
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

O-BAND ÇOK GEÇİŞLİ PRASEODİMYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇ KONFİGÜRASYONLARI VE PARAMETRE OPTİMİZASYONLARI

Hasan CİHANGİR

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri 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.

Hasan CİHANGİR

14/01/2026

O-BAND ÇOK GEÇİŞLİ PRASEODİMYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇ KONFİGÜRASYONLARI VE PARAMETRE OPTİMİZASYONLARI

(Doktora Tezi)

Hasan CİHANGİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

C-bandı, en düşük iletim kaybını sunmaktadır. Ancak internet kullanıcı sayısındaki artış bant genişliğine olan talebi üstel olarak artırmaktadır. Bu artan talebi karşılamada, O-bandı (1260–1360 nm) standart ITU-T G.652 tek modlu fiberlerin bu aralıkta sıfır dispersiyon göstermesi nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu özellik, veri merkezleri, 5G ön bağlantı ve yapay zeka kümeleri gibi kısa mesafeli (40 km'ye kadar), yüksek hızlı ve uygun maliyetli uygulamalar için ideal hale getirir. O-bandında Praseodimyum katkılı fiber yükselteçler (PKFY) için yeni konfigürasyonlar araştırmak ve bunların başlıca parametrelerini optimize etmek tasarım, maliyet ve performans bakımından oldukça önemlidir. Yükselteç konfigürasyonlarında başlıca tasarım bileşenleri ayarlanabilir lazer kaynağı (ALK), Praseodimyum katkılı fiber (PKF) ve pompa lazeridir. ALK için sinyal gücü ve sinyal dalgaboyu; PKF için PKF uzunluğu, iyon yoğunluğu, ters birikme katsayısı, numerik açıklık, çekirdek yarıçapı, katkılama yarıçapı ve sıcaklık; pompa lazeri için pompa gücü ve pompa dalgaboyu temel tasarım parametreleridir. Literatürde tek geçişli ve iki aşamalı çift geçişli (İAÇG) PKFY çalışmaları bulunmasına rağmen, bu tez çalışmasında ilk kez bir aşamalı çift geçişli (BAÇG), iki aşamalı üç geçişli (İAÜG), üç aşamalı üç geçişli (ÜAÜG), iki aşamalı dört geçişli (İADG) ve dört aşamalı dört geçişli (DADG) PKFY konfigürasyonları tasarlanmış, bunların başlıca parametre optimizasyonları yapılmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Geleneksel bir aşamalı çift yönlü (BAÇY) PKFY ile BAÇG-PKFY, İAÜG-PKFY ile ÜAÜG-PKFY, İADG-PKFY ile DADG-PKFY konfigürasyonlarının performansları kazanç, gürültü faktörü (GF), pompa dönüşüm verimliliği (PDV) açısından karşılaştırılmıştır. Optimize edilen parametre değerleri sonucunda geleneksel BAÇY-PKFY konfigürasyonuna alternatif olarak sunulan BAÇG-PKFY konfigürasyonunun çok daha verimli olduğu görülmüştür. İAÜG-PKFY konfigürasyonu, ÜAÜG-PKFY konfigürasyonundan; İADG-PKFY konfigürasyonu, DADG-PKFY konfigürasyonundan daha iyi performans göstermiştir. Sonuç olarak yeni PKFY konfigürasyonlarından elde edilen sonuçlarla birlikte ihtiyaç duyulan band genişliği talebine alternatif olarak değerlendirilebileceği öngörülmektedir. Bunun yanında çok geçişli PKFY konfigürasyonları tasarımcılar ve araştırmacılar için yol gösterici olması beklenmektedir.

Bilim Kodu	:	93428
Anahtar Kelimeler	:	O-band, PKFY, çok geçişli, çok aşamalı, optimizasyon
Sayfa Adedi	:	109
Danışman	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

O-BAND MULTI-PASS PRASEODYMIUM DOPED FIBER AMPLIFIER CONFIGURATIONS AND PARAMETER OPTIMIZATIONS

(Ph. D. Thesis)

Hasan CİHANGİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

The C-band offers the lowest transmission loss. However, the increase in the number of internet users is exponentially increasing the demand for bandwidth. In meeting this increasing demand, the O-band (1260–1360 nm) stands out because standard ITU-T G.652 single-mode fibers exhibit zero dispersion in this range. This feature makes it ideal for short reach (up to 40 km), high-speed, and cost-effective applications such as data centers, 5G pre-connection, and artificial intelligence clusters. Investigating new configurations for Praseodymium doped fiber amplifiers (PDFA) in the O-band and optimizing their key parameters is crucial for design, cost, and performance. The main design components in amplifier configurations are the tunable laser source (TLS), Praseodymium-doped fiber (PDF), and pump laser. For the TLS, signal power and signal wavelength; for the PDF, PDF length, ion density, upconversion coefficient, numerical aperture, core radius, doping radius, and temperature; and for the pump laser, pump power and pump wavelength are fundamental design parameters. Although single-pass and two-stage double-pass (2S2P) PDFA studies exist in the literature, this thesis is the first to design one-stage double-pass (1S2P), two-stage triple-pass (2S3P), three-stage triple-pass (3S3P), two-stage quadruple-pass (2S4P), and four-stage quadruple-pass (4S4P) PDFA configurations, conduct key parameter optimizations, and analyze the results. The performance of conventional one-stage bidirectional (1SBD) PDFA with 1S2P-PDFA, 2S3P-PDFA with 3S3P-PDFA, and 2S4P-PDFA with 4S4P-PDFA configurations was compared in terms of gain, noise factor (NF), and pump conversion efficiency (PCE). As a result of the optimized parameter values, the 1S2P-PDFA configuration, presented as an alternative to the conventional 1SBD-PDFA configuration, was found to be much more efficient. The 2S3P-PDFA configuration performed better than the 3S3P-PDFA configuration, and the 2S4P-PDFA configuration performed better than the 4S4P-PDFA configuration. In conclusion, it is predicted that the results obtained from the new PDFA configurations can be considered as an alternative to the required bandwidth demand. In addition, multi-pass PDFA configurations are expected to provide guidance for designers and researchers.

Science Code	:	93428
Key Words	:	O-band, PDFA, multi-pass, multi-stage, optimization
Page Number	:	109
Supervisor	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmalar boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren desteği ve bilgi birikimiyle hep yanımda olan tecrübesini bana aktarmaktan mutluluk duyan kıymetli Hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL'e teşekkür eder, göstermiş olduğu alâka ve nezakete en derin şükranlarımı sunarım. Tez sürecim boyunca desteklerini hiç eksik etmeyen hep yanımda olan sevgili annem ve babama en içten teşekkürlerimi ve hürmetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 7

3. OPTİK YÜKSELTEÇLER 15

3.1. Nadir Toprak Elementi Katkılı Fiber Yükselteçler 16

3.2. Yarıiletken Optik Yükselteçler 20

3.3. Fiber Raman Yükselteçler 20

3.4. Fiber Brillouin Yükselteçler 21

4. PRASEODİMYUM KATKILI OPTİK YÜKSELTEÇLER 23

4.1. Praseodimyum Soğurma ve Yayılım Spektrumu 23

4.2. PKFY Çalışma Prensibi 24

4.3. Yayılım Denklemleri 28

4.4. Kullanım Alanları 30

5. ÇOK GEÇİŞLİ NTEKFY KONFİGÜRASYONLARI 31

5.1. Tek Geçişli İleri, Geri ve Çift Yönlü Pompalama Konfigürasyonları 31

5.2. Çift Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları 33

5.2.1. Bir aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu 34

Sayfa

5.2.2. İki aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu 34
5.3. Üç Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları 35
5.3.1. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonları 36
5.3.2. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu 37
5.4. Dört Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları..... 37
5.4.1. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu..... 37
5.4.2. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonları 38
5.4.3. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu..... 39
6. ÇOK GEÇİŞLİ PKFY KONFİGÜRASYONLARI VE ANALİZLERİ 41
6.1. İleri, Geri ve Çift Yönlü Tek Geçişli Temel PKFY Konfigürasyonları 44
6.2. Bir Aşamalı Çift Yönlü ve Çift Geçişli PKFY Analizleri ve Karşılaştırılması . 46
6.2.1. Praseodimyum katkılı fiber uzunluğu analizleri ve karşılaştırılması..... 48
6.2.2. Sinyal gücü analizleri ve karşılaştırılması 50
6.2.3. Pompa gücü analizleri ve karşılaştırılması 52
6.2.4. İyon yoğunluğu analizleri ve karşılaştırılması..... 54
6.2.5. Ters birikme katsayısı analizleri ve karşılaştırılması..... 55
6.2.6. Numerik açıklık analizleri ve karşılaştırılması 57
6.2.7. Çekirdek yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması..... 59
6.2.8. Katkılama yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması..... 60
6.2.9. Pompa dalgaboyu analizleri ve karşılaştırılması..... 62
6.2.10. Sıcaklık analizleri ve karşılaştırılması 63
6.2.11. Kendiliğinden yükseltilmiş yayılım analizleri ve karşılaştırılması..... 65
6.2.12. Pompa dönüşüm verimliliği karşılaştırılması 66
6.3. İki ve Üç Aşamalı Üç Geçişli PKFY Analizleri ve Karşılaştırılması..... 67

Sayfa

6.3.1. Praseodimyum katkılı fiber uzunluğu analizleri ve karşılaştırılması 70
6.3.2. Sinyal gücü analizleri ve karşılaştırılması 71
6.3.3. Pompa gücü analizleri ve karşılaştırılması 73
6.3.4. İyon yoğunluğu analizleri ve karşılaştırılması 74
6.3.5. Ters birikme katsayısı analizleri ve karşılaştırılması 76
6.3.6. Numerik açıklık analizleri ve karşılaştırılması 77
6.3.7. Çekirdek yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması 78
6.3.8. Katkılama yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması 79
6.3.9. Pompa dalgaboyu analizleri ve karşılaştırılması 81
6.3.10. Sıcaklık analizleri ve karşılaştırılması 82
6.3.11. Kendiliğinden yükseltilmiş yayılım analizleri ve karşılaştırılması 83
6.3.12. Pompa dönüşüm verimliliği karşılaştırılması 85
6.4. İki ve Dört Aşamalı Dört Geçişli PKFY Konfigürasyonları 86
6.4.1. Praseodimyum katkılı fiber uzunluğu analizleri ve karşılaştırılması 88
6.4.2. Kendiliğinden yükseltilmiş yayılım analizleri ve karşılaştırılması 90
6.4.3. Pompa dönüşüm verimliliği karşılaştırılması 91
7. SINIRLILIKLAR VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR 93
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 95
KAYNAKLAR 99
ÖZGEÇMİŞ 109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Başlıca nadir toprak elementi katkı iyonları ve özellikleri 17

Çizelge 6.1. Parametre başlangıç değerleri 41

Çizelge 6.2. Optimize edilmiş parametre değerleri 66

Çizelge 6.3. Yapılan son çalışmalar ile karşılaştırma 66

Çizelge 6.4. Optimize edilmiş parametre değerleri 84

Çizelge 6.5. Yapılan son çalışmalar ile karşılaştırma 86

Çizelge 6.6. Dört geçişli yükselteçler için parametre başlangıç değerleri 88

Çizelge 6.7. KYY analizi için belirlenen parametre değerleri 90

Çizelge 6.8. Yapılan son çalışmalar ile karşılaştırma 92

Çizelge 8.1. Optimize edilen parametre değerleri 95

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Optik iletişim penceresinin farklı bandları için optik yükselteçler 16

Şekil 4.1. Praseodimyum soğurma ve yayılım spektrumu 24

Şekil 4.2. Beş seviyeli Praseodimyum iyonlarının enerji diyagramı 25

Şekil 5.1. Tek geçişli ileri yönlü pompalama konfigürasyonu 32

Şekil 5.2. Tek geçişli geri yönlü pompalama konfigürasyonu 32

Şekil 5.3. Tek geçişli çift yönlü pompalama konfigürasyonu 33

Şekil 5.4. Bir aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu 34

Şekil 5.5. İki aşamalı çift geçişli yükselteç tasarımı 35

Şekil 5.6. İki aşamalı üç geçişli yükselteç I konfigürasyonu 36

Şekil 5.7. İki aşamalı üç geçişli yükselteç II konfigürasyonu 36

Şekil 5.8. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu 37

Şekil 5.9. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu 38

Şekil 5.10. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç I konfigürasyonu 38

Şekil 5.11. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç II konfigürasyonu 39

Şekil 5.12. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç III konfigürasyonu 39

Şekil 5.13. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu 40

Şekil 6.1. Tek parametre optimizasyon şeması akış diyagramı 43

Şekil 6.2. İleri yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu 44

Şekil 6.3. Geri yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu 45

Şekil 6.4. Çift yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu 45

Şekil 6.5. Bir aşamalı çift yönlü PKFY konfigürasyonu 46

Şekil 6.6. Bir aşamalı çift geçişli PKFY konfigürasyonu 47

Şekil 6.7. Sinyal dalgaboyuna karşı kazanç değişimi 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.8. Sinyal dalgaboyuna karşı GF değişimi 48

Şekil 6.9. PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi 49

Şekil 6.10. PKF uzunluğuna karşı GF değişimi 50

Şekil 6.11. Sinyal gücüne karşı kazanç değişimi 51

Şekil 6.12. Sinyal gücüne karşı GF değişimi 52

Şekil 6.13. Pompa gücüne karşı kazanç değişimi 53

Şekil 6.14. Pompa gücüne karşı GF değişimi 53

Şekil 6.15. İyon yoğunluğuna karşı kazanç değişimi 54

Şekil 6.16. İyon yoğunluğuna karşı GF değişimi 55

Şekil 6.17. Ters birikme katsayısına karşı kazanç değişimi 56

Şekil 6.18. Ters birikme katsayısına karşı GF değişimi 57

Şekil 6.19. Numerik açıklık değerine karşı kazanç değişimi 58

Şekil 6.20. Numerik açıklık değerine karşı GF değişimi 58

Şekil 6.21. Çekirdek yarıçapına karşı kazanç değişimi 59

Şekil 6.22. Çekirdek yarıçapına karşı GF değişimi 60

Şekil 6.23. Katkılama yarıçapına karşı kazanç değişimi 61

Şekil 6.24. Katkılama yarıçapına karşı GF değişimi 61

Şekil 6.25. Pompa dalgaboyuna karşı kazanç değişimi 62

Şekil 6.26. Pompa dalgaboyuna karşı GF değişimi 63

Şekil 6.27. Sıcaklık değişimine karşı kazanç değişimi 64

Şekil 6.28. Sıcaklık değişimine karşı GF değişimi 64

Şekil 6.29. Sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişimi 65

Şekil 6.30. İki aşamalı üç geçişli PKFY konfigürasyonu 68

Şekil 6.31. Üç aşamalı üç geçişli geçişli PKFY konfigürasyonu 68

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.32. Sinyal dalgaboyuna karşı kazanç değişimi 69

Şekil 6.33. Sinyal dalgaboyuna karşı GF değişimi 69

Şekil 6.34. PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi karşılaştırılması 70

Şekil 6.35. PKF uzunluğuna karşı GF değişimi 71

Şekil 6.36. Sinyal gücüne karşı kazanç değişimi 72

Şekil 6.37. Sinyal gücüne karşı GF değişimi 72

Şekil 6.38. Toplam pompa gücüne karşı kazanç değişimi 73

Şekil 6.39. Toplam pompa gücüne karşı GF değişimi 74

Şekil 6.40. İyon yoğunluğuna karşı kazanç değişimi 75

Şekil 6.41. İyon yoğunluğuna karşı GF değişimi 75

Şekil 6.42. Ters birikme katsayısına karşı kazanç değişimi 76

Şekil 6.43. Ters birikme katsayısına karşı GF değişimi 77

Şekil 6.44. Numerik açıklık değerine karşı kazanç değişimi 77

Şekil 6.45. Numerik açıklık değerine karşı GF değişimi 78

Şekil 6.46. Çekirdek yarıçapına karşı kazanç değişimi 78

Şekil 6.47. Çekirdek yarıçapına karşı GF değişimi 79

Şekil 6.48. Katkılama yarıçapına karşı kazanç değişimi 80

Şekil 6.49. Katkılama yarıçapına karşı GF değişimi 80

Şekil 6.50. Pompa dalgaboyuna karşı kazanç değişimi 81

Şekil 6.51. Pompa dalgaboyuna karşı GF değişimi 82

Şekil 6.52. Sıcaklığa karşı kazanç değişimi 83

Şekil 6.53. Sıcaklığa karşı GF değişimi 83

Şekil 6.54. Sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişimi 84

Şekil 6.55. İki aşamalı dört geçişli PKFY konfigürasyonu 87

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.56. Dört aşamalı dört geçişli PKFY konfigürasyonu..... 87

Şekil 6.57. PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi..... 89

Şekil 6.58. PKF uzunluğuna karşı GF değişimi..... 89

Şekil 6.59. Sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişimi 90

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
τ_3	$^1G_4$ seviyesinin ömrü
τ_4	$^1D_2$ seviyesinin ömrü
τ_5	$^3P_0$ seviyesinin ömrü
N	İyon yoğunluğu seviyesi
W_{ij}	i ve j seviyeleri arasındaki geçiş oranları
P_p	Pompa gücü
P_s	Sinyal gücü
σ_{ij}	i ve j seviyeleri arasındaki uyarılmış yayılım kesiti
η_p	Katkılı fiber çekirdeğindeki kesirli pompa gücü
η_s	Katkılı fiber çekirdeğindeki kesirli sinyal gücü
Γ_s	Sinyal için örtüşme faktörü
A_c	Katkılı fiber öz alanı
N_t	Toplam pompa yoğunluğu
v_p	Pompa frekansı
v_s	Sinyal frekansı
v_i	KYY frekansı
s	Saniye
µs	Mikrosaniye
L	Fiber uzunluğu
c	Işık hızı
h	Plank sabiti
dB	Desibel
dBm	Desibel-miliwatt
mW	Miliwatt
m	Metre
µm	Mikrometre

Simgeler	**Açıklamalar**
nm	Nanometre
$\mathbf{P_{s_{in}}}$	Giriş sinyal gücü
$\mathbf{P_{s_{out}}}$	Çıkış sinyal gücü
$\mathbf{P_{KYY}^{\pm}}$	İleri ve geri yönde yayılan KYY
$\mathbf{g_a}$	Uyarılmış durum soğurum faktörü
$\mathbf{g_e}$	Uyarılmış durum yayılım faktörü
$\mathbf{g_g}$	Toprak durum soğurum faktörü
$\mathbf{g_p}$	Pompa durum soğurum faktörü
$\boldsymbol{\lambda}$	Dalgaboyu
I	Yoğunluk dağılımı
$\mathbf{a_v}$	Saçılma kayıpları
a	Çekirdek yarıçapı
kHz	Kilohertz
Tbps	Saniye başına terabit

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ALK	Ayarlanabilir lazer kaynağı
BAÇG	Bir aşamalı çift geçişli
BAÇY	Bir aşamalı çift yönlü
BKFY	Bizmut katkılı fiber yükselteç
ÇG	Çift geçişli
DA	Dört aşamalı
DADG	Dört aşamalı dört geçişli
DBÇ	Dalgaboyu bölmeli çoğullama
DG	Dört geçişli
DRY	Dağıtılmış Raman yükselteç
EKFY	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
ESA	Uyarılmış durum soğurması
FBY	Fiber Brillouin yükselteç
GF	Gürültü faktörü

Kısaltmalar	Açıklamalar
GSA	Toprak durum yayılımı
HKFY	Holmiyum katkılı fiber yükselteç
İA	İki aşamalı
İADG	İki aşamalı dört geçişli
İAÇG	İki aşamalı çift geçişli
İGÜA	İki aşamalı üç geçişli
İKFY	İterbiyum katkılı fiber yükselteç
KYY	Kendiliğinden yükseltilmiş yayılım
NKFY	Neodimyum katkılı fiber yükselteç
NTE	Nadir toprak elementi
NTEKFY	Nadir toprak elementi katkılı fiber yükselteç
PDV	Pompa dönüşüm verimliliği
PKF	Praseodimyum katkılı fiber
PKFY	Praseodimyum katkılı fiber yükselteç
UBS	Uyarılmış Brillouin saçılması
SGO	Sinyal gürültü oranı
TKFY	Tulyum katkılı fiber yükselteç
URS	Uyarılmış Raman saçılması
ÜA	Üç aşamalı
ÜAÜG	Üç aşamalı üç geçişli
ÜG	Üç geçişli
YDBÇ	Yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama
YOY	Yarıiletken optik yükselteç

1. GİRİŞ

Son yıllarda, hem kablolu hem de kablosuz platformlardaki artan internet kullanıcısı sayısından dolayı, ağ operatörlerinin band genişliğine olan talebi üstel olarak artmaktadır. Bu artış, yeni nesil internet ağlarının mevcut dağıtımı, çevrim içi hizmetlerin hızlı gelişimi, sosyal ağ platformları, yayın hizmetleri, çevrim içi oyun, elektronik ticaret platformları, IP üzerinden ses, video konferans, yüksek çözünürlüklü video akışı gibi çeşitli yüksek band genişliği gerektiren uygulamalardan kaynaklanmaktadır [1-5].

Günümüzde, optik iletişim ağları, artan trafik taleplerini karşılamak için küresel veri iletimini kolaylaştırmada kritik öneme sahiptir [6,7]. Sonuç olarak, büyük band genişliği talebini karşılamak için optik fiber ağlarının iletim kapasitesi ve erişim mesafesi son birkaç yılda muazzam ölçüde artmıştır. Örneğin, son zamanlarda ticari olarak kullanılan C-bandındaki dalgaboyu bölmeli çoğullama (DBÇ) ağları, birkaç yüz kilometre uzunluğundaki tek bir fiber üzerinden yaklaşık 1,6 Tbps'lik toplam veri hızına sahip 160'tan fazla kanalı taşımaktadır [8, 9]. Ek olarak, DBÇ ağları genellikle belirli dalgaboylarının yönetildiği birkaç ekleme-çıkarma noktası içerir. Bununla birlikte, bu bileşenler önemli sinyal kaybına neden olur [9, 10]. Optik sinyaller uzun mesafeler boyunca ilerledikçe daha da zayıflar. Bunu çözmek için, sinyali güçlendirmek amacıyla katkılı fiber yükselteç kullanılır. Bu yükselteçler aynı anda birden fazla dalgaboyuna yüksek kazanç sağlayarak, kayıp optik gücü etkili bir şekilde geri kazanır ve ağ boyunca sinyal gücünü korur [11].

Katkılı fiber yükselteçlerin üretiminde potansiyel olarak kullanılabilecek nadir toprak elementi (NTE) katkı maddelerinin başlıcaları Erbiyum, Tulyum, Praseodimyum, Neodimyum, Holmiyum ve İterbiyum'dur [12]. Genel olarak optik iletişim sistemleri, optik fiberin düşük zayıflama gösterdiği optik pencerelerde çalışır. 1,5 μm ve 1,3 μm dalgaboyu bölgeleri, saçılma ve soğurma kayıplarının minimum olduğu ve sırasıyla 0,22 dB ve 0,3 dB'ye eşit olduğu iki penceredir [13]. Günümüzde en çok tercih edilen 1,5 μm penceresi kapasite sınırlarıyla karşı karşıya olduğundan, iletim band genişliğine olan talebin üstel büyümesini karşılamak için yeni bir pencere açılması son derece arzu edilir. Bundan dolayı 1,3 μm penceresi sıfır dispersiyon, düşük saçılma ve soğurma kayıpları gibi avantajları sayesinde, optik iletişim sistemlerinin geliştirilmesi noktasında sistem tasarımcıları tarafından sunduğu fırsatlar nedeniyle geniş çapta araştırılmaktadır [13, 14].

PFKY'ler, 1,25 – 1,35 μm bandında çalışır ve 1,3 μm civarında en yüksek kazancı verebilir ve ticari olarak temin edilebilir [15]. İkinci (1,3 μm bölgesi) ve üçüncü (1,55 μm bölgesi) optik pencere dalgaboyu bölgeleri, saçılma ve soğurma kayıplarının minimum olduğu iki pencere olmasından dolayı Praseodimyum katkılı fiber yükselteçler (PKFY), Erbiyum katkılı fiber yükselteçlere (EKFY) alternatif olabilecek tasarım çalışmaları yapılmaktadır [16,17]. Son yıllarda ise çok geçişli yükselteç tasarımları üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmalar temel yükselteç devresine yükseltme ortamından sinyalin birden fazla geçirilerek yeniden yükseltilmesi mantığına dayanmaktadır.

Yapılmış olan çok geçişli nadir toprak elementi katkılı fiber yükselteç (NTEKFY) çalışmaları incelendiğinde genellikle C ve L-bandında EKFY'ler üzerine yapıldığı görülmektedir [18-27]. O-bandında ise çok geçişli yükselteç tasarımları üzerine henüz bir çalışma (iki aşamalı iki geçişli yükselteç konfigürasyonu [28] dışında) yapılmadığı, dolayısıyla literatürde bu konuda boşluk olduğu görülmektedir.

Tezin organizasyonu

Bu tez çalışmasında, literatür incelendiğinde PKFY'ler ile ilgili çok geçişli yükselteç konfigürasyon çalışmalarının genellikle yer almadığı görülmüştür. Bundan dolayı O-bandı için yüksek kazanç elde edilebilecek çok geçişli PKFY'lerin yeni konfigürasyonları araştırılmıştır. Çok geçişli EKFY çalışmaları literatürde sıkça yer almasından dolayı buna alternatif olabilecek PKFY'ler için yeni konfigürasyonlar incelenmiştir. EKFY ile altı geçişli düzeneğe kadar literatürde yer aldığı görülmektedir. Fakat yapılan çalışmalarda PKFY'ler için iki ve üç geçişli konfigürasyon tasarımları yeterli olduğu ve dört ve üstü geçişlerde yükselteç doyuma ulaştığı, sistemin karmaşıklığının arttığı, kontrol edilebilirliği zorlaştığı ve tasarım maliyetinin ciddi oranda artışa neden olduğu görülmüştür.

Bundan dolayı iki ve üç geçişli PKFY konfigürasyonların incelenmesine daha çok ağırlık verilmiştir. Bu konfigürasyonlar için temel parametre değerleri belirlenmiştir. Bu parametreler sırasıyla kazanç ve GF bakımından analiz edilmiştir. Kazanç bakımından elde edilen optimum değerler ile kendiliğinden yükseltilmiş yayılım (KYY) gürültü gücü karşılaştırılmış ve daha sonra bu değerler yardımıyla yükselteçlerin PDV değerleri elde edilmiştir. İki geçişli, üç geçişli ve dört geçişli yükselteç tasarımlarından avantajlı olan konfigürasyonlar belirlenmiştir.

Bu çalışmada:

İkinci bölümde; literatürde NTEKFY'ler ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Literatür çalışmasında iki ve üç geçişli yükselteç konfigürasyonlarına ağırlıklı olarak değinilmiştir. PKFY'ler ile ilgili yapılan çalışmalarının oldukça sınırlı olduğu ve çok geçişli PKFY konfigürasyonlarının, iki aşamalı iki geçişli PKFY dışında, literatürde yer almadığı görülmüştür.

Üçüncü bölümde; optik yükselteçler ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir. Temel optik yükselteçlerin çeşitleri kısaca ele alınmıştır. NTEKFY, yarıiletken optik yükselteçler, fiber Raman yükselteçler, fiber Brillouin yükselteçlerden bahsedilmiştir. Başlıca NTEKFY çeşitlerine değinilmiştir. Bunlarla ilgili genel bilgilere yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde; NTE olan PKFY'ler hakkında detaylı bilgilendirme yapılmıştır. PKFY teorik modeli, soğurma ve yayılım grafiği, yayılım denklemleri, günümüzde ticari olarak yer alan PKFY ve kullanım alanları anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, literatürde yer alan bir – dört geçişli NTEKFY konfigürasyonlarına değinilmiştir. Burada başlangıçta temel yükselteç konfigürasyonları olan ileri, geri ve çift yönlü bir geçişli NTEKFY konfigürasyonlarından bahsedilmiştir. Daha sonra iki – dört aşamalı iki – dört geçişli NTEKFY konfigürasyonları anlatılmıştır.

Altıncı bölümde; tezin araştırma konusu olan çok geçişli PKFY çalışmalarına yer verilmiştir. Bu bölümde özellikle BAÇG-PKFY konfigürasyonu, iki ve üç aşamalı üç geçişli PKFY konfigürasyonları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve sonra iki ve dört aşamalı dört geçişli PKFY konfigürasyonlarına da değinilmiştir. Sırasıyla çok geçişli PKFY konfigürasyonlarının analizi için başlıca temel parametreler belirlenmiştir. Daha sonra bu parametreler kazanç ve GF bakımından sırayla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar bir sonraki parametre optimizasyonunda kullanılmıştır. Böylece optimum parametre değerleri sırayla belirlenerek yükselteç konfigürasyonları için kazanç maksimize edilmeye çalışılmıştır. Yükselteçlerin KYY gürültü gücü karşılaştırılmış ve yükselteçler için PDV değerleri bulunmuştur. Son olarak en uygun yükselteç konfigürasyonları belirlenmiştir.

Yedinci bölümde; gelecek çalışmalar ve uygulanabilirlik hakkında bilgiler verilmiştir. EKFY ile ilgili bölümdeki laboratuvar deneyimi dikkate alınarak yapılan deneysel çalışmalar ile simülasyon çalışmaları karşılaştırılmasındaki benzerlikler ve farklılıklar göz önünde bulundurularak PKFY'ler için genel beklentiler değerlendirilmiştir.

Sekizinci ve son bölümde; yapılan çok geçişli yükselteç konfigürasyonlarının sonuçları değerlendirilmiştir. Genel olarak çalışmanın öneminden ve literatüre katkısından bahsedilmiştir.

Araştırmanın amacı

1,5 μm ve 1,3 μm dalgaboyu bölgeleri, saçılma ve soğurma kayıplarının minimum olduğu bölgelerdir. Günümüzde en çok tercih edilen 1,5 μm penceresi kapasite sınırlarıyla karşı karşıya olduğundan dolayı, iletim band genişliğine olan talebin üstel büyümesini karşılamak amacıyla yeni bir pencere açılması oldukça önemlidir. Bu amaçla, sıfır dispersiyon ve düşük saçılma ve soğurma kayıpları nedeniyle 1,3 μm penceresi buna alternatif olabilir. Literatür incelendiğinde çok geçişli PKFY konfigürasyon çalışmaları oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Bu araştırmada literatüre çok geçişli PKFY'lerin yeni konfigürasyonlarının kazandırılması amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi

O-bandı, kısa mesafeli, yüksek hızlı optik iletim için ideal olup veri merkezi bağlantıları, pasif optik ağlar, 5G için 40 km menzil içinde radyo ünitelerini ve bazband ünitelerini bağlamak için idealdir. Ayrıca yapay zeka kümeleri ve uç bilişimde grafik işleme birimleri veya dağıtılmış hesaplama düğümleri arasında düşük gecikmeli, yüksek band genişliğine sahip bağlantıları destekleyerek yüksek hızlı ethernette 100GBASE-LR4 ve 400GBASE-LR8 gibi standartlarda uygulanarak sistem karmaşıklığını ve güç tüketimini azaltmaktadır. Ancak mevcut PKFY'lerin PDV'leri ve kazançları düşüktür. Çok geçişli PKFY konfigürasyonlarının parametre optimizasyonları sonucunda performansları artırılmıştır. Bundan dolayı, uzun mesafeli fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanılan yükselteç tekrarlayıcı sayısı azaltılabilir. Böylelikle tasarım maliyetlerinde bir düşüş sağlanabilir. Ayrıca bu tezde ilk kez bir aşamalı iki geçişli, iki ve üç aşamalı üç geçişli, iki aşamalı ve dört aşamalı dört geçişli PKFY konfigürasyonları incelenmiştir. Böylece EKFY'lere

alternatif olabilecek çok geçişli PKFY'lerin yeni konfigürasyonlarının analiz edilmesi oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür incelendiğinde genelde yapılan çalışmalar ileri, geri ve çift yönlü pompalama yöntemlerini kullanan tek geçişli PKFY konfigürasyonlarına odaklanmıştır. Genellikle bu analizler, PKFY konfigürasyonlarının yalnızca birkaç parametre optimizasyonuyla sınırlıdır. Ayrıca literatürde, O-bandında çok geçişli PKFY kofigürasyonları ile ilgili [28] dışında çalışma bulunmamaktadır. Bundan dolayı çok geçişli yükselteçler üzerine yapılan çalışmalar incelenerek [18-27, 29-32], bunların PKFY tasarımına adaptasyonu araştırılmıştır.

Alharbi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çift yönlü pompalama kullanarak küçük sinyal kazancı, PDV ve çıkış optik gücü açısından O-bandında (1270–1350 nm) PKFY performansını iyileştirmeye yönelik bir simülasyon çalışması sunmuşlardır [33].

Obaid ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, her biri çok parametreli bir optimizasyon algoritmasıyla optimize edilmiş iki Tulyum katkılı fiber yükselteç (TKFY) konfigürasyonu sunmuşlardır. Sunulan iki konfigürasyon, çift yönlü ve iki aşamalı çift geçişli TKFY konfigürasyonlarıdır [34].

Wu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, öncelikle 2 μm'de TKFY'nin yükseltme etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, uygun koşullar altında bir aşamalı TKFY, iki aşamalı TKFY ve üç aşamalı TKFY'nin farklı yükseltme etkilerini karşılaştırdılar [35].

Ali ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, seri hibrit fiber yükselteç kullanarak geniş bandlı bir yükseltmeyi deneysel olarak incelemişlerdir. Erbiyum ve Raman yükselteçleri için çift geçişli konfigürasyonlar yoluyla kazanç düzlüğü için band genişliğini iyileştirdiler [36].

Gurkaynak ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, deneysel olarak çift geçişli paralel hibrit fiber yükselteç ile geniş kazanç düzlüğü band genişliği sunmuşlardır. Önerilen tasarımda, bir kolda seri Erbiyum-Raman fiber yükselteç ve diğer kolda bir Raman fiber yükselteci birleştirdiler [37].

Ali ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Optisystem kullanarak çift geçişli paralel hibrit fiber yükselteçlerde kazanç kontrol tekniklerinin kazanç seviyesi ve pompa gücü optimizasyonu üzerindeki etkisini simüle etmiş ve deneysel olarak doğrulamışlardır [38].

Khan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, TKFY'lerin parametrik ve şematik optimizasyonuna odaklanmışlardır. İleri ve geri ve çift yönlü TKFY konfigürasyonlarını karşılaştırdılar. Optimum kazancı, çift yönlü TKFY ile elde ettiler [39].

Mirza ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yeni iki aşamalı çift geçişli band içi asimetrik pompalama şemasına dayalı optimize edilmiş bir tasarımla 1,02–1,08 µm spektral bölge için bir İterbiyum katkılı fiber yükselteç (İKFY) performans iyileştirmesini göstermişlerdir [40].

Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sayısal modeller kullanarak, ileri, geri ve çift yönlü pompalama altında O-band Bizmut katkılı fiber yükseltecin (BKFY) kazanç ve gürültü karakteristiklerini kapsamlı bir şekilde karşılaştırmış ve optimize etmişlerdir. Çift yönlü pompalama biraz daha iyi performans göstermişlerdir [41].

Wang ve arkadaşları yaptıkları diğer bir çalışmada, çift yönlü pompalama şemasını kullanmışlardır. Fiber boyunca KYY değişimi, tipik KYY değişiklikleriyle tutarlı olduğunu gösterdiler [42].

Almukhtar arkadaşları yaptıkları çalışmada, kazanç ortamı olarak Hafniyum-Bizmut Erbiyum katkılı fiber ve Zirkonya-İtriyum Alüminyum katkılı Erbiyum fiber kombinasyonunu kullanan yeni bir kompakt geniş bandlı hibrit optik yükselteç sunmuşlardır. Önerilen yükselteç, sırasıyla tek geçişli ve çift geçişli konfigürasyonlarda 1 m uzunluğunda Hafniyum-Bizmut Erbiyum katkılı fiber ve 2 m uzunluğunda Zirkonya-İtriyum Alüminyum katkılı Erbiyum fiber kullanarak gerçekleştirildi [43].

Mirza ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, iki aşamalı pompalama şemasına dayalı, hem yükselteç hem de hat içi kullanım için iki aşamalı yer-uydu optik kablosuz iletişim bağlantısında verimli bir TKFY tasarımı önermişlerdir [44].

Fang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çift yönlü hibrit modlu pompalama şemasının, geleneksel çift yönlü hibrit modlu pompalama şemasına kıyasla dört modlu bir EKFY’nin

yüksek kazanç ve düşük diferansiyel mod kazancı arasındaki denge optimizasyon sorununu çözebileceğini teorik ve deneysel olarak doğrulamışlardır [45].

Ososkov ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada, pompa verimliliğini artırmak için geleneksel çift yönlü pompalama şemasını kullanmışlardır [46].

Taengnoi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kazanç spektrumunu genişletmek ve düzleştirmek için Bismut katkılı fiberi iki dalgaboyunda (1240 nm ve 1267 nm) çift yönlü olarak toplam pompa gücü 720 mW olacak şekilde pompa kullanmışlardır [47].

Śliwczyński ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bir dizi fiber hattı ve çift yönlü optik yükselteç ile birbirine bağlanan iki uç terminalden oluşan çift yönlü bir fiber optik bağlantıyı ele almışlardır [48].

Firstov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ticari olarak temin edilebilen çift yönlü pompalama şemasını kullanarak tipik bir BKFY deneysel kurulumunu oluşturmuşlardır [49].

Yücel ve Dincer yaptıkları çalışmada, üç farklı S-band TKFY tasarımını karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma, iki aşamalı üç geçişli TKFY tasarımının fiber optik iletişim sistemlerinde daha kararlı band genişliği ve daha yüksek kazanç sağlamak için uygun olabileceğini gösterdiler [50].

Facchini ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, deneysel-simülasyon yaklaşımıyla ilgili olarak, kazanç bozulması, GF ve radyasyon kaynaklı zayıflama açısından iki aşamalı optik yükseltecin radyasyon tepkisini incelemişlerdir [51].

Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, düşük tekrarlama hızlarında çalışan darbeli çift geçişli yükselteçlerin gürültü ve kazanç özelliklerini teorik ve deneysel olarak analiz etmişlerdir [52].

Lan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dağıtılmış çift yönlü Raman pompalama konfigürasyonu altında U-bandında yaklaşık 2,1 THz'de 3 dB'lik bir band genişliği üzerinde yaklaşık 15 dB'lik net Raman kazancını deneysel olarak elde etmişlerdir [53].

Ren ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Optisystem yazılımını kullanarak çift yönlü pompalanmış bir EKFY konfigürasyonu önermişlerdir. Bu çalışmada pompa gücü, fiber uzunluğu, Erbiyum iyon yoğunluğu ve giriş sinyal gücünü dikkate alarak EKFY'nin kazanç özelliklerini araştırdılar [54].

Donodin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, E-band yükselteç sistemi için rekor kıran özelliklere sahip yeni bir çift katkılı fiber yükselteç tanıtmışlardır. Telekom uyumlu E-band yükselteçler arasında bugüne kadar bildirilen en yüksek PDV değerini elde ettiler [55].

Wu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yaklaşık 8 kW çıkış gücüne sahip yüksek parlaklıkta çift yönlü tandem pompalı sınırlı katkılı fiber yükselteç sunmuşlardır [56].

Elmouaddine ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yedi çekirdekli Erbiyum katkılı çift katmanlı fiber yükselteç geliştirmişlerdir. İkinci bir pompanın eklenmesinin sonuçtaki kazanç ve GF üzerindeki etkisini araştırmak için, bu sistemde çift yönlü pompalama kullanmayı önerdiler [57].

Mishra ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dar band genişliğine (tipik olarak 3 nm veya incelenen sisteme bağlı olarak daha da küçük) sahip optik band geçiren filtre ile iki aşamalı bir EKFY'nin sisteme dahil edilmesini önermişlerdir [58].

Huang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, O-band yüksek hızlı PON'ler için çift yönlü, çapraz kazanç modülasyonu içermeyen bir BKFY'yi deneysel olarak göstermişlerdir [59].

Ahmad ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sürekli dalga S-band çalışması için çift yönlü bastırılmış kaplamalı EKFY önermiş ve karakterize etmişlerdir [60].

Awsaj ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çift geçişli dalga seçici kuplör kullanan bir EKFY konfigürasyonu için kazanç ve GF'yi analiz etmişlerdir [61].

Ma ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ana osilatör güç yükseltme konfigürasyonunda çift yönlü pompalama konfigürasyonuna dayalı olarak 5 kW seviyesinde rekor çıkış gücüne sahip tamamen fiberleştirilmiş dar hat genişliğine sahip bir fiber yükselteç sunmuşlardır [62].

Jamalus ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, pompa güç dağıtım tekniği kullanarak iki aşamalı TKFY'leri göstermişlerdir. Simülasyonlar, OptiSystem v.13 yazılımını kullanarak 1975 nm ile 2000 nm arasında değişen sinyallerle gerçekleştirdiler [63].

Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kazanç düzlüğü karakteristikleri sağlamak için pompa dalgaboylarını optimize etmişlerdir. Bi-katkılı fosfosilikat fiber, 1270 nm ve 1310 nm'lik çift pompa dalgaboylarında iki lazer diyot aracılığıyla çift yönlü pompa kullanmışlardır [64].

Obaid ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, S, C ve L-bandları boyunca optik yükselteç performanslarını göstermişlerdir. Çift yönlü bir TKFY ve çok bölümlü bir fiber optik parametrik yükselteç kombinasyonunu kullanan hibrit bir yükselteç önermişlerdir [65].

Naji ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, iki aşamalı üç geçişli EKFY'nin iki konfigürasyon tipini araştırmışlardır. Bu konfigürasyonları EKF uzunluğu, pompa gücü ve sinyal gücü açısından karşılaştırdılar [66].

Naji ve arkadaşları başka bir çalışmada, önerilen EKFY konfigürasyonlarının kapsamlı bir incelemesini sunmuşlardır. Bu incelemede, araştırmacılara alandaki güncel gelişmeler hakkında net bir bakış açısı sağlamayı amaçlamışlardır. Çalışmada, iki aşamalı üç geçişli ve üç aşamalı üç geçişli konfigürasyonları ayrıntılı olarak ele almışlardır [67].

Mahdi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, iki aşamalı üç geçişli EKFY için önerilen yeni bir konfigürasyonun pompa gücü optimizasyonu başarıyla gerçekleştirmişlerdir. Bu konfigürasyon, iki bağımsız 980 nm dalgaboylu pompa lazeri kullanılarak tasarlanmış iki aşamalı bir yükselteç yapısını içermektedir [22].

Al-Mansoori ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, geniş bandlı bir EKFY için tek geçişli S ve üç geçişli L-bandlarının sinyal güçlerini karşılaştırmışlardır [68].

Aozasa ve Yamada yaptıkları çalışmada, ilk kez, üç geçişli bir konfigürasyona sahip ve S-bandında KYY bastırmak için iki filtre içeren florür bazlı TKF kullanarak bir E-band TKFY'yi başarıyla geliştirmişlerdir [69].

Akhter ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, tüm olası üç geçişli EKFY konfigürasyonlarını araştırmışlardır. Tüm konfigürasyonların performansları pompa güç oranı ve sinyal gücü kullanılarak analiz edildi. Her konfigürasyon için optimum uzunluk ve optimum pompa güç oranı da belirlendi. Pratik tasarım için en iyi üç geçişli EKFY konfigürasyonu önerildi [19].

Akhter ve arkadaşları yaptıkları diğer çalışmada, tüm olası üç geçişli EKFY konfigürasyonlarını analiz etmişlerdir [21].

Bouzid yaptığı çalışmada, EKFY'nin dört kritik bölümüne odaklanmışlardır. Bunlar atomik kısım, teorik arka plan, tasarım ve kritik inceleme bölümüdür. Ayrıca iki aşamalı üç geçişli konfigürasyon tipinden bahsedildi [70].

Khairi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, iki aşamalı üç geçişli yükselteç şemasında yapılandırılmış yeni bir yüksek kazançlı EKFY sunmuşlardır. Birinci aşamada yükselteç, yüksek kazanç elde etmek için çift geçişli yükselteçten oluşurken, ikinci aşamada tek geçişli yükselteçten oluşmuştur [31].

Pradhan ve Mishra yaptıkları çalışmada, dört temel bölüme odaklanmışlardır. Bunlar, yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (YDBÇ) tekniği, teorik arka plan, tek geçişten dört geçişe EKFY'nin yapılandırılması ve EKFY'lerin düzleştirilmesi için kullanılan farklı yöntemlerdir. Optik sinyalleri yükseltmek için çeşitli optik yükselteçler geliştirmişlerdir [71].

Dinçer ve Yücel yaptıkları çalışmada, yeni nesil fiber optik iletişim sistemleri için çok aşamalı üç geçişli Tulyum katkılı fiber yükselteç (ÜG-TKFY) yapılarını kullanmış, optimize etmiş ve karşılaştırmışlardır. Üç tip ÜG-TKFY konfigürasyonlarını kullandılar. Her sistemin performansı, sinyal gücü, pompa gücü, TKF uzunluğu ve Tulyum iyon yoğunluğunun etkisini analiz ettiler [72].

Norouzi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, NTEKFY tarihine bir giriş sunmuşlardır. Burada, iki aşamalı üç geçişli EKFY konfigürasyonunu tartışmışlardır [73].

Naji ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, tek geçişli, çift geçişli ve üç geçişli EKFY gibi bir aşamalı EKFY uygulamaları için yeni bir açık kaynaklı bilgisayar tabanlı simülatör sunmuşlardır [74].

Almukhtar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kazanç ortamı olarak hafniyum Bizmut Erbiyum katkılı fiber ve Bizmut Erbiyum katkılı fiber kombinasyonunu kullanan iki aşamalı bir konfigürasyonda geliştirilen üç geçişli hibrit optik fiber yükselteç sunmuşlardır [23].

Qayoom ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, tek geçişli EKFY, çift geçişli EKFY, filtrelenmiş çift geçişli EKFY, filtrelenmiş üç geçişli EKFY ve son olarak filtrelenmiş dört geçişli EKFY dahil olmak üzere çeşitli olası EKFY konfigürasyonları tasarlamışlardır [32].

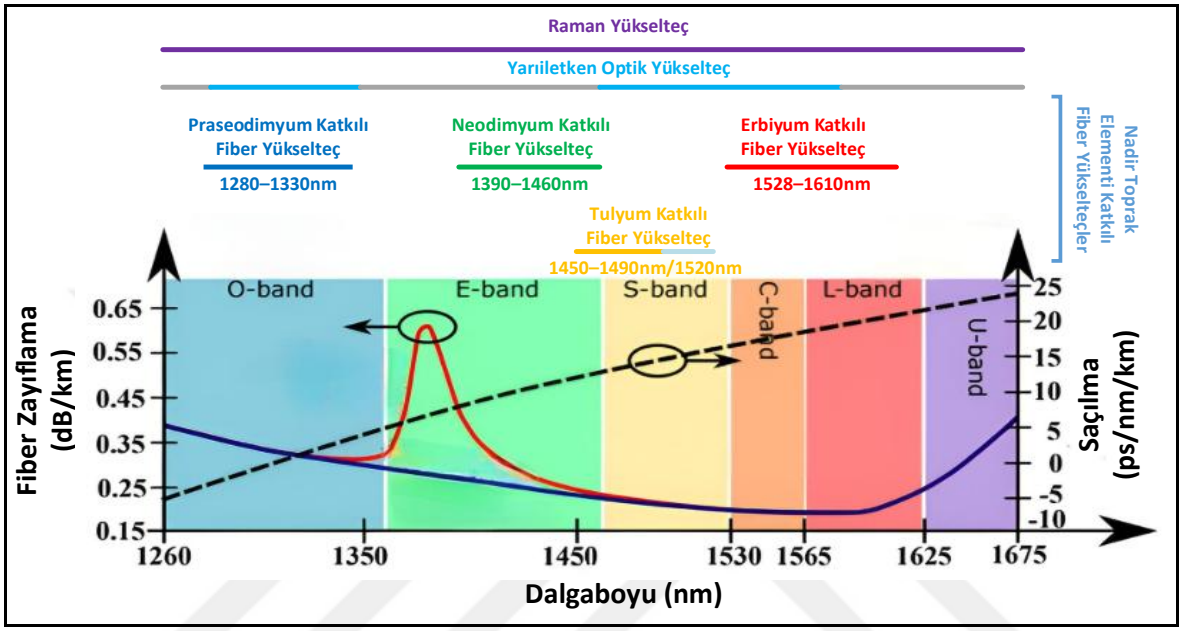
Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada BAÇG, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY, İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonlarının performansları ilk kez araştırılmıştır. BAÇG-PKFY, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY tasarımlarında kullanılan temel bileşenleri ve bu bileşenlerin önemli parametreleri kazanç açısından optimize edilmiştir. Bu yükselteçler kazanç ve GF açısından kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonlarıda ayrıca analiz edilmiştir. Son olarak, yükselteçlerin KYY gürültü gücü ve PDV açısından incelenmiştir. Ayrıca, optik yükselteçler karşılaştırılırken toplam pompa gücü önemli bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan toplam pompa gücü, literatürdeki çalışmalara kıyasla yüksek kazanç ve düşük GF sağlamaktadır. Genel olarak, kısa fiberler tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra düşük iyon yoğunluğuna sahip ve daha düşük maliyetli fiber kullanılmıştır. Bu çalışmada, seçilen parametrelerin pratik olarak uygulanabilir aralıkta olmasına dikkat edilmiştir. Literatüre kıyasla daha yüksek kazançlı, daha verimli ve ticari olarak temin edilebilen çok geçişli PFKY yeni konfigürasyon tasarımları sunulmuştur. PDV, literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla iyileştirilmiştir.

3. OPTİK YÜKSELTEÇLER

Optik fiber üzerinden sinyallerin yayılması, fiberin iletim mesafesi nedeniyle sinyallerin güç kaybına neden olur. Bu kayıp, iletim fiberinin uzunluğuyla doğru orantılıdır. Bu nedenle, sinyallerin bir alıcı tarafından algılanabilmeleri için belirli bir mesafeden sonra sinyallerin yükseltilmesi gereklidir. İlk iletim sisteminde, sinyallerin önce elektriksel alana dönüştürüldüğü ve daha sonra optik sinyallere geri dönüştürüldüğü optoelektronik rejeneratörler kullanılarak yükseltme yapılıyordu. Bununla birlikte, bu rejeneratörler pahalıydı ve DBÇ sistemleri için gecikmeye neden oluyordu [75]. Daha sonra, sinyalleri dönüştürmeden optik alanda yükseltebilen optik yükselteçler geliştirildi. Bu yükselteçler DBÇ sinyallerine karşı şeffaftı ve modülasyon formatlarından bağımsızdı. Optik yükselteçlerin yüksek dönüştürme verimliliği, birçok bilimsel topluluğun 80'ler ve 90'larda optik yükselteçler geliştirmesine yol açtı ve 90'ların ortalarında optik yükselteçler transatlantik ve transpasifik kablolar üzerinden kullanıldı [76]. Optik yükselteçlerin uygulanması, yüksek hızlı fiber optik iletişim sistemlerinin arkasındaki önemli teknolojilerden biri olmuştur. Bu teknoloji, yüzlerce kilometre boyunca petabit düzeyinde veri iletimini mümkün kılmıştır. Optik yükselteçlerin performansını belirleyen göstergeler, yükselteç kazancı ve GF'dir. Kazanç ve GF'ye ek olarak, yükseltme band genişliği, yükseltebileceği DBÇ kanal sayısını belirleyen bir diğer önemli özelliktir.

Optik yükselteçler, farklı giriş gücü seviyeleri için dinamik bir kazanç aralığı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bununla birlikte, giriş gücü miktarıyla kazanç miktarında bir sınırlama vardır. Çok düşük bir giriş gücü için, bir yükselteç tarafından eklenen sistem gürültüsü oldukça büyük olabilirken, yüksek bir giriş gücü için kazanç doygunluğa ulaşabilir. Bir yükselteçten elde edilebilecek maksimum çıkış gücü, doygun çıkış gücü olarak da bilinir. Zaman içinde, çeşitli katkılama maddelerine, yarıiletken optik özelliklerine ve fiber doğrusal olmayan özelliklerine dayalı olarak farklı optik yükselteçler geliştirilmiştir. Bunların en bilineni, iletişim penceresinin C-bandı üzerinde mevcut DBÇ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan EKFY'lerdir. Bununla birlikte, dünya çapında internet teknolojisinin hızla gelişmesi, C-bandında bir tükenmeye ve doğrusal olmayan Shannon sınırına yaklaştıkça kanal başına veri hızında bir düşüşe yol açmıştır [77]. Bu nedenle, farklı bilimsel topluluklar, uzay bölmeli çoklama [78] ve çok bandlı iletim [79] gibi yeni veri iletim teknolojileri aramaktadır. Özellikle band genişliğinden bahsetmek gerekirse, mevcut EKFY, optik pencerenin C ve L

bandlarının ötesini destekleyemez. Bu nedenle, kalan bandlarda sinyal yükseltmeyi sağlamak için farklı yükseltme teknolojilerine olan ilgi yeniden artmıştır [80]. Şekil 3.1'de gösterilen NTEKFY'ler, yarıiletken optik yükselteçler ve Raman yükselteçler gibi farklı yükselteçler ele alınacaktır [80].



Şekil 3.1. Optik iletişim penceresinin farklı bandları için optik yükselteçler

3.1. Nadir Toprak Elementi Katkılı Fiber Yükselteçler

Fiber yükselteçlerin temelleri, uyarılmış yayılım süreciyle optik kazanç üretebilen malzemelerdir. Bir fiberin nadir toprak iyonu ile katkılanmasıyla sinyalin yükseltilmesi sağlanabilir. Temel haldeki iyonlar, pompa fotonlarının soğurulmasıyla daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılır. Bu uyarılmış iyonlar, sinyal dalgaboyunda ara bir enerji seviyesine verimli bir geçişle kararsız bir durum oluşturur. Bu ara seviyeden elektronlar, ışımasız bir bozunma ile hızla temel hale geri döner. Fiberin pompalanmasıyla kararsız durumun popülasyon inversiyonu oluşturulur. Bir sinyal fotonu fiberden geçtiğinde, sinyali yükselten uyarılmış yayılım meydana gelir [81].

Fiber çekirdeği üç değerlikli nadir toprak iyonları ile katkılanmış olan ve belirli pompa dalgaboylarındaki ışığı soğurarak uyarılmış yayılım yoluyla sinyal dalgaboylarında güçlendirme sağlayan optik düzeneklere NTEKFY denir [73].

Katkılanan NTE, NTEKFY'de çalışma dalgaboyu ve kazanç band genişliği gibi yükselteç özelliklerini belirler. Erbiyum (Er^{3+}), Holmiyum (Ho^{3+}), Tulyum (Tm^{3+}), Neodimyum (Nd^{3+}), Praseodimyum (Pr^{3+}), İterbiyum (Yb^{3+}) gibi farklı NTE'ler, 0,5 – 3,5 μm aralığındaki farklı dalgaboylarında yükseltme işlemi yapabilirler. Çizelge 3.1'de bazı NTE katkı iyonları ve özellikleri listelenmiştir [73]. Katkılanan element ve yükselteç parametreleri değiştirilerek kullanılacak alana göre istenen özelliklere sahip NTEKFY oluşturulabilmektedir.

Çizelge 3.1 Başlıca nadir toprak elementi katkı iyonları ve özellikleri

Nadir Toprak Elementleri Katkı İyonu	Ana Fiber Materyal	Işıma Dalgaboyu Aralığı (μm)
Erbiyum	Silikat, fosfat ve florür	1,5-1,6; 2,7
Praseodimyum	Silikat, fosfat cam	1,3; 0,635; 0,6; 0,52; 0,49
Tulyum	Silikat, germanet ve florür cam	0,8; 1,45-1,53; 1,7-2,1
İterbiyum	Silikat cam	1,0-1,1
Neodimyum	Silikat ve fosfat cam	0,9-0,95; 1,03-1,1; 1,32-1,35
Holmiyum	Silikat, florozirkonat cam	2,08; 2,12; 2,98

Erbiyum katkılı fiber yükselteçler

Üçüncü telekomünikasyon penceresinde (1,55 μm), silika fiberin Erbiyum iyonlarıyla katkılanmasıyla verimli bir yükselteç oluşturulabilir [82]. Florür camlar, yükselteç kazanç profilinin genişliğini ve düzlüğünü iyileştirmek için kullanılır [83]. Tellür camlarda kazanç bandı daha uzun dalgaboylarına doğru kaydırılır.

Erbiyum katkılı fiber içindeki yükseltme, üç enerji seviyesi arasındaki geçişlere dayanmaktadır. 1,5 μm'deki radyasyon, $^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ geçişinden elde edilir. $^4I_{13/2}$ durumunun uzun ömrü (ms mertebesinde) nedeniyle yükselteçte yüksek verimlilik elde edilir. Erbiyum, 0,82 μm, 0,98 μm veya 1,48 μm'de pompalanır. 1,48 μm'de pompalama durumunda, Erbiyum iyonları doğrudan yarı-kararlı durumun ($^4I_{13/2}$) üst alt seviyelerine pompalanır. Ticari Erbiyum katkılı fiber yükselteçler çoğunlukla 0,98 μm veya 1,48 μm 'de pompalanır.

Praseodimyum katkılı fiber yükselteçler

PKFY O-band sinyallerinin yükseltilmesi için kullanılabilir. Bu tez çalışmasında, NTEKFY çeşitlerinden biri olan PKFY konusu ele alınmıştır. PKFY dördüncü bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

Holmiyum katkılı fiber yükselteçler

Holmiyum katkılı fiberler yükselteçler (HKFY) tipik olarak 2,1 μm'de çalışır ve bu daha uzun dalgaboylarında çalışma için cazip bir kazanım ortamı sunar [84]. Genelde, Holmiyum yayılım kesitinin maksimum olduğu (1,94 μm) dalgaboylarında pompa ile beslenmelidir. Bu nedenle, HKFY'ler için 1,94 μm pompa dalgaboyu tercih edilmektedir [85].

HKFY'ler, diğer katkılı fiber yükselteçlere kıyasla birkaç önemli avantaja sahiptir. Bunlar yüksek güç dönüşüm verimliliği, orta kızılötesi aralığında yükseltme, yüksek çıkış gücü ve kazanç olarak sıralanabilir. Bu avantajlar sayesinde Holmiyum, özellikle 1950 - 2150 nm arasındaki dalgaboyu aralığında optik iletişim uygulamalarında kazanım ortamı olarak kullanılabilen son derece verimli bir NTE olarak kabul edilmektedir [86].

İterbiyum katkılı fiber yükselteçler

İterbiyum iyonunun spektroskopik yapısı, diğer NTE'lerden daha basittir ve sırasıyla dört ve üç alt seviyeye sahip iki temel enerji seviyesi (temel ve uyarılmış durumlar) içerir. Bu üç seviyeli sistemlerde, uyarılmış elektronlar tarafından sinyal dalgaboyunun emilmesi kazancı azaltabilir [87]. İKFY'ler, kazanç davranışı dalgaboyuna göre değişir. 910 nm ve 975 nm yaygın pompa dalgaboyları iken, 860 nm, 1047 nm veya 1064 nm gibi pompa dalgaboylarıda kullanılır. Kazanç, 975 nm tepe noktasında veya daha geniş bir 1030 nm tepe noktasında meydana gelir ve daha kısa dalgaboylarında üç seviyeli davranıştan daha uzun dalgaboylarında dört seviyeli davranışa geçişler olur [88].

İKFY'ler, ultra kısa darbe yükseltmesi için ideal olan yüksek çıkış gücü, mükemmel dönüşüm verimliliği ve geniş band genişliği sunar. EDFA'ların aksine, İKFY'ler uyarılmış durum soğurumu (ESA) gibi komplikasyonlardan kaçınarak daha yüksek katkılama seviyelerine ve daha kısa fiberlerde yüksek kazanıma olanak tanır. Çok yönlü pompalama

şemalarını (860–1064 nm) desteklerler, daha uzun ömürlüdürler ve daha az ısı üreterek daha kompakt tasarımlara olanak sağlarlar. Bununla birlikte, İKFY'ler daha pahalıdır, sıcaklık ve dalgaboyu kaymalarına daha duyarlıdır ve EKFY'lere göre teknolojik olarak daha az olgunlaşmıştır.

Neodimyum katkılı fiber yükselteçler

Neodimyum katkılı fiber yükselteçler (NKFY), E-bandında yükseltme potansiyeline sahip başka bir katkılı yükselteçlerdir. Bu yükselteçler, 1350-1450 nm aralığında ~100 nm'lik bir yükselteç band genişliği gösteren deneysel bir gösterimle E-bandının büyük bir bölümünde kazanç üretebilir [89]. Bu yükseltecin soğurum spektrumu 800 nm civarındadır ve 920, 1060 ve 1350 nm civarlarında güçlü bir yayılım spektrumuna sahiptir [80]. 920 ve 1060 nm civarlarındaki güçlü KYY nedeniyle E-bandında PDV daha düşüktür. Bununla birlikte, dalgaboyu seçici filtre ve mikro yapılı boşluk kullanan ölçeklenebilir dalga kılavuzu tasarımı gibi tekniklerle, 920 ve 1060 nm civarlarındaki KYY bastırılarak E-bandındaki performans iyileştirilebilir [90,91].

Tulyum katkılı fiber yükselteçler

TKFY'ler iletişim penceresinin S bandında (~1470-1520 nm) sinyalleri yükseltebilen bir diğer ilginç yükselteçlerdir. Dört seviyeli bir sistem kullanılarak TKFY ile yükseltme, daha iyi gürültü performansı sağlar. Bununla birlikte, standart tek pompalama şemasıyla, uyarım doğrudan temel durumdan yarı kararlı duruma duruma gerçekleşir. Bunun nedeni, ikinci enerji durumunun ömrünün yarı kararlı durumunkine kıyasla dokuz kat daha uzun olmasıdır [80]. Bu nedenle, ana pompaya ek olarak yukarı dönüşüm için yardımcı bir pompa eklenir ve bu da hem temel hem de ikinci enerji durumundan emilimin gerçekleşmesine neden olur [92].

Ayrıca tellürit, florür, silikat gibi farklı ana malzemelerle TKFY'nin kazanç band genişliği S bandı (1480-1530 nm) ve S+ bandı (1450-1480) üzerinde değiştirilebilir [93].

3.2. Yarıiletken Optik Yükselteçler

Yarıiletken optik yükselteçler (YOY), boyut, kompaktlık ve çalışma prensibi açısından diğer fiber tabanlı yükselteçlerden farklı olan başka bir optik yükselteç kategorisidir. YOY'nin çalışma prensibi, herhangi bir optik geri besleme olmaksızın yarıiletken lazer diyotunkine benzemektedir. YOY'lerin çalışması, iletim bandından değerlik bandına elektron geçişine dayanır. Burada sinyaller, yarıiletken malzemenin P-N ekleminde elektron-delik rekombinasyonu nedeniyle yükseltilir [94]. YOY'nin kazanç ortamı genellikle Galyum arsenit, İndiyum fosfit veya her iki bileşiğin alaşımı gibi heterojen malzemelerin bir kütle bileşimidir [95]. Elektronları uyarmak için enerjinin bir lazer kaynağı kullanılarak sağlandığı diğer optik yükselteçlerin aksine, YOY'lerde bu enerji elektriksel olarak sağlanır. İletim bandındaki popülasyon, aktif ortama akım enjeksiyonu kullanılarak elde edilir ve maksimum kazanç, enerji iletim ve değerlik bandları arasındaki enerji band aralığını aştığında meydana gelir [80]. YOY'ler diğer optik yükselteçlere kıyasla kompakttır ve bu da onları entegre fotonikte uygulama için çok kullanışlı ve esnek hale getirir. YOY'lerde optik dalganın hapsedilmesi, aktif ortamın düşük kırılma indisine sahip iki kaplama tabakası arasına yerleştirilmesiyle sağlanır. Uç yansımaları önlemek için YOY'ler genellikle yansıma önleyici kaplamalarla kaplanır [96]. YOY'de kazanç miktarı, iletim bandındaki taşıyıcı yoğunluğuna ve uygulanan akım miktarına bağlıdır. Bununla birlikte, kazanç, kuantum oyukları ve kuantum çizgi/nokta gibi taşıyıcı hapsedici nanoyapılar kullanılarak optimize edilebilir [95]. Aktif malzemenin uygun tasarımı ve bileşimi ile YOY'ler, 100 nm civarında bir kazanç band genişliği ile geniş bir dalgaboyu aralığında çalıştırılabilir [97]. Bununla birlikte, YOY'lerin DBÇ iletim sisteminde yaygın olarak kullanılmasını engelleyen bazı sınırlamalar vardır.

3.3. Fiber Raman Yükselteçler

Raman yükseltmesinin prensibi, bir fiberdeki Raman saçılmasıyla ilişkili uyarılmış yayılım işlemidir. NTEKFY'ler, kazanç sağlamak için fiberde katkı maddelerine ihtiyaç duyarken, Raman kazancı iletim fiberinin kendisinde elde edilir. Pompa ve sinyal ışığı, pompa dalgaboyundan daha uzun bir dalgaboyunda birleştirilir ve bir fibere beslenir. Uyarılmış Raman saçılması (URS) işleminde, ana malzeme tarafından bir pompa fotonunun emilimini, sinyal frekansında yeni bir Stokes fotonun yayılımını izlerken, kalan emilmiş olan pompa fotonunun enerjisi ana malzemedeki moleküller tarafından fononlar olarak emilir. Temel

durumun üzerinde geniş bir titreşimsel durum aralığı olduğundan, geniş bir dalgaboyu bölgesinde kazanç elde edilir [98]. Raman kazancı, pompa gücüne ve pompa ile sinyal arasındaki frekans farkına büyük ölçüde bağlıdır. Yükseltecin çalışma dalgaboyu, pompa dalgaboyunun ayarlanmasıyla ayarlanabilir. Silika fiber kullanan Raman yükselteçlerde, pompa ve sinyal frekansları arasındaki fark olan Stokes kayması yaklaşık 13 THz olduğunda en yüksek kazanç elde edilir. Tek bir dalgaboyunda pompalanan bir Raman yükseltecin kazanç band genişliği yani, yükseltecin kazancının elde edilebilecek maksimum kazancın en az yarısı olduğu dalgaboyu aralığı yaklaşık 48 nm'dir. Çoklu dalgaboylu pompalama, Raman kazanç profilini genişletmek ve düzleştirmek için kullanılabilir. Çoklu dalgaboylu pompalanan bir Raman yükseltecin kazanç profili, ilgili pompalama dalgaboylarında pompalama ile elde edilen kazanç profillerinin süperpozisyonudur. Düz bir kazanç profili elde etmek için pompalama dalgaboylarında pompa gücünün doğru seçimi gereklidir. Raman yükseltmesinin bir avantajı, sinyal iletimi için kullanılan aynı fiberin sinyal yükseltmesi için de kullanılabilmesidir. Diğer yükselteç türlerinin sağladığı toplu yükseltmenin aksine dağıtılmış yükseltmedir. Dağıtılmış Raman yükselteç (DRY) durumunda, sinyal kayıpları fiber boyunca telafi edilir. Bu, toplu yükseltmeye kıyasla daha iyi bir sinyal gürültü oranı (SGO) ile sonuçlanır [99].

3.4. Fiber Brillouin Yükselteçler

Uyarılmış Brillouin saçılması (UBS), tek modlu fiberdeki en önemli doğrusal olmayan etkilerden biridir ve UBS, yavaş ışık, fiber lazerler, fiber optik sensörler ve fiber yükseltme dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynar [100-108]. Geleneksel bir fiber Brillouin yükseltecinde (FBY), zayıf sinyali yükseltmek için, uygun bir dalgaboyuna sahip başka bir güçlü pompa, fiberin ters yönde ilerleyen kısmına beslenir. UBS süreci, pompadan zayıf sinyale fiber boyunca güç aktarımına aracılık ederek, pompa için enerji zayıflamasına ve sinyal için yükseltmeye neden olur. Pompa frekansı, sinyal frekansından daha yüksektir ve etkileşim, yalnızca pompa ve prob sinyali arasındaki fark Brillouin kaymasına çok yakın olduğunda etkilidir. Bu da oda sıcaklığında ve telekomünikasyon dalgaboylarında silika fiberde 10−11 GHz mertebesindedir [73,109]. Pompa ve sinyal arasında etkileşime giren UBS'nin gücü genellikle bir kazanç katsayısı cinsinden ölçülür ve kazanç katsayısı, pompa ve sinyalin göreceli polarizasyon durumuna bağlıdır. Brillouin etkileşimi pompa ve sinyal dalgalarının paralel polarizasyon durumu için maksimumdur ama ortogonal polarizasyon durumu için sıfırdır [110]. Maksimum kazanç verimliliğini elde etmek için, zıt yönde

ilerleyen pompa ve sinyalin giriş polarizasyonlarını kontrol etmek için polarizasyon kontrolörleri kullanılmalıdır. Ancak gerçek fiberde rastgele çift kırılma etkisi mevcutken, FBY'de yükselteç ortam olarak kullanılan fiberin uzunluğu kilometreler mertebesindedir. Pompa ve sinyalin başlangıç giriş polarizasyon durumu ne korunabilir ne de tamamen karıştırılabilir. Bu nedenle, UBS'nin gücü fiber boyunca farklı konumlarda değişebilir ve FBY'nin genel kazancı azalacaktır [111,112].

4. PRASEODİMYUM KATKILI OPTİK YÜKSELTEÇLER

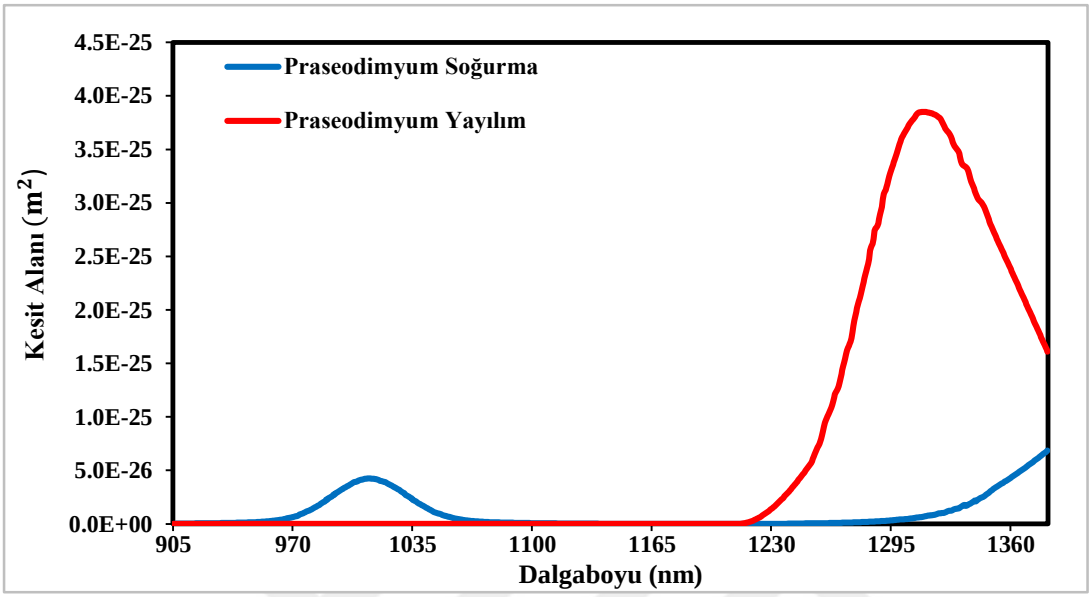
1,3 μm spektral bölgesinde çalışan optik yükselteçler, bu dalgaboyu aralığının sıfır dispersiyon dağılım noktasıyla çakışması nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Üç değerlikli nadir toprak iyonlarının enerji seviyeleri göz önüne alındığında, üç katkı maddesi (Praseodimyum (Pr^{+3}), Neodimyum (Nd^{+3}) ve Disprosyum (Dy^{+3})) fiber yükselteçler için uygun adaylardır. Bununla birlikte, tüm bu katkı elementleri verimlilik sınırlamalarıyla karşılaşmaktadır. Bu üç nadir toprak iyonundan hiçbiri silika bir ana malzeme içinde etkili bir şekilde kullanılamaz. Sonuç olarak, verimli bir yükselteç üretebilen bir ana cam malzeme belirlemek kritik bir araştırma hedefi olmaya devam etmektedir. İkinci pencerede çalışan iletişim sistemleri için, PKFY en umut verici adaydır. 1990 yılında Ohishi vd. [113], Carter vd. [114] ve Durteste vd. [115] tarafından bağımsız olarak geliştirilen florür camı, belirlenen ilk uygun konak malzemesiydi. Yükselteç olarak uygulanabilirliğine rağmen, bu Praseodimyum katkılı florür fiber versiyonları yüksek pompa gücü gerektirir. Bu düşük pompa gücü verimliliği, konak camın kafes titreşimlerine (fononlara) radyasyon dışı enerji transferinden kaynaklanan Praseodimyum radyatif geçişinin düşük kuantum verimliliğine atfedilir. Sülfür camlar, daha yüksek radyatif kuantum verimlilikleri nedeniyle florür camlara kıyasla verimlilikte önemli iyileştirmeler göstermiştir [116].

O-bandı için yüksek verimliliğe sahip bir PKFY tasarlamak için, cam fiberlerdeki Praseodimyum iyonlarının soğurma ve yayılım kesitlerini, enerji seviyesi diyagramlarını ve oran denklemlerini içeren kapsamlı teorik bir çerçeve gereklidir.

4.1. Praseodimyum Soğurma ve Yayılım Spektrumu

Praseodimyum soğurma ve yayılım spektrumu Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Praseodimyum için, 1010 nm ve 1400 nm'de merkezlenmiş iki ana pompa soğurma bandı gösterse de, iyonların etkili uyarılması için ağırlıklı olarak 1000 – 1040 nm dalgaboyu aralığı kullanılır [113, 117-120]. Ayrıca, yayılım spektrumu 1220 nm'de başlarken, yayılım kesiti yaklaşık 1300 nm'de en yüksek yoğunluğuna ulaşmaktadır. Bu da bu bölgenin yükseltme performansını optimize etmek için kritik olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu spektroskopik parametrelerin oran denklemi modellerine entegrasyonu, kazanç özelliklerini

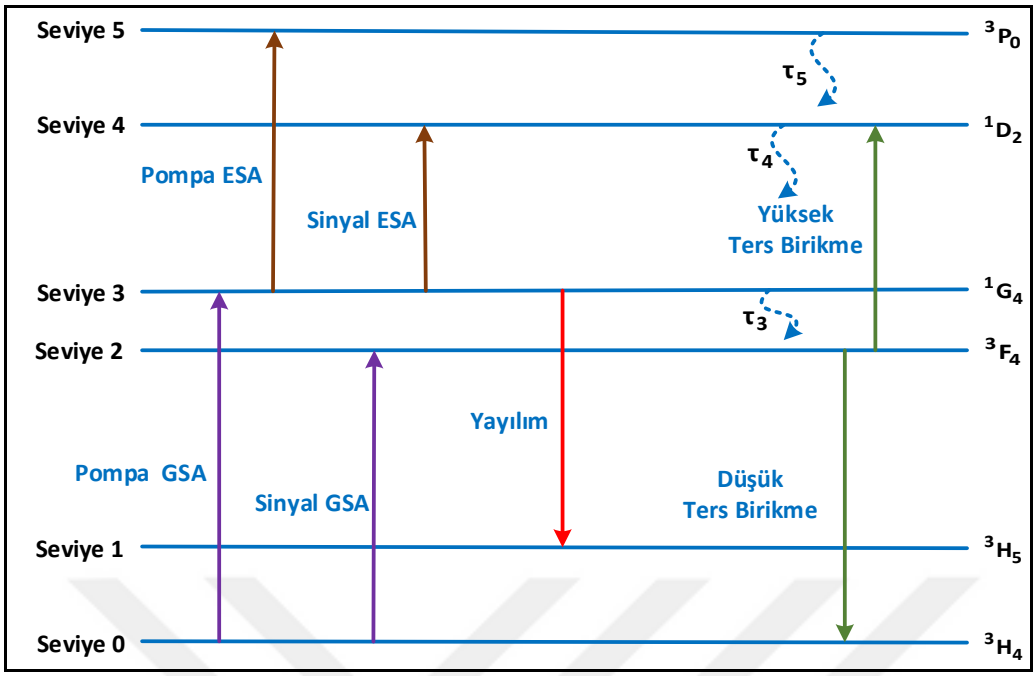
tahmin etmek ve optik iletişimde PKFY sistemlerinin verimliliğini artırmak için temel önem taşımaktadır.



Şekil 4.1. Praseodimyum soğurma ve yayılım spektrumu

4.2. PKFY Çalışma Prensibi

Oran denklemleri analizi için beş seviyeli Praseodimyum iyonlarının enerji diyagramı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Enerji seviyeleri arasındaki temel geçişler $^1G_4$, $^3P_0$, $^1D_2$, $^3F_4$, $^3F_3$, $^3H_5$ ve $^3H_4$ olarak tanımlanmıştır [121]. Toprak durum yayılımı (GSA), $^1G_4 \leftrightarrow {}^3H_4$ geçişleri aracılığıyla gerçekleşir. Sinyal soğurması ve sinyal yayılımı sırasıyla $^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ ve $^1G_4 \rightarrow {}^3H_5$ geçişleri tarafından sağlanır. Ek olarak, $^1G_4$ seviyesindeki taşıyıcı yoğunluğu, $^1G_4 \rightarrow {}^1D_2$ ve $^1G_4 \rightarrow {}^3H_5$ geçişleri yoluyla yüksek ters birikme etkisiyle azaltılabilir [15, 117]. Bunun nedeni, $^1G_4$ ve $^1D_2$ seviyeleri arasındaki enerji farkının, $^1G_4$ ve $^3H_5$ seviyeleri arasındaki enerji farkına eşit olmasıdır. Şekil 4.2'de gösterilen enerji diyagramına dayanarak, optik yükselteç sistemi Pr^{3+} iyonları için aşağıdaki oran denklemleriyle modellenebilir [113].



Şekil 4.2. Beş seviyeli Praseodimyum iyonlarının enerji diyagramı

Soğurumdan kaynaklanan katkılı elementin farklı enerji seviyeleri arasındaki geçiş oranları, uyarılmış yayılım, kendiliğinden yayılım ve oran denklemleri [122]'de belirtilmiştir. i seviyesinden j seviyesine geçiş sayısı W_{ij} geçiş oranı ile temsil edilmektedir.

Praseodimyum iyonlarının toprak durumu olan seviye 0'dan ($^3H_4$) uyarılmış durum olan seviye 3'e ($^1G_4$) yaklaşık 1.03 μm ν_p frekansında pompalanır. Bu geçiş için pompa GSA oranı $W_{03}(r, z, \nu_p)$ olan ν_p frekansında denklem (4.1) ile gösterilmiştir.

$$W_{03}(r, z, \nu_p) = \sigma_{03}(\nu_p)\frac{P_p^+(z) + P_p^-(z)}{h\nu_p} I(r, \nu_p) \tag{4.1}$$

Burada $\sigma_{03}(\nu_p)$, ν_p frekansında pompa soğurum kesit alanıdır. $P_p^+(z)$, ileri yönde yayılım ve $P_p^-(z)$, geri yöndeki yayılımın bölgesel pompa gücüdür. h Planck sabitidir. $I(r, \nu_p)$, pompa gücünün ν_p frekansındaki yoğunluk dağılımıdır.

Seviye 3 ($^1G_4$) ve seviye 1 ($^3H_5$) arasında uyarılmış veya kendiliğinden yayılmış fotonlar meydana gelme durumu vardır. Uyarılmış yayılımdan dolayı meydana gelen fotonlar, sinyal fotonları ile aynı yön, frekans ve faza sahiptir [123, 124]. Yani gelen sinyal ile birebir uyumludur. Kendiliğinden yayılan fotonlar ise, sinyal ışığına göre tutarlılıkları yoktur. Fiber

tarafından yakalanan, fiber boyunca kendiliğinden yayılan fotonlar hareket eder ve KYY'ye sebep olacak şekilde yükselir. c/λ_{min} ve c/λ_{max} arasındaki bir frekans aralığında yer alan v_s frekansındaki sinyal ile buna eşlik eden KYY'den kaynaklanan uyarılmış yayılımın toplam geçiş oranı olan W_{31}, denklem (4.2)'de gösterilmiştir.

$$W_{31}(r,z,v_s,v) = \sigma_{31}(v_s)\frac{P_s(z)}{hv_s}I(r,v_s) + \int_{\frac{c}{\lambda_{min}}}^{\frac{c}{\lambda_{max}}} \sigma_{31}(v)\frac{P^{+}_{KYY}(z,v)+P^{-}_{KYY}(z,v)}{hv}I(r,\nu)dv \qquad (4.2)$$

Bu denklemde sağ taraftaki ilk ifade, sinyalin neden olduğu yayılımdan kaynaklanan geçiş oranını, ikinci ifade ise KYY'den kaynaklı geçiş oranını açıklamaktadır. Bu denklemde $\sigma_{31}(v)$, v_s frekansındaki sinyal yayılım kesit alanını gösterir. P_s, sinyal gücünü göstermektdir. $I(r,v_s)$, v_s sinyal frekansındaki normalize yoğunluk dağılımıdır. KYY, $\lambda_{max}-\lambda_{min}$ dalgaboyu aralığında değerlendirilir. $P^{+}_{KYY}(z,v)$ ve $P^{-}_{KYY}(z,v)$, ileri ve geri yönde yayılım olan KYY güç spektral yoğunluklarını gösterir. $I(r,\nu)$, KYY'ye karşılık gelen normalize edilmiş yoğunluktur.

Yükseltme işlemini meydana getirmiş olan temel geçişler dışında, bu model sinyal fotonlarının tükenmesine ve sonuç olarak kazanç performansında bozulmaya yol açan karşıt geçişleri de içermektedir. Hem sinyal hem de KYY fotonları, sinyal ESA işleminde soğrulabilir. Sinyal uyarılmış durum yayılım oranı W_{34}, denklem (4.3)'te gösterilmiştir.

$$W_{34}(r,z,v_s,v) = \sigma_{34}(v_s)\frac{P_s(z)}{hv_s}I(r,v_s) + \int_{\frac{c}{\lambda_{min}}}^{\frac{c}{\lambda_{max}}} \sigma_{34}(v)\frac{P^{+}_{KYY}(z,v)+P^{-}_{KYY}(z,v)}{hv}I(r,\nu)dv \qquad (4.3)$$

Burada $\sigma_{34}(v_s)$, sinyal ESA kesit alanını gösterir. Sağ taraftaki ilk ifade, sinyalin uyarılmış durum yayılımından kaynaklanan geçiş oranını ve ikinci ifade ise, KYY'den dolayı uyarılmış durum yayılımının geçiş oranını belirtir.

Ayrıca elektronlar ışımasız, fonon relaksasyonu yoluyla seviye 3'e ($^1G_4$) düşer. Bu ışımasız düşmenin toprak durumu olan seviye 0, doğrudan veya ara ürün $^3F_4$, $^3F_3$, $^3F_2$, $^3H_6$ ve $^3H_5$ seviyelerinin bazıları vasıtasıyla meydana gelir. Seviye 3 ($^1G_4$) iyon ömrü, τ_e ile gösterilir.

Hem sinyal KYY hem de GSA nedeniyle, Praseodimyum iyonlarının toprak durumu olan seviye 0'dan ($^3H_4$), seviye 2'ye ($^3F_4$) yükseltilir. Sinyal GSA için geçiş oranı, toprak durumu hızlı düşme nedeninden dolayı değerlendirilmez. Bununla birlikte, GSA sinyali tarafından, sinyal ve KYY fotonlarının bu kayıpları dalgaboyuna bağlı bir soğurum faktörü ile hesaplanır. Seviye 1 ($^3H_5$) olan toprak durumuna ışımasız düşme tarafından iyon yoğunluğu azalır. Bu hızlı iyon yoğunluğu azalması nedeniyle, Seviye 1'deki ($^3H_5$) iyon yoğunluğunun ihmal edilebileceği varsayılmaktadır ($N_1(r,z) = 0$).

Sürekli dalga sinyal ışınları ve yaklaşık 10 – 100 kHz'den daha büyük frekanslarda modüle edilen bu sinyaller için çeşitli geçiş hızları arasında denge yani kararlı durum sağlanır. Modüle edilmiş bir ışık dalgasına karşı yükselteç tepkisi, iyon yoğunluğunun ters birikmesi zamana bağlı değişimlerine bağlıdır. Bu karakteristik frekans aralığı büyük ölçüde uyarılmış durumun yayılım iyon ömrü τ_e ile belirlenir [82,125,126].

Kararlı durumda, uyarılmış durum $N_3(r,z)$ ve toprak durum seviyesi $N_0(r,z)$ iyon yoğunlukları, oran denklemlerinden diğer uyarılmış durumdaki iyon yoğunluğunun ihmal edilebilir olduğu varsayımı altında elde edilebilir. $N_3(r,z)$ ve $N_0(r,z)$ iyon yoğunlukları denklem (4.4) ve denklem (4.5)'te sırasıyla gösterilmiştir.

$$N_3(r,z) = N_{Pr}(r,z)\frac{W_{03}(r,z)}{W_{03}(r,z)+W_{34}(r,z)+W_{31}(r,z)+\frac{1}{\tau_e}} \quad (4.4)$$

$$N_0(r,z) \approx N_{Pr}(r,z) - N_3(r,z) \quad (4.5)$$

Burada $N_{Pr}(r,z)$, fiber çekirdeğin enine kesiti boyunca katkılı dağılımdır. τ_e, uyarılmış durum seviye 3'teki ($^1G_4$) yayılım iyon ömrüdür.

İyon yoğunluğu N_0 ve N_3 bilindiğinde; pompanın, sinyalin ve KYY'nin yayılımı belirlenebilir. İyon yoğunluğu seviye 1'e ($^3H_5$) göre uyarılmış durum seviye 3'teki ($^1G_4$) iyon sayısı olarak tanımlanır. Düşük pompa güçlerinde, beş seviyeli bir sistemin iyon yoğunluğunun ters birikmesiyle, pompa gücüyle doğrusal olarak artar [127]. Sinyal GSA, yüksek düzeyde bir iyon yoğunluğunun ters birikme elde edildiğinde ihmal edilebilir düzeyde olur.

4.3. Yayılım Denklemleri

Optik fiber, fiberin çekirdeğinde homojen Praseodimyum iyon konsantrasyonuna sahip her biri Δz uzunluğundaki bölümlerin bir birleşmesi olarak kabul edilir. Yayılım denklemleri, optik gücün mesafeye göre değişimini tanımlar.

Sinyal, KYY ve pompa gücü, kılavuz fiber yayılma ve saçılma kayıpları $a(\nu)$ ve Praseodimyum katkılı fiberin soğurması nedeniyle zayıflamaya maruz kalır [128]. Praseodimyum tarafından soğurum, (lokal) iyon yoğunluğunun ters birikmesine bağlıdır.

Pompa gücünün $P_p^{\pm}$, hem ileri (+) hem de geri (-) yönde yayılma denklem (4.6)'da gösterilmiştir.

$$\frac{dP_p^{\pm}(z,\nu_p)}{dz} = \pm\left[g_p(z,\nu_p) + a(\nu_p)\right]P_p^{\pm}(z) \tag{4.6}$$

Burada $g_P(z,\nu_p)$, pompa toprak durum yayılım faktörüdür. $a(\nu_p)$, ν_p pompa frekansındaki kılavuz fiber yayılma ve saçılmadan kaynaklanan kayıptır. Pompa durum soğurum faktörü $g_P(z,\nu_p)$, denklem (4.7)'de verilmiştir.

$$g_P(z,\nu_p) = 2\pi\sigma_{03}(\nu_p)\int_0^a N_1(r,z)\, I(r,\nu_p) r\, dr \tag{4.7}$$

Burada a çekirdek yarıçapıdır. Sinyal gücünün yayılması P_s denklem (4.8)'de gösterilmiştir.

$$\frac{dP_s(z,\nu_s)}{dz} = \left[g_e(z,\nu_s) - g_a(z,\nu_s) - g_g(z,\nu_s) - a(\nu_s)\right]P_s(z) \tag{4.8}$$

Burada $g_e(z,\nu_s)$ seviye 3'ten seviye 1'e geçiş için sinyal/KYY uyarılmış durum faktörüdür. $g_a(z,\nu_s)$, seviye 3'ten seviye 4'e geçiş için sinyal/KYY uyarılmış durum yayılımı faktörüdür. $g_g(z,\nu_s)$, seviye 0'dan seviye 2'ye geçiş için sinyal/KYY toprak durumu yayılım faktörüdür. $a(\nu_s)$, ν_s sinyal frekansındaki kılavuz fiber yayılma ve saçılmadan kaynaklanan kayıptır.

KYY için $P_{KYY}^{\pm}$ 'nin frekans v_i ve band genişliği $\Delta\nu$ ile yayılması, yani hem ileri hem de geri yönde yayılması, denklem (4.9)'da gösterilmiştir.

$$\frac{dP_{KYY}^{\pm}(z,v_i)}{dz} = \pm\left[g_e(z,v_i) - g_a(z,v_i) - g_g(z,v_i) - a(v_i)\right]P_{KYY}^{\pm}(z,v_i) \pm 2hv\Delta v_i g_e(z,v_i) \quad (4.9)$$

Burada $\pm 2hv_i\Delta v_i g_e(z,v_i)$ ileri ve geri yayılım yönlerindeki kendiliğinden yayılım katkısıdır [129]. Bu ifadede, 2 faktörü yani KYY gücünün, sinyale paralel ve dik olan polarizasyon modlarında meydana geldiğini yansıtır [82]. Tek modda kendiliğinden yayılım olasılığının, tek bir foton için uyarılmış bir yayılım olayının olasılığı ile aynı olduğu varsayılmaktadır [123].

Denklem (4.8) ve (4.9)'da, seviye 3'ten seviye 1'e geçiş için sinyal/KYY uyarılmış durum yayılım faktörü $g_e(z,v)$, denklem (4.10)'da gösterilmiştir.

$$g_e(z,v) = 2\pi\sigma_{31}(v)\int_0^a N_3(r,z)I(r,v)r\,dr \quad (4.10)$$

Seviye 3'ten seviye 4'e geçiş için sinyal/KYY uyarılmış durum soğurum faktörü $g_a(z,v)$, denklem (4.11)'de gösterilmiştir.

$$g_a(z,v) = 2\pi\sigma_{34}(v)\int_0^a N_3(r,z)I(r,v)r\,dr \quad (4.11)$$

Seviye 0'dan seviye 2'ye geçiş için sinyal/KYY toprak durum soğurum faktörü $g_g(z,v)$, denklem (4.12)'de gösterilmiştir.

$$g_g(z,v) = 2\pi\sigma_{02}(v)\int_0^a N_0(r,z)I(r,v)r\,dr \quad (4.12)$$

Burada σ_{02}, ν frekansındaki sinyal GSA kesit alanıdır.

4.4. Kullanım Alanları

O-bandı, kısa mesafeli (tipik olarak 40 km'ye kadar), yüksek hızlı optik iletim için idealdir. Veri merkezi bağlantıları, pasif optik ağlar, 5G için 40 km menzil içinde radyo ünitelerini ve bazband ünitelerini bağlamak için uygundur. Ayrıca yapay zeka kümeleri ve uç bilişimde grafik işleme birimleri veya dağıtılmış hesaplama düğümleri arasında düşük gecikmeli, yüksek band genişliğine sahip bağlantıları destekleyerek yüksek hızlı ethernette 100GBASE-LR4 ve 400GBASE-LR8 gibi standartlarda uygulanarak sistem karmaşıklığını ve güç tüketimini azaltabilir.

PKFY'ler, yüksek güç şemalarına sahip fiber lazerler, doğrusal olmayan frekans dönüşümü, malzeme işleme, tutarlı ışın birleşimi gibi uygulamalarda kullanılır. Ayrıca düşük güç O-Band uyumlu bağlantılara dayalı yeni nesil veri merkezi ağlarında da kullanılabilir [130]. Thorlabs [16] ve FiberLabs Inc. [17] gibi ticari olarak temin edilebilen O-Band PKFY'ler çok çeşitli teknik alanlarda kullanılmaktadır. Thorlabs PKFY tasarımları özellikle optik ağlarda güçlendirici yükselteç veya ön yükselteç olarak kullanılır. Başlıca uygulama alanları arasında 400G ve 800G alıcı-verici testleri, O-Band alıcılarının aşırı yük testleri ve O-Band CWDM alıcı-verici testleri yer almaktadır. Ayrıca, bu cihazlar O-Band'da silikon fotonik cihaz karakterizasyonu ve veri iletişiminde O-Band sinyal iletimi için kullanılır.

FiberLabs Inc. ürünlerine gelince, masaüstü modeller, 100G, 400G ve 800G sistemleri de dahil olmak üzere yüksek hızlı Ethernet uygulamaları bağlamında alıcı stres testleri gibi alıcı-verici testleri için yoğun olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, 1300 nm dalgaboyu bölgesinin in vivo görüntüleme için ikinci pencere olarak kabul edilmesi nedeniyle, bu yükselteçler biyolojik görüntüleme uygulamalarında da kullanılmaktadır. Raf tipi konfigürasyonlar, veri merkezlerindeki ve erişim veya metropol ağlarındaki ağ uygulamaları için tasarlanmıştır; bu uygulamalarda, ağ test erişim noktalarından gelen küçük sinyalleri yükselterek derin paket incelemesi gibi ağ izleme görevlerini kolaylaştırırlar. Bu üniteler, üniversite araştırma ortamlarından yüksek otomasyonlu üretim hatlarına kadar çeşitli ortamlarda bulunur. Son olarak, entegre edilebilir modül serisi, gigabit ethernetten 100 gigabit ethernet sistemlerine, eve kadar fiber optik dağıtımlarına ve video iletim altyapılarından kablolu televizyon ağlarına ve senkron optik ağ/senkron dijital hiyerarşi sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

5. ÇOK GEÇİŞLİ NTEKFY KONFİGÜRASYONLARI

NTEKFY konfigürasyonlarında iletilen sinyalin yükseltme ortamından birden fazla kez geçmesine çok geçişli yükselteç denir. Ayrıca sinyalin nadir toprak elementi katkılı fiber (NTEKF) olan yükseltme ortamı sayısı, yükseltecin aşama sayısı olarak isimlendirilir. Optik sinyal ayna veya sirkülatör yardımı ile yükseltme ortamına tekrar döndürülebilir. Ayrıca sinyal sıralı şekilde birden fazla yükseltme ortamından da geçirilebilir. Bu ihtiyaca göre tasarlayacağımız yükseltece bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Çok geçişli yükselteçlerde, sinyal yükseltme ortamından iki kez geçtiğinde çift geçişli (ÇG), üç kez geçtiğinde üç geçişli (ÜG), dört kez geçtiğinde dört geçişli (DG) yükselteç şeklinde isimlendirilir.

Çok geçişli yükselteçlerde ayrıca iki yükseltme ortamı varsa iki aşamalı (İA), üç yükseltme ortamı varsa üç aşama (ÜA), dört yükseltme ortamı varsa dört aşamalı (DA) yükselteç şeklinde isimlendirilir ve çok geçişli yükselteçlere ek isimlendirme yapılır.

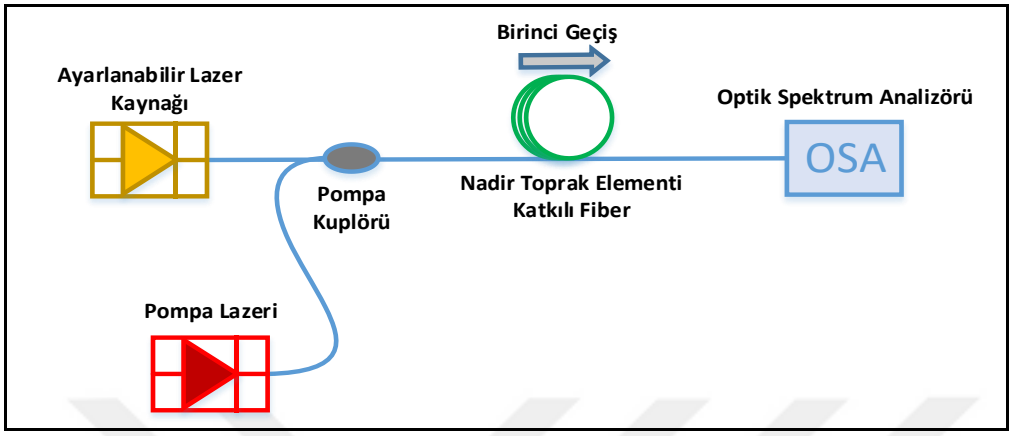
Yükselteçlerdeki farklı konfigürasyon analizleri ve bu konfigürasyonların temel parametre değerlerinin optimize edilmesi, sistemin performansını (kazanç, PDV gibi) artırmak için oldukça önemlidir.

PKFY ve NTEKFY için konfigürasyon tasarımları benzer olduğundan dolayı, bu bölümde PKFY konfigürasyonları yerine, NTE'lerin bütününü kapsayacak yükselteç ifadesi olan NTEKFY konfigürasyonlarına genel olarak değinilmiştir. Literatürde kullanılan bir-dört aşamalı bir-dört geçişli NTEKFY konfigürasyonlarının nasıl tasarlandığından bahsedilmiştir.

5.1. Tek Geçişli İleri, Geri ve Çift Yönlü Pompalama Konfigürasyonları

Tek geçişli yükselteç konfigürasyonlarında sinyal NTEKF yükseltme ortamından bir kez geçmektedir. Bu konfigürasyonlarda bir yükseltme ortamı bulunur. Tek geçişli yükselteçlerde genelde pompa yönüne göre ileri, geri ve çift yönlü konfigürasyonlar olarak

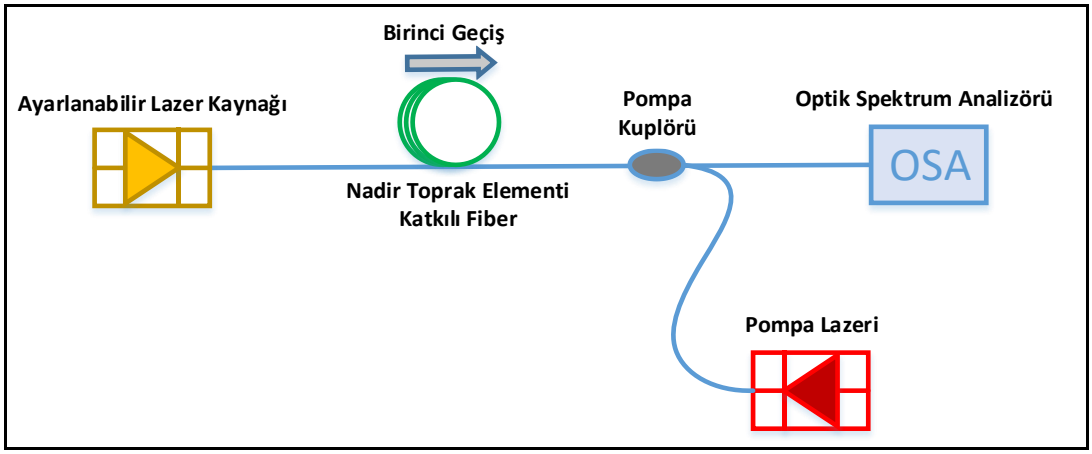
literatürde bahsedilmektedir. Şekil 5.1'de tek geçişli ileri yönlü pompalama konfigürasyonu gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Tek geçişli ileri yönlü pompalama konfigürasyonu

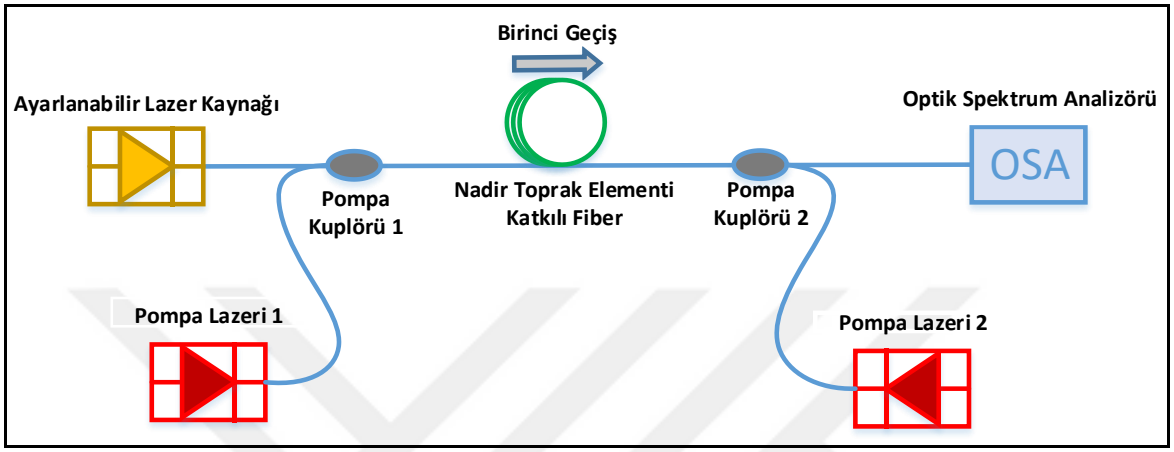
Bu konfigürasyon, NTEKFY konfigürasyonlarının en temel yükselteç düzeneğidir. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi tek geçişli ileri yönlü pompalama konfigürasyonunda tasarım için birer adet ALK, pompa lazeri, pompa kuplörü, NTEKF ve optik spektrum analizörü (OSA) kullanılmaktadır.

Şekil 5.2'de tek geçişli geri yönlü pompalama konfigürasyonu gösterilmiştir. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi tek geçişli geri yönlü pompalama konfigürasyonu tasarımı için kullanılan optik komponentler aynıdır. İleri yönlü yükselteçten tek farkı pompalama yönüdür.



Şekil 5.2. Tek geçişli geri yönlü pompalama konfigürasyonu

Şekil 5.3'te tek geçişli çift yönlü pompalama konfigürasyonu gösterilmiştir. Çift yönlü pompalamada ise hem ileri ve hem de geri yönde pompa lazeri kullanılmaktadır. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi tek geçişli çift yönlü pompalama konfigürasyonunun tasarımı için iki adet pompa lazeri ile birer adet ALK, pompa kuplörü, NTEKF ve OSA kullanılmaktadır.



Şekil 5.3. Tek geçişli çift yönlü pompalama konfigürasyonu

Tek geçişli yükselteç konfigürasyonlarında yapılan çalışmalar genellikle yükselteç sisteminin performansını artırmaya yöneliktir. Performans ölçütü olarak genelde yükselteç kazancını optimum hale getirmek olarak ele alınır.

Yükselteç sisteminin performansını arttırmak için ALK, pompa lazeri ve NTEKF için başlıca önemli parametreler optimize edilmektedir.

5.2. Çift Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları

Çift geçişli yükselteç konfigürasyonlarında sinyal iki kez NTEKF yükseltme ortamından geçmektedir. Bu yükselteç konfigürasyonlarında genelde bir yükseltme ortamı bulunmaktadır. Sinyal ayna veya sirkülatör yardımıyla yükseltme ortamına ikinci kez geçişi ile çift geçişli yükselteç konfigürasyonu sağlanır. Bazı durumlarda iki adet yükseltme ortamı sıralı şekilde bağlanır.

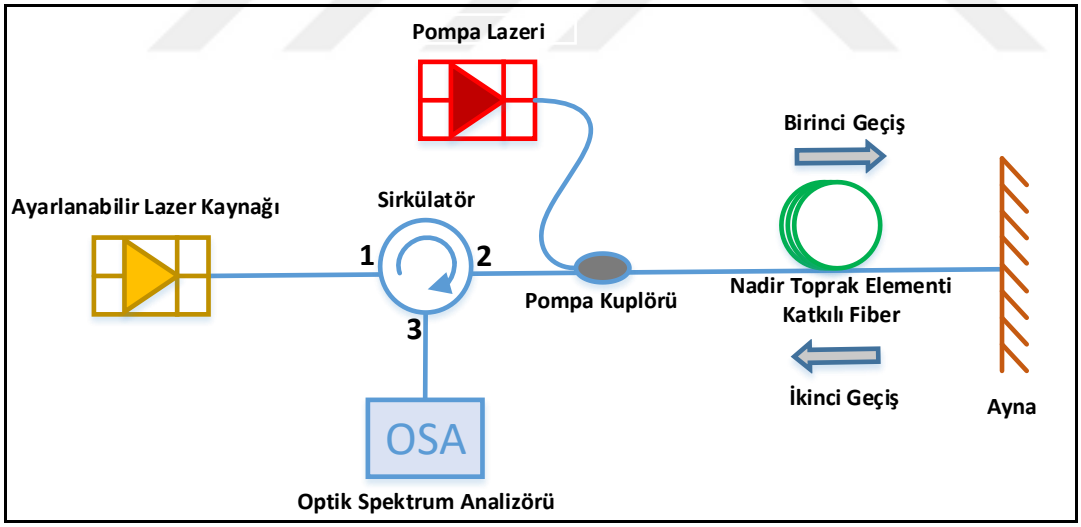
Çok geçişli yükselteç konfigürasyonlarında ayna veya sirkülatör kullanılabilir fakat sirkülatör komponenti maliyet bakımından pahalı ve ekleme kaybı olduğundan dolayı ayna

komponenti tercih edilmiştir. Bu tez çalışmasında yapılan çok geçişli konfigürasyonlarda ayna komponenti kullanılacaktır.

Bir NTEKF yükseltme ortamından geçen sinyal ayna veya sirkülatör komponentlerinden birisi yardımıyla tekrar yükseltme ortamına geri dönmesiyle oluşan konfigürasyon BAÇG yükselteç olarak ifade edilmektedir. İki farklı NTEKF yükseltme ortamından geçen sinyal ile oluşan konfigürasyon ise İAÇG yükselteç olarak isimlendirilmiştir.

5.2.1. Bir aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu

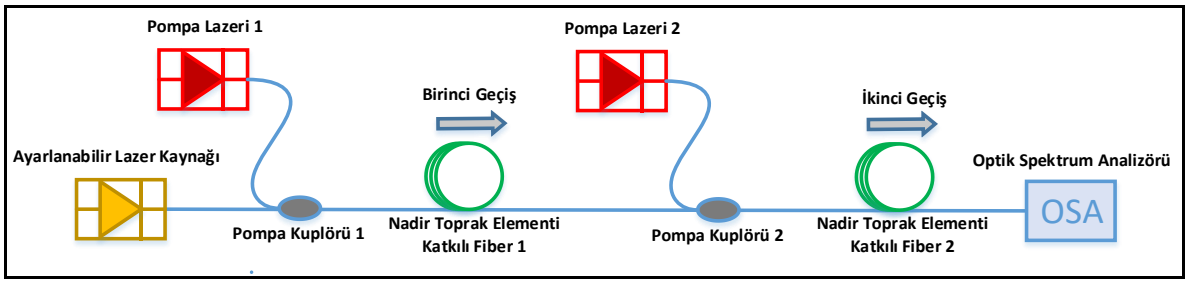
BAÇG yükselteç konfigürasyonu Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Sinyal NTEKF yükseltme ortamından geçerek aynadan yansıyan sinyal bir kez daha yükseltme ortamından geçmektedir. Böylece yükseltme ortamından iki defa geçen sinyal, iki kez yükseltilmiş olur. Çift geçişli konfigürasyonlar tek geçişli konfigürasyonlar ile kıyaslandığında daha yüksek kazanç, PDV ve çıkış gücü elde edilir.



Şekil 5.4. Bir aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu

5.2.2. İki aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu

İAÇG yükselteç konfigürasyonu Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Art arda iki NTEKF yükseltme ortamı kullanılarak oluşturulur. Böylece sinyal iki defa yükseltme ortamından geçerek iki kez yükseltme işlemine uğrar.



Şekil 5.5. İki aşamalı çift geçişli yükselteç tasarımı

Bu İAÇG yükselteç konfigürasyonu ile iki NTEKF ile iki pompa lazeri parametre değerleri ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Böylelikle optimize edilecek parametre sayısı artırılmış olur. Bu yükselteçler bir geçişli sistemlere göre daha yüksek kazanç sunar. İki yükselteç ortamının art arda bağlamanın getirdiği sistem karmaşıklığı, komponent sayısındaki artış maliyeti, yüksek güç tüketimi gibi dezavantajları olurken tek geçişli yükseltece göre, daha yüksek kazanç, daha az gürültü, daha fazla güç ve daha fazla parametre optimizasyonu gibi avantajlar sunar.

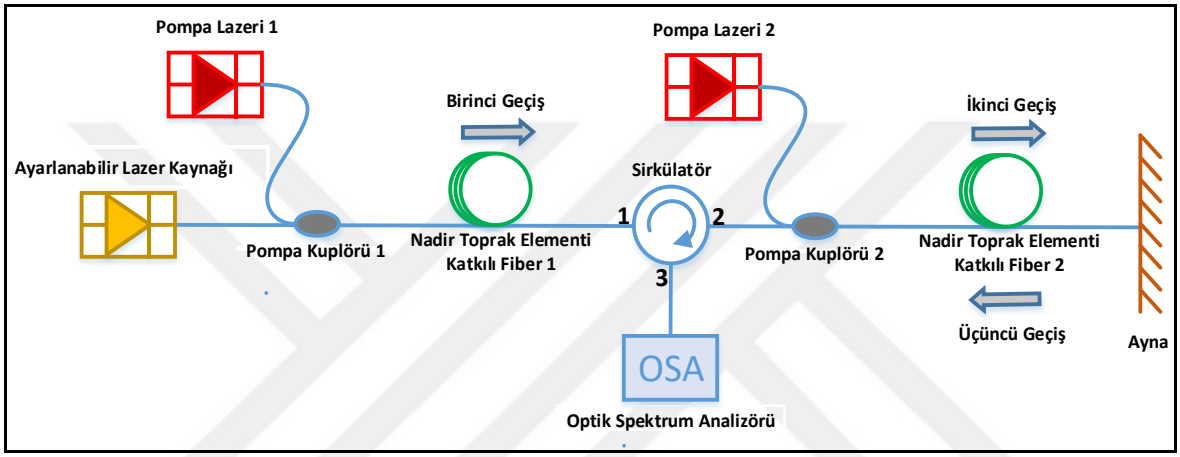
5.3. Üç Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları

Üç geçişli yükselteç konfigürasyonlarında sinyal üç defa NTEKF yükseltme ortamlarından geçmektedir. Böylelikle üç geçişli yükselteç konfigürasyonları oluşur. Üç geçişli konfigürasyonlar için üç farklı tasarım yer almaktadır. Bunlardan birincisi, İAÜG yükselteç I için ilk yükseltme ortamından geçip ikinci yükseltme ortamından da geçtikten sonra aynadan yansıyan sinyal tekrar üçüncü defa yükseltme ortamına geri dönmesi ile oluşur.

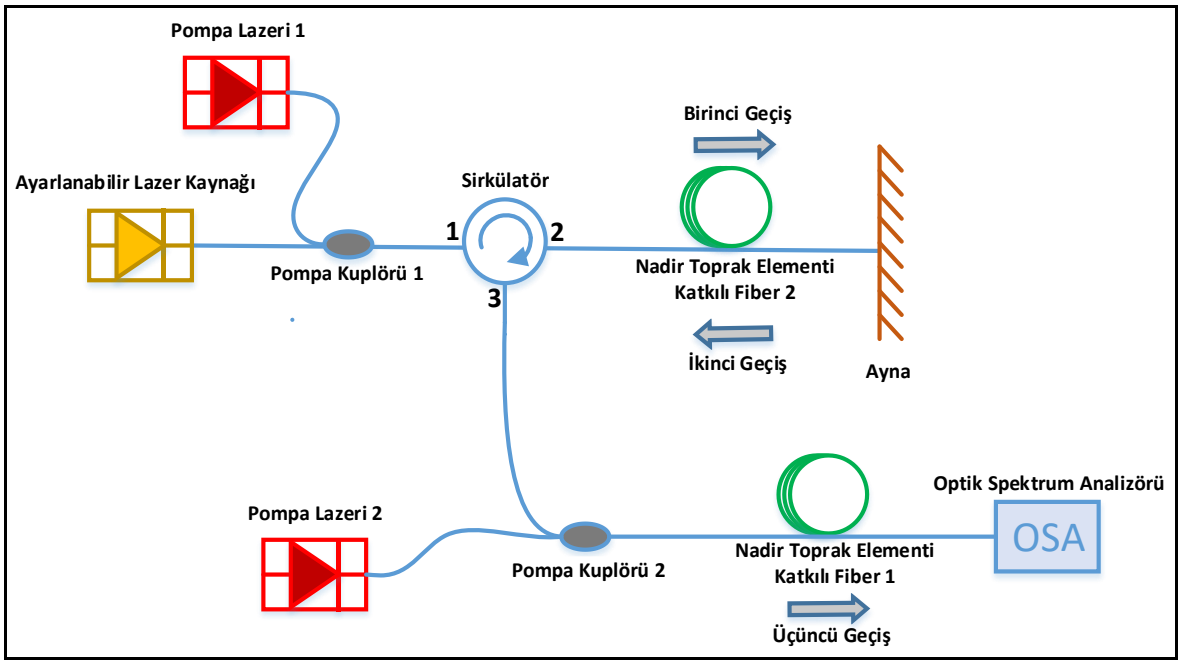
İkincisi, farklı İAÜG yükselteç II konfigürasyonunda ise sinyal yükseltme ortamından bir kez geçtikten sonra aynadan tekrar yansıyarak yükseltme ortamına geri döner. Daha sonra sirkülator yardımı ile sinyal tekrar yeni bir yükseltme ortamından geçmesi ile oluşur. Üçüncüsü, ÜAÜG yükselteç konfigürasyonu ise art arda sıralı üç yükseltme ortamından oluşur.

5.3.1. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonları

İAÜG yükselteç konfigürasyonları, iki yükseltme ortamı ve sinyalin bu yükseltme ortamlarından üç defa geçmesi ile oluşur. Bu tasarımlar hem tek geçişli ve hem de çift geçişli yükselteç avantajlarını bir araya getirmektedir. Böylelikle daha yüksek kazanç elde edilebilmektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de İAÜG yükselteç I ve II konfigürasyonları gösterilmektedir.



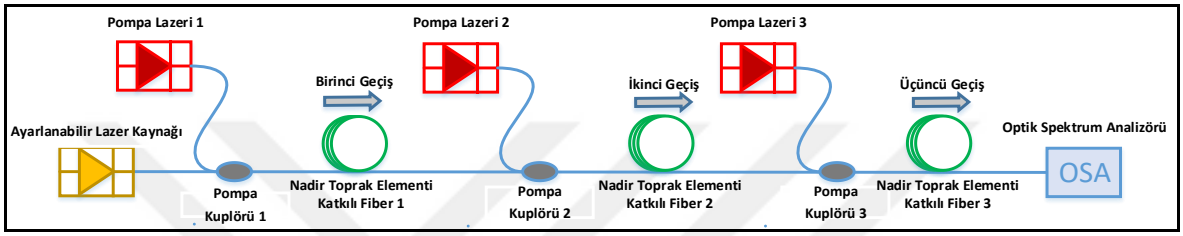
Şekil 5.6. İki aşamalı üç geçişli yükselteç I konfigürasyonu



Şekil 5.7. İki aşamalı üç geçişli yükselteç II konfigürasyonu

5.3.2. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu

ÜAÜG yükselteç konfigürasyonu, art arda üç yükseltme ortamının birleştirilmesi ile oluşturulur. Şekil 5.8'de ÜAÜG yükselteç konfigürasyonu gösterilmiştir. Burada Üç aşama ayrı ayrı kontrol edilebilir. Ayrıca her aşama için ayrı parametre optimizasyonuna imkan tanır. Böylece sinyal kazancının kontrol edilebilirliği artmaktadır. Fakat komponent sayısındaki artış yükselteç maliyetinin artmasına neden olacaktır.



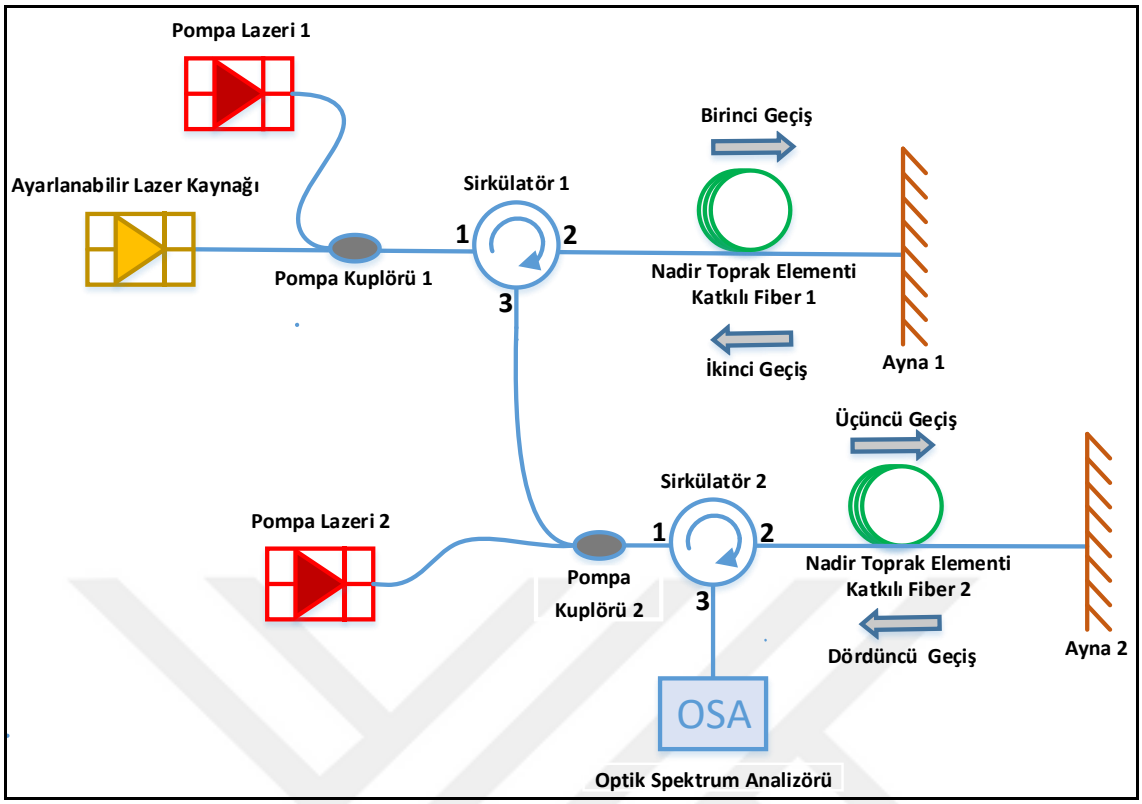
Şekil 5.8. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu

5.4. Dört Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları

Dört geçişli yükselteç konfigürasyonlarında sinyal dört defa yükseltme ortamından geçmesi ile dört geçişli konfigürasyonları oluşur. Bunlar NTEKF yükseltme ortamı sayısına göre iki, üç ve dört aşamalı yükselteçler olarak tasarlanabilmektedir. Bu yükselteç konfigürasyonları uzun mesafeli iletişimler için tercih edilmektedir. Dört geçişli yükselteç konfigürasyonları için birden fazla NTEKF yükseltme ortamı ve pompa lazeri sayesinde sistemin kontrol edilebilirliği artmaktadır. Bu sayede daha yüksek güç elde edilmesi sağlanabilir.

5.4.1. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

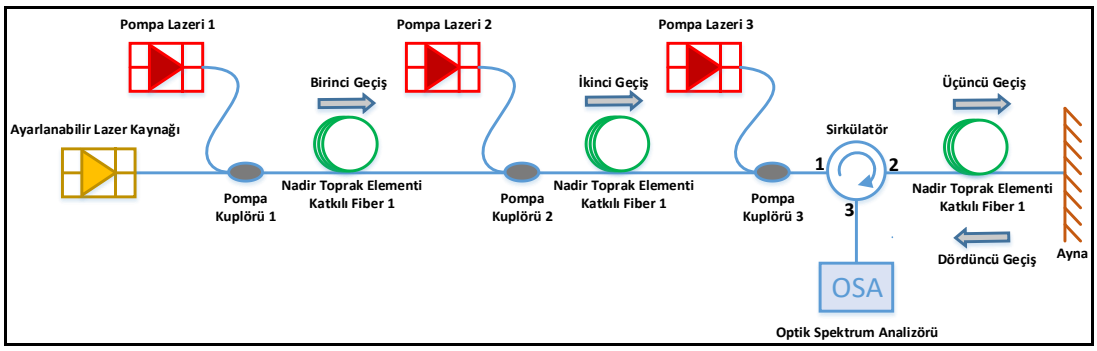
İADG yükselteç konfigürasyonu, sinyalin iki farklı yükseltme ortamından dört defa geçmesi ile oluşur. Şekil 5.9'da İADG yükselteç konfigürasyonu gösterilmiştir. Sinyalin dört defa yükseltme ortamından geçmesiyle, yükseltecin daha yüksek kazanç elde edilmesine olanak tanır. Geleneksel tek geçişli yükselteçlere göre daha verimli olabilmektedir. Fakat bunun yanında yükselteç tasarımı için kullanılan komponent sayısındaki artıştan dolayı tasarım maliyeti de ciddi şekilde artmış olur.



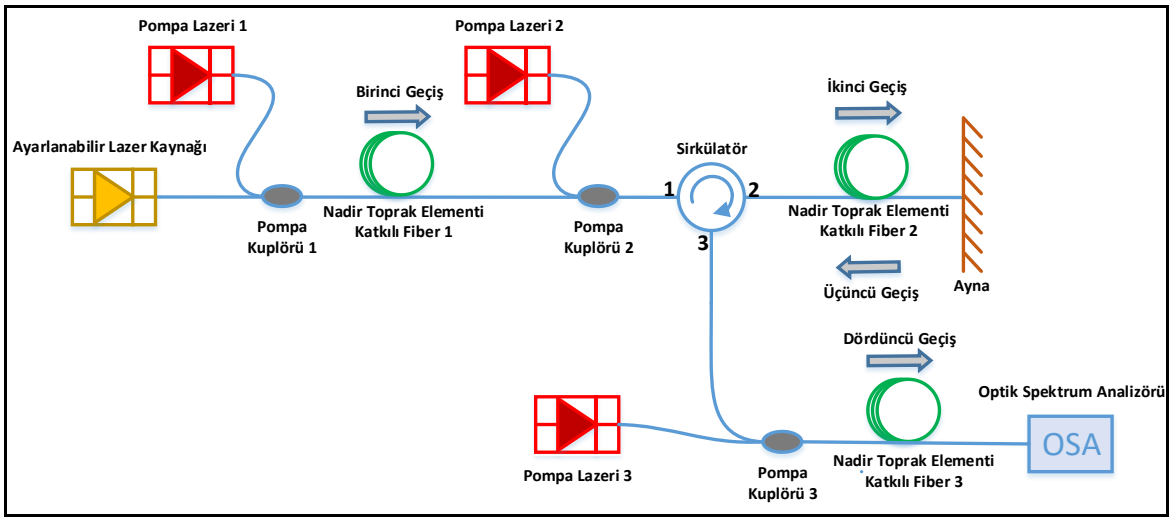
Şekil 5.9. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

5.4.2. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonları

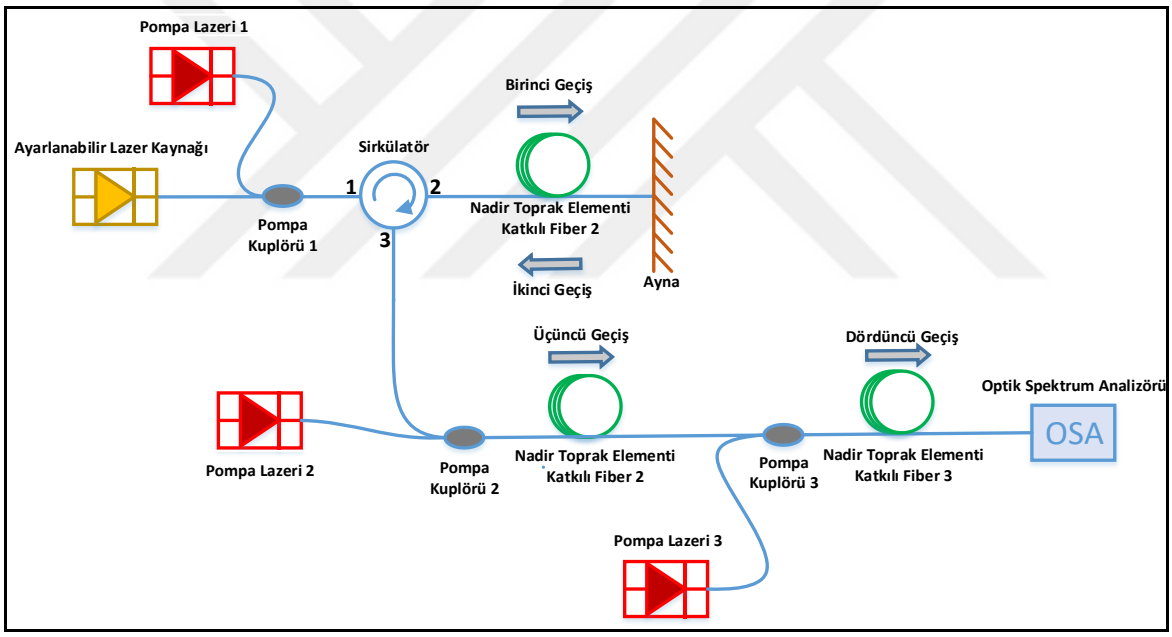
Üç aşamalı dört geçişli (ÜADG) yükselteç konfigürasyonları, sinyal üç farklı yükseltme ortamından dört defa geçmesi ile oluşur. Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de tasarlanabilecek üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonları gösterilmiştir. Sinyalin dört defa yükseltme ortamından geçmesiyle İADG yükselteç tasarımındaki gibi daha yüksek kazanç elde edilmesine olanak tanır. Fakat bunun yanında ciddi şekilde yükselteç tasarım maliyet artmaktadır.



Şekil 5.10. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç I konfigürasyonu



Şekil 5.11. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç II konfigürasyonu

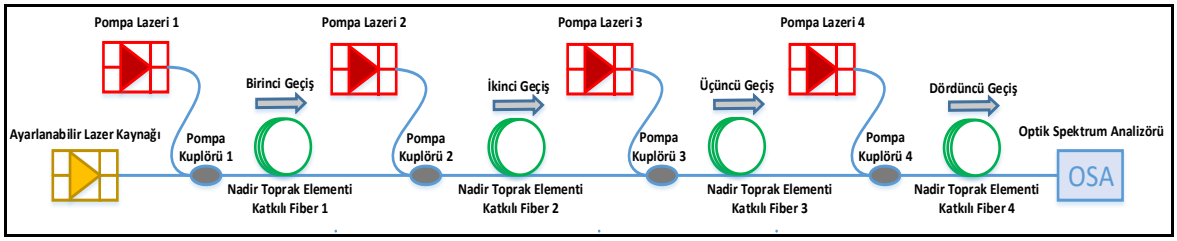


Şekil 5.12. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç III konfigürasyonu

5.4.3. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

DADG yükselteç konfigürasyonu, sinyalin dört farklı NTEKF yükseltme ortamından geçmesi ile oluşur. Şekil 5.13'te DADG yükselteç konfigürasyonu gösterilmiştir. Sinyalin dört defa yükseltme ortamından geçmesiyle, İADG ve ÜADG yükselteç tasarımlarındaki gibi daha yüksek kazanç elde edilmesine olanak tanır. Fakat bunun yanında kullanılan

komponent sayısı daha da artmasından dolayı ciddi şekilde yükselteç tasarım maliyetide artacaktır.



Şekil 5.13. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

6. ÇOK GEÇİŞLİ PKFY KONFİGÜRASYONLARI VE ANALİZLERİ

Literatürde çok geçişli PKFY konfigürasyonları ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Bu konuda PKFY konfigürasyonları dışındaki diğer çok geçişli NTEKFY konfigürasyon çalışmaları literatürde olduğu görülmektedir. Çok geçişli PKFY'ler için bir temel oluşturması bakımından bu alanda yeni konfigürasyon çalışmaları yapılmıştır. Çok geçişli yeni PKFY konfigürasyonları tasarlanması ve bunların optimizasyonları yapılması amaçlanmıştır. Optik yükselteç tasarımlarında kullanılan komponentler ALK, pompa lazeri ve PKF uzunluğudur.

ALK için, sinyal gücü ve sinyal dalgaboyu; pompa lazeri için, pompa gücü ve pompa dalgaboyu; PKF için, PKF uzunluğu, iyon yoğunluğu, ters birikme etkisi, numerik açıklık, çekirdek yarıçapı, katkılama yarıçapı, sıcaklık parametrelerinin analiz edilmesi ve bunların yükselteç kazancı bakımından optimum değerlerinin belirlenmesi araştırmacılar ve tasarımcılar için büyük öneme sahiptir.

Analiz için sırasıyla sinyal dalgaboyu, PKF uzunluğu, sinyal gücü, pompa gücü, iyon yoğunluğu, ters birikme etkisi, numerik açıklık, çekirdek yarıçapı, katkılama yarıçapı, pompa dalgaboyu ve sıcaklık parametreleri belirlenmiştir.

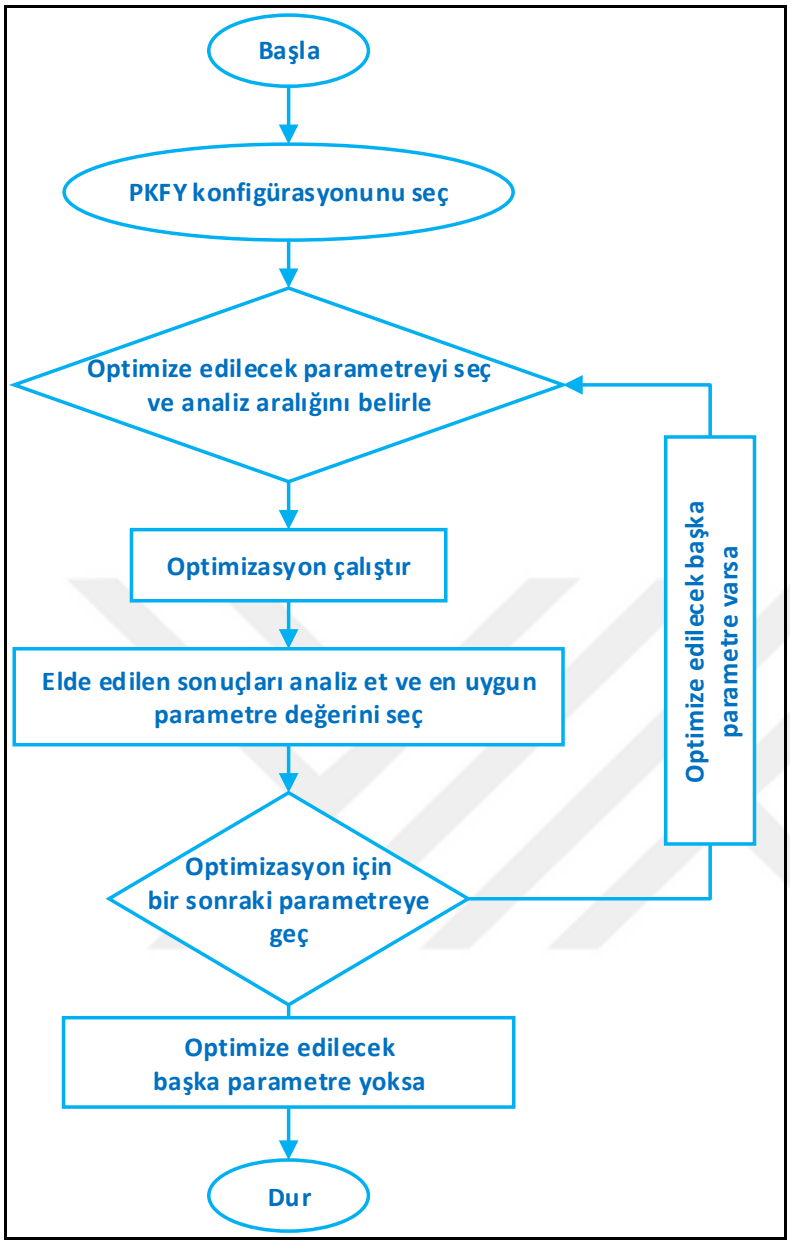
Bütün konfigürasyon kurulumları için Optisystem simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Genel olarak yazılımda tanımlanan başlangıç parametre değerleri, bu değerlere bağlı olarak analiz aralığı ve adım artışı Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Parametre başlangıç değerleri

Parametre	Başlangıç Değeri	Analiz Aralığı	Adım Aralık Artışı
Sinyal dalgaboyu (nm)	1270 – 1340 (1300 civarı optimum kazanç)	1270 – 1340	5
PKF uzunluğu (m)	5	1 – 24	1
Sinyal gücü (dBm)	0	0 – (-50)	-5
Toplam pompa gücü (mW)	100	1000 – 1200	100
İyon yoğunluğu (m^{-3})	$10x10^{24}$	$5x10^{24}$ – $50x10^{24}$	$5x10^{24}$
Ters birikme etkisi (m^3/s)	$0{,}2x10^{-21}$	$0x10^{-21}$ – $1x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	0,364	0,09 – 0,54	0,09
Çekirdek yarıçapı (µm)	1	0,4 – 1,6	0,2
Katkılama yarıçapı (µm)	1	0,4 – 1,6	0,2
Pompa dalgaboyu (nm)	1010	1000 – 1024	4
Sıcaklık (K)	300	250 – 350	25

Tüm simülasyonlarda, ekleme kaybı 0,02 dB olarak alınmıştır. Pompa dalgaboyunun başlangıç değeri 1010 nm olarak belirlenmiştir [117]. Analiz edilen her parametre aralığı, yükselteç konfigürasyonları için eşittir. Genellikle optik yükselteçler iletişim amaçlı kullanıldığından, tek modlu fiberler kullanılmıştır. Polarizasyondan bağımsız bir sistem tasarımı yapıldığından dolayı polarizasyon etkisi dikkate alınmamıştır.

Yükselteç konfigürasyonlarında parametre optimizasyonu için tek parametre optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Burada optimize etmek istenilen parametre seçilir, bu parametrenin analiz aralığı belirlenir ve diğer parametreler sabit tutulur. Seçilen parametrenin yükselteç sistemi üzerindeki etkisini analiz edilebilir. Böylece seçilen parametre değerinin yükselteç performansını optimum yapacak şekilde belirlenebilir. Tek parametre optimizasyon şeması akış diyagramı Şekil 6.1'de yer almaktadır.



Şekil 6.1. Tek parametre optimizasyon şeması akış diyagramı

Başlangıç değerlerinden başlayarak, PKF uzunluğu, sinyal gücü, pompa gücü, iyon yoğunluğu, ters birikme etkisi, numerik açıklık, çekirdek yarıçapı, katkılama yarıçapı ve sıcaklık parametrelerinin optimum değerleri sırasıyla belirlenmiştir. Analiz edilen her parametre değeri, bir sonraki parametre değerini belirlemek için kullanılır. Her parametre değeri belirlenirken PKFY sistem kazancını maksimize eden optimum değerler seçilmiştir. Her parametre analizi, kazanç ve GF açısından incelenmiştir. Ardından, PDV ve KYY gürültü gücü analiz edilmiştir.

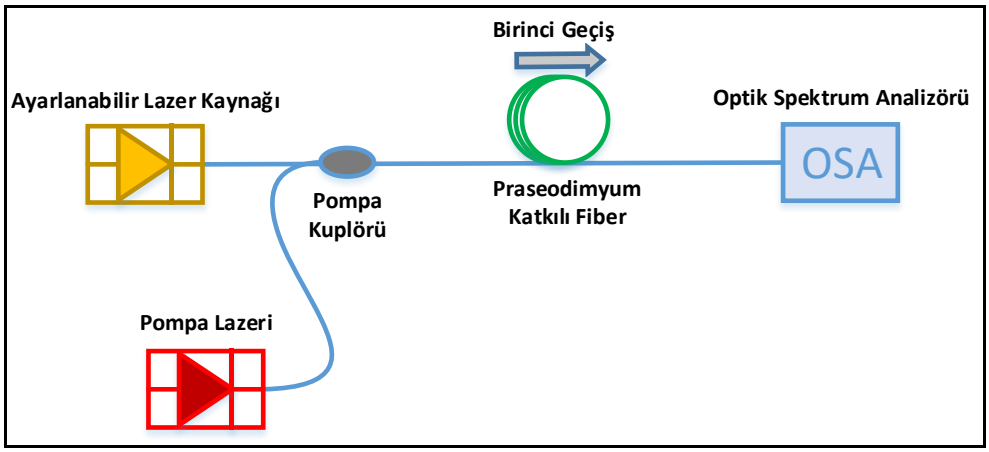
Bütün yükselteç konfigürasyonlarında sonuçları gözlemlemek ve analiz etmek için DBÇ analizörü ve OSA kullanılmıştır. Optimizasyondan elde edilen tüm grafiklerde düz çizgiler kazancı, kesikli çizgiler GF'yi temsil etmektedir. KYY gürültü gücü ise düz çizgiler ile belirtilmiştir.

Başta temel PKFY konfigürasyon tasarımları kısaca gösterilmiştir. Literatürde ileri, geri ve çift yönlü pompalanan yükselteç konfigürasyonları arasında kazanç bakımından daha verimli olan bir BAÇY-PKFY konfigürasyonuna, alternatif olabilecek yeni BAÇG-PKFY konfigürasyonu karşılaştırılıp analiz edilmiştir.

Literatürde ilk defa İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonları karşılaştırılıp analiz edilmiştir. Son olarak önceki optimize edilen parametre değerleri için İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonları analiz edilip karşılaştırılmıştır.

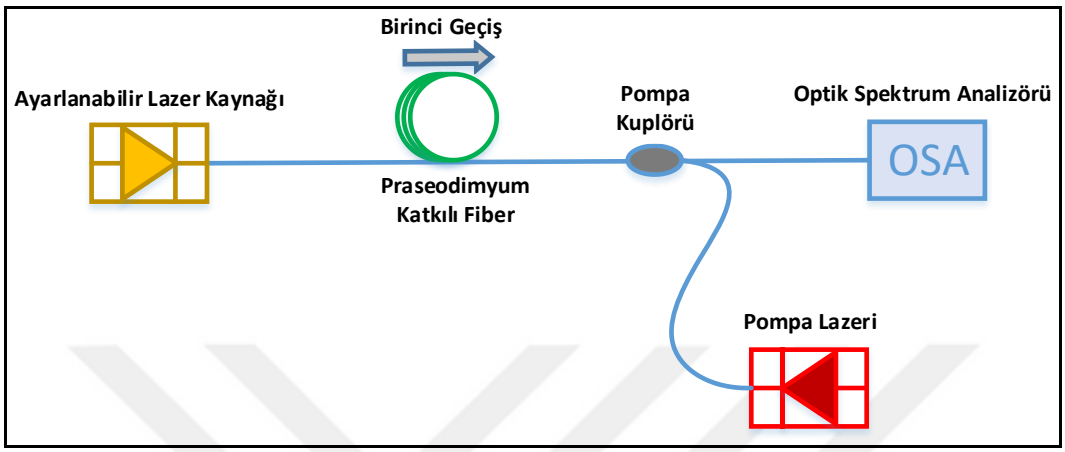
6.1. İleri, Geri ve Çift Yönlü Tek Geçişli Temel PKFY Konfigürasyonları

İleri yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Şekil 6.2'de ALK ile uygulanan sinyaller ve pompa lazeri, pompa kuplörde birleştirilmiş ve PKF'ye uygulanmıştır. Yükseltilmiş sinyaller OSA'ya ulaşmıştır.



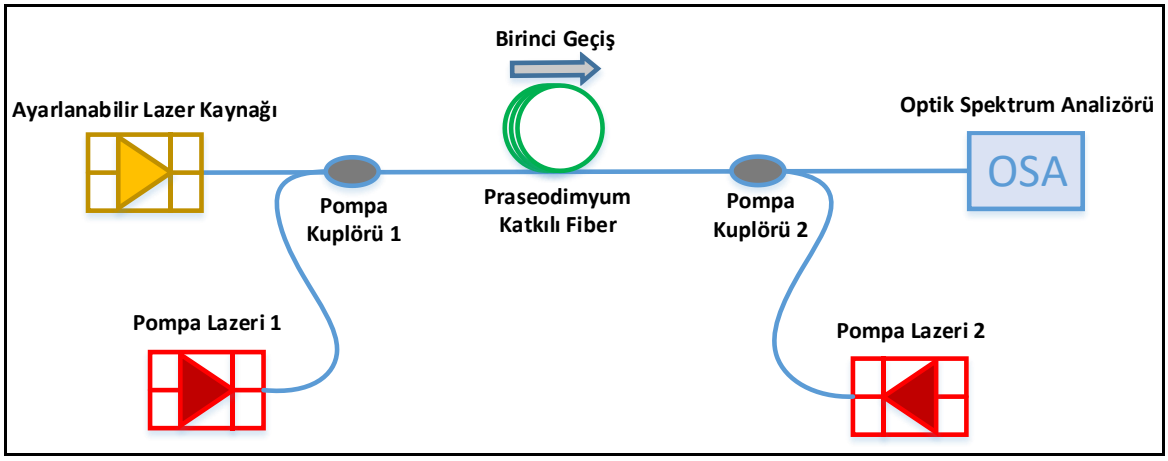
Şekil 6.2. İleri yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu

Geri yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Şekil 6.3'te ALK ile uygulanan sinyaller ve geri yönde pompa lazeri, pompa kuplörde birleştirilmiş ve PKF'ye uygulanmıştır. Yükseltilmiş sinyaller OSA'ya ulaşmıştır.



Şekil 6.3. Geri yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu

Çift yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Şekil 6.4'te ALK ile uygulanan sinyaller ve pompa lazeri 1 pompa kuplör 1'de ve pompa lazer 2 pompa kuplör 2'de birleştirilmiş ve PKF'ye uygulanmıştır. Yükseltilmiş sinyaller OSA'ya ulaşmıştır.



Şekil 6.4. Çift yönlü tek geçişli PKFY konfigürasyonu

Burada temel PKFY konfigürasyonları ele alınmıştır. Çok geçişli yükselteç konfigürasyonları daha detaylı anlatılacak ve kapsamlı bir şekilde belirlenen parametrelerin analizleri yapılmıştır.

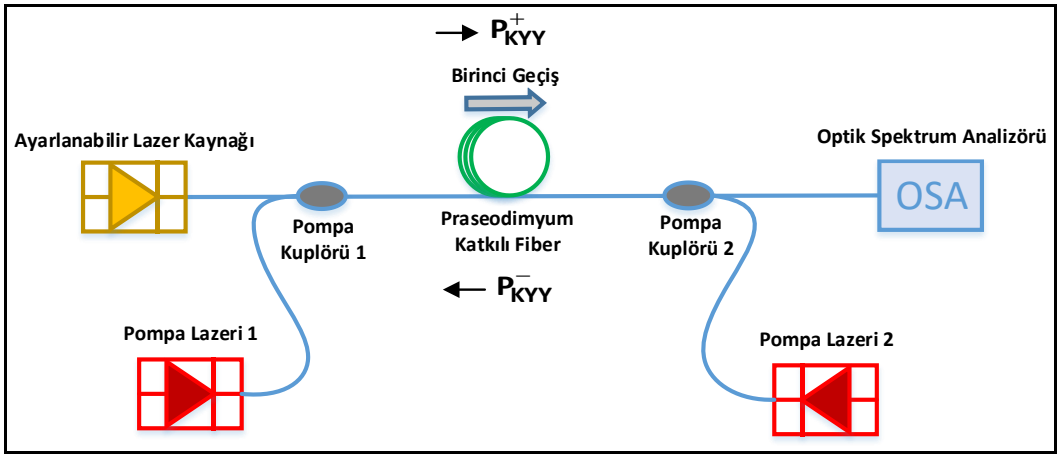
Literatürde tek geçişli temel konfigürasyonlardan, çift yönlü pompalanan yükselteç modeli olan, BAÇY-PKFY konfigürasyonu ile daha iyi kazanç elde edildiği için, bir sonraki aşamada bu konfigürasyona alternatif olabilecek ve maliyet bakımından uygun olan BAÇG-PKFY konfigürasyonu ile karşılaştırılması ve parametre optimizasyonu detaylı şekilde yapılmıştır.

6.2. Bir Aşamalı Çift Yönlü ve Çift Geçişli PKFY Analizleri ve Karşılaştırılması

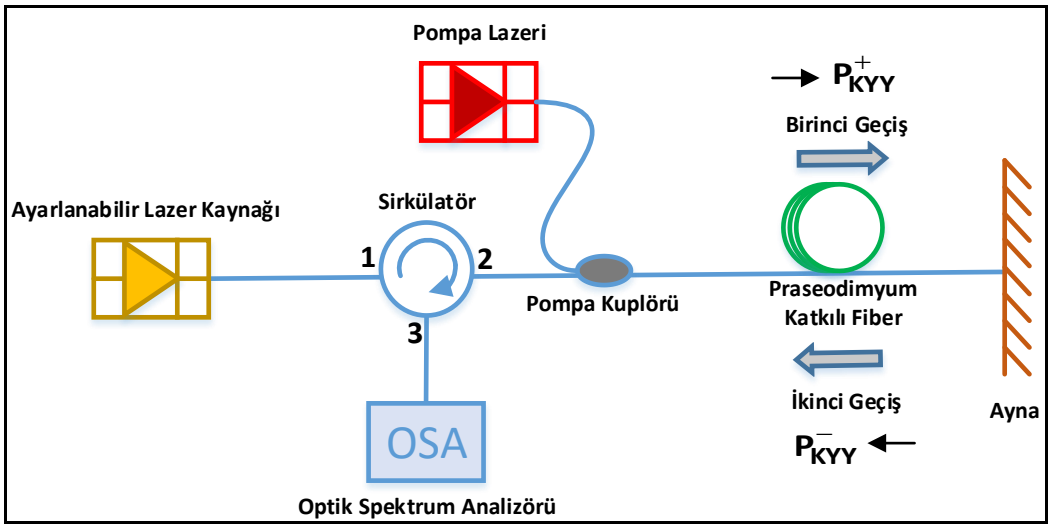
Burada temel BAÇY-PKFY konfigürasyonu ile buna alternatif olabilecek BAÇG-PKFY konfigürasyonu ele alınmıştır. Şekil 6.5'te BAÇY-PKFY konfigürasyonu gösterilmiştir. ALK ile uygulanan sinyaller ve pompa lazeri 1 pompa kuplör 1'de ve pompa lazer 2 pompa kuplör 2'de birleştirilmiş PKF'ye uygulanmıştır. Yükseltilmiş sinyaller OSA'ya ulaşmıştır. Böylece BAÇY-PKFY konfigürasyon tasarımı tamamlanmış olur.

Şekil 6.6'da ALK ile uygulanan sinyaller optik sirkülatörün 1 numaralı ucundan girip 2 numaralı ucundan çıkan sinyaller ve pompa lazeri, pompa kuplörde birleştirilmiş ve PKF' ye uygulanmıştır. Yükseltilmiş sinyaller aynadan yansıyıp PKF'den tekrar geçip sirkülatörün 2 numaralı ucundan girip 3 numaralı ucundan çıkıp OSA'ya ulaşmıştır. Böylelikle BAÇG-PKFY kurulumu tamamlanmıştır.

Sonuçları gözlemlemek ve analiz etmek için WDM analizörü ve bir OSA kullanılmıştır. Burada P^{+}_{KYY}, ileri yönde yayılan KYY gürültü gücüdür. P^{-}_{KYY}, geri yönde yayılan KYY gürültü gücüdür.

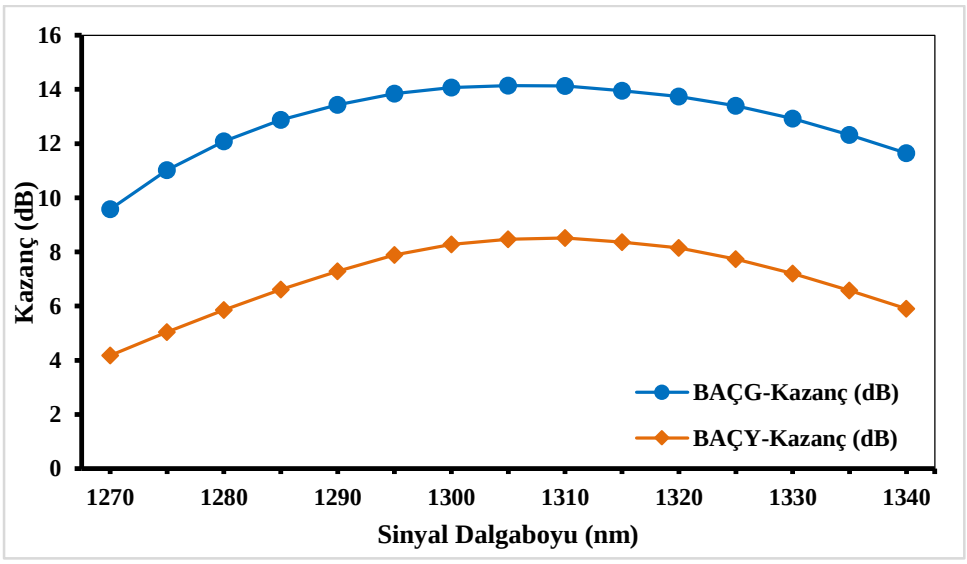


Şekil 6.5. Bir aşamalı çift yönlü PKFY konfigürasyonu



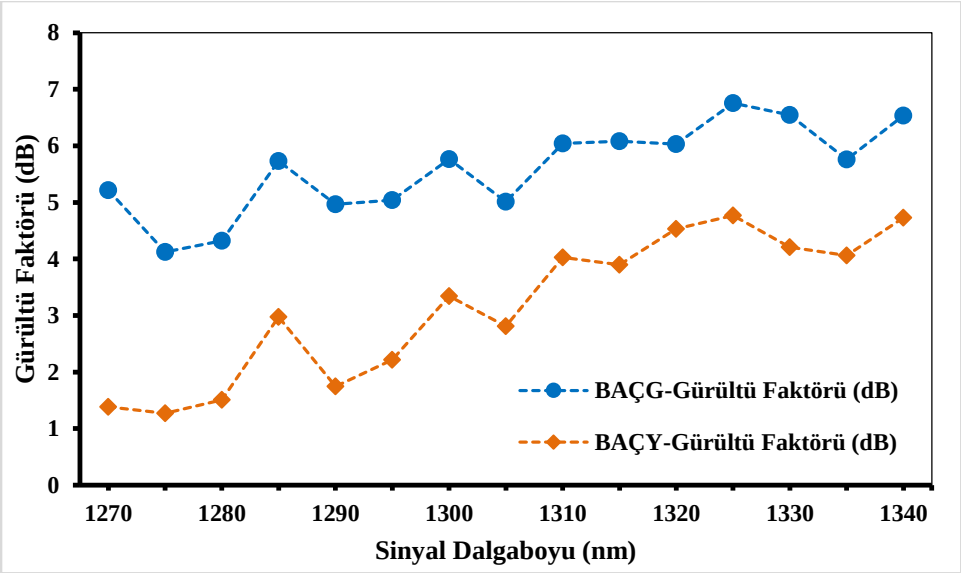
Şekil 6.6. Bir aşamalı çift geçişli PKFY konfigürasyonu

Çizelge 6.1'de belirlenen parametre başlangıç değerleri iki yükselteç konfigürasyonu için belirlenmiştir. İki yükselteç için bu değerler kullanılarak yapılan kazanç spektrumu analizi yapılmıştır. Şekil 6.7'de dalgaboyuna karşı kazanç değişimi, Şekil 6.8'de ise dalgaboyuna karşı GF değişimi sonuçları gösterilmiştir. Başlangıçta sinyal dalgaboyu artması yükselteçlerde kazanç artmış, artmaya devam etmesiyle yükselteçler 1300 nm dalgaboyu civarında doyuma gitmiş ve daha sonra sinyal dalgaboyu artışı kazançlarında düşüşe sebep olmuştur. İki yükselteç kazanç bakımından karşılaştırıldığında 1300 nm dalgaboyu için BAÇG-PKFY konfigürasyonunun BAÇY-PKFY konfigürasyonundan 6 dB civarı daha yüksek kazanç elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.7. Sinyal dalgaboyuna karşı kazanç değişimi

Optimum kazanç, 1300 nm sinyal dalgaboyu civarında elde edilmiştir. İki yükseltecin karşılaştırılmasında kullanılacak sinyal dalgaboyu 1300 nm olarak belirlenmiştir. Bu değer ikinci pencere haberleşme kanalı için kazancın optimuma yakın olduğu bölgedir. İki yükselteç için GF'ye baktığımızda sinyal dalgaboyu değişimine karşılık gelen gürültü faktörleri benzer olduğu görülmektedir. BAÇY-PKFY konfigürasyonu 1300 nm dalgaboyu için BAÇY-PKFY konfigürasyonundan yaklaşık 2.5 dB daha düşük GF üretmiştir.

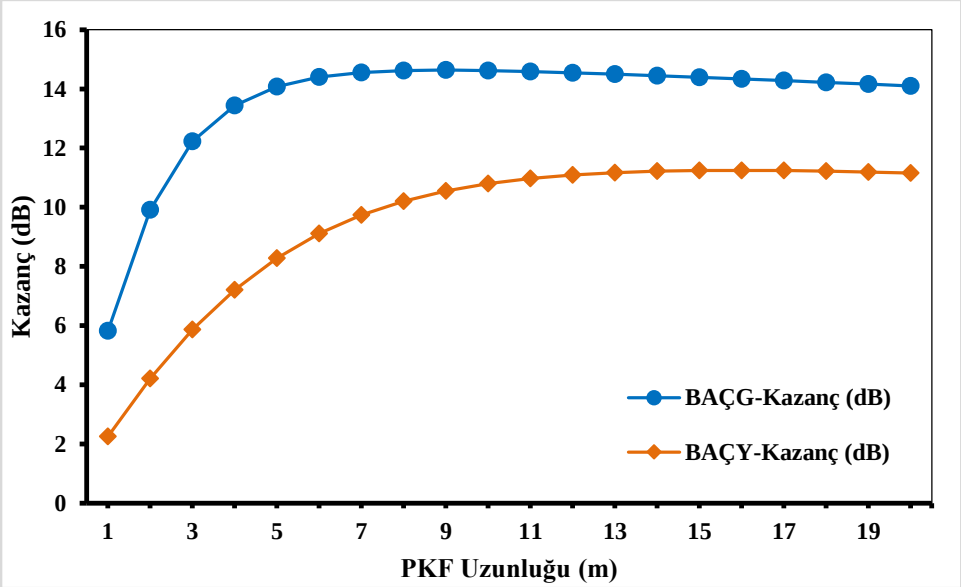


Şekil 6.8. Sinyal dalgaboyuna karşı GF değişimi

6.2.1. Praseodimyum katkılı fiber uzunluğu analizleri ve karşılaştırılması

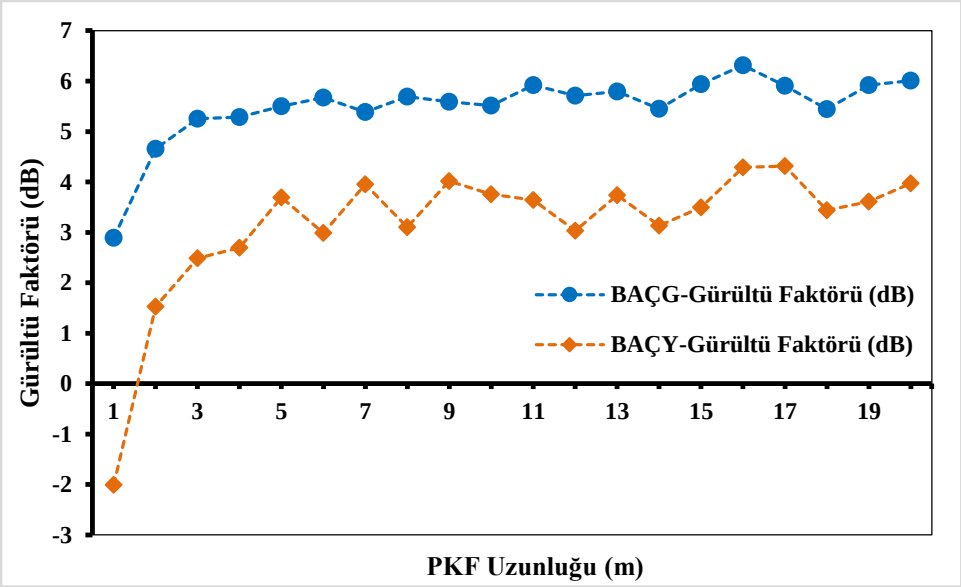
Optik yükseltecin genel performansını ve verimliliğini belirlemede fiber uzunluğunun optimizasyonu oldukça önemlidir. Fiber uzunluğu kısa ise, aktif iyonlar pompa fotonlarıyla tam olarak etkileşime giremez. Bu durum pompa gücünün tam olarak soğurulamamasına neden olur ve enerjinin bir kısmının kullanılmadan yükselteç sisteminden atılmasına yol açar. Fiber aşırı uzun ise, pompa gücü fiberin sonuna ulaşmadan tükenir. Bu pompalanmamış bölgelerde, temel haldeki iyonlar yükselme yerine tekrar soğurma görevi görmeye başlar. Yeniden soğurum olarak bilinen bu olay, sinyal gücünün azalmasına ve genel optik kazancın düşmesine neden olur. Bu nedenle, sinyal yeniden soğurum kayıplarını en aza indirirken maksimum pompa kullanımını sağlamak için ideal bir fiber uzunluğu seçilmesi gerekir.

İki yükselteç konfigürasyonunun PKF uzunluğu analizi için parametre aralığı 1 – 20 m ve 1 m adım aralığında artış yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi karşılaştırılması Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Burada PKF uzunluğunun artması ilk başta yükselteç kazançlarında artışa sebep olmuş, artmaya devam etmesi ile yükselteçler doyuma gitmiş ve daha sonra kazançlarında düşüşe sebep olmuştur. Optimum PKF uzunlukları BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY için sırasıyla 11 m ve 6 m civarında elde edilmiştir. BAÇY-PKFY için PKF uzunluğu 11 m iken yükselteç kazancı 11,0 dB elde edilmiştir. BAÇG-PKFY için PKF uzunluğu 6 m iken yükselteç kazancı 14,4 dB elde edilmiştir. Kazanç bakımından BAÇG-PKFY daha iyi performans sergilediği ve ayrıca PKF uzunluğu ise 5 m daha az iken optimum olmuştur.



Şekil 6.9. PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin PKF uzunluğuna karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.10'da gösterilmiştir. İki yükselteç konfigürasyonu GF bakımından incelendiğinde BAÇY-PKFY için PKF uzunluğu 11 m iken ortalama 3,6 dB civarındayken, BAÇG-PKFY için ise PKF uzunluğu 6 m iken 5,7 dB civarındadır. BAÇY-PFKY daha az GF üretmiştir.



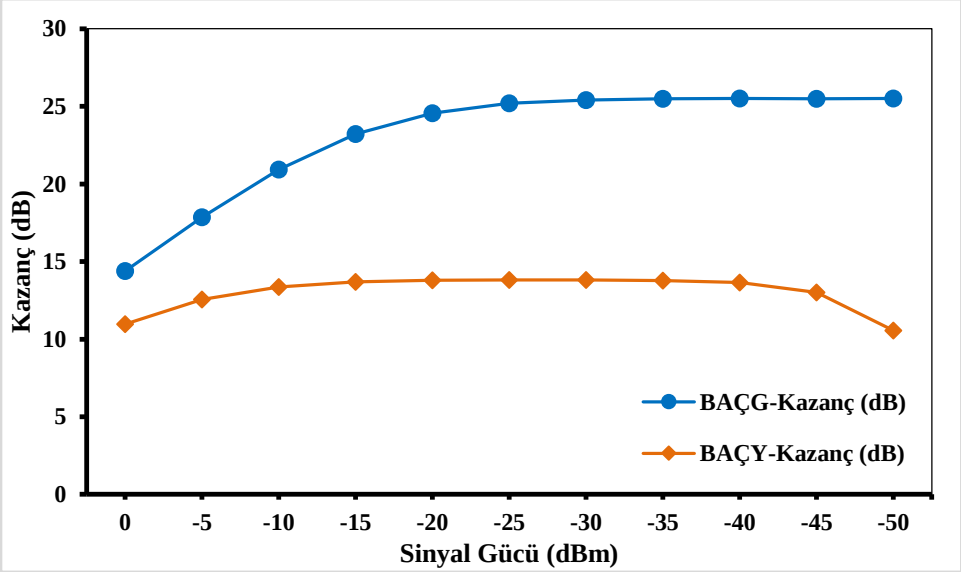
Şekil 6.10. PKF uzunluğuna karşı GF değişimi

6.2.2. Sinyal gücü analizleri ve karşılaştırılması

Sinyal gücü, özellikle kazanç ve doygunluk özellikleri açısından, optik yükseltecin performansında belirleyici bir rol oynar. Sinyal gücü, optik yükseltecin çalışma rejimini belirleyen temel bir parametredir. Sinyal gücü düşük olduğunda, yükselteç sinyal kazanç rejiminde çalışır. Burada popülasyon inversiyonu yüksek kalır ve kazanç nispeten sabit ve maksimum seviyede kalır. Bununla birlikte sinyal gücü arttıkça, daha fazla uyarılmış yayılım meydana gelir ve bu da uyarılmış iyon yoğunluğunu pompa gücünün yenileyebileceğinden daha hızlı tüketir. Sinyal gücü arttıkça mevcut kazanç azalmaya başlar ve bir noktadan sonra kazanç doygunluğa ulaşır. Yüksek bir giriş sinyali genel kazancı azaltabilirken, genellikle daha yüksek bir PDV neden olur çünkü depolanan enerjinin daha büyük bir kısmı sinyal tarafından çekilir. Tersine, sinyali gücü çok zayıfsa, yükselteç artan KYY gürültüsüne neden olabilir ve bu da SGO'sunu düşürür.

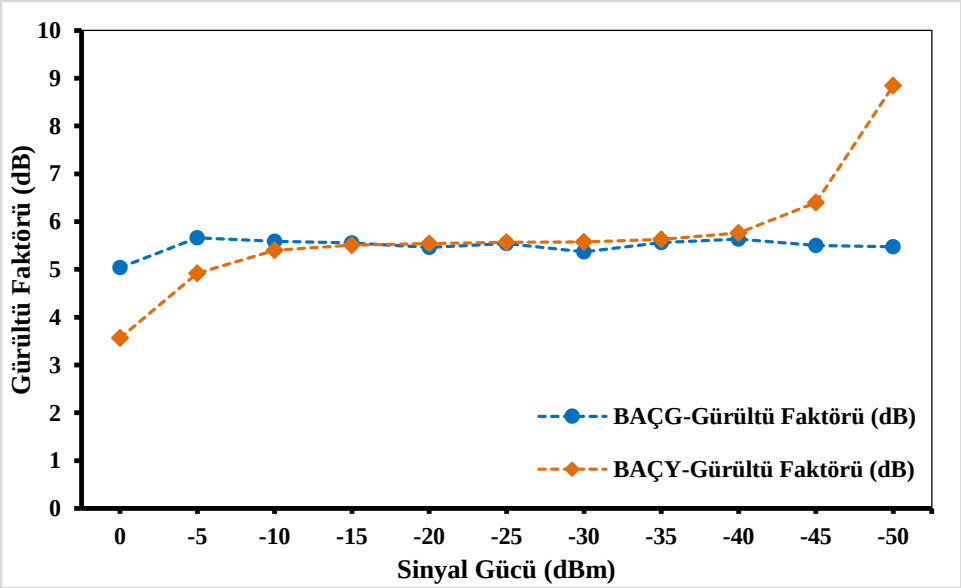
İki yükselteç konfigürasyonu için sinyal gücüne karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Sinyal gücü parametre aralığı 0 – (-50) dBm ve -5 dBm adım aralığında artış yapılmıştır. Başlangıçta sinyal gücü artması yükselteçlerde kazanç artmış, artmaya devam etmesiyle yükselteçler doyuma gitmiş ve daha sonra kazançlarında düşüşe sebep olmuştur. BAÇY-PKFY konfigürasyonu daha hızlı doyuma gittiği görülmektedir. Optimum sinyal gücü BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY için sırasıyla -

20 dBm ve -30 dBm iken elde edilmiştir. BAÇY-PKFY için sinyal gücü -20 dBm iken yükselteç kazancı 13,8 dB elde edilmiştir. BAÇG-PKFY için sinyal gücü -30 iken yükselteç kazancı 25,4 dB elde edilmiştir.



Şekil 6.11. Sinyal gücüne karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin sinyal gücüne karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.12'de gösterilmiştir. BAÇY-PKFY konfigürasyonu için GF başlangıçta daha düşük iken sinyal gücü arttıkça GF ciddi oranda artış göstermiştir. BAÇG-PKFY konfigürasyonu için ise GF başlangıçta BAÇY-PKFY konfigürasyonundan daha yüksek iken sinyal gücü artmasıyla daha stabil bir durum içinde kalmıştır. Sinyal gücünün artmasıyla BAÇG-PKFY konfigürasyonuna ait GF, BAÇY-PKFY konfigürasyonundan daha düşük bir duruma gelmiştir.

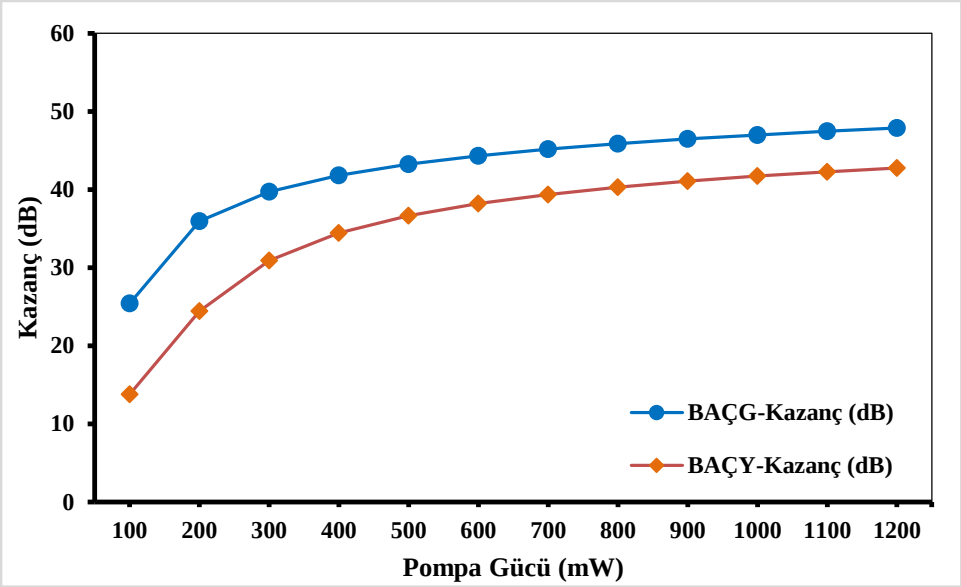


Şekil 6.12. Sinyal gücüne karşı GF değişimi

6.2.3. Pompa gücü analizleri ve karşılaştırılması

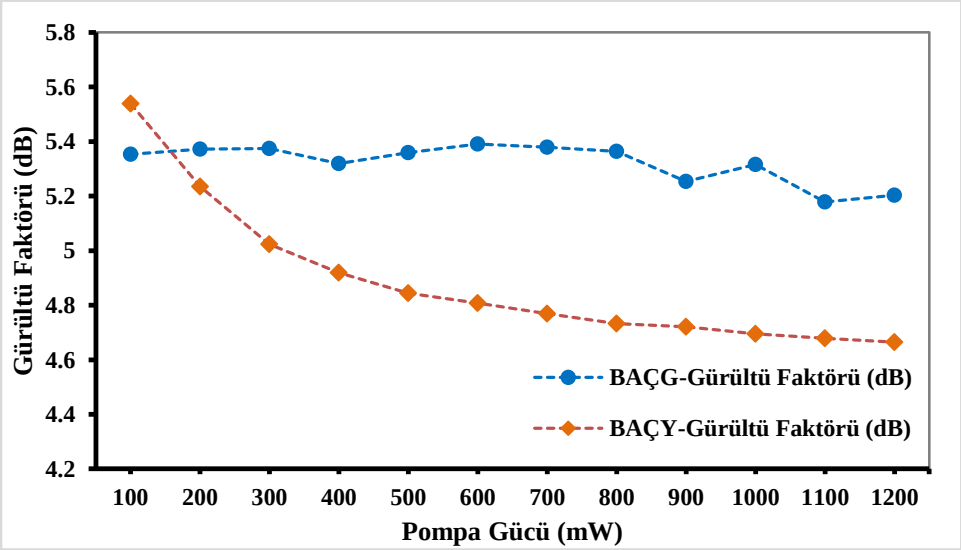
Pompa gücü, katkılı fiber içindeki popülasyon inversiyonu sağlayan temel enerji kaynağı görevi görür. Daha düşük pompa gücü seviyelerinde, uyarılmış iyon sayısı fiberin içsel kayıplarını aşmak için yetersizdir ve bu da yükseltecin kazanç ortamı yerine zayıflatıcı gibi davranmasına neden olur. Pompa gücü belli bir eşiği aştığında yükselteç, kazancın pompa yoğunluğuyla arttığı bir rejime girer. Bununla birlikte, pompa gücü artmaya devam ettikçe, sistem sonunda doygunluğa ulaşır. Bu durumda aktif iyonların çoğu zaten uyarılmış durumdadır. Bu noktadan sonra, pompa gücündeki artış, kazançta azalmaya neden olur.

İki yükseltecin pompa gücüne karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.13'de gösterilmiştir. Toplam pompa gücü parametre aralığı 1000 – 1200 mW ve 100 mW adım aralığında artış yapılmıştır. Toplam pompa gücü iki yükselteç tipi içinde 800 mW seviyesine ulaştıktan sonra artık kazanç artışı devam etmesine rağmen yükselteçler üzerindeki kazancın verimi azalmaya başlamıştır. Optimum toplam pompa güçleri hem BAÇY-PKFY ve hem de BAÇG-PKFY için 800 mW iken elde edilmiştir. BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY için toplam pompa gücü 800 mW iken sırasıyla 40,3 dB ve 45,9 dB kazanç elde edilmiştir. Kazanç bakımından BAÇG-PKFY sistemi BAÇY-PKFYsisteminden 5,5 dB daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 6.13. Pompa gücüne karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin pompa gücüne karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.14'de gösterilmiştir. Başlangıçta BAÇY-PKFY konfigürasyonu BAÇG-PKFY konfigürasyonundan daha fazla GF üretmiştir. GF pompa gücü artmasıyla BAÇG-PKFY konfigürasyonuna ait GF daha stabil kalmasına rağmaen BAÇY-PKFY konfigürasyonuna ait GF azalmaya başlamıştır. GF için iki yükseltecin pompa gücü 800 mW iken BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY için sırasıyla 4,7 dB ve 5,4 dB elde edilmiştir. İki yükselteç 800 mW pompa gücü için birbirine yakın ve BAÇY-PKFY 0,7 dB daha az GF üretir.

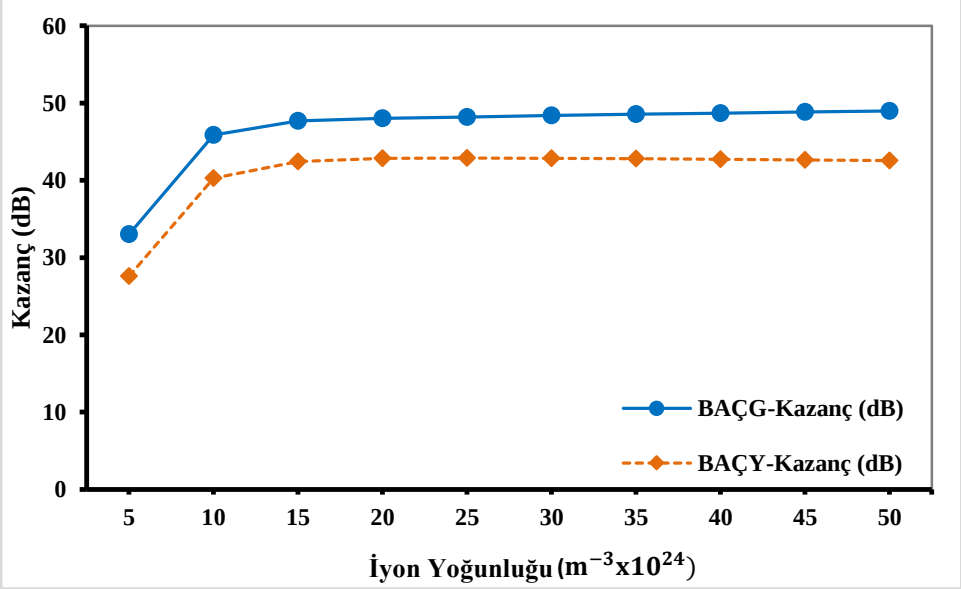


Şekil 6.14. Pompa gücüne karşı GF değişimi

6.2.4. İyon yoğunluğu analizleri ve karşılaştırılması

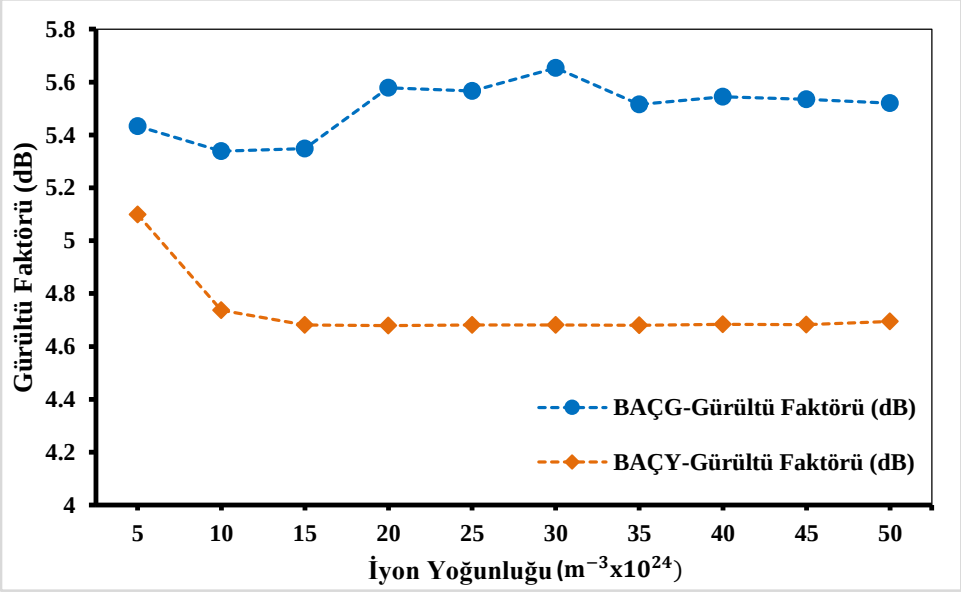
İyon yoğunluğu, yükseltecin genel verimliliğini belirlemede önemli bir rol oynar. Daha yüksek iyon yoğunluğu, pompa fotonları ile aktif ortam arasındaki etkileşimi artırarak, istenen kazancı elde etmek için daha kısa fiber uzunluklarına olanak tanır. Bununla birlikte, aşırı yüksek iyon yoğunluğu, iyonlar arasında ışımasız enerji transferlerinin popülasyon inversiyonunu önemli ölçüde bozduğu iyon sönümlemesi ve iyon kümelenmesi etkilerini tetikleyebilir. Bu nedenle, iyon yoğunluğunu optimize edilmesi, kazanç kayıp oranını en üst düzeye çıkarmak ve O-band uygulamalarında yüksek PDV korumak için önemlidir.

İki yükseltecin iyon yoğunluğuna karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.15'te gösterilmiştir. İyon yoğunluğu parametre aralığı $5x10^{24}$ – $50x10^{24}$ m^{-3} ve $5x10^{24}$ m^{-3} adım aralığında artırılmıştır. Başlangıçta, iyon yoğunluğundaki artış yükselteçlerin kazancında bir artışa neden olmuş, ancak yükselteçler doyuma ulaştıktan sonra kazanç azalmaya başlamıştır. Optimum iyon yoğunluğu, BAÇY-PKFY için $15x10^{24}$ m^{-3} ve BAÇG-PKFY için $20x10^{24}$ m^{-3} olduğunda elde edilir. BAÇY-PKFY için, iyon yoğunluğu $15x10^{24}$ m^{-3} olduğunda, yükselteç kazancı 42,4 dB'dir. BAÇG-PKFY için, iyon yoğunluğu $20x10^{24}$ m^{-3}olduğunda, yükselteç kazancı 48,0 dB'dir.



Şekil 6.15. iyon yoğunluğuna karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin iyon yoğunluğuna karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.16'da gösterilmiştir. GF açısından BAÇG-PKFY konfigürasyonu BAÇY-PKFY konfigürasyonuna göre ortalama 1,0 dB daha fazla GF üretir. İyon yoğunluğu arttıkça, yükselteçlerde doğrusal olmayan etkiler beklenir. Bu bağlamda, yüksek Praseodimyum konsantrasyonu, hem KYY gürültü gücü hem de iyon kümelenmesi nedeniyle çift kaynaklı sönümlemeye neden olarak yükselteçlerin performansını olumsuz etkileyen iyon kümelenmesine neden olur. Kümelenme problemi, fiber üretim sürecinde silikadaki Praseodimyum iyonlarının çözünürlüğünün artırılmasıyla azaltılabilir [131].



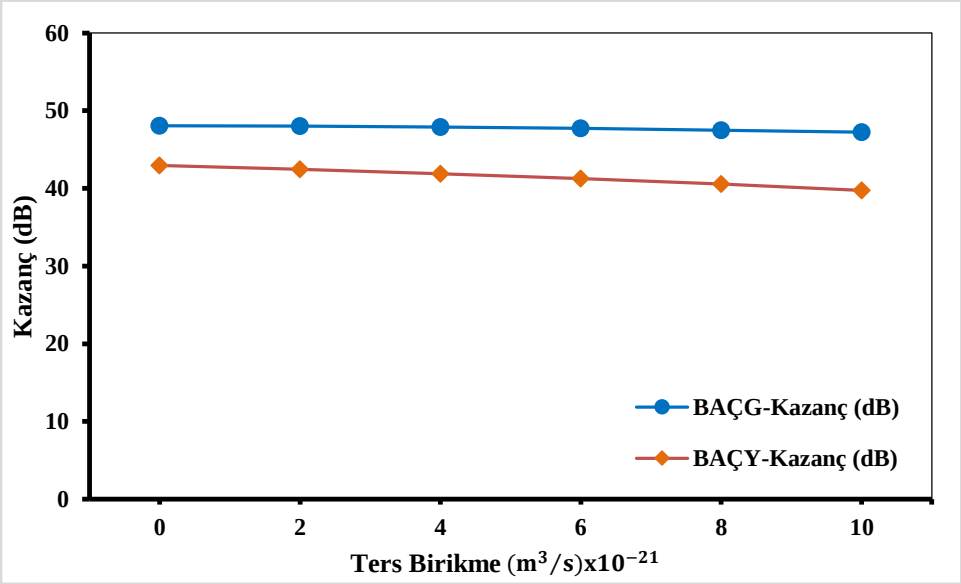
Şekil 6.16. İyon yoğunluğuna karşı GF değişimi

6.2.5. Ters birikme katsayısı analizleri ve karşılaştırılması

İdeal bir yükseltme işleminde, soğrulan her pompa fotonu, sinyali güçlendirmek için gereken popülasyon inversiyonuna katkıda bulunmalıdır. Bununla birlikte ters birikme, bu verimliliği düşürebilir. Zaten uyarılmış durumda olan bir iyonun, ya başka bir pompa fotonunu soğurarak ya da komşu bir uyarılmış iyondan enerji transferi yoluyla ek enerji kazandığında meydana gelir. Sinyalin uyarılmış yayılımına katkıda bulunmak yerine, iyon, yükseltme işlemiyle ilgisi olmayan daha yüksek bir enerji seviyesine itilir. Bu da, pompa enerjisini etkili bir şekilde kullanmamasına yol açar ve mevcut popülasyon inversiyonunu tüketerek optik kazançta azalmaya yol açar. Daha yüksek seviyelerden sonraki bozunma

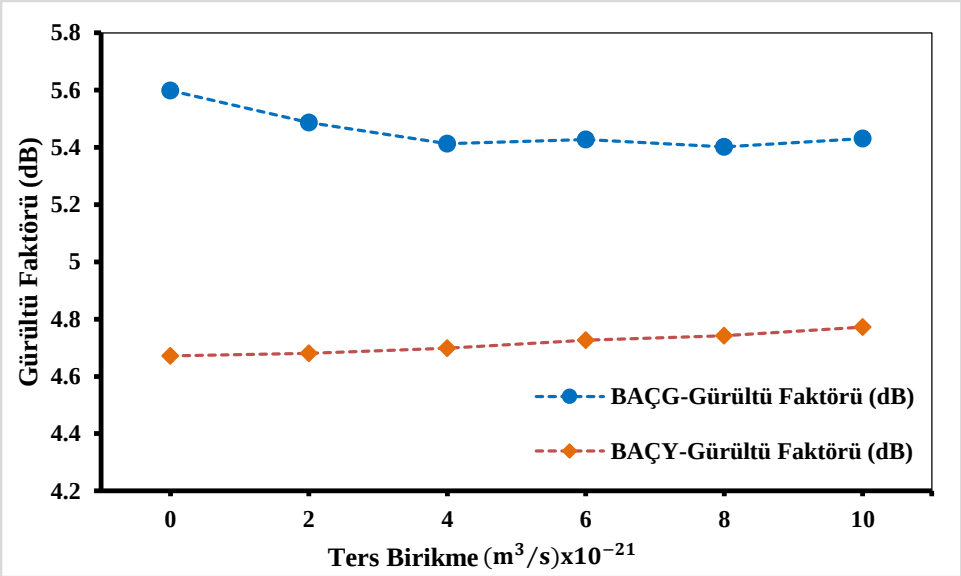
genellikle ışımasız geçişler yoluyla gerçekleşir. Bu da ısı üretmesine sebep olur ve yükselteç verimini düşürür.

İki yükseltecin ters birikme katsayısına karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Ters birikme katsayısı parametre aralığı $0x10^{-21}$–$1x10^{-21}$ m^3/s ve $0{,}2x10^{-21}$ m^3/s adım aralığında artırılmıştır. Her iki yükselteç tipi için de optimum ters birikme katsayısı etkisi, $0{,}2x10^{-21}$ m^3/s civarında elde edilmiştir. Yükselteçlerde ters birikme arttıkça, kazançta azalmaya başlamıştır.



Şekil 6.17. Ters birikme katsayısına karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin ters birikme katsayısına karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.18'de gösterilmiştir. BAÇG-PKFY konfigürasyonu BAÇY-PKFY konfigürasyonuna göre ortalama 0,9 dB daha yüksek GF üretmiştir.

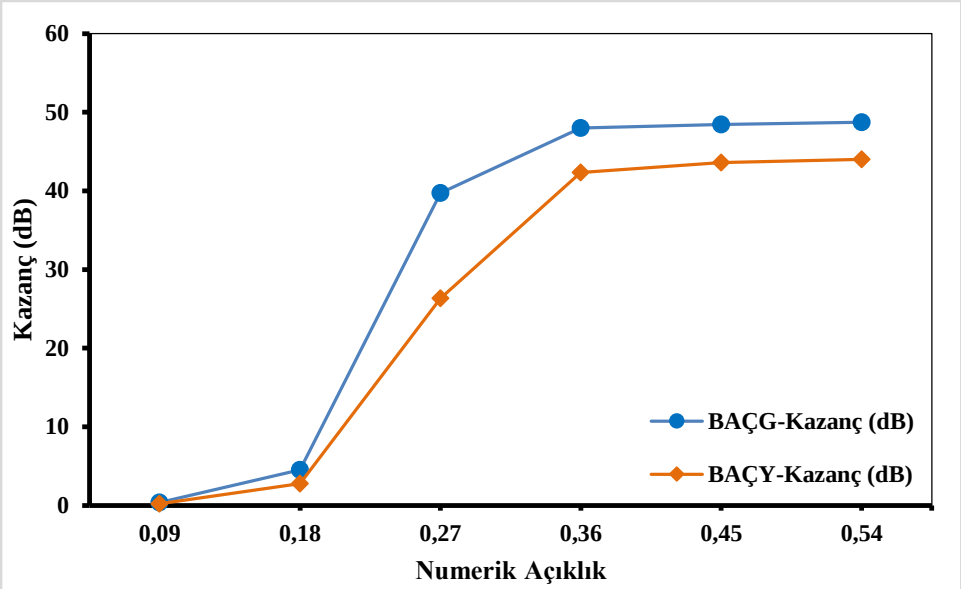


Şekil 6.18. Ters birikme katsayısına karşı GF değişimi

6.2.6. Numerik açıklık analizleri ve karşılaştırılması

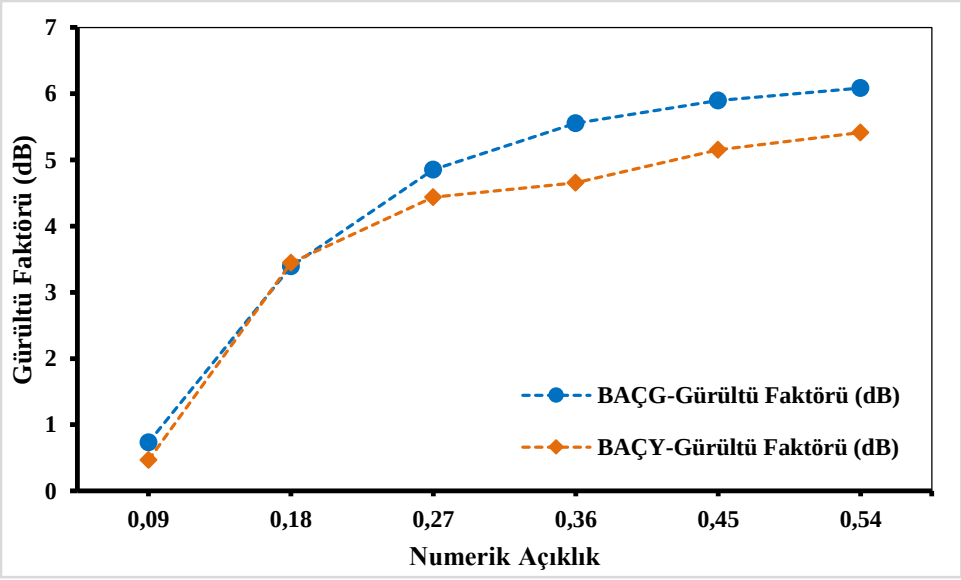
Numerik açıklık, bir fiberin ışığı ne kadar iyi yakalayıp tutabildiğini gösterir. Yüksek bir numerik açıklık, geniş bir kabul açısı sağlayarak verimli pompa gücü uygulanmasına ve ışığın çekirdek içinde sıkıştırmasına olanak tanır. Bu da katkı iyonlarıyla etkileşimi artırır ve yüksek optik kazanç sağlar. Buna karşılık, düşük bir numerik açıklık, ışık toplama kapasitesini sınırlar ve daha ışığı zayıf bir şekilde sıkıştırmasından dolayı yükselteç daha az verimli hale getirir ve bükülme kayıpları nedeniyle sinyal sızıntısına karşı savunmasız kalır. Yüksek güç yoğunluğuna ulaşmak ve yüksek performanslı bir yükseltme sürecini sürdürmek için daha yüksek bir numerik açıklığa sahip bir fiber seçmek önemlidir.

İki yükseltecin numerik açıklık değerine karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Numerik açıklık parametre aralığı 0,09 – 0,54 ve 0,09 adım aralığında artırılmıştır. Başlangıçta, numerik açıklığın artması yükselteçlerin kazancında artışa neden olurken, artmaya devam etmesiyle yükselteçler doyuma ulaşmış, daha sonra artmaya devam etmesiyle kazançta azalmaya neden olmuştur. Her iki yükselteç için de optimum numerik açıklık 0,36 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.19. Numerik açıklık değerine karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin numerik açıklık değerine karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Numerik açıklık 0,36 iken, iki yükselteç tipi arasında ortalama 0,9 dB'lik GF farkı korunmuştur. Numerik açıklık arttıkça yükselteçlerde GF artışı olmaktadır.

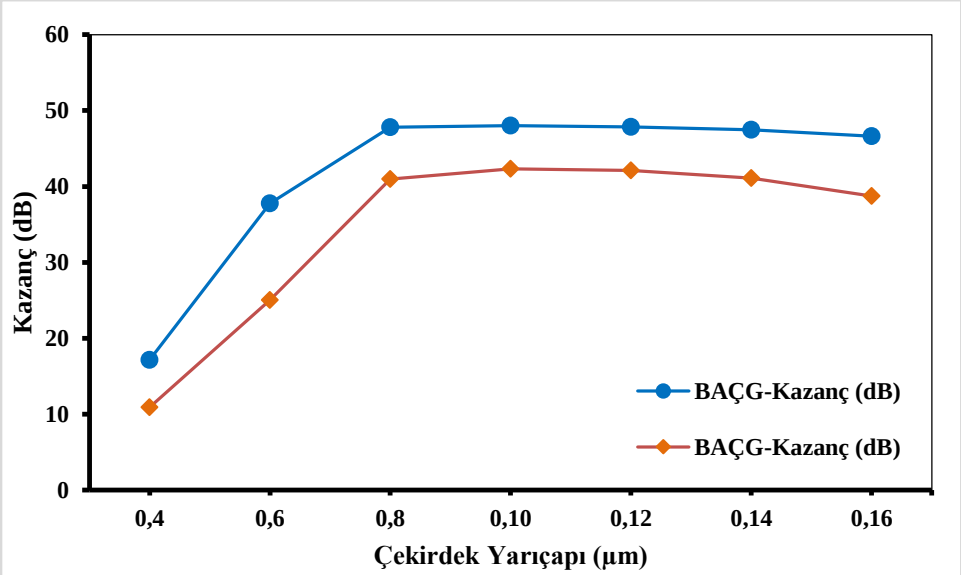


Şekil 6.20. Numerik açıklık değerine karşı GF değişimi

6.2.7. Çekirdek yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması

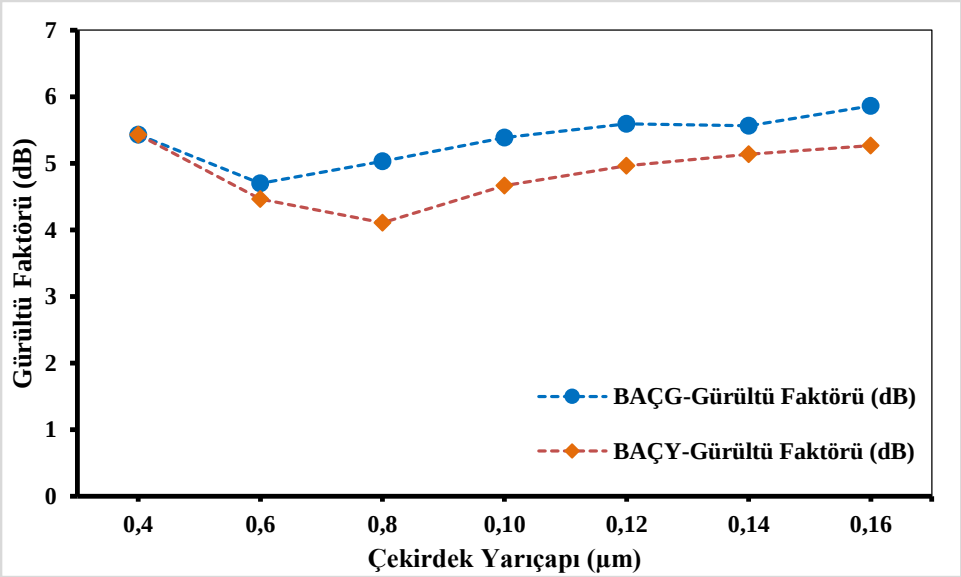
Çekirdek yarıçapı, optik modların yönlendirildiği yüksek kırılma indisi bölgesinin fiziksel sınırını tanımlayan temel bir geometrik parametredir. Fiber yükselteç tasarımında, çekirdek yarıçapı doğrudan mod alan çapını ve optik yoğunluğun uzamsal dağılımını belirler. Daha küçük bir çekirdek yarıçapı daha avantajlıdır çünkü hem pompa hem de sinyal ışığını sıkıca sınırlandırarak optik güç yoğunluğunu artırır. Bu yüksek ışık konsantrasyonu, fotonlar ve aktif iyonlar arasındaki etkileşim olasılığını artırarak birim uzunluk başına daha yüksek bir kazanç sağlar. Bununla birlikte, yükselteç daha yüksek dereceli modların girişimine maruz kalmadan yüksek ışın kalitesini korumasını sağlamak için yarıçapın tek modlu koşulu karşılayacak şekilde optimize edilmesi gerekir.

İki yükseltecin çekirdek yarıçapına karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.21'de gösterilmiştir. Çekirdek yarıçapı parametre aralığı 0,4 – 1,6 µm ve 0,2 µm'lik adım aralığında artırılmıştır. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de optimum çekirdek yarıçapı yaklaşık 1 µm'dir.



Şekil 6.21. Çekirdek yarıçapına karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin çekirdek yarıçapına karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.22'de gösterilmiştir. GF hala korunmakta olup, iki yükselteç konfigürasyonu arasında ortalama 0,9 dB'lik bir fark bulunmaktadır.

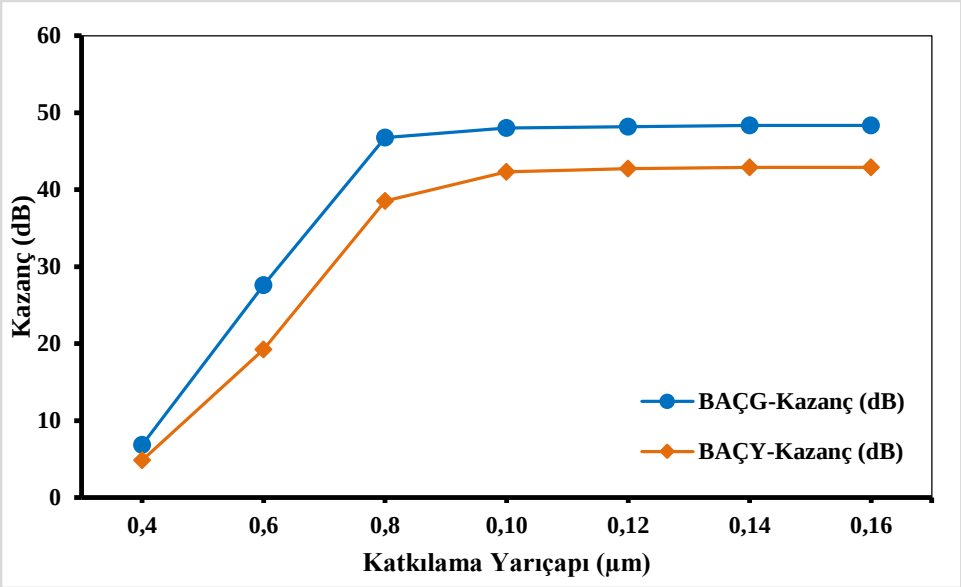


Şekil 6.22. Çekirdek yarıçapına karşı GF değişimi

6.2.8. Katkılama yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması

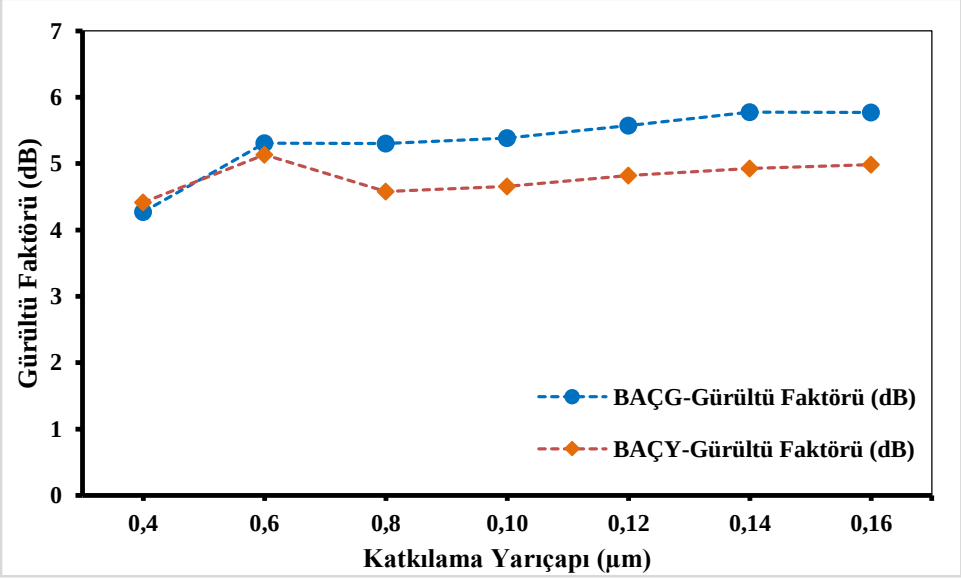
Katkılama yarıçapı, aktif iyonların yerleştirildiği çekirdeğin içindeki belirli alanı ifade eder. Çekirdek boyutuna göre katkılama yarıçapının boyutu, enerji kaybını kontrol etmek için önemlidir. Düşük katkılama yarıçapı, aktif iyonların yalnızca ışığın en yoğun olduğu çekirdeğin merkezine yerleştirilmesini sağlar. Böylelikle tüm iyonların güçlü bir şekilde pompalanmasını sağlayarak sinyalin yeniden soğurumunu önlediği ve verimliliği artırdığı için faydalıdır. Buna karşılık, yüksek bir katkılama yarıçapı iyonları ışığın zayıf olduğu çekirdeğin kenarlarına yakın yerleştirir. Bu kenar iyonları genellikle pompa tarafından tam olarak uyarılmaz. Bundan dolayı sinyali yükseltmek yerine soğurmasına neden olur.

İki yükseltecin katkılama yarıçapına karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.23'te gösterilmiştir. Katkılama yarıçapı parametre aralığı 0,4 – 1,6 µm ve 0,2 µm'lik adım aralığında artırılmıştır. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de optimum katkılama yarıçapı yaklaşık 1 µm'dir.



Şekil 6.23. Katkılama yarıçapına karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin katkılama yarıçapına karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.24'te gösterilmiştir. GF açısından, iki yükseltecin ortalama değerleri başlangıçta birbirine yakındır, ancak katkılama yarıçapı artmaya devam ettikçe fark tekrar yaklaşık 0,9 dB'ye ulaşmaktadır.



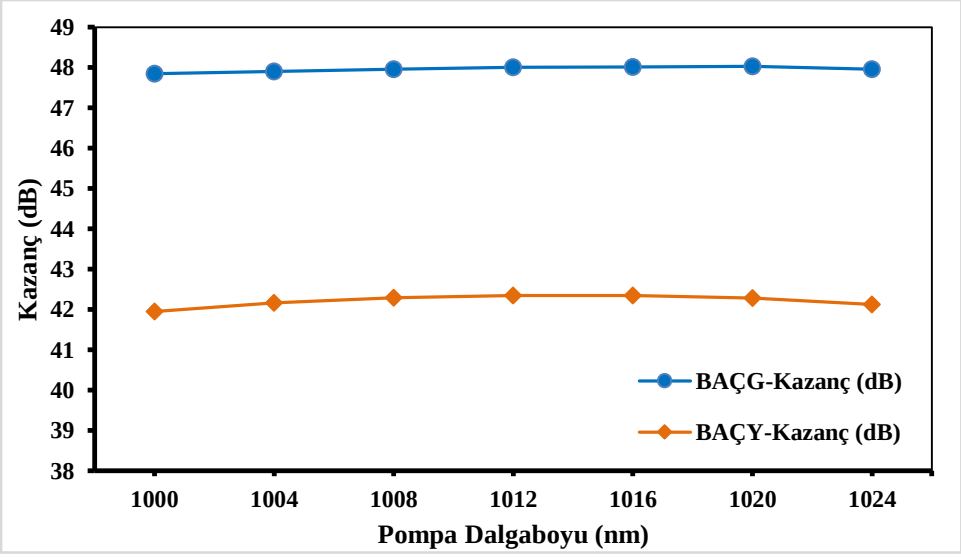
Şekil 6.24. Katkılama yarıçapına karşı GF değişimi

6.2.9. Pompa dalgaboyu analizleri ve karşılaştırılması

Pompa dalgaboyunun, katkı maddesi iyonlarının soğurma kesit tepe noktasıyla hizalanması, verimli popülasyon inversiyonu için gereklidir. İdeal merkezden daha düşük veya daha yüksek dalgaboylarına doğru bir kayma, pompa soğurma oranını azaltarak enerjinin verimli kullanılmamasına ve optik kazançta önemli bir azalmaya neden olur.

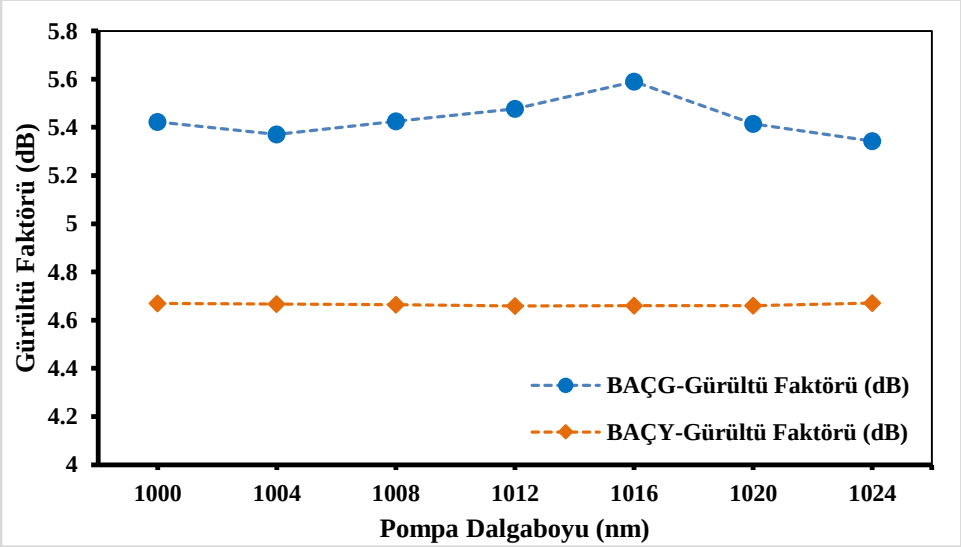
Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, PKFY birçok enerji seviyesinden oluşan bir yapıya sahiptir. Farklı pompa dalgaboyları, bu enerji seviyelerinden farklı seviyelere pompalama yapabilir. Bu nedenle, pompa dalgaboyunun değiştirilmesi kazançta bir değişikliğe neden olur. Özellikle dalgaboyları birbirine yakın seçilirse, her enerji seviyesindeki Stark ayrışmaları nedeniyle pompalama daha düşük Stark seviyelerine gerçekleşir ve aynı enerji seviyesinin alt seviyeleri arasında geçişler gözlemlenir.

İki yükseltecin pompa dalgaboyuna karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.25'de gösterilmiştir. Pompa dalgaboyu parametre aralığı 1000 – 1020 nm ve 4 nm'lik adım aralığında artırılmıştır. Pompa dalgaboyu değişikliği, belirtilen aralık için yükselteçlerdeki kazanç değişiminde önemli bir değişikliğe neden olmaz. BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY konfigürasyonları için optimum pompa dalgaboyları sırasıyla 1016 nm ve 1020 nm civarında elde edilir. BAÇY-PKFY için pompa dalgaboyu 1016 nm iken kazanç 42,3 dB, BAÇG-PKFY için ise pompa dalgaboyu 1020 nm iken 48,0 dB kazanç elde edilir.



Şekil 6.25. Pompa dalgaboyuna karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin pompa dalgaboyuna karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.26'da gösterilmiştir. BAÇG-PKFY konfigürasyonu BAÇY-PKFY konfigürasyonuna göre 0,7 dB daha fazla GF üretir. BAÇG-PKFY sisteminde, aynadan geri dönen ve tekrar fiberden geçen ışık nedeniyle kazanç daha yüksektir, ancak buna bağlı olarak gürültü seviyesi de artar.

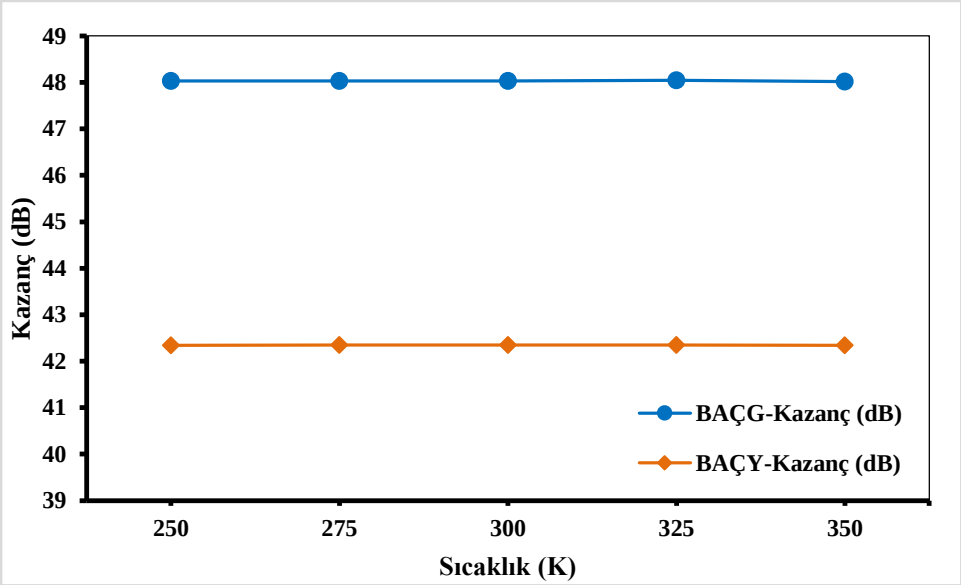


Şekil 6.26. Pompa dalgaboyuna karşı GF değişimi

6.2.10. Sıcaklık analizleri ve karşılaştırılması

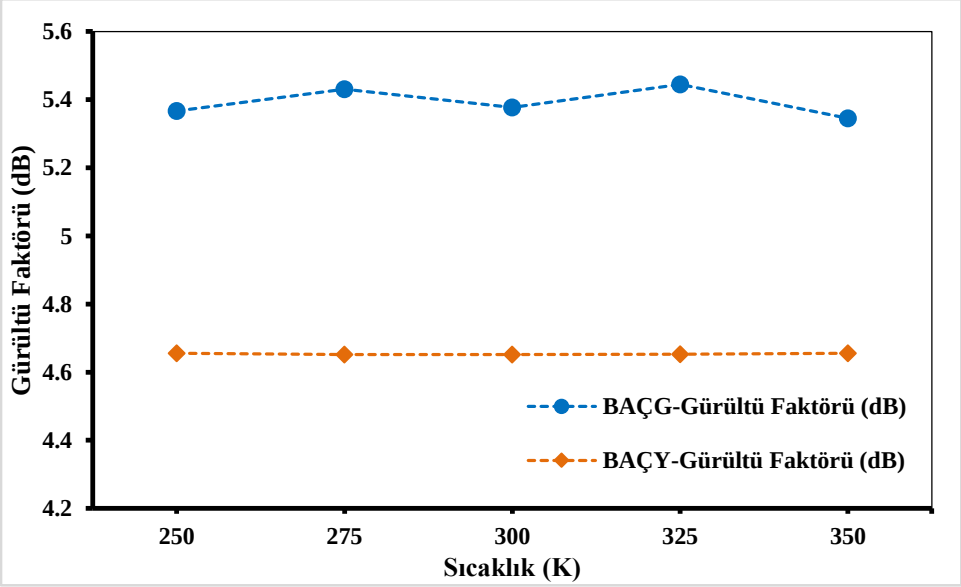
Daha yüksek çalışma sıcaklıkları, enerji seviyelerinin termal genişlemesine neden olur ve uyarılmış durumdaki iyonları azaltan ve tepe kazancını düşüren ışımasız relaksasyon oranlarını artırır. Daha düşük sıcaklıklarda ise termal gürültüyü en aza indirir ve tipik olarak iyonların üst durum ömrünü uzatarak, daha düşük enerji durumlarının bastırılmış termal uyarımı nedeniyle daha iyi kazanç kararlılığı ve daha düşük gürültü oranı sağlar.

İki yükseltecin sıcaklık değişimine karşı kazanç değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Sıcaklık parametre aralığı 250 – 350 K ve 25 K adım aralığında artırılmıştır. Her iki yükselteç konfigürasyonu için sıcaklık değişimi, belirtilen aralıkta kazanç ve GF üzerinde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır.



Şekil 6.27. Sıcaklık değişimine karşı kazanç değişimi

İki yükseltecin sıcaklık değişimine karşı GF değişimi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.28'de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık koşullarında, PKFY'lerdeki popülasyon inversiyonu azalması kazançta bir düşüşe neden olurken, aynı zamanda termal etkilerden kaynaklanan KYY'deki artış GF'de bir artışa neden olur. Bununla birlikte, bu değişikliklerin etkisi oldukça sınırlıdır. Her iki konfigürasyonun sıcaklığa karşı performansı incelenmiş ve kazanç ve GF değişikliklerinin pratik uygulamalar açısından ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir.

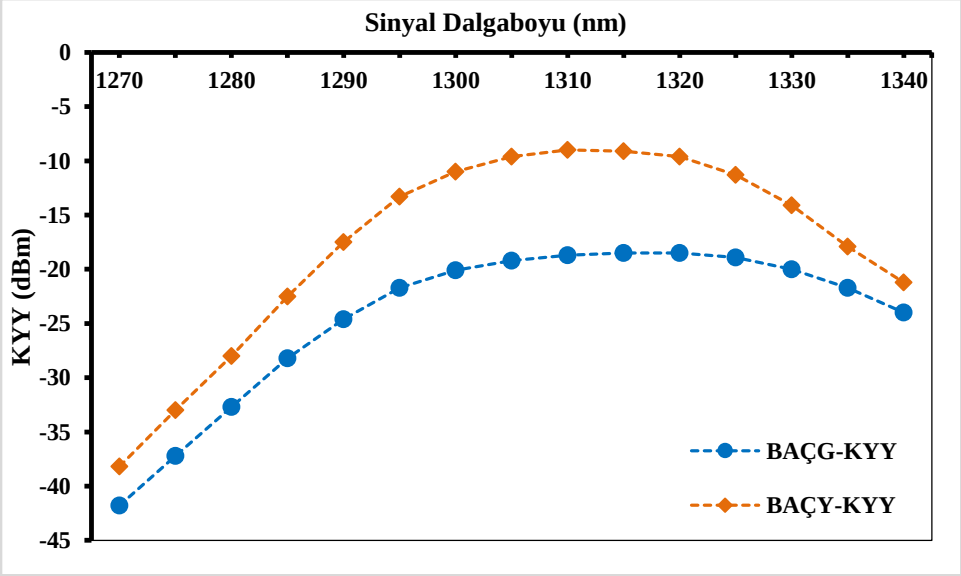


Şekil 6.28. Sıcaklık değişimine karşı GF değişimi

6.2.11. Kendiliğinden yükseltilmiş yayılım analizleri ve karşılaştırılması

KYY gürültü gücü iki yönde de yayılır. İleri yönde yayılan bileşene P^{+}_{KYY}, geri yönde yayılan bileşene ise P^{-}_{KYY} denir. Çizelge 6.2'de elde edilen optimum parametre değerleri için her iki yükselteç konfigürasyonunun KYY gürültü gücü bakımından karşılaştırılması Şekil 6.29'da gösterilmiştir. Her iki yükselteç konfigürasyonunda KYY, her iki yönde de eş zamanlı olarak yayılır.

BAÇG-PKFY konfigürasyonunda, aynadan yansıyan KYY hem ileri hem de geri yönlerde hareket eder ve yansıyarak kazanç ortamına yeniden girer. Böylece KYY'nin her seferinde birden fazla geçiş yapılarak yükseltilmesine neden olur. Her geçişte hem sinyal hem de KYY yükseltilir. Ayna kullanımı nedeniyle, KYY bileşenleri geri döner ve kazanç ortamına yeniden girerek üstel olarak artar. KYY tam geri besleme olmadığı için KYY'nin yeniden yükseltilmesi sınırlıdır. BAÇG-PKFY konfigürasyonunda ise, KYY kontrolü daha sınırlıdır. Bu nedenle sistem yüksek kazanç için optimize edilmiştir ve bu yapı daha yüksek kazanç sağlar. Öte yandan, BAÇY-PKFY sisteminde bir geçişli yükselteç olduğundan, KYY kontrolü daha etkili bir şekilde sağlanabilir. Bu da KYY'yi azaltmak için kazancın düşürülmesine neden olur.



Şekil 6.29. Sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişimi

6.2.12. Pompa dönüşüm verimliliği karşılaştırılması

Pompa lazeri, Praseodimyum iyonlarının sürekli ters birikmesini sağlayarak verimli bir şekilde uyarılmış yayılıma ve sinyal yükseltmesine olanak tanır. Pompa lazerinin gücü ve verimliliği, PKFY'nin genel yükseltme verimliliğini doğrudan etkiler. İyi tasarlanmış bir pompa sistemi, gürültü oranını en aza indirirken sinyal yükseltmesini artırır. Bu çalışmada PDV, pompa lazer gücünün sinyale verimli aktarımını ifade eden bir parametre olarak hesaplanmıştır. Optik yükselteçlerde, PDV terimi lazer verimliliğine tercih edilir. Bu bağlamda PDV, pompa lazer gücünün optik yükseltmeye aktarımını niceliksel olarak değerlendirmek için kullanılır. NTEKFY'ler için PDV matematiksel olarak şu şekilde tanımlanabilir [27]:

$$\text{PDV}\ (\%) = \frac{P_{s_{out}} - P_{s_{in}}}{P_p} \tag{6.1}$$

PDV, Çizelge 6.2'de elde edilen optimum parametre değerleriyle her iki yükselteç konfigürasyonu için de hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2. Optimize edilmiş parametre değerleri

Parametre	BAÇY-PKFY	BAÇG-PKFY
Sinyal dalgaboyu (nm)	1310	1310
PKF uzunluğu (m)	11	6
Sinyal gücü (dBm)	-20	-30
Toplam pompa gücü (mW)	800	800
İyon yoğunluğu (m^{-3})	$15x10^{24}$	$20x10^{24}$
Ters birikme katsayısı (m^3/s)	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	0,364	0,364
Çekirdek yarıçapı (μm)	1	1
Katkılama yarıçapı (μm)	1	1
Pompa dalgaboyu (nm)	1016	1020
Sıcaklık (K)	300	300

Elde edilen sonuçlar BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY konfigürasyonları için PDV değerleri sırasıyla %45,4 ve %65,3 olarak elde edilmiştir. BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY konfigürasyonları Çizelge 6.3'te literatür ile karşılaştırılmıştır.

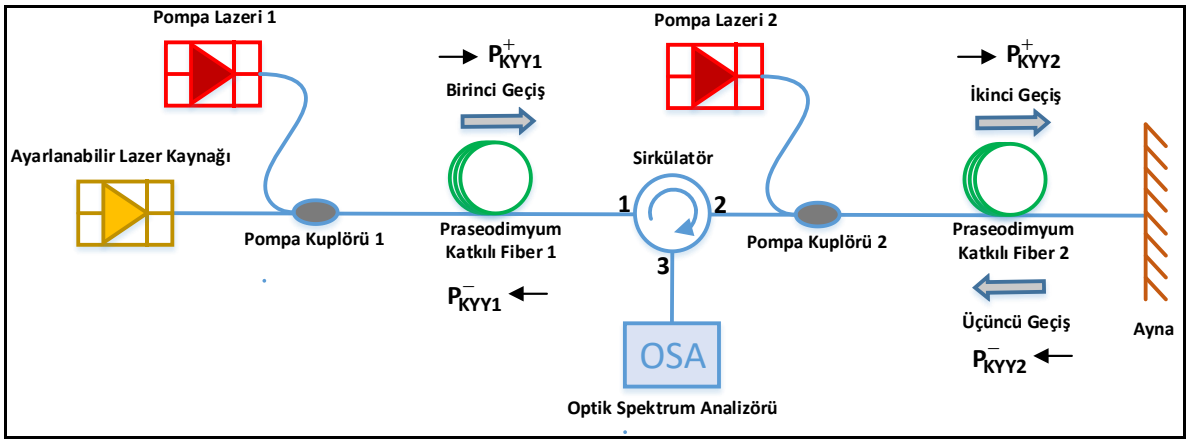
Çizelge 6.3. Yapılan son çalışmalar ile karşılaştırma

Çalışma	[28]	[33]	[132]	Mevcut Çalışma	Mevcut Çalışma
Konfigürasyon Türü	İAÇG-PKFY	BAÇY-PKFY	BAÇY-PKFY	BAÇY-PKFY	BAÇG-PKFY
Sinyal dalgaboyu (nm)	1300	1310	1312	1310	1310
PKF uzunluğu (her bir aşama) (m)	1,5	15	27	11	6
Toplam pompa gücü (mW)	700	3000	700	800	800
İyon yoğonluğu (m^{-3})	$50x10^{24}$	$50x10^{24}$	$3x10^{24}$	$15x10^{24}$	$20x10^{24}$
Ters birikme katsayısı (m^3/s)	-	0	-	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	-	0,34	0.38	0,36	0,36
Çekirdek yarıçapı (µm)	1	1,2	1	1	1
Katkılama yarıçapı (µm)	-	0,8	1	1	1
Pompa dalgaboyu (nm)	1030	1030	1017	1016	1020
Sıcaklık (K)	-	300	-	300	300
PDV (%)	12,8	47	-	45,4	65,3
Kazanç (dB)	34,6	56,4	44.56	42,3	48,0
Gürültü Fktörü (dB)	5,8 (min.)	4,1	4.1 (min.)	5,5	5,7

BAÇY-PKFY konfigürasyonuna alternatif olabilecek BAÇG-PKFY konfigürasyonunun PDV verimi oldukça yüksektir. Literatürdeki son çalışmalarla kıyaslandığında da BAÇG-PKFY konfigürasyonunun daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir.

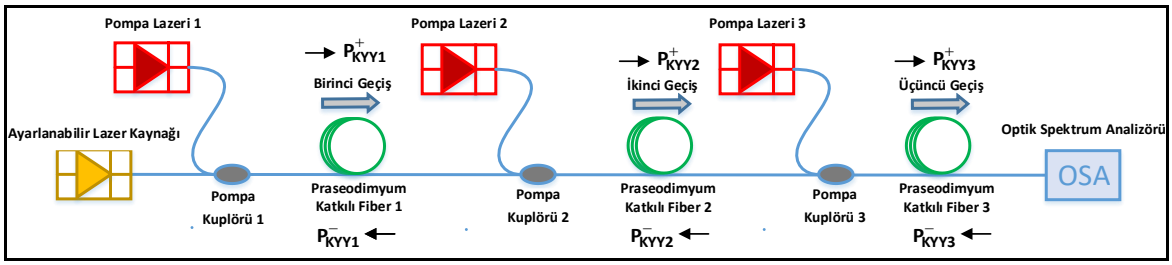
6.3. İki ve Üç Aşamalı Üç Geçişli PKFY Analizleri ve Karşılaştırılması

İAÜG-PKFY konfigürasyonu Şekil 6.30'da gösterilmiştir. ALK ile uygulanan sinyaller ve pompa lazeri 1, pompa kuplörü 1'de birleştirilir ve PKF 1'e uygulanır. Yükseltilmiş sinyaller, optik sirkülatörün 1 numaralı ucundan girip 2 numaralı ucundan çıkan sinyaller ve pompa lazer 2, pompa kuplörü 2'de birleştirilir ve PKF 2'ye uygulanır. Yükseltilmiş sinyaller aynadan yansır, tekrar PKF 2'den geçer, sirkülatörün 2 numaralı ucundan girer, 3 numaralı ucundan çıkar ve OSA'ya ulaşır. Böylece, İAÜG-PKFY kurulumu tamamlanır.



Şekil 6.30. İki aşamalı üç geçişli PKFY konfigürasyonu

ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu Şekil 6.31'de gösterilmiştir. ALK ile uygulanan sinyaller ve pompa lazeri 1, pompa kuplörü 1'de birleştirilerek PKF 1'e uygulanır. Yükseltilmiş sinyaller ve pompa lazer 2, pompa kuplörü 2'de birleştirilerek PKF 2'ye uygulanır. Yeniden yükseltilmiş sinyaller ve pompa lazeri 3, pompa kuplörü 3'te birleştirilerek PKF 3'e uygulanır ve yükseltilmiş sinyaller OSA'ya ulaşır. Böylece ÜAÜG-PKFA kurulumu tamamlanır.

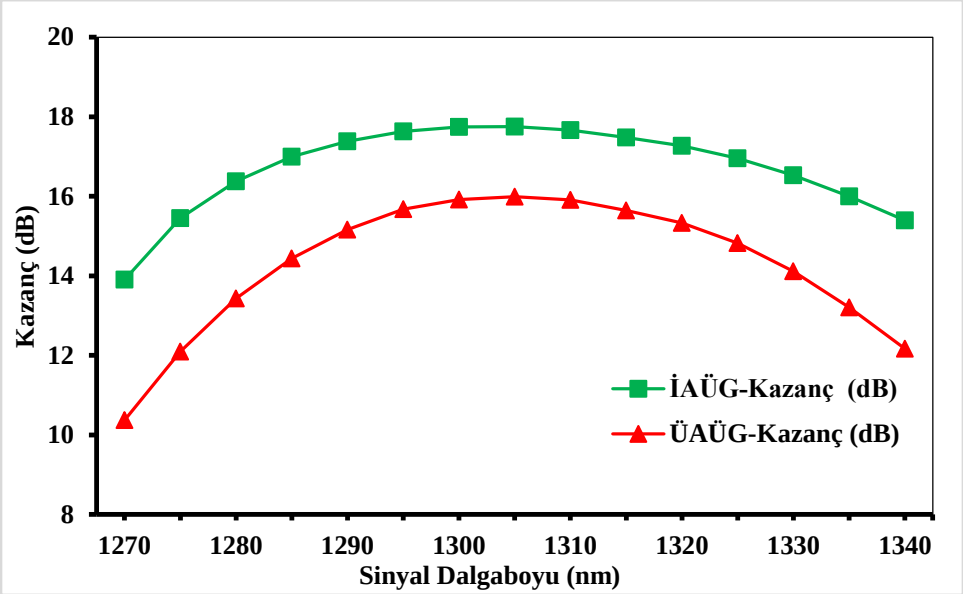


Şekil 6.31. Üç aşamalı üç geçişli PKFY konfigürasyonu

Sonuçları gözlemlemek ve analiz etmek için DBÇ analizörü ve OSA kullanılmıştır. P^{+}_{KYY}, ileri yönde yayılan KYY gürültü gücüdür. P^{-}_{KYY}, geri yönde yayılan KYY gürültü gücüdür.

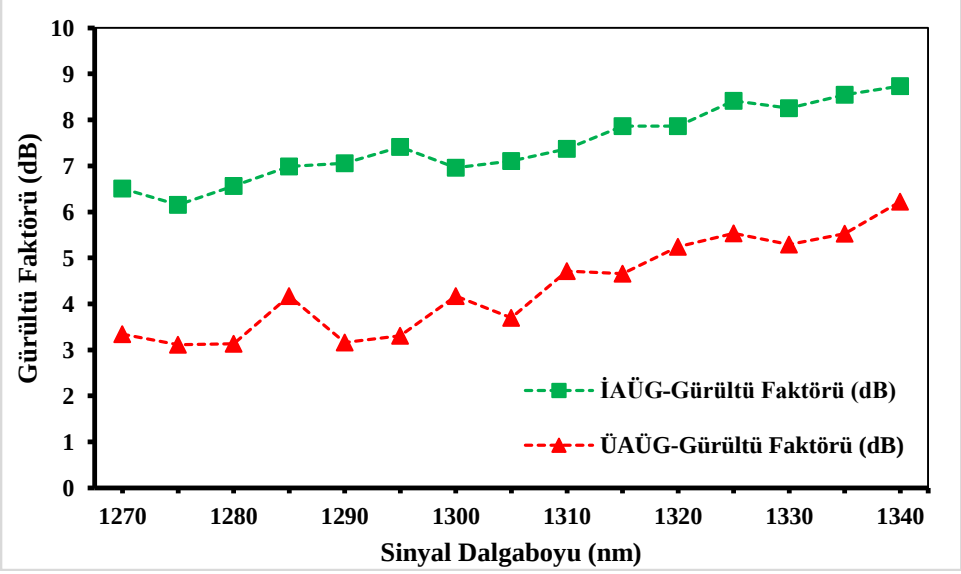
Çizelge 6.1'de parametre başlangıç değerleri iki yükselteç konfigürasyonu için belirlenmiştir. İki yükselteç için bu değerler kullanılarak yapılan kazanç spektrumu analizi sonuçları, dalgaboyuna karşı kazanç değişimi Şekil 6.32'de ve dalgaboyuna karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.33'te gösterilmiştir. Başlangıçta sinyal dalgaboyunun artması yükselteçlerde kazancı artırmış, artmaya devam etmesiyle yükselteçler 1300 nm dalgaboyu civarında doyuma gitmiş ve daha sonra kazançlarında düşüşe sebep olmuştur. İki yükselteç

kazanç bakımından karşılaştırıldığında İAÜG-PKFY konfigürasyonunun ÜAÜG-PKFY sisteminden 1,8 dB daha yüksek kazanç elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.32. Sinyal dalgaboyuna karşı kazanç değişimi

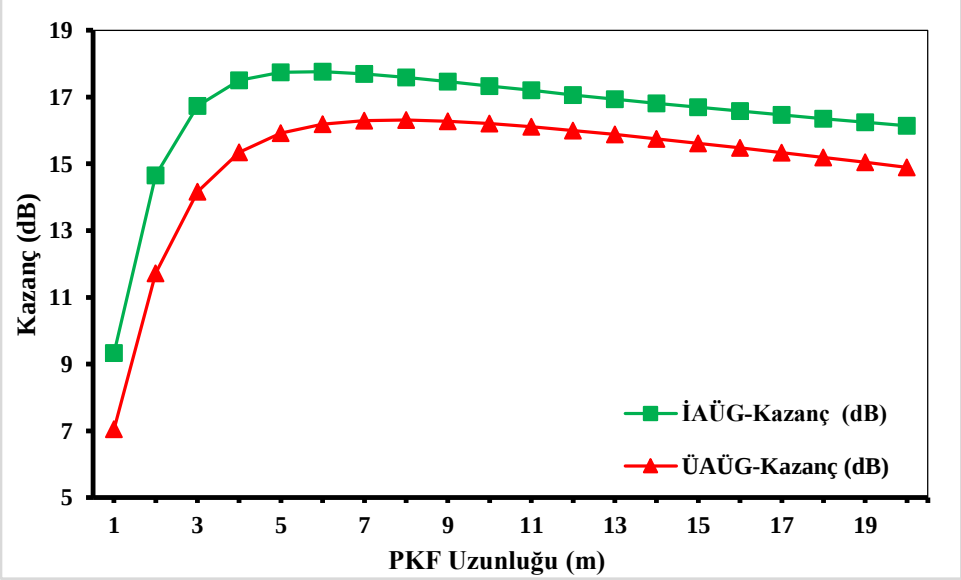
Optimum kazanç, 1300 nm sinyal dalgaboyu civarında elde edilmiştir. İki yükseltecin karşılaştırılmasında kullanılacak sinyal dalgaboyu 1300 nm olarak belirlenmiştir. ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu 1300 nm dalgaboyu için İAÜG-PKFY konfigürasyonundan yaklaşık 2.8 dB daha düşük GF üretmiştir.



Şekil 6.33. Sinyal dalgaboyuna karşı GF değişimi

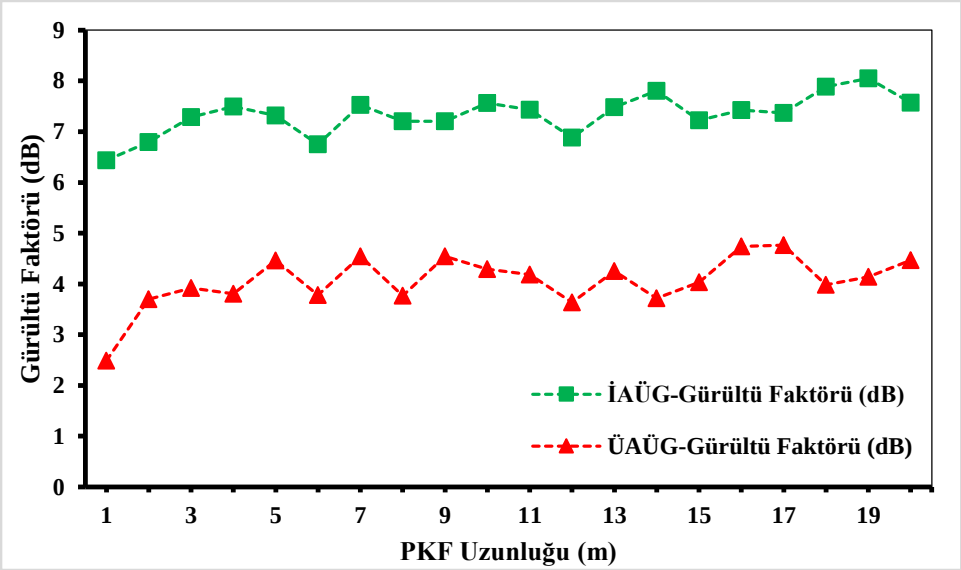
6.3.1. Praseodimyum katkılı fiber uzunluğu analizleri ve karşılaştırılması

Başlangıçta, Çizelge 6.1'deki parametre değerleri belirlenmiştir. Farklı PKF uzunluğu analizleri için, parametre aralığı 1 – 20 m ve 1 m adım aralığında artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi Şekil 6.34'te gösterilmiştir. Burada, PKF uzunluğundaki artış başlangıçta iki yükseltecin kazancında bir artışa neden olmuştur ve artmaya devam ettikçe yükselteçler doyuma ulaşmıştır ve ardından kazançta bir azalmaya neden olmuştur. Optimum PKF uzunluğu, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY için sırasıyla yaklaşık 5 m ve 7 m olarak elde edilmiştir. İAÜG-PKFY için, PKF uzunluğu 5 m olduğunda, yükselteç kazancı 17,7 dB olarak elde edilir. ÜAÜG-PFKY için, PKF uzunluğu 7 m olduğunda, yükselteç kazancı 16,3 dB olarak elde edilmiştir. Kazanç açısından İAÜG-PKFY daha iyi performans göstermiştir ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyondan PKF uzunluğu 2 m daha az olduğunda optimum kazanç elde edilmiştir.



Şekil 6.34. PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi karşılaştırılması

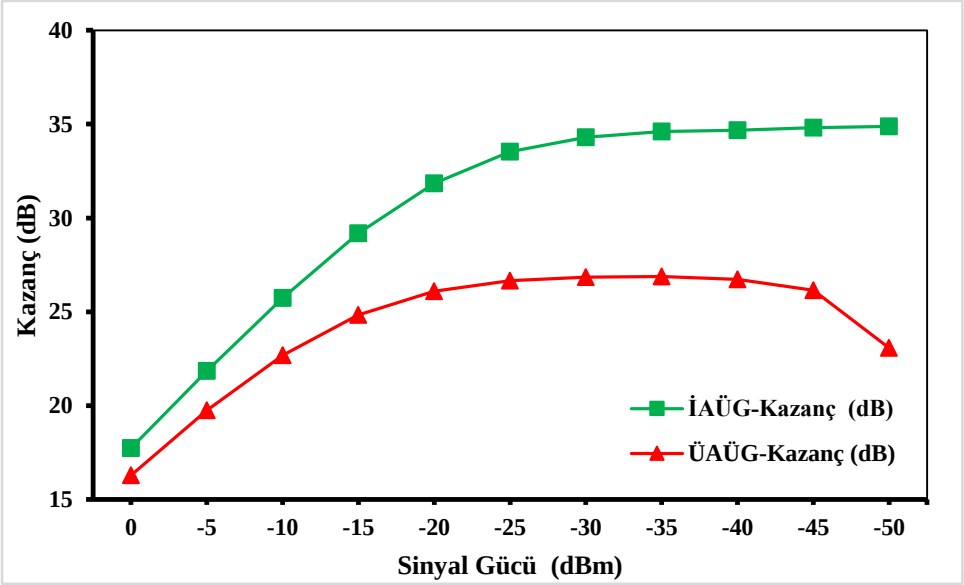
PKF uzunluğuna karşı GF değişimi Şekil 6.35'te gösterilmiştir. İAÜG-PKFY için 7 dB ve ÜAÜG-PKFY için 4 dB civarındadır. ÜAÜG-PKFY daha düşük GF üretmiştir.



Şekil 6.35. PKF uzunluğuna karşı GF değişimi

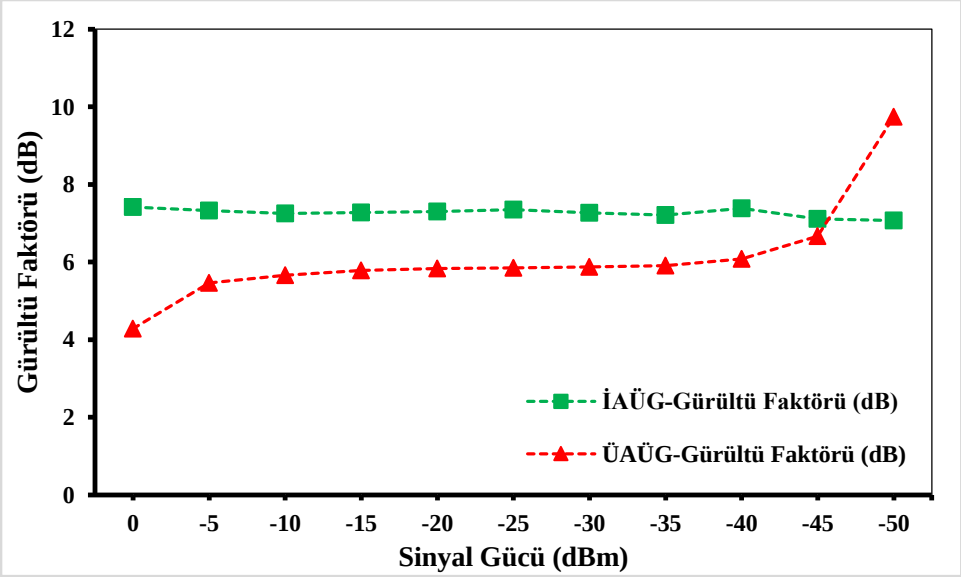
6.3.2. Sinyal gücü analizleri ve karşılaştırılması

Sinyal gücü parametre aralığı 0 – (-50) dBm ve -5 dBm adım aralığında artırılmıştır. İki yükseltecin sinyal gücüne karşı kazanç değişimi karşılaştırılması Şekil 6.36'da gösterilmiştir. Başlangıçta, sinyal gücündeki artış yükselteçlerdeki kazancı artırır ve artmaya devam etmesiyle yükselteçler doyuma ulaşır ve ardından kazançlarında bir azalmaya neden olur. Optimum sinyal gücü, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonları için sırasıyla -35 dBm ve -30 dBm'de elde edilir. İAÜG-PKFY konfigürasyonu için, sinyal gücü -35 dBm olduğunda, yükselteç kazancı 34,6 dB'dir. ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu için, sinyal gücü -30 dBm olduğunda, yükselteç kazancı 26,8 dB'dir.



Şekil 6.36. Sinyal gücüne karşı kazanç değişimi

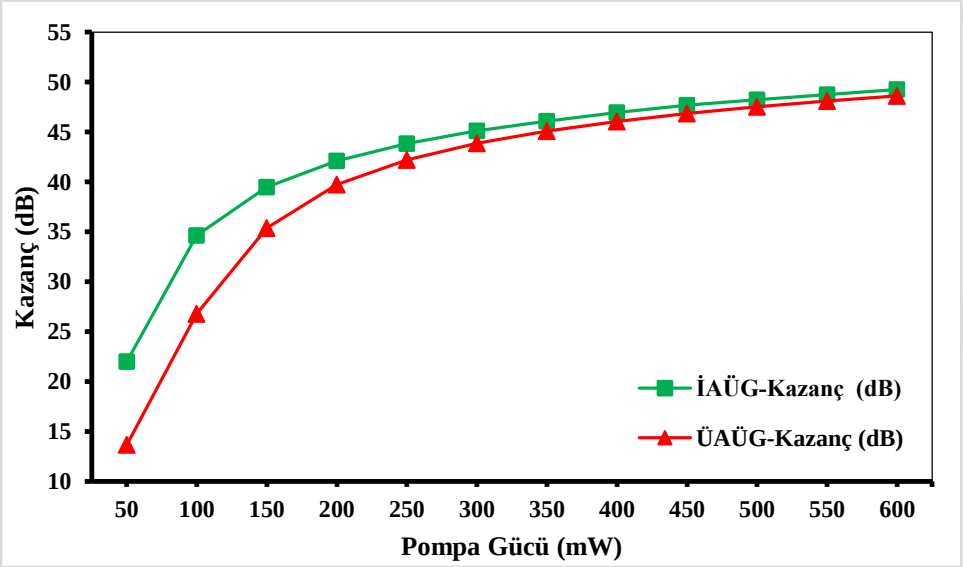
İki yükseltecin sinyal gücüne karşı GF değişimi karşılaştırılması Şekil 6.37'de gösterilmiştir. GF açısından, İAÜG-PKFY konfigürasyonu daha kararlı bir durum göstermektedir. ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu başlangıçta GF düşükken, sinyal gücündeki artışla birlikte GF'de önemli bir artış gözlemlenir.



Şekil 6.37. Sinyal gücüne karşı GF değişimi

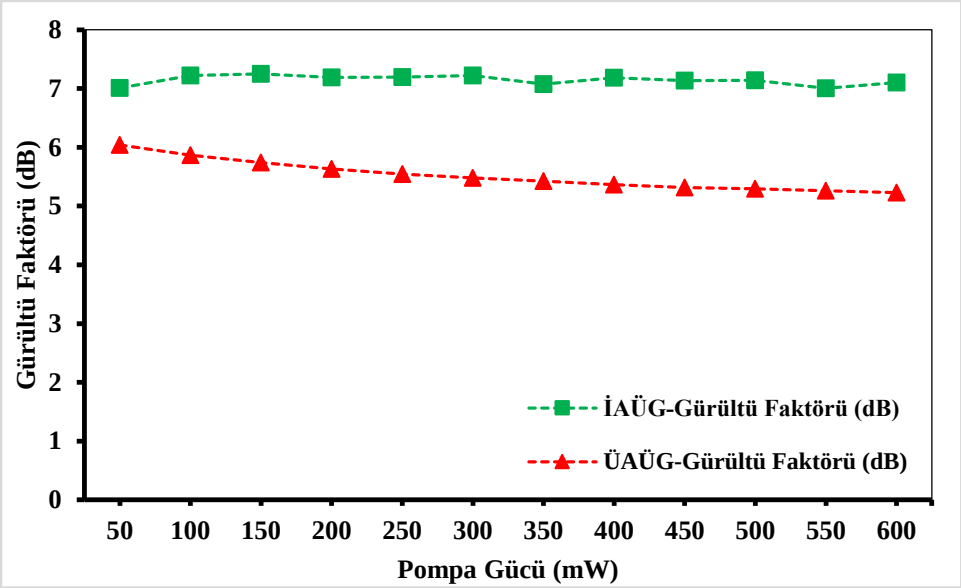
6.3.3. Pompa gücü analizleri ve karşılaştırılması

Toplam pompa gücü parametre aralığı 1000 – 1200 mW ve 100 mW'lık adımlarla artırılmıştır. Toplam pompa gücüne karşı kazanç değişimi sonuçları Şekil 6.38'de gösterilmiştir. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de toplam pompa gücü 1000 mW'a ulaştığında, kazanç verimliliği azalmaya başlar. İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY için optimum toplam pompa gücü 1000 mW olduğunda elde edilir. İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonları için toplam pompa gücü 1000 mW olduğunda, sırasıyla 48,2 dB ve 47,5 dB kazanç elde edilir.



Şekil 6.38. Toplam pompa gücüne karşı kazanç değişimi

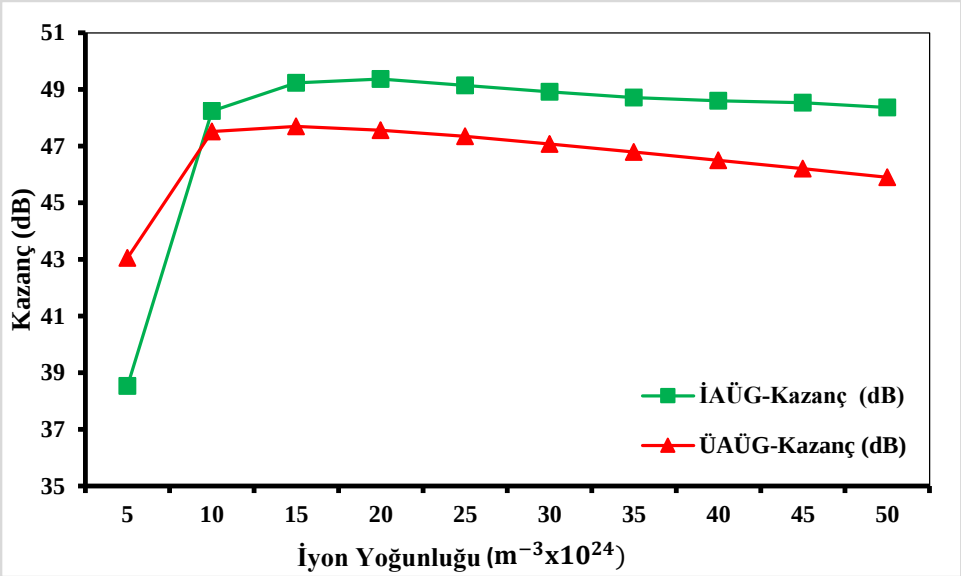
Toplam pompa gücündeki karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.39'da gösterilmiştir. GF için bakıldığında, İAÜG-PFKY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonları için sırasıyla ortalama 7,0 dB ve 5,5 dB olarak GF üretir.



Şekil 6.39. Toplam pompa gücüne karşı GF değişimi

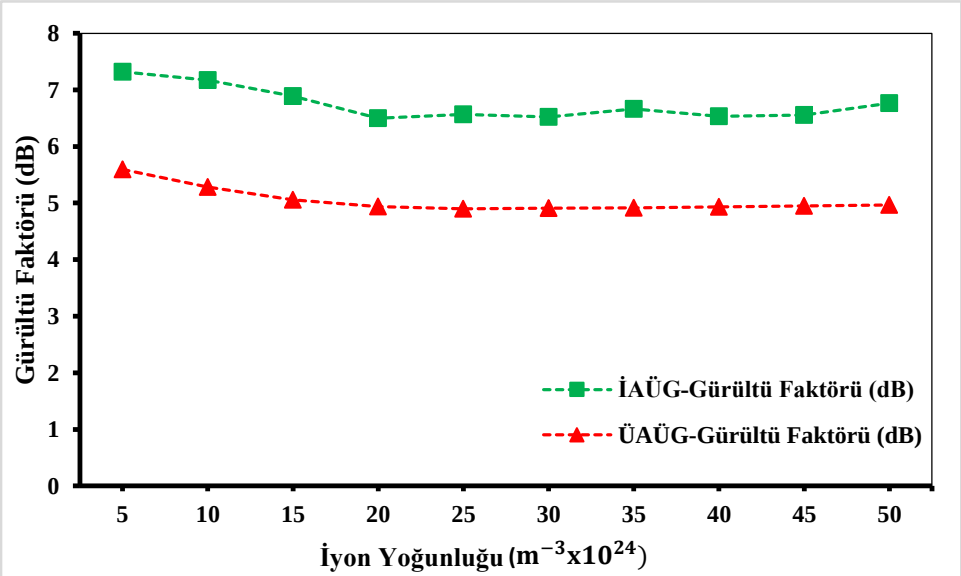
6.3.4. İyon yoğunluğu analizleri ve karşılaştırılması

İyon yoğunluğu parametre aralığı $5x10^{24}$ – $50x10^{24}$ m^{-3} ve $5x10^{24}$ m^{-3} adım aralığında artırılmıştır. İyon yoğunluğuna karşı kazanç değişimi Şekil 6.40'ta gösterilmiştir. Başlangıçta, iyon yoğunluğundaki artış yükselteçlerin kazancında bir artışa neden olur. Ancak yükselteçler doyuma ulaştıktan sonra kazanç azalır. Optimum iyon yoğunluğu, İAÜG-PKFY konfigürasyonu için $20x10^{24}$ m^{-3} ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu için $15x10^{24}$ m^{-3} olduğunda elde edilmiştir. İAÜG-PKFY konfigürasyonu için, iyon yoğunluğu 20 x 10^{24} m^{-3} olduğunda, yükselteç kazancı 49,4 dB'dir. ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu için, iyon yoğunluğu 15 x 10^{24} m^{-3}olduğunda, yükselteç kazancı 47,7 dB'dir.



Şekil 6.40. İyon yoğunluğuna karşı kazanç değişimi

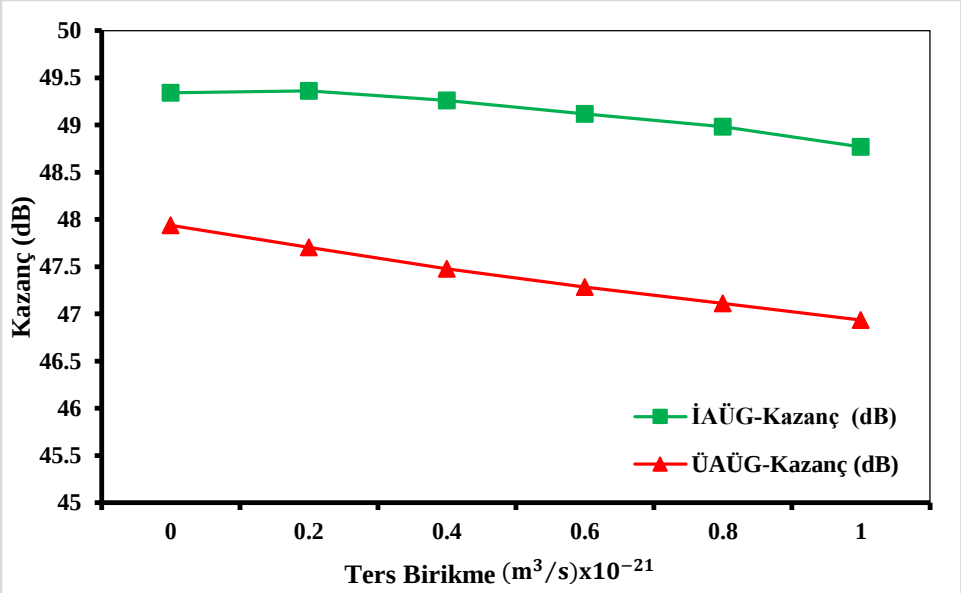
İyon yoğunluğuna karşı GF değişimi Şekil 6.41'de gösterilmiştir. GF açısından, İAÜG-PKFY konfigürasyonu, ÜAÜG-PKFY konfigürasyonuna göre ortalama 1,5 dB daha fazla GF üretmiştir. Yüksek iyon yoğunluğu arttıkça, PKFY sistemlerinde doğrusal olmayan etkiler beklenir. Bu bağlamda, yüksek Praseodimyum konsantrasyonu, hem KYY gürültü gücü hem de iyon kümelenmesi nedeniyle çift kaynaklı sönümlemeye neden olarak PKFY'nin performansını olumsuz etkileyen iyon kümelenmesine neden olur.



Şekil 6.41. İyon yoğunluğuna karşı GF değişimi

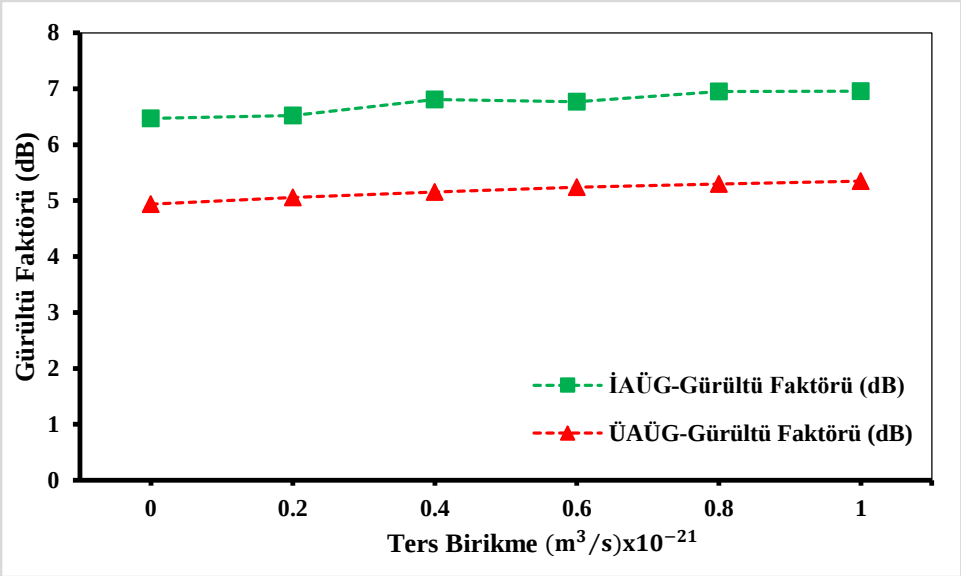
6.3.5. Ters birikme katsayısı analizleri ve karşılaştırılması

Ters birikme katsayısı parametre aralığı $0x10^{-21}$ – $1x10^{-21}$ m^3/s ve $0{,}2x10^{-21}$ m^3/s adım aralığında artırılmıştır. Ters birikme katsayısına karşı kazanç değişimi Şekil 6.42'de gösterilmiştir. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de optimum ters birikme katsayısı etkisi, $0{,}2x10^{-21}$ m^3/s civarında elde edilmiştir. Yükselteçlerde ters birikme katsayısı arttıkça, kazançta azalmaya ve GF'de artışa neden olur.



Şekil 6.42. Ters birikme katsayısına karşı kazanç değişimi

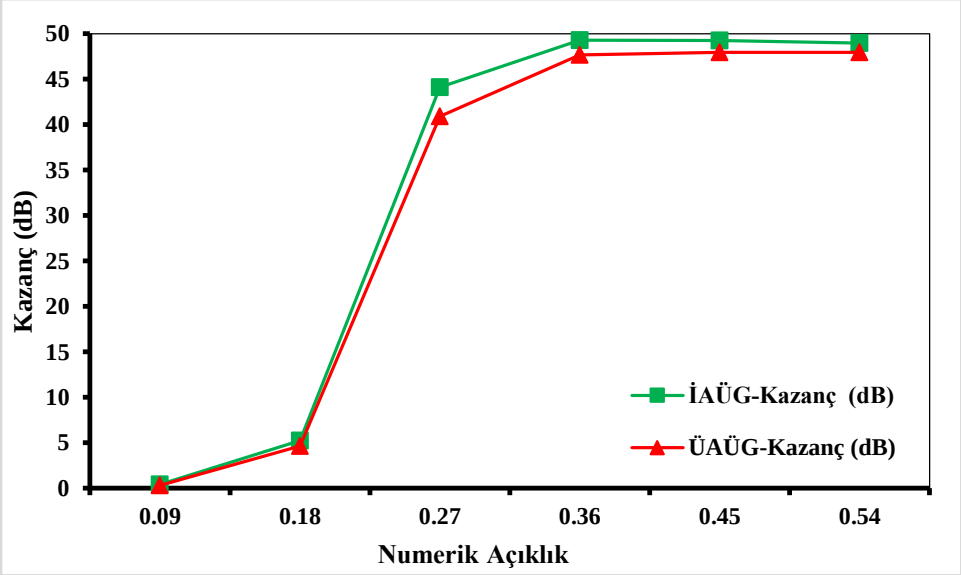
Ters birikme katsayısına karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.43'te gösterilmiştir. İAÜG-PKFY konfigürasyonu, ÜAÜG-PKFY konfigürasyonuna göre ortalama 1,5 dB daha yüksek GF üretir.



Şekil 6.43. Ters birikme katsayısına karşı GF değişimi

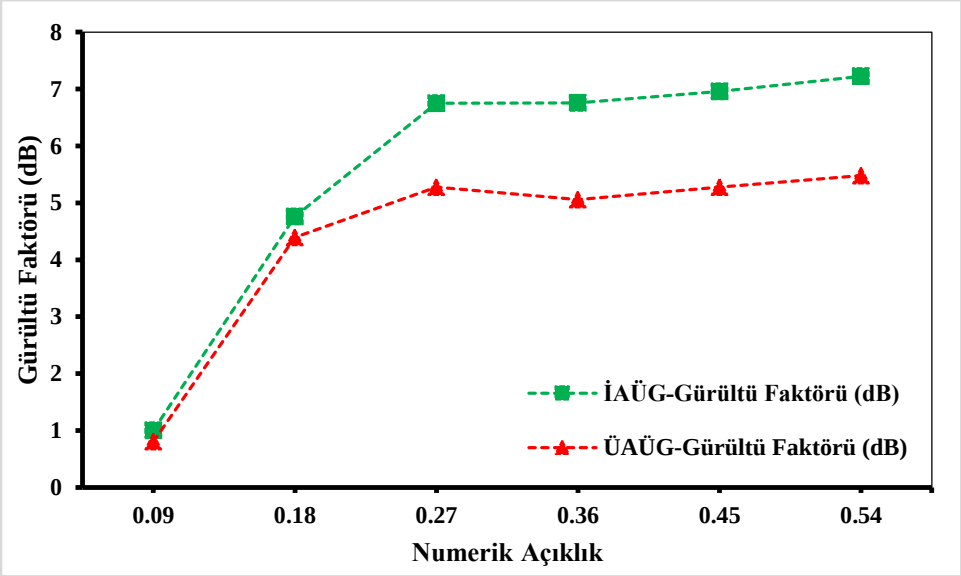
6.3.6. Numerik açıklık analizleri ve karşılaştırılması

Numerik açıklık parametre aralığı 0,09 – 0,54 ve 0,09'luk adımlarla artmaktadır. Numerik açıklık değerine karşı kazanç değişimi sonuçları Şekil 6.44'te gösterilmiştir. Başlangıçta, numerik açıklığın artması yükselteçlerin kazancında artışa neden olurken, artmaya devam etmesiyle doyuma gider. Daha sonra kazançta azalmaya neden olur. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de optimum numerik açıklık 0,36 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.44. Numerik açıklık değerine karşı kazanç değişimi

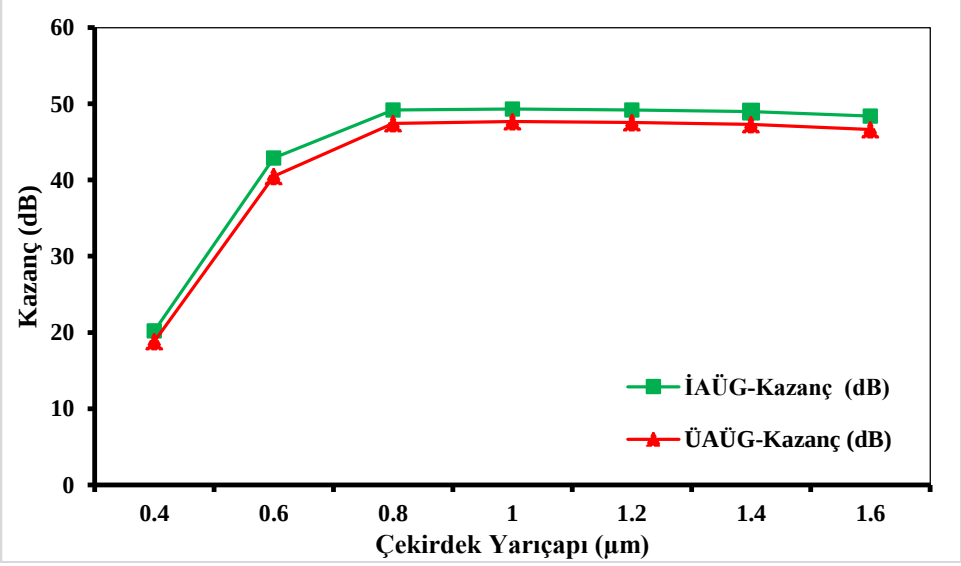
Numerik açıklık değerine karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.45'te gösterilmiştir. GF açısından bakıldığında, iki yükselteç konfigürasyonu arasında ortalama 1,5 dB farkını korur.



Şekil 6.45. Numerik açıklık değerine karşı GF değişimi

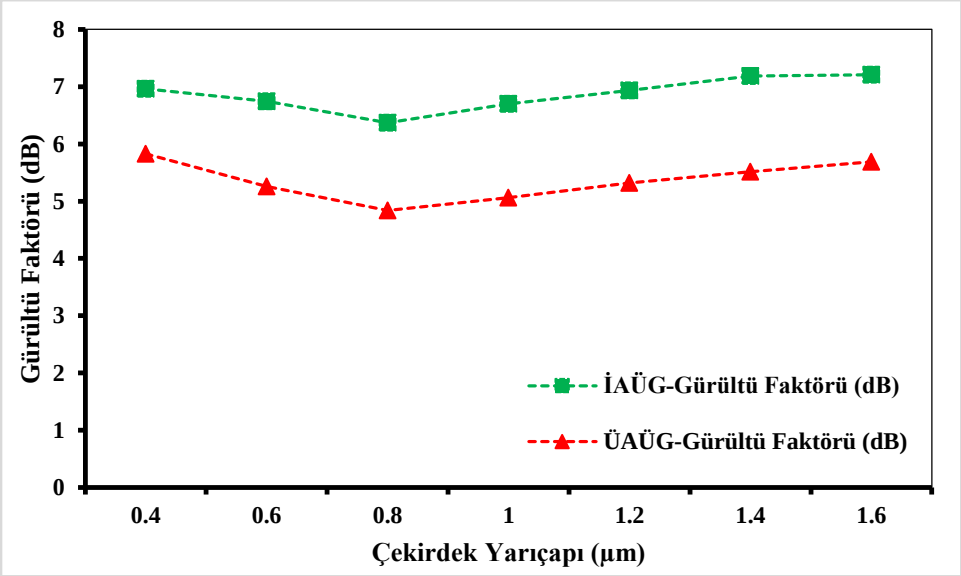
6.3.7. Çekirdek yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması

Çekirdek yarıçapı 0,4 – 1,6 µm aralığında ve 0,2 µm adım aralığında artırılmıştır. Çekirdek yarıçapına karşı kazanç değişimi sonuçları Şekil 6.46'da gösterilmiştir. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de optimum çekirdek yarıçapı yaklaşık 1 µm'dir.



Şekil 6.46. Çekirdek yarıçapına karşı kazanç değişimi

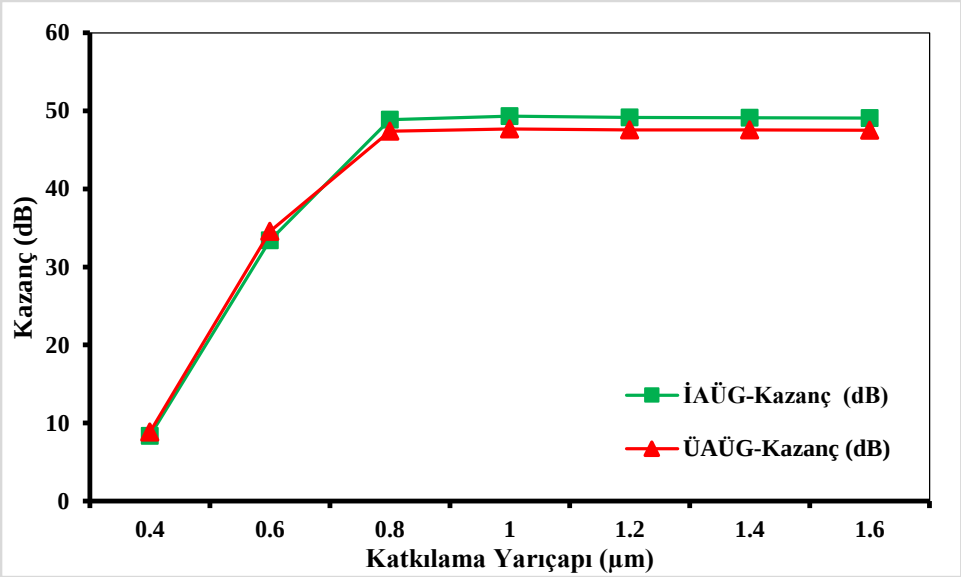
Çekirdek yarıçapına karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.47'de gösterilmiştir. İki yükselteç konfigürasyonu arasındaki GF farkı hala korunmakta olup, bu fark ortalama 1,5 dB'dir.



Şekil 6.47. Çekirdek yarıçapına karşı GF değişimi

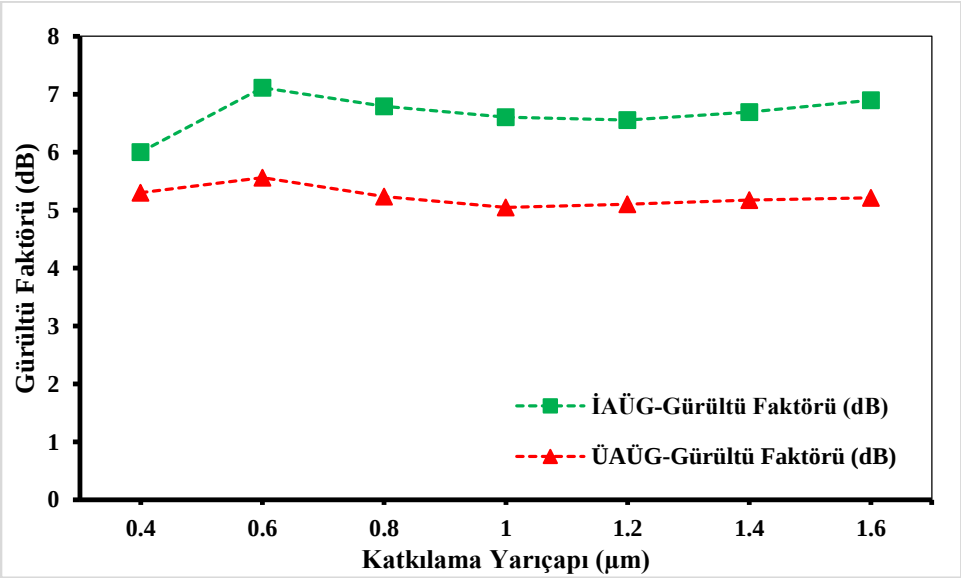
6.3.8. Katkılama yarıçapı analizleri ve karşılaştırılması

Katkılama yarıçapı parametre aralığı 0,4 – 1,6 µm ve 0,2 µm adım aralığında artırılmıştır. Katkılama yarıçapına karşı kazanç değişimi Şekil 6.48'de gösterilmiştir. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de optimum katkılama yarıçapı yaklaşık 1 µm'dir.



Şekil 6.48. Katkılama yarıçapına karşı kazanç değişimi

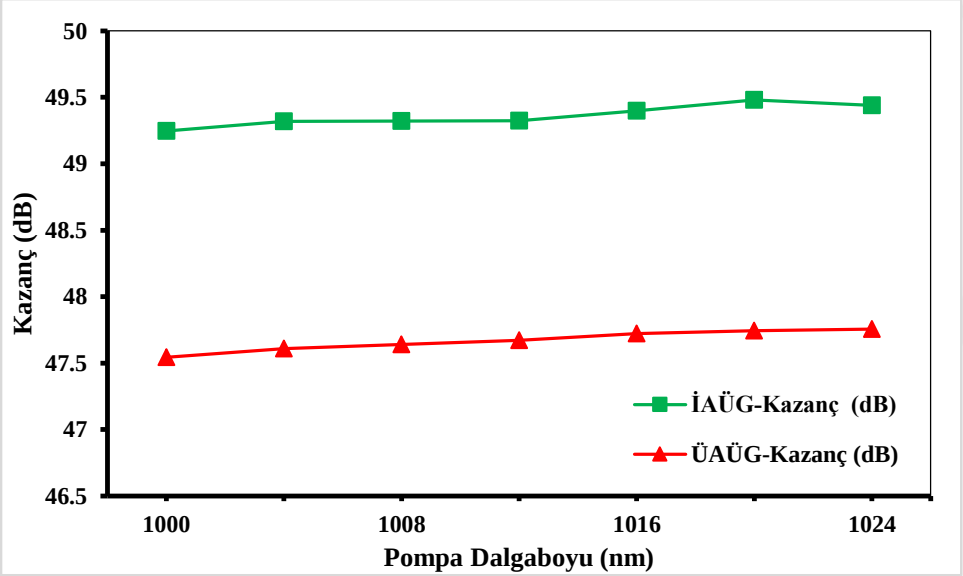
Katkılama yarıçapına karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.49'da gösterilmiştir. GF açısından, iki yükseltecin ortalama değerleri başlangıçta birbirine yakındır. Ancak katkılama yarıçapı artmaya devam ettikçe fark tekrar yaklaşık 1,5 dB'ye ulaşmaktadır.



Şekil 6.49. Katkılama yarıçapına karşı GF değişimi

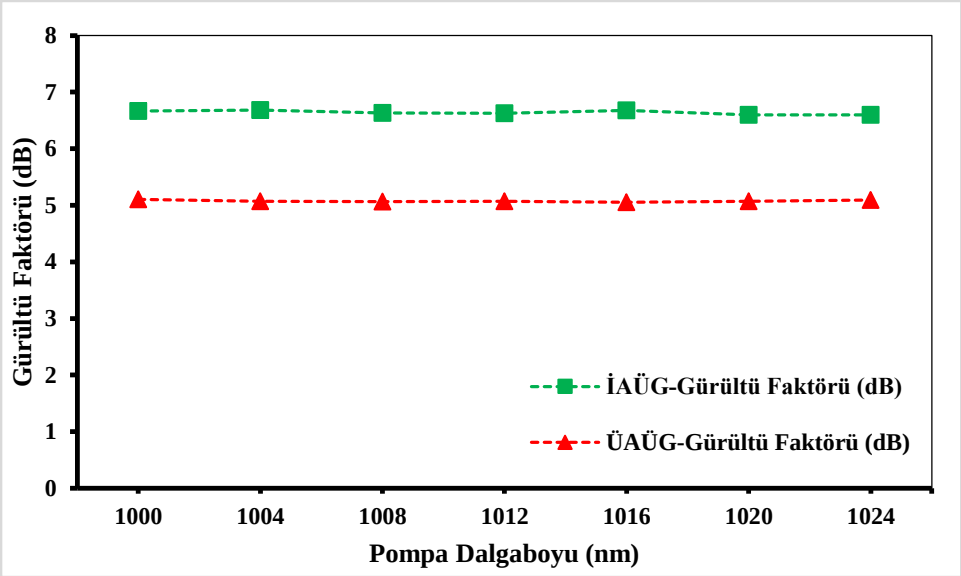
6.3.9. Pompa dalgaboyu analizleri ve karşılaştırılması

Pompa dalgaboyu parametre aralığı 980 – 1040 nm ve 4 nm adım aralığında artırılmıştır. Pompa dalgaboyuna karşı kazanç değişimi sonuçları Şekil 6.50'de gösterilmiştir. Pompa dalgaboyu değişikliği, belirtilen aralık için yükselteçlerdeki kazanç değişiminde önemli bir değişikliğe neden olmaz. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de optimum pompa dalgaboyu yaklaşık 1020 nm'de elde edilmiştir. 1020 nm pompa dalgaboyundaki soğurma katsayısı $3{,}91 \times 10^{-26}$ m^2'dir. 1020 nm pompa dalgaboyunda, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonları için sırasıyla 49,5 dB ve 47,7 dB kazanç elde edilmiştir.



Şekil 6.50. Pompa dalgaboyuna karşı kazanç değişimi

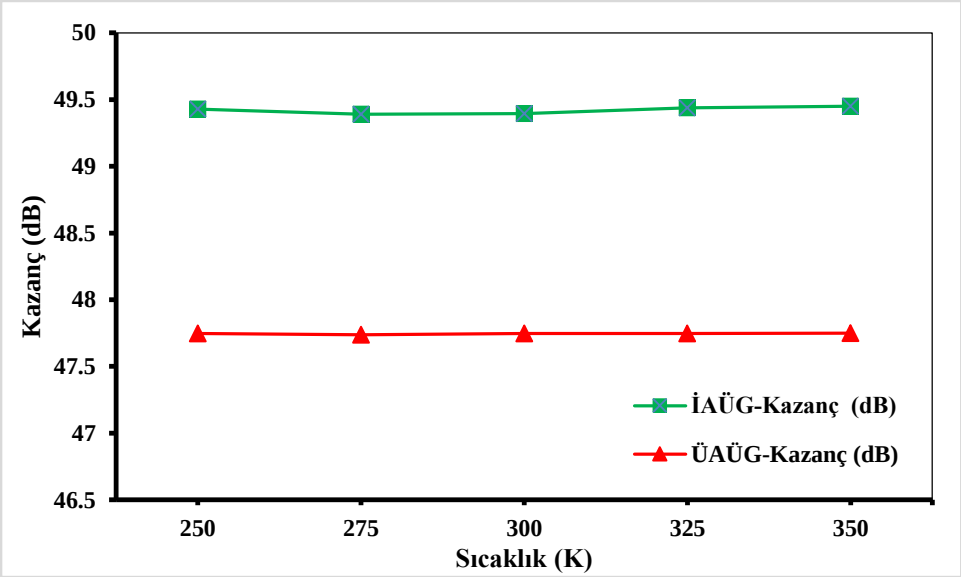
Pompa dalgaboyuna karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.51'de gösterilmiştir. GF açısından İAÜG-PKFY konfigürasyonu, ÜAÜG-PKFY konfigürasyonuna göre 1,5 dB daha fazla GF üretir. Her aşama arasındaki optimize edilmiş pompalama ve kazanç dengelemesi sayesinde, SGO daha etkili bir şekilde korunur. ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu, sinyalin kademeli olarak yükseltilmesini sağlayarak, her aşamada gürültü katkısını azaltır ve toplam gürültü birikimini kontrol altında tutar. İAÜG-PKFY konfigürasyonunda ise, aynadan geri dönen ve tekrar fiberden geçen ışık nedeniyle kazanç daha yüksektir, ancak buna bağlı olarak gürültü seviyesi de artar. Buna karşılık, ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu, optimum çalışma sağlamak için her aşamada kazanç dengelenir ve böylece GF daha düşük seviyelerde tutulabilir.



Şekil 6.51. Pompa dalgaboyuna karşı GF değişimi

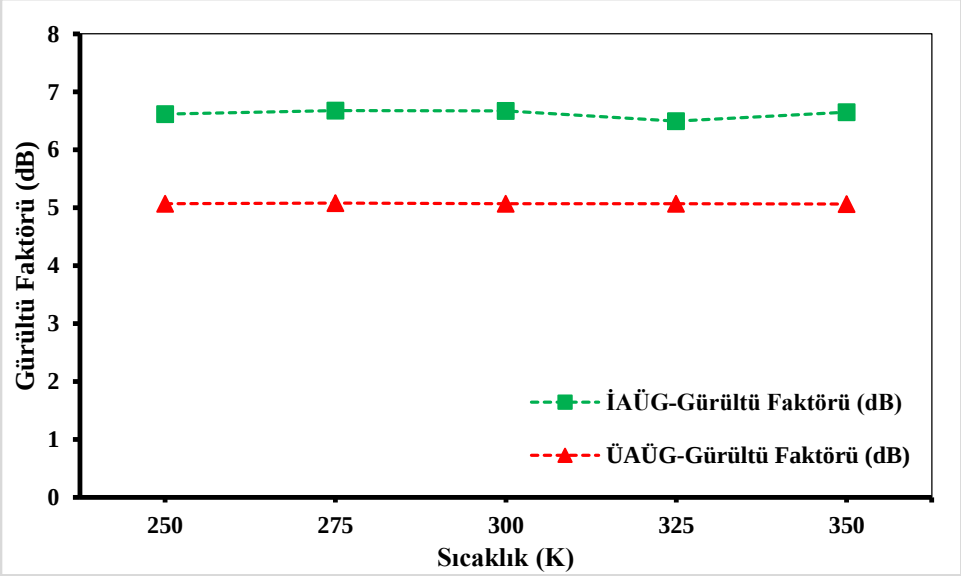
6.3.10. Sıcaklık analizleri ve karşılaştırılması

Sıcaklık parametere aralığı 250 – 350 K ve 25 K adım aralığında artırılmıştır. Sıcaklığa karşı kazanç değişimi sonuçları Şekil 6.52'de gösterilmiştir. Her iki yükselteç konfigürasyonu için de sıcaklık değişimi, belirtilen aralıkta kazanç ve GF'de önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır. Yüksek sıcaklık koşullarında, PKFY'lerdeki popülasyon inversiyonunun azalması kazançta bir düşüşe neden olurken, aynı zamanda termal etkilerden kaynaklanan KYY'deki artış GF'de bir artışa neden olur. Bununla birlikte, bu değişikliklerin etkisi oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, PKFY'lerin sıcaklığa karşı performansı incelenmiş ve kazanç ve GF değişikliklerinin pratik uygulamalar açısından ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.52. Sıcaklığa karşı kazanç değişimi

Sıcaklığa karşı GF değişimi sonuçları Şekil 6.53'te gösterilmiştir.



Şekil 6.53. Sıcaklığa karşı GF değişimi

6.3.11. Kendiliğinden yükseltilmiş yayılım analizleri ve karşılaştırılması

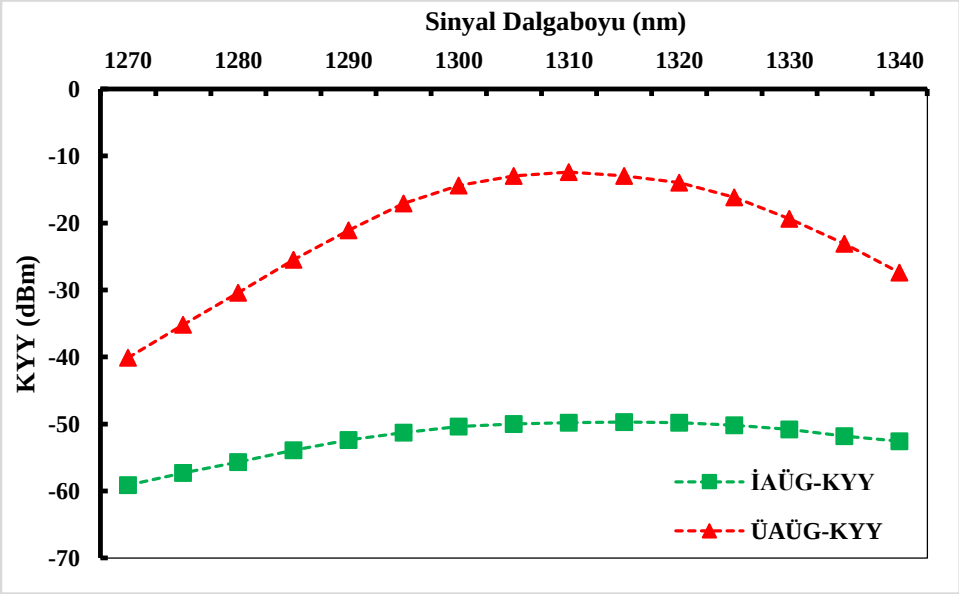
KYY gürültü gücü, iki yükselteç konfigürasyonu için Çizelge 6.4'te elde edilen optimum parametre değerleri kullanılmıştır. Her iki yükselteç için de, çözünürlük band genişliği

değeri 0,01 nm olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar iki yükselteç konfigürasyonu için sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişim etkisi Şekil 6.54'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Optimize edilmiş parametre değerleri

Parametre	İAÜG-PKFY	ÜAÜG-PKFY
Sinyal dalgaboyu (nm)	1300	1300
PKF uzunluğu (m)	5	7
Sinyal gücü (dBm)	-35	-30
Toplam pompa gücü (mW)	1000	1000
İyon yoğunluğu (m^{-3})	$20x10^{24}$	$15x10^{24}$
Ters birikme etkisi (m^3/s)	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	0,36	0,36
Çekirdek yarıçapı (μm)	1	1
Katkılama yarıçapı (μm)	1	1
Pompa dalgaboyu (nm)	1020	1020
Sıcaklık (K)	300	300

1300 nm dalgaboyundaki sinyal için, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonlarının KYY gürültü gücü değerleri sırasıyla -54,4 dBm ve -14,4 dBm olarak elde edilmiştir. Burada, Yükselteçlerdeki aşama sayısının artmasıyla KYY gücünde önemli bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 6.54. Sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişimi

İAÜG-PKFY konfigürasyonunda, ilk aşamada oluşan KYY, her iki yönde de eş zamanlı olarak yayılır. İkinci aşamada kullanılan çift geçişli sistemde, aynadan yansıyan KYY hem ileri hem de geri yönlerde hareket eder ve yansıyarak kazanç ortamına yeniden girer. Bu da, KYY'nin her seferinde birden fazla geçiş yapılarak yükseltilmesine neden olur. Her geçişte hem sinyal hem de KYY yükseltilir. Aynanın kullanımı nedeniyle, KYY bileşenleri geri döner ve kazanç ortamına yeniden girerek üstel olarak artar. Buna karşılık, ÜAÜG-PKFY konfigürasyonunda, PKF'ler seri olarak bağlandığı için KYY birikimi daha kontrollüdür. Her aşama, önceki aşamanın KYY seviyesine göre optimize edilir. Bu çalışmada kullanılan ÜAÜG-PKFY konfigürasyon kurulumu tamamen optimize edilmiş bir yapıdır. KYY her aşamada kısmen söndürülür ve tam geri besleme olmadığı için KYY'nin yeniden yükseltilmesi sınırlıdır. İAÜG-PKFY konfigürasyonunda iki aşamalı bir geçiş olduğundan, KYY kontrolü daha sınırlıdır. Bu nedenle sistem yüksek kazanç için optimize edilmiştir ve bu konfigürasyon daha yüksek kazanç sağlar. Öte yandan, ÜAÜG-PKFY konfigürasyonunda ise, üç aşamalı bir geçiş olduğundan KYY kontrolü daha etkili bir şekilde sağlanabilir. Bu da her aşamada KYY'yi azaltmak için kazancın düşürülmesine neden olur. Bu nedenle, toplam kazanç nispeten daha düşüktür.

6.3.12. Pompa dönüşüm verimliliği karşılaştırılması

Pompa lazeri, Praseodimyum iyonlarının sürekli popülasyon inversiyonunu sağlayarak verimli uyarılmış yayılım ve sinyal yükseltmesine olanak tanır. Pompa lazerinin gücü ve verimliliği, PKFY'nin genel yükseltme verimliliğini doğrudan etkiler. İyi tasarlanmış bir pompa sistemi, gürültü oranını en aza indirirken sinyal yükseltmesini artırır.

PDV, Çizelge 6,4'te elde edilen optimum parametre değerleriyle her iki yükselteç sistemi için hesaplanmıştır. Bu noktada, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonlarının PDV değerleri sırasıyla %64,7 ve %59 olarak elde edilmiştir.

İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonlarının sonuçları çizelge literatürle karşılaştırılmıştır.

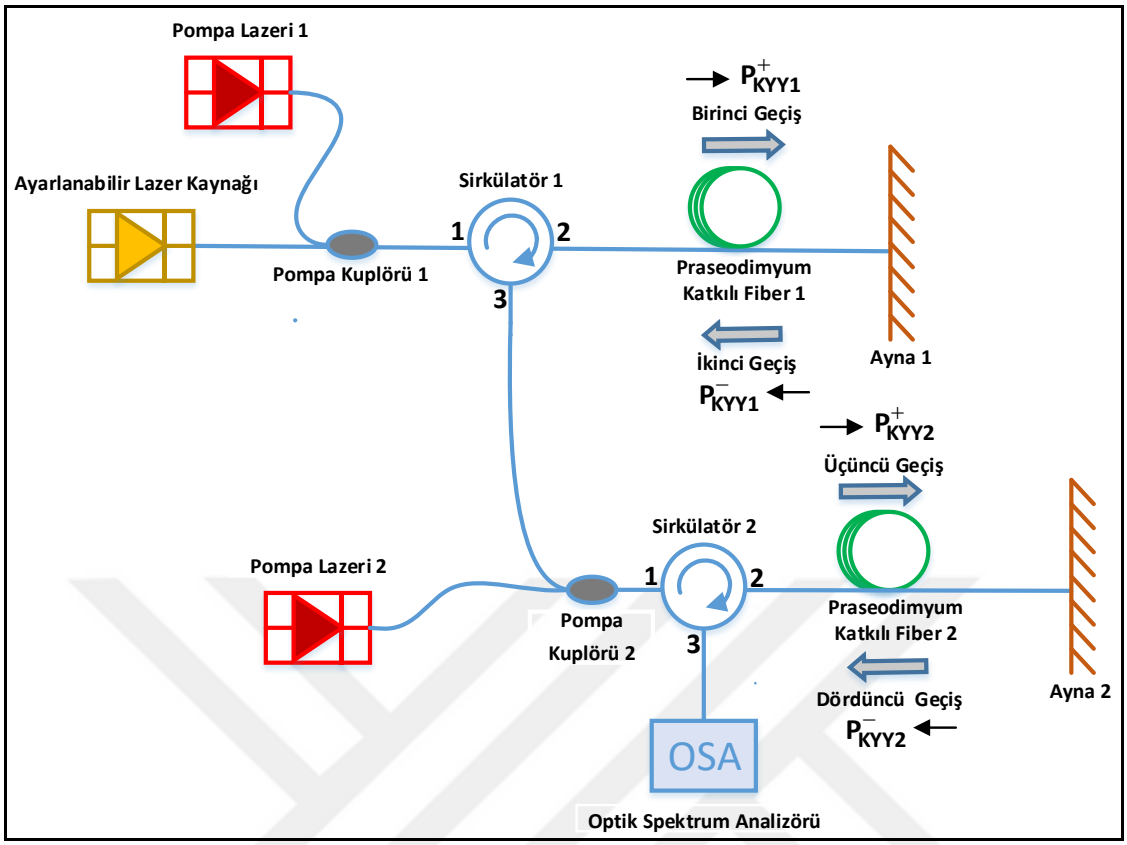
Çizelge 6.5. Yapılan son çalışmalar ile karşılaştırma

Çalışma	[28]	[33]	[117]	[132]	Mevcut Çalışma	Mevcut Çalışma
Konfigürasyon Çeşidi	İAİG-PKFY	BAÇY-PKFY	Tek Geçişli PKFY	BAÇY-PKFY	İAÜG-PKFY	ÜAÜG-PKFY
Sinyal dalgaboyu (nm)	1300	1310	1300	1312	1300	1300
PKF uzunluğu (her bir aşama) (m)	1,5	15	15,7	27	5	7
Toplam pompa gücü (mW)	700	3000	300	700	1000	1000
İyon yoğonluğu (m^{-3})	$50x10^{24}$	$50x10^{24}$	$50x10^{24}$	$3x10^{24}$	$20x10^{24}$	$15x10^{24}$
Ters birikme etkisi (m^3/s)	-	0	-	-	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	-	0,34	0,26	0.38	0,36	0,36
Çekirdek yarıçapı (μm)	1	1,2	1,2	1	1	1
Katkılama yarıçapı (μm)	-	0,8	1,2	1	1	1
Pompa dalgaboyu (nm)	1030	1030	1030	1017	1020	1020
Sıcaklık (K)	-	300	300	-	300	300
PDV (%)	12,8	47	12,5	-	64,7	59
Kazanç (dB)	34,6	56,4	22,7	44.56	49,4	47,7
Gürültü Faktörü (dB)	5,8 (min.)	4,1	4 (min.)	4.1 (min.)	6,5	5,1

Çizelge 6.5'te görüleceği üzere tasarlanan yükselteçler literatürle karşılaştırıldığında pompa lazerinin sinyal gücüne aktarımı yüksektir. Böylece PDV'nin sonucu diğer çalışmalara kıyasla daha iyi olduğu görülmektedir. İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonlarının araştırmasında literatürde ilk kez analizi ve önemli parametrelerinin optimize edilmesi bakımından oldukça önemlidir.

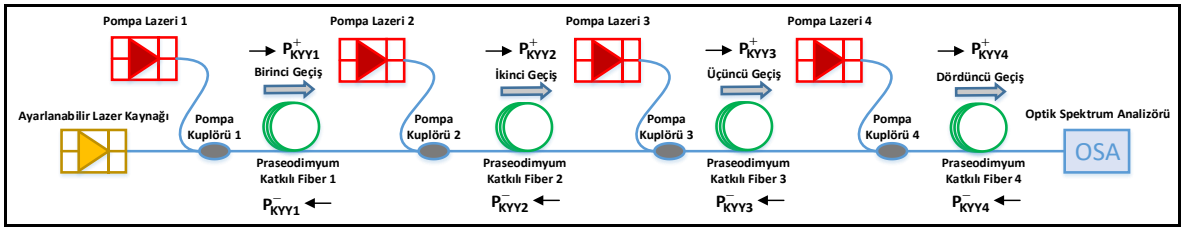
6.4. İki ve Dört Aşamalı Dört Geçişli PKFY Konfigürasyonları

İADG-PKFY konfigürasyonu Şekil 6.55'te gösterilmiştir. ALK ile uygulanan sinyaller ve pompa lazeri 1, pompa kuplörü 1'de birleştirilir ve sirkülatör 1'in 1 numaralı ucundan girip 2 numaralı ucundan çıkar ve PKF 1'e uygulanır. Yükseltilmiş sinyaller, ayna 1'den geri yansıyarak PKF 1'den geçer, sirkülatör 1'in 2 numaralı ucundan girer, 3 numaralı ucundan çıkar ve pompa lazeri 2, pompa kuplörü 2'de birleşerek sirkülatör 2'nin 1 numaralı ucundan girer ve 2 numaralı ucundan çıkar ve PKF 2'ye uygulanır. Tekrar yükseltilmiş sinyaller ayna 2'den yansıyarak sirkülatör 2'nin 2 numaralı ucundan girer ve 3 numaralı ucundan çıkar ve OSA'ya ulaşır. Böylece, İADG-PKFY kurulumu tamamlanır.



Şekil 6.55. İki aşamalı dört geçişli PKFY konfigürasyonu

DADG-PKFY konfigürasyonu Şeki 6.56'da gösterilmiştir. ALK ile uygulanan sinyaller ve pompa lazeri 1, pompa kuplörü 1'de birleştirilerek PKF 1'e uygulanır. Yükseltilmiş sinyaller ve pompa lazer 2, pompa kuplörü 2'de birleştirilerek PKF 2'ye uygulanır. Tekrar yükseltilmiş sinyaller ve pompa lazeri 3, pompa kuplörü 3'te birleştirilerek PKF 3'e uygulanır. Yeniden yükseltilmiş sinyaller ve ve pompa lazeri 4, pompa kuplörü 4'te birleşerek PKF 4'e uygulanır. Yükseltilmiş sinyaller OSA'ya ulaşır. Böylece DADG-PKFY kurulumu tamamlanır.



Şekil 6.56. Dört aşamalı dört geçişli PKFY konfigürasyonu

Sonuçları gözlemlemek için DBÇ analizörü ve OSA kullanılmıştır. P^{+}_{KYY}, ileri yönde yayılan KYY gürültü gücüdür. P^{-}_{KYY}, geri yönde yayılan KYY gürültü gücüdür.

Başlangıçta iki yükselteç için, iki geçişli ve üç geçişli PKFY konfigürasyonlarının ortalama optimum değer aralıkları göz önünde bulundurularak İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonların performans analizi için belirlenen parametre değerleri Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6. Dört geçişli yükselteçler için parametre başlangıç değerleri

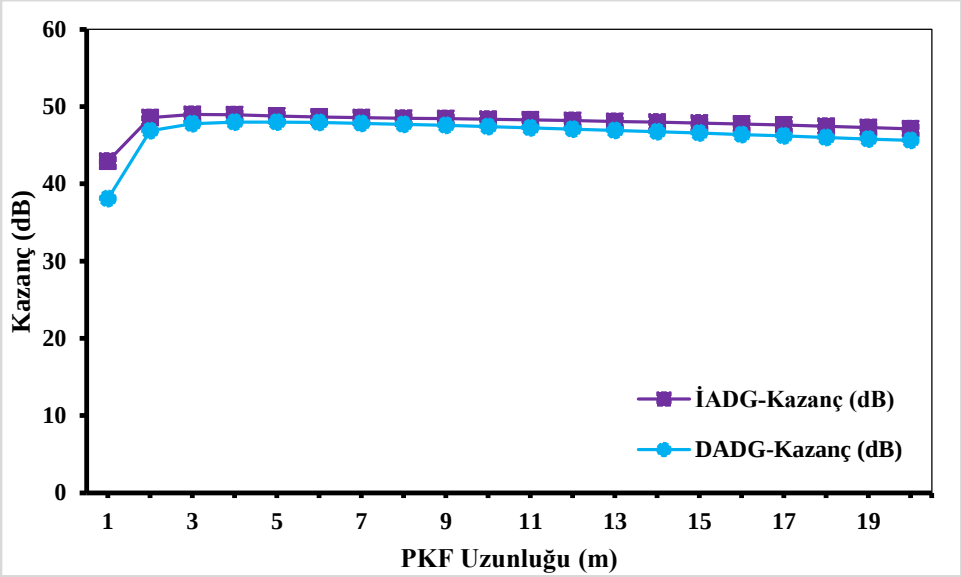
Parametre	Değeri
Sinyal dalgaboyu (nm)	1300
PKF uzunluğu (m)	1 – 20
Sinyal gücü (dBm)	-30
Toplam pompa gücü (mW)	1000
İyon yoğunluğu (m^{-3})	$20x10^{24}$
Ters birikme etkisi (m^3/s)	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	0,36
Çekirdek yarıçapı (μm)	1
Katkılama yarıçapı (μm)	1
Pompa dalgaboyu (nm)	1020
Sıcaklık (K)	300

Önceki iki geçişli ve üç geçişli PKFY konfigürasyonların analizleri detaylı olarak verilmiştir. Burada İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonları için sadece boy analizi yapılmıştır. Çünkü geçiş sayısı arttıkça PKFY sisteminin kontrol edilebilirliği zorlaşacak ve maliyeti önemli ölçüde artacaktır. Bunun yanında geçiş sayısı artışı sistem performansı üzerindeki etkisi azalacaktır. Burada PKF uzunluğu, KYY gürültü gücü ve PDV analizleri yapılmıştır.

6.4.1. Praseodimyum katkılı fiber uzunluğu analizleri ve karşılaştırılması

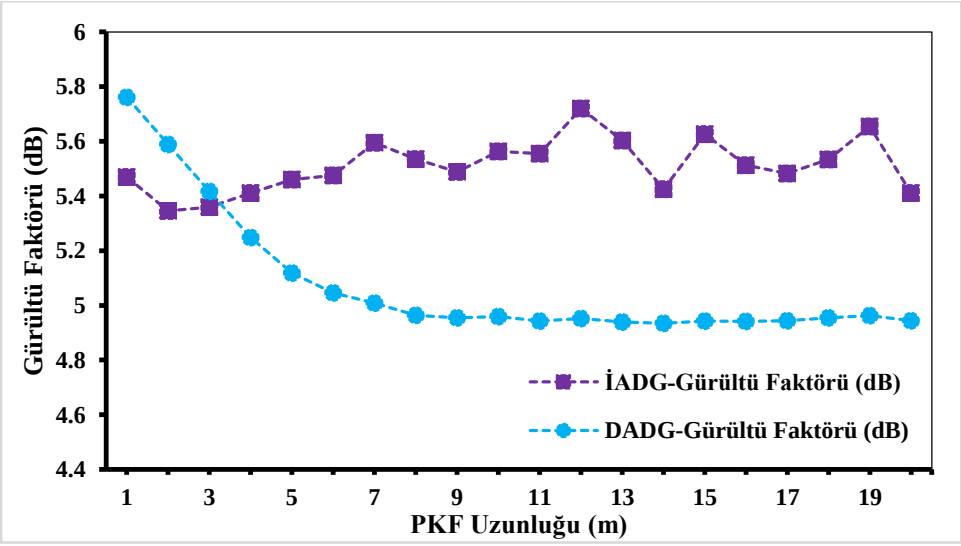
Farklı PKF uzunluğu analizleri için, parametre aralığı 1 – 20 m ve 1 m adım aralığında artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi Şekil 6.57'de gösterilmiştir. Burada, PKF uzunluğundaki artış başlangıçta iki yükseltecin kazancında bir artışa neden olur, artmaya devam ettikçe yükselteçler doyuma ulaşır ve ardından kazançta bir azalmaya neden olur. Optimum PKF uzunluğu, Hem İADG-PKFY hem de DADG-PKFY için 3 m olarak elde edilmiştir. İADG-PKFY ve DADG-PKFY için, PKF uzunluğu 3

m iken, yükselteç kazancı sırasıyla 49,0 dB ve 47,8 dB olarak elde edilir. Kazanç açısından İADG-PKFY daha iyi performans gösterir.



Şekil 6.57. PKF uzunluğuna karşı kazanç değişimi

PKF uzunluğuna karşı GF değişimi Şekil 6.58'de gösterilmiştir. GF incelendiğinde, İADG-PKFY konfigürasyonu başlangıçta DADG-PKFY konfigürasyonundan daha az GF üretirken PKF uzunluğu 3 m'yi geçtiğinde İADG-PKFY konfigürasyonunda GF değerinde ciddi bir değişme olmazken DADG-PKFY konfigürasyonunda biraz azalma olmuştur. GF bakımından incelendiğinde genel olarak DADG-PKFY daha iyi performans gösterir.



Şekil 6.58. PKF uzunluğuna karşı GF değişimi

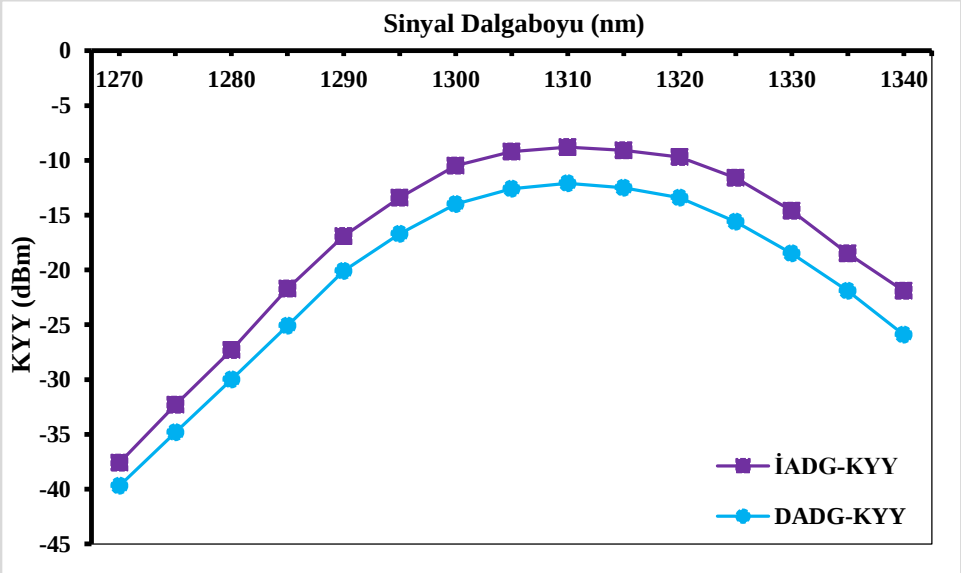
6.4.2. Kendiliğinden yükseltilmiş yayılım analizleri ve karşılaştırılması

KYY gürültü gücü, her iki yükselteç konfigürasyonu için Çizelge 6.7'de belirlenen parametre değerleri kullanılmıştır. Her iki yükselteç için de, band genişliği değeri 0,01 nm olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar iki yükselteç konfigürasyonu için sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişim etkisi Şekil 6.59'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.7. KYY analizi için belirlenen parametre değerleri

Sinyal dalgaboyu (nm)	PKF uzunluğu (m)	Sinyal gücü (dBm)	Toplam pompa gücü (mW)	İyon yoğunluğu (m^{-3})	Ters birikme etkisi (m^3/s)	Numerik açıklık	Çekirdek ve Katkılama yarıçapları (µm)	Pompa dalgaboyu (nm)	Sıcaklık (K)
1300	3	-30	1000	$20x10^{24}$	$0,2x10^{-21}$	0,36	1	1020	300

1300 nm dalgaboyundaki sinyal için, İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonlarının KYY gürültü gücü değerleri sırasıyla -10,5 dBm ve -14,0 dBm olarak elde edilmiştir. Burada, Yükselteçlerdeki aşama sayısının artmasıyla KYY gücünde azalma olduğu görülmektedir. KYY sinyal kadar verimli artmaz ve aşama sayısına bağlı olarak düşer.



Şekil 6.59. Sinyal dalgaboyuna karşı KYY gürültü gücü değişimi

İADG-PKFY konfigürasyonunda, ilk oluşan KYY, her iki yönde de eş zamanlı olarak yayılır. İkinci aşamada kullanılan çift geçişli yapıdan dolayı, aynadan yansıyan KYY hem

ileri hem de geri yönlerde hareket eder ve yansıyarak kazanç ortamına yeniden girer. Bu durum iki defa tekrarlanır. KYY'nin her seferinde birden fazla geçiş yaparak yükselmesine neden olur. Her geçişte hem sinyal hem de KYY yükselir. Aynanın kullanımı nedeniyle, KYY bileşenleri geri döner ve kazanç ortamına yeniden girerek üstel olarak artar. Fakat yükselteç iki aşamadan oluştuğu için KYY artışı sınırlandırılmış olur. Buna karşılık, DADG-PKFY konfigürasyonunda, PKF'ler seri olarak bağlandığı için KYY birikimi daha kontrollüdür. Her aşama, önceki aşamanın KYY seviyesine göre optimize edilir. KYY her aşamada kısmen söndürülür ve tam geri besleme olmadığı için KYY'nin yeniden yükseltilmesi sınırlıdır. İADG-PKFY konfigürasyonunda iki aşamalı bir geçiş olduğundan, KYY kontrolü daha sınırlıdır. Bu nedenle sistem yüksek kazanç için optimize edilmiştir ve bu konfigürasyon daha yüksek kazanç sağlar. Öte yandan, DADG-PKFY konfigürasyonunda dört aşamalı bir geçiş olduğundan, KYY kontrolü daha etkili bir şekilde sağlanabilir. Bu da her aşamada KYY'yi azaltmak için kazancın düşürülmesine neden olur. Bu nedenle, toplam kazanç nispeten daha düşüktür.

6.4.3. Pompa dönüşüm verimliliği karşılaştırılması

Pompa lazeri, Praseodimyum iyonlarının sürekli popülasyon inversiyonunu sağlayarak verimli uyarılmış yayılım ve sinyal yükseltmesine olanak tanır. Pompa lazerinin gücü ve verimliliği, PKFY'nin genel yükseltme verimliliğini doğrudan etkiler. İyi tasarlanmış bir pompa sistemi, gürültü oranını en aza indirirken sinyal yükseltmesini artırır.

PDV, Çizelge 6,7'de belirtilen optimum parametre değerleriyle her iki yükselteç sistemi için hesaplanmıştır. Bu noktada, İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonlarının PDV değerleri sırasıyla %63,3 ve %59,3 olarak elde edilmiştir.

İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonlarının sonuçları Çizelge 6.8’de gösterilmiş ve üç geçişli yükselteç konfigürasyonlarında olduğu gibi yapılan son çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.8. Yapılan son çalışmalar ile karşılaştırma

Çalışma	[28]	[33]	[117]	[132]	Mevcut Çalışma	Mevcut Çalışma
Konfigürasyon Çeşidi	İAİG-PKFY	BAÇY-PKFY	Tek Geçişli PKFY	BAÇY-PKFY	İADG-PKFY	DADG-PKFY
Sinyal dalgaboyu (nm)	1300	1310	1300	1312	1300	1300
PKF uzunluğu (her bir aşama) (m)	1,5	15	15,7	27	3	3
Toplam pompa gücü (mW)	700	3000	300	700	1000	1000
İyon yoğonluğu (m^{-3})	$50x10^{24}$	$50x10^{24}$	$50x10^{24}$	$3x10^{24}$	$20x10^{24}$	$20x10^{24}$
Ters birikme etkisi (m^3/s)	-	0	-	-	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	-	0,34	0,26	0.38	0,36	0,36
Çekirdek yarıçapı (µm)	1	1,2	1,2	1	1	1
Katkılama yarıçapı (µm)	-	0,8	1,2	1	1	1
Pompa dalgaboyu (nm)	1030	1030	1030	1017	1020	1020
Sıcaklık (K)	-	300	300	-	300	300
PDV (%)	12,8	47	12,5	-	63,3	59,3
Kazanç (dB)	34,6	56,4	22,7	44.56	49,0	47,8
Gürültü Faktörü (dB)	5,8 (min.)	4,1	4 (min.)	4.1 (min.)	5,4	5,4

Çizelge 6.8'de görüleceği üzere tasarlanan yükselteçler son yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında pompa lazerinin sinyal gücüne aktarımı yüksektir. Böylece PDV'nin sonucu diğer çalışmalara kıyasla daha iyi olduğu görülmektedir. İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonlarının literatürde ilk kez simüle edilmesi, incelenmesi ve analizi bakımından oldukça önemlidir.

Dört geçişli PKFY konfigürasyonlar ile ilgili yapılan analizler sonucunda iki ve üç aşamalı yükselteçlerden kazanç bakımından ciddi bir faklılık görülmemiştir. Sistemin karmaşıklığı ile beraber optik komponent sayısında ciddi artış olacaktır. Bu da dört geçişli yükselteçlerin kontrolünü zorlaştıracaktır. Dört geçişli PKFY konfigürasyonlarının tasarımı için kullanılacak optik komponentlerin sayısındaki artış, beraberinde ciddi bir maliyet artışı da getirecektir. Bundan dolayı iki ve üç geçişli PKFY konfigürasyonları araştırma ve tasarım bakımından daha uygun görülmüştür.

7. SINIRLILIKLAR VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada tasarlanabilecek çok geçişli yeni PKFY konfigürasyonları ele alınmış ve tasarımda dikkat edilecek başlıca parametreler incelenmiştir. Yazılım ortamında çalışılmasından dolayı iyon kümelenme etkisi gözlemlenemez. Pompa gücü arttıkça ortaya çıkabilecek doğrusal olmayan etkiler ve tüm Stark ayrışmaları yazılımda tanımlanmadığından, bu etkiler simülasyon sonuçlarına yansımamaktadır. Bu nedenle, pompa dalgaboyu değişiminin PKFY konfigürasyonları üzerindeki etkisi sınırlıdır. Bununla birlikte, bu etkinin deneysel çalışmalarda daha belirgin olabileceği tahmin edilmektedir.

Pompa gücü yüksek bir seviyeye (>500 mW) çıkarıldığında, deneysel uygulamalarda bu güce uygun pompa kuplörlerinin seçimi zorlaşır. Klasik pompa kuplörleri bu seviyelere dayanamaz ve hasar görebilir. Bu tür pratik sınırlamalar yazılım ortamında gözlemlenemez. Ayrıca, füzyon ekleme kayıpları da değişebilir. Özellikle PKFY sistemine ekleme yapıldığında, fiberlerin çekirdek yarıçapındaki farklılık nedeniyle mod alan çapı değişir ve bu da tüm modun fiber çekirdeğine girmemesine neden olur. Bu nedenle, yazılım ortamında ek kayıplar görülemez. Bu, en kritik sınırlamalarından biridir. Ayrıca, çok yüksek güç seviyelerinde bileşen bozulması ve iyon kümelenmesi gibi etkiler yazılım ortamında gözlemlenemez. Özetle, yazılımda kullanılan model sınırlıdır.

Bu tez çalışmasında, genel olarak geçerli parametre aralıkları dikkate alınmıştır. Parametre optimizasyon aralıkları, ticari olarak temin edilebilen cihazların sınır değerlerinin değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. Önerilen kurulumlar, pratik olarak uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Hassas parametre optimizasyonu sonucunda, deneysel çalışmada elde edilen spektrumlar, yazılımda elde edilenlere benzerdir, ancak deneysel kayıplar nedeniyle yaklaşık 3 dB'lik farklılıklar beklenmektedir.

Gelecekteki çalışmalar, özellikle 400G/800G ethernet ve yapay zeka kümeleri için koherent bağlantıları hedefleyerek, yüksek hızlı optik altyapılar içinde O-band PKFY entegrasyonu ve performans optimizasyonuna odaklanması muhtemeldir. Araştırmalar, veri merkezi ara bağlantıları, 5G ön bağlantı için sistem karmaşıklığını ve güç tüketimini azaltmada PKFY'lerin rolüne öncelik verilmesi beklenmektedir. Ek olarak, çalışmalar bu yükselteçlerin kapsamlı ağ trafiği analizi ve 1300 nm penceresinde yüksek çözünürlüklü in

vivo (canlı organizmanın içinde) biyolojik görüntüleme dahil olmak üzere özel uygulamalardaki kullanımını muhtemeldir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

EKFY'ye alternatif olabilecek PKFY'lerin yeni konfigürasyonlarını analiz etmek oldukça önemlidir. Literatür incelendiğinde önerilen BAÇG-PKFY, İAÜG-PKFY, ÜAÜG-PKFY, İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonları ilk kez analiz edilip ve parametre optimizasyonları yapılmıştır. İlk önce geleneksel BAÇY-PKFY ile buna alternatif olabilecek BAÇG-PKFY konfigürasyonu karşılaştırılmıştır. Daha sonra İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonları karşılaştırılmıştır. Son olarak İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonları karşılaştırılmıştır. Ayrıca BAÇY-PKFY, BAÇG-PKFY, İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonlarının analizi için sırasıyla sinyal dalgaboyu, PKF uzunluğu, sinyal gücü, pompa gücü, iyon yoğunluğu, ters birikme etkisi, numerik açıklık, çekirdek yarıçapı, katkılama yarıçapı, pompa dalgaboyu ve sıcaklık parametreleri belirlenmiştir. İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonları için ise önceki yükselteçler için belirlenen optimum değerler seçilmiş ve PKF uzunluğu analizi yapılmıştır. BAÇY-PKFY ve BAÇG-PKFY konfigürasyonları ile İAÜG-PKFY ve ÜAÜG-PKFY konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak kazanç ve GF bakımından detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yükselteç konfigürasyonları için optimize edilen parametreler ve optimizasyon sonucu elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak BAÇY-PKFY, BAÇG-PKFY, İAÜG-PKFY, ÜAÜG-PKFY, İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonları için Çizelge 8.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.1. Optimize edilen parametre değerleri

Parametre	BAÇY-PKFY	BAÇG-PKFY	İAÜG-PKFY	ÜAÜG-PKFY	İADG-PKFY	DADG-PKFY
Sinyal dalgaboyu (nm)	1300	1300	1300	1300	1300	1300
PKF uzunluğu (m)	11	6	5x(2 PKF)	7x(3 PKF)	3x(4 PKF)	3x(4 PKF)
Sinyal gücü (dBm)	-20	-30	-35	-30	-30	-30
Toplam pompa gücü (mW)	800	800	1000	1000	1000	1000
İyon yoğunluğu (m^{-3})	$15x10^{24}$	$20x10^{24}$	$20x10^{24}$	$15x10^{24}$	$20x10^{24}$	$20x10^{24}$
Ters birikme etkisi (m^3/s)	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$	$0{,}2x10^{-21}$
Numerik açıklık	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Çekirdek yarıçapı (µm)	1	1	1	1	1	1
Katkılama yarıçapı (µm)	1	1	1	1	1	1
Pompa dalgaboyu (nm)	1016	1020	1020	1020	1020	1020
Sıcaklık (K)	300	300	300	300	300	300

Optimize edilen parametre değerleri sonucunda BAÇY-PKFY için elde edilen maksimum kazanç 42,3 dB ve GF ise 4,7 dB civarında elde edilmiştir. BAÇG-PKFY için ise maksimum kazanç 48,0 dB ve GF ise 5,4 dB civarında elde edilmiştir. Genel olarak iki yükselteç konfigürasyonuna baktığımızda kazanç bakımından 1300 nm sinyal dalgaboyu için BAÇG-PKFY 6 dB civarında BAÇY-PKFY'den çok daha iyi performans göstermiştir. Fakat bu noktadaki GF bakımından ise iki yükselteç için değerler birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tasarım açısından bakıldığında önerilen BAÇG-PKFY konfigürasyonunun çok daha verimli olduğu görülmüştür. Bu da BAÇY-PKFY konfigürasyonu yerine önerilen BAÇG-PKFY konfigürasyonunun kullanılması daha uygun olduğunu göstermiştir.

İAÜG-PKFY için elde edilen maksimum kazanç 49,4 dB ve GF ise 6,5 dB civarında elde edilmiştir. ÜAÜG-PKFY için ise maksimum kazanç 47,7 dB ve GF ise 5,1 dB civarında elde edilmiştir. Genel olarak iki yükselteç tipine baktığımızda kazanç bakımından 1300 nm sinyal dalgaboyu için İAÜG-PKFY 1,5 dB civarında ÜAÜG-PKFY'den daha iyi performans göstermiştir. Fakat bu noktadaki GF bakımından ise ÜAÜG-PKFY konfigürasyonu İAÜG-PKFY konfigürasyonundan daha az GF üretmiştir.

İADG-PKFY ve DADG-PKFY konfigürasyonları için belirlenen değerler ve yapılan PKF uzunluğu optimizasyonu sonucunda elde edilen maksimum kazanç sırasıyla 49,0 dB ve 47,8 dB elde edilmiştir. GF bakımından incelendiğinde iki yükselteç için 1300 nm sinyal dalgaboyu için 5,4 dB civarında elde edilmiştir. Fakat 1270 – 1340 band aralığında incelendiğinde İADG-PKFY konfigürasyonu daha fazla gürültü ortalamasına sahip olduğu görülmüştür.

Analizlerin sonuçlarına bakıldığında, yükselteçlerde aşama sayısı üçten fazla artması kazançta önemli bir artışa neden olmamıştır. Aksine sistem doyuma geldikten sonra kazanç üzerinde olumsuz etkisi görülmüştür. Geçiş sayısına bakıldığında ise, yükselteçlerde geçiş sayısı bir seviyeye kadar sistem performansını artırmıştır. Aşama ve geçiş sayılarındaki artış yükselteç sistemini doyuma götüreceği gibi aynı zamanda artan komponent sayısından dolayı yükseltecin kontrol edilebilirliği zorlaşacak ve tasarım maliyetinde ciddi artış olacaktır. Bundan dolayı ihtiyaca göre doğru yükselteç konfigürasyonunu seçmek oldukça önemlidir.

Son olarak literatürde çok geçişli PKFY konfigürasyonları üzerine ilk çalışma olması sebebiyle yapılan yeni konfigürasyon analizleri büyük önem arz etmektedir. Elde edilen sonuçlar optik yükselteç üreticilerine ve araştırmacılara, tasarım ve optimizasyon noktasında kılavuzluk edeceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Kanwal, B., Armghan, A., Ghafoor, S., Atieh, A., Sajid, M., Kausar, T., ve Lu, Y. (2022). Design and analysis of an O+E-band hybrid optical amplifier for CWDM systems. *Micromachines*, 13(11), 1962.

2. Winzer, P. J., Neilson, D. T., ve Chraplyvy, A. R. (2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Optics Express*, 26(18), 24190–24239.

3. Ferrari, A., Napoli, A., Fischer, J. K., da Costa, N. M. S., D'Amico, A., Pedro, J., ve Stavdas, A. (2020). Assessment on the achievable throughput of multi-band ITU-T G. 652.D fiber transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, 38(16), 4279–4291.

4. Mirza, J., Imtiaz, W. A., Aljohani, A. J., Atieh, A., ve Ghafoor, S. (2020). Design and analysis of a 32x5 Gbps passive optical network employing FSO based protection at the distribution level. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4621–4631.

5. Chen, Y., Li, J., Zhou, P., Zhu, P., Tian, Y., Wu, Z., et al. (2016). MDM-TDM PON utilizing self-coherent detection-based OLT and RSOA-based ONU for high power budget. *IEEE Photonics Journal*, 8(3), 1–7.

6. Krishna Sarma, K. V. S., ve Khan, M. M. (2025). Design, optimization, and evaluation of ultra-broadband hybrid optical doped-fiber amplifier for O+E+S+C band amplification. *Optik*, 329, 172328.

7. Elson, D. J., Wakayama, Y., Mikhailov, V., Luo, J., Yoshikane, N., Inniss, D., ve Tsuritani, T. (2024). 9.6-THz single fibre amplifier o-band coherent DWDM transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 42(21), 7432-7441.

8. İnternet: Fiber Optics For Sale Co. WDM lightwave systems. URL: https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/wdm-lightwave-systems, Son Erişim Tarihi: 12.01.2026.

9. Paul, M. C., Dhar, A., Das, S., Pal, M., Bhadra, S. K., Markom, A., et al. (2015). Enhanced erbium-zirconia-yttria-aluminum co-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics Journal*, 7(5), 1–7.

10. Abedin, K. S., Fini, J. M., Thierry, T. F., Zhu, B., Yan, M. F., Bansal, L., et al. (2014). Seven-core erbium-doped double-clad fiber amplifier pumped simultaneously by side-coupled multimode fiber. *Optics Letters*, 39(4), 993–996.

11. Sliwinska, D., Kaczmarek, P., Sobon, G., ve Abramski, K. M. (2013). Double-seeding of Er/Yb co-doped fiber amplifiers for controlling of Yb-ASE. *Journal of Lightwave Technology*, 31(21), 3381–3386.

12. Amin, M. Z., Qureshi, K. K., ve Hossain, M. M. (2019). Doping radius effects on an erbium-doped fiber amplifier. *Chinese Optics Letters*, 17(1), 010602.

13. Senior, J. M., ve Jamro, M. Y. (2009). *Optical fiber communications: Principles and practice.* (3rd edition). London: Pearson Education, 36–65.

14. Tawarayama, H., Ishikawa, E., Yamanaka, K., Itoh, K., Okada, K., Aoki, H., et al. (2000). Optical amplification at 1.3 μm in a praseodymium-doped sulfide-glass fiber. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(4), 792–796.

15. Berkdemir, C., ve Özsoy, S. (2007). Modelling consideration of praseodymium-doped fiber amplifiers for 1.3 μm wavelength applications. *Optics Communications*, 269(1), 102–106.

16. İnternet: Thorlabs. O-Band Fiber Amplifiers (PDFAs). URL: https://www.thorlabs.com/o-band-fiber-amplifiers-pdfas?tabName=Overview, Son Erişim Tarihi: 12.01.2026.

17. İnternet: Fiberlabs Inc. O-band PDFA Bench-top. URL: https://www.fiberlabs.com/products/product_details/o-band-pdfa-bench-top/, Son Erişim Tarihi: 12.01.2026.

18. Kaur, J., Goyal, R., ve Kaur, G. (2025). Multi-stage EDFA amplifiers: Optimizing gain and noise performance across fiber lengths (10–24 m) in the 185.2–186.2 THz band. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 19(6), 6.

19. Akhter, F. (2012). Modeling and characterization of all possible triple pass EDFA configurations. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(18), 2656-2663.

20. Naji, A. W., Akhter, F., Ibrahimy, M. I., ve Siddiquei, H. R. (2012, 3-5 Temmuz). *Modeling and characterization of a new three-stage quadruple pass EDFA.* 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, 458-461.

21. Akhter, F., Naji, A. W., Ibrahimy, M. I., ve Siddiquei, H. R. (2012, 3-5 Temmuz). *Characterization of triple pass erbium-doped fiber amplifiers.* 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, 462-466.

22. Mahdi, M. A., Khairi, K. A., Bouzid, B., ve Abdullah, M. K. (2004). Optimum pumping scheme of dual-stage triple-pass erbium-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(2), 419-421.

23. Almukhtar, A. A., Al-Azzawi, A. A., Cheng, X., Reddy, P., Dhar, A., Paul, M., et al. (2020). Enhanced triple-pass hybrid erbium doped fiber amplifier using distribution pumping scheme in a dual-stage configuration. *Optik*, 204, 164191.

24. Qin, S., He, J., Zou, Y., ve Qiang, Z. (2010, 8-12 Aralık). *An improved 3-stage l-band erbium doped fiber amplifier*. Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, Shanghai, 15-16.

25. Yücel, M. ve Yiğit, E. (2020). Two stage three pass EDFA design and EDFA parameters' optimization. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 335-344.

26. Yigit, E. ve Yucel, M. (2022). Three-stage six-pass EDFA preamplifier design and EDFA parameters' optimization. *Optical and Quantum Electronics*, 54(1), 24.

27. Awsaj, M., Sumait, B., Ahmed, A., ve Awsaj, M. (2020). Triple pass in l-band erbium doped fiber amplifier with fiber bragg grating. *Solid State Technology*, 63(6), 2405-2415.

28. Mohammed, D. Z., ve Hammadi, A. K. (2022). Performance evaluation of O-band praseodymium-doped fiber amplifier with dual-pass regime. *Fiber Integrated Optics*, 41(5–6), 131–142.

29. Yan, L., Chunyu, W., ve Yutian, L. (2007). A four-passed ytterbium-doped fiber amplifier. *Optics and Laser Technology*, 39(6), 1111-1114.

30. Bouzid, B. (2010). High-gain and low-noise-figure erbium-doped fiber amplifier employing dual stage quadruple pass technique. *Optical Review*, 17(3), 100-102.

31. Khairi, K. A., Naji, A. W., Sheih, S. J., ve Mahdi, M. A. (2004). High-gain triple-pass amplification in two-stage optical amplifier architecture. *Microwave and Optical Technology Letters*, 41(4), 317-318.

32. Qayoom, T., Qazi, G., ve Shah, N. (2018). Investigation and performance evaluation of filter aided configurations for erbium doped fiber optical amplification system. *Optik*, 164(2), 311-323.

33. Alharbi, A. G., Mirza, J., Raza, M., ve Ghafoor, S. (2022). Performance enhancement of praseodymium doped fiber amplifiers. *Computers, Materials and Continua*, 73(3), 5411–5422.

34. Obaid, H. M., Shahid, H., Akram, A., ve Zafrullah, M. (2024). Performance optimization of dual-stage and bidirectional pumped thulium-doped fiber amplifier configuration for improved gain using multiparameter optimization algorithm. *Optical and Quantum Electronics*, 56(8), 1085.

35. Wu, Y., Wang, Z., Xie, Z., Ji, J., ve Wang, K. (2025). Numerical simulation of thulium-doped fiber amplifier at 2 μm. *Optoelectronics Letters*, 21(10), 582–588.

36. Ali, A. Y., Al-Mashhadani, M. K. S., Al-Mashhadani, T. F., Awsaj, M. K., ve Bouteraa, Y. (2022). Broadband flat amplification based on fully double-pass configuration in serial hybrid fiber amplifier. *Optical and Quantum Electronics*, 54(12), 813.

37. Gurkaynak, I. A., Al-Mashhadani, M. K. S., Ali, M. H., Al-Mashhadani, T. F., Gunduz, A. E., et al. (2021). Widely flatness gain bandwidth with double pass parallel hybrid fiber amplifier. *Optical and Quantum Electronics*, 53(9), 359.

38. Ali, M. H., Abdullah, F., ve Al-Mashhadani, T. F. (2020). Gain-control technique in double-pass parallel hybrid fiber amplifier. *Optical and Quantum Electronics*, 52(10), 386.

39. Khan, M. M., ve Gurjar, N. S. (2022, 02-02 Aralık). *Pump and signal optimization in thulium doped fiber amplifiers for S–band with amplified spontaneous emission and*

ion-ion interactions. 2022 IEEE 9th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), Prayagraj, 1–6.

40. Mirza, J., Ghafoor, S., Armghan, A., Elhamrawy, O. I., Jamal, L., et al. (2022). Performance enhancement of ytterbium-doped fiber amplifier employing a dual-stage in-band asymmetrical pumping. *Micromachines*, 13(9), 1488.

41. Wang, D., Pei, L., Zheng, J., Wang, J., Xu, W., et al. (2022). Analysis of gain and noise characteristics of O-band Bi-doped fiber amplifier under different pumping schemes. *Optik*, 251, 168491.

42. Wang, D., Pei, L., Zheng, J., Wang, J., Xu, W., Li, J., ve Ning, T. (2024). Modeling optimization design and amplification characteristics of O-band irregular Bragg bismuth-doped fiber amplifier. *Results in Physics*, 63, 107860.

43. Almukhtar, A. A., Al-Azzawi, A. A., Ahmad, B. A., Cheng, X. S., Reddy, P. H., et al. (2019). Flat-gain and wide-band partial double-pass erbium co-doped fiber amplifier with hybrid gain medium. *Optik*, 178, 256–261.

44. Mirza, J., Atieh, A., Menhas, M. I., Ghafoor, S., Magam, M., et al. (2023). Design of an efficient thulium-doped fiber amplifier for dual-hop earth to satellite optical wireless links. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(7), 101983.

45. Fang, Y., Zhang, C., Zeng, Y., Xu, O., Huang, X., et al. (2024). Simultaneous realization of high gain and low DMG of four-mode EDFA under bidirectional hybrid-mode pump. *Optics Express*, 32(6), 9332–9342.

46. Ososkov, Y., Khegai, A., Firstov, S., Riumkin, K., Alyshev, S., et al. (2021). Pump-efficient flattop O+E-bands bismuth-doped fiber amplifier with 116 nm –3 dB gain bandwidth. *Optics Express*, 29(26), 44138–44145.

47. Taengnoi, N., Bottrill, K. R. H., Hong, Y., Wang, Y., Thipparapu, N. K., et al. (2021). Experimental characterization of an O-band bismuth-doped fiber amplifier. *Optics Express*, 29(10), 15345–15355.

48. Śliwczyński, Ł., Krehlik, P., ve Salwik, K. (2019). Modeling and optimization of bidirectional fiber-optic links for time and frequency transfer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 66(3), 632–642.

49. Firstov, S. V., Alyshev, S. V., Riumkin, K. E., Khopin, V. F., Guryanov, A. N., et al. (2016). A 23-dB bismuth-doped optical fiber amplifier for a 1700-nm band. *Scientific Reports*, 6, 28939.

50. Yucel, M. ve Dincer, A. (2022). The gain and noise figure comparison of single-pass, double-pass, and dual-stage triple-pass thulium-doped fiber amplifiers in S-band with thulium-doped fiber optimization. *Microwave and Optical Technology Letters*, 64(10), 1832–1840.

51. Facchini, A., Morana, A., Boukenter, A., Mescia, L., Marin, E., et al. (2025). Investigation of the radiation response of a dual-stage optical amplifier. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 72(8), 2774–2782.

52. Li, R., Fan, W., Wang, X., ve Li, X. (2019). Improvement of noise and gain characteristics of low-repetition-rate double-pass fiber amplifiers. *IEEE Photonics Journal*, 11(3), 7101710.

53. Lan, T., Xiang, J., Zhou, G., Xiang, M., Fu, S., ve Qin, Y. (2024). Inverse design of incoherent Raman pump sources for U-band WDM transmission over 125 km G.652.D fiber. *IEEE Photonics Journal*, 16(5), 7202106.

54. Ren, L., Pan, Y., Cheng, Y., Fu, Y., Bao, S., ve Yuan, L. (2023, 10-13 Kasım). *Gain simulation of bidirectional pumped broadband EDFA*. 2023 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC), Guilin, 1–3.

55. Donodin, A., Manuylovich, E., Dvoyrin, V., Melkumov, M., Mashinsky, V., ve Turitsyn, S. (2024). E-band telecom-compatible 40 dB gain high-power bismuth doped fiber amplifier with record power conversion efficiency. *APL Photonics*, 9(4), 046102.

56. Wu, H., Li, R., Xiao, H., Huang, L., Yang, H., et al. (2022). First demonstration of a bidirectional tandem-pumped high-brightness 8 kW level confined-doped fiber amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 40(16), 5673–5681.

57. Elmouaddine, M., Nassiri, A., Boulezhar, A., ve Taibi, M. (2023). Erbium doped seven-core fiber amplifier with bi-directional pumping. Nonlinear Optics, *Quantum Optics*, 60, 123–135.

58. Mishra, A. R., Kakade, R. N., ve Kakade, P. D. (2022). Dual-stage EDFA for improving the performance of long-haul optical systems. *IEEE Access*, 10, 14193–14202.

59. Huang, Y., Huang, H., Vijayan, K., Wen, J., Borkowski, R., et al. (2025). Bismuth-doped bidirectional fiber amplifier for high-speed passive optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 43(13), 6361–6367.

60. Ahmad, H., Zulkifli, M. Z., Latif, A. A., Thambiratnam, K., ve Harun, S. W. (2009). Bidirectional S–band continuous wave operation in a depressed-cladding erbium doped fiber amplifier. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 11(5), 547–553.

61. Awsaj, M. K., Goktas, H. H., Yucel, M., ve Awsaj, M. K. (2020, 15-16 Aralık). *Gain and noise figure analysis of erbium doped fiber amplifier based on double pass configuration using forward pumping.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Baghdad, 1094(1), 012095.

62. Ma, P., Xiao, H., Liu, W., Zhang, H., Wang, X., Leng, J., et al. (2021). All-fiberized and narrow-linewidth 5 kW power-level fiber amplifier based on a bidirectional pumping configuration. *High Power Laser Science and Engineering*, 9, e45.

63. Jamalus, M. S. K. B., Yusoff, N. M., ve Sulaiman, A. H. (2019). Simulation of dual stage thulium-doped fiber amplifier using pump power distribution technique. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(3), 1203–1211.

64. Wang, Y., Wang, S., Halder, A., ve Sahu, J. (2023). Bi-doped optical fibers and fiber amplifiers. *Optical Materials*: X, 17, 100219.

65. Obaid, H. M., Rashid, F., Shahid, H., Khan, B., ve Zafrullah, M. (2024). Gain flattened S+C+L-band bidirectional thulium doped fiber/ multi-section fiber optical parametric hybrid amplifier. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), 102497.

66. Naji, A. W., Ibrahim, H. F., Ahmed, B., Harun, S. W., ve Mahdi, M. A. (2010, 11-13 Mayıs). *Theoretical analysis of triple-pass Erbium Doped Fiber Amplifier*. 2010 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, 1–4.

67. Naji, A. W., Hamida, B. A., Cheng, X. S., Mahdi, M. A., Harun, S., et al. (2011). Review of erbium doped fiber amplifier. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(20), 4674–4689.

68. Al-Mansoori, M. H., Al-Qasmi, A. S., Al-Abri, K. M., Al-Ghaithi, W. S., ve Younis, M. A. A. (2014, 2-4 Eylül). *Wideband EDFA utilizing short length high concentration erbium doped fiber*. 2014 IEEE 5th International Conference on Photonics (ICP), Kuala Lumpur, 201–203.

69. Aozasa, S., ve Yamada, M. (2019). E-band thulium doped fiber amplifier. *Electronics Letters*, 55(6), 333–334.

70. Bouzid, B. (2013, 27-30 Nisan). *Analysis and review of erbium doped fiber amplifier*. 2013 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference, Riyadh, 1–5.

71. Pradhan, D., ve Mishra, V. (2015). Analysis and review of EDFA. *International Journal of Computer Science and Network*, (4)6, 918–923.

72. Dincer, A. ve Yücel, M. (2024). Modeling and optimizations of triple-pass TDFAs for next generation fiber optical communication systems. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 26(5-6), 219–227.

73. Norouzi, M., Badeka, P., Chahande, P., ve Briley, B. (2013, 9-11 Mayıs). *A survey on rare earth doped optical fiber amplifiers.* IEEE International Conference on ElectroInformation Technology (EIT 2013), Rapid City, 1–11.

74. Naji, A. W., Akhter, F., Ibrahimy, M. I., Ahmed, B., Mahdi, M. A., ve Siddiquei, H. R. (2010). *A computer based simulator for Erbium Doped Fiber Amplifier.* International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE'10), 1–5.

75. Agrawal, G. P. (2002). *Fiber-Optic Communications Systems*. (3rd edition). New York: Wiley Interscience, 1–90.

76. Lynch, R. L., Maybach, R. L., ve Walch, P. F. (1995). Design and Deployment of Optically Amplified Undersea Systems. *AT and T Technical Journal*, 74(1), 83–92.

77. Ellis, A. D., Zhao, J., ve Cotter, D. (2010). Approaching the Non-Linear Shannon Limit. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 423–433.

78. Richardson, D. J., Fini, J. M., ve Nelson, L. E. (2013). Space-division multiplexing in optical fibres. *Nature Photonics*, 7(5), 354–362.

79. Asif Iqbal, M., Krzczanowicz, L., Phillips, I., Harper, P., ve Forysiak, W. (2020, 8-12 Mart). *150nm SCL band transmission through 70km SMF using ultra-wideband dual-stage discrete raman amplifier*. Optical Fiber Communication Conference (OFC), San Diego, 1–3.

80. Rapp, L., ve Eiselt, M. (2022). Optical Amplifiers for Multi – Band Optical. *Journal of Lightwave Technology*, 40(6), 1579–1589.

81. van de Sluis, H. J. D. (1993). Characterisation and modelling of praseodymium-doped fibre amplifiers. *Master's thesis*, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.

82. Desurvire, E. (1994). *Erbium-doped fiber amplifiers. Principles and applications*. (1st edition). New York: John Wiley and Sons, 1–120.

83. Ono, H., Yamada, M., Kanamori, T., Sudo, S., ve Ohishi, Y. (1997). 1.58 m band fluoride-based Er^{3+} doped fibre amplifier for WDM transmission systems. *Electronics Letters*, 33(17), 1471–1472.

84. Simakov, N., Li, Z., Jung, Y., Daniel, J. M. O., Barua, P., et al. (2016). High gain holmium-doped fibre amplifiers. *Optics Express*, 24(13), 13946-13956.

85. Alharbi, A. G., Kanwal, F., Ghafoor, S., Habib, N., Kanwal, B., et al. (2022). Performance optimization of holmium doped fiber amplifiers for optical communication applications in 2 – 2.15 μm wavelength range. *Photonics*, 9(4), 245.

86. Kożak, M. M. (2006). Development of thulium-doped fluoride fiber amplifiers. *Doctoral dissertation*, Technische Universität Braunschweig, Cuvillier Verlag, Braunschweig.

87. Supe, A., Olonkins, S., Udalcovs, A., Senkans, U., Mūrnieks, R., et al. (2021). Cladding-pumped erbium/ytterbium co doped fiber amplifier for c-band operation in optical networks. *Applied Sciences*, 11(4), 1702.

88. Paschotta, R., Nilsson, J., Tropper, A. C., ve Hanna, D. C. (1997). Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 33(7), 1049-1056.

89. Boley, C. D., Dawson, J. W., Kiani, L. S., ve Pax, P. H. (2019). E-band neodymium-doped fiber amplifier: model and application. *Applied Optics*, 58(9), 2320–2326.

90. Dawson, J. W., Kiani, L. S., Pax, P. H., Allen, G. S., Drachenberg, D. R., et al. (2017). E-band Nd^{3+} amplifier based on wavelength selection in an all-solid micro-structured fiber. *Optics Express*, 25(6), 6524–6531.

91. Pax, P. H., Khitrov, V. V., Drachenberg, D. R., Allen, G. S., Ward, B., et al. (2016). Scalable waveguide design for three-level operation in Neodymium doped fiber laser. *Optics Express*, 24(25), 28633–28640.

92. Kozak, M. M., Caspary, R., ve Kowalsky, W. (2004, 4 Temmuz). *Thulium-doped fiber amplifier for the S band*. Proceedings of 2004 6th International Conference on Transparent Optical Networks, Wroclaw, 51–54.

93. Aly, M. H., Nasr, M., ve Seleem, H. E. (2005). Thulium doped fiber amplifier in the S/S+ band Employing Different Concentration profiles B. *Fifth Workshop on Photonics and Its Applications*, 39–49.

94. Ivaniga, T., ve Ivaniga, P. (2017). Comparison of the optical amplifiers EDFA and SOA based on the BER and Q-factor in C-band. *Advances in Optical Technologies*, 2017, 9053582

95. Sobhanan, A., Anthur, A., O'Duill, S., Pelusi, M., Namiki, S., et al. (2022). Semiconductor optical amplifiers: recent advances and applications. *Advances in Optics and Photonics*, 14(3), 571–630.

96. İnternet: RP Photonics Encyclopedia. Semiconductor optical amplifiers. URL: https://www.rp-photonics.com/semiconductor_optical_amplifiers.html, Son Erişim Tarihi: 12.01.2026.

97. Connelly, M. J. (2001). Wideband semiconductor optical amplifier steady state numerical model. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 37(3), 439–447.

98. Nissov, M. (1997). Long-haul optical transmission using distributed Raman amplification. *PhD thesis*, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby.

99. Bjarklev, A. (1993). *Optical Fiber Amplifiers*, Design and system applications. (1st edition). Norwood: Artech House, 1–242.

100. Kobyakov, A., Sauer, M., ve Chowdhury, D. (2010). Stimulated Brillouin scattering in optical fibers. *Advances in Optics and Photonics*, 2(1), 1–59.

101. Chen, W., Meng, Z., ve Zhou, H. J. (2013). Phono lifetime measurement by stimulated Brillouin scattering slow light technique in optical fiber. Chinese Physics Letters, 30(7), 074209.

102. Ghosh, A., Venkitesh, D., ve Vijaya, R. (2009). Study of Brillouin amplifier characteristics toward optimized conditions for slow light generation. *Applied Optics*, 48(31), G48–G52.

103. Qin, G. S., Sotobayashi, H., Tsuchiya, M., Mori, A., Suzuki, T., et al. (2008). Stimulated Brillouin scattering in a single-mode tellurite fiber for amplification, lasing, and slow light generation. *Journal of Lightwave Technology*, 26(5), 492–498.

104. Sheng, L. W., Ba, D. X., ve Lu, Z. W. (2019). Low-noise and high-gain of stimulated Brillouin amplification via orbital angular momentum mode division filtering. *Applied Optics*, 58(1), 147–151.

105. Yuan, H., Wang, Y. L., Lü, Z. W., ve Zheng, Z. X. (2015). Small-scale self-focusing of 200 ps laser pulses in Brillouin amplification. *Chinese Physics B*, 24(9), 094210.

106. Terra, O., Grosche, G., ve Schnatz, H. (2010). Brillouin amplification in phase coherent transfer of optical frequencies over 480 km fiber. *Optics Express*, 18(15), 16102–16111.

107. Raupach, S. M. F., Koczwara, A., ve Grosche, G. (2014). Optical frequency transfer via a 660 km underground fiber link using a remote Brillouin amplifier. *Optics Express*, 22(22), 26537–26547.

108. Chen, L., ve Bao, X. (1998). Analytical and numerical solutions for steady state stimulated Brillouin scattering in a single-mode fiber. *Optics Communications*, 152(1-3), 65–70.

109. Niklès, M., Thévenaz, L., ve Robert, P. A. (1997). Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 15(10), 1842–1851.

110. van Deventer, M. O., ve Boot, A. J. (1994). Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 12(4), 585–590.

111. Shlomovits, O., ve Tur, M. (2013). Vector analysis of depleted stimulated Brillouin scattering amplification in standard single-mode fibers with nonzero birefringence. *Optics Letters*, 38(6), 836–838.

112. Galtarossa, A., Palmieri, L., Schiano, M., ve Tambosso, T. (2001). Measurement of birefringence correlation length in long, single-mode fibers. *Optics Letters*, 26(13), 962–964.

113. Ohishi, Y., Kanamori, T., Nishi, T., Takahashi, S., ve Snitzer, E. (1992). Concentration effect on gain of Pr^{3+} doped fluoride fiber for 1.3 μm amplification. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(12), 1338–1341.

114. Carter, J. N., Smart, R. G., Hanna, D. C., ve Tropper, A. C. (1990). Lasing and amplification in the 0.8μm region in thulium doped fluorozirconate fibres. *Electronics Letters,* 26(21), 1759-1761.

115. Durteste, Y., Monerie, M., Allain, J. Y., ve Poignant, H. (1991). Amplification and lasing at 1.3 μm in praseodymium-doped fluorozirconate fibres. *Electronics Letters*, 27(8), 626–628.

116. Artiglia, M., Di Vita, P., ve Potenza, M. (1994). Optical fibre amplifiers: Physical model and design issues. *Optical and Quantum Electronics*, 26, 585–608.

117. Mirza, J., Ghafoor, S., Habib, N., Kanwal, F., ve Qureshi, K. K. (2021). Performance evaluation of praseodymium doped fiber amplifiers. *Optical Review*, 28(6), 611–618.

118. Husein, A. K. M., ve El-Nahal, F. I. (2010). Noise figure and gain temperature dependent of praseodymium-doped fiber amplifier by using rate equations. *Optics Communications,* 283(3), 409–413.

119. Schimmel, R. C., van de Sluis, H. J. D., Jonker, R. J. W., ve de Waardt, H. (2001). Characterisation and modelling of praseodymium doped fibre amplifiers. *6th Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter*, 133–136.

120. Morin, V., ve Taufflieb, E. (1997). High output-power praseodymium doped fiber amplifier single pumped at 1030 nm: Analysis and results. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 3(4), 1112–1118.

121. İnternet: optiwave systems inc. OptiSystem overview. URL: https://optiwave.com/optisystem-overview/, Son Erişim Tarihi: 12.01.2026.

122. Karasek, M. (1993). Theoretical investigation of Pr^{3+} doped fluoride fibre amplifiers. *Frequenz*, 47(7–8), 197–201.

123. Yariv, A. (1991). *Optical electronics*. (1st edition). London: Saunders College,18–75.

124. Mandel, L., ve Wolf, E. (1995). *Optical coherence and quantum optics*. (1st edition). Cambridge: Cambridge University Press, 1100–1160.

125. Fleming, S. (1996). Crosstalk in 1.3 μm praseodymium fluoride fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 14(1), 66–71.

126. Valles, J., Hotoleanu, M., ve Voiculescu, E. (1997). Modelling of the temporal response of Pr^{3+} doped fluoride fibre amplifiers. *Pure and Applied Optics*, 6(11), 779–792.

127. Sudo, S. (1997). *Optical fiber amplifiers: materials, devices, and applications*. (1st edition). Norwood: Artech House, 300–340.

128. Osch, A. v. (1995). *Modelling of praseodymium-doped fluoride and sulfide doped fibre amplifiers for the 1.3μm wavelength region*. (1st edition). Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 160-256

129. Giles, C. R., ve Desurvire, E. (1991). Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 9(2), 271–283.

130. Maharry, A., Liu, J., Misak, S., Andrade, H., Valenzuela, L. A., et al. (2023). First demonstration of an O-band coherent link for intra data center applications. *Journal of Lightwave Technology*, 41(21), 6643–6650.

131. Ibrahim, S. A., Mansoor, A., Tuan Mohd Marzuki, T. A. S., Omar, N. Y. M., ve Abdul Rashid, H. A. (2021). Comparison of 1480 nm and 980 nm-pumped Gallium-Erbium fiber amplifier. *F1000Research*, 10, 251.

132. Khan, M. M., Sarma, K., ve Ali, K. (2024). Optimization of O-band praseodymiumdoped optical fiber amplifier in a CWDM communication link. *2024 ITU Kaleidoscope: Innovation and Digital Transformation for a Sustainable World (ITU K)*, 1–5.



Gazili olmak ayrıcalıktır