, Punjab, India. May, 2014. 1(2), e-ISSN: 1694-2310.

19. Al-Mansoori, M. H., and Al-Ghaithi, W. S. (2014). 56.6 dB high gain L-band EDFA utilizing short-length highly-doped erbium rare-earth material. *Journal of European Optical Society Rapid Publications* 9, 14028, DOI: http://dx.doi.org/10.2971/jeos.2014.14028.

20. Bouzid, B. (2016). *Erbium-Doped Fiber Amplifier Review*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Electrical Systems, Tunisia.

21. Al-Khateeb, K.A., Sellami, A. and Belloui, B. (2006, May). *A High Gain EDFA Using Double-Pass Dual-Stage Amplification.* Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering, 2, 812-814, Kuala Lumpur, Malaysia.

22. Bouzid, B. (2010). High-Gain and Low-Noise-Figure Erbium-Doped Fiber Amplifier Employing Dual Stage Quadruple Pass Technique. *Optical Review* 3(17), 100-102.

23. Naji, A.W., Mohammed, M.A., Zaidan, B.B., Zaidan, A.A., Al-Khateeb, W., Al-Khateeb, K.A.S. and Mahdi, M.A. (2011). A Novel Theoretical Analysis of Quadruple Pass Erbium Doped Fiber Amplifier. *International Journal of Physical Sciences*, 6(10), 2393-2398, DOI: 10.5897/AJBM11.228.

24. Ali, S., Khalid, A.S. and Bouzid, B. (2009). A New Erbium-Doped Fiber Amplifier. *Journal of Applied Sciences*, 9(13), 2498-2550.

25. Bouzid, B. (2012). Behavioral Variations of Gain and NF Owing to Configurations and Pumping Powers. *Optics and Photonics Journal*, 2, 8-12 March 2012, DOI: http://dx.doi.org/10.4236/opj.2012.21002.

26. Mohamed, B. El-Mashade1 and Mohamed, A. (2017). Characteristics Evaluation of Multi-Stage Optical Amplifier EDFA. *British Journal of Applied Science & Technology* 19(4), 1-20, 2017, Article no. BJAST.31911 ISSN: 2231-0843, NLM ID: 101664541, DOI: 10.9734/BJAST/2017/31911

27. Yücel, M. ve Göktaş H. H. (2007, 31 Ocak - 02 Şubat). *L Band EKFY'lerin Sıcaklığa Bağımlı Fiber Boyu ve Kazancının Bulanık Mantık Kullanılarak İncelenmesi*. Akademik Bilişim'07 - IX. Akademik Bilişim Konferansı Bildirilerinde sunuldu, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

28. Yücel, M. and Göktaş H. H. (2008, September). A Fuzzy Logic Based Device for The Determination of Temperature Dependence of EDFAs. Article in *Microwave and Optical Technology Letters*, DOI: 10.1002/mop.23699.

29. Yücel, M., Göktaş, H. H. (2007, June). *Gain Flattening Configurations at the L Band Erbium Doped Fiber Amplifiers.* Paper presented at the Signal Processing and Communications Applications Conference, IEEE 15th, 1-4.

30. Yücel, M. ve Göktaş H. H. (2007). Kazancı Düzleştirilmiş Çok Geniş Bantlı Hibrid Optik Yükselteç Tasarımı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 4(22), 863-868.

31. Yamada, M. (2004). Overview of wideband optical fiber amplification technologies. *NTT Technical Review*, 2(12), 34.

32. Sakamoto, T., Mori, A., Masuda, H., and Ono, H., (2004). Wideband rare-earth-doped fiber amplification technologies – Gain bandwidth expansion in the C and L bands. *NTT Technical Review,* 2(12), 38.

33. Yücel, M. ve Göktaş H. H. (2008) Determination of Minimum Temperature Coefficient of C Band EDFA. *Journal of Applied Sciences* 8(23), 4464-4467, DOI: 10.3923/jas.2008.4464.4467.

34. Yücel, M., Göktaş H. H., ve Özkaraca, O. (2010). Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçte Gürültü Faktörünün Sıcaklık Bağımlılığı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 3(25), 635-641.

35. Yücel, M., Göktaş H. H., ve Çelebi, F. V. (2011, April). *Pompa Lazer Dalga Boyu Değişiminin EDFA'nın Sıcaklık Bağımlılığına Etkisi*. Paper presented at the 2011 IEEE 19th Signal Processing and Communications Applications Conference, Antalya, Turkey, DOI: 10.1109/SIU.2011.5929631.

36. Yücel, M., Göktaş H. H., ve Çelebi, F. V. (2011, May). Temperature independent length optimization of L-band EDFAs providing flat gain. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics,* DOI: 10.1016/j.ijleo.2010.06.012.

37. Yücel, M. (2011, November). Fuzzy Logic-Based Automatic Gain Controller for EDFA. *Microwave and Optical Technology Letters,* DOI: 10.1002/mop.26318.

38. Yücel, M. (2012). Increase of Transmission Distance Using EDFA and Module Design for Free Space Optics Applications. *Gazi University Journal of Science* 25(1), 119-125.

39. Yücel, M. ve Göktaş H. H. (2006). İki Aşamalı C Band Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde (EKFY) Kazanç Düzleştirici Filtre Optimizasyonu. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 10(1).

40. Yücel, M. ve Göktaş H. H. (2008, April). *Düz Kazançlı Bir Optik Yükselteç Olarak C Band Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç.* Paper presented at the 2008 IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference, Aydın, Turkey, DOI: 10.1109/SIU.2008.4632737.

41. Aslan, Z. ve Yücel, M. (2012). Tek ve Çift Geçişli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerin C bandında Deneysel Olarak Karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 15(3), 135 - 138, DOI: 10.2339/2012.15.3.

42. Yücel, M., Göktaş H. H. ve Akkaya, G. (2012, April). *Optimization of three stage L band EDFA.* Paper presented at the 2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference, Muğla, Turkey. DOI: 10.1109/SIU.2012.6204451.

43. Sakamoto, T., Mori, A., Masuda, H. and Ono, H. (2004). Wideband rare-earth-doped fiber amplification technologies – Gain bandwidth expansion in the C and L bands. *NTT Technical Review*, 2(12), 38.

44. Yamada, M. (2004). Overview of wideband optical fiber amplification technologies. *NTT Technical Review*, 2(12), 34.

45. Soto, J., Aguiar, M. I. V., and Flores-Sintas, A. (2007). A fuzzy clustering application to precise orbit determination. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 204, 137–143.

46. Celebi F.V. and Altindag T. (2009). An accurate optical gain model using adaptive neuro-fuzzy interference system. *Optoelectronics and Advanced Materials for Rapid Communications*, 3, 975–977.

47. Kemtchou, J., Duhamel, M., and Lecoy, P. (1997). *Gain Temperature Dependence of Erbium-Doped Silica and Fluoride Fiber Amplifiers in Multichannel Wavelength-Multiplexed Transmission Systems.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Journal of Lightwave Technology, 15(11), 2083-2090.

48. Miniscalco, W. J. (1991). *Erbium-Doped Glasses for Fiber Amplifiers at 1500 nm.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Journal of Lightwave Technology, 9(2), 234-250.

49. Flood, F.A. (2001). *Comparision of Temperature Dependence in C-Band and L-Band EDFAs.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Journal of Lightwave Technology, 19(4), 527-535.

50. Im, Y. E., Oh, K., Chang, S. H., Kim, K., and DiGiovanni, D. J. (2005). *Reduction of Temperature-Dependent Gain in L-Band EDFA Using Antimony–Aluminum Codoped Silica EDF.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photonics Technology Letters, 17(9), 1839-1841.

51. Lee, J. H., Lee, W. J., and Park, N. (1998). *Comparative Study on Temperature-Dependent Multichannel Gain and Noise Figure Distortion for 1.48 and 0.98 nm Pumped EDFA's.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photonics Technology Letters, 10(12), 1721-1723.

52. Lee, J. H. and Park, N. (1998). *Reduction of Temperature-Dependent Multichannel Gain Distortion Using a Hybrid Erbium-Doped Fiber Cascade.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photonics Technology Letters, 10(8), 1168-1170.

53. Seo, H. S., Chung, W. J., and Ahn, J. T. (2005). *A Novel Hybrid Silica Wide-Band Amplifier Covering S+C+L Bands With 105-nm Bandwidth.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photonics Technology Letters, 7(9), 1830-1832.

54. Mehra, R., Jaiswal, S., and Dixit, H. K. (2012). Optical computing with semiconductor optical amplifiers, *Optical Engineering*, 51(8), 080901, https://doi.org/10.1117/1.OE.51.8.080901.

55. Mukai, T., and Yamamoto, Y. (1983). Optical direct amplification for fibre transmission, *Review of Electrical Communication Laboratory*, 3, 340-348.

56. O'Mahony, M. J., Westlake, H. J., and Marshall, I. W. (1985). Gain measurements on laser amplifiers for optical transmission systems at 1.5 μm. *British Telecom Technology Journal,* 3, 25-29.

57. Connelly, M. J. (2002). *Semiconductor Optical Amplifiers*. Kluwer Academic Publishers: Boston, A.B.D., 135-140.

58. Yücel, M. ve Tuza, F. (2012, Eylül). *Enjeksiyon Akımının Yarı İletken Optik Yükselteç Kazancına Etkisinin İncelenmesi.* Paper presented at the International Union of Radio Science (URSİ), İstanbul.

59. Bernard, J. J. and Renand, M. (2001). Semiconductor Optical Amplifiers, *Spie's Magazine,* 36-39.

60. Mukai, T., Dnoue, K., and Saito, T. (1987). Homogenous gain saturation in 1,5 μm InGaAsP Traveling-wave semiconductor laser amplifiers, *Applied Physics Letters,* 51.

61. Byron, K. C. (1986). Simultaneous amplification and pulse compression in a single-mode optical fibre. *Electronics Letters,* 22, 1275-1277.

62. Agrawal, G. P. (2002). *Fiber-Optic Comminication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 92-97.

63. Edagawa, N., Mochizuki, K., Ryu, S., and Wakabayashi, H. (1988). Amplification characteristics of fiber raman amplifiers. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers* (*IEICE) Technical Report.*

64. Seo, H. S, Chung, W. J, and Ahn, J. T. (2005). S+C Bands Amplification in a Distrubuted Er-Doped Raman Fiber. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photonics Technology Letters,* 17(6), 1181-1183.

65. Xing, L., Zhan, L., Luo, S., and Xia, Y. (2008, December). *High-Power Low-Noise Fiber Brillouin Amplifier for Tunable Slow-Light Delay Buffer.* Paper presented at the The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Journal of Quantum Electronics, (12)44, 1133 – 1138, DOI: 10.1109/JQE.2008.2004601.

66. Souidi, Y., Taleb, F., Zheng, J., Lee, M. W., Du Burck, F., and Roncin, V. (2016, January) Low Noise and High Gain Brillouin Optical Amplifier for narrow band active-optical-filtering based on a Pump-to-Signal Optoelectronic Tracking. *Applied Optics* 55(2), 248, DOI: 10.1364/AO.55.000248.

67. Tanabe, S. (2002, May). Rare-earth-doped glasses for fiber amplifiersin broadband telecommunication. *Académie des sciences*, Faculty of Integrated Studies, Kyoto University, Kyoto, 815–824.

68. Digonnet, M. J. F. (1993). *Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers.* New York: Stanford University/Marcel Dekker, Inc., 340-350.

69. Aslan, Z. (2013). *Çift Geçişli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Gürültü Faktörünün Azaltılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, 20-21.

70. Husein, A. H. M., El-Nahal, F. I., Hamadah, M. S., and Astal, H. (2012, October). *The dependence of gain and noise figure on temperature variation for EDFAs pumped at 980*

nm. Paper presented at the The Fourth International Engineering Conference (IEC4), Palestine.

71. Chen, P., Feng, S., An, L., Song, H., Zhao, X., and Xu, C. (2012). Crystal fiber based erbium doped amplifiers and their gain. *International Journal of Future Computer and Communication*, 1(1), 40-43.

72. Sharma, K. K., Sharma, V., and Sharma, B. (2013). Analysis of 2-stage erbium doped fibre amplifier with optimum parameters. *International Journal of. Engineering Education (IJEE)*, 5(2), 119-122.

73. Lin, M. C., and Chi, S. (1992). The gain and optimal length in the erbium-doped fiber amplifiers with 1480 nm pumping. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) photonics technology letters*, 4(4), 354-356.

74. Pedersen, B., Bjarkev, A., Polvsen, J. H., Dybdal, K. and Larsen, C.C. (1991, September). The design of erbium-doped fibre amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 9, 1105-1112.

75. Rebolledo, M. A. (2004). Characterization and modeling of Erbium-doped fibers and integrated waveguides. *Fiber and integrated optics*, 23(2), 189-200.

76. Konkanen, S. (1997). High Er concentration phosphate glasses for planar waveguide amplifiers. *Proc. The International Society for Optics and Photonics (SPIE)* 32, 2996, DOİ:10.1117/12.271162.

77. Desurvire, E., and Zervas, M. N. (1995). Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications. *Physics Today*, 56.

78. Rebolledo, M. A., and Jarabo, S. (1994). Erbium-doped silica fiber modeling with overlapping factors. *Applied optics*, 33(24), 5585-5593.

79. Koyuncu, O. (2018). *Erbiyum Katkılı Fiber Kullanılarak Pasif Kenar Filtre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, 16-17.

80. Giles, C. R. and Desurvire, E. (1991). Modeling Erbium Doped Fiber Amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 9(2), 271-283.

81. Desurvire, E. (1991). *Perspectives of 1.5-μm erbium-doped fiber amplifiers.* Paper presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics, USA.

82. Lin, M. C. and Chi, S. (1992). The gain and optimal length in the erbium-doped fiber amplifiers with 1480nm pumping, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* (*IEEE) Photonics Technology Letters*, 4, 354–356.

83. Yu, A., O'Mahony, M. J., and Siddiqui, A.S. (1993). Analysis of Optical Gain Enhanced Erbium-Doped Fiber Amplifiers Using Optical Filters. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* (*IEEE) Photonics Technology Letters*, (5)7, 773-775.

84. Hossain, N., Mishra, V., Hairul, A. A. R., Abbou, F. M., Faidz, A. R., Quadir, S. M. M., Al-Mansoori, M. H., Mahdi M. A. and Naji., A.W. (2007). *A Numerical Analysis of R-EDFA for Long Haul Optical Fiber Communication System.* Paper presented at the 4th International Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications.

85. Harun, S. W., Ahmad, H. (2004). Efficient and Low-Noise Gain Flattened Double Pass L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier. *Microwave and Optical Technology Letters*, 40(2), 112-114.

86. Desurvire, E. (1994). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, New York: John Wiley & Sons, Inc, USA, 7.

87. Becker, P. C., Olsson, N. A., and Sinpson, J. R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers.* New York: Academic Press, USA, 204.

88. Hossain, N., Naji, A. W., Mishra, V., Abbou, F. M., Al-Mansoori, M. H., Mahdi, M. A., and Faidz, A. R. (2007). Modeling, Optimization, and Experimental Evaluation of Remotely Pumped Double-Pass EDFA. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(9), 2257-2261.

89. Hossain, N., Naji, A. W., Mishra, V., Abbou, F. M., Hairul A. A. R. and Faidz., A. R. (2007). Theoretical analysis, Optimization, and experimental evaluation of Dual Function DP R-EDFA. *Journal of Russian Laser Research*. 28(3).

90. Hossain N., Naji, A. W., Mishra, V., Abbou, F.M., Hairul A. A. R., and Faidz., A.R. (2007, April). Numerical and experimental Analysis of Dual-Function EDFA. *International Journal of Microwave and Optical Technology*, 2(2).

91. Yucel, M., Ozoglu, Y. A., Goktas, H. H., Gündüz, A. E. and Burunkaya, M. (2019). Determination of the Temperature Independent Quiescent Regions for Different Types of Erbium-Doped Fibers. *Optik*, 183,619-628.

92. OptiSystem Version 16; Optical Fiber Amplifier and Laser Design Software (Copyright © 2019 Optiwave).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YİĞİT, Emrah

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : [redacted]

Medeni hali : [redacted]

Telefon : [redacted]

e-mail : [redacted]

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Bilişim Sistemleri	Devam ediyor
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2010
Lise	Polatlı Anadolu Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Savunma Sanayii Başkanlığı	Proje Mühendisi
2011-2013	ZTE Corporation	Network Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Yücel M., Yiğit E. İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY Tasarımı ve EKFY Parametrelerinin Optimizasyonu. *Gazi University Science Journal: PART:C 'Design and Technology'*, Vol. 8 Issue 2, pp. 335-344, June 2020, DOI: https://doi.org/10.29109/gujsc.695874.

Hobiler

Balık avı, turistik geziler



GAZİLİ OLMAK AYRICALIKTIR.