
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÇOK GEÇİŞLİ TKFY TASARIMLARI VE KARAKTERİSTİKLERİ

Ayten DİNCER

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2024

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.

……...

Ayten DİNCER

30/04/2024

ÇOK GEÇİŞLİ TKFY TASARIMLARI VE KARAKTERİSTİKLERİ

(Doktora Tezi)

Ayten DİNCER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2024

ÖZET

Çok aşamalı bir fiber yükselteç tasarlamanın temel amacı, uzun mesafeli optik iletim sistemleri için daha yüksek performans elde etmektir. Bu çalışmada uzun mesafe optik iletim sistemleri için ön yükselteç olarak kullanılabilecek çok geçişli TKFY tasarımları ve giriş gücü, pompa dalgaboyu ve gücü, TKF uzunluğu gibi parametrelerin sistem kazancı ve gürültü şekli üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada s bandında ilk kez üç ve dört geçişli TKFY konfigürasyonları denenmiş olup, yeni ve özgün bilgi üretimi ve paylaşımı sağlanarak, literatürdeki bu alandaki boşluk doldurulmuştur. İlk olarak yapılan araştırma ve çalışmada en uygun pompa dalgaboyunun 1050 nm ve pompalama yönünün ise ileri-ileri-geri yönlü olduğu tespit edilmiştir. Fakat geri pompalama yönünün araştırmaya eklenmesi iki, üç ve dört geçişli konfigürasyonlarda tasarım ihtimali sayısını arttıracağı ve karışıklığa yol açacağı için sadece ileri yönlü pompalama kullanılmıştır. 1050 nm pompa dalgaboyu ve ileri yönlü pompalama kullanılarak muhtemel çok geçişli TKFY konfigürasyonları oluşturulmuş ve sırası ile incelenmiştir. İnceleme sırasında öncelikle giriş gücünün her bir konfigürasyon karakteristiğine etkisi araştırılıp en uygun giriş gücü belirlenmiş, daha sonra pompa gücü ve TKF uzunlukları sırasıyla optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan tüm tasarımlar, profesyonel bir ticari yazılım olan Optisystem 21.0 yazılım programı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Her çalışma sonunda elde edilen veriler kullanılarak kazanç ve gürültü şekli değişim grafikleri oluşturulmuştur. Optimize edilen konfigürasyonların her bir geçişi için kazanç ve gürültü şekli değişimleri de incelenmiştir. İki geçişli, üç geçişli ve dört geçişli konfigürasyonları kendi grupları içinde benzer koşullarda karşılaştırılarak, her grup için en verimli konfigürasyon belirlenmiştir. Yüksek performans sağlayan çok geçişli TKFY'ler, yüksek veri hızlarına ve geniş mesafelerde güvenilir iletim sağlamada hayati rol oynayan uzun mesafeli yeni nesil fiber optik haberleşme sistemlerinde ön yükselteç olarak kullanılabilir. Bu sayede bu sistemlerdeki tekrarlayıcı mesafesinin arttırılabileceği düşünülmektedir. Gelişen teknoloji ile yakın gelecekte yaşanması öngörülen alternatif band arayışına çözüm olacağı düşünülmektedir.

Bilim Kodu	:	90532
Anahtar Kelimeler	:	TKFY, çok geçiş, S-band, çok aşama
Sayfa Adedi	:	162
Danışman	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

MULTI-PASS TDFA DESIGNS AND CHARACTERISTICS

(Ph. D. Thesis)

Ayten DİNCER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2024

ABSTRACT

The primary goal of designing a multi-stage fiber amplifier is to achieve higher performance for long-haul optical transmission systems. In this study, the effects of parameters such as input power, pump wavelength and power, and TDF length on system gain and noise figure in multi-pass TDFA designs that can be used as preamplifiers for long-haul optical transmission systems have been explored. For the first time in this study three- and four-pass TDFA configurations in s-band have been tested, and new and original information has been produced and shared, filling a gap in the literature in this field. The initial research and study clarified that the most suitable pump wavelength is 1050 nm and the pumping direction is forward forward-backward. However, since adding the backward pumping direction to the study would increase the number of design possibilities in two-, three-, and four-pass configurations and lead to confusion, only forward pumping has been used. Possible multi-pass TDFA configurations have been created and investigated using a 1050 nm pump wavelength and forward pumping. Initially, the effect of input power on each configuration's characteristics has been explored, and the optimal input power has been determined. Then, the pump power and TDF lengths have been optimized in sequence. All designs in this study have been simulated using Optisystem 21.0, a professional commercial software program. Gain and noise figure variation graphs have been generated using the data obtained at the end of each simulation. The gain and noise figure variations for each pass of the optimized configurations have been also analyzed. The two pass, three-pass, and four-pass configurations are compared under similar conditions within their respective groups to identify the most efficient configuration in each group. High-performance multi-pass TDFAs can be used as pre-amplifiers in next-generation long haul fiber optic communication systems, which play a critical role in enabling high data rates and reliable transmission over extended distances. This could potentially increase the repeater spacing in these systems. It is also believed to provide a solution to the anticipated alternative band search in the near future with the advancement of technology.

Science Code	:	90532
Key Words	:	TDFA, multi-pass, S-band, multi-stage
Page Number	:	162
Supervisor	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmalar boyunca ilk günden bu yana beni yönlendiren, bilgi ve birikimlerini esirgemeyen, umutsuzluğa kapıldığım anlarda beni cesaretlendiren, ihtiyaç duyduğum her an bana yardımcı olmakta hiç tereddüt etmeyen, her daim güler yüzlü ve anlayışlı olan danışmanım sayın Prof. Dr. Murat YÜCEL'e teşekkür eder, şükran ve minnetlerimi sunarım. Her daim desteğini esirgemeyen mesai arkadaşlarım Fatma SALTEK'e, bana hayat boyu çalışmanın önemini öğreten ve hep hatırlatan annem ve babama teşekkür ederim. Hayatıma huzur ve mutluluk katan, varlığına hep şükrettiğim ve şükredeceğim sevgili eşim Mehmet Şamil DİNCER'e, biricik oğlum İbrahim Kerem DİNCER'e, güzel kızlarım Elif Miray DİNCER'e ve Feyza Nil DİNCER'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Çalışmaya yapmış oldukları destekten ötürü Optisystem Inc.'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 7

3. OPTİK YÜKSELTEÇLER 23

3.1. Optik Yükselteçlerin Gelişim Süreci 23

3.2. Optik Yükselteç Çeşitleri 25

3.2.1. Yarıiletken optik yükselteçler 26

3.2.2. Fiber yükselteçler 27

4. TULYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLER 37

4.1. Tulyum'un Tarihi ve Kullanım Alanları 38

4.2. Tulyum'un Özellikleri 39

4.2.1. Tulyum'un fiziksel ve kimyasal özellikleri 39

4.2.2. Tulyum'un enerji seviyesi 40

4.2.3. Tulyum'un yayılım spektrumu 43

4.3. TKFY'in Teorik Analizi 45

Sayfa

5. ÇOK GEÇİŞLİ YÜKSELTEÇ KONFİGÜRASYONLARI 55

5.1. Tek Geçişli Yükselteç Konfigürasyonu 55

5.2. İki Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları 56

5.2.1. Tek aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu 56

5.2.2. Çift aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu 58

5.3. Üç Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları 59

5.3.1. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu I 59

5.3.2. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu II 60

5.3.3. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu 61

5.4. Dört Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları 61

5.4.1. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu 61

5.4.2. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu I 62

5.4.3. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu II 63

5.4.4. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu III 63

5.4.5. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu 64

6. ÇOK GEÇİŞLİ TKFY ÇALIŞMASI 65

6.1. Pompa Dalgaboyu ve Pompalama Yönü Seçimi 67

6.2. Çift Geçişli TKFY 72

6.2.1. Tek aşamalı çift geçişli TKFY 72

6.2.2. İki aşamalı çift geçişli TKFY 78

6.2.3. İki geçişli TKFY konfigürasyonlarının karşılaştırılması 84

6.3. Üç Geçişli TKFY 86

6.3.1. İki aşamalı üç geçişli TKFY I 86

6.3.2. İki aşamalı üç geçişli TKFY II 92

Sayfa

6.3.3. Üç aşamalı üç geçişli TKFY 99

6.3.4. Üç geçişli TKFY konfigürasyonlarının karşılaştırılması 105

6.4. Dört Geçişli TKFY Çalışması 107

6.4.1. İki aşamalı dört geçişli TKFY 107

6.4.2. Üç aşamalı dört geçişli TKFY I 114

6.4.3. Üç aşamalı dört geçişli TKFY II 120

6.4.4. Üç aşamalı dört geçişli TKFY III 127

6.4.5. Dört aşamalı dört geçişli TKFY 133

6.4.6. Optimize edilmiş DADG-TKFY 138

6.4.7. Dört geçişli TKFY konfigürasyonlarının karşılaştırılması 139

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 143

7.1. Çok Geçişli TKFY ile Çok Geçişli EKFY'in Karşılaştırılması 143

7.2. En Verimli Çok Geçişli TKFY Konfigürasyonları 145

7.3. Tezin Katkısı 147

KAYNAKLAR 149

ÖZGEÇMİŞ 161

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Bir kısım nadir toprak elementi katkı iyonları ve özellikleri 31

Çizelge 4.1. Tulyum'un özellikleri 40

Çizelge 4.2. Tulyum'un elektron ve kabuk konfigürasyonu 40

Çizelge 4.3. Tulyum iyonlarının enerji seviyeleri 41

Çizelge 4.4. Tulyum iyonlarının geçiş dalgaboyları 42

Çizelge 6.1. Yapılan simülasyonlarda kullanılan ortak yükselteç parametreleri 66

Çizelge 6.2. Pompa dalgaboyu ve Pompalama yönü çalışmasında kullanılan değerler. 69

Çizelge 6.3. ÇG-TKFY için yapılan optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 77

Çizelge 6.4. İAÇG-TKFY için yapılan optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 84

Çizelge 6.5. İki geçişli TKFY optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen elde edilen değerler 85

Çizelge 6.6. İAÜG-TKFY I için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 91

Çizelge 6.7. İAÜG-TKFY II için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 98

Çizelge 6.8. ÜAÜG-TKFY için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 104

Çizelge 6.9. Üç geçişli TKFY optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 106

Çizelge 6.10. İADG-TKFY II için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 113

Çizelge 6.11. ÜADG-TKFY I için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 120

Çizelge 6.12. ÜADG-TKFY II için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 126

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.13. ÜADG-TKFY III için karşılaştırma çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 132

Çizelge 6.14. DADG-TKFY için karşılaştırma çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 138

Çizelge 6.15. Dört geçişli TKFY karşılaştırma çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 140

Çizelge 6.16. Mevcut çalışmada ve literatürde kullanılmış çok geçişli TKFY-çok geçişli EKFY karşılaştırması 144

Çizelge 6.17. Çok geçişli TKFY karşılaştırma çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler 146

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Optik yükselteç türleri 26

Şekil 3.2. Temel yarıiletken yükselteç şeması 27

Şekil 3.3. Raman yükseltecin yapısı 28

Şekil 3.4. EKFY'nin basit şematik gösterimi 32

Şekil 3.5. Er^{3+}'um soğurma ve yayılma spektrumları 32

Şekil 3.6. Ho^{3+}'um soğurma ve yayılma spektrumları 34

Şekil 3.7. Yb^{3+}'um soğurma ve yayılma spektrumları 35

Şekil 3.8. Pr^{3+}'um soğurma ve yayılma spektrumları 36

Şekil 4.1. Geçiş dalgaboylarının yer aldığı Tulyum'un enerji seviye diyagramı 43

Şekil 4.2. Tm^{3+}'um soğurma ve yayılma spektrumları 44

Şekil 4.3. Tulyum'un soğurma ve yayılma spektrumunun Florit (ZBLAN) ve Silika tabanlı fiber üzerinden karşılaştırması 44

Şekil 4.4. Florit camdaki Tulyum iyonlarının enerji diyagramı 46

Şekil 4.5. Oran denklemleri analizi için oluşturulan model 47

Şekil 4.6. Silika fiberdeki Tulyum iyonlarının enerji seviyeleri 53

Şekil 5.1. Tek geçişli yükselteç konfigürasyonu 55

Şekil 5.2. Tek aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonları 57

Şekil 5.3. İki aşamalı çift geçişli yükselteç tasarımı 58

Şekil 5.4. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu I 60

Şekil 5.5. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu II 60

Şekil 5.6. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu 61

Şekil 5.7. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu 62

Şekil 5.8. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu I 62

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.9. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu II 63

Şekil 5.10. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu III 63

Şekil 5.11. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu 64

Şekil 6.1. Optisystem Programında kullanılan Tm^{+3} yayılma spektrumu 66

Şekil 6.2. Pompa dalgaboyu ve pompalama yönü araştırmasında kullanılan çift geçişli TKFY düzenekleri 68

Şekil 6.3. Farklı pompa dalgaboylarında beslenen tüm çift TKFY tasarımların kazanç ve gürültü şekli grafikleri 70

Şekil 6.4. Farklı pompa yönlerinde tüm çift TKFY tasarımların pompa gücü değişiminde kazanç ve gürültü şekli grafikleri 71

Şekil 6.5. Tek aşamalı çift geçişli TKFY 72

Şekil 6.6. ÇG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişim grafiği 73

Şekil 6.7. ÇG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 73

Şekil 6.8. ÇG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi 74

Şekil 6.9. ÇG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi 75

Şekil 6.10. ÇG-TKFY için TKF boyu-kazanç değişimi 76

Şekil 6.11. ÇG-TKFY için TKF 2 boyu-gürültü şekli değişimi 76

Şekil 6.12. ÇG-TKFY konfigürasyonunda her geçişte elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 77

Şekil 6.13. Çift Aşamalı Çift Geçişli TKFY 78

Şekil 6.14. İAÇG-TKFY için Giriş gücü-kazanç değişimi 79

Şekil 6.15. İAÇG-TKFY için Giriş gücü-gürültü şekli değişimi 79

Şekil 6.16. İAÇG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi 80

Şekil 6.17. İAÇG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi 81

Şekil 6.18. TKF 1 boyu optimizasyonu 82

Şekil 6.19. İAÇG-TKFY için TKF 2 boyu-kazanç değişimi 82

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.20. İAÇG-TKFY için TKF 2 boyu-gürültü şekli değişimi 83

Şekil 6.21. İAÇG-TKFY konfigürasyonunun her iki geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 84

Şekil 6.22. ÇG-TKFY ve İAÇG-TKFY tasarımlarının kazanç ve gürültü şekli karşılaştırması 85

Şekil 6.23. İki aşamalı üç geçişli TKFY I 86

Şekil 6.24. İAÜG-TKFY I için giriş gücü-kazanç değişimi 87

Şekil 6.25. İAÜG-TKFY I için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 88

Şekil 6.26. İAÜG-TKFY I için pompa gücü-kazanç değişimi 89

Şekil 6.27. İAÜG-TKFY I için pompa gücü- gürültü şekli değişimi 89

Şekil 6.28. İAÜG-TKFY I için TKF 2 boyu-kazanç değişimi 90

Şekil 6.29. İAÜG-TKFY I için TKF 2 boyu-gürültü şekli değişimi 91

Şekil 6.30. İAÜG-TKFY I konfigürasyonunun her üç geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 92

Şekil 6.31. İki aşamalı üç geçişli TKFY I 93

Şekil 6.32. İAÜG-TKFY II için giriş gücü-kazanç değişimi 94

Şekil 6.33. İAÜG-TKFY II için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 94

Şekil 6.34. İAÜG-TKFY II için pompa gücü-kazanç değişimi 95

Şekil 6.35. İAÜG-TKFY II için pompa gücü- gürültü şekli değişimi 96

Şekil 6.36. İAÜG-TKFY II için TKF boyu-kazanç değişimi 97

Şekil 6.37. İAÜG-TKFY II için TKF boyu-gürültü şekli değişimi 97

Şekil 6.38. İAÜG-TKFY II konfigürasyonunun her üç geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 98

Şekil 6.39. Üç aşamalı üç geçişli TKFY 99

Şekil 6.40. ÜAÜG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi 100

Şekil 6.41. ÜAÜG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 100

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.42. ÜAÜG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi 101

Şekil 6.43. ÜAÜG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi 102

Şekil 6.44. ÜAÜG-TKFY için TKF 2 boyu-kazanç değişimi 103

Şekil 6.45. ÜAÜG-TKFY için TKF 2 boyu-gürültü şekli değişimi 104

Şekil 6.46. ÜAÜG-TKFY konfigürasyonunun her iki geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 105

Şekil 6.47. İAÜG-TKFY I, İAÜG-TKFY II ve ÜAÜG-TKFY tasarımlarının kazanç ve gürültü şekli karşılaştırması 106

Şekil 6.48. İki aşamalı dört geçişli TKFY 107

Şekil 6.49. İADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi 108

Şekil 6.50. İADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 109

Şekil 6.51. İADG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi..... 110

Şekil 6.52. İADG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi..... 111

Şekil 6.53. İADG-TKFY için TKF boyu-kazanç değişimi..... 112

Şekil 6.54. İADG-TKFY için TKF boyu-gürültü şekli değişimi..... 113

Şekil 6.55. İADG-TKFY konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 114

Şekil 6.56. Üç aşamalı dört geçişli TKFY 114

Şekil 6.57. ÜADG-TKFY I için giriş gücü-kazanç değişimi..... 115

Şekil 6.58. ÜADG-TKFY I için giriş gücü-gürültü şekli değişimi..... 116

Şekil 6.59. ÜADG-TKFY I için pompa gücü-kazanç değişimi..... 117

Şekil 6.60. İADG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi..... 118

Şekil 6.61. ÜADG-TKFY I için TKF boyu-kazanç değişimi..... 119

Şekil 6.62. ÜADG-TKFY I için TKF boyu-gürültü şekli değişimi..... 119

Şekil 6.63. ÜADG-TKFY I konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi..... 120

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.64. Üç aşama dört geçişli TKFY II 121

Şekil 6.65. ÜADG-TKFY II için giriş gücü-kazanç değişimi 122

Şekil 6.66. ÜADG-TKFY II için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 122

Şekil 6.67. ÜADG-TKFY II için pompa gücü-kazanç değişimi 123

Şekil 6.68. ÜADG-TKFY II için pompa gücü-gürültü şekli değişimi 124

Şekil 6.69. ÜADG-TKFY II için TKF boyu-kazanç değişimi 125

Şekil 6.70. ÜADG-TKFY II için TKF boyu-gürültü şekli değişimi 125

Şekil 6.71. ÜADG-TKFY III konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 126

Şekil 6.72. Üç aşama dört geçiş TKFY III 127

Şekil 6.73. ÜADG-TKFY III için giriş gücü-kazanç değişimi 128

Şekil 6.74. ÜADG-TKFY III için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 128

Şekil 6.75. ÜADG-TKFY III için pompa gücü-kazanç değişimi 129

Şekil 6.76. ÜADG-TKFY III için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 130

Şekil 6.77. Üç aşamalı dört geçişli TKFY III için TKF boyu-kazanç değişimi 131

Şekil 6.78. Üç aşamalı dört geçişli TKFY III için TKF boyu-gürültü şekli değişimi 131

Şekil 6.79. ÜADG-TKFY III konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 132

Şekil 6.80. Dört aşamalı dört geçişli TKFY 133

Şekil 6.81. DADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi 134

Şekil 6.82. DADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 134

Şekil 6.83. DADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi 135

Şekil 6.84. DADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 136

Şekil 6.85. DADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi 137

Şekil 6.86. DADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi 138

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.87. DADG-TKFY konfigürasyonunun her iki geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi 139

Şekil 6.88. İADG-TKFY, ÜADG-TKFY I, ÜADG-TKFY II, ÜADG-TKFY III ve DADG-TKFY tasarımlarının kazanç ve gürültü şekli karşılaştırması 140

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Oda sıcaklığında Tulyum 39

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
dB	Desibel
dBm	Desibel miliwatt
c	Işık hızı
^{o}C	Santigrat
E_1	Alt Enerji Seviyesi
E_2	Üst Enerji Seviyesi
f	Frekans
^{o}F	Fahrenhayt
Gb	Gigabit
h	Plank sabiti
Hz	Hertz
J	Joule
I_p	Pompa güç yoğunluğu
I_s	Sinyal güç yoğunluğu
K	Kelvin
m	Metre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
mW	Miliwatt
N	Toplam popülasyon yoğunluğu
nm	Nanometre
P_p	Lokal pompa gücü
ppm	Milyonda bir birim
ν_p	Pompa ışığı frekansı
ν_s	Sinyal ışığı frekansı
µ	Kendiliğinden yayılma faktörü
µs	Mikrosaniye

Simgeler	**Açıklamalar**
$\boldsymbol{\Delta N}$	Popülasyon ters birikimi
$\boldsymbol{\gamma_{ij}}$	i seviyesinden j seviyesine kendiliğinden yayılma
$\boldsymbol{\tau_1}$	$^3H_4$ seviyesinin ömrü
$\boldsymbol{\tau_3}$	$^3F_4$ seviyesinin ömrü
$\boldsymbol{\sigma_p}$	Pompa ışığı için etkin kesit alanı
$\boldsymbol{P_{\lambda+}}$	Pozitif ilerlemiş yayılma spektral güç yoğunluğu
$\boldsymbol{P_{\lambda-}}$	Negative ilerlemiş yayılma spectral güç yoğunluğu

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ÇG	Çift geçiş
İAÇG	İki aşama çift geçiş
DA	Dört aşama
DADG	Dört aşamalı dört geçişli
DBÇ	Dalgaboyu çoklama
DFK	Dört foton karışımı
DG	Dört geçişli
EKF	Erbiyum katkılı fiber
EKFY	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
E/O	Elektrik/Optik
FBI	Fiber Bragg Izgara
FBY	Fiber Brilliouin yükselteç
FOPY	Fiber optik parametrik yükselteç
FRY	Fiber Raman yükselteç
FY	Fiber yükselteç
GA	Genetik algoritma
HB-EKF	Hafniyum-Bizmut katkılı erbiyum katkılı fiber
HBO	Hata bit oranı
HKF	Holmiyum katkılı fiber
HKFY	Holmiyum katkılı fiber yükselteç
KDO	Kazanç değişim oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
KFY	Katkılı fiber yükselteçler
İA	İki aşama
İADG	İki aşamalı dört geçişli
İAÜG	İki aşamalı üç geçişli
İÇG	İleri yönlü çift geçiş
İİÇG	İleri-ileri yönlü çift geçiş
İİGÇG	İleri-ileri-geri yönlü çift geçiş
İGÇG	İleri-geri yönlü çift geçiş
İKFY	İterbiyum katkılı fiber yükselteç
MR	Manyetik rezonans
NTE	Nadir toprak elementi
NTEKFY	Nadir Toprak Elementi Katkılı Optik Yükselteçler
O/E	Optik/Elektrik
PKFY	Paraseodmiyum katkılı fiber yükselteç
PFY	Parametrik fiber yükselteç
SGO	Sinyal gürültü oranı
SY-DBÇ	Süper yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama
TKF	Tulyum katkılı fiber
TKFY	Tulyum katkılı fiber yükselteç
URS	Uyarılmış Raman saçılması
UBS	Uyarılmış Brillouin saçılması
ÜA	Üç aşama
ÜADG	Üç aşamalı dört geçişli
ÜAÜG	Üç aşamalı üç geçişli
ÜG	Üç geçişli
YDBÇ	Yoğun Dalgaboyu Çoğullama
YOY	Yarıiletken optik yükselteç
YKY	Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayınım
YZ	Yapay Zekâ

1. GİRİŞ

Günümüzde bilgi edinmenin en popüler kaynağı ve bilgi alışveriş aracı internet olarak görülmektedir. İnternet, hayatın her alanına dokunmuş ve insan hayatını önemli ölçüde değiştirmiştir. Artık online alışveriş, yemek siparişi gibi e-ticaret işlemleri yapılırken, online ödeme sistemleri üzerinden nakitsiz ödeme yapılabilmektedir. Sosyal ağ uygulamaları ve siteleri ile dünyanın her yerindeki insanlar birbirine bağlanmakta, video ve resim paylaşabilmektedir. Covid-19 salgını ile birlikte önceleri mecburiyetten kullanılan "Uzaktan Çalışma" şekli artık pek çok firma için diğer çalışma şekillerinin arasına eklenmiştir. Zoom, Skype, Webex gibi telekonferans uygulamaları kullanılarak uzaktan eğitim, uzaktan sınav, uzaktan mülakat gibi aktiviteler günlük hayatta yerini almıştır. Sosyal platformlarda kitleler birleşerek toplu eylemlere katılırken, tüketiciler ürün yorumları üzerinden üreticileri yönlendirmeye başlamıştır. Cerrahlar kıtalar arası ameliyatlara katılırken, dijital sağlık ürünleri sağlığın takibine ve yönetilmesine yardımcı olmaktadır. Sanal Gerçeklik ile kullanıcılar gerçek dünyadan koparak sanal bir dünyayı deneyimlerken, Yapay Zekâ (YZ); sağlık, üretim, finans ve ulaşım gibi alanlarda hayatı kolay, verimli ve daha eğlenceli kılmaktadır.

İnternetin bir iletişim aracı olarak giderek daha önemli bir rol oynadığı göz önüne alındığında, Birleşmiş Milletler yakın zamanda internet hizmetlerine erişimin insan hakkının bir parçası olması gerektiğini önermiştir [1]. Bu hakkın kullanılmasında ise Optik haberleşme sistemleri büyük öneme sahiptir. Optik haberleşme sistemlerinde ses, veri, görüntü gibi çeşitli bilgileri taşımak için ışık kullanılır. Tarihi dumanla haberleşen Kızılderililere kadar dayanmaktadır. 18. yüzyılda, Avrupa'da semafor denilen işaret kollarından yararlanılan optik telgraf sistemleri kullanılmaya başlanmıştır [2]. 19. yüzyılda, Alexander Graham Bell, fotofon deneyi ile ilk optik haberleşme sistemini geliştirmiştir. Bu sistemde, ses sinyali, güneş ışığı ile modüle edilmiş ve atmosfer üzerinden iletilmiştir. 20. yüzyılda, fiber optiklerin geliştirilmesiyle birlikte, optik haberleşme sistemleri daha uzun mesafelere, daha yüksek hızlarda veri iletmeye başlamıştır [3]. 1970'lerde, ilk fiber optik haberleşme sistemlerinin kurulmasını, denizaltı kabloları ve şehir içi ağlar gibi çeşitli uygulamaların kullanılması takip etmiştir. 1980'lerde hızla yaygınlaşırken telefon, televizyon ve internet gibi çeşitli iletişim hizmetlerinde kullanılmaya başlanmıştır.

1990'larda, fiber optik haberleşme sistemleri, artık dünyanın her yerinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [4].

Günümüzde, optik haberleşme sistemlerinin performans ve verimliliğini arttırmak amacıyla farklı teknolojiler kullanılmaktadır. Bu teknolojik sistemlerden biri olan Dalgaboyu Çoklama (DBÇ), farklı dalga boylarındaki ışık sinyallerini tek bir fiber optik kablo üzerinden iletmeye olanak tanımaktadır. DBÇ sistemleri, optik ağların daha esnek bir şekilde kurulmasını ve yönetilmesini sağlarken, bu yönü ile optik haberleşme sistemlerinin yeni uygulamalara uyarlanmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca DBÇ sistemleri, veri iletim kapasitesini önemli ölçüde artırırken, daha fazla veri iletmek için gereken fiber optik kablo miktarını azaltarak maliyeti düşürür ve sonuç olarak daha verimli iletim sağlar [5-8].

Optik iletişim sistemlerinde kullanılan bir diğer önemli teknolojik bileşen de optik yükselteçlerdir. Bu cihazlar, optik sinyalleri güçlendirmek için kullanılır ve bu da sinyallerin iletim mesafesini artırırlar. Sinyalleri güçlendirmenin yanı sıra düşük ek kayıplar sağlayarak sinyal kalitesini artırırlar. Bu, optik iletişim sistemlerinin daha verimli ve güvenilir çalışmasına yardımcı olur [9].

Nadir Toprak Elementi Katkılı Optik Yükselteçler (NTEKFY), optik yükselteç çeşitlerinden biridir. Bu tür yükselteçler, Nadir Toprak Elementlerinin (NTE) üretim aşamasında silika tabanlı optik fiberin çekirdeğine eklenerek özel üretim teknikleri ile üretilirler. NTEKFY'de fiber içine katkılanan NTE, çalışma dalgaboyu ve kazanç bant genişliği gibi yükselteç özelliklerini belirler [10]. NTEKFY çeşitlerinden şimdiye kadar üzerinde en fazla araştırma yapılan yükselteç, Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EKFY) olmuştur. EKFY ile günümüze kadar en çok kullanılan haberleşme bandı olan C bandında ve L bandında yüksek verimlilik elde edilebilmektedir [11-13]. Fakat gelişen teknoloji ile artan arzı karşılayacak hız ve kapasite düşünüldüğünde, geleneksel çalışma bandı olan C ve L bandlarının yetersiz kalması yakın gelecekte kaçınılmaz görülmektedir. Bu nedenle alternatif ek band aralığı sunarak menzili arttıracak olan S bandına yoğunlaşan çalışmalar her geçen gün daha da artmaktadır [14-18]. Bu çalışmalardan bir kısmı Fiber Raman Yükselteçler (FRY) üzerinedir. Ancak FRY çalışmalarında pompa sayısı ve kazanç düzleştirme kısıtlarından dolayı S bandında bu gibi kısıtları bulunmayan ve iyi kazanç elde edilebilen Tulyum Katkılı Fiber Yükselteç (TKFY) daha iyi bir alternatif olarak görülmektedir.

TKFY, EKFY'ye göre düşük fiber kaybı, düşük dispersiyon ve OH^- iyonlarından kaynaklanan düşük soğurma kaybı gibi daha fazla avantaj sunar [19]. TKFY'nin kazanç değerini iyileştirmek, düşük gürültü değerleri elde edebilmek için TKF uzunluğu, Tulyum iyon yoğunluğu, giriş gücü, pompa gücü gibi temel parametrelerin değiştirildiği pek çok çalışma bulunmaktadır [20-25]. Bunların dışında farklı yükselteçlerin çeşitli bağlantı şekilleri ile bir arada kullanılmasıyla oluşturulan hibrit yükselteç çalışmaları da yapılmıştır [26-44]. Son yıllarda ise çok geçişli (≥2) tasarım çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar temel yükselteç devresine bir ayna ya da sirkülatör eklenerek yükseltilmiş sinyalin yeniden yükselteçten geçirilerek yeniden yükseltilmesi mantığına dayanmaktadır. Yapılmış olan çok geçişli çalışmalar incelendiğinde hepsinin C ve L bandında EKFY üzerine yapıldığı görülecektir [45-54]. S bandında ise çok geçişli (≥2) yükselteç tasarımı üzerine henüz bir çalışma yapılmadığı, dolayısıyla literatürde bu konuda boşluk olduğu görülecektir.

Tezin organizasyonu

Bu araştırmada, çok geçişli TKFY çalışmaları yapılarak S bandında yüksek kazanç elde edilebilen yükselteçler tasarlanmıştır. İlk olarak, literatürde çok geçişli (2≥) TKFY çalışması olmadığından [20] hariç), şimdiye kadar kullanılan çok geçişli EKFY düzeneklerinden yararlanılmıştır. Çok geçişli EKFY üzerinde yapılmış olan çalışmaların TKFY'ye adaptasyonu araştırılmıştır. EKFY ile 6 geçişli düzeneğe kadar araştırma yapılmıştır ancak yapılan ön çalışmalarda TKFY için doyuma daha erken gireceği düşünüldüğünden 3 ve 4 geçişli düzenek yeterli görülmüştür. Daha sonra çok geçişli TKFY düzenekleri oluşturulmuş ve temel parametrelerin sistem kazancına etkileri incelenmiştir. Optimum değerler belirlenerek elde edilen kazanç ve gürültü değerleri karşılaştırılmıştır. Üzerinde çalışılan tüm tasarımlar karşılaştırılarak en verimli tasarım belirlenmiştir.

Bu çalışmada, ikinci bölümde; yapılan literatür araştırmasında incelenen çalışmalara yer verilmiştir. Bu bölümde sırasıyla pompalama yönü ve yükselteç parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili olan çalışmalardan, TKFY ile kullanılarak hibrit yükselteç oluşturulan çalışmalardan, çok geçişli EKFY çalışmalarından bahsedilmiştir. Bunların yanında ayrıca İKFY, HKFY ve FRY çalışmalarına da yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde; optik yükselteçlerin gelişim sürecinden ve çeşitlerinden bahsedilmiştir. Temel optik yükselteç çeşitlerinden bahsedilirken, bu tezin temelini oluşturun TKFY ile aynı

alt grupta yer alan EKFY, İKFY, PKFY gibi nadir toprak elementi katkılı fiber yükselteç çeşitlerinden, bunların yayılma ve soğurma spektrumlarından, verimli çalıştığı dalgaboyu aralığından ve pompa dalgaboyundan bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde; TKFY'ye ismini veren nadir toprak elementi Tulyum hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Tulyum'un tarihi ve kullanım alanları, fiziksel ve kimyasal özellikleri, enerji ve yayılım spektrumundan ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Daha sonra silika ve florit tabanlı TKFY'nin teorik analizi yapılarak, oran denklemlerine yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, literatürde şimdiye kadar kullanılmış olan çok geçişli yükselteç konfigürasyonları ile daha önce yapılmış bir çalışma rastlanmamış fakat muhtemel çok geçişli yükselteç tasarımlarından bahsedilmiştir. Bölüm içerisinden iki adet iki geçişli, üç adet üç geçişli ve beş adet dört geçişli olmak üzere toplamda on farklı çok geçişli yükselteç tasarımı ele alınmıştır.

Altıncı bölümde tezin ana konusu olan çok geçişli TKFY çalışmaları yer almaktadır. Bu bölümde ilk olarak, en uygun pompa dalgaboyu ve pompalama yönü belirlenmiş, daha sonra elde edilen değerler kullanılarak muhtemel çok geçişli TKFY konfigürasyonları tasarlanmıştır. Yapılan çalışma ile giriş gücünün her bir konfigürasyona etkisi araştırılıp en uygun giriş gücü belirlenmiş, daha sonra pompa gücü ve TKF uzunlukları optimize edilmiştir. Daha sonra belirlenen giriş gücü, pompa gücü değerleri kullanılarak TKF boyları optimize edilmiştir. Her bir çalışma sonunda elde edilen veriler kullanılarak kazanç ve gürültü şekli değişim grafikleri oluşturulmuştur. Optimize edilen konfigürasyonların her bir geçişi için kazanç ve gürültü şekli değişimleri de incelenmiştir. İki geçişli, üç geçişli ve dört geçişli konfigürasyonları ile her bir grup kendi içinde olmak üzere benzer koşullar sağlanarak karşılaştırma yapılmış olup, her grup için en verimli konfigürasyon belirlenmiştir.

Yedinci ve son bölümde yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilip, literatürdeki diğer çok geçişli yükselteç örnekleri ile karşılaştırılarak çalışmanın öneminden bahsedilmiştir.

Araştırmanın amacı

Gelişen teknoloji ve artan talepler karşısında mevcut haberleşme bandları olan C ve L bandının yakın gelecekte yetersiz kalması beklenmektedir. Bu nedenle alternatif band arayışları devam etmekte olup, S-bandında yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır.
Literatür incelendiğinde, S-bandında çok geçişli TKFY ile ilgili boşluk olduğu görülecektir. Bu tez çalışması ile literatürdeki bu boşluğun kapatılmayı ve yakın gelecekte yaşanması öngörülen alternatif band arayışına çözüm olması amaçlanmaktadır. Bu nedenle oluşturulan tasarımlar araştırılmış ve kullanılabilecek yüksek kazanç sağlanabilen en verimli çok geçişli konfigürasyonlar belirlenmiştir. Belirlenen bu tasarımların yeni nesil optik haberleşme sistemlerinde ön yükselteç olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Araştırmanın önemi

Çok geçişli TKFY tasarımlarının, uzun mesafeli yeni nesil fiber optik haberleşme sistemlerinde ön yükselteç olarak kullanıldığında tekrarlayıcı mesafesinin arttırılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma ile ilk kez üç ve dört geçişli TKFY düzeneği denenmiş olup, yeni ve özgün bilgi üretimi ve paylaşımı sağlanarak, literatürde bu alandaki boşluk doldurulmuştur. Çok Geçişli TKFY'lerin gelişen teknoloji ile yakın gelecekte yaşanması öngörülen alternatif band arayışına çözüm olacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, yapılan çalışmanın konusu ile ilgili olan çalışmalara kısaca yer verilmiştir. Konu ile ilgili geçmişten günümüze literatür taraması yapılarak çalışmaya temel oluşturacak ve ışık tutacak veriler araştırılmıştır.

İlgili alan yazın incelendiğinde genellikle TKFY verimliliğini arttırmaya yönelik çok çeşitli optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı gözlemlenmiştir. Araştırmalarda, çoğunlukla teorik olarak sistem düzeneği oluşturulmuş ve sistem parametreleri belirlenmiştir. Parametreler genel olarak optik fiberin; uzunluğu, katkı yoğunluğu, katkı yarıçapı, pompanın; sayısı, yönü, dalgaboyu ve gücü, optik sinyallerin başlangıçtaki güçleri ifade eder. Yapılan çalışmaların başarısını ölçmek için, elde edilen maksimum kazanç, doğrusal kazanç aralığının uzunluğu, gürültü değerlerinin kabul edilebilir seviyede olması gibi faktörler dikkate alınabilir.

Literatürde tek geçişli TKFY üzerine oldukça çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazılarında pompalama yönü baz alınarak tek yönlü TKFY [22,55-59] ve çift yönlü TKFY [60-66] konfigürasyonları yapılmış olup, bazılarında ise TKFY'e ait TKF uzunluğu, nümerik açıklık, iyon yoğunluğu, katkı yarıçapı gibi temel yükselteç parametreleri değiştirilerek [22,26,56,67-69] daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. TKFY, diğer yükselteç çeşitleri ile kullanılarak hibrit tasarımlar oluşturulmuştur. Bu tasarımların bir kısmı EKFY ile [27-35], bir kısmı Raman Yükselteçler ile [36-41], bir kısmı ise Holmiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (HKFY) [42,43] ve Fiber Optik Parametrik Yükselteç (FOPY) ile [44,70] beraber kullanılması ile oluşturulan hibrit düzeneklerdir.

Literatür incelendiğinde, 1875–2000 nm bandında yapılan silika bazlı çok geçişli TKFY üzerine bir çalışma bulunmaktadır [20]. Ancak S bandında çok geçişli TKFY ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle çok geçişli EKFY üzerine yapılan çalışmalar incelenerek [45-54, 71-74], bunların TKFY'ye adaptasyonu araştırılmıştır.

El-Nahal ve Husein, bir TKFY'nin kazanç ve gürültü değeri, pompa gücü ve Tulyum katkılı fiber (TDF) uzunluğu gibi faktörler açısından incelemiştir. Bunların yanında ayrıca,

TKFY’lerin tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer faktörler de tartışılmıştır. Bunlar arasında, TKF'nin iyon yoğunluğu, çekirdek yarıçapı ve sayısal açıklığı yer almaktadır. Bu faktörlerin optimum değerleri, 16x10 Gb/s DBÇ sistemleri için 1450-1530 nm dalga boyu aralığında elde edilmiştir. Fiber uzunluğu değişiminin 1450 nm-1530 nm aralığındaki çıkış spektrumuna etkisini araştırmışlardır. Çıkış gücü, 1450 nm de artmaya başlarken, 1470 nm dalgaboyunda maksimum değerini almakta ve sonrasında düşüşe geçmektedir [22].

Boen Qu yapmış olduğu çalışmada Genetik Algoritma (GA) kullanarak fiber uzunluğu ve iyon konsantrasyonunu optimize etmiştir. Bunu yükselteç performansı, fiber uzunluğu ve iyon konsantrasyonu ile ilişkili bir matematiksel model kullanarak hesaplamıştır. Makalede yükselteç performansının fiber uzunluğu ve iyon konsantrasyonuna bağlılığını gösteren bir veri modeli sunulmuştur. Sonuç olarak; GA, yükselteç kazancını önemli ölçüde artıran optimal fiber uzunluğu ve iyon konsantrasyonu değerlerini vermiştir. Bu çalışma, TKFY’lerin S-bandı amplifikatörleri için etkili bir tasarım yöntemi olarak GA'nın potansiyelini göstermektedir. Fakat çalışma, diğer optimizasyon teknikleri ile GA performansının karşılaştırılmasını içermemektedir. Ayrıca sunulan model, deneysel verilerle doğrulanmaya ihtiyaç duymaktadır [25].

Xiang ise GA kullanarak 1900 nm civarı dalgaboylarında fiber uzunluğu ve iyon yoğunluğu gibi parametreleri optimize ederek en yüksek kazanç elde etmeye çalışmıştır. Runge-Kutta yöntemi ile çözülen denklemlere göre, MATLAB kullanılarak bir fiber yükselteç simüle edilmiştir. Çalışma sonucunda, GA ile, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek kazanç değerleri elde etmiştir. En iyi parametre eşleşimi; fiber uzunluğu 1 m ve iyon konsantrasyonu 3,5 x 10^{25} m^{-3} kullanıldığında en yüksek kazanç 27,5 dB’ye ulaşmıştır. Makalede ayrıca iki ayrı optimizasyon metodu olan çift geçiş ve genetik algoritma yöntemleri avantaj ve dezavantajları bakımından karşılaştırılmıştır [55].

Bir başka çalışmada El-Nahal ve Husein, TKF uzunluğu ve pompa gücünün TKFY kazancına ve gürültü şekline etkisini incelemiştir. Düzeneklerinde ileri yönlü 1064 nm dalgaboyundaki pompa lazeri kullanmışlardır. Pompa gücü 1000 mW-2000 mW aralığında değiştirilerek denenmiştir. TKF uzunluğu olarak 2,5 m, 5 m ve 7,5 m seçilmiştir. Sonuç olarak elde edilen verilerde, 5 m ve 7,5 m için pompa gücü arttıkça kazancın arttığı, 2,5 m uzunluğu için ise kazancın sabit kaldığı görülmüştür. Pompa gücü ve TKF uzunluğu değişiminin gürültü şekli üzerindeki etkisi çok düşüktür. TKF uzunluğu 10 m, pompa gücü

2000 mW olduğunda elde edilen kazanç 16,7 dB'dir. Bu kazanç değeri, uzun iletim sistemleri için tasarlanan düşük pompa güçlü TKFY mantığına ters düşmektedir. Bu nedenle bu yükseltecin tek yönlü tasarımlarında uzun TKF önerilmemektedir [56].

Khamis ve Ennser çalışmalarında, bant içi ve dolaylı pompalama diye isimlendirdikleri iki pompalama şeklini kullanarak teorik bir TKFY modeli tasarlamışlardır. MATLAB'da bir program geliştirerek, TKFY'in statik davranışını incelemek için Runge-Kutta metodu kullanmışlardır. Yapılan çalışmada bant içi pompalamada $^3H_4$, dolaylı pompalamada $^3F_4$ seviyelerine pompalanmıştır. Simülasyon sonuçlarında elde edilen veriler, band içi pompalama şeklinde çıkış kazancının, dolaylı pompalamadaki çıkış kazancından yüksek olduğunu göstermiştir. Aynı şartlarda, gürültü şekli ise her iki durumda aynı değerdedir. Giriş gücü -10 dBm alındığında bant içi pompalama şeklinde çıkış kazancı 1840 nm de 30 dB iken, dolaylı pompalamada 22 dB'dir. Bu veriler, bant içi pompalama kullanıldığında TKFY'in daha verimli olduğu göstermektedir [57].

Li ve arkadaşları, 2000 nm bandında sırayla TKFY-C ve TKFY-L olarak adlandırdıkları iki farklı TKFY tasarımı yapmışlardır. TKFY-C tasarımında, TKF uzunluğu 12 m'dir ve 1565 nm dalgaboyunda ileri yönlü olarak tek modlu Er^{+3} / Yb^{+3} katkılı fiber lazerle pompalanmaktadır. Pompa ve sinyal dalgaboyları bir DBÇ kuplörü kullanılarak bir araya getirilmiştir. TKFY-L tasarımında ise giriş izolatörü ile DBÇ kuplörünün arasına fazladan 4 m TKF yerleştirilmiştir. Çalışma sonunda, gürültü şeklinde 110 nm'lik bir bant aralığında 6,3 dB'den daha az değerler, kazançta ise 90 nm'lik bant aralığında 35 dB'den daha büyük değerler elde edilmiştir [58].

Watekar ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada, TKFY küçük sinyal ve küçük kazanç rejiminde analizini yapmak için bir model sunmuştur. Sunulan modeli doğrulamak için deneysel bir kurulum gerçekleştirilmiştir. Deneyde, 1064 nm dalga boyunda bir lazer pompa kaynağı olarak kullanılmıştır. Yükselteç kazancı ve doyuma ulaşma gücü farklı pompa güçleri için ölçülmüştür. Sonuçta elde edilen deneysel verilerin, sunulan model ile uyumlu olduğu görülmüştür [59].

Sighn ve arkadaşları, yapmış oldukları TKFY tasarımında ileri yönlü 1050 nm, geri yönlü 1400 nm + 800 nm üçlü pompalama düzeneği oluşturarak, 1460 nm-1480 nm aralığında kazanç ve gürültü grafiğini incelemişlerdir. Elde edilen verilerde en yüksek kazanç; 1470

nm dalgaboyunda 33,70 dB ve en düşük kazanç; 1480 nm dalgaboyunda 29,52 dB çıkmıştır [60]. Diğer bir çalışmalarında ise 800, 1050 ve 1400 nm dalgaboyundaki üç pompa kullanılarak dört farklı konfigürasyon tasarlamış ve sonrasında ise iyon yoğunluklarının değişimi araştırmışlardır [61].

Emami ve arkadaşları, florür tabanlı TKFY'yi çift geçişli tasarımda teorik olarak incelemiştir. Çalışmanın amacı, çift geçişli TKFY'lerin kazancının ve gürültü şeklinin optimum değerlerini belirlemektir. Ayrıca, çift geçişli TKFY'lerin tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer faktörleri de tartışmaktadır. Bunlar arasında, TDF'nin çekirdek yarıçapı ve sayısal açıklığı yer almaktadır. Bir reflektör yardımıyla çift geçişli konfigürasyon oluşturulmuş ve TKFY kazancı bu şekilde arttırılmıştır. Önerilen TKFY ile kazanç artımı 1465 nm dalgaboyunda 15 dB'den fazla olmuştur. 1050 nm dalgaboyunda 300 mW gücünde pompa kullanılarak, 20 m TKF uzunluğunda 1465 nm bandında elde edilen kazanç 42 dB'dir [62].

Gomes ve arkadaşları ise oluşturdukları çift yönlü konfigürasyonda bir reflektör, 800 nm ve 1050 nm dalgaboyunda iki pompa kullanmışlardır. Bu sayede, 180 mW toplam pompa gücü ile elde ettikleri küçük sinyal kazancı 27 dB'dir. Ayrıca, gürültü değeri 5dB'den az olmuştur. Bu değerler, tek yönlü pompa ile çalışan bir TKFY'nin kazancından ve gürültü şeklinden önemli ölçüde daha iyidir. Ayrıca, 180 mW toplam pompalama gücü ve çift yönlü pompalama şeması ile çalışan bir TKFY, yaklaşık %70 spektral verimliliğe sahiptir. Bu da çift yönlü konfigürasyonun, TKFY'lerin spektral verimliliğini de iyileştirdiğini göstermektedir [63].

Roy ve arkadaşları çıkış gücü ve gürültü değişimini incelerken, 1047, 1064, 1400 ve 1550 nm dalgaboylarındaki pompaları kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, 1550 nm + 1400 nm pompalama şemasının, TKFY'lerin gürültü değerini ve kazanç bandını iyileştirmede en etkili konfigürasyon olduğu bulunmuştur. Bu konfigürasyonda, 1550 nm pompalama, Tm^{3+} iyonlarını $_3H^4$ enerji seviyesine pompalarken, 1400 nm pompalama, Tm^{3+} iyonlarını $_3F^4$ enerji seviyesine pompalamaktadır. Bu iki pompalama seviyesi, Tm^{3+} iyonlarının farklı uyarılmış geçişlerini uyararak, daha geniş bir kazanç bandı ve daha düşük bir gürültü şekli sağlamaktadır. Araştırma ayrıca, pompalama gücünün ve TKF uzunluğunun, TKFY'lerin gürültü değeri ve kazanç bandını nasıl etkilediğini de göstermiştir. Pompalama gücü arttıkça, gürültü şekli azalmakta ve kazanç bandı genişlemektedir. TKF uzunluğu arttıkça, gürültü

değeri artarken kazanç bandı daralmaktadır [64].

Emami ve arkadaşları 1050 nm ileri yönlü pompalama ve 2000 ppm iyon yoğunluğunu kullanarak tek geçişli ve çift geçişli TKFY düzenekleri oluşturmuşlardır. Çift geçişli tasarımda bir sirkülatör yükseltecin giriş bölümüne yerleştirilmiştir. Böylece giriş sinyali verilip, yükseltilmiş sinyal de çıkışa yönlendirilmiştir. Yansıtıcı olarak seçilen dalgaboyunda yansıtma yapacak şekilde bir ayna kullanılmıştır. İncelenen üç farklı durumda kullanılan TKF uzunlukları sırayla 12 m, 20 m ve 34 m'dir. Sonuçta elde edilen verilerde; TKF boyu kısaldığında, yükselteç düşük pompa güçlerinde bile doyuma ulaşmaktadır. Bu nedenle de yüksek bir kazanç elde edilememektedir. İki tasarımda da pompa gücünün artması ile paralel olarak kazanç değeri artarken, gürültü şekli düşmektedir. En yüksek değerlerine ise çift geçişli tasarımda ulaşmaktadır. TKF boyu artmasıyla, tüm TKF'in iyon yoğunluğunu evirmek için kullanılan pompa gücü değeri de artmaktadır. Ayrıca çift geçişli TKFY'ler için, optimum pompalama gücü 300 mW' tan fazla olduğunda, kazanç 42 dB'den fazla ve gürültü 6 dB'den azdır. TKF uzunluğu 20 m'den fazla olduğunda, kazanç 35 dB'den az ve gürültü 7 dB'den fazladır [65].

Peterka ve arkadaşları, tulyum iyon katkısına ile alüminyum iyon katkısı ile TKFY' nin $_3H^4$ flor ışıma ömrünü arttırmaya çalışmışlardır. Tasarımlarında 800 nm + 1400 nm dalgaboylarında iki pompa kullanılmıştır. Kılıfa 800 nm pompa uygulanırken, fiber özüne 1400 nm pompa uygulanmıştır. Sonuçta elde edilen verilerde, $_3H^4$ flor ışıma ömrünün 58 µs'ye yükseldiği görülmüştür. Çift pompalamada yüksek kazanç değerleri çift pompalamalı tasarımda elde edilirken, bu tasarım karmaşık bulunmuştur. Bu sebeple, optimize edilmiş tekli pompalama önerilmiştir [66].

Buna benzer bir diğer çalışmada Signh ve arkadaşları, iyon yoğunluğu 20 ppm-80 ppm aralığında, katkı yarıçapını ise 0,3 µm - 1,3 µm aralığında değiştirmiştir. İleri yönlü 1050 nm; çift yönlü 1050 nm + 1400 nm; çift yönlü-üçlü 1050 nm + 1400 nm + 800 nm pompalama yapılan üç farklı durumun kazanç spektrumlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda; iyon yoğunluğu, katkı yarıçapı, pompalama yönü ve pompalama şekli gibi parametrelerin TKFY kazancını etkilediği görülmüştür. Katkı yarıçapı 0,7 µm, iyon yoğunluğu 80 ppm, ve tasarımın çift yönlü üçlü pompalama olduğunda kazanç 29,63 dB'dir [67].

Khamis ve Ennser çalışmalarında 1570 nm dalgaboyunda pompa kullanarak, TKFY performansını 2 μm dalgaboyunda incelemişlerdir. İyonlar arası etkileşimi sağlamak amacıyla aşırı tulyum iyon yoğunluğu tercih edilmiştir. Oran ve yayılım denklemleri oluşturularak TKFY karakteristiği incelenmiştir. MATLAB programı aracılığıyla fiber boyu optimize edilerek, kazanç ve gürültü şekli hesaplanmıştır. Nümerik sonuçlara göre kısa fiber boyu, yüksek tulyum iyon yoğunluğunda bir artı olarak görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre tulyum iyon yoğunluğundaki artış, yükselteç 1570 nm de pompalandığında kazancı düşürmektedir [68].

Watekar ve arkadaşları çalışmalarında, 1064 nm pompa kullanarak 1470 nm deki kazanç değeri için optimum yükselteç parametreleri araştırmışlardır. $1{,}2 \times 10^{25}$ iyon/m^3 ve 7×10^{25} iyon/m^3 değerlerinde iyon yoğunluğuna sahip iki farklı TKF kullanılmıştır. Farklı TKF uzunluklarında, giriş güçlerinde ve pompa güçlerinde yükselteç ayrı ayrı denenmiştir. Çalışma sonucunda, pompa gücü 300 mW için iki farklı fiberde ölçülen maksimum güç 0,7 dB ve 2 dB olmuştur. İyi bir kazanç elde edebilmek için pompa gücünün 1000 mW'ın üzerinde olması iyi kazanç elde edilmesini sağlamıştır [69].

Aozasa çalışmasında iyon yoğunluğu, fiber uzunluğu ve pompa güçleri oranı gibi faktörlerin farklı değerlerinde Tulyum iyonlarının karakteristiğini incelemiştir. İyon yoğunluğu 6000 ppm olduğunda, 1507 - 1577 nm band aralığında kazanç 22 dB, gürültü şekli ise 6 dB'den az elde edilmiştir [26]. Arkadaşları ile beraber yapmış olduğu bir başka çalışmada ise TKFY ve EKFY den oluşan bir hibrit yükselteç konfigürasyonu hazırlamışlardır. 1460 - 1540 nm band aralığında TKFY-EKFY şeklinde sıralandığında ve 1480 -1560 nm band aralığında ise EKFY-TKFY şeklinde sıralandığında gürültü şekli 7 dB'den düşüktür. Deneysel sonuçlara göre; hibrit yükselteçten 1460 - 1560 nm dalgaboyu aralığında 80 nm den fazla bant genişliğinde kazanç 20 dB civarındadır. TKFY ve EKFY'in kazançları optimize edildiğinde hibrit yükseltecin kazanç değişim oranı (KDO = (en yüksek kazanç-en düşük kazanç) / en düşük kazanç) 0,4'den düşüktür. Bu şekilde kazanç dengeleme tekniği kullanıldığında 77 nm'lik kazanç bandında, hibrit yükseltecin ortalama kazancı 20 dB, çıkış gücü 14,5 dBm ve gürültü şekli 7 dB den düşük olmaktadır [27].

Sakamoto ile arkadaşları, TKFY ve EKFY iki yükselteci kademeli olarak birbirine bağlayarak hibrit bir tasarım geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu yeni tasarımın bant genişliği, kazancı ve gürültü değerlerini belirlemek için deneyler yapmışlar ve kazanç

düzleştirme için çeşitli teknikler araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda TKFY-EKFY hibrit yükselteçlerin DBÇ sistemlerinde uzun mesafe iletişim için uygun oldukları ve kazanç düzleştirme teknikleri ile hibrit yükselteçlerin performanslarının iyileştirilmesinin sağlanabileceği sonucuna ulaşmışlardır [28]. Başka bir çalışmalarında ise TKFY-EKFY hibrit fiber yükselteçlerin kazanç spektrumlarının daha düz ve kontrol edilebilir olması için pompa kaybı kontrolünü kullanmışlardır. Çalışmalarında pompa kaybı kontrolü kavramını açıklayarak geliştirmiş oldukları yöntemi simüle ederek test etmişlerdir. Çalışma sonunda, pompa kaybı kontrolünün, TKFY-EKFY hibrit fiber yükselteçlerin kazanç spektrumlarını daha düz hale getirdiği ve sinyalin bozulmasını azaltmaya yardımcı olduğu görülmüştür Bunun yanında, Pompa kaybı kontrolü ile, kazanç spektrumları daha kontrol edilebilir hale getirilerek, farklı dalga boylarında sinyalin güçlendirilmesi veya zayıflatılması için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [29].

C. Kumar ve G. Kumar, süper yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (SY-DBÇ) sistemlerinde performansı yükseltmek için EKFY-TKFY hibrit yükselteç tasarımını kullanmıştır. Yapmış oldukları çalışmada C-Bandında 1,22 dB'den daha az varyasyon ile 25,55 dB'lik maksimum kazanç elde etmişlerdir. Bu, sistemin sinyal gücünü önemli ölçüde arttırırken sinyal bozulmasını minimuma indirgemektedir. Makalede, hibrit yükseltecin 400 kanallı, 2,455 Gb/s SY-DBÇ sisteminin performansını simule edilmiştir. Simülasyonlar, yükseltecin sistemin girişim (crosstalk) ve optik sinyal-gürültü oranını açısından iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmalara ek olarak EKFY-TKFY hibrit yükselteç performansı, SY-DBÇ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan Raman-EKFY hibrit yükselteç ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, TKFY ile hibritlenen tasarımın daha düz kazanç ve daha düşük gürültü sunduğunu göstermektedir [30].

Kaur ve Gupta, yapmış oldukları bir çalışmada S+C bantlarında 96 kanallı DWDM sistemi için hibrit TKFY-EKFY ile hibrit EKFY-TKFY konfigürasyonlarını karşılaştırmaktadır. Böylece, bu iki konfigürasyonun performansını, kazanç, gürültü şekli, girişim ve Hata Bit Oranı (HBO) değerlerini karşılaştırmışlardır. Her iki konfigürasyon için de 96 kanallı, 0,8 nm aralıklarla yerleştirilmiş 1479 nm ile 1555 nm arasında dalgaboylarına sahip bir YDBÇ sistemi tasarlamışlardır. Her ikisi de fiber kaybı ve dispersiyon gibi sistemdeki kayıplar dikkate alınarak simüle edilmiştir. Sonuç olarak, TKFY-EKFY hibrit yükselteci daha düz bir kazanç ve daha düşük gürültü şekli sağlarken, daha düşük bir girişim ve HBO değeri sunmuştur. Bunlar da Hibrit TKFY-EKFY konfigürasyonunun, hibrit EKFY-TKFY

konfigürasyonuna göre daha iyi performans sunduğunu göstermektedir [31]. Kaur ve Gupta bir diğer çalışmalarında ise TKFY-EKFY hibrit ve EKFY-TKFY hibrit yükselteçlerin performansını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Bunlar katkı maddesi tipi ve yoğunluğu, fiber tipi, pompa gücü, pompa dalgaboyu, kazanç bant genişliği gibi faktörlerdir. Bu faktörlerin performans üzerine etkileri araştırılmıştır [32].

Kaur ve arkadaşları bir diğer çalışmasında Yapay Zekâ (YZ) yöntemlerini kullanarak YDBÇ sistemleri için hibrit yükselteçlerin performansını ve verimliliğini iyileştirmeye çalışmışlardır. Makalelerinde hibrit yükselteçlerin temel çalışma prensiplerini ve YZ yöntemlerinin kavramlarını açıklamışlardır. YZ yöntemlerinin hibrit yükselteçlerin performansını ve verimliliğini iyileştirmek için nasıl kullanılabileceğini araştırmak için bir yöntem geliştirmişler ve bu yöntemi, simülasyonlar kullanılarak test etmişlerdir. Makalede geliştirilen bir YZ yöntemi, hibrit yükselteçlerin kazanç spektrumunu %20'ye kadar düzleştirmiştir. Bu, sinyalin bozulmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Aynı yöntem, hibrit yükselteçlerin gürültü şeklini de %10'a kadar azaltmıştır. Bu, sinyalin gürültüsüz bir şekilde iletilmesini ve yüksek veri kayıp oranı performansını sağlar. Yine geliştirilen YZ yöntemi, hibrit yükselteçlerin verimliliğini de %15'e kadar artırmıştır. Bu, sistemin enerji verimliliğini artırmaya yardımcı olmaktadır. Çalışma sonucu, YZ yöntemlerinin hibrit yükselteçlerin performansını ve verimliliğini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir [33].

Bir başka çalışmasında Kaur ve arkadaşları, güneş enerjisini dönüştürmede TKFY-EKFY hibrit yükselteç tasarımını kullanmıştır. Çalışma, hibrit yükselteçlerin güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için %25'e varan verimlilik elde edebildiğini göstermiştir. Bu, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için geleneksel teknolojilerle verim yönünden rekabet edebilir. Ayrıca pompa gücü arttıkça, güneş enerjisi dönüşüm verimliliği de artmaktadır. Bu, pompa gücünün, yükseltecin kazancını artırmasından kaynaklanmaktadır. Çalışma sonucunda hibrit yükselteçler kullanılarak güneş enerjisi, ışık, elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülerek kullanılabileceği gösterilmiştir [34].

Singh ve arkadaşları, çoklu pompalamanın Tm^{3+}- Er^{3+} hibrit yükselteçlerin performansına etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada kazanç spektrumlarını optimize etmek için bir yöntem geliştirmişler ve bu yöntemi simülasyon kullanarak test etmişlerdir. Sonuçta çoklu pompalamanın, Tm^{3+}-Er^{3+} hibrit yükselteçlerin kazanç spektrumunu %20'ye kadar düzleştirebileceğini göstermiştir. Böylece, sinyalin bozulması önemli ölçüde azalmaktadır.

Aynı çalışma, çoklu pompalamanın, Tm^{3+}- Er^{3+} hibrit yükselteçlerin gürültü şeklini %10'a kadar azaltabileceğini göstermiştir [35].

Singh ve arkadaşları, EKFY-TKFY hibrit yükselteç çalışmalarının dışında TKFY-FRY hibrit yükselteçler üzerine de çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaların birinde TKFY-FRY hibrit yükselteçlerin S+C bandında azaltılmış kanal aralıkları için performansını araştırmış ve karşılaştırmışlardır. TKFY-FRY hibrit yükselteçler, ardışık ve paralel tasarımlarda 0,8 nm, 0,4 nm ve 0,2 nm kanal aralıkları için simüle edilmiştir. 1000 nm, 1040 nm, 1390 nm, 1410 nm ve 1450 nm'de çalışan toplam 5 sürekli dalga lazerle pompalanmıştır. Sonuç, ardışık tasarımda, 0,8 nm kanal aralığında 20 dB'den fazla kazanç artışı elde edilmiştir. Paralel tasarımda, 0,2 nm kanal aralığında 30 dB'den fazla kazanç artışı elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca, TKFY-FRY hibrit yükselteçlerin performansını etkileyen pompa gücü, kanal aralığı, fiber uzunluğu gibi faktörler tartışılmaktadır [36].

Bir diğer çalışmalarında ise 1460 nm ila 1500 nm arasındaki S bandında düz kazanç sağlamak için optimize edilmiş TKFY-FRY geniş bant hibrit yükselteç kullanmışlardır. Yükselteç, 1000 nm ve 1450 nm'de çalışan iki sürekli dalga lazerle pompalanmıştır. Fiber uzunluğu ve Tulyum katkı yoğunluğu optimize edilerek, S bandında düz kazanç elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca, TKFY-FRY hibrit yükselteçlerin performansını etkileyen fiber uzunluğu, pompa gücü, Tulyum katkı yoğunluğu ve kanal aralığı gibi faktörler tartışılmıştır. Sonuç olarak ise, optimize edilmiş TKFY-FRY hibrit yükselteç, S bandında 5 dB'lik bir kazanç düzlüğü sağlamıştır. Maksimum kazanç 31,1 dB, minimum kazanç ise 26,1 dB olmuştur [37]. Bu çalışmanın benzeri bir diğer çalışmada ise, S bandının tamamını (1460-1530 nm) kapsayacak şekilde düz kazanç sağlayan bir hibrit FRY-TKFY yükselteci tasarlamışlar ve daha temel bir optimizasyon yaklaşımı kullanmışlardır. FRY, düşük dalgaboyu aralığında (1460-1500 nm) yükseltme sağlarken, TKFY ise nispeten yüksek dalgaboyu aralığında (1500-1530 nm) yükseltme sağlamaktadır. FRY nin uzunluğu 10 m, pompa gücü ise 100 mW seçilmiştir. TKFY'nin fiber uzunluğu 10 m seçilirken, pompa gücü 1 W olarak seçilmiştir. Deneysel sonuçlar, hibrit yükseltecin S bandının tamamını kapsayacak şekilde iyi performans ve 1460-1530 nm aralığında 10 dB'den fazla kazanç ve 0,1 dBm'den az gürültü düzeyi elde edildiğini göstermiştir [38].

Luthi ve arkadaşları, S bandının tamamında (1460-1530 nm) sorunsuz bir şekilde yükseltme sağlayan yeni bir hibrit TKFY-FRY yükselteç tasarlamışlardır. Bu tasarım, tek bir 1426 nm

pompa ışını kullanarak oluşturulan bir Raman bölümü ile bir veya iki TKF bölümü birbirine kaskad halinde bağlamaktadır. Bu şekilde iki aşamalı ve üç aşamalı olacak şekilde iki tasarım gerçekleştirmişlerdir. Farklı konsantrasyondaki iki TKF'nin kullanılması, ek filtre elemanları olmadan kazancın düzleştirilmesine olanak tanımıştır. Sonuçta maksimum kazanç dB'ye kadar ulaşırken gürültü şekli 6 dB'ye düşmüştür [39].

Lin ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada S bandında TKFY'nin kazanç aralığını genişletmek için yeni bir yükselteç önermektedir. FRY-TKFY hibrit yükseltecin farklı pompa yapılarıyla performansını analiz etmişlerdir. Fiber uzunluğundaki ve FRY pompalama gücündeki değişikliklerin hibrit yükselteç kazancı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Simülasyon sonuçları, kullandıkları yöntemin S bandında ortalama 28,97 dB kazanç elde edebildiğini göstermektedir [40].

Crippa ve arkadaşları, TKFY ve FRY'nin kaskad bağlanması ile 1450-1520 nm bant genişliğinde yüksek kazançlı bir S-band yükselteç tasarlamıştır. Çalışmada, 10 m uzunluğunda bir TKFY ve 10 km uzunluğunda bir FRY kullanılmıştır. TKFY, 1060 nm'de pompalanırken, FRY 1413 nm'de pompalanmıştır. Yükselteç performansı, bir spektrograf ve bir güç ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Sonuç olarak ise, 1445 nm'den 1520 nm'ye kadar 70 nm genişliği için 20 dBm'den fazla kazanç ve -7 dB civarında gürültü değeri elde edilmiştir. Daha dar bir bant genişliği için (1455-1505 nm) elde edilen en yüksek kazanç 35 dB'dir. Her iki yükseltecin de kazanç spektrumlarının simetrik olması nedeniyle herhangi bir kazanç düzleştirme tekniği kullanılmadan düz bir kazanç elde edilmiştir [41].

Tench ve arkadaşları, yüksek kazançlı ve düşük gürültü değerlerine sahip Holmiyum Katkılı Fiber Yükselteç'ten (HKFY) ve daha yüksek çıkış gücüne sahip TKFY kullanarak, 2000 nm bandında yenilikçi bir geniş bantlı HKFY-TKFY hibrit yükselteç tasarlamışlardır. HKFY, TKFY'nin geniş bant genişliğine katkıda bulunurken, TKFY, HKFY'nin kazancını ve gürültü şeklini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Yükselteç performansı, teorik modelleme ve deneysel testler kullanılarak değerlendirilmiştir. Teorik modelleme, yükselteç kazancını, gürültü şeklini ve bant genişliğini doğru bir şekilde tahmin etmiştir. Deneysel testler, yükseltecin teorik modelleme ile tutarlı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Çalışmalarında kullandıkları hibrit yükselteç ile yüksek küçük sinyal kazancı (70 dB), düşük gürültü şekli (7,5 dB), geniş giriş sinyal dinamik aralığı (40 dB), doğrudan ölçülen geniş çalışma bant

genişliği ≈ 89 nm (2009-2098 nm) ve 2069 nm'de 28,5 W'lık yüksek çıkış gücü elde edilmiştir [42].

Bir diğer çalışmalarında ise, tasarladıkları HKFY-TKFY hibrit yükselteci ise iki aşamalı HKFY tasarımı sonuçlarını karşılaştırmışlardır. HKFY-TKFY hibrit yükselteci kullanarak 3,54 W çıkış gücü, 49,1 dB küçük sinyal kazancı ve 6,5 dB gürültü değerleri elde etmişlerdir. Hibrit HKFY/TKFY tasarımının simülasyon çalışmaları ile karşılaştırıldığında, çift aşamalı HKFY tasarımı 2000 nm bandında önemli ölçüde daha yüksek doymuş çıkış gücü, önemli ölçüde daha düşük küçük sinyal kazancı ve benzer kazanç bant genişliği ve çıkış güç çalışma bant genişliği sağladığını göstermiştir [43].

Obaid ve arkadaşları, S, C ve L bantları boyunca optik yükseltme sağlayacak çift yönlü TKFY/ Fiber Optik Parametrik Yükselteç (FOPY) hibrit yükselteç tasarlamışlardır. Tasarlanan yükselteç, her biri 100 Gb/s kapasiteye ve 10 nm kanal aralığına sahip 18 dalga boyu bölmeli çoğullamalı kanaldan oluşan bir sistemde çalıştırılmıştır. Kanal başına giriş gücünün optimal değeri –30 dBm'ye ayarlanmasıyla parametreler, yalnızca 2,09 dB'lik kazanç dalgalanmasının eşlik ettiği 23,52 dB'yi aşan düz bir kazanç elde edecek şekilde ayarlanmıştır. Bu parametreler 1460 nm ile 1630 nm arasındaki dalga boyu aralığında optimize edilmiştir. Farklı giriş güç seviyelerinde yapılan analizler, giriş gücünün artmasının kazancı düşürdüğünü ve kazanç dalgalanmasını artırdığını göstermektedir [44].

Lüthi ve arkadaşları, S bandında yükseltme ve S bandından C/L bandına dalga boyu dönüşümü sağlayabilecek yeni bir TKFY/FOPY hibrit yükselteç tasarlamışlardır. Hibrit Yükselteç, iki aşamalı bir tasarıma sahiptir. İlk aşamada, bir TKFY S bandında düzleştirilmiş yükseltme sağlarken, ikinci aşamada bir FOPY, TKFY tarafından üretilen sinyallerin frekansını dönüştürür ve bu sayede dalga boyu dönüşümü sağlanır. Yükselticinin 1450 nm ile 1530 nm arasında 18 dB'nin üzerinde düzleştirilmiş kazanç ve 2,5 dB'lik kazanç dalgalanması sağladığını göstermiştir. Ayrıca, yükselticinin S bandından C bandına ve L bandına dalga boyu dönüşümü için 1,5 dB'nin üzerinde verimlilik sağladığı gösterilmiştir. Gürültü ise ortalama 6-12 dB olarak ölçülmüştür [70].

Naji ve arkadaşları optik haberleşme sistemlerinde yüksek performansından dolayı yaygın olarak kullanılan iki farklı iki kademeli üç geçişli EKFY konfigürasyonu kullanmışlardır. Çalışmanın ana amacı, optik sinyalleri yükseltmede hangi konfigürasyonun daha güvenilir

olduğunu göstermektir. Konfigürasyon A olarak isimlendirilen ilk konfigürasyonda, ilk kademede tek geçişli bir EKFY ve ikinci kademede çift geçişli bir EKFY kullanılmıştır. Konfigürasyon B olarak isimlendirilen ikinci konfigürasyonda ise, ilk kademede çift geçişli bir EKFY, ikinci kademede tek geçişli bir EKFY kullanılmıştır. Bu iki konfigürasyonun performansını analiz eden ve aralarında bir karşılaştırma sunan teorik analizler yapılmıştır. 1550 nm dalgaboyundaki giriş sinyali, 1480 nm dalga boyunda, 100 mW gücündeki pompa ve 10 metre uzunluğunda EKF'lerle yükseltilmiştir. Sonuçta elde edilen verilere göre B konfigürasyonunun kazancı, A konfigürasyonunun kazancından daha yüksektir. Gürültü değerleri ise yaklaşık olarak aynıdır. Bu nedenle fiber optik iletişim sistemleri için optik sinyalleri yükseltmede Konfigürasyon B'nin daha güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır [45].

Akhter ve arkadaşları ise yüksek performans elde etmek için en yaygın kullanılan iki farklı üç geçişli TKFY konfigürasyonlarına üçüncü bir konfigürasyon ekleyerek, bu üç farklı konfigürasyonu sistem kazancı ve gürültü değerleri üzerinden karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda kazanç ve gürültü değerleri karşılaştırılarak tüm konfigürasyonlar için optimum pompa güç oranı ve sinyal gücü belirlenmiştir. Belirli sinyal gücü ve pompa gücü değerleri için optimum fiber uzunlukları da belirlenmiştir. Herhangi bir giriş pompa gücü ve sinyal gücünde ilk konfigürasyonunun diğer iki konfigürasyonlardan daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [46].

Akhter ve arkadaşları bir başka çalışmalarında ise, yüksek kazanç, düşük gürültü şekli ve geniş bant genişliği sunan yeni bir EKFY tasarımı geliştirmek amacıyla Üç Aşamalı Dört Geçişli EKFY (DG EKFY) modellemesi ve karakterizasyonu üzerine araştırma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada yeni bir üç aşamalı dörtlü geçişli EKFY konfigürasyonu önermişlerdir. Önerilen bu EKFY'nin tasarımına yönelik matematiksel modeller geliştirilmiştir. Matematiksel modellerde, önceki aşamaların Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayınım (YKY) etkileri de hesaba katılmıştır. Bu DG-EKFY'nin performans analizi, giriş pompa güç oranı ve sinyal gücü değişimine göre gerçekleştirilmiştir. Ayrıca geliştirdikleri modelin doğruluğunu deneysel olarak doğrulamaya çalışmışlardır. 20 mW gibi düşük bir giriş pompa gücü için, önerilen dört geçiş şemasıyla çok yüksek bir kazanç değeri olan 57,11 dB elde etmişlerdir [47].

Yine bir başka çalışmalarında Akhter ve arkadaşları, en iyi Üç Geçişli EKFY (ÜG EKFY) konfigürasyonunu belirlemek için tüm olası ÜG EKFY konfigürasyonlarını incelemişlerdir. Her bir konfigürasyonun performansı, pompa güç oranı ve sinyal gücüye göre analiz edilmiştir. Ayrıca, her konfigürasyon için optimum fiber uzunluğu ve pompa güç oranı belirlenmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda, pompa güç oranı değiştirildiğinde TP1 olarak isimlendirdikleri konfigürasyon, diğer tüm konfigürasyonlardan daha iyi performans göstermiştir. TP3 olarak isimlendirilen konfigürasyon, sinyal gücü değişikliğinde daha iyi performans gösterirken; -40 dBm'de tüm ÜG EKFY konfigürasyonlarının kazancı neredeyse aynıdır. TP1'in gürültü performansı en iyidir ve 4 dB civarındadır. Optimum pompa güç oranı, kazanç ve gürültü değerlerine göre hesaplanmıştır. Tüm ÜG EKFY için optimum uzunluk da hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en uygun konfigürasyonun TP1 ÜG EKFY olduğu belirtilmiştir [48].

Mahdi ve arkadaşları iki aşamalı üç geçişli EKFY çalışmalarında İki aşamalı Üç Geçişli EKFY konfigürasyonu kullanarak pompa gücü optimizasyonu yapmışlardır. Bu konfigürasyonda, iki bağımsız 980-nm pompa lazeri kullanan iki aşamalı yükselteç içermektedir. İlk aşama, çift geçişli yükselteç ile yüksek kazanç elde edilmektedir. Sinyal yönlendirmesi sirkülatör ile yapılmıştır. İkinci aşamada tek geçişli yükseltece geri yönde pompalama yapılmıştır. Deneyde elde edilen maksimum kazanç, minimum gürültü seviyesine sahip değildir. Bu nedenle, optimum çalışma noktası, kazanç-gürültü seviyesi oranına göre tanımlanmıştır. Önerilen konfigürasyondaki pompa gücü dağılımları arasındaki ilişki, birinci aşama pompa lazerinin toplam pompa gücüne oranının sinyal gücüne bağlı olarak 0,3 ile 0,5 arasında olduğunu göstermektedir [49].

Almukhtar ve arkadaşları, hibrit EKFY performansını artırmaya yönelik iki aşamadan ve üç geçişli bir yapıdan oluşan yeni bir konfigürasyon üzerinde çalışmışlardır. Hafniyum-bizmut katkılı erbiyum katkılı fiber (HB-EKF) ve bizmut katkılı erbiyum katkılı fiber (Bi-EKF) kombinasyonu kullanılarak hibrit bir EKFY tasarlanmıştır ve yükselteç kazanç, gürültü şekli ve bant genişliği gibi performans parametreleri simülasyonlar aracılığıyla değerlendirilmiştir. Düz kazanç ve geniş bant amplifikasyonu elde etmek için her iki EKFY da 1480 nm dalga boyunda pompalama uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, önerilen konfigürasyonun, geleneksel EKFY konfigürasyonlarına kıyasla daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü elde ettiği gösterilmiştir. Simülasyonlar, 1550 nm ila 1600 nm dalga

boyu aralığında 17 dB'lik düz kazanç kazanç ve 8 dB'den az gürültü şekli elde edilebileceğini göstermiştir [50].

Shan ve arkadaşları, mevcut EKFY'lerin düşük güç dönüşüm verimliliğini gidermek için 3 kademeli bir L-band EKFY tasarımı geliştirmeye çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada Üç kademeli EKFY tasarımı geliştirmişler ve Üçüncü EKF kademesinden ve 1-2. kademedeki pompa baypasından kaynaklanan YKY geri kazanılmıştır. Güç dönüşüm verimliliğini optimize etmek için pompa güçleri ve sinyal giriş gücü ayarlanmıştır. Geliştirmiş oldukları bu üç kademeli L-band EKFY ile 1570 ila 1610 nm dalga boyu aralığında düşük gürültü, 30 dB'ye kadar yüksek kazanç elde etmişlerdir. Tasarım, geleneksel EKFY'lere kıyasla %80'den fazla ölçüde daha yüksek güç dönüşüm verimliliği sağlamıştır [51].

Yücel ve Yiğit, yüksek kazanç, düz kazanç ve düşük gürültü şekli sağlayan bir EKFY tasarımı geliştirmeyi amaçlayarak İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY tasarımı simüle etmişlerdir. Çalışmalarında farklı fiber türleri ve pompa güçleri için optimizasyonlar yapılmıştır. İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY tasarımı, 54 dB'ye kadar yüksek kazanç, 1,5 dB'den az dalgalanmaya sahip düz kazanç ve 3,3 dB'ye kadar düşük gürültü sağlamıştır. En iyi sonuçlar, I6 fiber türü ve 1480 nm pompa dalga boyu için elde edilmiştir [52].

Yücel ve Yiğit bir diğer çalışmalarında, düşük gürültü şekli ve yüksek kazanç sağlayan Üç Kademeli Altı Geçişli EKFY ön yükselteç tasarımı geliştirmişlerdir. Tasarladıkları EKFY parametrelerini optimize ederek, ön yükselteç performansını en üst düzeye çıkarmaya çalışmışlardır. Çalışmalarında farklı EKF tipleri, pompa güçleri ve sinyal giriş güçleri araştırmışlardır. Gürültü ve kazanç optimizasyonu için EKFY'nin matematiksel modelleme kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, tasarlanan ön yükselteç, 1528-1566 nm dalga boyu aralığında 57,36 – 59,23 dB kazanç ve 3,11 – 3,86 dB gürültü şekli elde etmiştir. 200 mW pompa gücü, optimum performans için belirlenmiş ve I6 tipi EKF, en yüksek kazanç ve en düşük gürültü şeklini sağlamıştır [53].

Awsaj ve arkadaşı çalışmalarında, L band üç geçişli EKFY tasarımına Fiber Bragg Izgara (FBI) Filtresi entegre ederek yükseltecin spektral verimliliğini ve çıkış gücünü artırmayı amaçlamışlardır. Dört farklı L bant üç geçişli EKFY konfigürasyonu tasarlamışlardır. Tasarımlarında FBI filtresi yükseltecin geri besleme döngüsüne yerleştirilmiştir. Bu konfigürasyonların kazanç ve gürültü şekli performansları farklı pompa güçleri ve giriş

sinyal güçleri için FBI filtre varlığı ve yokluğuna göre karşılaştırılmıştır. Her konfigürasyonda, üç kademeli pompa gücü (100, 150 ve 225 mW) uygulanmaktadır. Ayrıca, her durum için optimal EKF uzunluğu ile birlikte −20 dB ve −30 dB olmak üzere iki farklı giriş sinyal gücü kullanılmıştır. Pasif EKF, pompa enerjisini ve kendiliğinden yayılmayı azaltarak gürültüyü düşürmekte kullanılmıştır. FBI filtresi ve Dalgaboyu Seçici Kuplör kullanarak, istenmeyen dalga boylarını filtreleyip sinyal kalitesini arttırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, önerilen konfigürasyonların ortalama kazancı, geleneksel kurulumlara göre daha yüksek çıkmıştır. En düşük gürültü değeri, ileri yönlü üç geçişli EKFY'de FBI filtre kullanıldığında -30 dBm giriş sinyal gücü için kaydedilmiştir [54].

Yan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada dört geçişli İterbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (İKFY) tasarımını, simülasyonunu ve deneysel karakterizasyonunu ele almaktadırlar. Farklı fiber türleri ve pompa güçleri optimize edilerek Dört geçişli İKFY tasarımı simüle edilmiştir. Tasarlanan İKFY deneysel olarak kurulmuş ve karakterize edilmiştir. Sonuçlar, Dört Geçişli İKFY tasarımı ile, 40 dB'ye kadar yüksek kazanç, 1 dB'den az dalgalanmalı düz kazanç ve 4 dB'ye kadar düşük gürültü sağlayabildiğini göstermiştir. Deneysel sonuçlar, simülasyon sonuçlarıyla örtüşürken, en iyi sonuçlar, I2 fiber türü ve 980 nm pompa dalga boyu için elde edilmiştir [71].

Bouzid çift aşamalı dört geçişli EKFY tasarıma filtre ekleyerek yüksek kazançlı ve düşük gürültü elde etmeye çalışmıştır. İki adet ayarlanabilir bant geçiren filtre ile istenilen sinyal dalga boyunu geçirerek ve istenmeyen gürültüyü bastırarak sinyal kalitesini yükseltmek amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda, en yüksek kazanç, -50 dBm giriş sinyal gücü, ikinci ve birinci aşama yükselteçlerinde sırasıyla 10 ve 165 mW pompa güçleri için elde edilmiştir. Bu koşullarda 62,56 dB kazanç ve 3,98 dB gürültü şekliyle düşük gürültülü performans sağlanmıştır [72].

Khairi ve arkadaşları, yüksek kazanç elde etmek için birinci aşamada çift geçişli, ikinci aşama ise tek geçişli yükselteçten oluşan iki aşamalı ve üç geçişli EKFY tasarlamışlardır. Her aşamada 980 nm dalga boyunda ve maksimum 90 mW çıkış gücüne sahip iki adet pompa lazeri kullanılmıştır. Birinci ve ikinci aşamadaki EKF uzunlukları sırasıyla 10 ve 7 metredir. EKFY, P1 ve P2 olmak üzere iki pompa lazeri ile pompalanmıştır. Toplam pompa gücü (PT) her iki lazerden gelen 100 mW olarak sabit tutulmuştur. P1'in PT'ye oranı %10'luk artışlarla

%10'dan %90'a kadar değiştirilmiştir. Sonuçta elde edilen kazanç eğrisi iki bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölgede (%0,1-0,3) pompa oranı arttıkça kazanç yavaşça artar. İkinci bölgede (%0,4-0,9) pompa oranı arttıkça kazanç düşer. Bunun nedeni, P2'nin birinci aşamadan çıkan güçlü sinyali yükseltmek için yeterli enerji sağlayamamasıdır. En yüksek kazanç, -50 dBm ile 0 dBm arasındaki tüm giriş sinyal güçlerinde, P1 = 30 mW ve P2 = 70 mW (%30 pompa oranı) ile elde edilmiştir [73].

Qayoom ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, EKFY sistemlerinde filtre kullanımının sağlayabileceği potansiyel faydaları ve dezavantajlarını daha iyi anlamak için filtre kullanımının performansa etkilerini araştırmışlardır. Özellikle, filtrelerin gürültü şekli, kazanç ve bant genişliği gibi önemli performans parametrelerini nasıl etkilediği incelemişlerdir. Band geçiren filtreler, FBI gibi farklı filtre tipleri ve konfigürasyonları EKFY sisteminde simüle edilmiştir. İncelenen konfigürasyonlar; tek geçişli, çift geçişli, filtreli çift geçişli, filtreli üç geçişli ve filtreli dört geçişli EKFY tasarımlarıdır. Gürültü şekli, kazanç ve bant genişliği gibi performans parametreleri her konfigürasyon için hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Bant genişliği, kesim dalga boyu farklı filtre parametrelerinin performans üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, filtrelerin EKFY sistemlerinde gürültü şeklini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir. Filtreli çift geçişli EKFY, en iyi performansı sunan konfigürasyon olarak öne çıkmıştır. Bu konfigürasyon, özel olarak tasarlanmış filtre ile daha yüksek kazanç ve gürültü şekli azaltımı sağlamıştır. Filtreli üç geçişli ve filtreli dört geçişli EKFY konfigürasyonları, DBÇ uygulamalarında kritik öneme sahip dalgalanması minimuma indirgenmiş kazanç sunmuştur [74].

3. OPTİK YÜKSELTEÇLER

3.1. Optik Yükselteçlerin Gelişim Süreci

Son otuz yıldır fiber optik haberleşmenin gelişimi hızlı bir ilerleme kat etmiştir. Fiber optik haberleşme sistemleri uzun bir geçmişe sahip olmasına rağmen yirminci yüzyılın ikinci yarısında taşıyıcı olarak optik dalgalar kullanılarak daha büyük bir iletim bant genişliğinin elde edilebileceği fark edilmiştir [75]. Buna rağmen, 1960'lı yıllarda lazerin icadına kadar bu olanaktan yararlanılamamıştır [76]. Optik iletişimde yeni çağ, lazerlerin çıkışıyla başlamıştır. Başlangıçta, son derece büyük kayıplar (en iyi optik fiberlerde gözlenen 1000 dB/km'den fazla), bunların kullanışsız görünmesine neden olmuştur. 1966'da Kao, Hockham ve Werts, yüksek kayıpların fiber malzemedeki yabancı maddelerden kaynaklandığını ve cam bazlı optik dalga kılavuzu kullanılarak kayıpların azaltılabileceğini keşfettiklerinde büyük bir atılıma neden olmuştur [77]. 1970 yılında Kapron ve arkadaşları yaklaşık 20 dB/km zayıflamaya sahip bir silika fiber üretmeyi başarmaları, birkaç kilometrelik iletimin ticari olarak mümkün olmasını sağlamıştır [76].

1980'de ticari olarak piyasaya sunulan ve 0,8 μm civarında çalışan Birinci Nesil Işık Dalgası Sistemleri, 10 km'lik izin verilen tekrarlayıcı aralığıyla 45 Mb/s'lik bit hızıyla çalışıyordu. Birkaç yıl sonra geliştirilen İkinci Nesil Işık Dalgası Sistemleri 1,3 μm'ye yakın çalıştığından tekrarlayıcı aralığı arttırılabilmektedir. Ayrıca optik fiber kaybının 1 dB/km'nin altında olduğu ve 1,3 μm dalga boyu bölgesine yakın minimum dağılım gösterdiği bulunmuştur. Bu sistemlerde çok modlu fiberler kullanılmıştır. Bu fiberlerdeki dağılım nedeniyle bit hızı 100 Mbit/s'nin altında sınırlı kalmıştır. 80'li yılların ortalarında tek modlu fiberin kullanıma sunulması bu sınırlamanın aşılmasını sağlamıştır. 1987 yılına gelindiğinde ikinci nesil ışık dalgası sistemleri, 50 km tekrarlayıcı aralığıyla 1,7 Gb/s'ye varan bit hızında çalışıyordu. Ancak bu sistemlerin 1,3 μm'lik fiber kaybıyla sınırlı olduğu, dolayısıyla daha hızlı bir veri hızı veya daha uzun mesafe elde etmek için silika fiber kaybının minimum olduğu 1,55 μm'ye yakın çalışması gerektiği bulunmuştur. 1990 yılında piyasaya sürülen 1,55 μm'deki Üçüncü Nesil Işık Dalgası Sistemleri 2,5 Gb/s bit hızında çalışıyordu. Yüksek hız büyük bir avantaj sağlarken, sinyali periyodik olarak yeniden üretme ihtiyacından doğan, 60-70 km aralıklarla yerleştirilmiş elektronik tekrarlayıcıların kullanılması bu sistemlerin dezavantajlarıydı [75].

90'lı yılların başında fiber yükselteçlerin ortaya çıkmasıyla bu sorun çözülmüştür. Dördüncü nesil sistemler, tekrarlayıcı aralığını ve bit hızını artırmak için fiber amplifikatörler kullanılarak geliştirildi. Erbiyum katkılı fiber yükseltecin (EKFY) geliştirilmesi, 1,55 μm dalga boyu bölgesindeki aktif fiber teknolojisi araştırmalarına büyük bir hız kazandırmıştır. Bu yükselteç, optik sinyallerin elektriksel tekrarlayıcılar olmadan binlerce kilometre boyunca iletilmesine olanak sağlamıştır [78].

Bu teknoloji sayesinde, sistemlerin verileri daha uzun mesafeden ve daha hızlı veri hızında iletebilmekteydi. 1996 yılında ise, dördüncü nesil sistemlerin 5 Gb/s bit hızında 11.300 km'nin üzerinde iletim kapasitesine sahip olduğu rapor edilmiştir [71]. 2000'li yılların başlarında, 300 ila 800 km arası uzun mesafeli veya 800 km'den uzun ultra uzun fiber optik iletim sistemlerinde, Raman yükselteç kullanılmıştır. Raman yükselteçlerin dezavantajı, düşük sinyal güçlerinde nispeten zayıf verimliliğiydi. Erbiyum katkılı fiber yükselteçler 1 ila 10 mW aralığında güç gerektirirken, Raman yükselteçleri 1 ila 5 W aralığında güç gerektiriyordu. Bu nedenle, 20 dB veya daha fazla kazanç elde etmek için Raman yükselteçlerde üç kat daha fazla pompa gücü gerekmekteydi [79].

Sonraki zamanlardaki çabalar, çok sayıda dalga boyunun çoğullanması yoluyla fiber sistemlerinde daha fazla kapasite kullanımının gerçekleştirilmesine yöneliktir. Bu sistemlere Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (YDBÇ) sistemi adı verilir. Bu sistem, halihazırda faaliyette olan 0,8 nm'lik dalga boyu ayrımının 0,5 nm'nin altına düşürülmesini amaçlamaktadır [80]. Gelen optik sinyallere belirli bir frekans bandı içinde belirli frekanslar atayarak ve ardından elde edilen sinyalleri tek bir fiber üzerine çoklayarak gömülü fiberin kapasitesi arttırılabilir. Dalga boyu kararlılığının kontrol edilmesi ve dalga boyu çoğullama cihazlarının geliştirilmesi bu çalışmalar için kritik öneme sahiptir. YDBÇ teknolojisi sadece ağın genişletilmesi ve yükseltilmesini de kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda optik ağlarda anahtarlama işlevinin gerçekleştirilmesini sağlar.

Günümüzde araştırmacılar, daha yüksek performans, daha az güç tüketimi ve daha geniş bant aralığı sunan yeni yükselteçler geliştirmeye çabalamaktadırlar. Gelecekte de optik iletişim teknolojisi gelişmeyi sürdürdükçe, optik yükselteçler de gelişmeye devam edecektir.

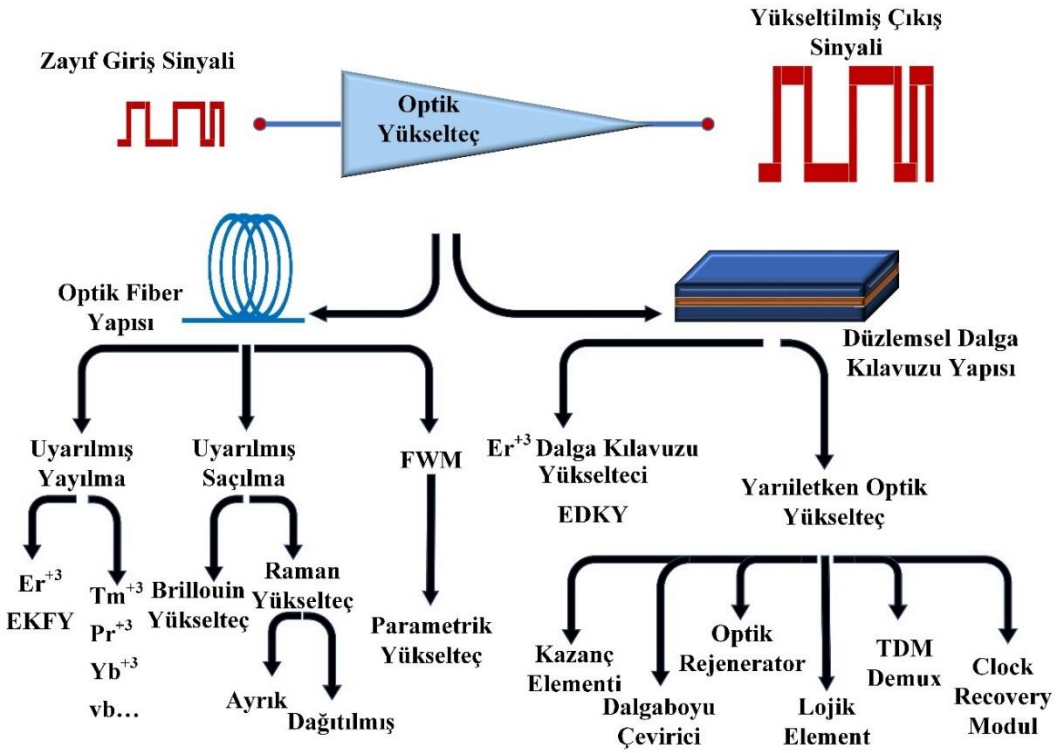
3.2. Optik Yükselteç Çeşitleri

Fiber optik iletişimde, bükülme gibi çeşitli etkenler sinyalde güç kaybı (zayıflama) şeklinde sinyal bozulmasına neden olabilir. Bu durum, özellikle uzun mesafeli iletişimlerde yüksek kaliteli sinyal alımını zorlaştırır. Bu zorlukları aşmak ve uzatılmış bağlantı uzunlukları elde etmek için etkili çözümlere ihtiyaç vardır. Zayıflamayı ele almanın bir yolu tekrarlayıcılar kullanmaktır. Bu cihazlar zayıflayan sinyalleri alır, elektriksel forma dönüştürür (O/E dönüşümü), yükseltir ve tekrar iletim için optik forma geri dönüştürür (E/O dönüşümü). Etkili olmasına rağmen, bu yaklaşım birden fazla dönüşüm içerir ve sistem karmaşıklığını ve maliyetini artırır. Optik yükselteçler, elektro-optik dönüşüm yapılmadan sadece optik ortamlarda çalıştırılan cihazlardır. Elektro-optik dönüştürücüler karmaşık ve hataya eğilimli cihazlarken, optik yükselteçler sadece sinyal yükseltme işlevi yapmaktadır. Bu nedenle elektro-optik dönüştürücülerle kıyaslandığında optik yükselteçler basit bir çözüm olmaktadır. Basit olmanın yanında, optik yükselteçler ayrıca kullanışlı ve avantajlıdırlar. Bundan dolayı, elektro-optik dönüştürücüler yerine iletilen optik sinyalin yükseltilmesi için bir fiber linki boyunca belirli aralıklarla optik yükselteçler kullanılır. Bu sayede aynı fiber üzerinde pek çok sinyal hızlı bir şekilde taşınabilir.

Optik Yükseltme işlemi, pompalanan ortamdaki uyarılmış yayılma yoluyla gerçekleşir. Pompa kaynağı, genellikle bir lazer ışığıdır. Optik Yükselteçte yükseltme prensibi, atomların varlığı ve bunların farklı enerji seviyelerine sahip olmasından kaynaklanır. Soğurma sürecinde, yüksek enerji seviyelerine ulaşmak için atomlar enerji emer. Giriş sinyallerini yükselterek temel duruma geri dönerler. Yayılma ve soğurmanın iki durumu arasındaki fark, temel durum ve uyarılmış durum arasındaki farka eşittir. Bir atomun uyarılmış duruma geçerek enerji depolama süreci, ışık veya fotonun üzerine çarptığında gerçekleşir. Yüksek enerji durumuna ulaştıktan sonra, atomlar kararlı değildir ve her zaman bir foton üreterek temel duruma dönmeye eğilimlidir. Bu, enerji seviyelerinde kendiliğinden yayılma fenomeni olarak adlandırılır. Optik fiber yükseltme, uyarılmış yayılma fenomenini yaşar ve bu yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, yüksek enerjili veya uyarılmış enerji durumundaki elektronla birlikte hareket ettiği zaman gerçekleştirilir. Bu, atoma toplam enerjinin bir kısmını kaybederek yarı kararlı duruma geçme potansiyeli sağlar. Yarı kararlı durum, uyarılmış duruma yakın ve hemen altındadır. Bu durumdan sonra, yüksek miktarda enerji kaybeden atomlar, ilave bir foton üreterek temele döner. Yükseltmenin elde edilmesi için,

yüksek enerji durumlarındaki atom sayısı, ters birikme N1<N2 elde etmek için düşük enerji durumundan daha fazla olmalıdır. N1, N2 ise alt ve üst seviyelerin iyon yoğunluklarını temsil eder [81].

Yükselteç ortamı, Nadir Toprak Elementi (NTE) katkılı fiber, yarı iletken veya optik fiber gibi çeşitli malzemelerden yapılabilir. Bu nedenle farklı çalışma prensiplerine ve özelliklerine sahip çeşitli optik yükselteç türleri mevcuttur. Şekil 3.1'de optik yükselteç çeşitleri şematize edilmiştir. Optik yükselteçler, iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar Yarıiletken Optik Yükselteçler (YOY) ve Fiber yükselteçler (FY)'dir.

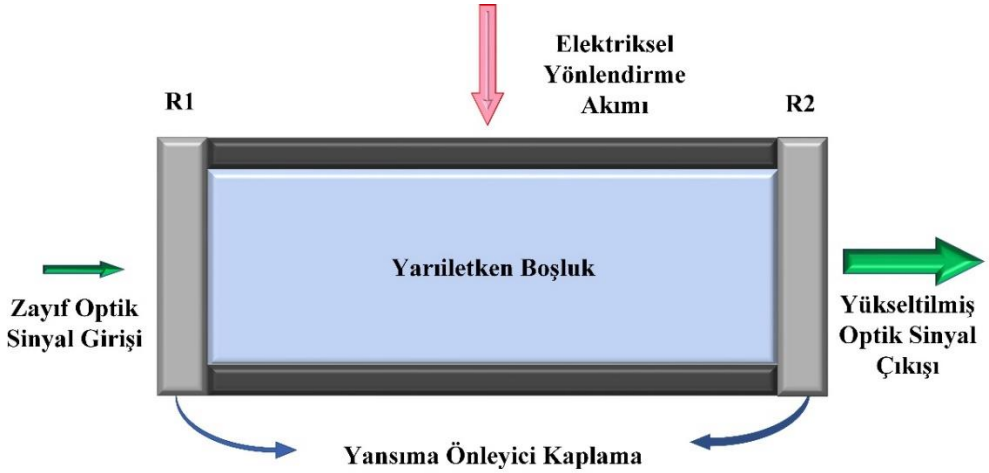


Şekil 3.1. Optik Yükselteç Türleri [82]

3.2.1. Yarıiletken optik yükselteçler

Yarıiletken optik yükselteçler (YOY), doğrudan band aralığı olan yarıiletken malzemelerden üretilirler. Şekil 3.2'de temel YOY şeması gösterilmiştir. Dışarıdan uygulanan elektrik akımı ile giriş sinyaline kazanç sağlayan bölüm cihazdaki aktif alandır. Kazanç, uygun yarıiletken malzemenin elektriksel olarak pompalanmasıyla elde edilmektedir. Gelen foton uyarılmış yayınım, dahili malzeme kayıpları ve uyarılmış soğurma kayıplarını aştığında yükseltilebilir.

Yayılan sinyali, gömülü dalgaboyu aktif bölgede hapseder. Ancak bu sınırlama zayıf olduğundan sinyalin bir bölümü çevreleyen kılıfa sızar. Bu nedenle çıkış sinyaline gürültü karışır. Bu gürültü, yükseltme sırasında kendiliğinden oluşurken, kazanç spektrumunda dalgalanmalara sebep olur [83].



Şekil 3.2. Temel yarıiletken yükselteç şeması [84]

Uzun mesafe optik haberleşme sistemlerinde, optik tekrarlayıcılar arasındaki mesafenin artmasından kaynaklı link kayıplarının dengelenmesinde YOY'lar kullanılabilir. YOY'ların çift yönlülük, DBÇ kapasitesi, çalışma modunun basitliği ve düşük güç tüketimi gibi avantajları bulunmaktadır [85].

YOY, diğer yarıiletken tabanlı optoelektronik cihazlarla kolayca entegre edilebilir. YOY kazancı, sinyallerin polarizasyonuna bağlı olarak değişebilirken, yüksek güç seviyelerinde doyma ve bozulmaya karşı hassastır. Fiber yükselteçlere göre daha ucuz iken daha yeni bir teknolojidir ve daha az olgunlaşmıştır.

3.2.2. Fiber yükselteçler

Fiber yükselteçler (FY), optik sinyalleri amplifikasyon yoluyla güçlendirmek için kullanılan optik yükselteçlerin bir alt dalıdır. Optik fiberlerde iletilen sinyaller, zayıflama ve dispersiyon gibi etkenlerden dolayı güç kaybeder. FY, bu kayıpları telafi ederek sinyallerin uzun mesafeler boyunca iletilmesini sağlar.

FY, optik sinyalleri önemli ölçüde yükseltebilir ve uzun mesafeler boyunca iletilmesini sağlayabilir. Düşük gürültü şekline sahiptir ve sinyallerin bozulmadan iletilmesini sağlarken, geniş bir bant genişliğine sahiptir ve farklı dalgaboylarındaki sinyalleri yükseltebilir. Küçük boyutludurlar ve az yer kaplarlar. Uzun ömürlüdür ve uzun yıllar boyunca kullanılan FY diğer yükselteç türlerine göre daha az güç tüketirler.

Her katkı maddesinin kendine özgü spektral özellikleri ve yükseltme kazancı vardır. Bu nedenle FY, yükseltme ortamında kullanılan katkı maddesine göre çeşitlenmiştir. Bunun yanında yükseltme tekniğine göre de çeşitlenmiştir.

Fiber Raman yükselteçler (FRY)

Maliyet açısından daha verimli bir çözüm için, tek modlu fiber tek başına kazanç ortamı olarak kullanılabilir. Bu tekniğe, pahalı katkılanmış iyonlara ihtiyaç duymadan, yüksek pompa gücü altında sinyalin güçlendirilmesini sağlayan yükselteçlere FRY adı verilir. Işık dalgaları fiber optik kablo içerisinde ilerlerken, bir fotonun daha düşük enerjili fotona elastik olmayan saçılmalarından dolayı, yayılan ışığın dalgaboyundan farklı dalgaboylarında, geri ve ileri yönlü, yeni ışık dalgaları oluşmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan saçılmalar olarak iki kısma ayrılmaktadır. Doğrusal olmayan saçılmalar silikanın titreşimli uyarma modları ile ilgilidir. Bu durumlar, uyarılmış Raman saçılması (URS) ve uyarılmış Brillouin saçılması (UBS) olarak isimlendirilmektedir. UBS akustik fononlardan geçerken, URS optik fononlardan geçer. UBS tek yönde oluşurken, URS ileri ve geri olarak iki yönde de oluşabilir. URS kullanılarak FRY'ler üretilmiştir [86].

FRY ancak optik olarak pompalandığında, kazanç elde edebilebilir. Pompa ışını ve sinyal ışını w_p ve w_s frekanslarında, bir kuplör aracılığıyla fibere enjekte edilir. Enerji, pompa ışınlarından sinyal ışınlarına doğru URS aracılığıyla aktarılırken, her iki ışın da fiberle birlikte veya karşılıklı yayılır [75]. Raman Yükseltecin yapısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Raman yükseltecin yapısı

FRY'lerin Nadir Toprak Elementi Katkılı Fiber Yükselteçler (NTEKFY) ile karşılaştırıldığında, sinyalin dalgaboyundan daha düşük dalgaboylarında pompa kullanılarak sinyal yükseltilebilmesi ve iletilen veri sinyallerine orta seviyede Raman yükseltmesi sağlayan fiber kullanılabilmesi gibi avantajları bulunmaktadır [87]. Fiber Raman Yükselteçlerin sağladığı diğer avantajlar ise, geniş bant genişliği, düşük gürültü, yüksek kazanç ve uzun ömür sayılabilir. Ancak, güç sınırı, gecikme ve maliyet gibi bazı dezavantajları da vardır.

Fiber Brillouin yükselteçler (FBY)

Çalışma prensibi FRY ile aynıdır. Farklı olarak FBY'de Uyarılmış Brillouin saçılması (UBS) kullanılır. UBS, optik fiberlerde en verimli doğrusal olmayan amplifikasyon mekanizmasıdır. FBY, UBS sayesinde pompalama gücünün bir kısmını sinyal dalga boyuna aktararak sinyalin yükseltilmesini sağlarlar. Fiziksel olarak her bir pompalama fotonu enerjisinin $\hbar\omega_p$ büyük bir kısmını kullanarak $\hbar\omega_s$ enerjili bir sinyal foton üretir. Kalan enerji ise akustik bir foton üretmek için kullanılır [88].

FRY, FBY kazanç bant genişliği optik fiberlerde daha kısadır. Bu da uygulanabilir iletişim hızını sınırlar. Bu nedenle, FBY dar bantlı yükseltme özelliği nedeniyle bir yükselteç yerine aktif filtre olarak daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

UBS ve URS arasında birçok benzerlik olmasına rağmen, UBS birkaç noktada URS'den farklılık gösterir:

1. Brillouin saçılması, akustik frekanslı bir fonon ve saçılan bir foton nedeniyle meydana gelirken, Raman saçılması moleküler titreşimlerden kaynaklanır.
2. UBS'de frekans kayması ters yönde maksimum düzeydedir ve ileri yönde sıfıra yaklaşır. URS'de ise frekans kayması yön bağımsızdır.
3. URS'in optik güç eşiği, UBS'den üç kat mertebeye kadar daha yüksektir.
4. Saçılan ışığın frekansı UBS için yaklaşık 10 GHz, URS için ise 13 THz kadar kayar.
5. Brillouin kazanç bant genişliği, Raman kazanç bant genişliğine kıyasla son derece dardır [89].

Parametrik fiber yükselteçler (PFY)

Fiber tabanlı Parametrik yükselteçler (PFY), özellikle haberleşme alanında darbe kaynağı, demultiplekser, ön yükselteç, dalga boyu dönüştürücü ve tamamen optik örnekleme gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılan çok işlevli cihazlardır. PFY aynı anda olmasa da çok yüksek kazanç ve geniş bantgenişliği sunabilir. PFY'lerin benzersiz özelliklerinden biri, tek yönlü kazancın sağlanmasıdır. Bu sayede diğer birçok yükselteç türünün aksine geriye yayılan YKY gürültüsü oluşmaz [90].

PFY'ler, dört etkileşen foton arasındaki faz eşleşmesini gerektiren yüksek verimli dört-foton karışımı (DFK) prensibine göre çalışır. Kısmen dejenere DFK'de, kuantum mekaniği açısından, optik pompadan iki foton yok edilirken, enerji ve momentum korunarak yeni frekanslarda iki yeni foton oluşturulur. Diğer bir deyişle, fotonlar bir pasif ortam olarak fiber ile optik pompadan, her ikisi de pompa alanı frekansının etrafında simetrik olarak yerleştirilmiş olan sinyal ve onun eşleniğine aktarılır [91].

PFY'ler, ışık dalgası sistemlerinde optik yükseltme, faz konjugasyonu ve dalga boyu dönüşümü gibi çeşitli sinyal işleme uygulamalarında kullanılabilir. Tek pompalı, çift pompalı, dejenere ve dejenere olmayan PFY gibi çeşitleri bulunmaktadır. Pompa dalgaboyu esnekliği, ayarlanabilir kazanç spektrumu gibi avantajları varken; karmaşık konfigürasyon, güçlü pompa ihtiyacı ve doğrusal olmayan etkilere karşı hassasiyet gibi çeşitli dezavantajları bulunmaktadır.

Nadir toprak elementi katkılı fiber yükselteçler (NTEKFY)

Katkılı Fiber Yükselteçler (KFY), fiberin içinde Erbiyum (Er^{3+}), Europium (Eu^{3+}), Neodimyum (Nd^{3+}), Holmium (Ho^{3+}), Disprosium (Dy^{3+}) Gadolinium (Gd^{3+}), Samarium (Sm^{3+}), Promethium (Pm^{3+}), Cerium (Ce^{3+}), Lantanyum (La^{3+}) ve Tulyum (Tm^{3+}) gibi nadir toprak elementi katkı malzemeleri kullanan yükselteç kategorilerinden biridir. Fiber çekirdeğine üç değerlikli nadir toprak iyonları ile katkılanmış, belirli pompa dalga boylarında ışığı soğurarak uyarılmış yayılma yoluyla bazı sinyal dalga boylarında yayan bir optik fiber yükselteçlere Nadir Toprak Katkılı Fiber Yükselteçler (NTEKFY) denir [92].
Nadir Toprak Elementleri (NTE) yeryüzünde pek çok elementten daha çok bulunmaktadır. 17.yüzyılda oksit bileşikleri şeklinde bulunmuşlar ve bu nedenle gruplandırılamamışlardır.

Oksitlerinin metale indirgenmesi çok zordur. Doğada benzeri bir maddeye sık rastlanmadığı için bu şekilde isimlendirilmişlerdir. 18. yüzyılın sonlarında yapılan çalışmalarda ise nadir toprak elementler kimyasal davranışlarına göre sınıflandırılmıştır.

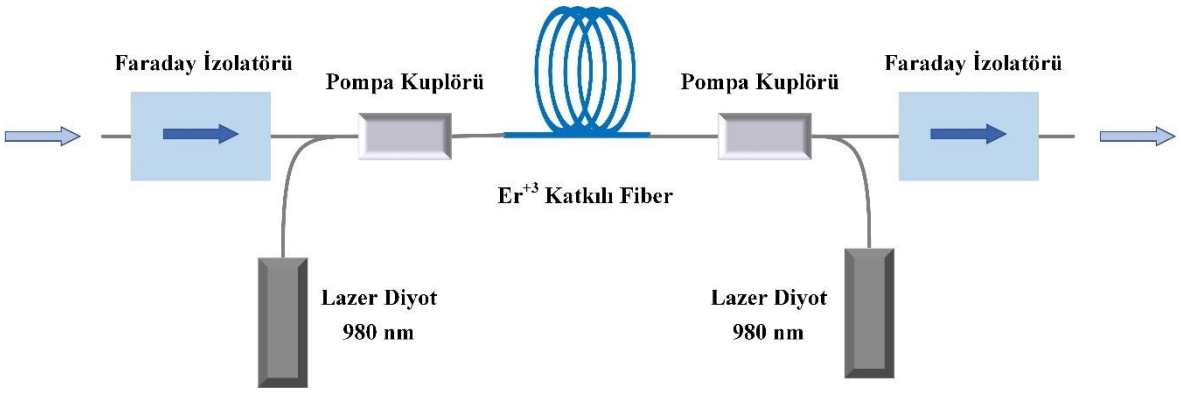
Katkılanan NTE, NTEKFY'de çalışma dalgaboyu ve kazanç bant genişliği gibi yükselteç özelliklerini belirler. Erbiyum (Er^{3+}), Holmiyum (Ho^{3+}), Tulyum (Tm^{3+}), Neodmiyum (Nd^{3+}), Parasedmiyum (Pr^{3+}), İtterbiyum (Yb^{3+}) gibi farklı NTE'ler, 0,5 – 3,5 μm aralığındaki farklı dalgaboylarında yükseltme işlemi yapabilirler. Çizelge 3.1'de bazı NTE katkı iyonları ve özellikleri listelenmiştir [92]. Katkılanan element ve yükselteç parametreleri değiştirilerek kullanılacak alana göre istenen özelliklere sahip NTEKFY oluşturulabilmektedir.

Çizelge 3.1. Bir kısım nadir toprak elementi katkı iyonları ve özellikleri

NTE Katkı İyonu	Ana Fiber Materyal	Işıma Dalgaboyu Aralığı (μm)
Erbiyum (Er^{+3})	Silikat, fosfat ve florür cam	1,5-1,6; 2,7
Tulyum (Tm^{+3})	Silikat, germanet ve florür cam	0,8; 1,45-1,53; 1,7-2,1
Holmiyum (Hm^{+3})	Silikat, florozirkonat cam	2,08; 2,12; 2,98
İterbiyum (Yb^{+3})	Silikat cam	1,0-1,1
Neodmiyum (Nd^{+3})	Silikat ve fosfat cam	0,9-0,95; 1,03-1,1; 1,32-1,35
Praseodyum (Pr^{+3})	Silikat, fosfat cam	1,3; 0,635; 0,6; 0,52; 0,49

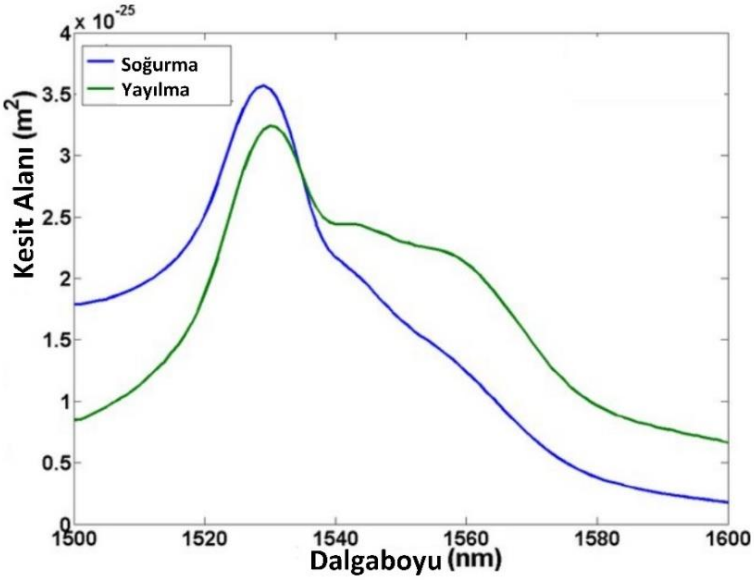
Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (EKFY)

EKFY, üzerinde en çok çalışma yapılan, C ve L bandında en çok kullanılan NTEKFY çeşididir. 1550 nm civarındaki optik sinyalleri yükseltilmesi için Erbiyum iyonları ile katkılanmış fiber optik kablo kullanan bir fiber yükselteçtir. Haberleşme sistemlerinde, optik erişim ağlarında ve optik sensörlerde yaygın olarak kullanılır. Basit bir EKFY tipik kurulumu Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Ana bileşeni, genellikle tek modlu fiber (bazen de birkaç modlu fiber) olan erbiyum katkılı optik fiberdir. Şekilde de görüleceği gibi, aktif fiber iki lazer diyotundan gelen ışıkla pompalanmıştır (çift yönlü pompalama). Bununla birlikte, ileri veya geri yönde tek yönlü pompalama (eş yönlü ve karşı yönlü pompalama) da oldukça yaygındır.



Şekil 3.4. EKFY'nin basit şematik gösterimi

Şekil 3.5'te Er^{3+}'un yayılma ve soğurma spektrumları gösterilmiştir. Genellikle 980 nm veya bazen 1450 nm civarında bir dalga boyuna sahip olan pompa ışığı, Er^{3+} iyonlarını $^4I_{13/2}$ seviyesine uyarır. Bu seviyeden, uyarılmış yayılma yoluyla geriye $^4I_{15/2}$ temel durumuna 1,5 µm dalga boyu bölgesindeki ışığı yükseltebilirler. Gösterilen kurulum ayrıca iki Faraday izolatörü içerir. Girişteki izolatör, yükseltilmiş kendiliğinden yayılmadan kaynaklanan ışığın geri beslenmesini önleyerek önceki aşamaları bozmasını engellerken, çıkıştaki izolatör, çıkış ışığı yükseltece geri yansıtılırsa lazerleşmeyi bastırır. İki lazer diyot EKF'i pompa ile güçlendirir. Pompa ışığı, fiber bağlantıları yoluyla enjekte edilir. Optik izolatörler, cihazın geri yansımalara olan hassasiyetini azaltır.



Şekil 3.5. Er^{3+}'un soğurma ve yayılma spektrumları

Bir optik fiber iletişim sisteminde, EKFY'ler sinyalleri uzun mesafeler boyunca iletmek için gerekli olan yükseltmeyi sağlamak için kullanılır. Hat-içi yükselteç olarak; sinyallerin iletim

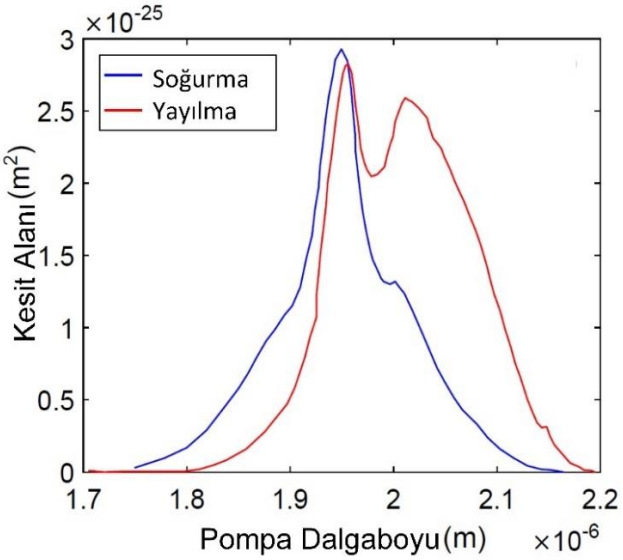
sırasında zayıflamasını önlemek için, güç yükselteci olarak; sinyalleri iletim fiberine enjekte etmeden önce yükseltmek için, ön yükselteç olarak ise, alıcı tarafından algılanmadan önce sinyalleri yükseltmek için kullanılır. Bunların yanında optik çapraz bağlantı tekniğinde ve dalgaboyu ekleme/çıkarmada kayıpları telafi etmekte kullanılır [93].

EKFY'ler, sinyalleri önemli ölçüde yükseltebilen yüksek kazanç sunarken, geleneksel yükselteçlere kıyasla daha düşük gürültü seviyesine sahiptirler. Geniş bir optik sinyal bant genişliğini destekleyebilirler, polarizasyona duyarlı değildirler. Diğer yükselteç türlerine göre daha az bakım ve onarım gerektirmenin yanında daha uzun ömürlüdürler. EKFY'lerin bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları bulunmaktadır. Pompa lazeri nedeniyle diğer yükselteçlerden daha fazla güç tüketirler ve daha pahalı olabilirler.

Holmiyum katkılı fiber yükselteçler (HKFY)

TKFY'ler üzerine son zamanlarda yapılan çalışmalar 1660-2050 nm dalga boyu aralığını kapsayan yüksek kazançlı, düşük gürültülü yükseltme sağladığını göstermiştir [94-97]. Bununla birlikte, bir TKFY'i 2050 nm'den daha uzun dalga boylarında çalıştırmak, Tulyumun yayılma kesitinin azalması nedeniyle zorlaşır [98]. Bu nedenle, 2 μm iletim penceresinin uzun dalga boyu bölgesine tam erişim sağlamak için alternatif nadir toprak elementi iyon katkılılarına ihtiyaç duyulur. Holmium katkılı fiberler (HKF'ler) tipik olarak 2,1 μm'de çalışır ve bu daha uzun dalga boylarında çalışma için cazip bir kazanım ortamı sunar [99]

HKFY'lerde sinyal amplifikasyon mekanizması, Ho^{3+} iyonunun soğurma ve yayılma spektrumları ile enerji seviyesi diyagramının analizi ile anlaşılabilir. Ho^{3+}'ın pompa soğurma ve yayılma spektrumları Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Genelde, HKF yayılma kesitinin maksimum olduğu dalgaboylarında pompa ile beslenmelidir. Şekilden görülebileceği gibi, maksimum yayılma yaklaşık 1,94 μm'de gerçekleşmektedir. Bu nedenle, HKF'yi pompalamak için 1,94 μm dalga boyu tercih edilmektedir [100].



Şekil 3.6. Ho^{3+}'un pompa soğurma ve yayılma spektrumları

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

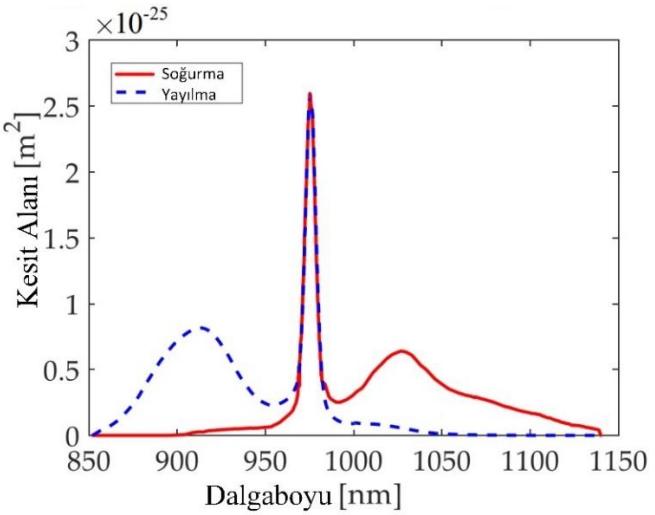
Tulyum katkılı fiber yükselteçler (TKFY)

Bu tez çalışmasında, NTEKFY çeşitlerinden biri olan TKFY kullanılmıştır. TKFY bölüm 4'te detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde ise diğer fiber yükselteçlerden bahsedilmiştir.

İterbiyum katkılı fiber yükselteçler (İKFY)

İterbiyum iyonunun spektroskopisi diğer nadir toprak elementlerine kıyasla basittir. Sadece iki seviyeli enerji düzeyi ile ilgilenilir: temel durum ve uyarılmış durum. Bunlar sırasıyla dört ve üç alt seviyeye sahiptir. Üç seviyeli sistemlerde pompa enerjisi ile uyarılan üst seviyedeki elektronlar doğrudan sinyal dalga boyunu emebilir. Bu durum kazancı azaltır. Şekil 3.7'de İKFY'nin soğurma ve yayılma spektrumu görülmektedir [101]. İKFY'lerde soğurma ve yayılma spektrumlarının yapısı, dalga boyu seçimine bağlı olarak farklı kazanç davranışları ortaya çıkarır. 910 nm ve 975 nm pompalamaları yaygındır ancak farklı dalga boyları da (860 nm, 1047 nm, 1064 nm) kullanılabilir. Kazanç, 975 nm yayılma tepesinde

veya 1030 nm merkezli daha geniş bir tepede elde edilebilir. 975 nm civarında kısa dalga boylarında üç seviyeli davranış gözlemlenirken, daha uzun dalga boylarında dört seviyeli davranışa yaklaşılır [102].



Şekil 3.7. Yb^{+3}'un soğurma ve yayılma spektrumu

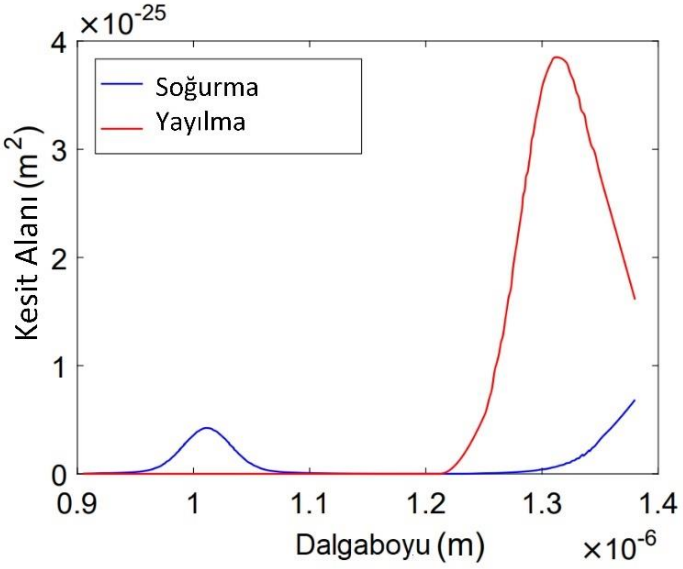
Geniş kazanç bant genişliğinin yanı sıra, İKFY'ler yüksek çıkış gücü ve mükemmel güç dönüşüm verimliliği sunabilir. EKFY'de bilinen birçok komplikasyon, İKFY'lerde önlenmiştir. Uyarılmış durum yayılımı ve dolayısıyla enerji transferi ile yoğunluk azalması meydana gelmez ve yüksek katkılama seviyeleri mümkündür, bu da kısa bir fiber uzunluğunda yüksek kazanç sağlar. Geniş bant genişliği, ultra kısa darbelerin amplifikasyonu için idealdir. Ayrıca, diyot lazerleri veya hatta yüksek güçlü Nd lazerleri dahil olmak üzere çeşitli pompa şemalarına olanak tanıyan geniş bir pompa dalga boyu aralığı (860-1064 nm) mevcuttur. İKFY'lerin ömrü EKFY'lere kıyasla daha uzundur ve daha az ısınır. Bu da onları daha kompakt ve taşınabilir hale getirir. Ancak daha pahalıdırlar. Ayrıca dalga boyu değişimlerine ve sıcaklığa daha hassas olabilir. İKFY teknolojisi EKFY teknolojisi kadar gelişmiş değildir.

Praseodyum katkılı fiber yükselteçler (PKFY)

Praseodyum katkılı fiber yükselteç (PKFY), 1,3 µm ve 1,5 µm dalga boyu aralıklarında yüksek kazanç ve düşük gürültü sunarak mevcut haberleşme altyapısına uyumludur. Bu dalgaboyu aralığında ilgi çekmekte ve sinyal yükseltmesi sağlamaktadır. PKFY, optik iletişim ve sensör gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. PKFY üzerine yapılan

çalışmalar, kazanç verimliliğini artırmak, sıcaklığı kontrol etmek ve uygun yardımcı malzeme seçmek üzerine yoğunlaşmaktadır [103-107].

Şekil 3.8'de Praseodyumun soğurma ve yayılma spektrumu gösterilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi, Pr^{3+} iyonunun iki pompa yayılma bandı vardır. Bu bantların zirve merkezleri 1010 nm ve 1400 nm'dir. Pr^{3+} iyonlarını uyarım için literatürde yaygın olarak 1000-1040 nm aralığında pompa dalga boyları kullanılmaktadır. Yayılma 1220 nm'de başlar ancak yayılma kesiti maksimumu yaklaşık 1300 nm civarındadır [104,108,109].



Şekil 3.8. Pr^{+3}'un soğurma ve yayılma spektrumu

PKFY'ler, yüksek kazanç, düşük gürültü ve geniş bant genişliği gibi birçok avantaja sahip yükselteçlerdir. Bu da onları optik iletişim, optik sensörler, lazer teknolojisi ve tıbbi görüntüleme gibi çeşitli alanlarda kullanışlı hale getirmektedir.

4. TULYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLER

TKFY, optik sinyalleri yükseltmek için TKF kullanan bir fiber yükselteç türüdür. Silika ve florür tabanlı fiberin içine Tulyum iyonları (Tm^{3+}) katkılanmıştır. Bu yükselteçler, ışık-madde etkileşimi ve uyarılmış emisyon prensiplerine dayanarak çalışır. Özellikle uyarılmış emisyon, sinyal yükseltmede önemli bir rol oynar. Belirli bir dalga boyuna sahip zayıf sinyal ışığı, uyarılmış Tm^{3+} iyonları ile etkileştiğinde, sinyal ile aynı dalga boyuna ve faza sahip fotonların emisyonunu uyarır. Bu işlem, iyon popülasyonu ters çevirmesine yol açarak sinyal için genel kazanç sağlar.

TKFY'nin katkılandığı fiber tabanına göre silika tabanlı TKFY ve florit tabanlı TKFY olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Silika tabanlı TKFY'in kazancı, florit tabanlı TKFY'ye göre kısmen düşüktür. Düşük pompa güçlerinde Florit tabanlı TKFY kazancı daha yüksek seyretmektedir. Her iki TKFY'nin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Florit tabanlı TKFY, daha düşük doğrusal olmayan etkiler, yüksek kırılma indisi gibi avantajlar sağlarken; üretim zorluğu, zehirli içerik, düşük ısıl kararlılık ve silika tabanlı fiberlerle uyuşmamazlık gibi dezavantajlara sahiptir. Öte yandan, silika tabanlı TKFY'in florit tabanlı TKFY'deki gibi sınırlılamaları bulunmamakla beraber yüksek ısıl kararlılık, gelişmiş mekanik sağlamlık, olgun üretim teknolojisi gibi pek çok avantajı bulunmaktadır. Ana fiberin (silika veya florür) özel malzeme özellikleri, TKFY'nin performansını önemli ölçüde etkiler. Bu özellikler arasında çekirdek kırılma indisi, fonon enerjisi dağılımı ve doğrusal olmayan etkiler bulunur. Bunlar kazanç bant genişliği, gürültü şekli ve genel verimlilik gibi faktörleri etkiler.

Bu bölümde TKFY'nin temel bileşeni olan Tulyum'un tarihi, kullanım alanları, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve teorik analizinden bahsedilecektir. Soğurma ve yayılma spektrumu, Tulyum'un enerji seviyesi ve teorik analizi çalışmanın bir parçası olan silika tabanlı Tulyum üzerinden incelenmiş olmakla beraber karşılaştırma yapmak amacı ile florit tabanlı Tulyum üzerine de incelemeye yer verilmiştir.

4.1. Tulyum'un Tarihi ve Kullanım Alanları

Tulyum, 1879 yılında İsveçli kimyager Per Teodor Cleve tarafından keşfedilmiştir. Cleve, gadolinit mineralini incelerken, daha önce bilinmeyen bir elementin varlığını keşfetmiştir [110]. Eskiden dünyanın en kuzey kısmının (Norveç, İsveç ve İzlanda) yerleşim yerlerine "Thule" adını vermişlerdi. Element, Thule'den ilham alarak "Tulyum" adını bu bölgeden almıştır [111].

Tulyum, Dünya'da en az bulunan elementlerden biridir. Yerkabuğunda milyonda 0,5 ppm oranında bulunur. Tulyum, monazit ve gadolinit gibi minerallerde bulunur. Tulyum, monazit ve gadolinit minerallerinden iyon değişimi ve indirgeme yöntemleri kullanılarak üretilir [112].

Lazerler ve optik yükselteçlerin yanında tıbbi, manyetik rezonans (MR) ve X görüntülemede kullanılmaktadır. Tulyum, bazı alaşımlarda kullanılır. Tulyum alaşımları, daha güçlü ve daha dayanıklı olma özelliğine sahiptir.

Tulyum lazerleri, 1,9 μm dalga boyunda ışık üretir. Bu lazerler, çeşitli tıbbi tedavilerde kullanılır. Örneğin, tulyum lazerleri, göz cerrahisi, cilt tedavisi ve kanser tedavisinde kullanılır. Tulyum lazerleri, metal kesme, kaynak ve sondaj gibi malzeme işlemede de kullanılır. Tulyum bazlı kontrast maddeleri, X-ışını ve MR taramalarında kullanılır. X-ışını taramalarında, tulyum bazlı kontrast maddeleri, damarlar, organlar ve tümörler gibi dokuların daha net görünmesini sağlar. MR taramalarında, tulyum bazlı kontrast maddeleri, kaslar, bağlar ve kıkırdak gibi dokuların daha net görünmesini sağlar. Tulyum bazlı floresan ekranlar, X-ışınlarının daha net görünmesini sağlar. Tulyum bazlı floresan ekranlar, X-ışınlarının daha parlak ve daha keskin görünmesini sağlar [113-116].

Tulyum, bazı alaşımlarda kullanılır. Tulyum alaşımları, daha güçlü ve daha dayanıklı olma özelliğine sahiptir. Örneğin, tulyum alaşımları, havacılıkta ve uzay araştırmalarında kullanılır [117]. Tulyum, nükleer enerjide, elektronikte ve katalizörlerde de kullanılır. Nükleer enerjide, tulyum nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu olarak kullanılır. Elektronikte, tulyum yarı iletken malzemelerde kullanılır. Katalizörlerde, tulyum kimyasal reaksiyonları hızlandırmak için kullanılır [118].

4.2. Tulyum’un Özellikleri

Bu bölümde Tulyum elementinin erime ve kaynama noktaları, elektron dizilimi ve kabuk konfigürasyonu gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri anlatılmıştır. Ayrıca Yükseltme işleminde büyük önem arz eden Tulyum iyonlarının enerji seviyeleri ve yayılma spektrumundan bahsedilmektedir.

4.2.1. Tulyum’un fiziksel ve kimyasal özellikleri

Tulyum, bıçak kullanılarak kolaylıkla kesilebilen yumuşak bir metaldir. Resim 4.1’de görüldüğü gibi rengi gridir [119]. Dövülerek ince metal levhalara dönüştürülebildiğinden üzerinde çalışılması kolay bir metaldir. Hava ile temas etmesi halinde hemen matlaşır, buna rağmen diğer NTE’ler ile karşılaştırıldığında oksidasyona daha dirençlidir. Bu nedenle, Tulyum’un kuru havada korozyon direnci iyidir. Doğadaki en az bulunan NTE olup, saf halde bulunmaz. Diğer NTE’ler ile monazit, gadolinit, ekzenit gibi mineral şekillerinde bulunur [112].



Resim 4.1. Oda sıcaklığında Tulyum

Tulyum, periyodik cetveldeki Lantan (La, Z=57) ile başlayıp Lutesyum (Lu, Z=71) ile biten lantanit serisinde bulunan metalik bir elementtir. Tulyumun atom numarası 69 ve atom ağırlığı 168,93421'dir. Çizelge 4.1, periyodik tabloda tulyumun özelliklerini göstermektedir [120].

Çizelge 4.1. Tulyum'un özellikleri

Atom Numarası	69
Atom Ağırlığı	168,93421
Erime Noktası	1818 K (1545 ^{o}C yada 2813 ^{o}F)
Kaynama Noktası	2323 K (1950 ^{o}C yada 3542 ^{o}F)
Oda Sıcaklığındaki Yoğunluğu	9,321 g/cm^{3}
Oda Sıcaklığındaki Fazı	Katı
Element Sınıflandırması	Metal

Çizelge 4.2'te Tulyum'un elektron ve kabuk dağılımı görülmektedir. Tulyum'un kabuk konfigürasyonu her enerji seviyesinde sırayla 2, 8, 18, 31, 8 ve 2 elektron bulunur. Tulyum'un elektron konfigürasyonu ise $1s^2\ 2\ s^2\ 2p^6\ 6d^{10}\ 4s^2\ 2p^6\ d^{10}\ f^{13}\ 5s^2\ 2p^6\ 6s^2$ dir [112].

Çizelge 4.2. Tulyum'un elektron ve kabuk konfigürasyonu

Element	Kabuk başına düşen elektronlar	Elektron konfigürasyonu	Değerlik elektronları	Oksidasyon hali
Tulyum	2, 8, 18, 31, 8, 2	[Xe] $4f^{13}\ 6s^2$	$4f^{13}\ 6s^2$	+3 (temel oksit)

Tulyum, yoğunluğu 9,321 g/cm3, erime noktası 1545 ^{o}C ve kaynama noktası 1950 ^{o}C olan bir elementtir. Tulyum'un oksidasyon direnci yüksek olduğu için oksijen veya havadaki diğer elementlerle kolayca reaksiyona girmez. Eş. 4.1'de görüldüğü gibi hava ile temas etmesi halinde yavaşça matlaşarak Tulyumoksit formuna dönüşür [112].

$$4\ Tm + 3\ O_2 \rightarrow 2\ Tm_2O_3 \qquad (4.1)$$

4.2.2. Tulyum'un enerji seviyesi

Işık, emilirken veya yayılırken foton olarak bilinen tanecikler halindedir. Bir fotonun enerjisi Eş. 4.2'deki gibi ifade edilir.

$$E_{foton} = hf = \frac{hc}{\lambda} \qquad (4.2)$$

Burada h: Plank sabitidir ve 6,63 x 10^{-34} Js değerindedir. f ışığın frekansı, λ ışığı dalgaboyu, c ışık hızıdır (3 x 10^{8} m/s). Gelen ışığın foton enerjisi hf, iki enerji seviyesi arasındaki enerji

farkıyla aynıysa, foton atom tarafından emilirek atom üst enerji seviyesine çıkar. E_2 üst, E_1 alt enerji seviyesi olmak üzere $E_{21}=E_2-E_1=hf$ yani E_{21}, E_2 ve E_1 enerji seviyeleri arasındaki farktır. Atom düşük enerji seviyesine geri döndüğünde, ışığı yayar. Yayılan ışığın frekansı ve dalgaboyu başta atomun emdiği ışığın frekans ve dalgaboyu ile aynıdır.

Enerji seviyesi, Eş. 2'deki enerji ve dalgaboyu arasındaki bağlantıdan dolayı cm^{-1} birimindedir. Eğer atom yüksek enerji seviyesinden, enerji seviyesi cm^{-1} olarak ifade edilen düşük enerji seviyesine ışınımsal geçiş yaparsa, yayılan ışığın dalgaboyu Eş. 4.3'teki denklemden elde edilir [121].

$$E_{foton} = E_{21}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda_2} - \frac{hc}{\lambda_1}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}$$

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}} \tag{4.3}$$

Çizelge 4.3. Tulyum iyonlarının enerji seviyeleri

Seviye	Enerji seviyesinin değeri (cm^{-1})	
	Teorik değer	Deneysel değer
$^3H_6$	100	105
$^3F_4$	5320	5900
$^3H_5$	8520	8390
$^3H_4$	12730	12673
$^3F_3$	14550	14446
$^3F_2$	15000	15092
$^1G_4$	21120	21275
$^1D_2$	28090	27926
$^1I_6$	33850	-
$^3P_0$	35600	35074
$^3P_1$	36640	36443
$^3P_2$	38440	38100

Burada, λ yayılan ışığın dalgaboyu, λ_2 üst enerji seviyesinde bir birim uzunluğun enerjisi iken λ_1 alt enerji seviyesindeki bir birim uzunluğun enerjisidir. Çizelge 4.3'de Enerji seviyelerindeki değerler yer almaktadır [122,123].

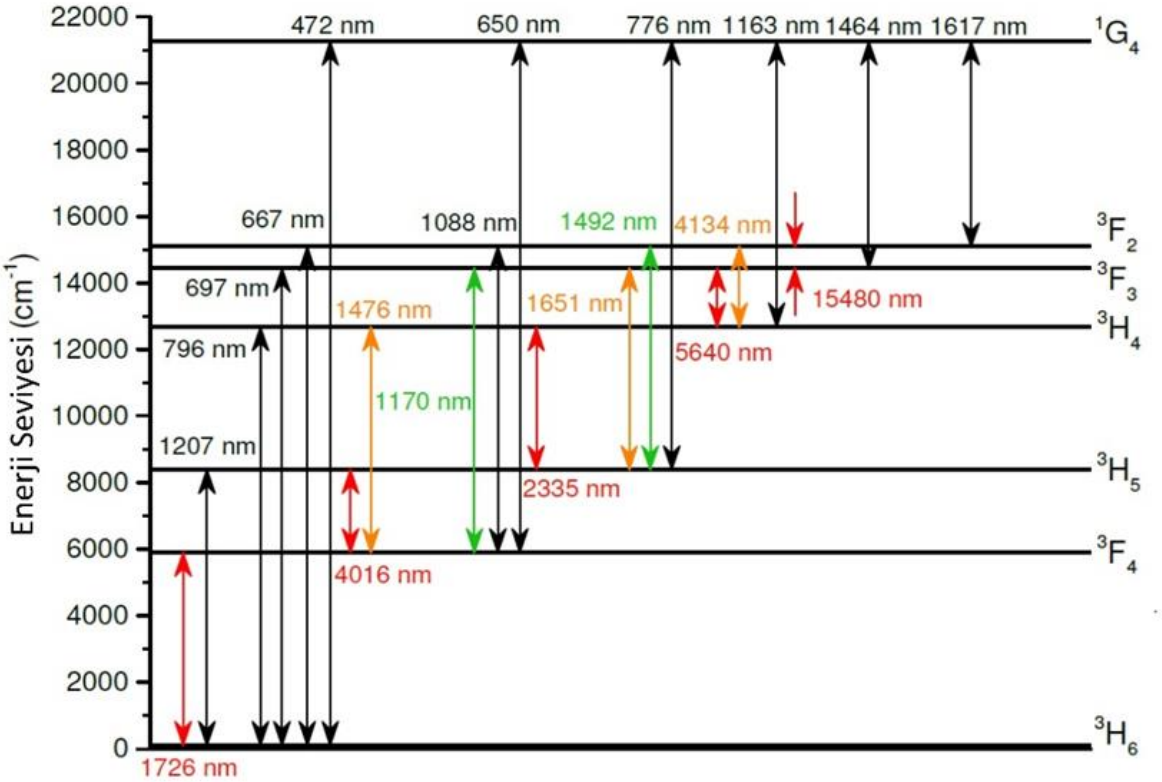
Çizelge 4.3'deki Tm^{3+} enerji seviyeleri, Russell-Saunders eşleşmesi kullanılarak etiketlenmiştir. Bu şema, seviyeleri $^{2S+1}L_J$ şeklinde etiketler. Burada; L, toplam orbital açısal momentumdur ve S, P, D, F, G, H, I, K... harfleri ile temsil edilir. Bu harfler sırasıyla L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7... değerlerini gösterir. S ise toplam spini temsil ederken J ise L ve S'nin vektörel toplamından elde edilen toplam açısal momentumdur [124].

Çizelge 4.3.'teki deneysel sonuçlar ile Eş. 3'den yararlanılarak uygulanabilir tüm geçişlerde bir enerji seviyesinden başka bir enerji seviyesine geçişiyle ilgili dalgaboyları Çizelge 4.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. Tulyum iyonlarının geçiş dalgaboyları

Enerji Seviyesi	$^3H_6$	$^3F_4$	$^3H_5$	$^3H_4$	$^3F_3$	$^3F_2$
$^3F_4$	1726					
$^3H_5$	1207	4016				
$^3H_4$	796	1476	2335			
$^3F_3$	697	1170	1651	5640		
$^3F_2$	667	1088	1492	4134	15480	
$^1G_4$	472	650	776	1163	1464	1617

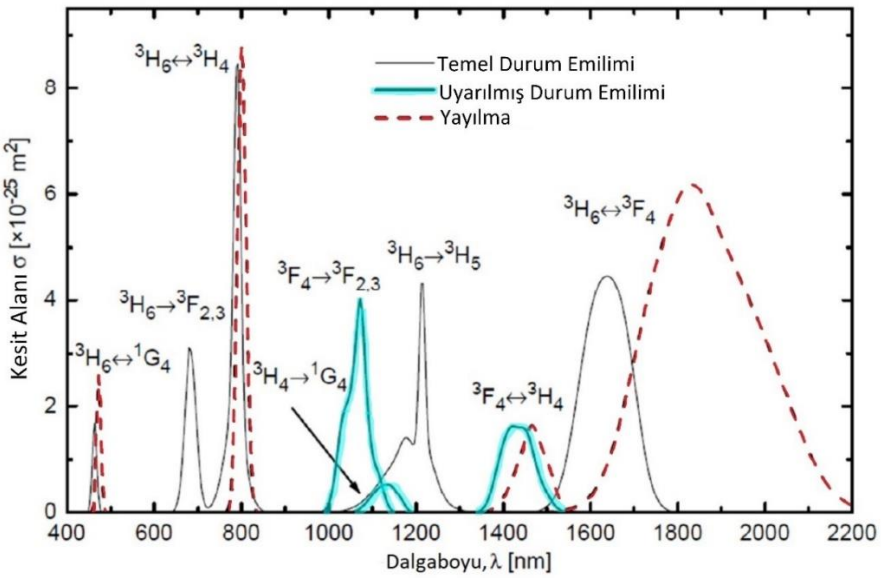
Şekil 4.1'deki Tm^{3+} enerji seviyesi diyagramı, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'i kullanarak oluşturulmuştur. Diyagram basittir ve Tm^{3+}'nin soğurma ve yayılma dalga boylarını tahmin etmekte yararlıdır. Burada, dalga boyu aslında iki katman arasındaki enerji farkını temsil eder [121].



Şekil 4.1. Geçiş dalgaboylarının yer aldığı Tulyum'un enerji seviye diyagramı

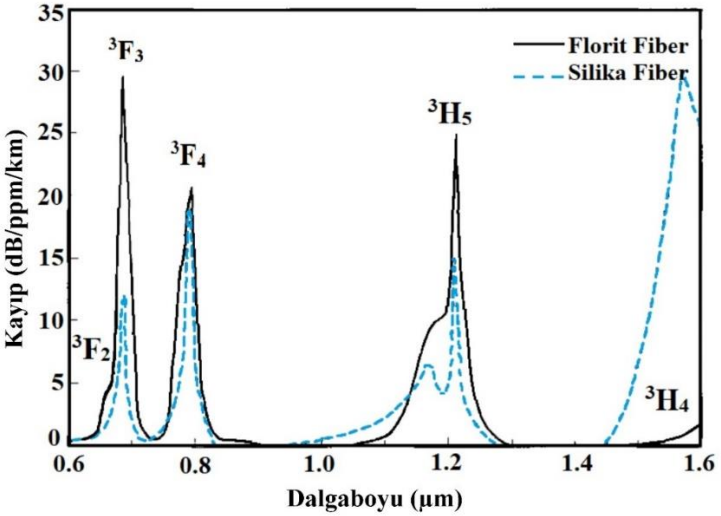
4.2.3. Tulyum'un yayılım spektrumu

Işığın hangi dalgaboyunda Tulyum tarafından emildiği, Tulyumun yayılım spektrumu ile gösterilir. Tulyum'un iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı, dalgaboyuyla eşleştiğinde ışık emilebilir. Şekil 4.2'de, Tulyum'un çapraz kesit soğurma ve yayılım spektrumu gösterilmektedir [125]. Spektrum, Tm^{3+} iyonlarının temel durum yayılımını gösterir. Temel durum yayılımı, en düşük enerji seviyesi olan temel durumdaki Tm^{3+} iyonlarında gerçekleşen yayılım sürecidir ve $^3H_6$ seviyesinden gerçekleşmektedir. Bunun yanında, Şekil 4.2'den daha yukarıdaki enerji seviyelerine doğru harekete geçirmesi gereken ışığın dalgaboyları da görülmektedir. $^3H_4$ seviyesine çıkarmak için 800 nm veya 1400 nm dalgaboylarında pompalar kullanılabilir. Pompa, başlangıçta taban durum $^3H_6$ iyonlarını $^3F_4$ enerji seviyesine itekler. Daha sonra aynı pompa, iyonların $^3H_4$ enerji seviyesine tetiklenmesini sağlar. $^3H_4$ enerji seviyesinden $^3F_4$ enerji seviyesine geçişi, 1470 nm yayılım bandında sonlanır.



Şekil 4.2. Tulyum'un soğurma ve yayılma spektrumu

Genelde, cam taban içindeki nadir toprak iyonlarının soğurma spektrumu homojen olarak genişler. Bu durum, soğurma spektrumunun keskin olduğu kristal tabanda farklıdır. Örneğin, silika camdaki Tm^{3+} iyonları 1,064 μm'de $^3H_6$ → $^3H_5$ soğurma kuyruğuna sahiptir ve soğurma katsayısı yaklaşık 2 dB/ppm/km'dir. Öte yandan, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, Tm^{3+} katkılı florit fiber 1,064 μm'de daha az soğurmaya sahiptir. Soğurma katsayısının 0,05 dB/ppm/km olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle, Tm^{3+} konsantrasyonu yeterince yüksek ve uzunluk yeterli ise, 1,064 μm'lik pompa ışığının bir kısmı temel durum soğurması tarafından soğurulacaktır [126].

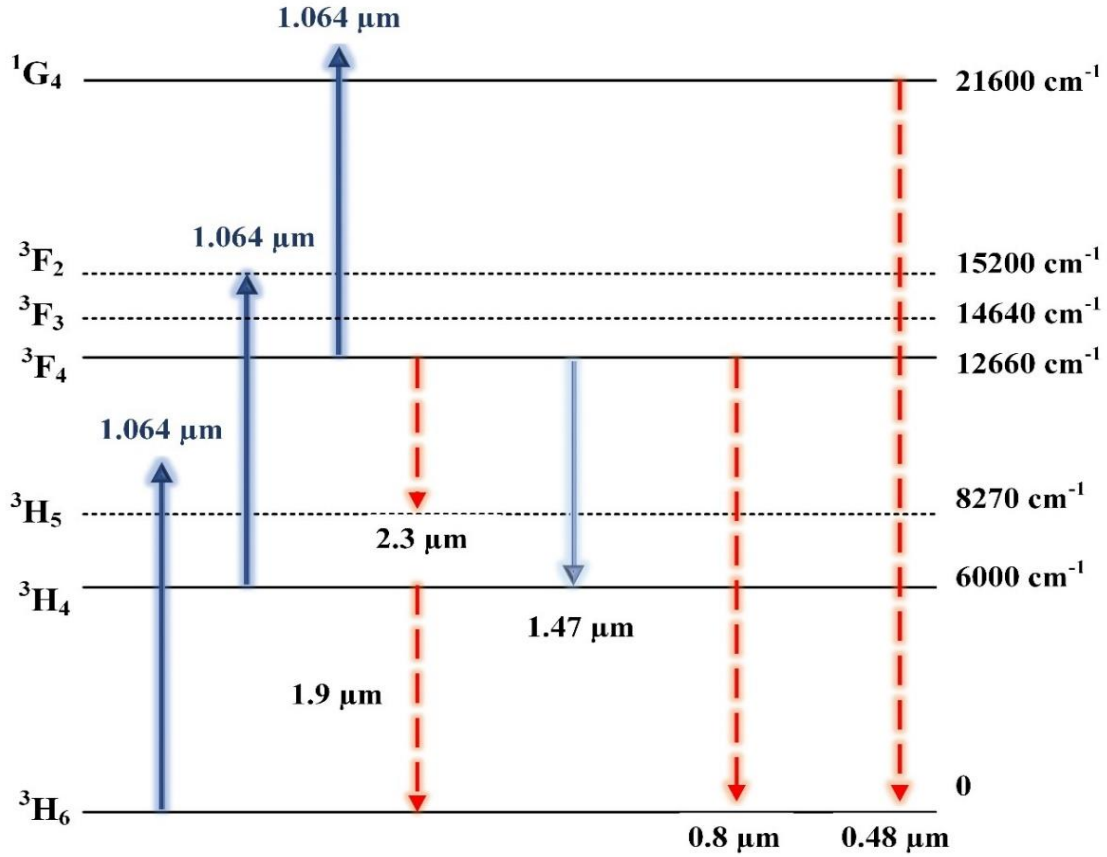


Şekil 4.3. Tulyum'un soğurma ve yayılma spektrumunun Florit (ZBLAN) ve Silika tabanlı fiber üzerinden karşılaştırması

4.3. TKFY'in Teorik Analizi

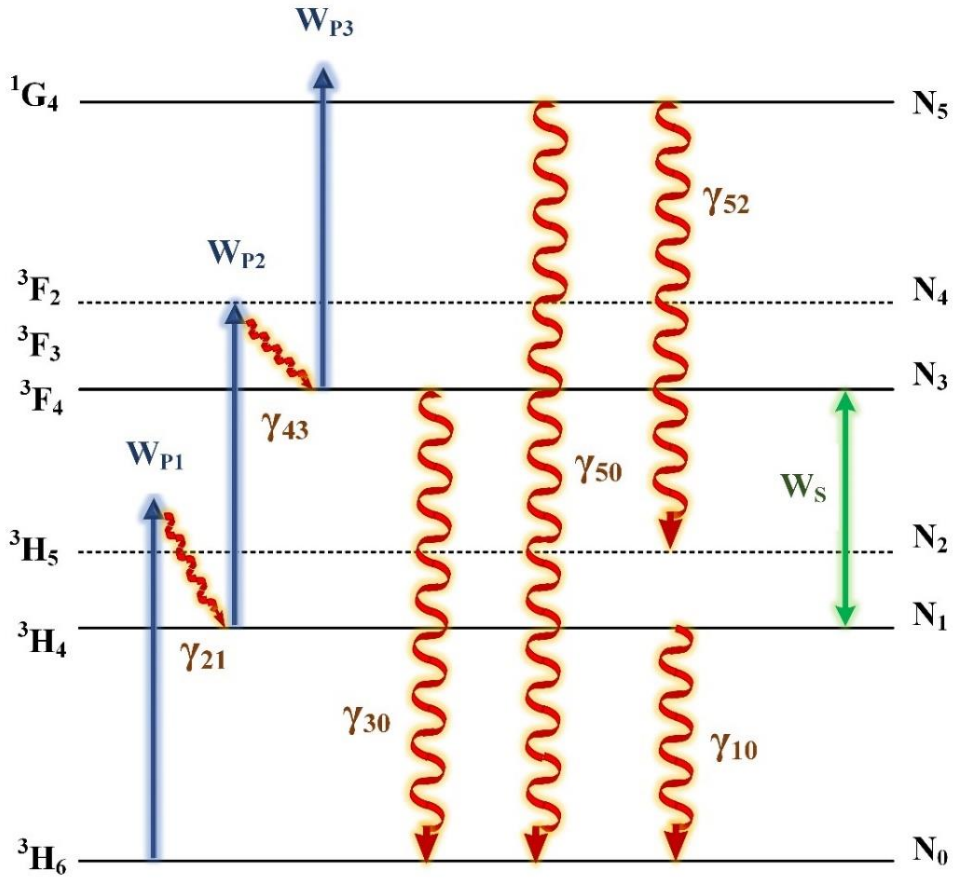
Antipenko ve arkadaşları, 1,47 μm dalgaboyunda uyarılmış yayılmayı ilk kez 1983'te ispatlamıştır. İlk uyarılmış seviye $^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ arasında oluşmuştur [127]. Ancak, verimli bir yükseltme için bu geçişin kullanımını güçleştiren iki sorun bulunmaktadır. Bu sorunlardan ilki Tulyum'un, yüksek seviye ömrünün düşük seviye ömründen daha kısa olan dört seviyeli lazer sistemi gibi davranmasıdır. Bu nedenle, üst seviyeye doğrudan pompalama yapılarak ters birikme neredeyse hiç sağlanamaz. Daha sonra bu sorunu, çalışmalarında florit tabanlı fiber kullanılarak Komukai ve arkadaşları çözmüştür.

Komukai ve arkadaşları, spektroskopik açıdan değerlendirme yaparak temel oran denklemleriyle yükseltme karakteristiklerini analiz etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada Tm^{3+} iyonunun florit camda 1,47 μm ve diğer bazı dalga boylarında lazer ışınımı yayma yeteneğini kullanmışlardır. 1,47 μm seviyesinin enerji seviyesi, diğer bir seviyeye göre daha kısa sürede boşaldığı için lazer ışınımı üretimi zordur. Bu sorunu 1,064 μm pompalama yaparak çözmeye çalışmışlardır. 1,064 μm pompalama ile önce Tm^{3+} iyonları farklı enerji seviyelerine yükseltilmiştir. Bu aşamada Şekil 4.3.'te gösterildiği gibi florit camın 1,064 μm'yi silika cama göre daha az soğurması bu olumsuz etkileri azaltmıştır [126]. 1,064 μm dalgaboyunda pompalanan Tm^{3+} iyonlarının popülasyon dinamiklerini teorik olarak analiz etmek için oran denklemleri kullanılmaktadır. Oran denklemlerinde, pompalama geçişlerini ve birçok enerji seviyesini hesaba katılmalıdır. Şekil 4.4'te florit camdaki tulyum iyonlarının enerji diyagramına göre Tm^{+3} iyonlarında üç adet pompalama geçişi bulunmaktadır. EKFY'lerde ise az sayıda pompalama geçişi ve enerji seviyesi olduğu için oran denklemleri daha basittir. Tm^{3+} iyonlarının 1,064 μm bandında pompalanması durumunda, daha karmaşık bir sistem oluştuğu için oran denklemlerinde daha fazla pompalama geçişinin ve enerji seviyesinin hesaba katılması gerekir.



Şekil 4.4. Florit camdaki Tulyum iyonlarının enerji diyagramı

Oran denklemleri için oluşturulan model Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Basitleştirmek için $^3F_2$ ve $^3F_3$ seviyeleri tek bir seviye olarak kabul edilmiştir. N_0, N_1, N_2, N_3, N_4 ve N_5, sırasıyla $^3H_6$, $^3H_4$, $^3H_5$, $^3F_4$, $^3F_2$-$^3F_3$ ve $^3G_4$ seviyelerindeki iyon popülasyon yoğunluklarını temsil eder. W_{p1}, W_{p2} ve W_{p3}, $^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$, $^3H_4 \rightarrow {}^3F_2$ ve $^3F_4 \rightarrow {}^3G_4$ pompalama geçişlerinin olasılıklarını temsil etmektedir. W_i, uyarılmış yayılma veya soğurma geçişlerinin olasılıklarını temsil ederken, γ_{ij} i seviyesinden j seviyesine kendiliğinden yayılmayı temsil eder. γ_{30} ile karşılaştırıldığında γ_{31} ve γ_{32} değerleri çok küçük oldukları için ihmal edilirken, γ_{51}, γ_{53} ve γ_{54} değerleri de γ_{50} ve γ_{52} ile karşılaştırıldığında çok küçük oldukları için ihmal edilmiştir. γ_{20} ve γ_{4j} (j = 0, 1, 2) değerleri de çok küçük oldukları için göz ardı edilmiştir [126].



Şekil 4.5. Oran denklemleri analizi için oluşturulan model

Model için oran denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dN_0}{dt} = -W_{P^1}N_0 + \gamma_{10}N_1 + \gamma_{30}N_3 + \gamma_{50}N_5 \tag{4.4}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(\gamma_{10} + W_{P2} + W_s)N_1 + \gamma_{21}N_2 + W_sN_3 \tag{4.5}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{P^1}N_0 - \gamma_{21}N_2 + \gamma_{52}N_5 \tag{4.6}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_sN_1 - (\gamma_{30} + W_s + W_{P3})N_3 + \gamma_{43}N_1 \tag{4.7}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{P^2}N_1 - \gamma_{43}N_4 \tag{4.8}$$

$$\frac{dN_5}{dt} = W_{P3}N_3 - (\gamma_{50} + \gamma_{52})N_5 \tag{4.9}$$

N_2 ve N_4 değerleri diğer N_i değerlerine kıyasla çok küçük olduğundan toplam popülasyon yoğunluğu N şöyle ifade edilir;

$$N = N_0 + N_1 + N_3 + N_5 \tag{4.10}$$

Burada,

$$w_{P^1} = \frac{I_p \sigma_{p1}^a}{h v_P} \tag{4.11}$$

$$w_{P^2} = \frac{I_p \sigma_{p2}^a}{h v_P} \tag{4.12}$$

$$w_{P^3} = \frac{I_p \sigma_{p3}^a}{h v_P} \tag{4.13}$$

$$w_S = \frac{I_S \sigma^S}{h v_S} \tag{4.14}$$

$$\gamma_{30} = \frac{1}{\tau_3} \tag{4.15}$$

$$\gamma_{10} = \frac{1}{\tau_1} \tag{4.16}$$

I_p pompa güç yoğunluğunu, I_s ise sinyal güç yoğunluğunu ifade ederken σ_{p1}^a, σ_{p2}^a *ve* σ_{p3}^a ise sırasıyla $^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$, $^3H_4 \rightarrow {}^3F_2$ ve $^3F_4 \rightarrow {}^3G_4$ uyarılmış yayılım etkin kesit alanlarını temsil eder. τ_3 ve τ_1 sırasıyla $^3F_4$ ve $^3H_4$ seviyelerinin ömürlerini ifade eder. h Planck sabiti, ν_p pompa ışığı frekansı ve ν_s sinyal ışığı frekansını ifade etmektedir [126].

Kararlı durumda $d\,/\,dt = 0$ olduğundan, bu Eş. (4.4-4.9) denklemlerine uygulandığında aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$-W_{P^1} N_0 + \gamma_{10} N_1 + \gamma_{30} N_3 + \gamma_{50} N_5 = 0 \tag{4.17}$$

$$-(\gamma_{10} + W_{P2} + W_s)N_1 + \gamma_{21}N_2 + W_5N_3 = 0 \quad (4.18)$$

$$W_{P^1}N_0 - \gamma_{21}N_2 + W_{52}N_5 = 0 \quad (4.19)$$

$$W_sN_1 - (\gamma_{30} + W_s + W_{P3})N_3 + \gamma_{43}N_1 = 0 \quad (4.20)$$

$$W_{P^2}N_1 - \gamma_{43}N_4 = 0 \quad (4.21)$$

$$W_{P3}N_3 - (\gamma_{50} + \gamma_{52})N_5 = 0 \quad (4.22)$$

$N_0 + N_1 + N_3 + N_5 = N$ (4.10)

Popülasyon ters birikimi ΔN olarak tanımlanırsa:

$$\Delta N = N_3 - N_1 \quad (4.23)$$

$$\Delta N = \frac{A}{B} N \quad (4.24)$$

Burada;

$$A = (\gamma_{50} + \gamma_{52})W_{P1}(W_{P2} - W_{P3} - \gamma_{30}) \quad (4.25)$$

$$B = (\gamma_{50} + \gamma_{52})\{\gamma_{10}\gamma_{30} + \gamma_{30}W_{P1} + \gamma_{30}W_{P2} + W_{P1}W_{P2} + \gamma_{10}W_{P3} + W_{P1}W_{P3} + (\gamma_{10} + \gamma_{30})W_s + 2W_{P1}W_s\} + (\gamma_{50} + W_{P1})(W_{P2} + W_s)W_{P3} \quad (4.26)$$

Popülasyonun tersine çevrilmesi için $\Delta N > 0$ 'ın karşılanması gerekmektedir. Bu nedenle,

$$I_P \geq \frac{h\nu_P\gamma_{30}}{\sigma^a_{p2} - \sigma^a_{p3}} = \frac{h\nu_P}{(\sigma^a_{p2} - \sigma^a_{p3})\tau_3} \quad (4.27)$$

Bir diğer eşitlik,

$$P_P \geq \frac{h\nu_P \, A_{eff}^{p}}{(\sigma_{p2}^{a} - \sigma_{p3}^{a})\tau_3} \tag{4.28}$$

Burada, P_p lokal pompa gücünü ve σ_p pompa ışığı için etkin kesit alanını ifade etmektedir. Üç seviyeli tipik bir lazer sisteminde "şeffaflık (transparency) pompa gücü" bulunmadığından, bu durumda hesaplama üç seviyeli yükselteçlerde olduğu gibi ifade edilmektedir [126].

Kendiliğinden yayılma faktörü μ;

$$\mu = \frac{N_3}{N_3 - N_1} = \frac{1}{1 - \frac{N_1}{N_3}} \tag{4.29}$$

Buradan $\frac{N_1}{N_3}$ ifadesi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{N_1}{N_3} = \frac{W_{P3} + W_S + \gamma_{30}}{W_{P2} + W_S} = \frac{\frac{\sigma_{p3}^{a}}{h\nu_P} + \frac{\sigma_S I_a}{h\nu_S I_P} + \frac{\gamma_{30}}{I_P}}{\frac{\sigma_{p2}^{a}}{h\nu_P} + \frac{\sigma_S I_S}{h\nu_S I_P}} \tag{4.30}$$

Dolayısıyla, pompa güç yoğunluğu I_p sonsuza kadar arttırılırsa, kendiliğinden yayılma faktörü p limiti şöyle ifade edilebilir;

$$\lim_{I_P \to \infty} \mu = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_{p3}^{a}}{\sigma p_2^{a}}} \tag{4.31}$$

Buradan gürültü şekli, $F = 2\mu$ iken,

$$\lim_{I_P \to \infty} F = \frac{2}{1 - \frac{\sigma_{p3}^{a}}{\sigma p_2^{a}}} \equiv 2\left(1 + \frac{\sigma_{p3}^{a}}{\sigma p_2^{a}}\right) \tag{4.32}$$

1,064 μm'de $\sigma_{p^3}^{a}$ değerinin $\sigma_{p^2}^{a}$ değerinden çok daha küçük olduğu belirtilmiştir. Bu, sinyal ışığının 1,064 μm'de çok az soğrulduğu anlamına gelir. Eş. 4.32, gürültü şeklinin kuantum

limiti olan 3 dB değerine yakın olabileceğini göstermektedir. Kuantum limiti, teorik olarak en düşük gürültü seviyesidir [126].

Bu modelde, pompa güç yoğunluğu I_p ve sinyal güç yoğunluğu I_s, aşağıdaki diferansiyel denklemleri sağlar;

$$\frac{dI_s}{dI} = (\sigma_s^e N_3 - \sigma_s^a N_1) I_s = \sigma_s \Delta N I_s \tag{4.33}$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -(\sigma_{p1}^a N_0 + \sigma_{p2}^a N_1 + \sigma_{p3}^a N_3) I_p \tag{4.34}$$

Kazanç $g(I_s)$ ve devamında ΔN aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$g(I_s) = \sigma_s \Delta N \tag{4.35}$$

$$\Delta N \equiv \frac{1}{1+\frac{\gamma_{10}+3\gamma_{30}}{4W_{p1}}} \cdot \frac{N}{1+\frac{2W_S}{W_{p2}}} \tag{4.36}$$

$$g(I_s) = K \frac{\sigma_s N}{1+\frac{I_s}{I_{ssat}}} \tag{4.37}$$

Burada l_{ssat}, doymuş sinyal güç yoğunluğudur. Aşağıdaki eşitlikteki ifadede $g(I_s)$ yerine konulduğunda;

$$K = \frac{1}{1+\frac{\gamma_{10}+3\gamma_{30}}{4W_{p1}}} \cdot \frac{1}{1+\frac{(\gamma_{10}+3\gamma_{30})h\nu_P}{4\sigma_{p1}^a I_p}} \tag{4.38}$$

$$l_{ssat} = \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{p2}^a}{\sigma_s}\right)\left(\frac{v_s}{v_p}\right) I_P \tag{4.39}$$

Eş. (4.37) 1.47 μm bandındaki yükseltmenin, K faktörü ile çarpılan üç seviyeli bir yükseltecin kazanımına eşit olduğunu ifade etmektedir. K faktörü, Tm^{3+} iyonlarının iyon konsantrasyonu, fiber özellikleri ve pompa parametreleri gibi faktörlere bağlı sistemine özgü bir parametredir. Bu faktörler, üç seviyeli bir yükselteçten farklı olarak 1,47 μm dalgaboyunda elde edilen yükseltmeyi etkiler [126].

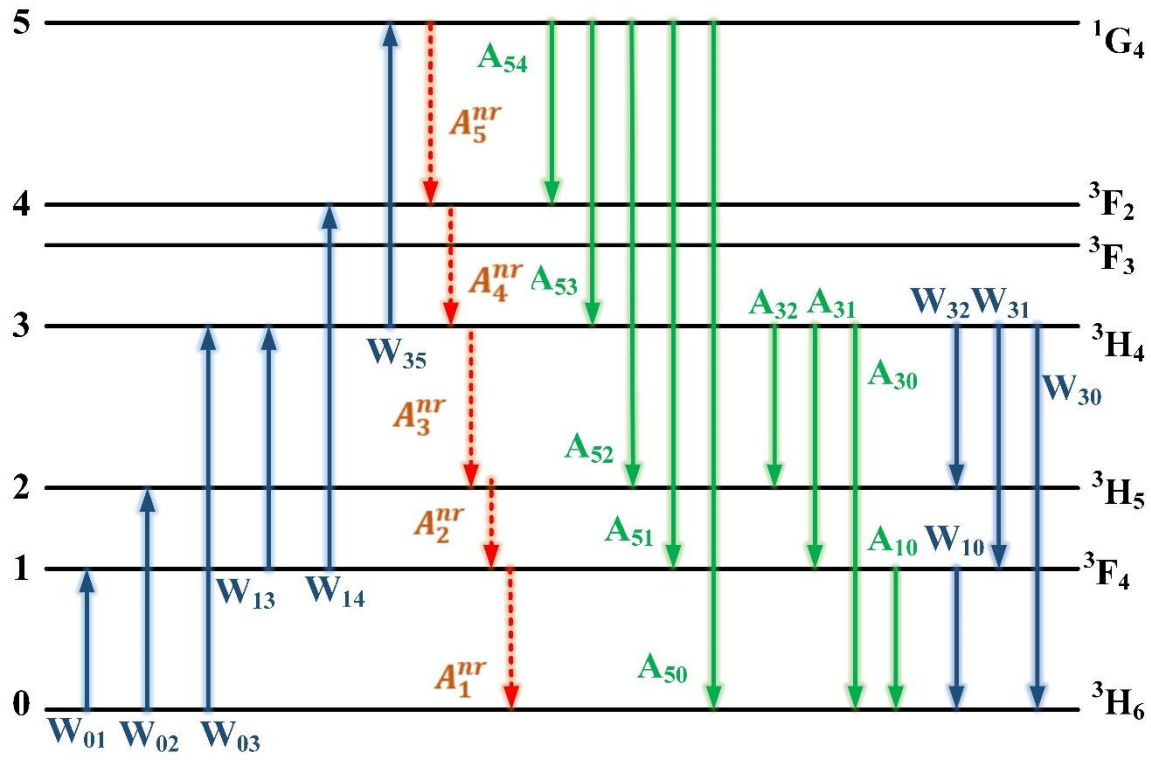
$$P_{ssat} = \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{p2}^{a}}{\sigma_s}\right)\left(\frac{v_s}{v_p}\right)\frac{A_{eff}^{s}}{A_{eff}^{p}}P_P \tag{4.40}$$

P_{ssat}, doymuş lokal sinyal gücünü ifade etmektedir. Eş. 4.40'a göre doymuş çıkış gücü, pompa gücüne bağlıdır. Bu özellik, üç seviyeli yükselteçlerin karakteristiklerinden biridir. Dört seviyeli yükselteçlerde ise doymuş çıkış gücü pompa gücüne bağımlı değildir [126].

Verimli bir yükseltmeyi güçleştiren iki sorundan diğeri ise $^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ geçişiyle ilgili olan pozitif ışınımsal olmayan bozulmadan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle TKFY modüllerinin çoğunluğu, düşük fonon enerjili florit tabanlı TKF'den oluşmaktadır. Fakat florit fiberlerin kullanımında, üretimde ve kılıfın dayanıklılığında bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için farklı malzemelerle çalışmalar yapılmaktadır. S-band TKFY alanında yapılan tüm deneysel çabalara rağmen, EKFY optimizasyonuna başarılı bir şekilde uyumlu olan numerik modeller kullanılarak ortaya çıkmış yükselteç performansını açıklayan detaylı bir teorik çalışma bulunmamaktadır. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda farklı band aralıklarında çeşitli teorik modeller oluşturulmuştur. Bu çalışmalardan birinde, S-band TKFY'e ait ilk nümerik analiz Lee ve arkadaşları tarafından 2001 yılında sunulmuştur. Peterka ve arkadaşları ise sunulan bu modelden farklı olarak silika fiber kılıf ve çeşitli pompalama şekilleri kullanarak yeni bir model oluşturmuşlardır [125].

TKFY'lerde kazancın bağlı olduğu parametrelerden biri tulyum iyonlarının farklı enerji seviyelerindeki iyon yoğunluğuna ve ters birikmesine bağlı olmasıdır. Silika tabanlı fiberdeki tulyum iyonlarının enerji seviyeleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir. 0, 1, 2, 3, 5 olarak numaralandırılmış enerji seviyeleri sırayla $^3H_6$, $^3F_4$, $^3H_5$, $^3H_4$, $^1G_4$ olarak isimlendirilmiştir [67].

Farklı enerji seviyelerindeki Tm^{3+} iyonlarının popülasyon dinamiklerini tanımlamak için bir oran denklemleri sistemi formüle edilmektedir. Bu denklemler pompa emilimi, kendiliğinden yayılma, uyarılmış yayılma ve ışımasız geçiş süreçlerinin oranlarını dikkate almaktadır.



Şekil 4.6. Silika fiberdeki Tulyum iyonlarının enerji seviyeleri

P. Peterka ve arkadaşları, Tulyum'un farklı enerji seviyelerinin değer eşitliği için aşağıdaki denklemleri kullanmışlardır [125].

$$\frac{dN_1}{dt} = N_0(W_{01} + W_{02}) - N_1(W_{10} + W_{13} + W_{14} + A_1^{nr} + A_{10}^r) + N_3(W_{31} + W_{32} + A_3^{nr} + A_{32}^r + A_{31}^r) + N_5(A_{51}^r + A_{52}^r) \quad (4.41)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_0(W_{03}) + N_1(W_{13} + W_{14}) - N_5(A_5^{nr} + A_{52}^r + A_{53}^r) - N_3(W_{35} + W_{32} + W_{31} + W_{30} + A_3^{nr} + \sum_{j=0}^{2} A_{3j}^r) \quad (4.42)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = N_0(W_{05}) + N_3W_{35} + N_5(W_{50} + A_5^{nr} + \sum_{j=0}^{4} A_{5j}^r) \quad (4.43)$$

$$N_t = N_0 + N_1 + N_3 + N_5 \quad (4.44)$$

Bu denklemlerdeki N_0, N_1, N_3, N_5 değerleri sırayla, $^3H_6$, $^3F_4$, $^3H_4$, $^1G_4$ seviyelerindeki tulyumun ortalama iyon yoğunluğunu ifade etmektedir. N_t toplam elektron yoğunluğunu gösterirken; i, j'den küçük olduğu yerde i'den j'ye uyarılmış yayılma W_{ij} ile

gösterilmektedir. Uyarılmış yayılma i, j'den büyük olduğu yerde Wij ile gösterilirken A_{ij}, i seviyesinden j seviyesine ışınımsal geçiş oranını ve A_{nrj} ise ışımasız geçiş oranını temsil etmektedir [67].

N_i ve W_{ij} değişkenleri r, φ, z konumlarının fonksiyonlarıdır. Tulyum iyonlarının fiber kesiti içerisinde homojen olarak uyarılmış olduğu kabul edildiğinde, iyonların elektromanyetik etkileşimini ifade eden, geçiş değeri ifadesi W_{ij} Eş. 4.45 gibi oluşturulabilir.

$$W_{ij}(z)= \int_0^{\infty} \lambda\Gamma(\lambda)\sigma_{ij}(\lambda)\frac{\left(P_\lambda^+(z,\lambda)+P_\lambda^-(z,\lambda)\right)}{hc\pi b^2}\, d\lambda \tag{4.45}$$

Sırasıyla, σij ilgili geçiş kesiti, h Plank sabiti, c ışık hızı, $P_{\lambda+}$ ve $P_{\lambda-}$ fiber ekseninin pozitif ve negatif yönde ilerlemiş yayılmanın spektral güç yoğunluğudur. $\Gamma(\lambda)$ ise çakışma faktörü olup Eş. 4.46 ile ifade edilir [38].

$$\Gamma(\lambda)= \frac{\int_0^{\infty}|E(r,\varphi,\lambda)|^2 N(r) r dr}{N_t \int_0^{\infty}|E(r,\varphi,\lambda)|^2 r dr} \tag{4.46}$$

Eş. 4.47, pompa sayısı ve dalgaboyunu seçiminde kolaylık sağlaması için, dalganın ileri yönde yayılımı için tanımlanır [125].

$$\frac{dP^+(\lambda)}{dz} = \Gamma(\lambda)P^+(\lambda)\sum_{ij}^{\{10,30,31,50,32\}}\left(N_i\,\sigma_{ij}(\lambda) - N_j\,\sigma_{ji}(\lambda)\right) - \Gamma(\lambda)P^+(\lambda)(N_0\,\sigma_{02}(\lambda)$$

$$+N_1\,\sigma_{14}(\lambda) + N_3\,\sigma_{35}(\lambda)) + \Gamma(\lambda)\sum_{ij}^{\{10,30,31,50,32\}} 2hv_{ij}\Delta v N_i\,\sigma_{ij}(\lambda) - \alpha(\lambda)\,P^+(\lambda) \tag{4.47}$$

L fiber boyu, z=0 ve z=L belirli sınır durumlarında, zaman türevleri $\frac{dN_1}{dt}$, $\frac{dN_3}{dt}$, $\frac{dN_5}{dt}$ sıfıra eşitlendiğinde, problem kararlı duruma indirgenmektedir. TKFY'in kazanç karakteristiğini elde etmek için eşitlik, uzay ve frekans üzerinden tamamlanmalıdır [67].

5. ÇOK GEÇİŞLİ YÜKSELTEÇ KONFİGÜRASYONLARI

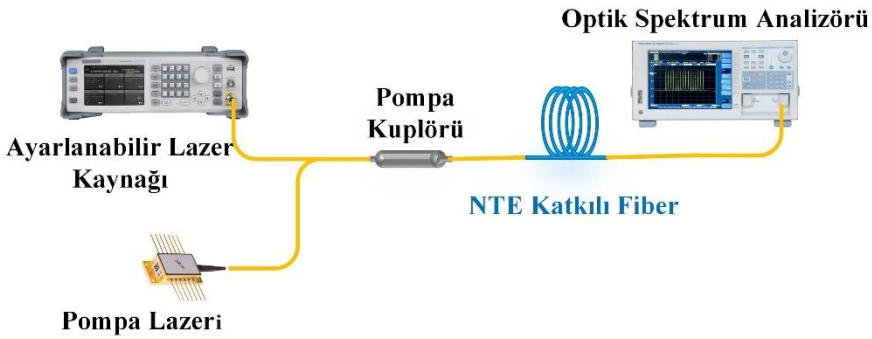
Yükselteç tasarımlarında sinyalin yükseltme ortamından bir kez geçtiği konfigürasyonlara tek geçişli yükselteç denir. Sinyalin bir sirkülatör ya da reflektör kullanılarak yükseltme ortamından birden fazla geçmesine izin verildiğinde çok geçişli konfigürasyonlar oluşur. Sinyal, sirkülatör veya aynadan yansıdıktan sonra yükseltme ortamından ikinci kez geçtiğinde buna çift geçişli (ÇG) yükselteç denir. Çoklu geçişlerde üç geçiş (ÜG) ve dört geçiş (DG) yükselteçleri de oluşturulabilir.

Çok geçişli yükselteçlerde yükseltme ortamında tek yükselteç kullanılıyorsa tek aşamalı, iki yükselteç kullanılıyorsa iki aşamalı (İA) ve üç yükselteç kullanılıyorsa üç aşamalı (ÜA) olarak ek isimlendirme yapılmaktadır.

Bu bölümde ÇG, ÜG ve DG yükselteçlerin tek ve çok aşamalı konfigürasyonları ve bunların nasıl oluşturulduğundan bahsedilecektir.

5.1. Tek Geçişli Yükselteç Konfigürasyonu

Tek geçişli tasarımlarda sinyal yükseltme işlemi bir kez gerçekleşmektedir. Şekil 5.1'de tek geçişli yükselteç konfigürasyonu gösterilmiştir. Bu konfigürasyon aynı zamanda en temel yükselteç düzeneğidir. Şekilde görüldüğü gibi temel yükselteç devresinde birer adet sinyal kaynağı, pompa, pompa kuplörü ve NTE katkılı fiber bulunmaktadır.



Şekil 5.1. Tek geçişli yükselteç konfigürasyonu

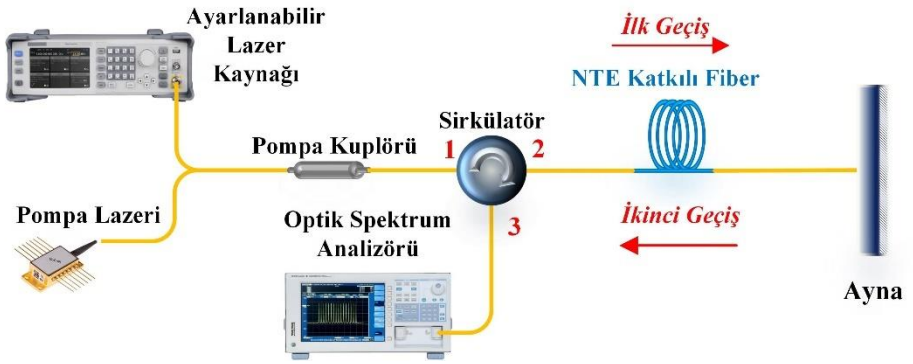
Tek geçişli yükselteç konfigürasyonlarında yapılan çalışmalar çoğunlukla yükselteç performansını arttırmaya yöneliktir. Yükselteç performansını arttırmak için temelde iki yöntem kullanılmaktadır. Bunların ilkinde; katkılı fiber uzunluğu, katkı iyon yoğunluğu, katkı yarıçapı gibi yükselteç parametreleri üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır [20-25, 53-57, 100, 104, 108, 111, 131, 132]. İkincisinde ise pompa gücü, pompalama yönü, sıcaklık, giriş sinyal gücü gibi faktörlerin çıkış kazancına ve gürültüye etkileri incelenmektedir [8, 15, 57, 60, 61, 63, 64, 102, 103, 105-107, 126-130].

5.2. İki Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları

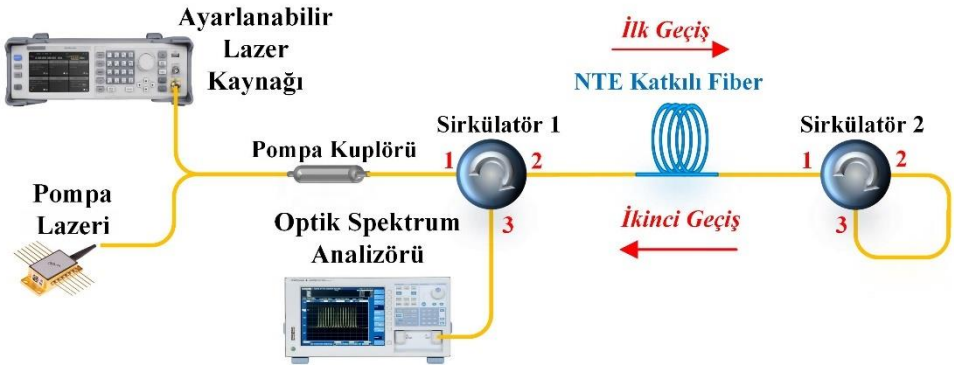
Bu grupta iki konfigürasyon yer almaktadır. İki geçişli konfigürasyonlar, bir ayna ya da sirkülatör yardımı ile sinyalin aynı TKF'den ikinci kez geçişi sağlanarak tekrar yükseltilmesi ile ya da iki ayrı TKF kullanılarak sinyalin iki defa yükseltilmesi ile oluşturulan tasarımlardır. Bu bölümde tek ve iki aşamalı iki geçişli konfigürasyonlardan bahsedilmektedir. Tek aşamadan oluşan, ayna ya da sirkülatörle yönlendirilen sinyalin TKF'den yeniden geçirilerek yükseltilmesine olanak sağlayan tasarım Çift Geçişli (ÇG) TKFY olarak isimlendirilmiştir. İki farklı TKF ile iki aşama oluşturularak çift geçiş sağlanan tasarım İki Aşama Çift Geçiş (İAÇG) TKFY olarak isimlendirilmiştir.

5.2.1. Tek aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu

Tek aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu oluşturmak için Şekil 5.1. de gösterilen temel yükselteç devresine ayna ve sirkülatör gibi sinyal yansıtıcıları eklenmiştir. Böylece NTE katkılı fiberden geçerek yükseltilen sinyal, sirkülatör ya da ayna yardımıyla tekrar NTE katkılı fiber üzerinden geçecek şekilde yönlendirilmiş olur. Böylece NTE katkılı fiber üzerinden ikinci kez geçen sinyal, ikinci bir yükseltme işlemine uğrar. Şekil 5.2'de sirkülatör ve ayna ile yönlendirme yapılan tek aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonları gösterilmektedir. Çift geçişli konfigürasyonlarda, tek geçişli konfigürasyonlara göre daha yüksek güç dönüşüm verimliliği, yüksek kazanç ve yüksek çıkış gücü elde edilir.



(a) Sirkülatör ile yönlendirme yapılan konfigürasyon



(b) Ayna ile yönlendirme yapılan konfigürasyon

Şekil 5.2. Tek aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonları

Şekil 5.2(a)'daki düzenekte kullanılan ayna, ışığı geldiği yönde geri yansıtır. Çift geçişli bir yükselteçte, bu, yükseltilen sinyalin aynadan sekerek tekrar kazanç ortamından geçmesini sağlamaktadır.

Şekil 5.2(b)'deki düzenekte NTE'den sonra kullanılan sirkülatör, pasif bir çoklu fiber bağlantısıdır ve sinyali saat yönünde başka bir fibere yönlendirmekte kullanılır. Işık için tek yönlü bir yol görevi görür. Işığın belirli bir girişten girmesine, döngüde ilerlemesine ve başka bir çıkıştan çıkmasına izin verir. Bu, yükseltilen sinyalin ikinci geçiş için istenen yönde ilerlemesini sağlarken, geri yansımayı önleyerek sistem istikrarını korumaktadır.

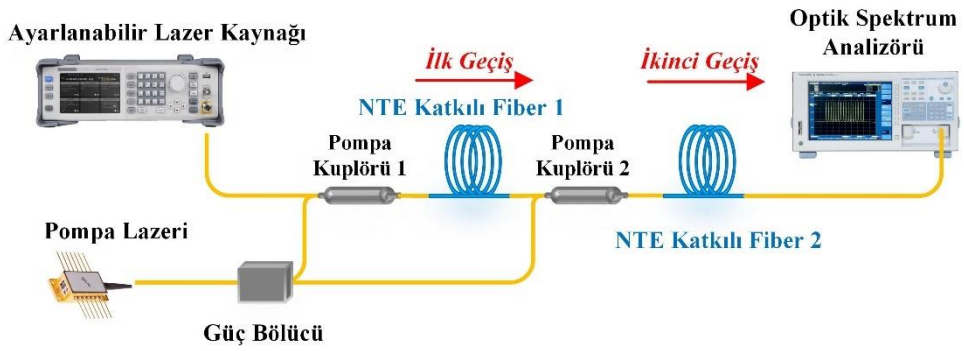
Sirkülatörler, aynaya göre daha karmaşık ve pahalı cihazlardır. Yön kontrolünü sağlamak için genellikle magneto-optik etkileri kullanılır. Aynalar ise daha basit ve ucuz bir seçenektir. Sirkülatör, daha iyi yönsellik sunsa dahi, ek optik ekleme kaybına neden olabilir. Bu, ışığın malzemeden geçerken bir kısmının kaybolduğu anlamına gelir. Bu da yükseltecin

sistem kazancını biraz düşürebilir. Ayna da yansıtma kaybına neden olur, ancak bu kayıp tipik olarak bir sirkülatörün ekleme kaybından daha düşüktür [133].

Bu tez çalışmasında denenen çok geçişli yükselteç konfigürasyonunda güç maksimizasyonu daha önemli olduğu için, daha düşük kayıp nedeniyle ayna tercih edilmiştir. Bu nedenle bundan sonraki çalışmada yer alan düzeneklerde ayna kullanılarak devam edilmiştir.

5.2.2. Çift aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu

Art arda iki katkılı fiber kullanılarak oluşturulan konfigürasyon çeşididir. Bu şekilde yükseltilmiş sinyal, ikinci bir NTE katkılı fiberden geçerek tekrar yükseltilmiş olur. Böylece tek bir yükseltecin sağlayabileceğinden daha fazla kazanç elde edilebilir. Bu, uzun mesafeli iletişim sistemleri için önemlidir. Çift aşamalı çift geçişli yükselteç konfigürasyonu Şekil 5.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3. İki aşamalı çift geçişli yükselteç tasarımı

Bu konfigürasyon ile iki yükseltecin parametreleri ayrı ayrı kontrol edilebilir. Bu, farklı dalga boylarında veya farklı sinyal formatlarında yükselteç için optimize edilmiş bir sistem oluşturmaya imkân vermektedir.

Genel olarak, iki yükselteci art arda bağlamanın sistem karmaşıklığı ve fazla maliyet ve güç tüketimi gibi dezavantajları olurken, tek yükseltece göre birçok avantajı vardır. Bu avantajlar, daha yüksek kazanç, daha düz kazanç, daha az gürültü, daha fazla güç, daha fazla esnekliktir.

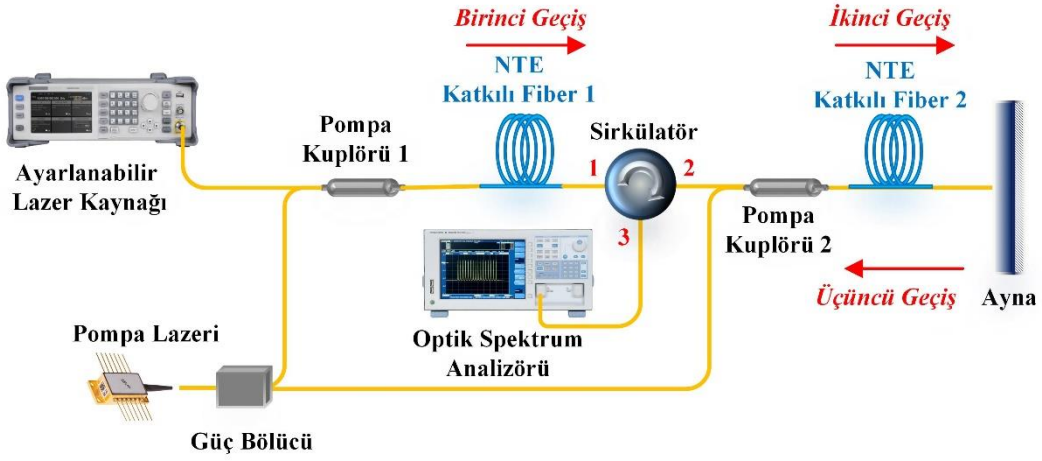
5.3. Üç Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları

Bu grupta üç konfigürasyon yer almaktadır. Üç geçişli konfigürasyonlar, bir çift geçiş düzeneği ile bir tek geçiş düzeneğinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu bölümde iki ve üç aşamalı üç geçişli konfigürasyonlardan bahsedilmektedir. İlk aşamada tek geçiş, ikinci aşamada çift geçiş konfigürasyonunun kullanılması ile oluşturulan tasarıma çift aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu I adı verilmiştir. İlk aşamada iki geçiş, ikinci aşamada tek geçiş konfigürasyonunun kullanılması ile oluşturulan tasarıma ise iki aşamalı üç geçişli konfigürasyon II adı vermiştir. Üç farklı NTE katkılı fiberden oluşan ve üç adet tek geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile oluşan tasarım, üç aşamalı üç geçişli yükselteç olarak isimlendirilmiştir.

Yükselteç kazancı arttıkça çoğunlukla kararlı kazanç aralığı daralmaktadır. Fakat üç geçişli yükselteç konfigürasyonları ile kararlı band aralığı değişmeksizin kazanç artışı gerçekleştirilebilmektedir [134].

5.3.1. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu I

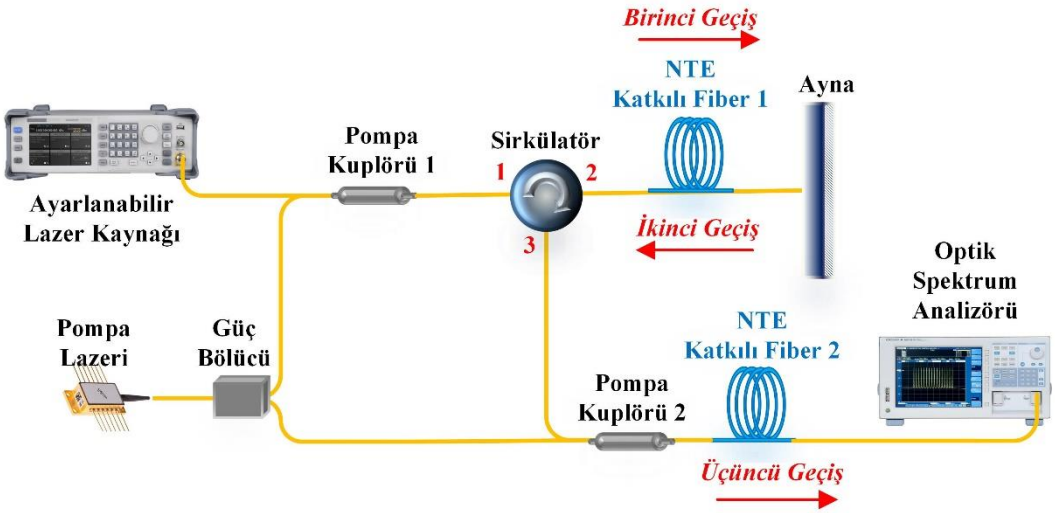
İlk aşamasında tek geçişli yükselteç ile ikinci aşamasında çift geçişli yükseltecin kullanılması ile oluşturulan tasarımdır. Bu konfigürasyon, tek ve çift geçişli yükselteçlerin avantajlarını birleştirerek hibrit bir çözüm sunar. Şekil 5.4'te iki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu I görülmektedir. İlk aşamadaki tek geçişli yükselteç, ikinci aşamadaki çift geçişli yükseltece ön yükseltme sağlayarak toplam kazancı önemli ölçüde artırır. Bu şekilde ikinci geçişten sonra kararlı dalgaboyu bant aralığı değişmeksizin kazanç değerleri arttırılmış olur. Çift geçişli yükselteçlerle elde edilebilen kararlı bant arağına paralel, daha yüksek kazanç değerlerine sahip bant aralığında kazanç elde edilebilmektedir [134].



Şekil 5.4. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu I

5.3.2. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu II

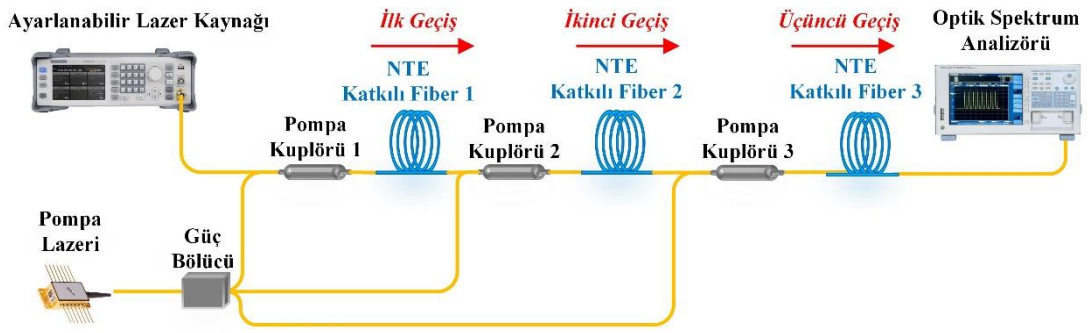
İlk aşamasında çift geçişli yükselteç ile ikinci aşamasında tek geçişli yükseltecin kullanılması ile oluşturulan tasarımdır. Şekil 5.5'te iki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu II gösterilmektedir. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu I'e göre ilk aşamada daha yüksek kazanç elde edilmektedir. İlk aşamadaki çift geçişli yükselteç, ikinci aşamaya daha yüksek güç göndererek genel güç verimliliğini artırır.



Şekil 5.5. İki aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu II

5.3.3. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu

Üç farklı NTE katkılı fiberden oluşan ve üç adet tek geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile oluşan konfigürasyondur. Şekil 5.6'da üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu gösterilmektedir. Diğer üç geçişli tasarımdan daha fazla maaliyete mal olacağı ve daha fazla güç tüketeceği açıktır. Fakat, her aşama ayrı ayrı kontrol edilebilir. Bu, farklı dalga boylarında veya farklı sinyal formatlarında yükseltme için optimize edilmiş bir sistem oluşturmaya imkân verir. Gürültü şekli tek bir yükseltece göre daha düşüktür. Bu, sinyal-gürültü oranını (SGO) iyileştirir ve daha kaliteli bir sinyal iletimi sağlar.



Şekil 5.6. Üç aşamalı üç geçişli yükselteç konfigürasyonu

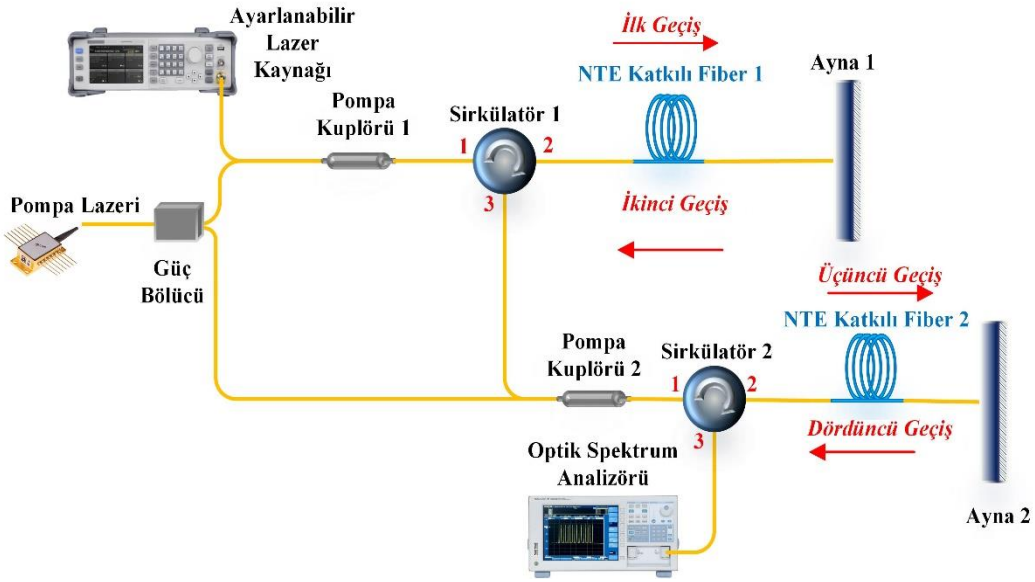
5.4. Dört Geçişli Yükselteç Konfigürasyonları

İki, üç ve dört aşamalı düzeneklerde iki ve daha fazla NTE katkılı fiber kullanarak dört geçişli yükselteç konfigürasyonları oluşturulabilmektedir. Dört geçişli konfigürasyonu, sinyalin dört kez yükseltilmesine izin vererek daha yüksek kazanç elde edilmesini sağlar. Bu, uzun mesafeli iletişim sistemleri için idealdir. Ayrıca pompalanan gücü daha verimli bir şekilde kullanarak daha yüksek güç verimliliği sağlayabilir.

5.4.1. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

Her iki aşamada da çift geçişli yükselteç kullanılan konfigürasyon çeşididir. Şekil 5.7'de iki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu gösterilmektedir. İki aşamalı dört geçişli düzenek, sinyalin her iki aşamada da iki kez yükseltilmesine izin vererek, geleneksel yükselteçlere kıyasla daha yüksek kazanç elde edilmesini sağlar. Çift geçişli yükselteçler,

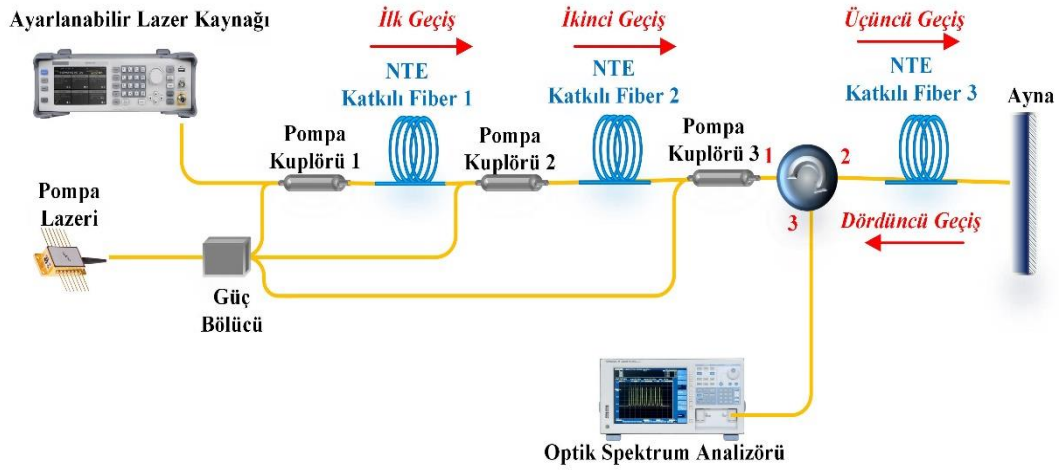
pompalanan gücü daha verimli bir şekilde kullanarak daha yüksek güç verimliliği sağlayabilir. İki aşamalı dört geçişli düzenekte her iki aşamada da bu verimlilik sağlandığında, genel güç verimliliği önemli ölçüde artar.



Şekil 5.7. İki aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

5.4.2. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu I

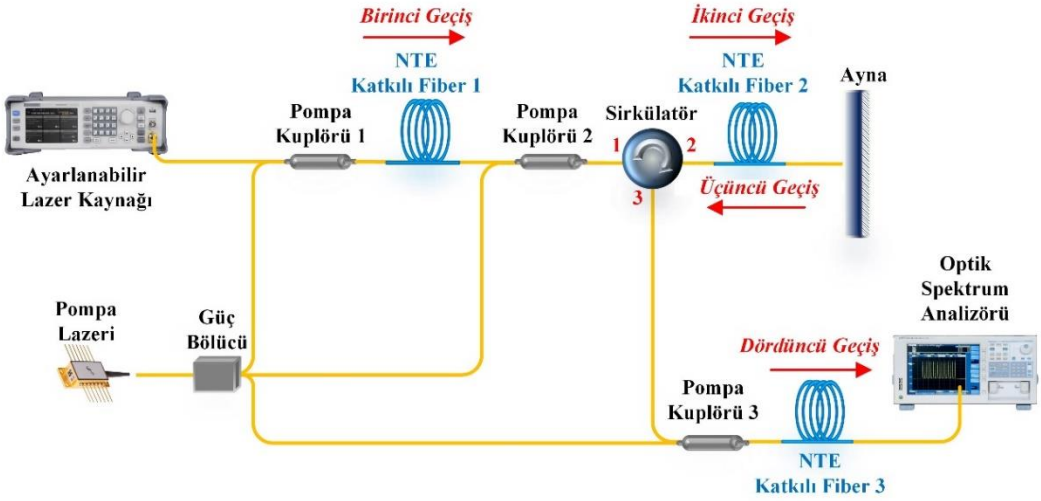
İlk iki aşamasında tek geçişli, üçüncü aşamasında ise çift geçişli düzenekten oluşan konfigürasyondur. Literatürde bu tasarım üzerine bir çalışma yapılmamış olup, çıkış kazanç ve gürültü şekli spektrumu Bölüm 6'da incelenecektir.



Şekil 5.8. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu I

5.4.3. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu II

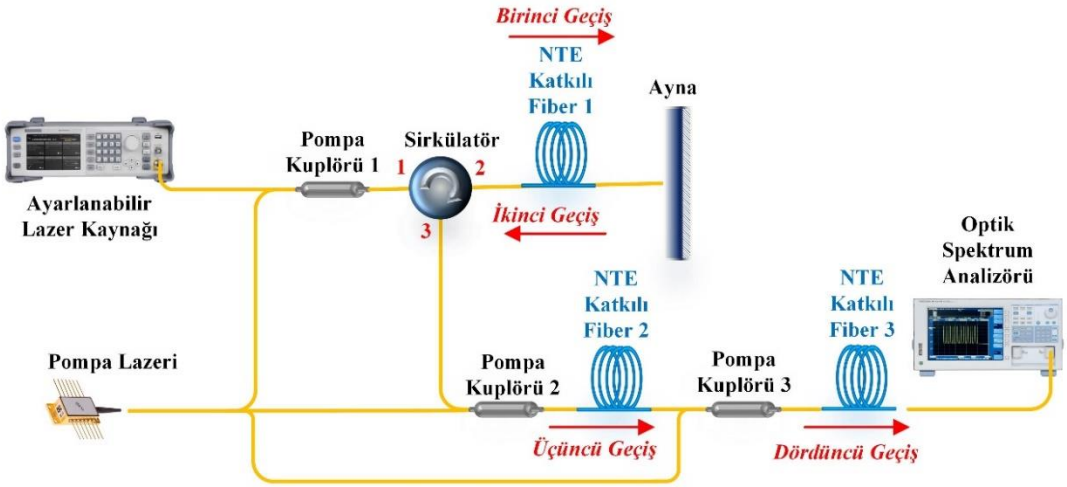
İlk ve son aşamasında tek geçişli, ikinci aşamasında ise çift geçişli düzenekten oluşan konfigürasyondur. Literatürde bu tasarım üzerine de bir çalışma yapılmamış olup, çıkış kazanç ve gürültü şekli spektrumu Bölüm 6'da incelenecektir.



Şekil 5.9. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu II

5.4.4. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu III

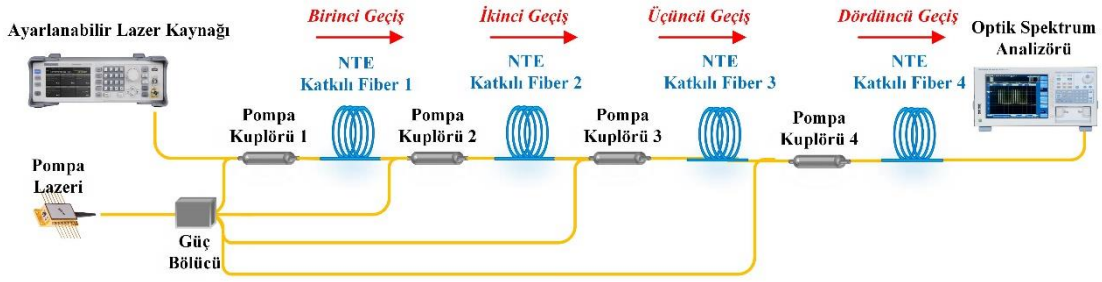
İlk aşamasında çift geçişli, ikinci ve üçüncü aşamasında ise tek geçişli düzenekten oluşan konfigürasyondur. Literatürde bu tasarım üzerine de bir çalışma yapılmamış olup, çıkış kazanç ve gürültü şekli spektrumu Bölüm 6'da incelenecektir.



Şekil 5.10. Üç aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu III

5.4.5. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

Dört farklı NTE katkılı fiberden oluşan ve dört adet tek geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile oluşan konfigürasyondur. Şekil 5.11'de dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu gösterilmektedir. Diğer çok geçişli tasarımdan daha fazla maaliyete mal olmakta ve daha fazla güç tüketmektedir. Fakat, her aşama ayrı ayrı kontrol edilebilir. Bu, farklı dalga boylarında veya farklı sinyal formatlarında yükseltme için optimize edilmiş bir sistem oluşturmaya imkan verir. Gürültü şekli tek bir yükseltece göre daha düşüktür. Bu, sinyal-gürültü oranını (SGO) iyileştirir ve daha kaliteli bir sinyal iletimi sağlar.



Şekil 5.11. Dört aşamalı dört geçişli yükselteç konfigürasyonu

6. ÇOK GEÇİŞLİ TKFY ÇALIŞMASI

Çok geçişli TKFY çalışmasından önce literatürdeki çok geçişli yükselteç çalışmaları incelenmiştir. Kullanılan pompa dalgaboyları, pompalama yönleri, yükselteç parametreleri ve tasarımları incelenerek yapılacak çalışmanın temelleri oluşturulmuştur. İlk etapta pompa dalgaboyunu belirlemek için bu konuda şimdiye kadar yapılan çalışmalar incelenmiştir. Literatürde çok fazla pompa dalgaboyunda çalışma yapılmıştır. Bu nedenle bunlardan en çok kullanılanları üzerinde çalışılarak, en verimli pompa dalgaboyu belirlenmiştir. Pompa dalgaboyu çalışması ile aynı zamanda pompalama yönü de araştırılmıştır. Bu nedenle kullanılan konfigürasyonlar bu amaca uygun tasarlanmışlardır.

İlk etapta belirlenen en uygun pompa dalgaboyu ve pompalama yönü ile muhtemel çok geçişli TKFY konfigürasyonları tasarlanmıştır. İki adet iki geçişli, üç adet üç geçişli ve beş adet dört geçişli TKFY konfigürasyonu oluşturulmuş ve sırası ile incelenmiştir. İnceleme sırasında öncelikle giriş gücünün her bir konfigürasyona etkisi araştırılıp en uygun giriş gücü belirlenmiş, daha sonra pompa gücü ve TKF uzunlukları optimize edilmiştir. Giriş gücünün etkisi araştırılırken giriş gücü değerleri -40 dBm ile -10 dBm aralığında değiştirilerek kazanç ve gürültü değerleri incelenmiştir. Pompa gücü optimizasyonu yapılırken iki ve çok geçişli konfigürasyona göre pompa gücü 200-2000 mW aralığında değiştirilerek en verimli pompa gücü belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra belirlenen giriş gücü ve pompa gücü değerleri kullanılarak TKF boyları optimize edilmiştir.

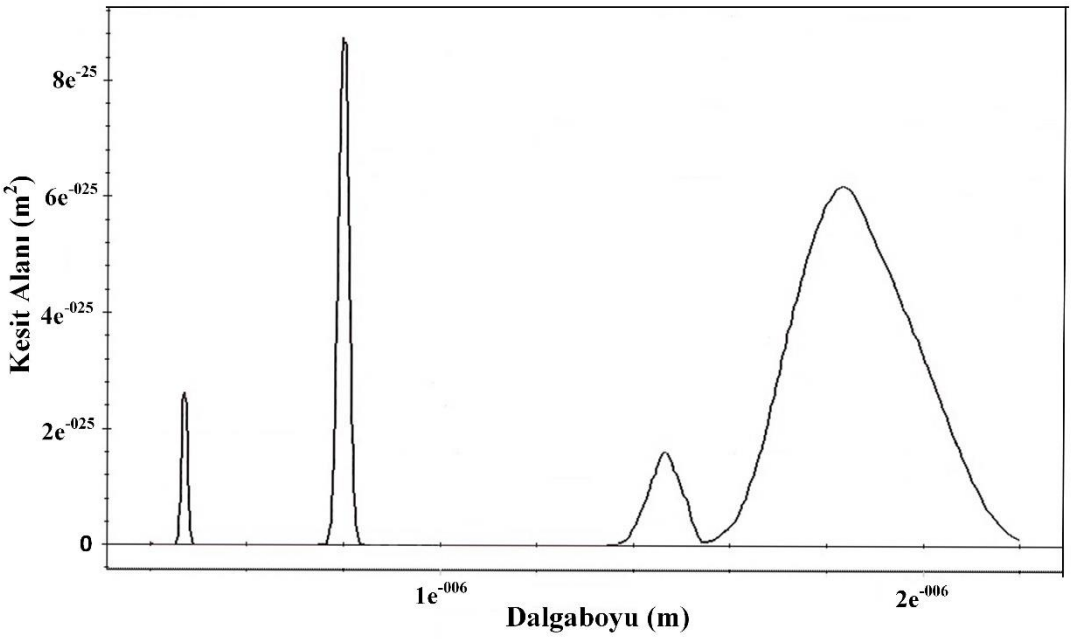
Her bir çalışma sonunda elde edilen veriler kullanılarak kazanç ve gürültü şekli değişim grafikleri oluşturulmuştur. Optimize edilen konfigürasyonların her bir geçişi için kazanç ve gürültü şekli değişimleri de incelenmiştir. İki geçişli, üç geçişli ve dört geçişli konfigürasyonları ile her bir grup kendi içinde olmak üzere benzer koşullar sağlanarak karşılaştırma yapılmış olup, her grup için en verimli konfigürasyon belirlenmiştir.

Son olarak, her grup içinde belirlenen en verimli konfigürasyonlar birbiri ile benzer şartlar oluşturularak karşılaştırılmış ve en iyi performansı gösteren çok geçişli TKFY tasarımı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada kullanılan tüm tasarımlar, Optisystem 21.0 yazılım programı kullanılarak simüle edilmiştir. Optisystem profesyonel bir ticari yazılımdır ve literatürdeki birçok makale tarafından desteklenmektedir [135-138]. Tüm simülasyonlarda kullanılan parametreler Çizelge 6.1'de, yazılım içerisinde kullanılan Tm^{+3} parametreleri ve yayılma spektrumu Şekil 6.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. Yapılan simülasyonlarda kullanılan ortak yükselteç parametreleri

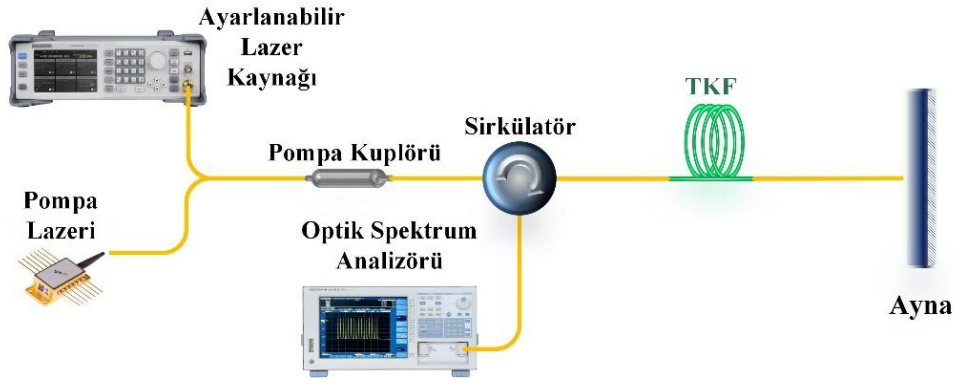
Parametre	Değer	Birim
Nümerik açıklık	1	
Çekirdek yarıçapı	1,3	μm
Katkı yarıçapı	0,8	μm
Tulyum iyon konsantrasyonu	$20e^{+024}$	m^{-3}
Non-radiant ion lifetime 1	430×10^{-6}	*s*
Non-radiant ion lifetime 2	45×10^{-6}	*s*
Non-radiant ion lifetime 3	784×10^{-6}	*s*
Ar10	285.7	*(1/s)*
Ar30	1353,85	*(1/s)*
Ar31	138,46	*(1/s)*
Ar32	46,153	*(1/s)*
Ar50	581,4	*(1/s)*



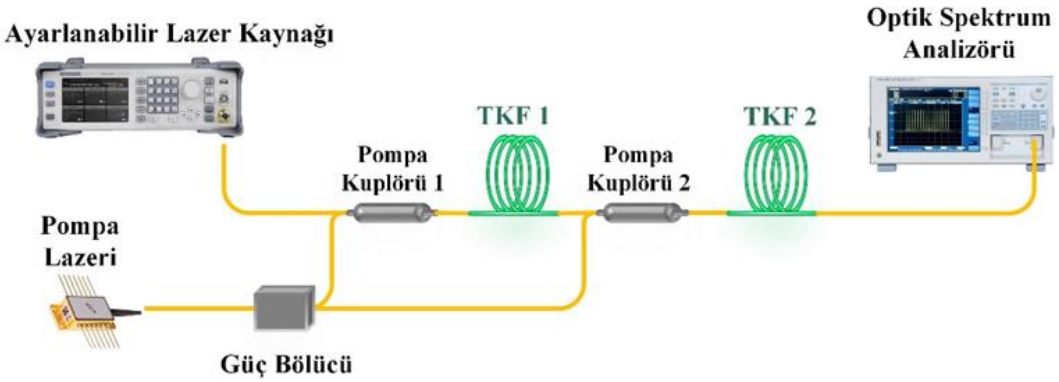
Şekil 6.1. Optisystem 21.0 Programında kullanılan Tm^{+3} yayılma spektrumu

6.1. Pompa Dalgaboyu ve Pompalama Yönü Seçimi

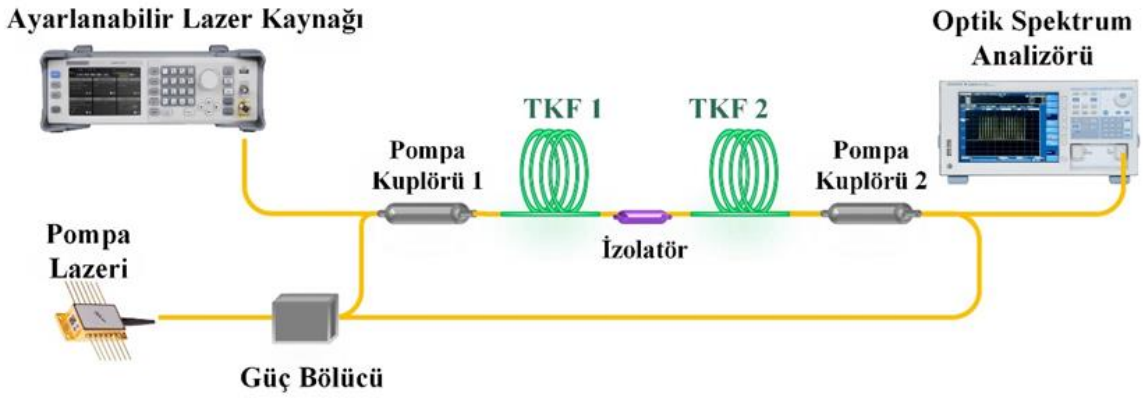
Literatür incelendiğinde Tulyum'un soğurma ve yayılma spektrumu dikkate alınarak; 690 nm [139], 800 nm [22,60,61,63,37], 1047 nm [64], 1050 nm [22,61,63,65,133,134, 139-140) 1064 nm [21,141], 1210 nm [142], 1400 nm [22,60,61,64,26,37,139], 1550 nm [20,64], 1560 nm [125,140,143], 1567 nm [144,145], 1570 nm [57,58] pompa dalga boylarına yapılan çalışmalara rastlanmaktadır. Görüldüğü gibi bazı pompa dalgaboyu değerleri birbirine yakın olup, bu çalışmada öncelikle 800 nm, 1050 nm, 1400 nm ve 1560 nm dalga boylarına sahip pompaların optik kazanç ve gürültü şekli değerlerine etkileri incelenmiştir. Daha sonra en verimli dalga boyuna sahip pompa dalgaboıyu ve pompalama yöntemi araştırılmıştır. Pompa dalgaboyu araştırması için üzerinde çalışılan tek ve iki aşamalı çift geçişli TKFY konfigürasyonları Şekil 6.2'de gösterilmektedir.



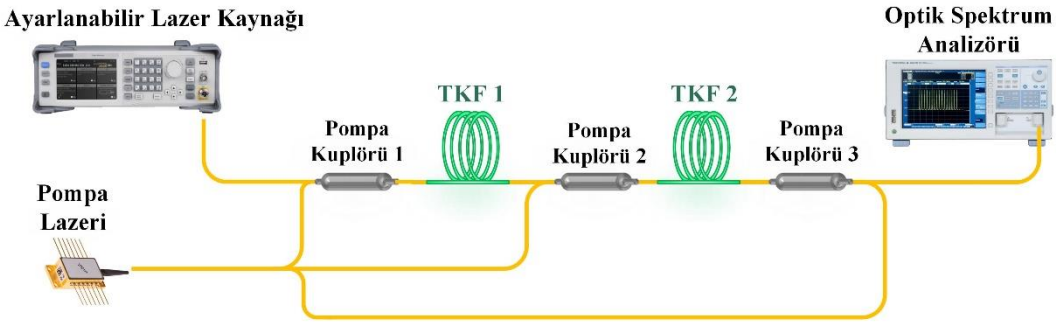
(a) İleri Yönlü Çift Geçişli TKFY (İÇG-TKFY)



(b) İleri-İleri Yönlü Çift Geçişli TKFY (İİÇG-TKFY)



(c) İleri-Geri Yönlü Çift Geçişli TKFY (İGÇG-TKFY)



(d) İleri-İleri-Geri Yönlü Çift Geçişli TKFY (İİGÇG-TKFY)

Şekil 6.2. Pompa dalgaboyu ve pompalama yönü araştırmasında kullanılan çift geçişli TKFY düzenekleri

Şekil 6.2(a)'da görüldüğü gibi ileri pompalamalı çift geçişli TKFY (İÇG TKFY) tasarımında temel TKFY düzenine ayna eklenerek yansıyan sinyal tekrar TKF üzerinden geçirilerek sinyalin ikinci kez yülseltilmesi sağlanır. Şekil 6.2(b)'de ileri-ileri pompalamalı çift geçişli TKFY (İİÇG TKFY) olarak adlandırılan tasarımda, pompa gücü bir güç bölücü kullanılarak eşit olarak bölünmekte ve iki farklı TKF'yi ileri doğru beslemektedir. Şekil 6.2(c)'de ileri-geri pompalamalı çift geçişli TKFY (İGÇG-TKFY) isimli tasarımda da pompa gücü ikiye bölünmüştür ancak farklı olarak ikinci TKF geri pompalama ile beslenir. Bu şekilde geriye doğru pompalamanın kazanç ve gürültü rakamı değerlerine etkisi araştırılmıştır. Kademelerin birbirinden ayrılması için TDF 1 ile TDF2 arasında izolatör bulunmaktadır. Son olarak Şekil 6.2(d)'de gösterilen tasarımda pompa gücü üçe bölünmektedir. Bu tasarıma ileri-ileri-geri pompalamalı çift geçişli TKFY (İİGÇG TKFY) adı verilmiştir. Şekil 6.1(a)'da ışık bir TKF'den iki kez geçmekte, diğer şekillerde ise ayrı ayrı TKF'lerden bir kez ve toplamda iki kez geçmektedir.

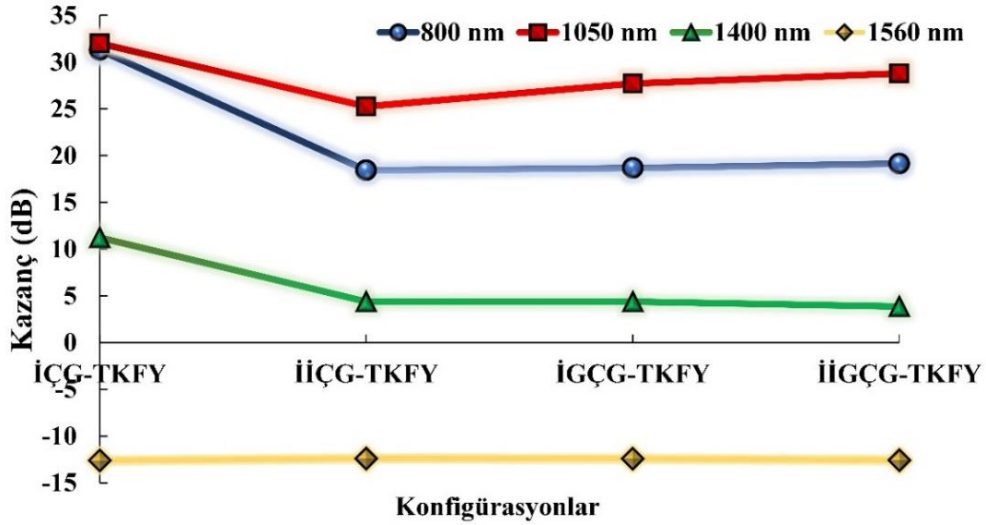
Çalışmada kullanılan değerler Çizelge 6.2'de listelenmiştir. Önceki çalışmamızın [134] sonuçlarına göre her bir tasarım -20 dBm giriş gücüne, 1469 giriş sinyaline ve 1000 mW pompa gücüne sahiptir; 800 nm, 1050 nm, 1400 nm ve 1450 nm dalga boylarındaki pompalarla beslenerek ayrı ayrı simüle edilmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak kazanç ve gürültü grafikleri oluşturulmuş ve en verimli pompa dalga boyu belirlenmiştir.

Çizelge 6.2. Pompa dalgaboyu ve Pompalama yönü çalışmasında kullanılan değerler

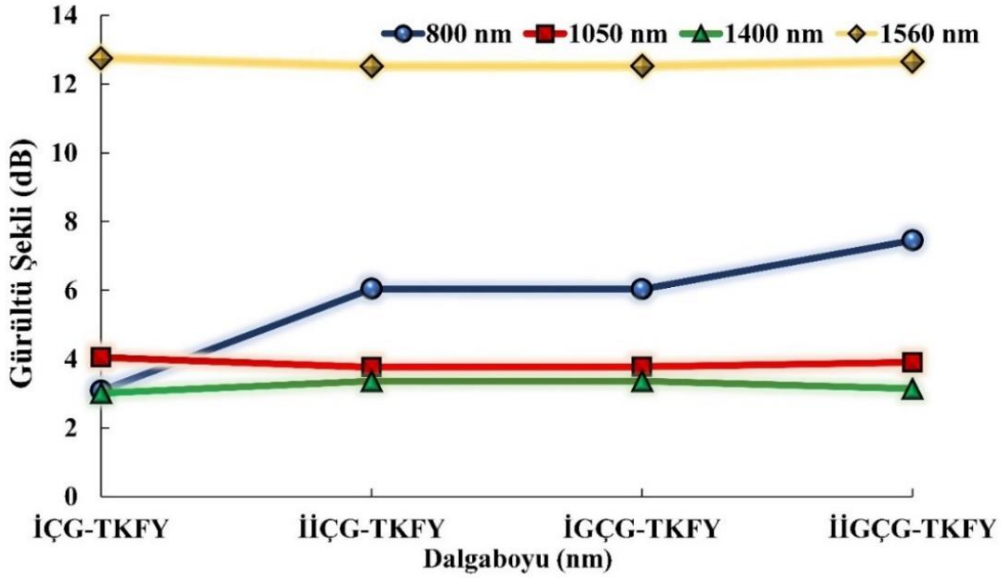
Tasarım	Pompa Dalgaboyu (nm)	Pompa Gücü (mW)	Pompalama Yönü	TKF Boyu (m)
İleri Yönlü Çift Geçişli TKFY	800, 1050, 1400, 1560	1000	İleri	5
İleri-İleri Yönlü Çift Geçişli TKFY	800, 1050, 1400, 1560	500+500	İleri + İleri	5+5
İleri-Geri Yönlü Çift Geçişli TKFY	800, 1050, 1400, 1560	500+500	İleri + Geri	5+5
İleri-İleri-Geri Yönlü Çift Geçişli TKFY	800, 1050, 1400, 1560	333+333+333	İleri + İleri + Geri	5+5

Tüm TKFY tasarımlarının ayrı ayrı simüle edilmesiyle kazanç ve gürültü şekli değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, karşılaştırma kolaylığı sağlamak amacıyla kazanç ve gürültü değerleri olarak iki ayrı grafikte gösterilmektedir.

İlk olarak 1469 nm dalga boyunda -20 dBm gücündeki giriş sinyallerine farklı dalga boylarında 1000 mW gücünde pompalar uygulanmıştır. Şekil 6.3'de 800 nm, 1050 nm, 1400 nm ve 1560 nm dalga boylarında pompalarla beslenen tasarımlarının kazanç ve gürültü şekli grafikleri gösterilmektedir.



(a) Kazanç



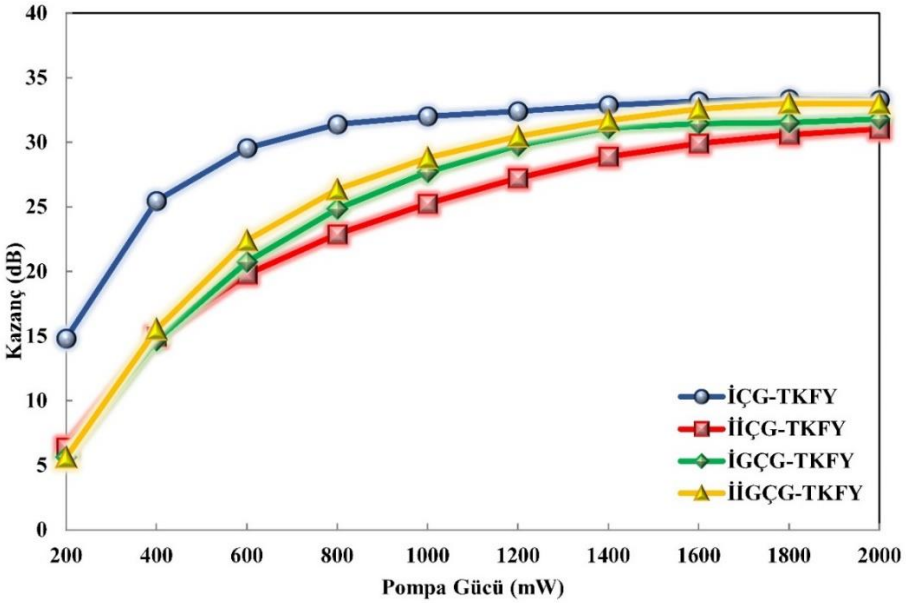
(b) Gürültü Şekli

Şekil 6.3. Farklı pompa dalgaboylarında beslenen tüm çift TKFY tasarımların kazanç ve gürültü şekli

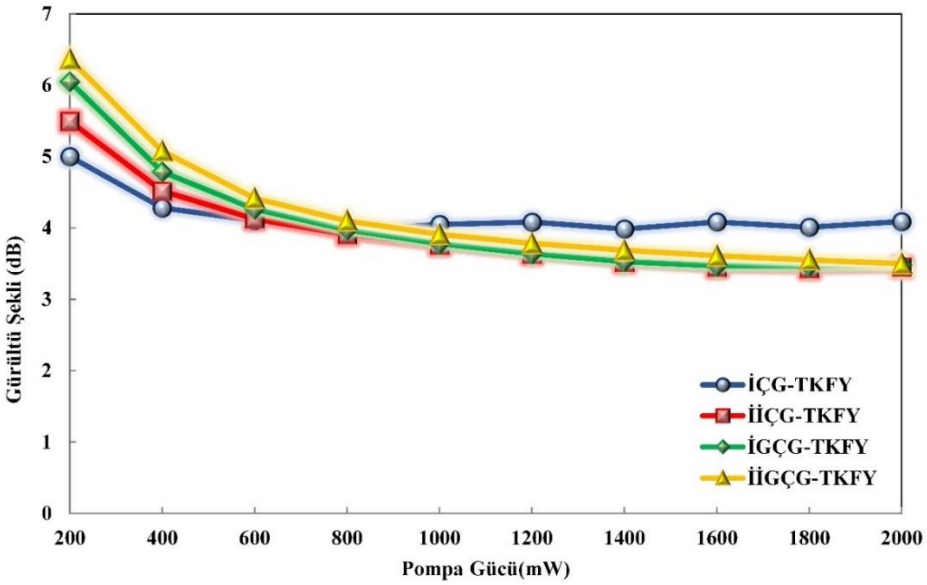
Şekil 6.3(a)'daki grafik incelendiğinde en yüksek kazanç değerlerinin 1050 nm pompa dalga boyunda elde edildiği görülmektedir. Şekil 6.3(b)'de 1050 nm ve 1400 nm dalga boylarında pompalanan tasarımların diğer tasarımlara göre daha düşük gürültü değerleri ürettiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre S bandındaki tüm çift geçişli TKFY tasarımları için en verimli pompa dalga boyu 1050 nm olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde 1050 nm dalga boyuna sahip bir pompa kullanılarak farklı pompa güçlerinde pompalama yönü araştırması yapılmıştır. 200 mW ile 2000 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle

edilirken giriş sinyallerinin dalga boyları 1451-1490 nm aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.4 incelendiğinde 800 mW pompa gücünden sonra İÇG-TKFY'nin doyuma yaklaştığı, pompa gücü artışının sistem kazancına etkisinin düşük olduğu görülmektedir. Bu tasarımda düşük pompa güçlerindeki kazanç değerleri diğer tasarımlara göre daha yüksektir. Çünkü diğer tasarımlardan farklı olarak pompanın tüm gücünü bölmeden kullanır. Bu tasarım için 800 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



(a) Kazanç



(b) Gürültü Şekli

Şekil 6.4. Farklı pompa yönlerinde tüm çift TKFY tasarımların pompa gücü değişiminde kazanç ve gürültü şekli

Diğer tasarımlarda pompa gücü paylaşıldığı için 2000 mW pompa gücüne kadar kazanç artışının az da olsa devam ettiği görülmektedir. Geri pompalamalı İGÇG-TKFY'nin kazancının, ileri pompalamalı İİGÇ-TKFY'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. İkinci pompalama yöntemi seçilirken ileri pompalama yerine geriye pompalama kullanılması kazanç değerini arttırmıştır. Bunun nedeni, sinyalin pompa giriş ucunun yakınında güçlü olması ve bu bölgedeki uyarma yoğunluğunu düşük tutması, böylece pompa ışığının parazit kayıplar onu almadan önce iyonlar tarafından verimli bir şekilde emilmesidir. Pompalama yönü çalışması sonucuna göre ikinci pompalama yönünde geri pompalama yapılması kazanç değerlerini ufak da olsa arttırmaktadır. Fakat üç ve dört geçişli konfigürasyonlarda karmaşıklığa neden olacağı için tüm tasarımlarda ikinci ve daha fazla pompalama olması durumunda ileri yönde pompalama kullanılmıştır.

6.2. Çift Geçişli TKFY

6.2.1. Tek aşamalı çift geçişli TKFY

Şekil 6.5'te tek aşamalı çift geçişli (ÇG) TKFY tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, TKF'den geçerek yükseltilen sinyal, ayna yardımıyla tekrar TKF üzerinden geçecek şekilde yönlendirilmiştir. Böylece TKF üzerinden ikinci kez geçen sinyal, ikinci bir yükseltme işlemine uğrar. ÇG-TFKY tasarımlarında, temel TKFY düzeneğine göre daha yüksek güç dönüşüm verimliliği, yüksek kazanım ve yüksek çıkış gücü elde edilir.

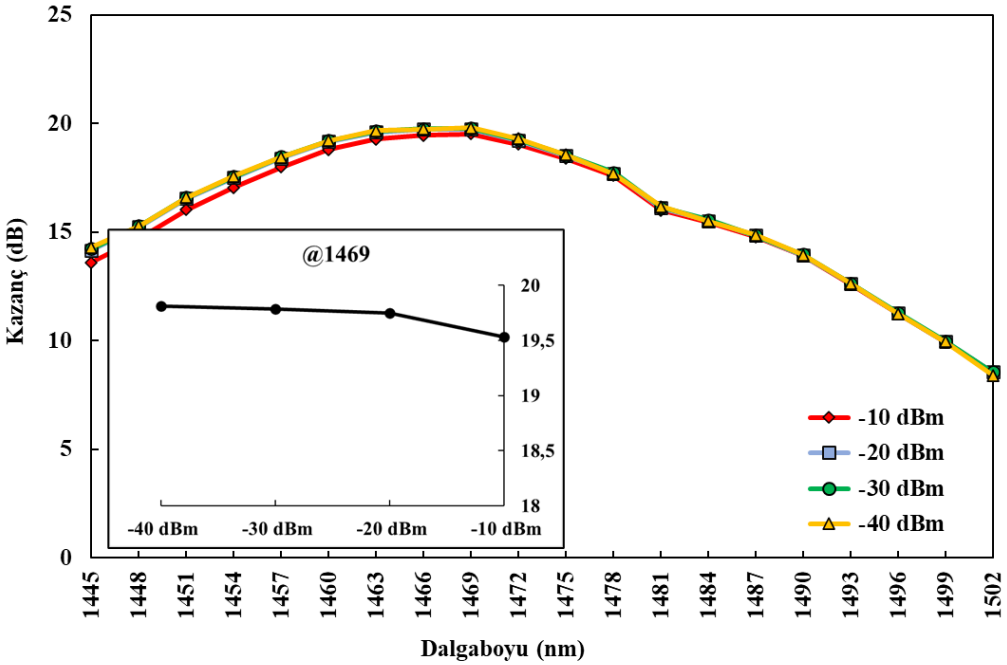


Şekil 6.5. Çift geçişli TKFY

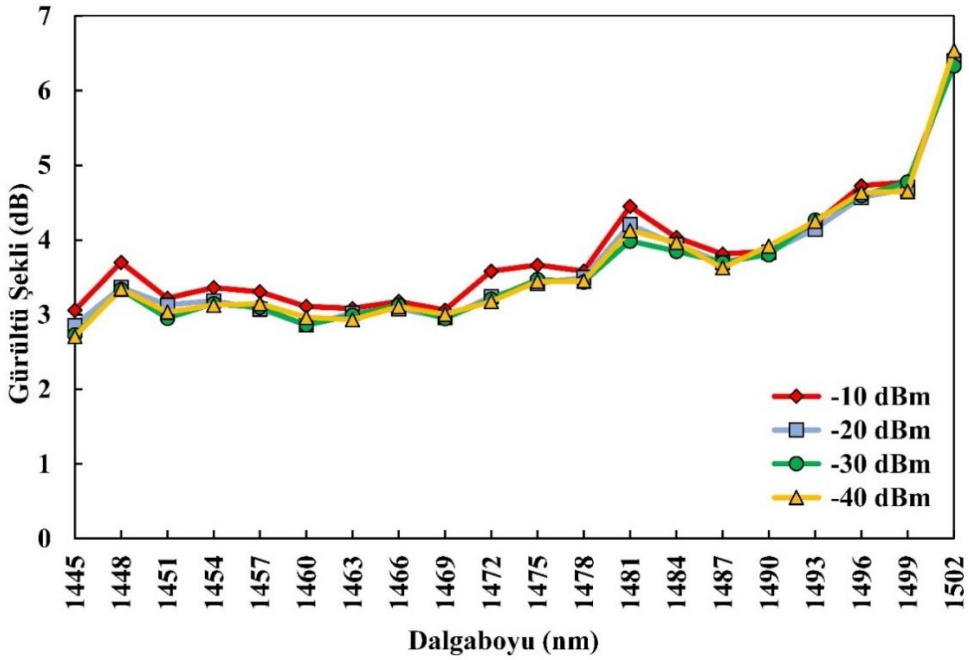
ÇG-TKFY performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

Giriş gücünün etkisi ve seçimi

ÇG-TKFY'de giriş gücünün seçimi için giriş gücü, -40 dBm ile -10 dBm arasında değiştirilerek, giriş gücünün sistem kazancına ve gürültüsüne etkileri incelenmiştir. Elde edilen verilerle oluşturulmuş giriş gücü-kazanç değişim grafiği Şekil 6.6'da, giriş gücü-gürültü şekli değişim grafiği ise Şekil 6.7'de görülmektedir.



Şekil 6.6. ÇG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi

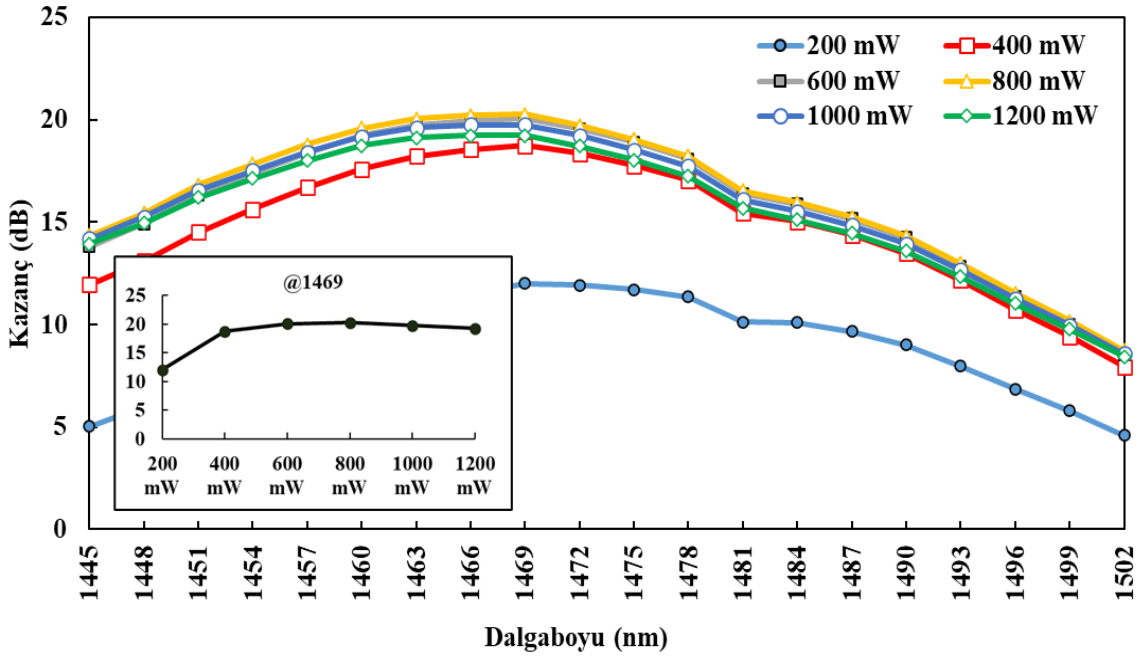


Şekil 6.7. ÇG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

Giriş gücü-kazanç değişim grafiği incelendiğinde giriş gücü, -10 dBm altına indiğinde kazanç değerlerindeki değişimin çok az olduğu görülecektir. Yükselteç, fiber boyu kısa olduğu için, giriş gücü -10 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan ÇG-TKFY konfigürasyonu için giriş gücü değeri -10 dBm alınmıştır. Giriş gücü-gürültü şekli grafiği incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 3-4 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 1-2 dB daha yükselmektedir. -10 dBm giriş gücü için gürültü şekli değerleri, diğer giriş güçleri için elde edilen gürültü şekli değerlerinden biraz fazladır.

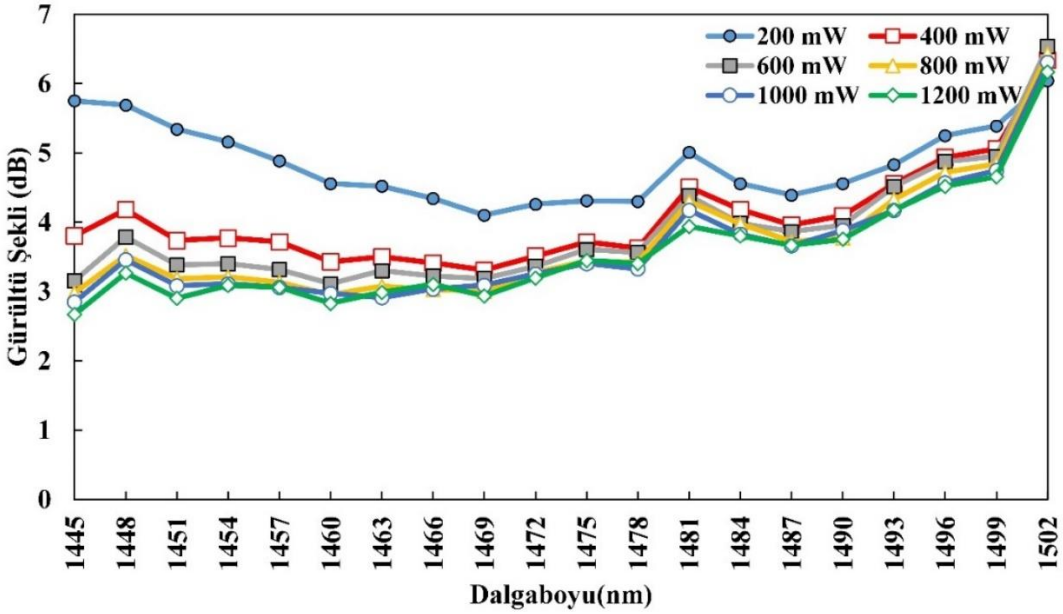
Pompa gücü optimizasyonu

Çalışmanın ikinci bölümünde, -10 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 1200 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.8 incelendiğinde 600 mW pompa gücünden sonra ÇG-TKFY'nin doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına bir etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 600 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.8. ÇG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi

Şekil 6.9'da 200-1200 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline neden olmaktadır. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri az da olsa düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 600 mW pompa gücünün gürültü şekli değerleri de düşük seyretmektedir.

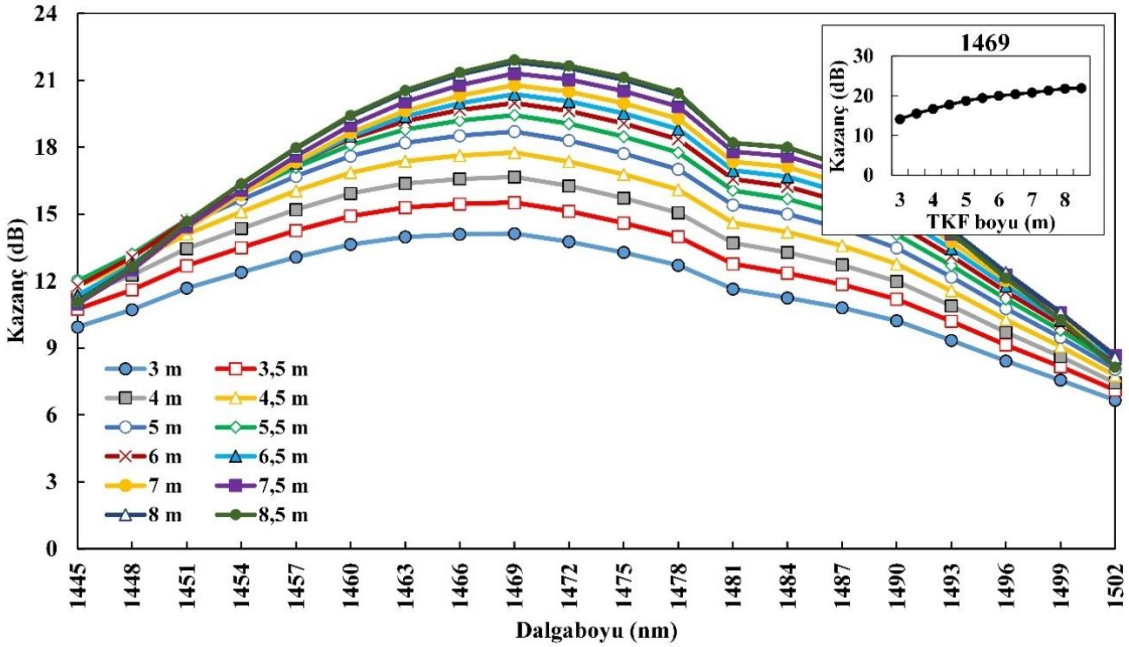


Şekil 6.9. ÇG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi

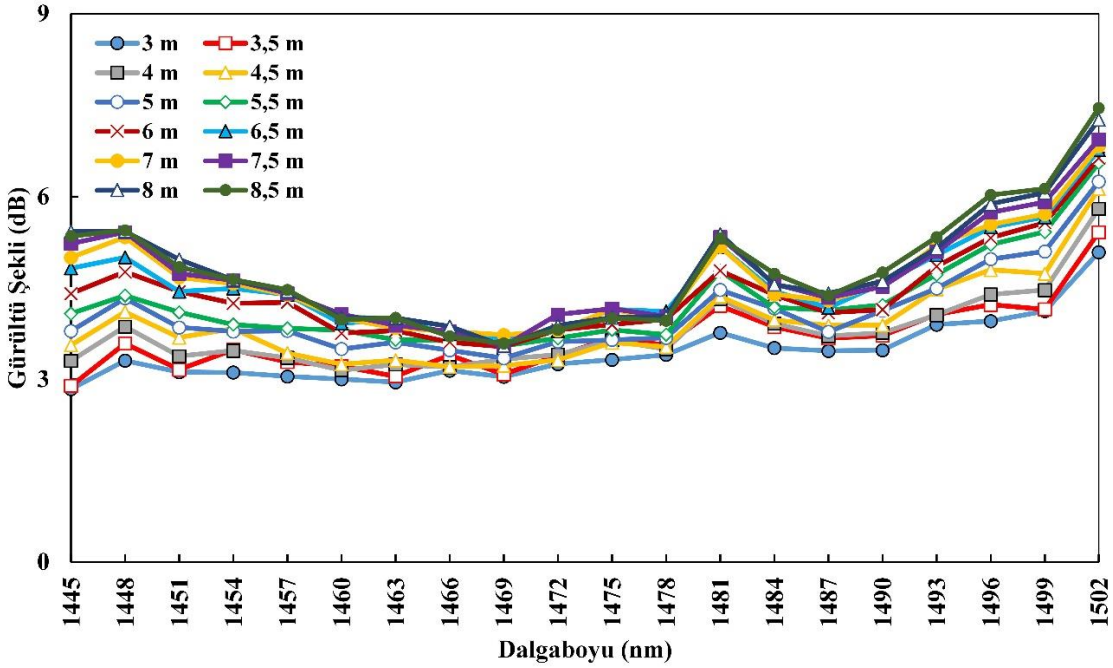
TKF boyu optimizasyonu

Şimdiye kadar yapılan ÇG-TKFY optimizasyon çalışmalarında elde edilen -10 dBm giriş gücü ve 600 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF boyu optimize edilmiştir. TKF boyu, 3 - 8,5 m arasında her seferinde 0,5 m arttırılarak değiştirilmiş ve çıkış kazancına ve gürültü şekline etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler ile Şekil 6.10'da gösterilen TKF boyu-kazanç değişim grafiği ve Şekil 6.11'de gösterilen TKF boyu-gürültü şekli değişim grafiği oluşturulmuştur.

TKF boyu-kazanç değişim grafiği incelendiğinde fiber boyundaki artış ile kazanç değerinin de arttığı görülmektedir. Fakat fiber boyu arttıkça kazanç artış oranı azalmaktadır. Çünkü yükselteç, yavaş yavaş doyuma yaklaşmaktadır. TKF boyu 8 m'den sonra kazanç miktarındaki artış 0,1 dB civarındadır. Bu boydan daha uzun fiber kullanmanın sisteme katkısı yok denecek kadar az olmaktadır. Bu nedenle TKF boyu 8 m seçilebilir.



Şekil 6.10. ÇG-TKFY için TKF boyu-kazanç değişimi



Şekil 6.11. ÇG-TKFY için TKF boyu-gürültü şekli değişimi

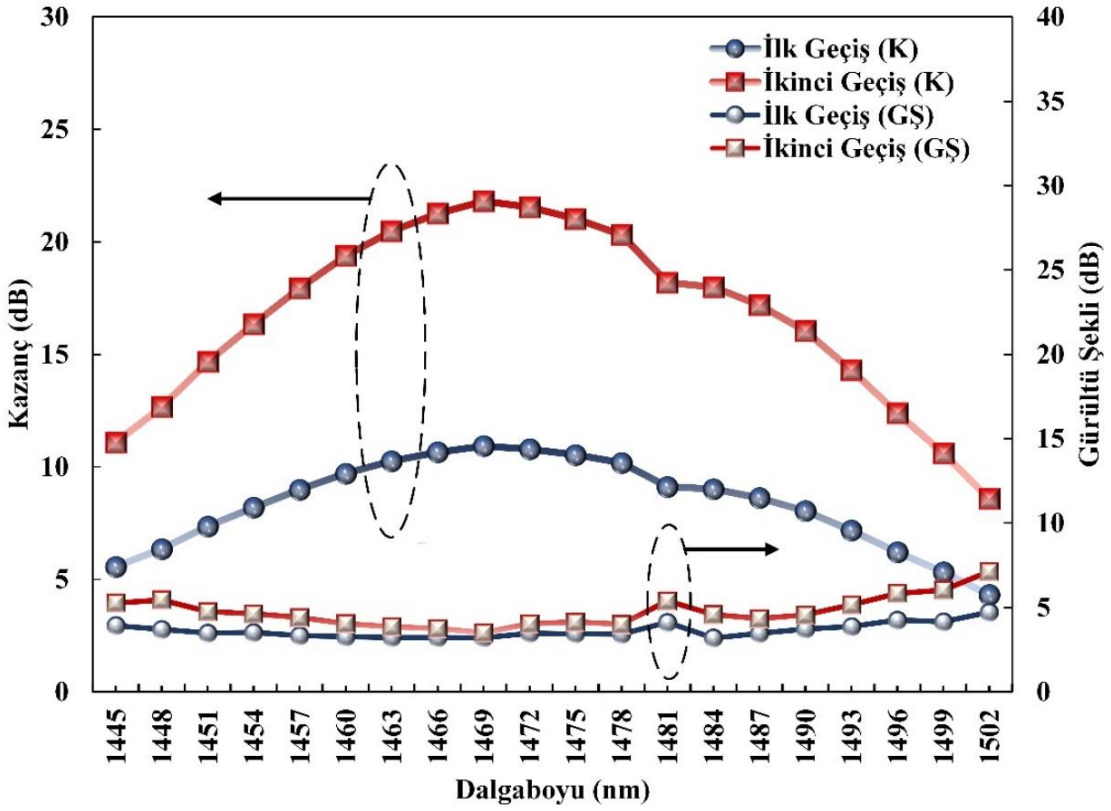
TKF boyu-gürültü şekli grafiği incelendiğinde düşük fiber boylarında gürültü şekli düşük iken, fiber boyu arttıkça gürültü şeklinin de arttığı görülmektedir. 5 m ve daha düşük fiber boyu için gürültü şekli değeri 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 3-4 dB seyrederken, 1478 nm'den büyük dalgaboylarında 1-2 dB daha fazla olmaktadır. 5m'den büyük boylarda ise gürültü şekli değeri 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 4-5 dB civarındayken, 1478 nm'den sonra 1-2 dB daha artış göstermektedir.

Optimize edilmiş ÇG-TKFY

Şimdiye kadar yapılan, giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.3'te gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen ÇG-TKFY'nin ilk ve ikinci geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.12'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.3. ÇG-TKFY için yapılan optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
ÇG-TKFY	-10	600	8	21,81	3,55

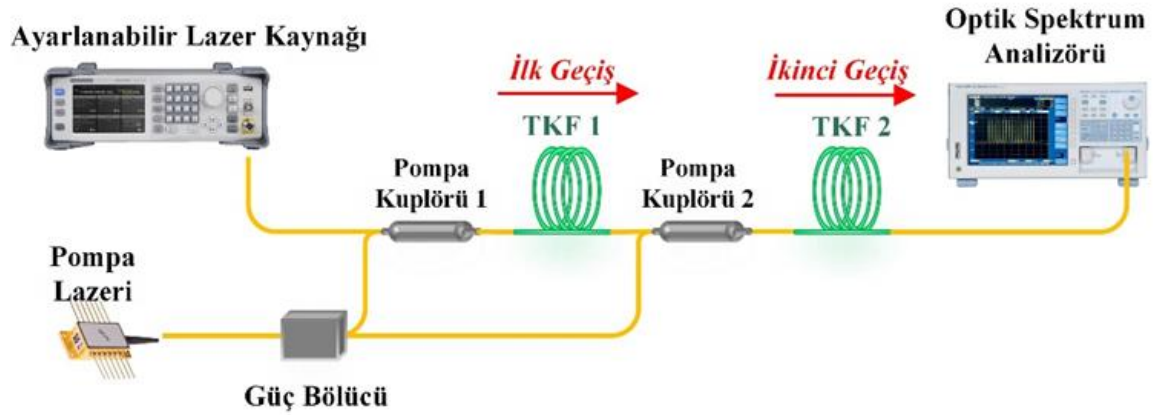


Şekil 6.12. ÇG-TKFY konfigürasyonunun her iki geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

Şekil 6.12'de görüldüğü gibi ilk geçişte 1469 nm dalgaboyundaki sinyal baz alındığında kazanç değeri 10,9 dB civarında iken, ikinci geçişten sonra kazanç değeri 21,8 dB'ye kadar yükseltmektedir. Bu da kazanç değerinin %100 arttığını göstermektedir. Gürültü değerleri ise ikinci geçişte, ilk geçişe kıyasla farklı dalgaboylarında 0,3-0,6 dB aralığında daha fazladır.

6.2.2. İki aşamalı çift geçişli TKFY

Şekil 6.13'te iki aşamalı çift geçişli (İAÇG) TKFY tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, TKF 1'den geçerek yükseltilen sinyal, TKF 2'den de geçerek ikinci bir yükselme işlemine uğramaktadır. Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile ikiye ayrılarak paylaştırılmaktadır. Böylece ilk fiberi doyuma ulaştıracak olan pompa gücü paylaştırılarak, ikinci bir fiberde yükseltme yapılmasına olanak sağlanmıştır.



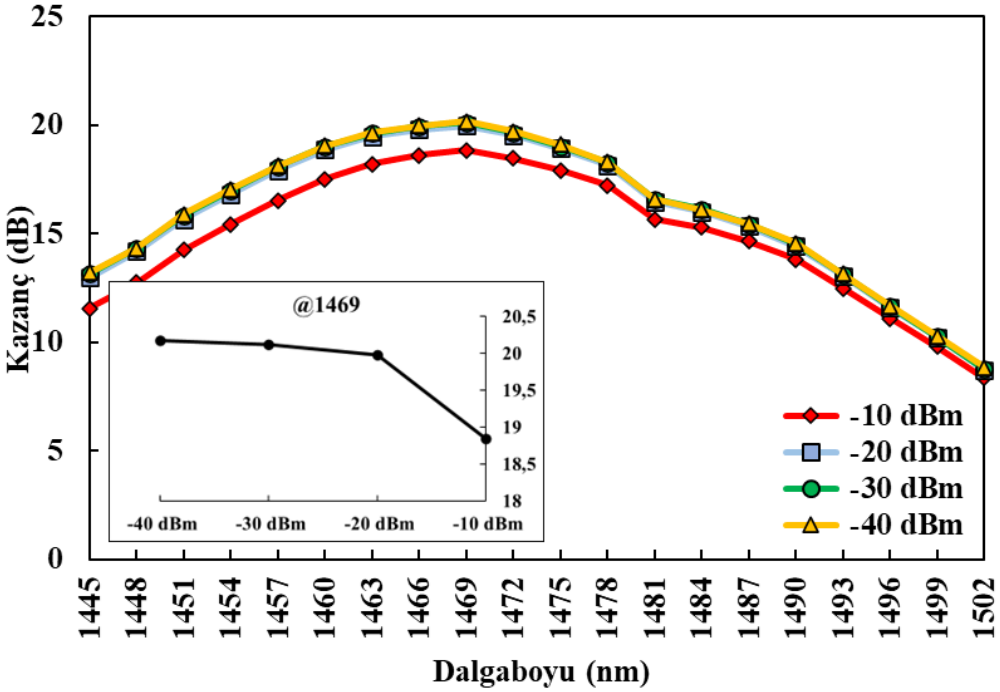
Şekil 6.13. İki Aşamalı Çift Geçişli TKFY

İAÇG-TKFY performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

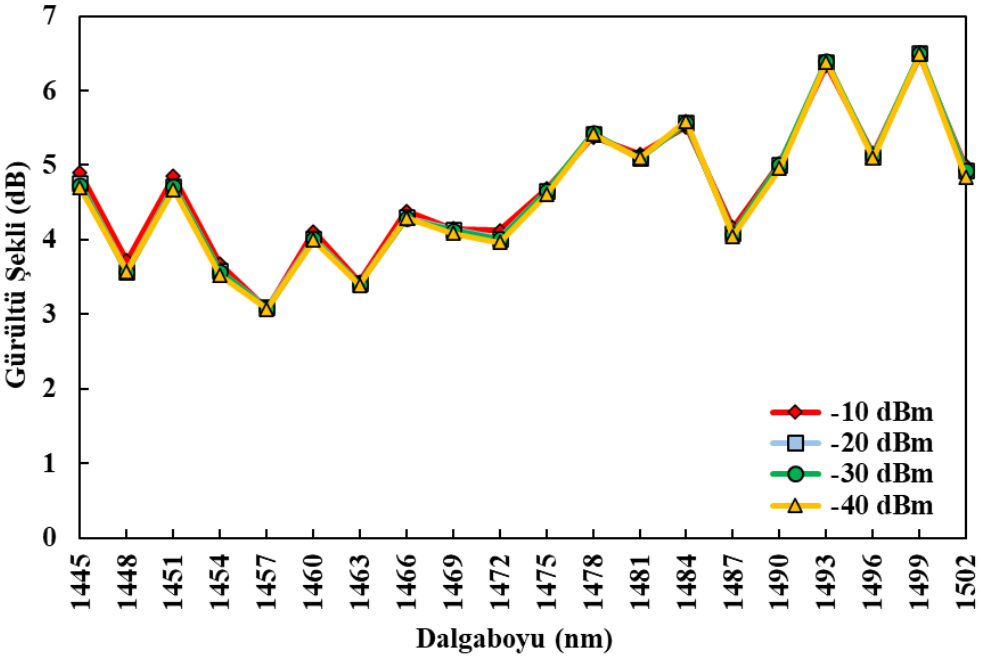
Giriş gücü etkisi ve seçimi

Şekil 6.14'de görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -20 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi minimal düzeydedir. Yükselteç, giriş gücü -20 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu

çalışmalarında, tasarlanan İAÇG-TKFY konfigürasyonu için giriş gücü değeri -20 dBm alınmıştır. Şekil 6.15 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 3-4 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 1-2 dB daha yükselmektedir. Gürültü şekli değeri -10 dBm giriş gücü için yüksek seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli değerleri birbirine cok yakın ve daha düşüktür.



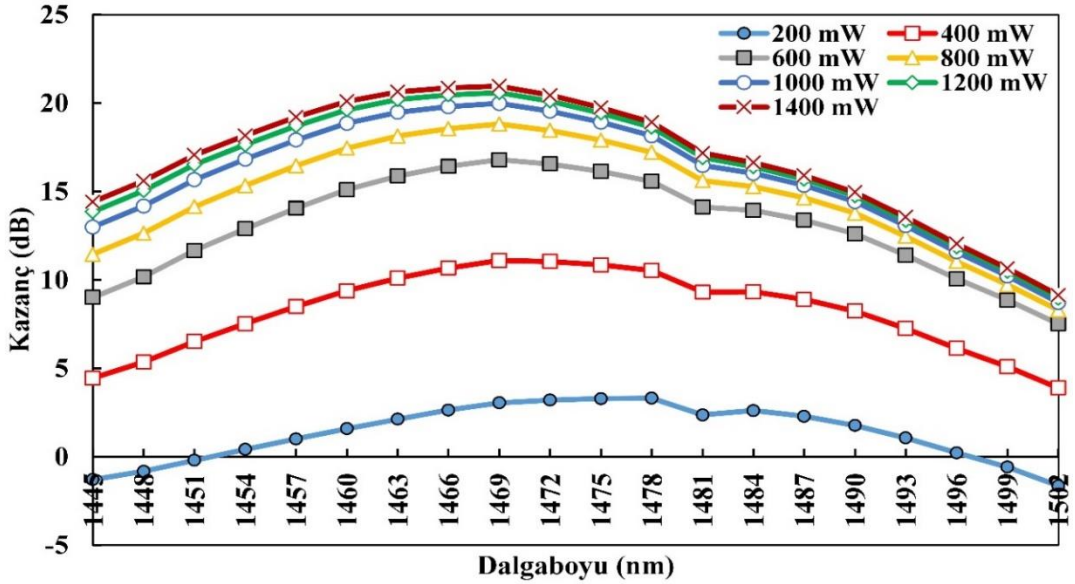
Şekil 6.14. İAÇG-TKFY için Giriş gücü-kazanç değişimi



Şekil 6.15. İAÇG-TKFY için Giriş gücü-gürültü şekli değişimi

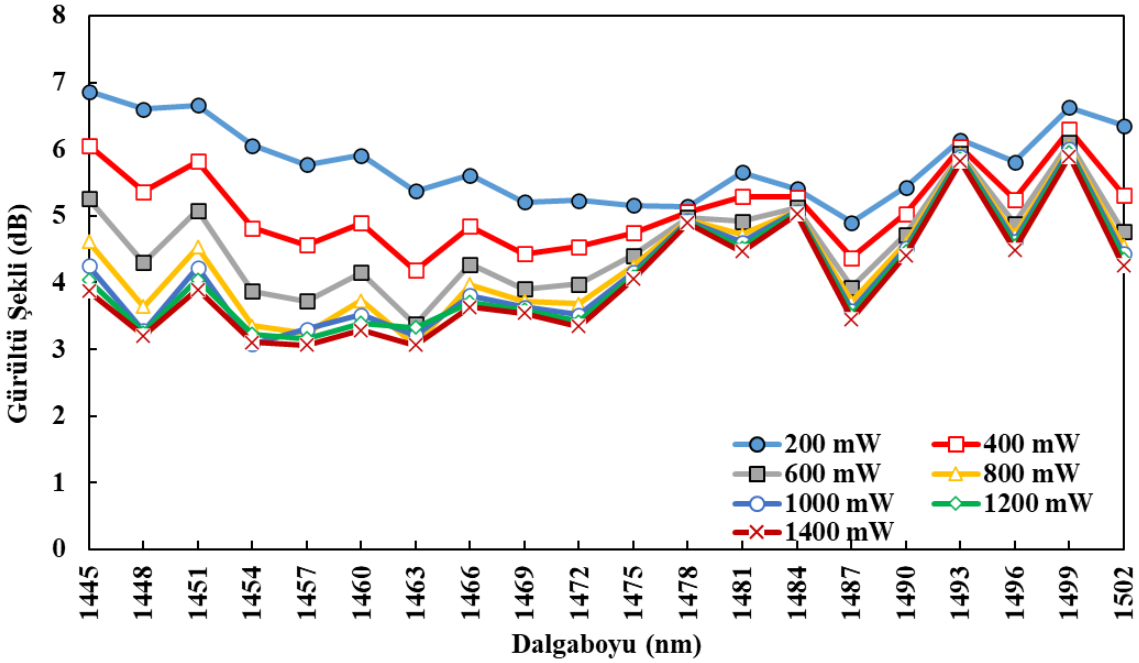
Pompa gücü optimizasyonu

Pompa gücü optimizasyonunda -20 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 1400 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.16 incelendiğinde 1200 mW pompa gücünden sonra İAÇG-TKFY'nin doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1200 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.16. İAÇG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi

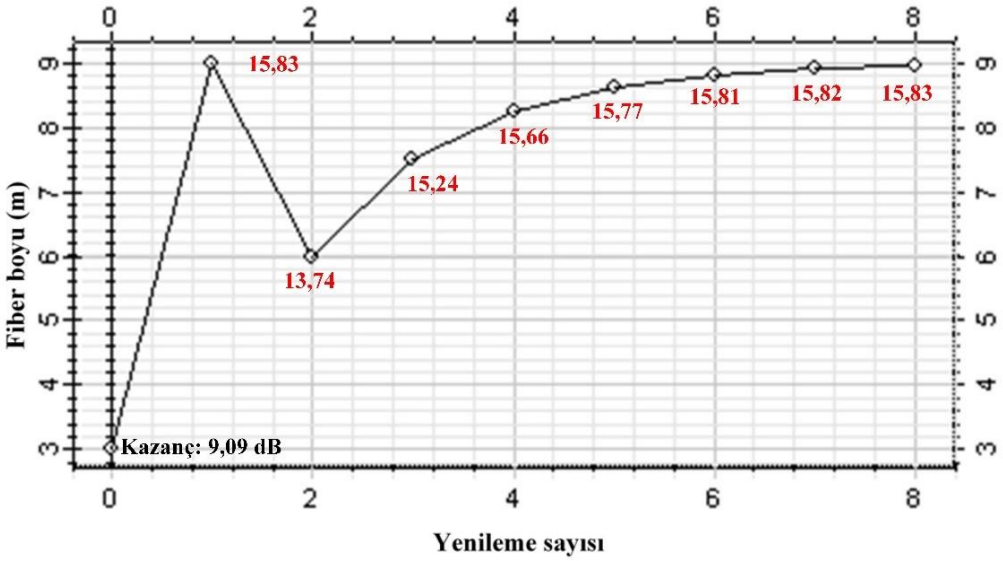
Şekil 6.17'de 200-1400 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline neden olmaktadır. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1200 mW pompa gücünün gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. Bu pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 2-4 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 1-2 dB daha yükselmektedir.



Şekil 6.17. İAÇG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi

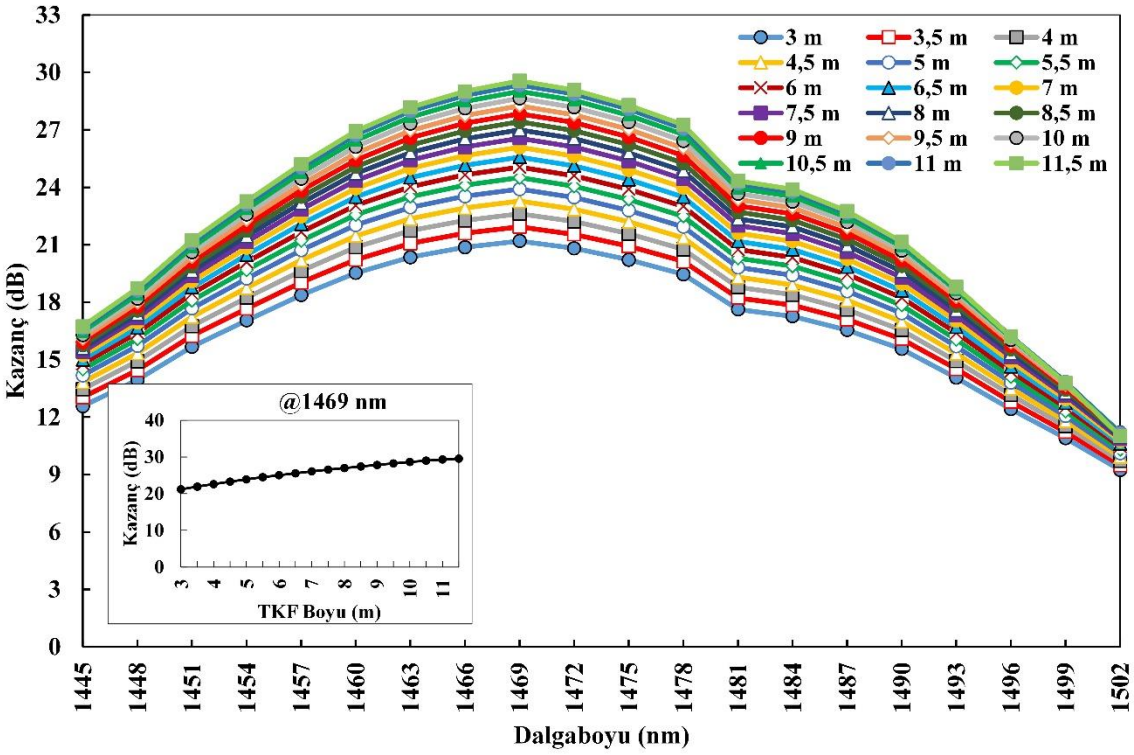
TKF boyu optimizasyonu

Şimdiye kadar yapılan İAÇG-TKFY optimizasyon çalışmalarında elde edilen -20 dBm giriş gücü ve 1200 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1 ve TKF 2 boyları optimize edilmiştir. TKF 1 boyu Optisystem 21.0'de yer alan "Single Parameter Optimization (SPO)" optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 9 m'dir. Optisystem 21.0 programında yapılan optimizasyon grafiği Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18. TKF 1 boyu optimizasyonu

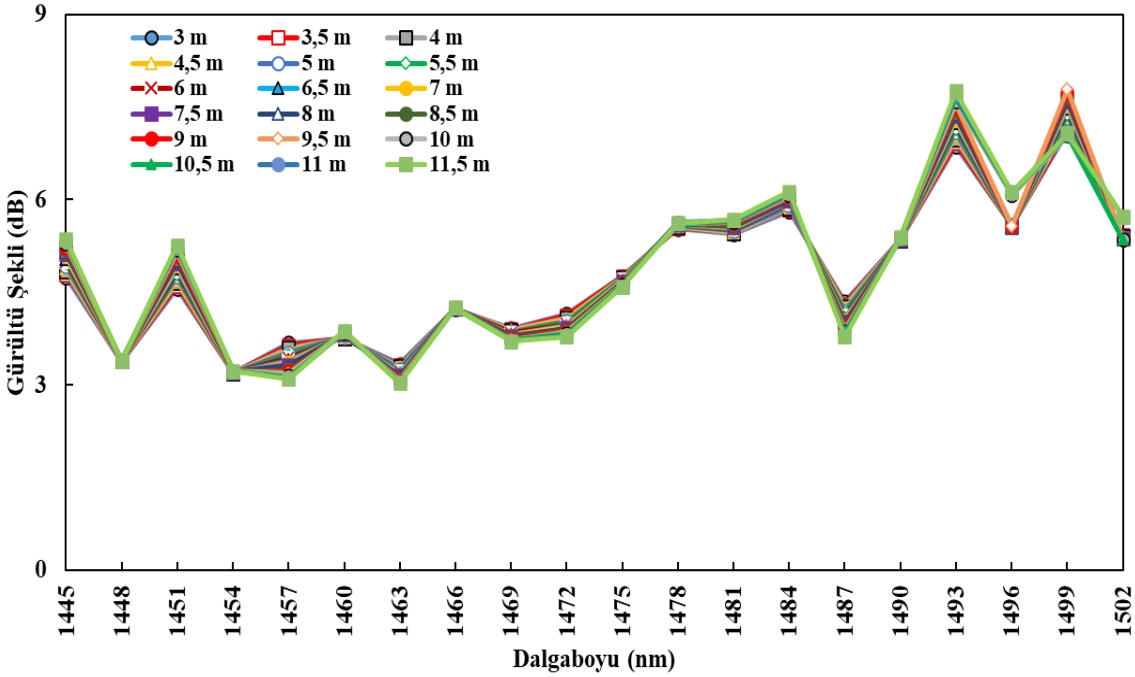
Daha sonra TKF 1 boyu 9 m alınarak TKF 2 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 2 boyu 3 – 11,5 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.19 ve 6.20'deki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.19'da TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.20'de ise TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.19. İAÇG-TKFY için TKF 2 boyu-kazanç değişimi

TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği incelendiğinde, TKF 2 boyunun artması ile kazanç değeri de arttığı görülmektedir. Fakat fiber boyu arttıkça yükselteç doyuma yaklaşmakta dolayısıyla kazanç artış miktarı düşmektedir. TKF 2 boyu 11 m'den büyük olduğunda kazanç artışı 0,1 dB'nin altına düşmektedir. Bu nedenle 11 m yeterli görülmüştür.

TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği incelendiğinde ise tüm fiber boyları için gürültü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



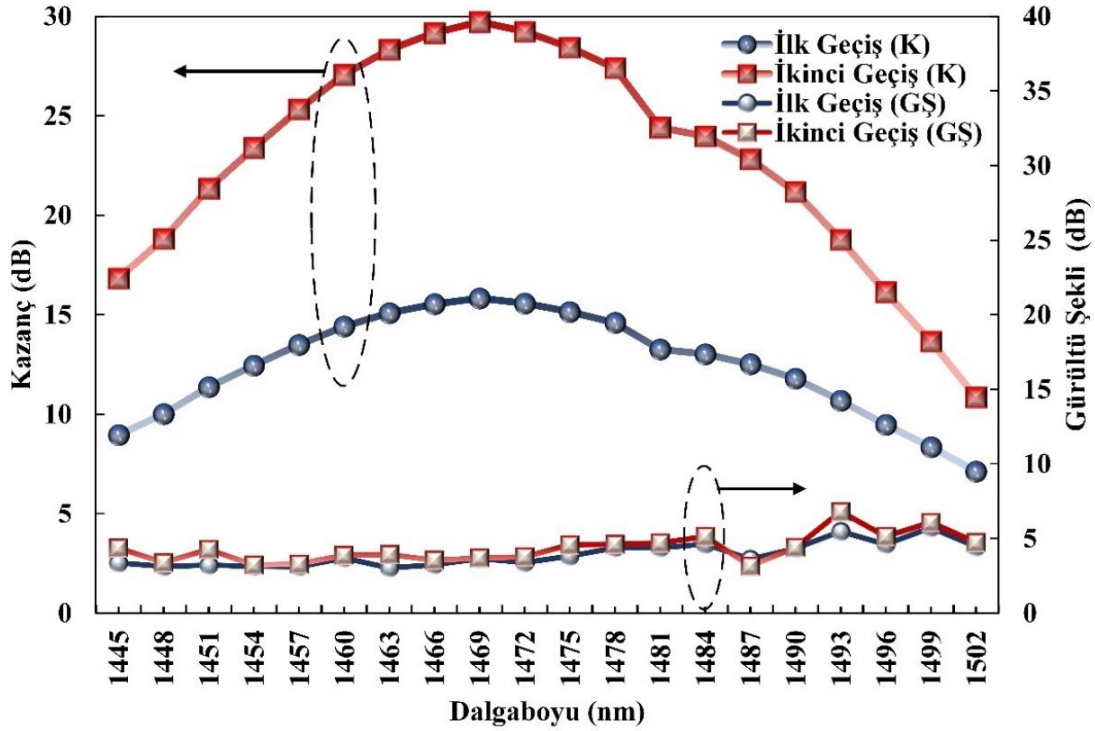
Şekil 6.20. İAÇG-TKFY için TKF 2 boyu-gürültü şekli değişimi

Optimize edilmiş İAÇG-TKFY

İAÇG-TKFY üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.4'de gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen İAÇG-TKFY'nin ilk ve ikinci geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.21'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.4. İAÇG-TKFY için yapılan optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
İAÇG-TKFY	-20	1200	9 + 11	29,72	3,10



Şekil 6.21. İAÇG-TKFY konfigürasyonunun her iki geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

Şekil 6.21'de görüldüğü gibi ilk geçişte 1469 nm dalgaboyundaki sinyal baz alındığında kazanç değeri 15,8 dB civarında iken, ikinci geçişten sonra kazanç değeri 29,7 dB'ye kadar yükseltmektedir. Bu da kazanç değerinin %88 arttığını göstermektedir. Gürültü şekli değerleri incelendiğinde ise, iki geçiş arasında değerlerin biribirine çok yakın olduğu görülmektedir.

6.2.3. İki geçişli TKFY konfigürasyonlarının karşılaştırılması

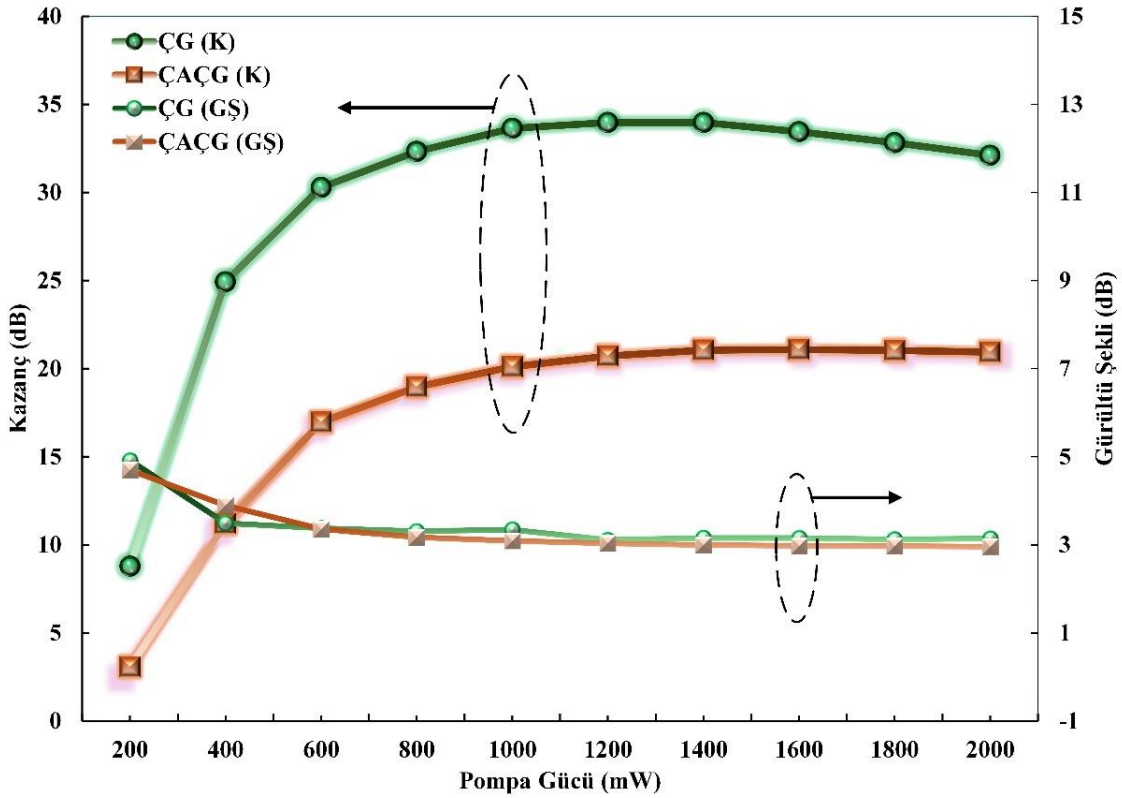
ÇG-TKFY ve İAÇG-TKFY konfigürasyonları, kendi içinde ayrı ayrı optimizasyon yapılarak giriş gücü, pompa gücü ve TKF boylarının kazanç ve gürültü şekli üzerine etkisi

incelenmiştir. İki konfigürasyonda da en iyi performans farklı değerlerde elde edilmiştir ve bu değerler Çizelge 6.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. İki Geçişli TKFY optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1/ TKF1+TKF2 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
ÇG-TKFY	-10	600	8	21,81	3,55
İAÇG-TKFY	-20	1200	9 + 11	29,72	3,10

Bu iki tasarımı karşılaştırma yapmak için mümkün olduğunca benzer şartlarda çalıştırmak gerekmektedir. Bu nedenle -20 dBm giriş gücünde ve 1469 nm dalgaboyundaki giriş sinyali için ÇG-TKFY için 10 m TKF ve İAÇG-TKFY için de 5+5 m fiber boyu kullanılarak çalıştırılmış, 200 mW dan başlayarak artan giriş güçlerinde her iki düzeneğinde performansı incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak şekil 6.22'deki grafik oluşturulmuştur.



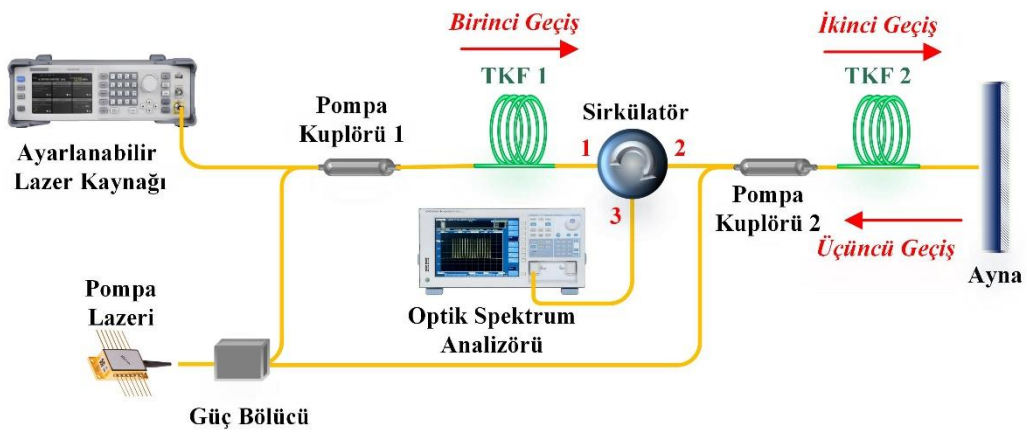
Şekil 6.22. ÇG-TKFY ve İAÇG-TKFY tasarımlarının kazanç ve gürültü şekli karşılaştırması

Grafik incelendiğinde benzer koşullarda her iki konfigürasyonunda kazanç değeri 1200 mW pompa gücünden sonra artmamaktadır. 1200 mW pompa gücünde ÇG-TKFY'nin kazanç değeri 34 dB iken, İAÇG-TKFY'nin kazanç değeri 20,7 dB'dir. Benzer koşullarda İAÇG-TKFY ile karşılaştırıldığında, ÇG-TKFY ile %64,25 daha fazla kazanç elde edilmiştir. Her iki konfigürasyonun gürültü şekli değerleri ise birbirine çok yakındır. İki geçişli TKFY çalışmalarında en iyi performans ÇG-TKFY'e attir. Bu nedenle, en verimli konfigürasyon tipi bu kategoride ÇG-TKFY olarak belirlenmiştir.

6.3. Üç Geçişli TKFY

6.3.1. İki aşamalı üç geçişli TKFY I

Şekil 6.23'de iki aşamalı üç geçişli (İAÜG) TKFY I tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, ilk aşamasında tek geçişli yükselteç, ikinci aşamasında çift geçişli yükselteç kullanılmıştır. TKF 1'den geçerek yükseltilen sinyal, TKF 2'den de geçirilerek ikinci bir yükseltme işlemine uğramaktadır. Aynadan yansıyan sinyal tekrar TKF 2'den geçerek üçüncü bir yükseltme uğramaktadır. Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile ikiye ayrılarak paylaştırılmaktadır. İAÜG-TKFY I konfigürasyonu ile tek ve çift geçişli yükselteçlerin avantajlarını birleştirerek hibrit bir çözüm sunulmuştur.

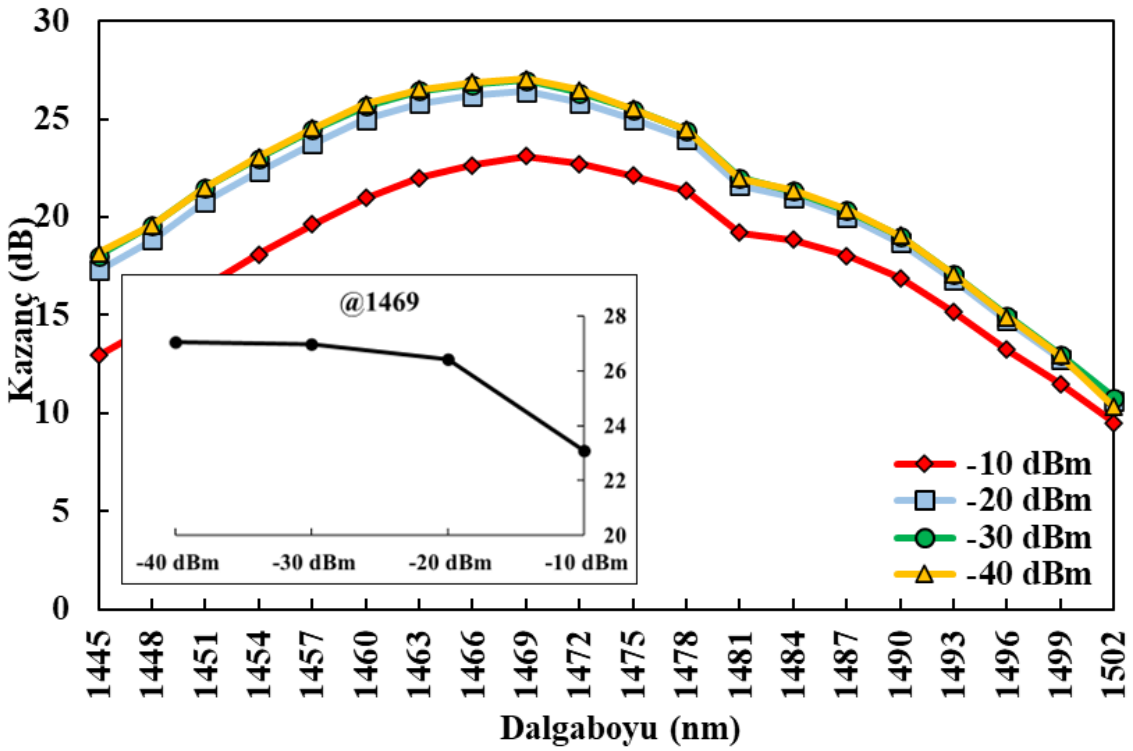


Şekil 6.23. İki aşamalı üç geçişli TKFY I

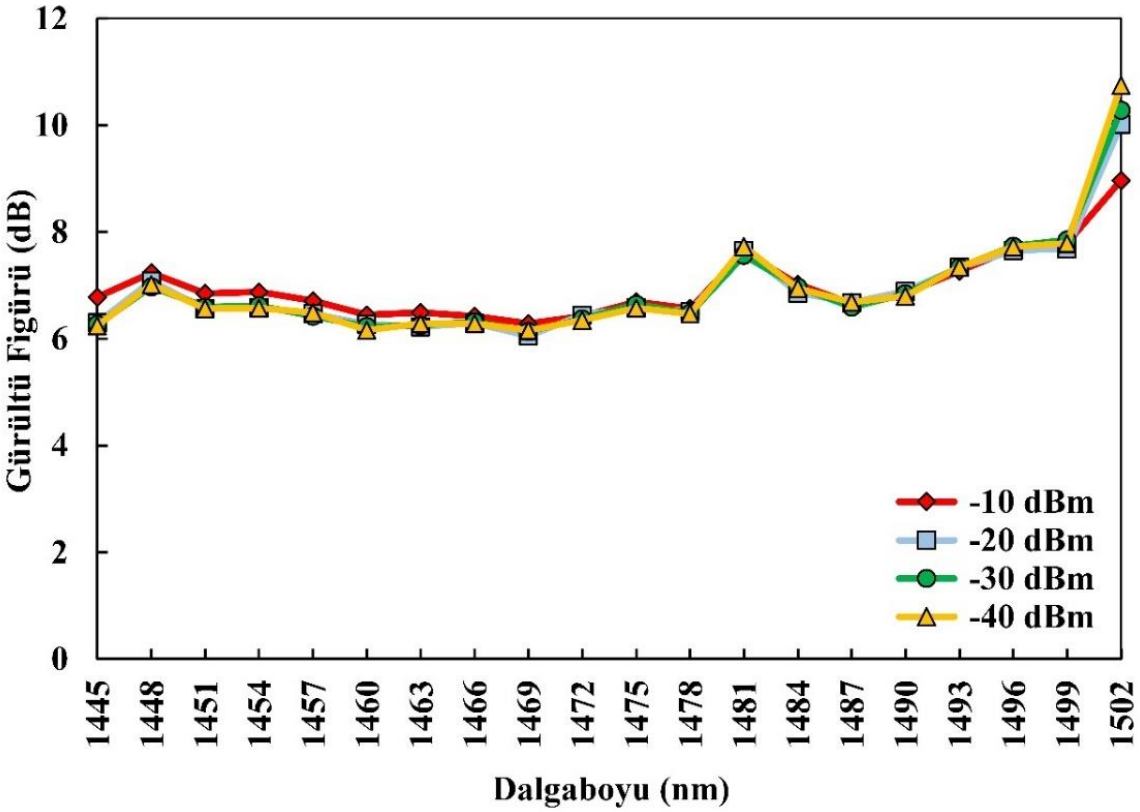
İAÜG-TKFY I performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

Giriş gücü etkisi ve seçimi

Şekil 6.24'de görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -20 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi çok az olmaktadır. Yükselteç, giriş gücü -20 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan İAÜG-TKFY I konfigürasyonu için giriş gücü değeri -20 dBm alınmıştır. Şekil 6.25 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 6-7 dB arasında seyrederken, 1478-1499 nm dalgaboyu aralığında 1-2 dB daha yükselmektedir. Gürültü şekli değeri -10 dBm giriş gücü için yüksek seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli değerleri birbirine cok yakın ve nispeten daha düşüktür.



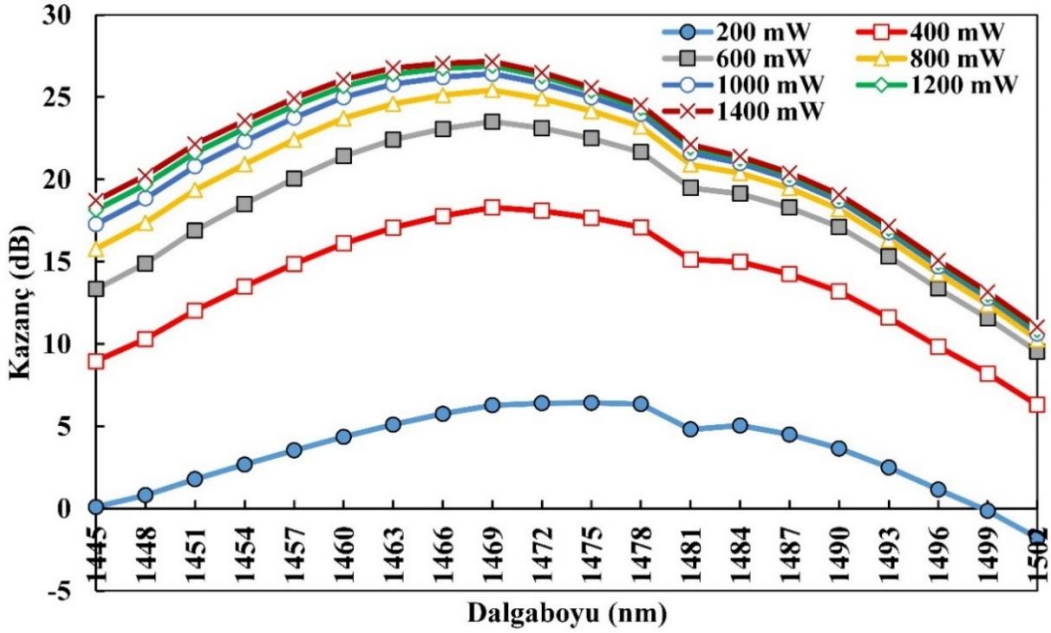
Şekil 6.24. İAÜG-TKFY I için giriş gücü-kazanç değişimi



Şekil 6.25. İAÜG-TKFY I için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

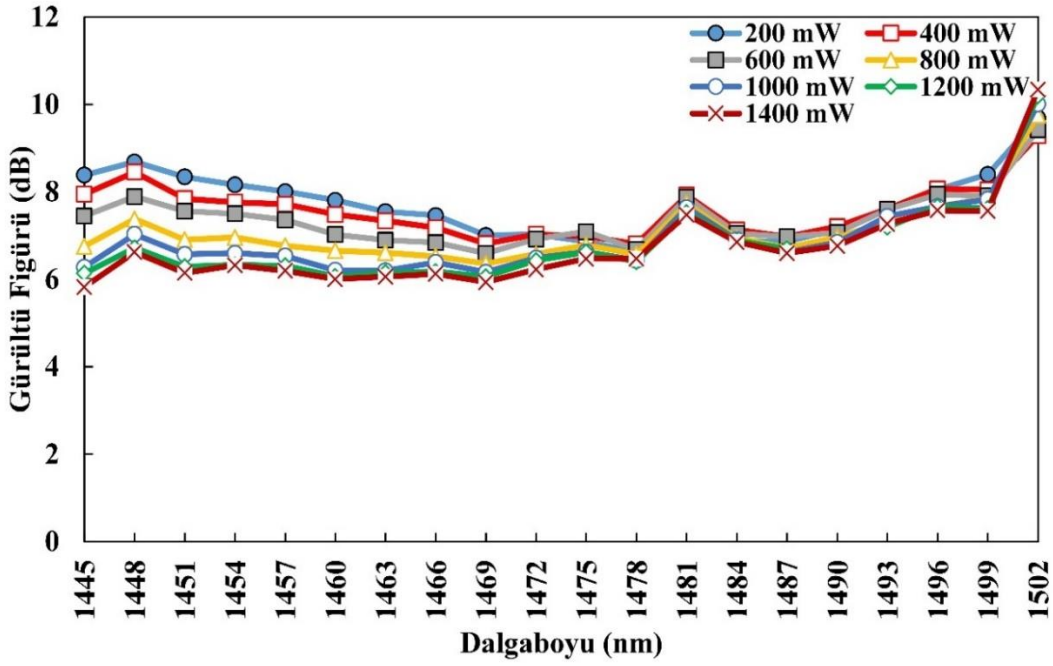
Pompa gücü optimizasyonu

Pompa gücü optimizasyonunda -20 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 1400 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.26 incelendiğinde 1200 mW pompa gücünden sonra İAÜG-TKFY I'in doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1200 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.26. İAÜG-TKFY I için pompa gücü-kazanç değişimi

Şekil 6.27'de 200-1400 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline neden olmaktadır. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1200 mW pompa gücünün gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. Bu pompa gücünde gürültü şekli değerleri 6-9 dB arasında değişmektedir.

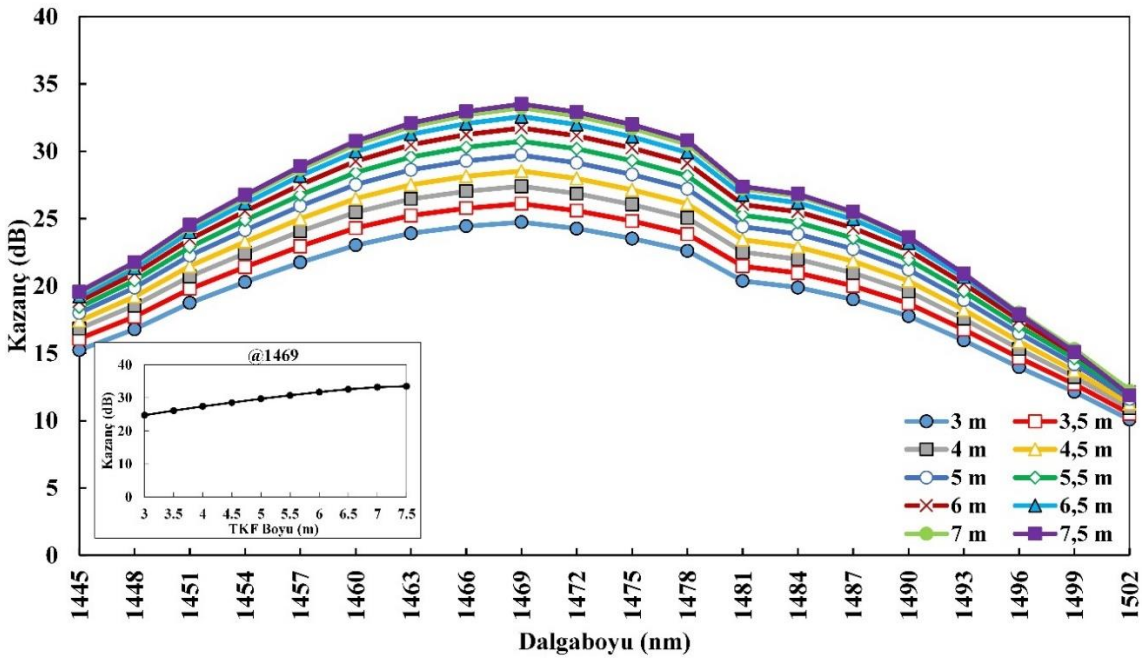


Şekil 6.27. İAÜG-TKFY I için pompa gücü- gürültü şekli değişimi

TKF boyu optimizasyonu

Şimdiye kadar yapılan İAÜG-TKFY I optimizasyon çalışmalarında elde edilen -20 dBm giriş gücü ve 1200 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1 ve TKF 2 boyları optimize edilmiştir. TKF 1 boyu Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 9 m'dir.

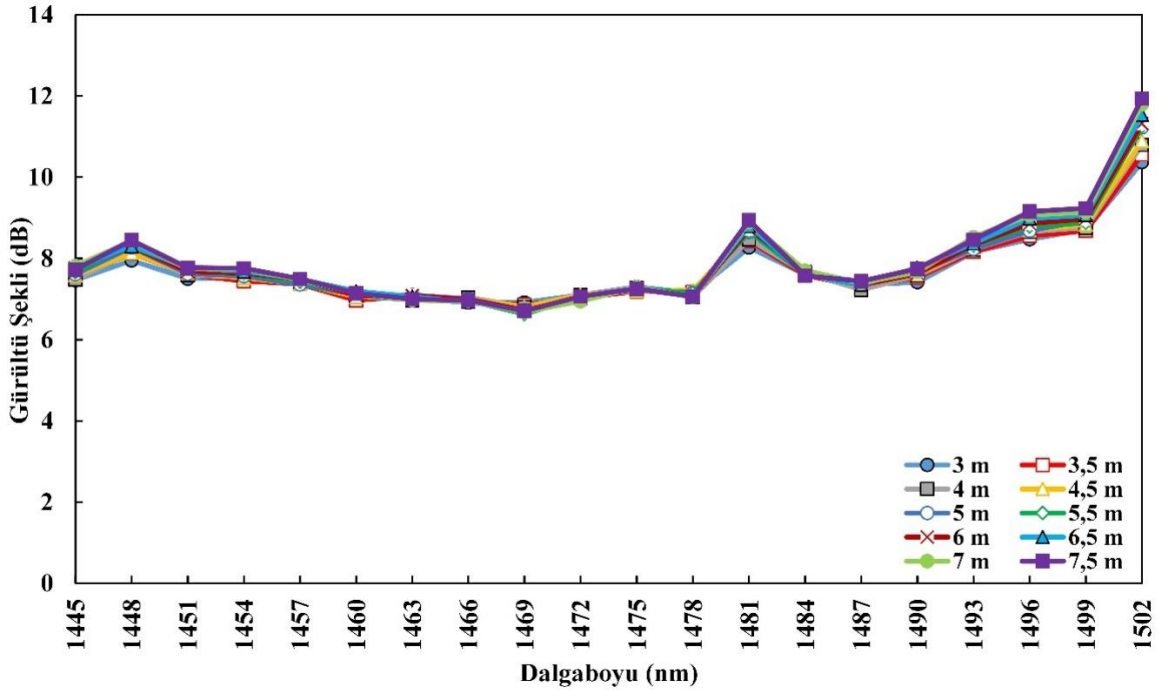
Daha sonra TKF 1 boyu 9 m alınarak TKF 2 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 2 boyu 3 – 7,5 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.28 ve 6.29'deki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.28'de TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.29'da ise TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.28. İAÜG-TKFY I için TKF 2 boyu-kazanç değişimi

TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği incelendiğinde, TKF 2 boyunun artması ile kazanç değerinin de arttığı görülmektedir. Fakat fiber boyu arttıkça yükselteç doyuma yaklaşmakta dolayısıyla kazanç artış miktarı düşmektedir. TKF 2 boyu 7 m'den büyük olduğunda kazanç arttışı 0,1 dB'nin altına düşmektedir. Bu nedenle TKF 2 için 7 m yeterli görülmüştür.

TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği incelendiğinde ise tüm fiber boyları için gürültü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



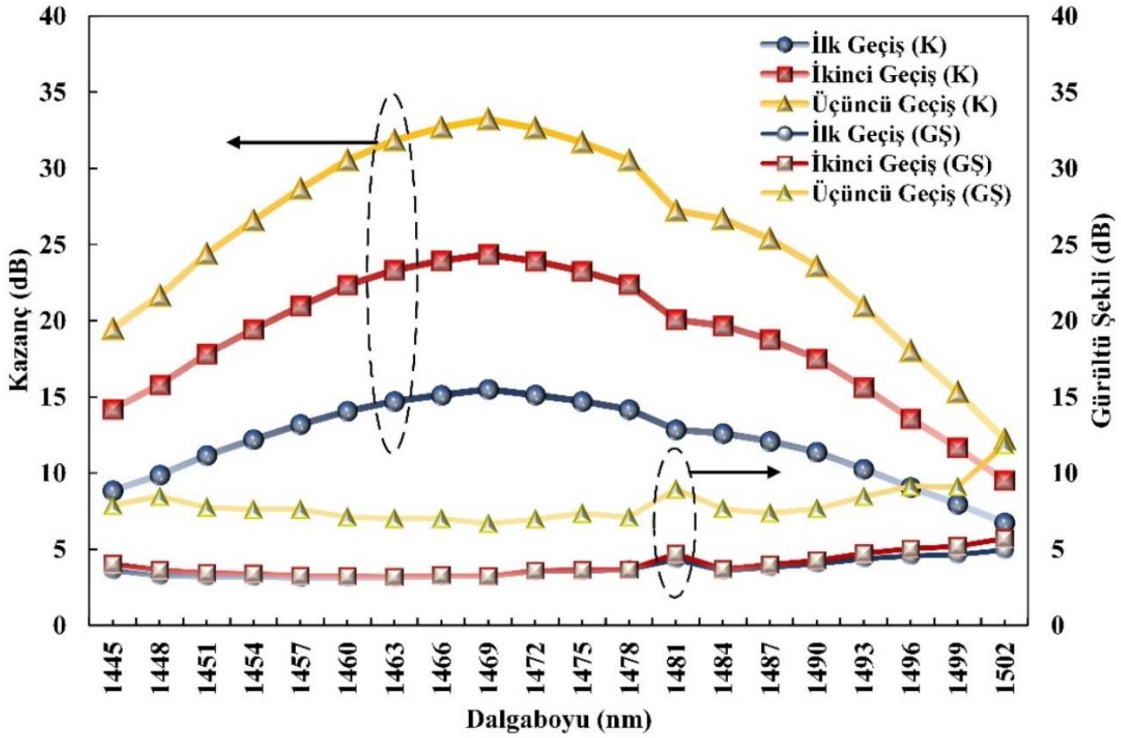
Şekil 6.29. İAÜG-TKFY I için TKF 2 boyu-gürültü şekli değişimi

Optimize edilmiş İAÜG-TKFY I

İAÜG-TKFY I üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.6'da gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen İAÜG-TKFY I'in ilk, ikinci ve üçüncü geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.30'da gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.6. İAÜG-TKFY I için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
İAÜG-TKFY I	-20	1200	9 + 7	33,23	6,68

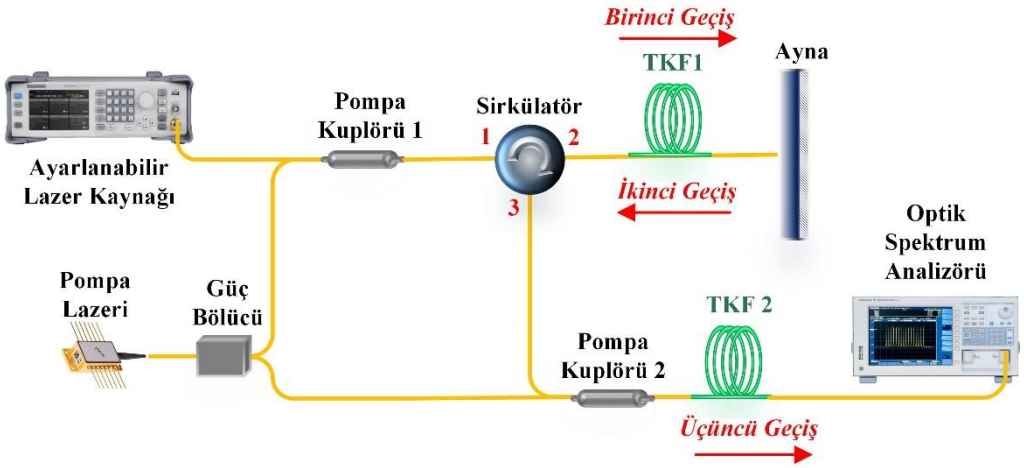


Şekil 6.30. İAÜG-TKFY I konfigürasyonunun her üç geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

Şekil 6.30'da görüldüğü gibi ilk geçişte 1469 nm dalgaboyundaki sinyal baz alındığında kazanç değeri 15,5 dB civarında iken, ikinci geçişte kazanç değeri 24,4 dB'dir. Üçüncü geçiş sonunda ise 33,2 dB'ye yükselmektedir. Bu da kazanç değerinin ikinci geçişte (ilk geçişe göre) %57,4 arttığını, üçüncü geçişte ise (ikinci geçişe göre) %36,1 arttığını göstermektedir. Gürültü şekli değerleri incelendiğinde ise, ilk iki geçiş arasında değerlerin biribirine çok yakın ve 3-5 dB civarında olduğu görülürken, üçüncü geçişte gürültü şekli değerleri 7-9 aralığına yükselmektedir.

6.3.2. İki aşamalı üç geçişli TKFY II

İAÜG-TKFY II konfigürasyonunda, İAÜG-TKFY I konfigürasyonunun tersine çift geçiş ilk aşamada yer almaktadır. Çift geçişte iki kez yükseltilmiş sinyal son olarak TKF 2 'de de yükseltilerek üç geçiş tamamlanacaktır. Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile ikiye ayrılarak paylaştırılmaktadır. İAÜG-TKFY I konfigürasyonunda olduğu gibi İAÜG-TKFY II konfigürasyonu ile de tek ve çift geçişli yükselteçlerin avantajlarını birleştirerek hibrit bir çözüm sunulmuştur.

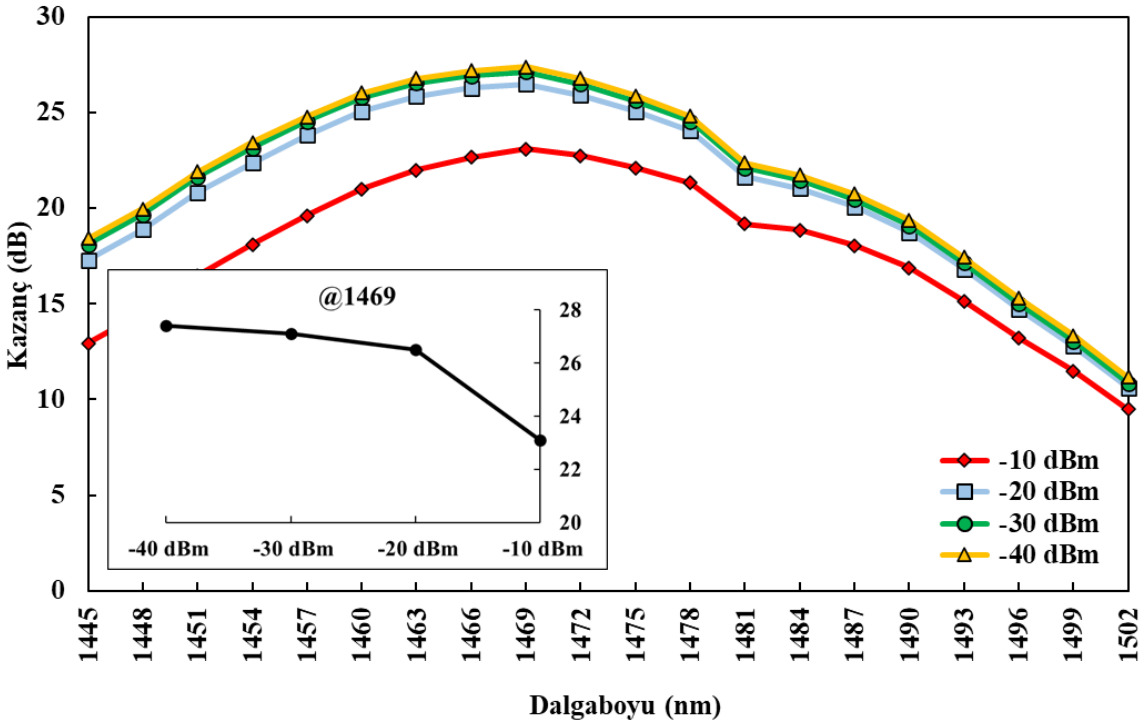


Şekil 6.31. İki aşamalı üç geçişli TKFY II

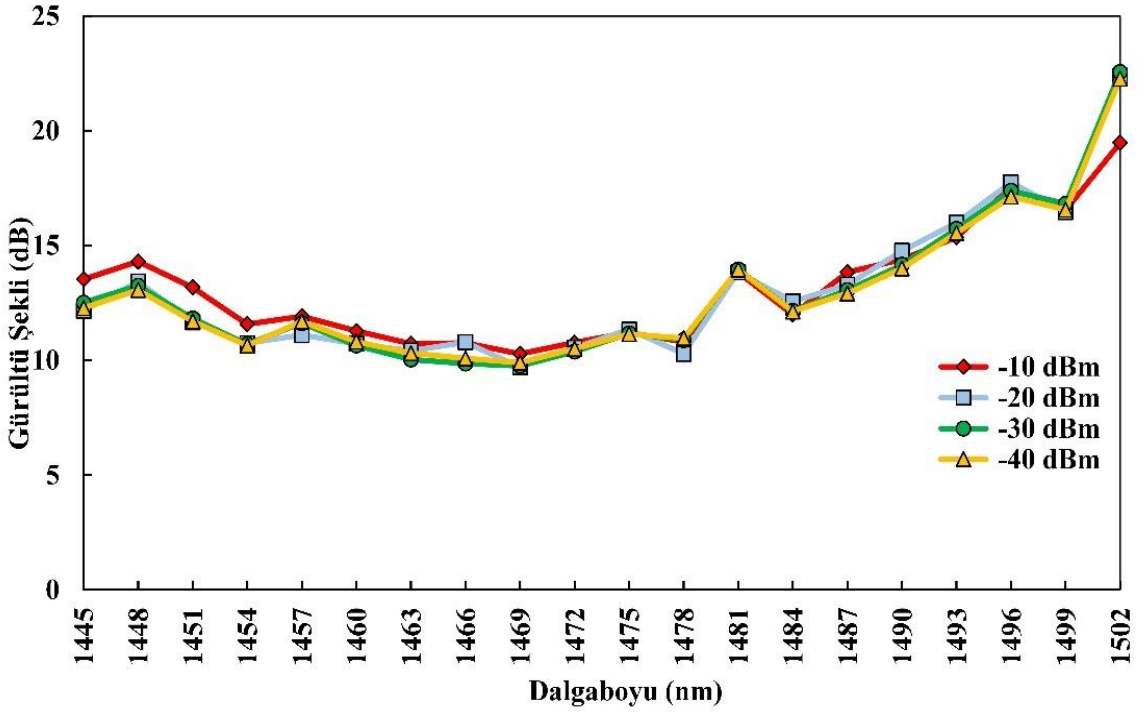
İAÜG-TKFY II performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

Giriş gücü etkisi ve seçimi

Şekil 6.32'de görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -20 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişim çok az olmaktadır. Yükselteç, giriş gücü -20 dBm'de doyuma yakındır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan İAÜG-TKFY II konfigürasyonu için giriş gücü değeri -20 dBm alınmıştır. Şekil 6.33 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 10-13 dB arasında seyrederken, 1478-1499 nm dalgaboyu aralığında 4-5 dB daha yükselmektedir. Gürültü şekli değeri -10 dBm giriş gücü için yüksek seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli değerleri birbirine cok yakın ve nispeten daha düşüktür.



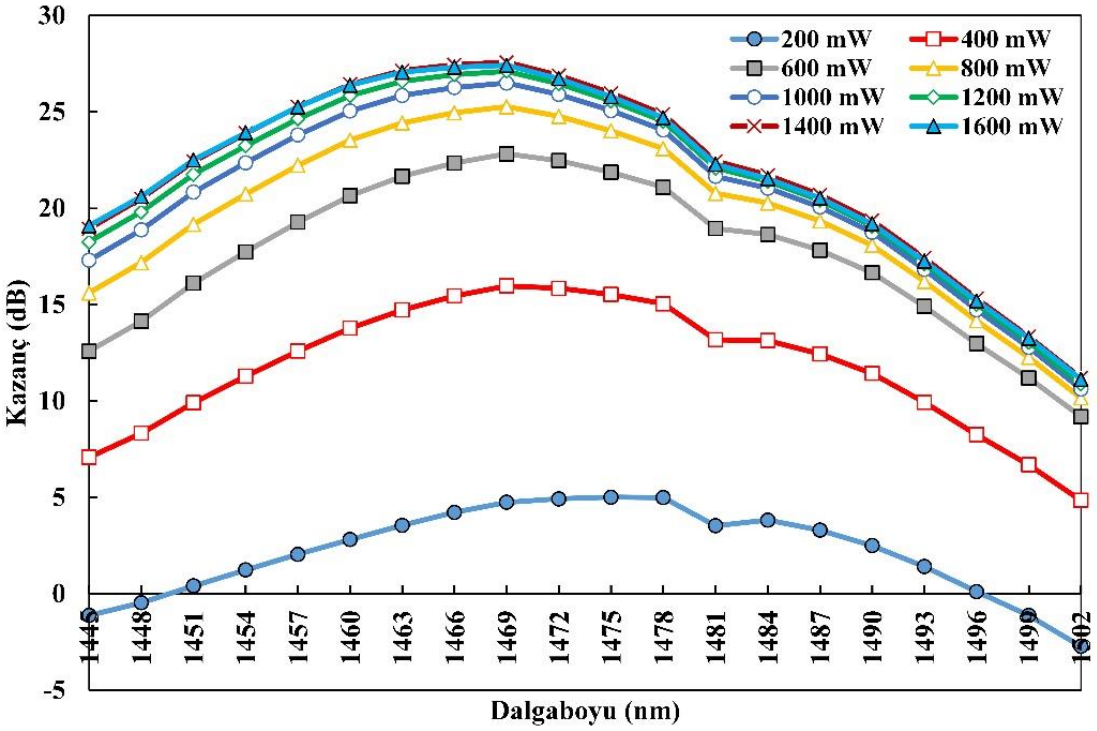
Şekil 6.32. İAÜG-TKFY II için giriş gücü-kazanç değişimi



Şekil 6.33. İAÜG-TKFY II için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

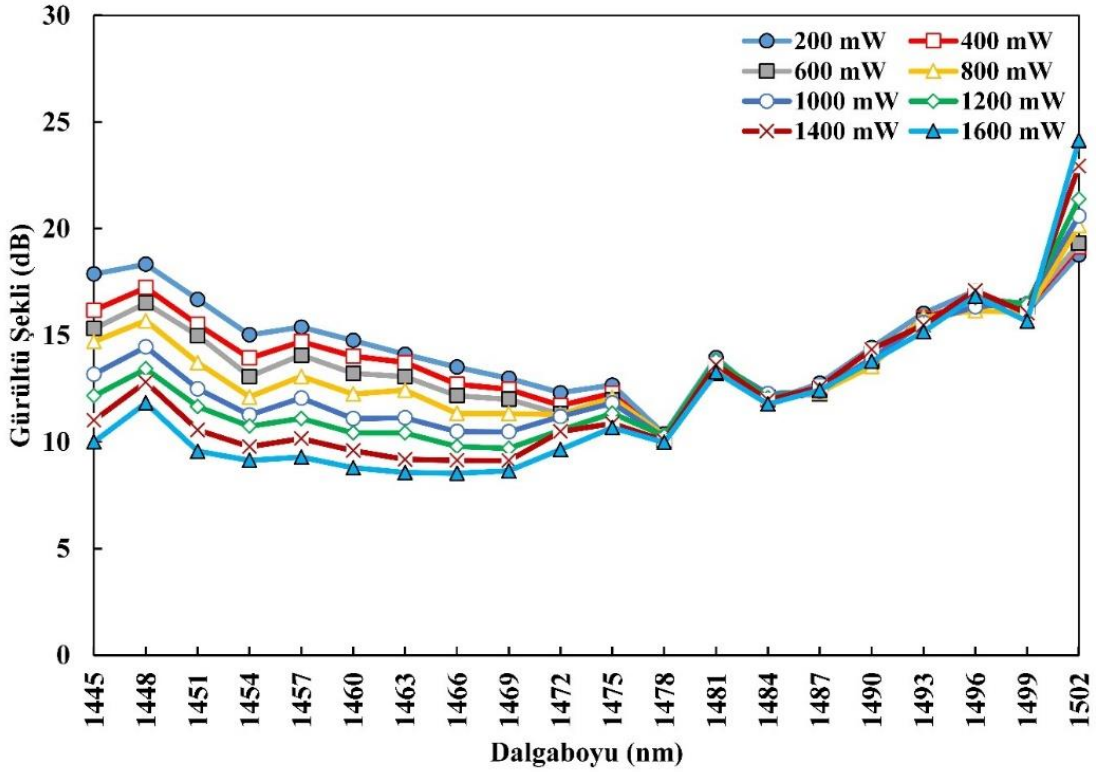
Pompa gücü optimizasyonu

Pompa gücü optimizasyonunda -20 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 1600 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.34 incelendiğinde 1400 mW pompa gücünden sonra İAÜG-TKFY II'nin doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1400 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.34. İAÜG-TKFY II için pompa gücü-kazanç değişim grafiği

Şekil 6.35'te 200-1600 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline neden olmaktadır. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1400 mW pompa gücünün gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. Bu pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 9-10 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 7-8 dB daha yükselmektedir.

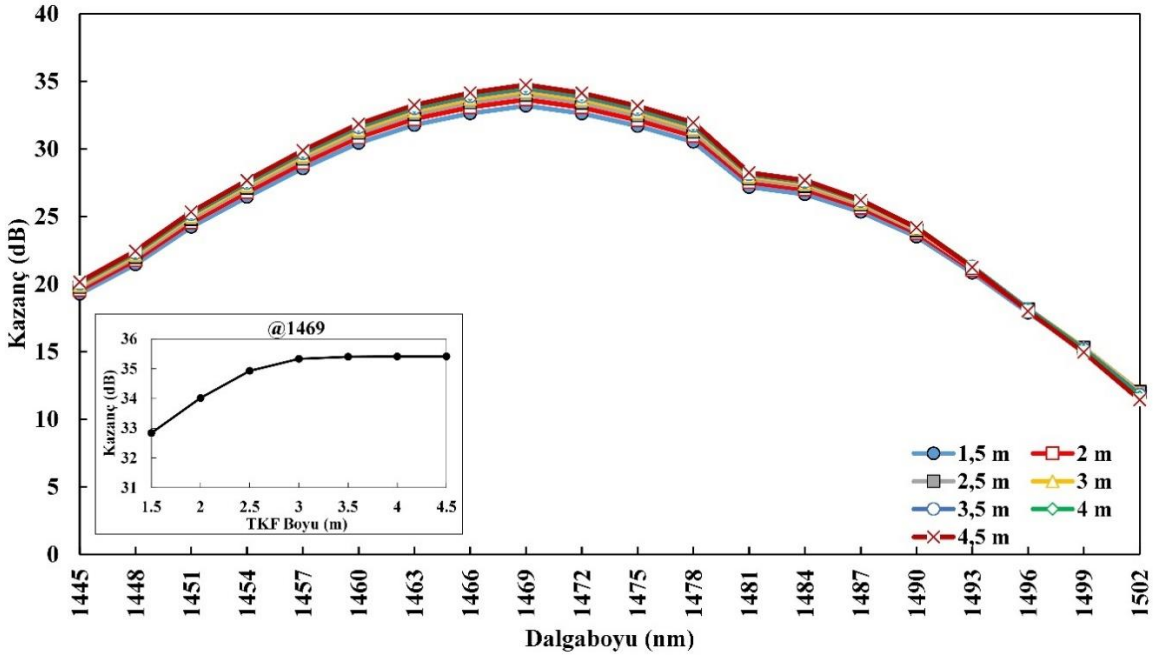


Şekil 6.35. İAÜG-TKFY II için pompa gücü- gürültü şekli değişimi

TKF boyu optimizasyonu

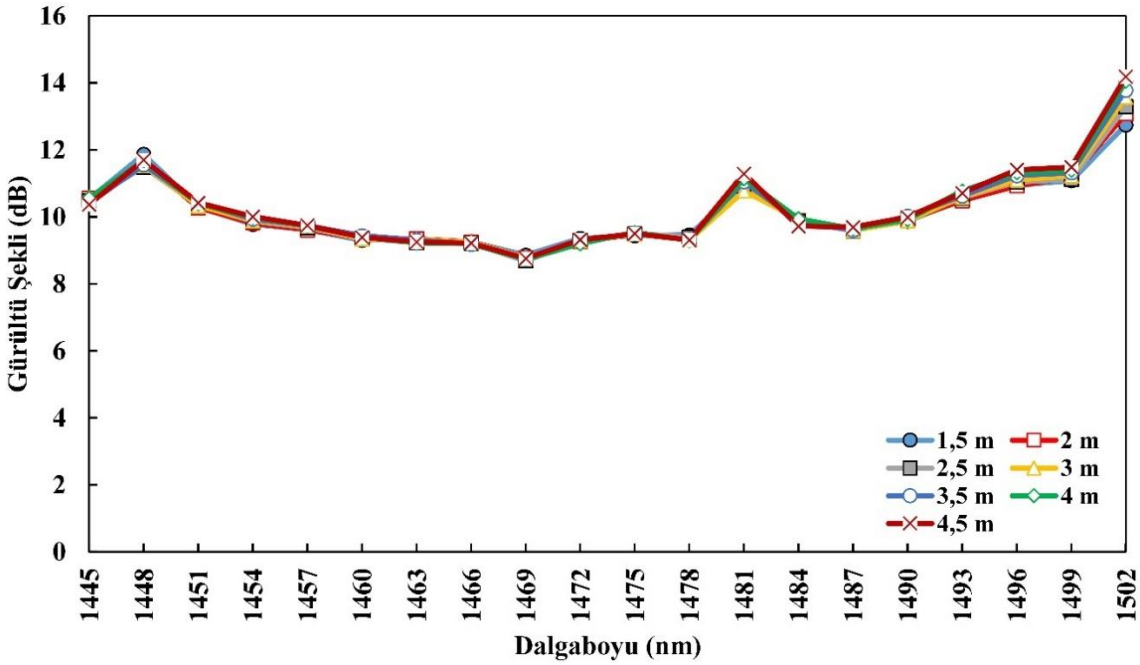
İAÜG-TKFY II optimizasyon çalışmalarında elde edilen -20 dBm giriş gücü ve 1400 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1 ve TKF 2 boyları optimize edilmiştir. TKF 1 boyu Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 11 m'dir.

Daha sonra TKF 1 boyu 11 m alınarak TKF 2 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 2 boyu 1,5 – 4,5 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.36 ve 6.37'deki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.36'da TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.37'de ise TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.36. İAÜG-TKFY II için TKF boyu-kazanç değişimi

TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği incelendiğinde, TKF 2 boyunun artması ile kazaç değeri de arttığı görülmektedir. Fakat fiber boyu 3 m uzunluğundan sonra kazanç artışı çok az değişmiştir. Bu nedenle TKF 2 için 3 m yeterli görülmüştür. TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği incelendiğinde ise tüm fiber boyları için gürültü değerleri yaklaşık 10 dB olup birbirine yakın olduğu görülmektedir.



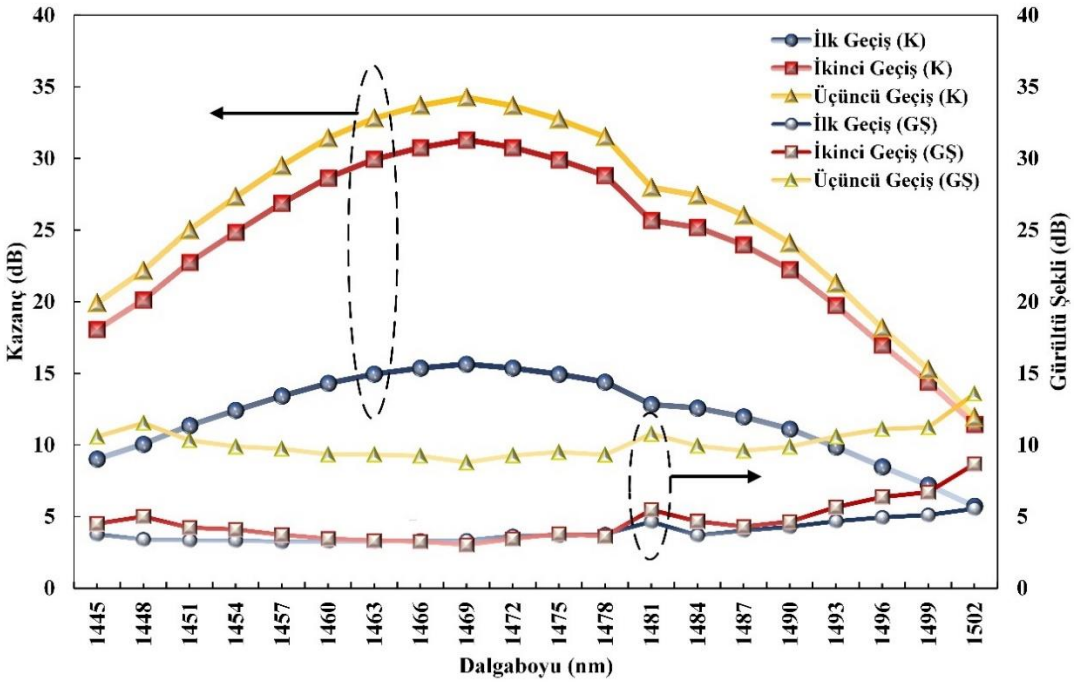
Şekil 6.37. İAÜG-TKFY II için TKF boyu-gürültü şekli değişimi

Optimize edilmiş İAÜG-TKFY II

İAÜG-TKFY II üzerine yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.7'de gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen İAÜG-TKFY II'nin ilk, ikinci ve üçüncü geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.38'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.7. İAÜG-TKFY II için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
İAÜG-TKFY II	-20	1400	11 + 3	34,27	8,78



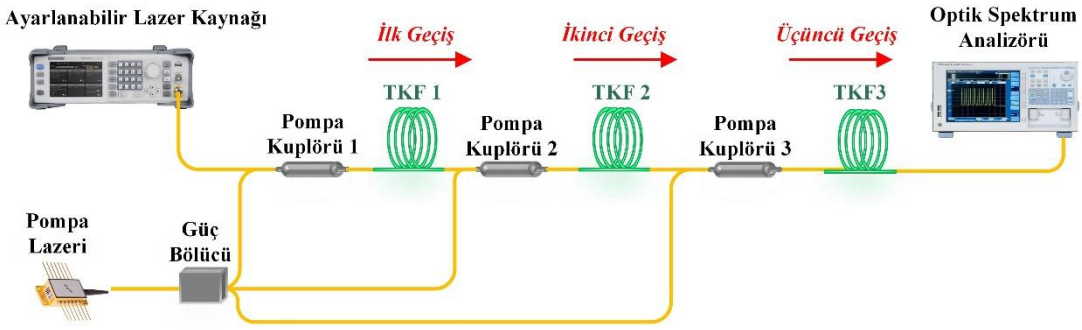
Şekil 6.38. İAÜG-TKFY II konfigürasyonunun her üç geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

Şekil 6.38'de görüldüğü gibi ilk geçişte 1469 nm dalgaboyundaki sinyal baz alındığında kazanç değeri 15,6 dB civarında iken, ikinci geçişte kazanç değeri 31,3 dB'dir. Üçüncü geçiş sonunda ise 34,3 dB'ye yükselmektedir. Bu da kazanç değerinin ikinci geçişte (ilk geçişe göre) %100,6 arttığını, üçüncü geçişte ise (ikinci geçişe göre) %9,6 arttığını göstermektedir.

Gürültü şekli değerleri incelendiğinde ise, ilk iki geçiş arasında değerlerin biribirine çok yakın ve 3-5 dB civarında olduğu görülürken, üçüncü geçişte gürültü şekli değerleri 9-11 aralığına yükselmektedir.

6.3.3. Üç aşamalı üç geçişli TKFY

Şekil 6.39'da üç aşamalı üç geçişli (ÜAÜG) TKFY tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, üç farklı TKF'den oluşan ve üç adet tek geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. TKF 1'den geçerek yükseltilen sinyal, TKF 2 ve TKF3'ten de geçerek üç defa yükseltme işlemine uğramaktadır. Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile üçe ayrılarak paylaştırılmaktadır. Bu konfigürasyon ile pompa gücünün verimli kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.



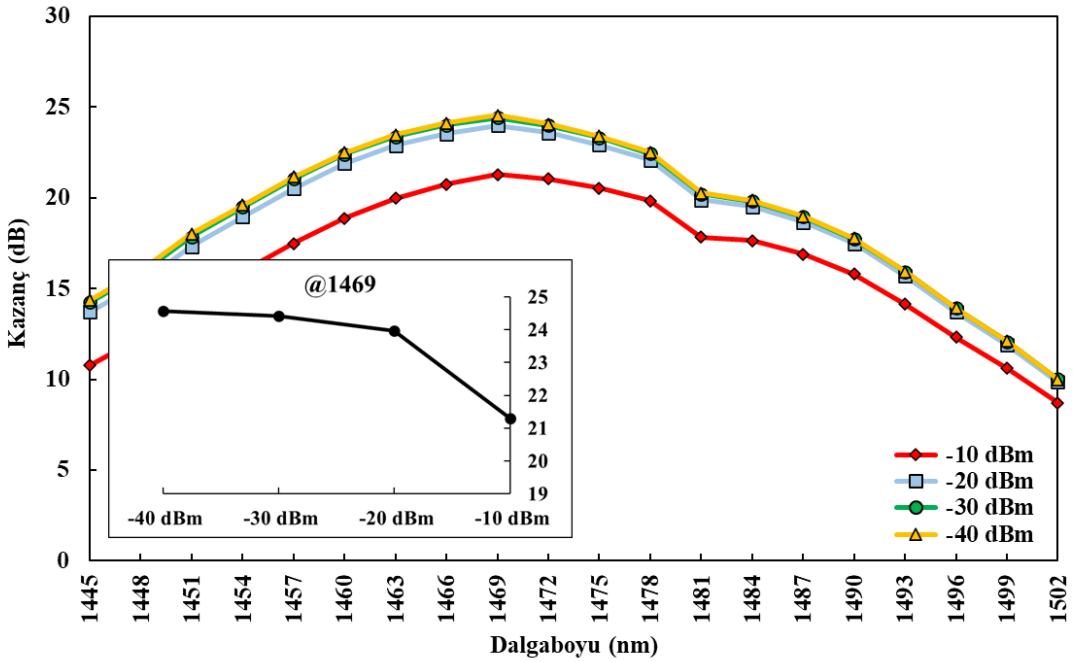
Şekil 6.39. Üç aşamalı üç geçişli TKFY

ÜAÜG-TKFY performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

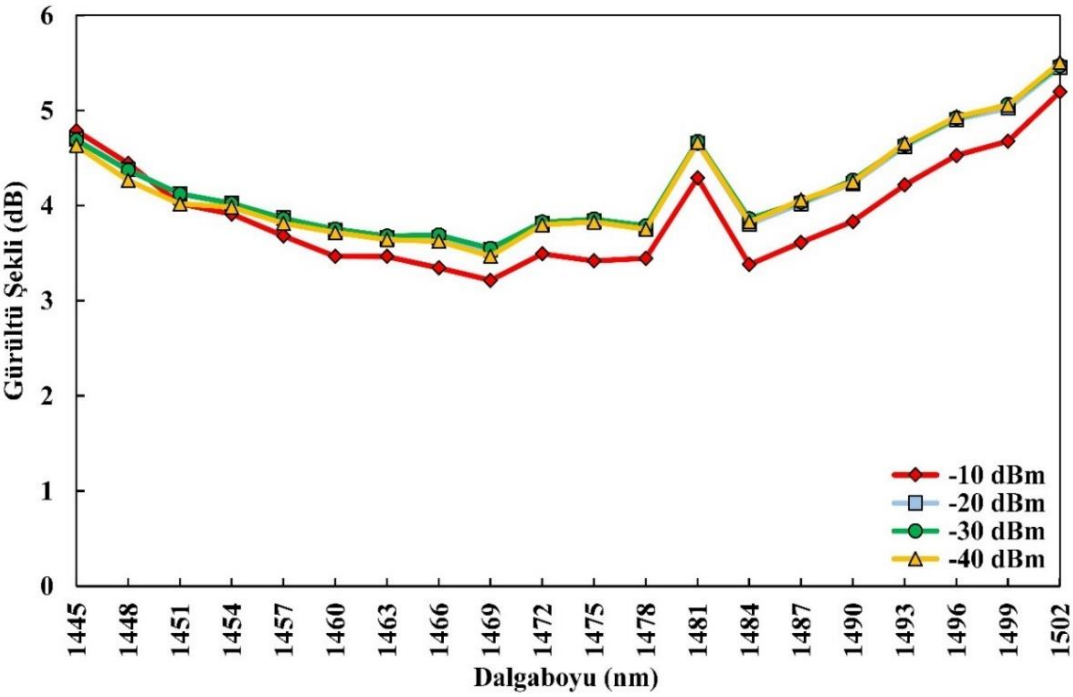
Giriş gücünün etkisi ve seçimi

Şekil 6.40'ta görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -20 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi çok az olmaktadır. Yükselteç, giriş gücü -20 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan ÜAÜG-TKFY konfigürasyonu için giriş gücü değeri -20 dBm alınmıştır. Şekil 6.41 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 3,5-5,5 dB aralığında değiştiği

görülmektedir. Gürültü şekli, -10 dBm giriş gücü için düşük seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli birbirine cok yakın ve nispeten daha yüksektir.



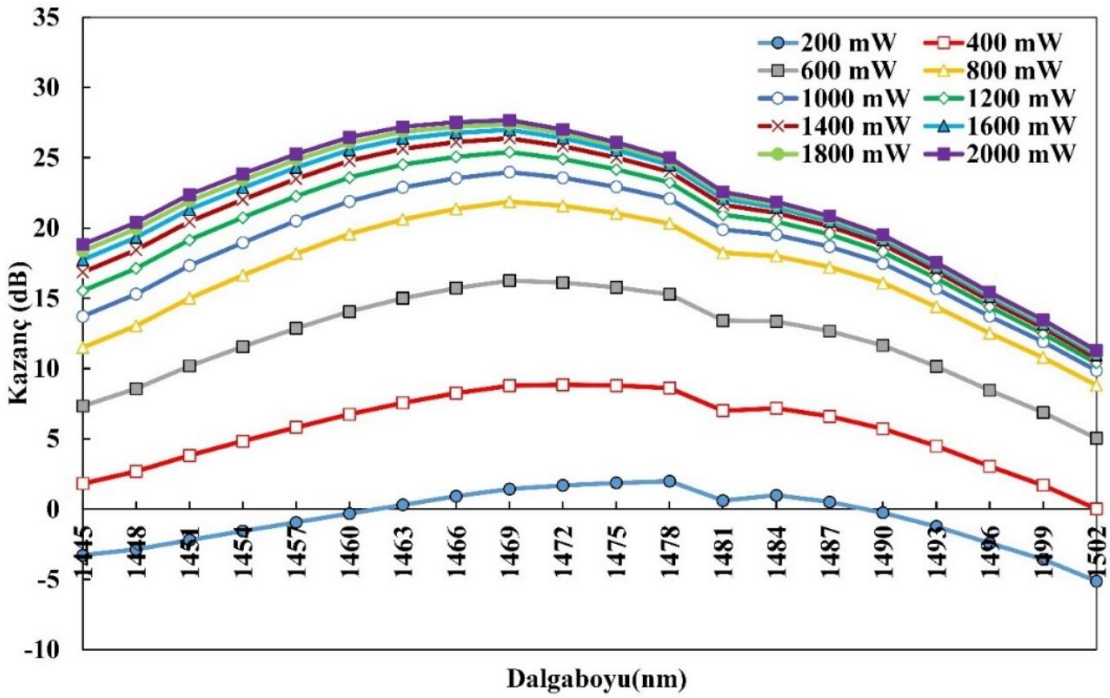
Şekil 6.40. ÜAÜG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi



Şekil 6.41. ÜAÜG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

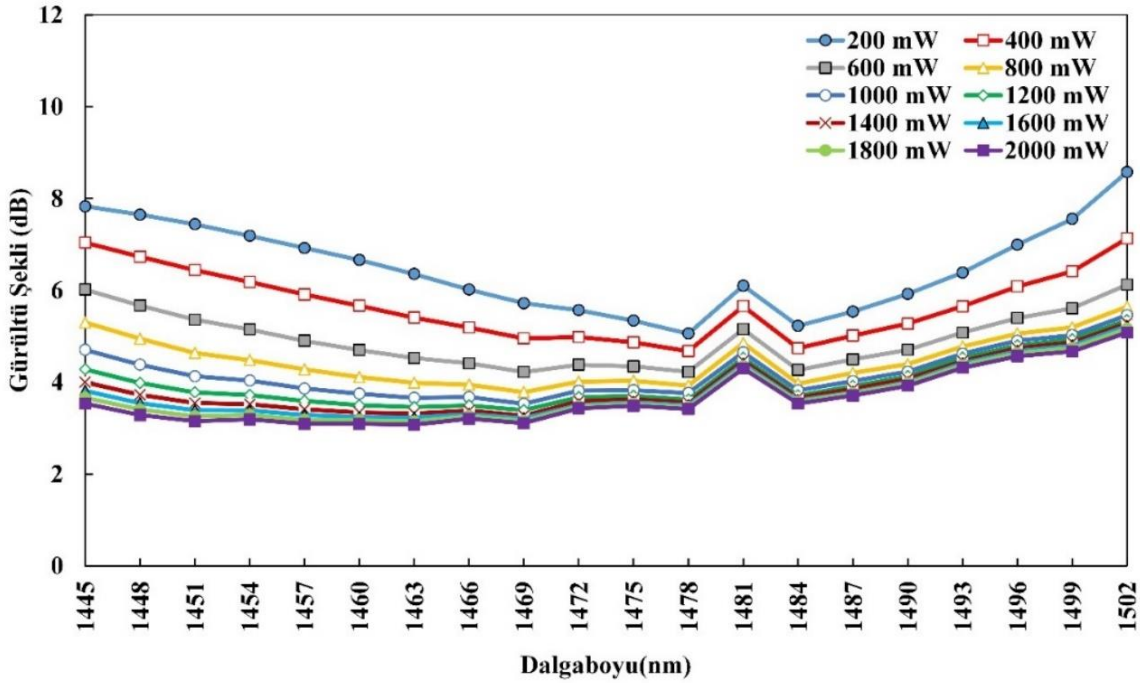
Pompa gücü optimizasyonu

Pompa gücü optimizasyonunda -20 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 2000 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.42 incelendiğinde 1800 mW pompa gücünden sonra ÜAÜG-TKFY'nin doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1800 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.42. ÜAÜG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi

Şekil 6.43'te 200-2000 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline sahiptir. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1800 mW pompa gücünün gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. Bu pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 3,5-4 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 4-4,5 dB aralığında bulunmaktadır.

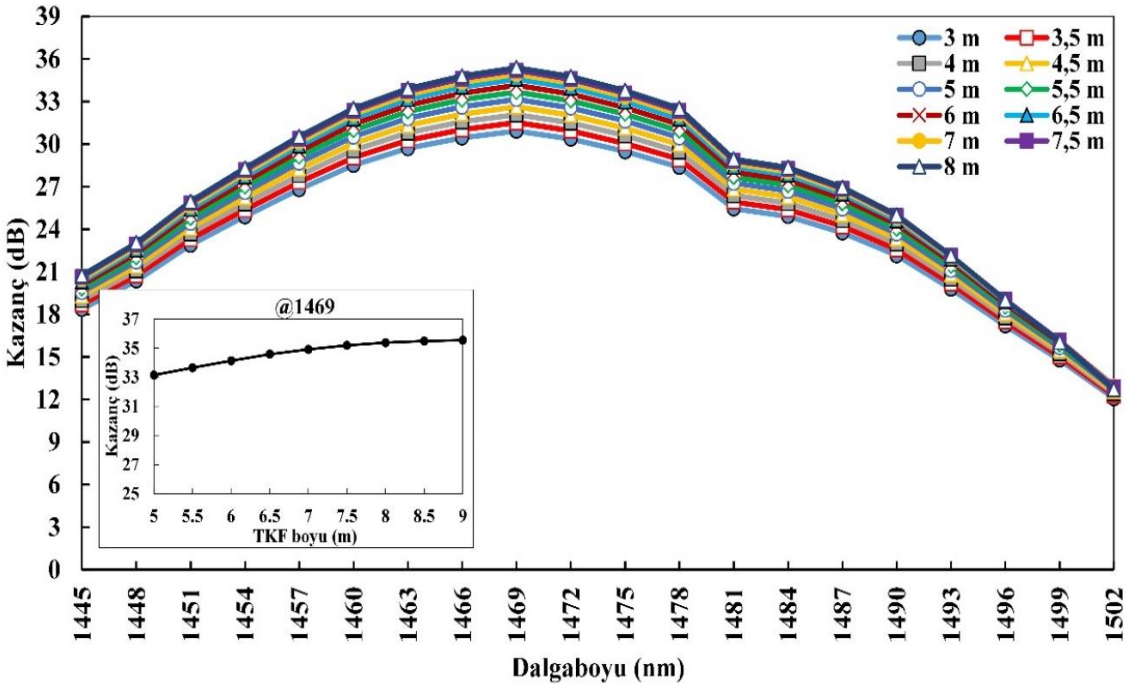


Şekil 6.43. ÜAÜG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi

TKF boyu optimizasyonu

ÜAÜG-TKFY optimizasyon çalışmalarında elde edilen -20 dBm giriş gücü ve 1800 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1, TKF 2 ve TKF 3 boyları optimize edilmiştir. Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 ve TKF 2 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 7,5 m ve TKF 2 değeri ise 9,5 m'dir.

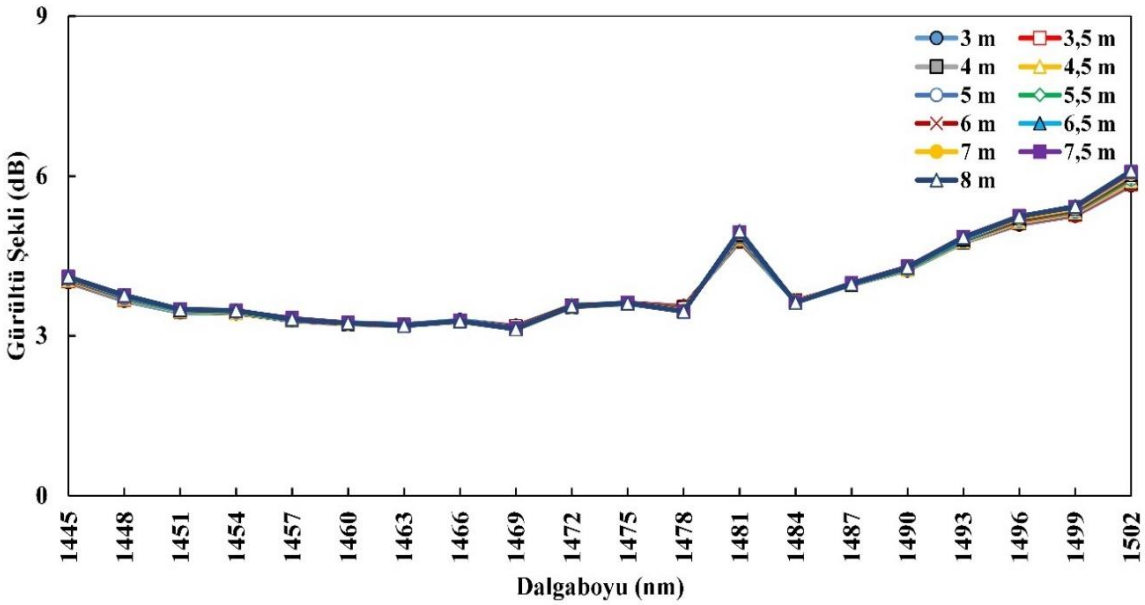
Daha sonra TKF 1 ve TKF 2 boyları 7,5 m ve 9,5 m alınarak TKF 3 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 3 boyu 3 – 8 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.44 ve 6.45'teki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.44'te TKF 3 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.45'te ise TKF 3 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.44. ÜAÜG-TKFY için TKF 2 boyu-kazanç değişimi

TKF 3 boyu-kazanç değişim grafiği incelendiğinde, kazanç artımı için TKF boyları uzadıkça artmaktadır. Fiber boyu 7,5 m olduktan sonra ise yükselteç doyuma ulaştığı için kazanç artışı hemen hemen durmaktadır. Bu nedenle TKF 3 için 7,5 m yeterli görülmüştür.

TKF 3 boyu-gürültü şekli grafiği incelendiğinde ise tüm fiber boyları için gürültü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. 1445-1481 nm band aralığında yüksek kazanç değerleri elde edilirken, bu aralığın gürültü şekli de diğer bölgeye göre daha düşük seyretmektedir. Bu aralıktaki gürültü şekli değeri 3,5-4 dB aralığında değişmektedir. 1481 nm dalgaboyundan sonra ise gürültü şekli yükselmektedir.



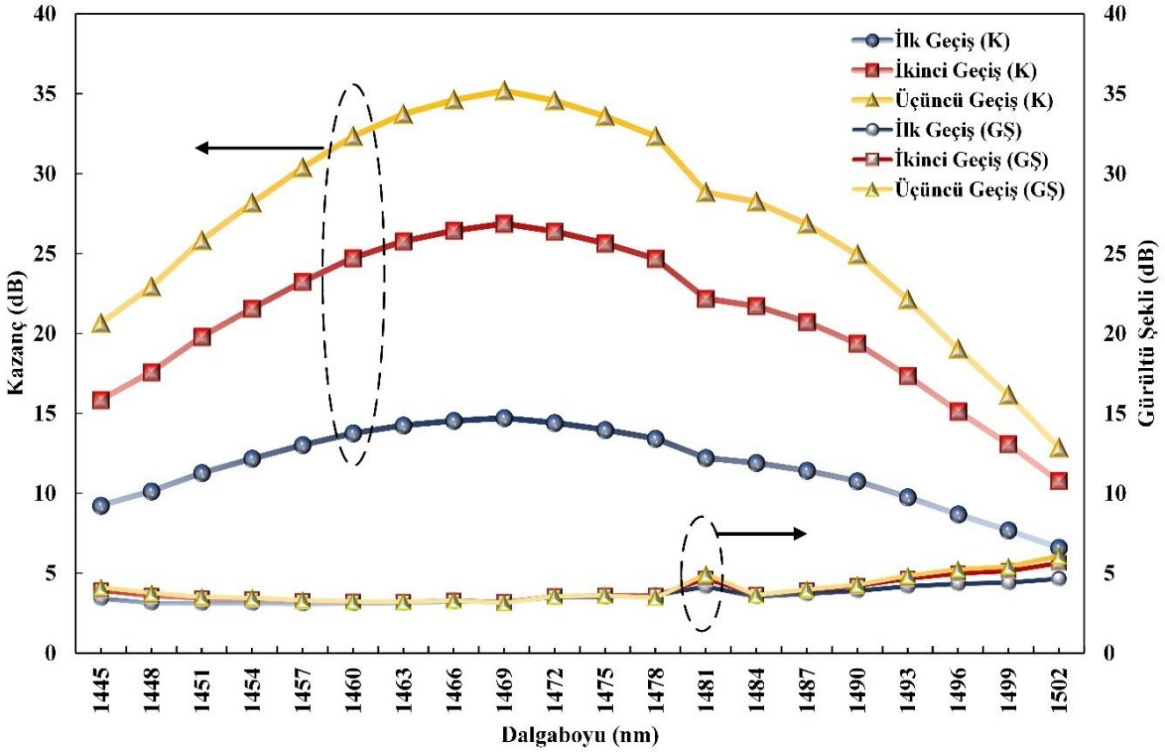
Şekil 6.45. ÜAÜG-TKFY için TKF 2 boyu-gürültü şekli değişimi

Optimize edilmiş ÜAÜG-TKFY

ÜAÜG-TKFY üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.8'de gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen ÜAÜG-TKFY'nin ilk, ikinci ve üçüncü geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.46'da gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.8. ÜAÜG-TKFY için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2+TKF3 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
ÜAÜG-TKFY	-20	1800	7,5+9,5+7,5	35,18	3,12



Şekil 6.46. ÜAÜG-TKFY konfigürasyonunun her iki geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

Şekil 6.46'da görüldüğü gibi ilk geçişte 1469 nm dalgaboyundaki sinyal baz alındığında kazanç değeri 14,7 dB civarında iken, ikinci geçişte kazanç değeri 26,9 dB'dir. Üçüncü geçiş sonunda ise 35,9 dB'ye yükselmektedir. Bu da kazanç değerinin ikinci geçişte (ilk geçişe göre) %82,9 arttığını, üçüncü geçişte ise (ikinci geçişe göre) %33 arttığını göstermektedir. Gürültü şekli değerleri incelendiğinde ise, üç geçişte de değerlerin birbirine çok yakın ve 3-6 dB civarında olduğu görülmektedir.

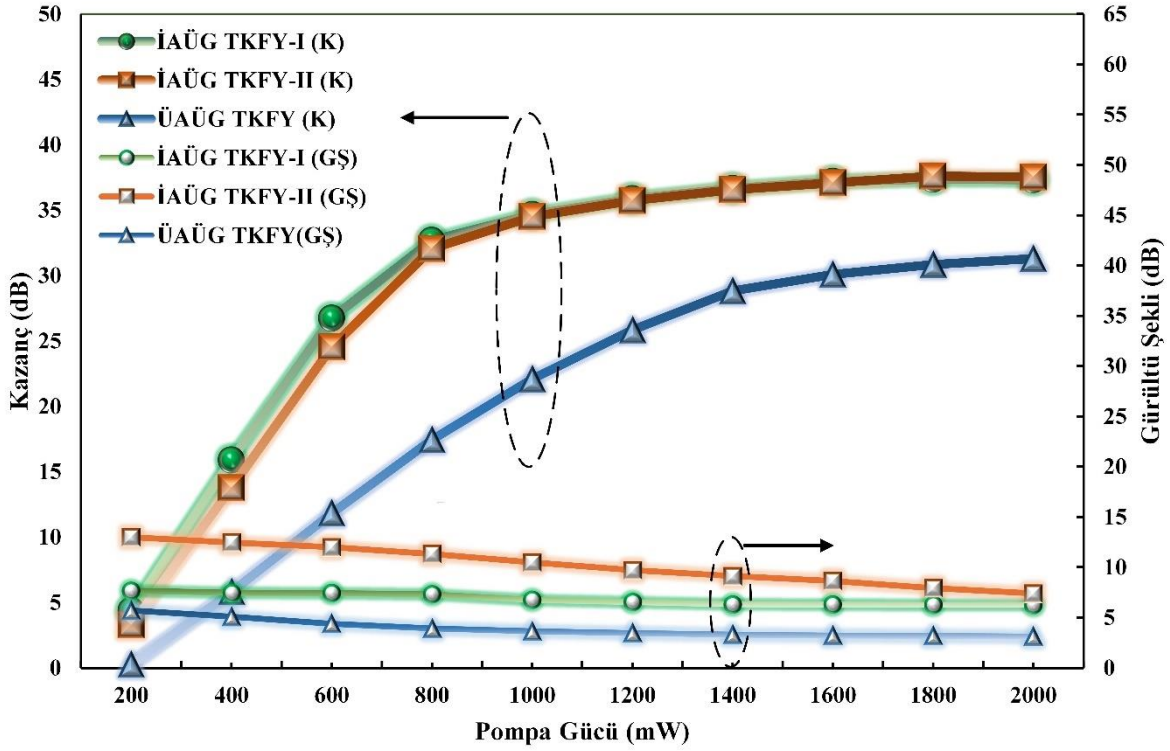
6.3.4. Üç geçişli TKFY konfigürasyonlarının karşılaştırılması

İAÜG-TKFY I, İAÜG-TKFY II ve ÜAÜG-TKFY konfigürasyonları, kendi içinde ayrı ayrı optimizasyon yapılarak giriş gücü, pompa gücü ve TKF boylarının kazanç ve gürültü şekli üzerine etkisi incelenmiştir. Üç konfigürasyonda da en iyi performans farklı değerlerde elde edilmiştir ve bu değerler Çizelge 6.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.9. Üç Geçişli TKFY optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2+TKF3 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
İAÜG-TKFY I	-20	1200	9 + 7	33,23	6,68
İAÜG-TKFY II	-20	1400	11 + 3	34,27	8,78
ÜAÜG-TKFY	-20	1800	7,5+9,5+7,5	35,18	3,12

Bu üç tasarımı karşılaştırma yapmak için mümkün olduğunca benzer şartlarda çalıştırmak gerekmektedir. Bu nedenle -20 dBm giriş gücünde ve 1469 nm dalgaboyundaki giriş sinyali için İAÜG-TKFY I ve İAÜG-TKFY II konfigürasyonları için 7,5+7,5 m TKF ve ÜAÜG-TKFY için de 5+5+5 m TKF kullanılarak çalıştırılmış, 200 mW dan başlayarak artan giriş güçlerinde her üç düzeneğinde performansı incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak Şekil 6.47'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 6.47. İAÜG-TKFY I, İAÜG-TKFY II ve ÜAÜG-TKFY tasarımlarının kazanç ve gürültü şekli karşılaştırması

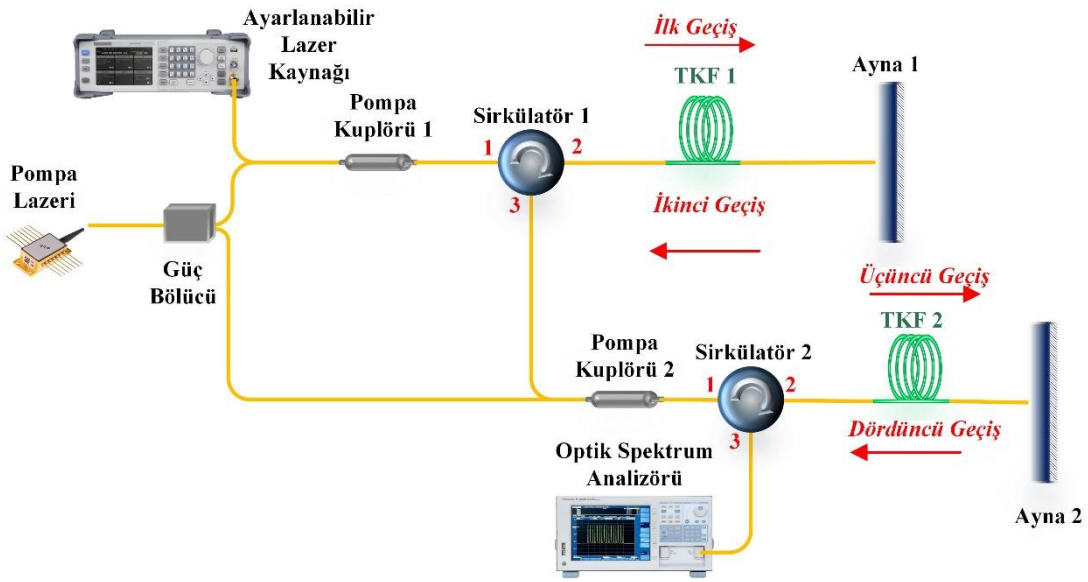
Grafik incelendiğinde benzer koşullarda ÜAÜG-TKFY konfigürasyonunun kazanç değerleri diğer iki konfigürasyona göre düşüktür. Bununla beraber gürültü şekli de diğer iki

konfigürasyona kıyasla oldukça düşüktür. Pompa gücü 2000 mW olduğunda artık kazanç artışı giderek düşmektedir. Bu da yükseltecin yavaş yavaş doyuma yaklaştığını göstermektedir. İAÜG-TKFY I ve II konfigürasyonlarında kazanç artışı 1600 mW pompa gücünden sonra durmuştur. Bu iki tasarımda yükselteçlerin 1600 mW pompa gücünde doyuma ulaştığı söylenebilir. İlk iki konfigürasyonda kazanç değerleri yaklaşık olarak benzer iken, İAÜG-TKFY II konfigürasyonunun gürültü değeri, İAÜG-TKFY I konfigürasyonundan 3-5 dB daha fazladır. Bu nedenle, üç geçişli TKFY çalışmalarında en iyi performans İAÜG-TKFY I'e attir ve en verimli konfigürasyon tipi bu kategoride ÇG-TKFY olarak belirlenmiştir.

6.4. Dört Geçişli TKFY Çalışması

6.4.1. İki aşamalı dört geçişli TKFY

Şekil 6.48'de iki aşamalı dört geçişli (İADG) TKFY tasarımı gösterilmektedir. İki adet TKF ve ayna kullanılarak, iki çift geçişli konfigürasyon birleştirilmiştir. İlk TKF'de birinci ve ikinci geçiş, ikinci TKF de ise üçüncü ve dördüncü geçiş gerçekleşmektedir. Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile ikiye ayrılarak eşit paylaştırılmaktadır.

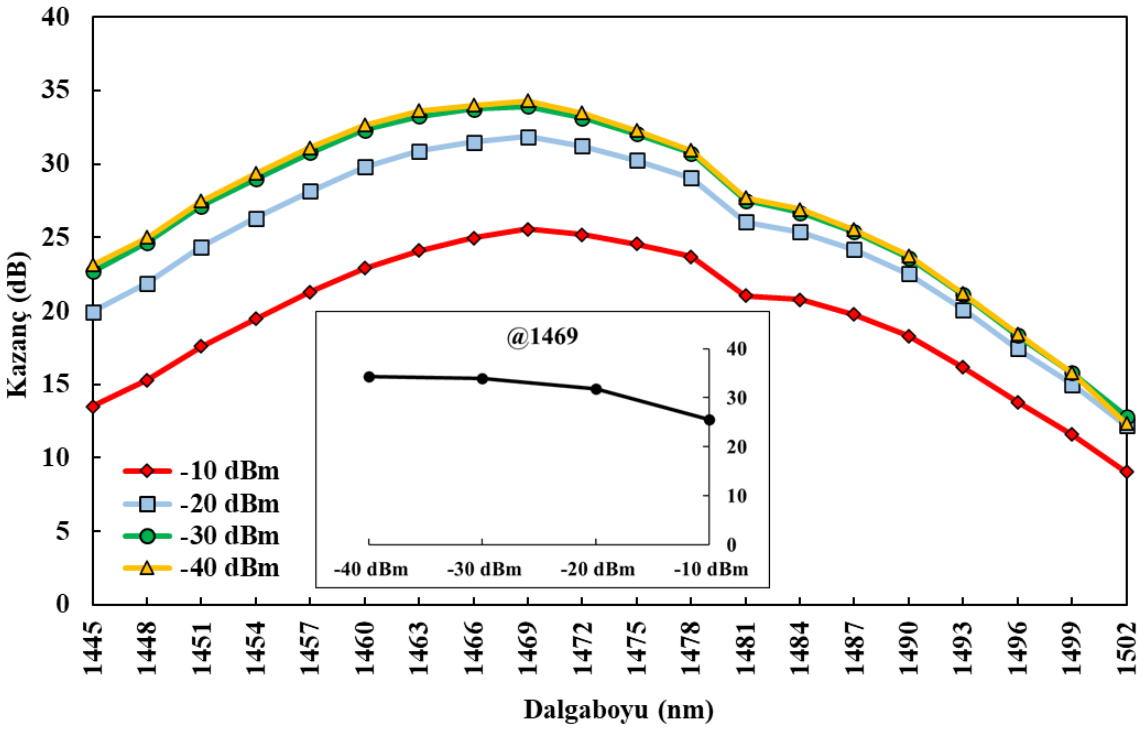


Şekil 6.48. İki aşamalı dört geçişli TKFY

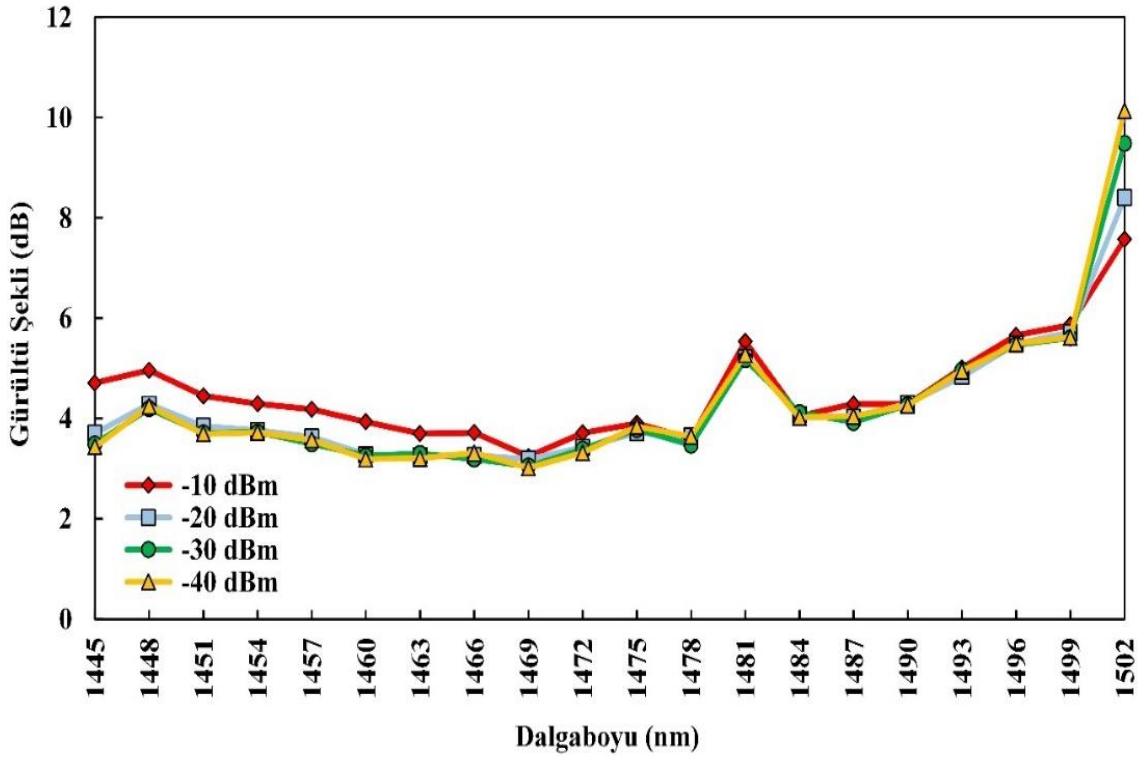
İADG-TKFY performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

Giriş gücünün etkisi ve seçimi

Şekil 6.49'da görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -30 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi olmamaktadır. Yükselteç, giriş gücü -30 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan İADG-TKFY konfigürasyonu için giriş gücü değeri -30 dBm alınmıştır. Şekil 6.50 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 4-6 dB aralığında değiştiği görülmektedir. Gürültü şekli, -10 dBm giriş gücü için yüksek seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli birbirine cok yakın ve nispeten daha düşüktür.



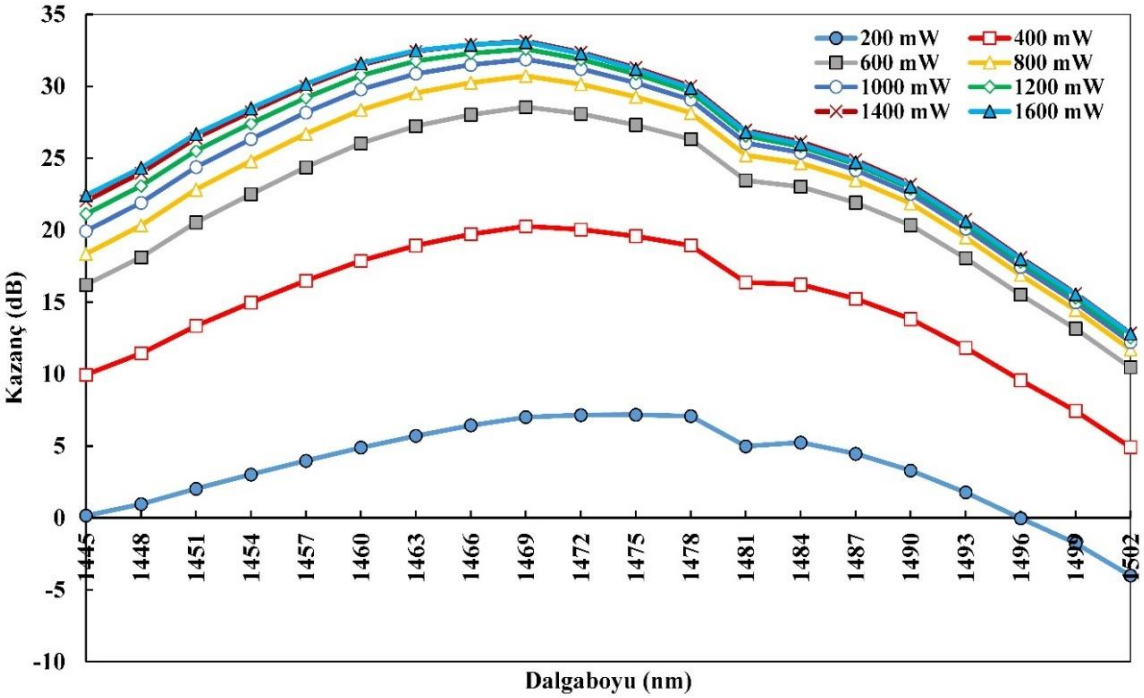
Şekil 6.49. İADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi



Şekil 6.50. İADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

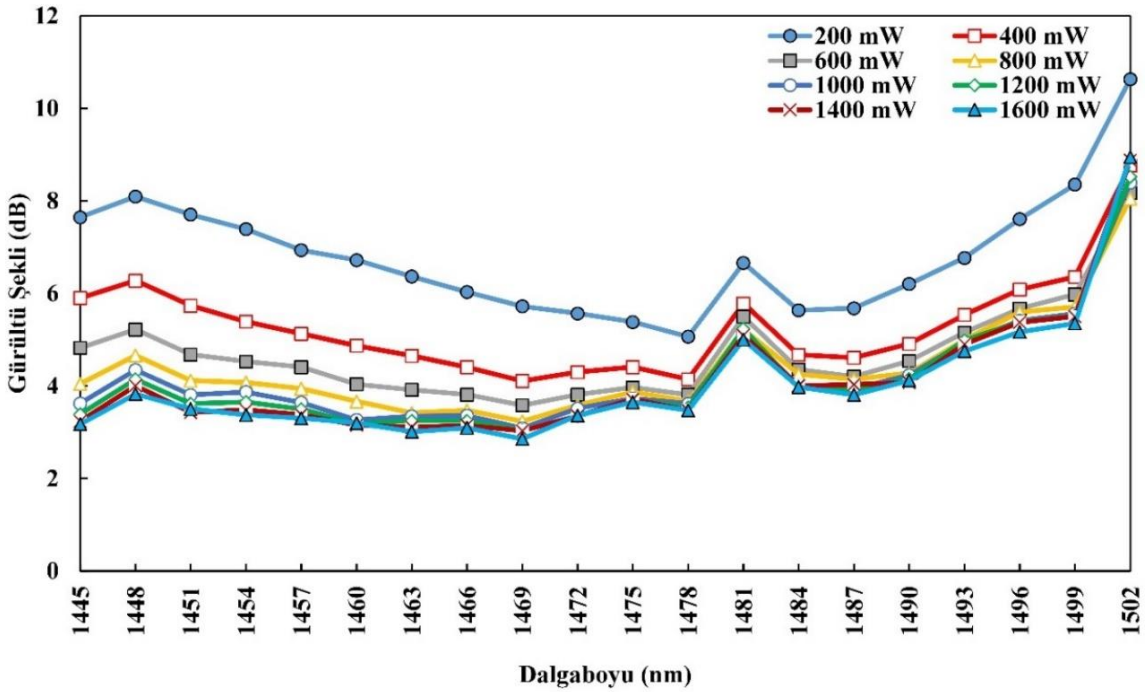
Pompa gücü optimizasyonu

Pompa gücü optimizasyonunda -30 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile1600 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.51 incelendiğinde 1400 mW pompa gücünden sonra İADG-TKFY'nin doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1400 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.51. İADG-TKFY için pompa gücü-kazanç değişimi

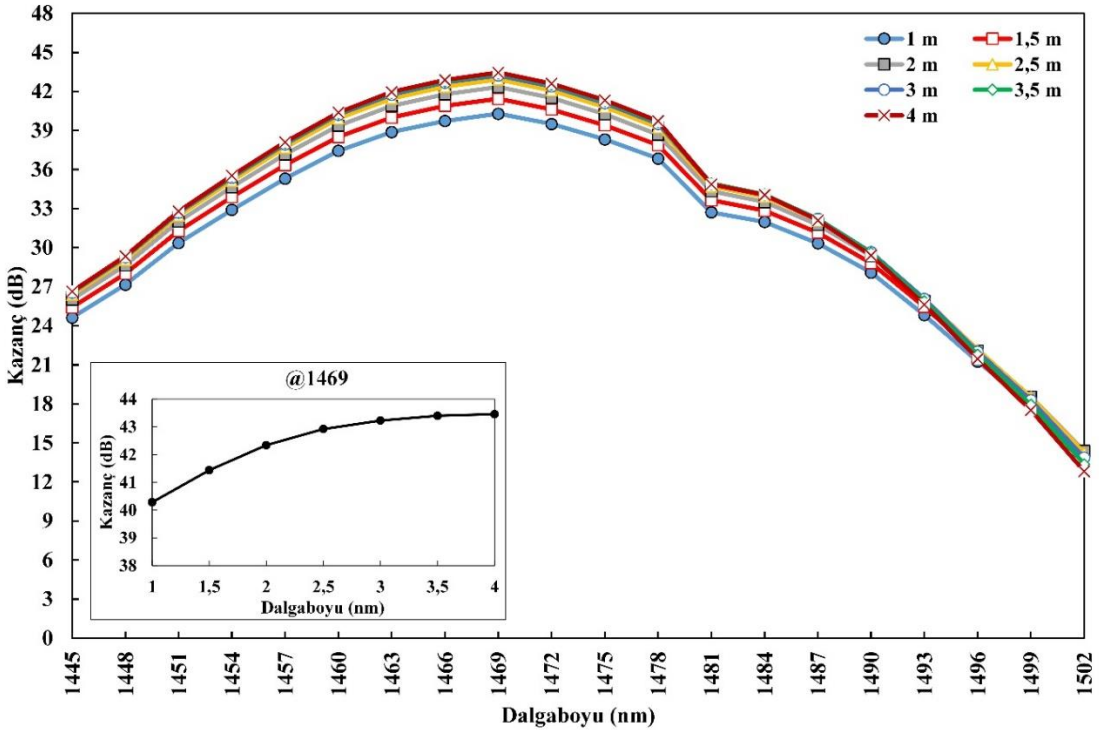
Şekil 6.52'de 200-1600 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline sahiptir. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 800 mW pompa gücünden yüksek olan pompa güçlerinde gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. 1400 pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 3-4 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 4-5 dB aralığında bulunmaktadır.



Şekil 6.52. İADG-TKFY için pompa gücü-gürültü şekli değişimi

TKF boyu optimizasyonu

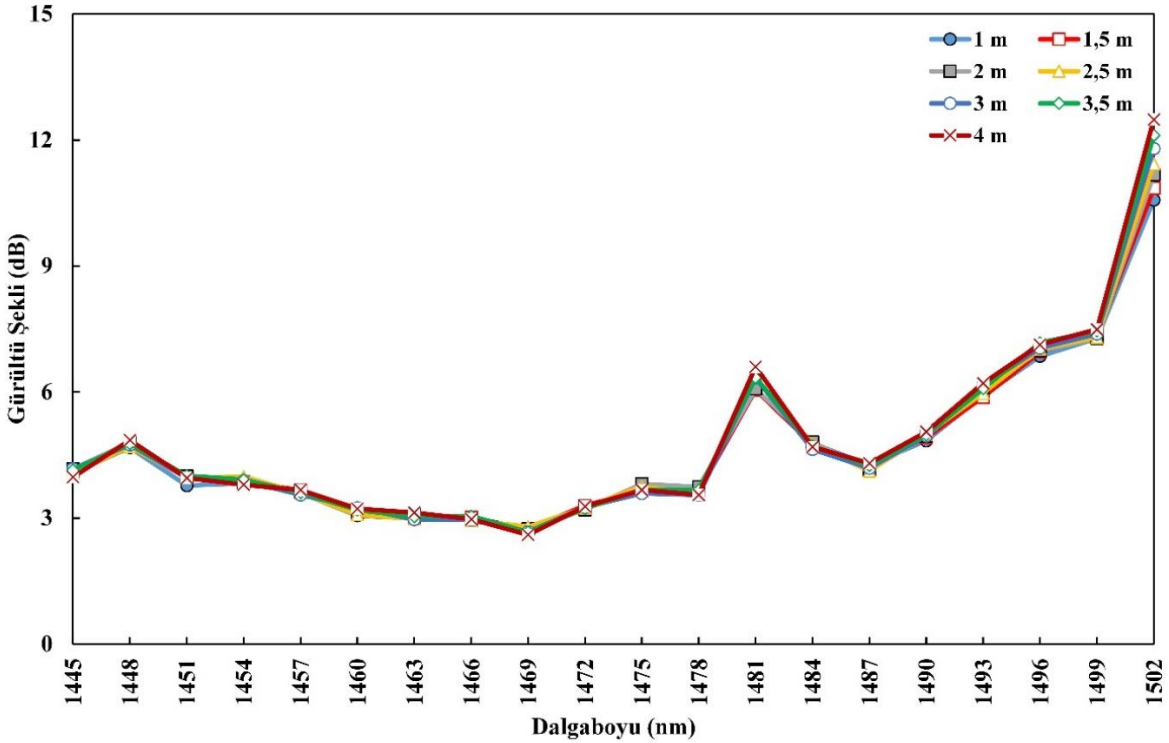
İADG-TKFY optimizasyon çalışmalarında elde edilen -30 dBm giriş gücü ve 1400 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1, TKF 2 ve TKF 3 boyları optimize edilmiştir. Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek ilk geçiş çıkış gücünü veren TKF 1 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 13 m'dir. Daha sonra TKF 1 boyu 13 m alınarak TKF 2 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 2 boyu 1 – 4 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.53 ve 6.54'teki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.53'te TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.54'te ise TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.53. İADG-TKFY için TKF boyu-kazanç değişimi

TKF 2 boyu-kazanç değişim grafiği incelendiğinde, kazanç artımı için TKF boyları uzadıkça artmaktadır. Fiber boyu 3,5 m olduktan sonra ise yükselteç doyuma ulaştığı için kazanç artışı durmaktadır. Bu nedenle TKF 2 için 3,5 m yeterli görülmüştür.

TKF 2 boyu-gürültü şekli grafiği incelendiğinde ise tüm fiber boyları için gürültü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. 1445-1481 nm band aralığında yüksek kazanç değerleri elde edilirken, bu aralığın gürültü şekli de diğer bölgeye göre daha düşük seyretmektedir. Bu aralıktaki gürültü şekli değeri 3-5 dB aralığında değişmektedir. 1481 nm dalgaboyundan sonra ise gürültü şekli giderek artmaktadır.



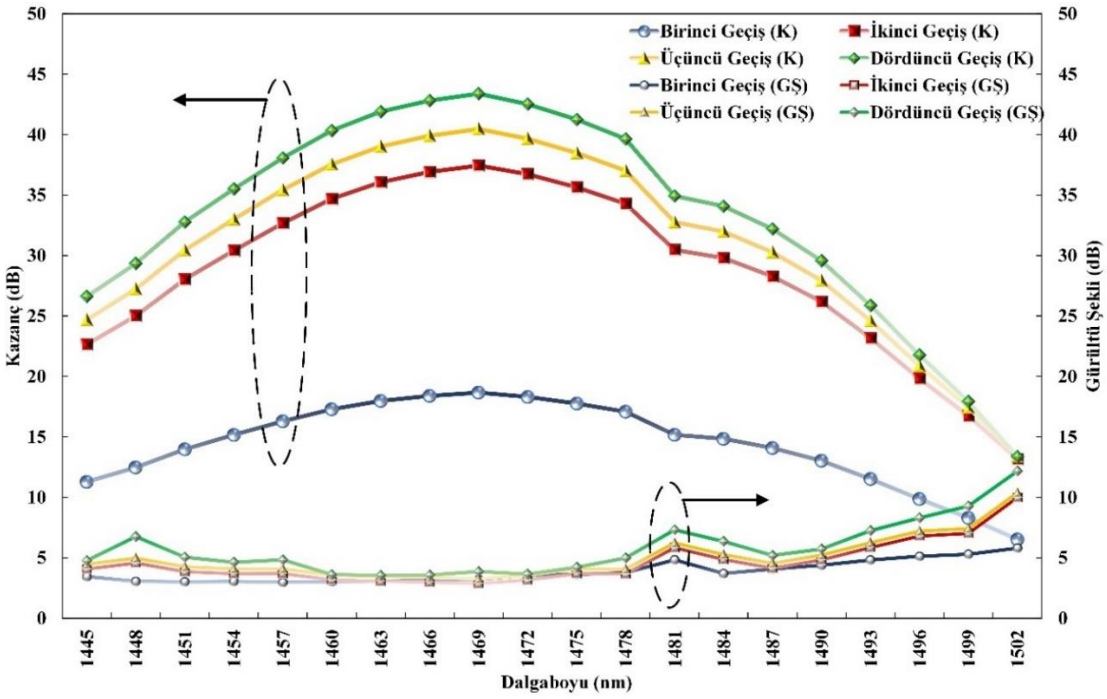
Şekil 6.54. İADG-TKFY için TKF boyu-gürültü şekli değişimi

Optimize edilmiş İADG-TKFY

İADG-TKFY üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.10'da gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen İADG-TKFY'nin ilk, ikinci, üçüncü ve dördüncü geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.55'te gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.10. İADG-TKFY için elde optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

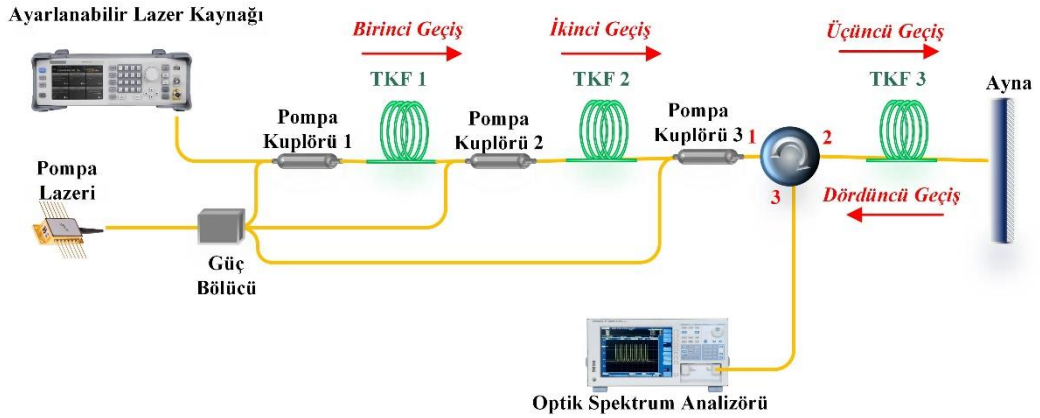
Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
İADG-TKFY	-30	1400	13 + 3,5	43,30	3,86



Şekil 6.55. İADG-TKFY konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

6.4.2. Üç aşamalı dört geçişli TKFY I

Şekil 6.56'da üç aşamalı dört geçişli (ÜADG) TKFY I tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, bu konfigürasyon iki adet tek geçişli ve bir adet çift geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile toplamda üç adet TKF kullanılarak oluşturulmuştur. TKF 1 ve TKF 2'den geçerek iki defa yükseltilen sinyal, ek olarak ayna yardımıyla yönlendirilmekte ve TKF 3'ten iki kere yükseltilerek toplamda dört yükseltme işlemine uğramaktadır Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile dörde ayrılarak paylaştırılmaktadır.

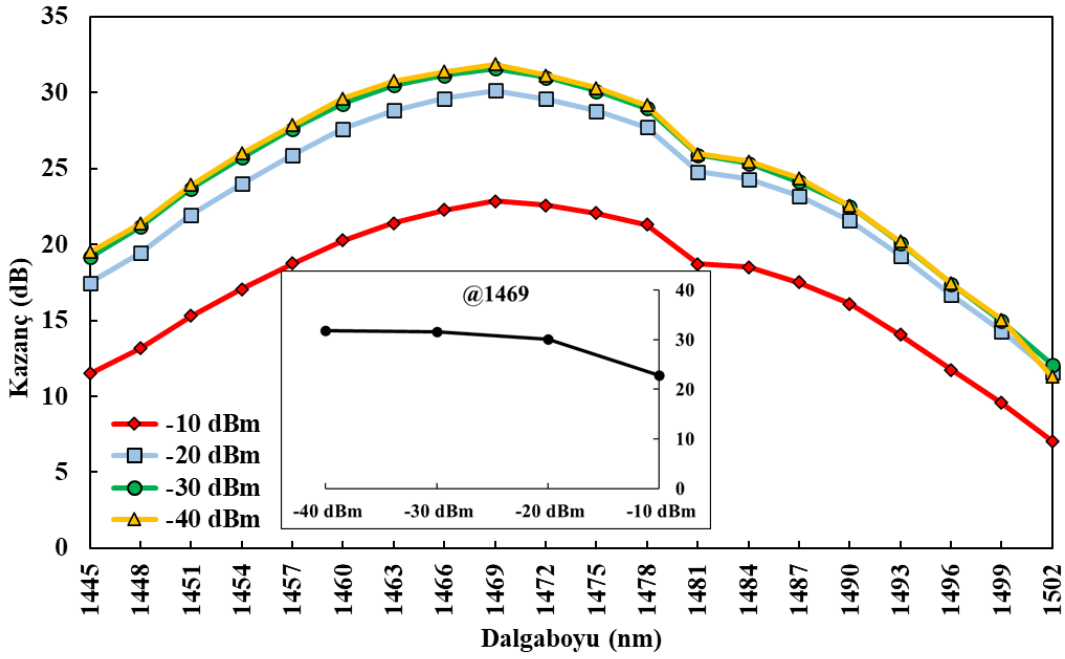


Şekil 6.56. Üç aşamalı dört geçişli TKFY

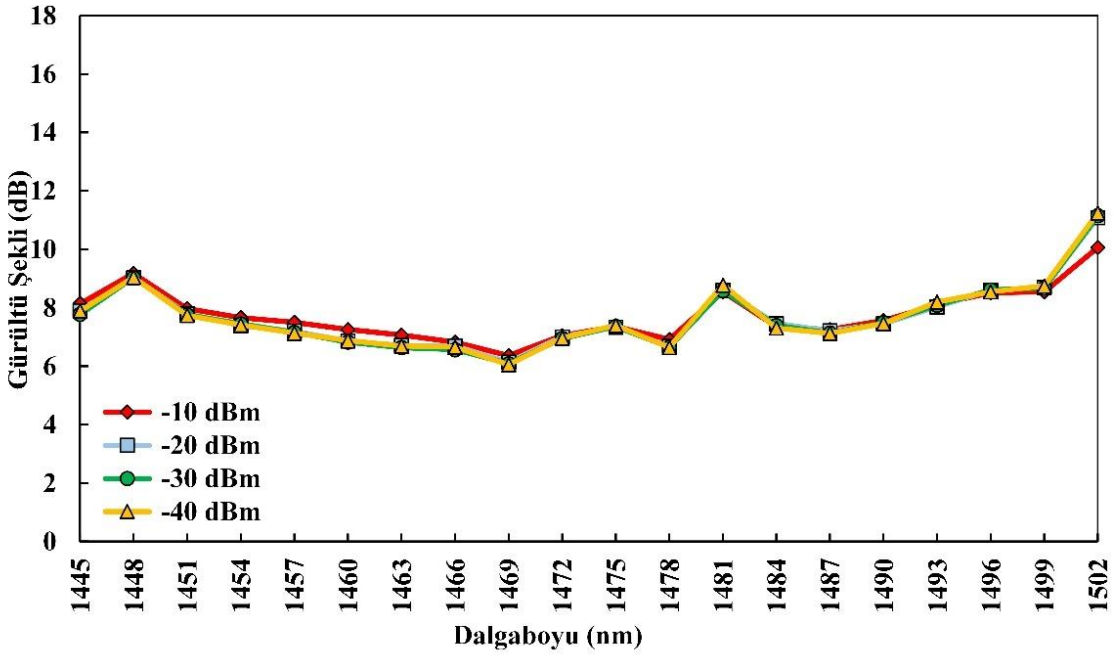
ÜADG-TKFY I performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

Giriş gücünün etkisi ve seçimi

Şekil 6.57'de görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -30 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi olmamaktadır. Yükselteç, giriş gücü -30 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan ÜADG-TKFY I konfigürasyonu için giriş gücü değeri -30 dBm alınmıştır. Şekil 6.58 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 6-10 dB aralığında değiştiği görülmektedir. Gürültü şekli, -10 dBm giriş gücü için nispeten yüksek seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli birbirine cok yakın ve daha düşüktür.



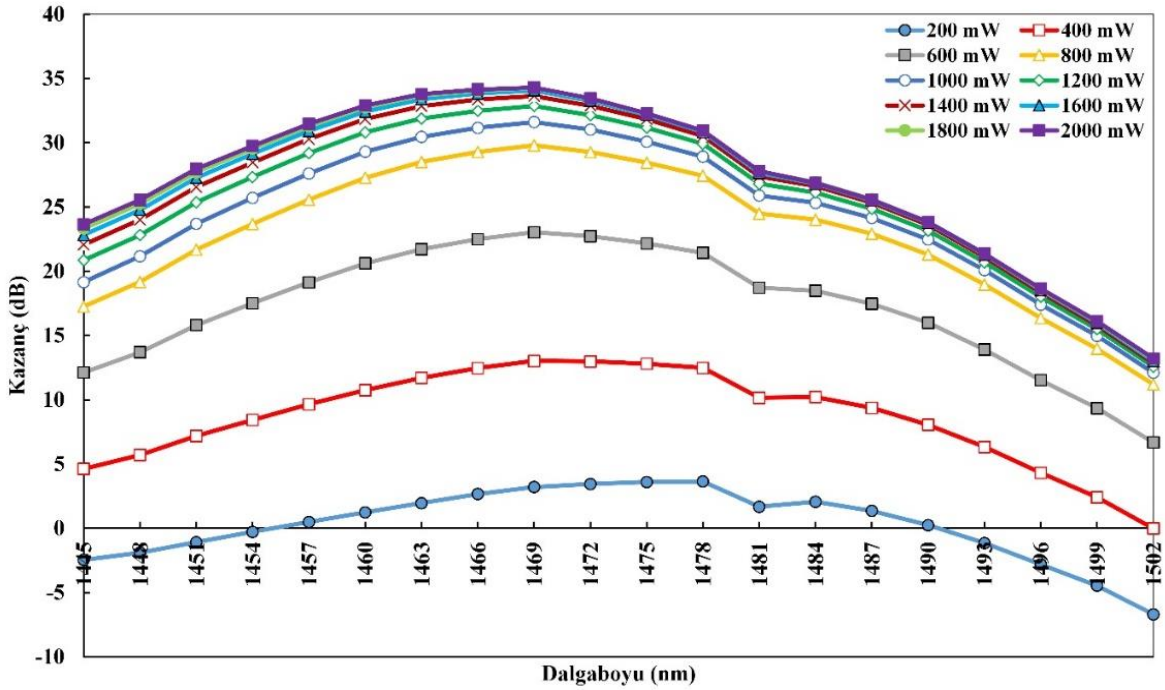
Şekil 6.57. ÜADG-TKFY I için giriş gücü-kazanç değişimi



Şekil 6.58. ÜADG-TKFY I için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

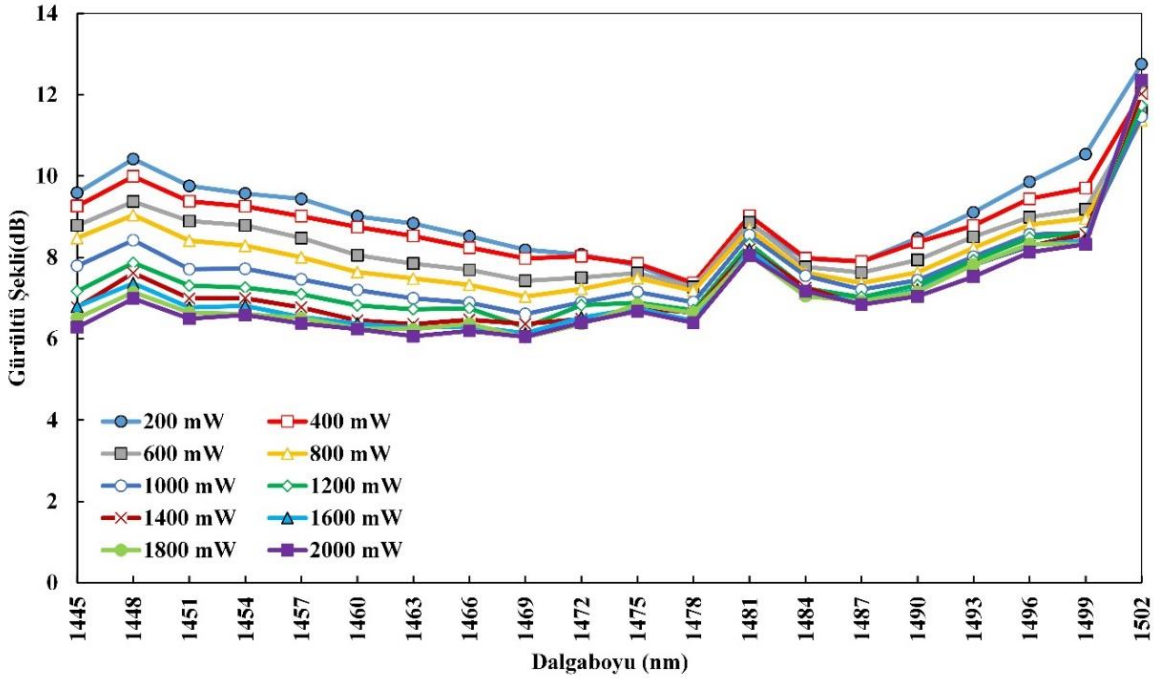
Pompa gücü optimizasyonu

Pompa gücü optimizasyonunda -30 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 2000 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.59 incelendiğinde 1600 mW pompa gücünden sonra ÜADG-TKFY I'in doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1600 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.59. ÜADG-TKFY I için pompa gücü-kazanç değişimi

Şekil 6.60'ta 200-2000 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline sahiptir. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1600 mW ve üzerindeki pompa güçlerinde gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. 1600 mW pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 6,5-7 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 7-8 dB aralığında bulunmaktadır.

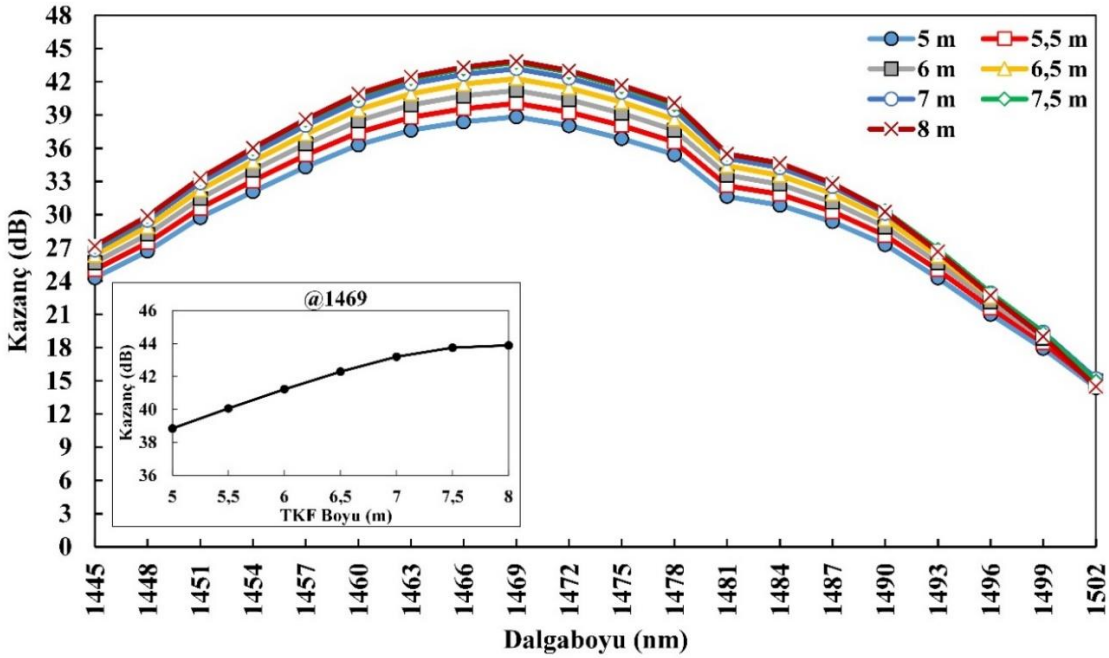


Şekil 6.60. ÜADG-TKFY I için pompa gücü-gürültü şekli değişimi

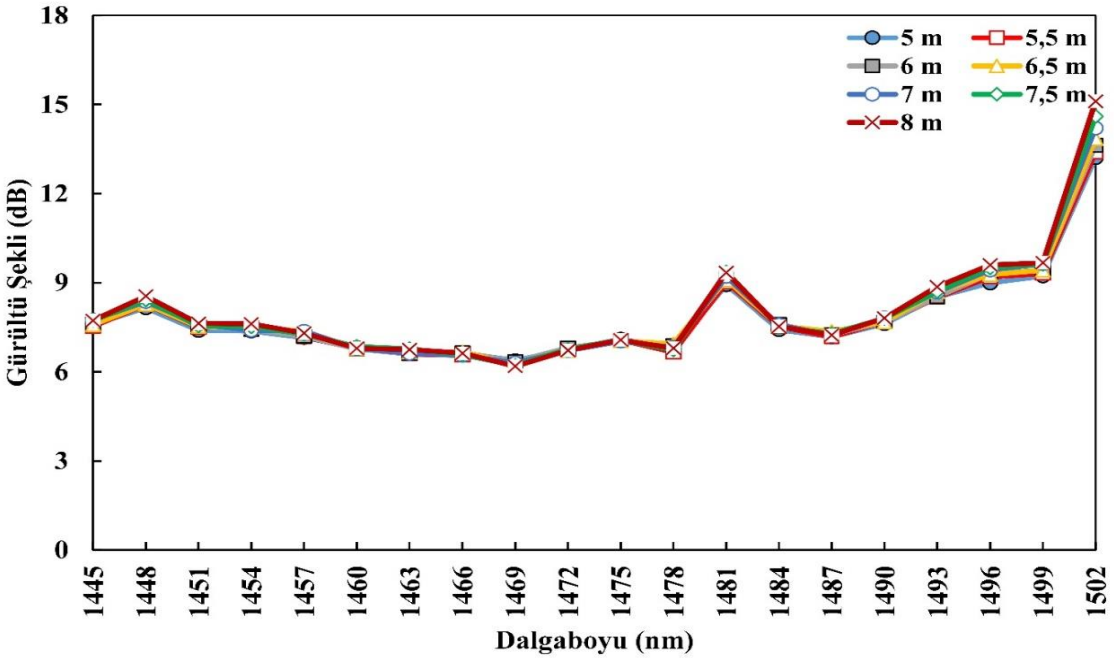
TKF boyu optimizasyonu

ÜADG-TKFY I optimizasyon çalışmalarında elde edilen -30 dBm giriş gücü ve 1600 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1, TKF 2 ve TKF 3 boyları optimize edilmiştir. Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 ve TKF 2 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 7 m ve TKF 2 değeri ise 8 m'dir.

Daha sonra TKF 1 ve TKF 2 boyları 7 m ve 8 m alınarak TKF 3 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 3 boyu 5 – 8 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.61 ve 6.62'deki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.61'de TKF 3 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.62'de ise TKF 3 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.61. ÜADG-TKFY I için TKF boyu-kazanç değişimi



Şekil 6.62. ÜADG-TKFY I için TKF boyu-gürültü şekli değişimi

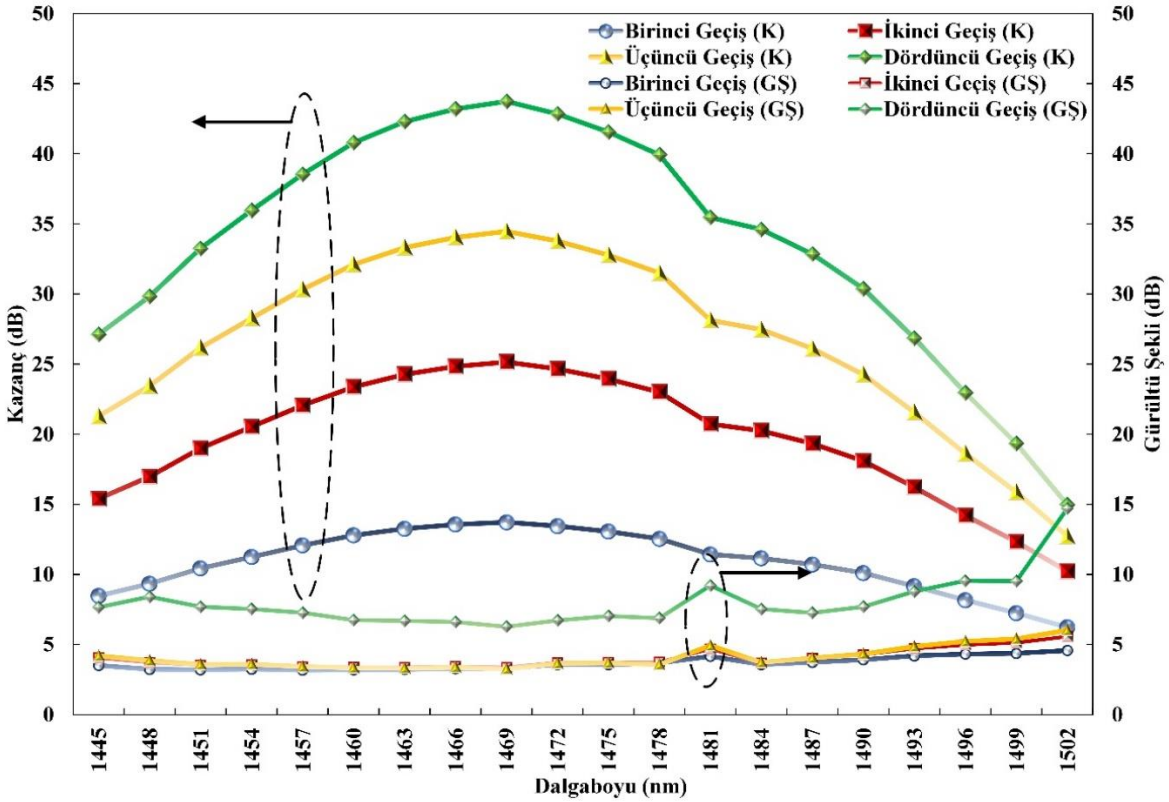
Optimize edilmiş ÜADG-TKFY I

ÜADG-TKFY I üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.11'de gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen ÜADG-TKFY I'in ilk, ikinci, üçüncü ve dördüncü

geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.63'te gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.11. ÜADG-TKFY I için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2+TKF3 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
ÜADG-TKFY I	-30	1600	7+8+7,5	43,74	6,21

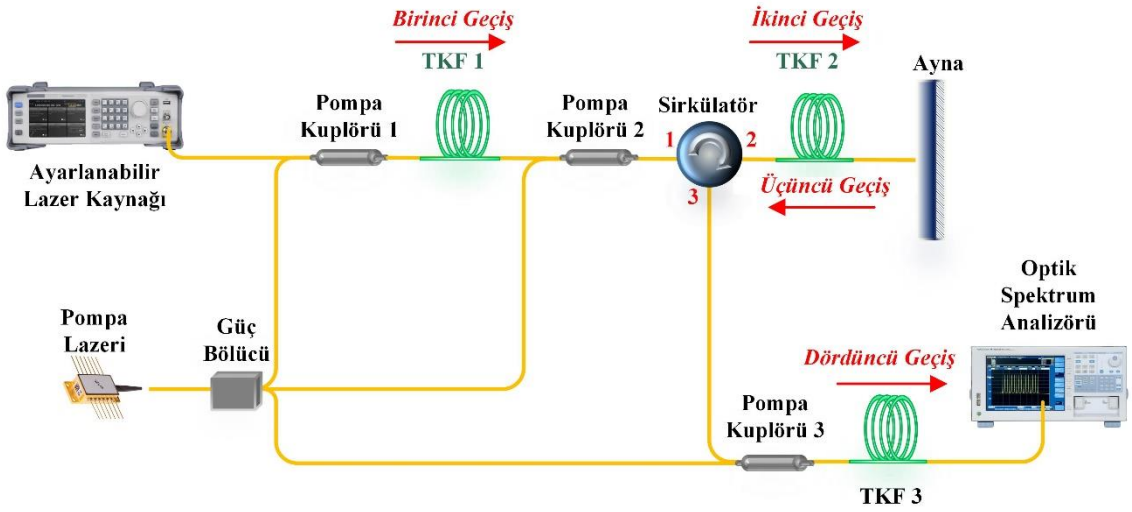


Şekil 6.63. ÜADG-TKFY I konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

6.4.3. Üç aşamalı dört geçişli TKFY II

Şekil 6.64'te üç aşamalı dört geçişli (ÜAÜG) TKFY II tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, bu konfigürasyon sırasıyla tek geçişli, çift geçişli ve yine tek geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile toplamda üç adet TKF kullanılarak oluşturulmuştur. TKF 1'den bir kez, ve TKF 2'den ayna yardımıyla iki defa yükseltilen sinyal, son olarak TKF 3'te de

dördüncü kez yükseltilerek toplamda dört yükseltme işlemine uğramaktadır Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile dörde ayrılarak paylaştırılmaktadır.

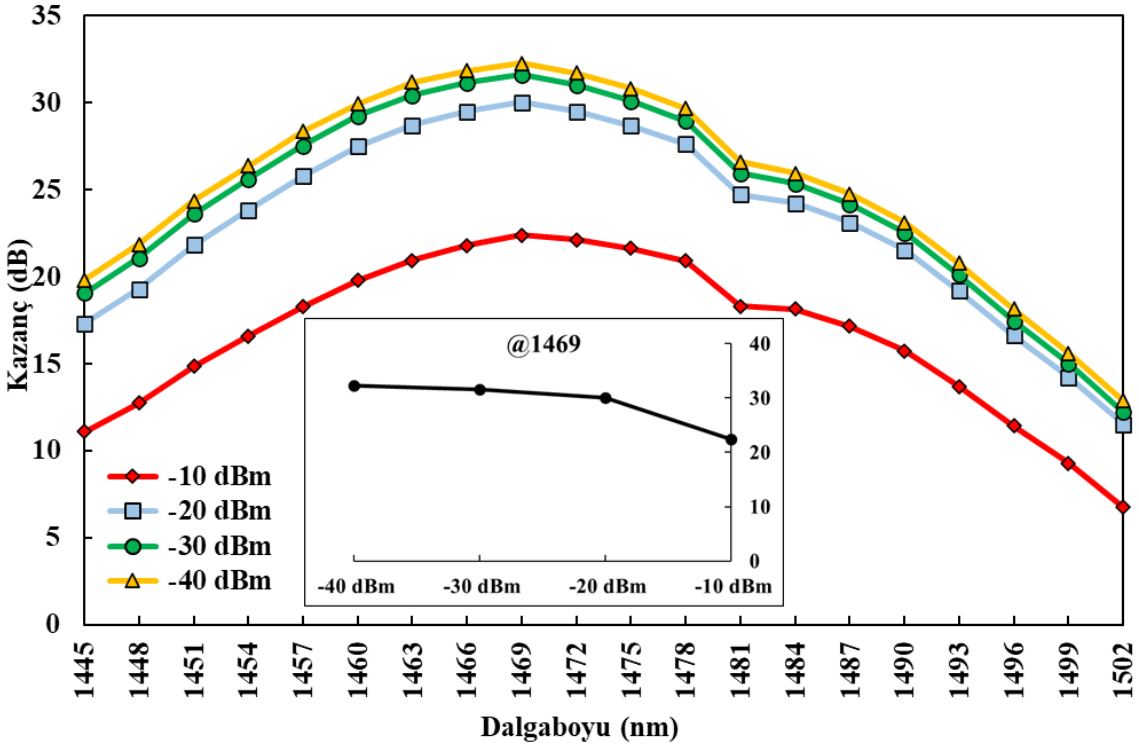


Şekil 6.64. Üç aşama dört geçişli TKFY II

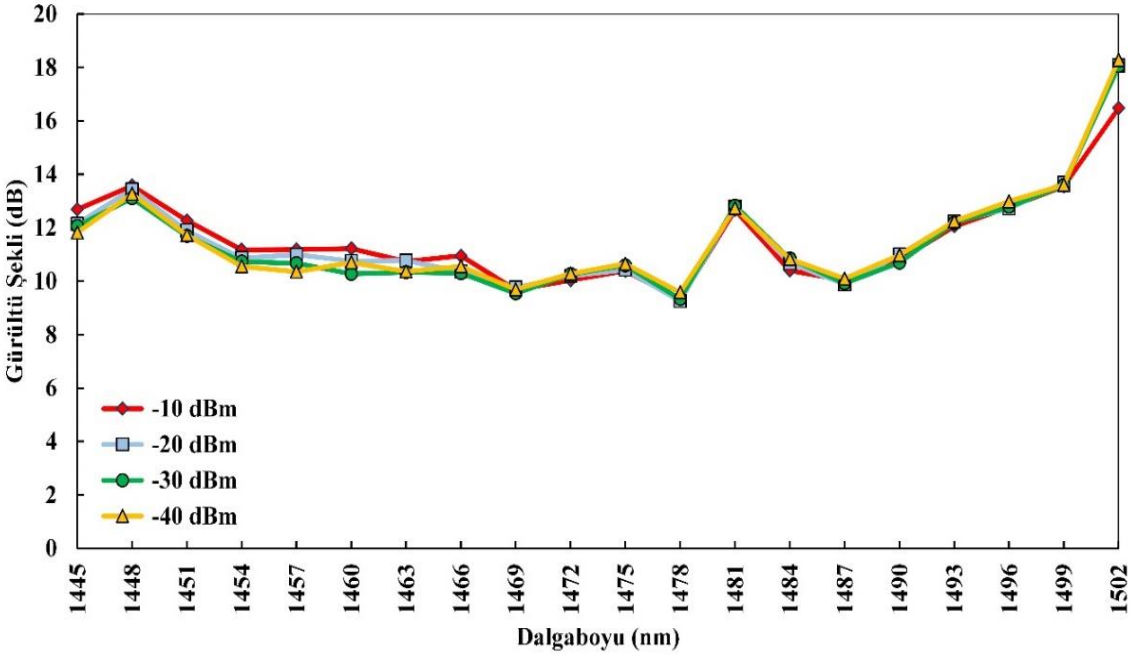
ÜADG-TKFY II performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

Giriş gücünün etkisi ve seçimi

Şekil 6.65'te görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -30 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi çok az olmaktadır. Yükselteç, giriş gücü -30 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan ÜADG-TKFY konfigürasyonu için giriş gücü değeri -30 dBm alınmıştır. Şekil 6.66 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 10-14 dB aralığında değiştiği görülmektedir. Gürültü şekli, -10 dBm giriş gücü için yüksek seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli birbirine cok yakın ve nispeten daha düşüktür.



Şekil 6.65. ÜADG-TKFY II için giriş gücü-kazanç değişimi

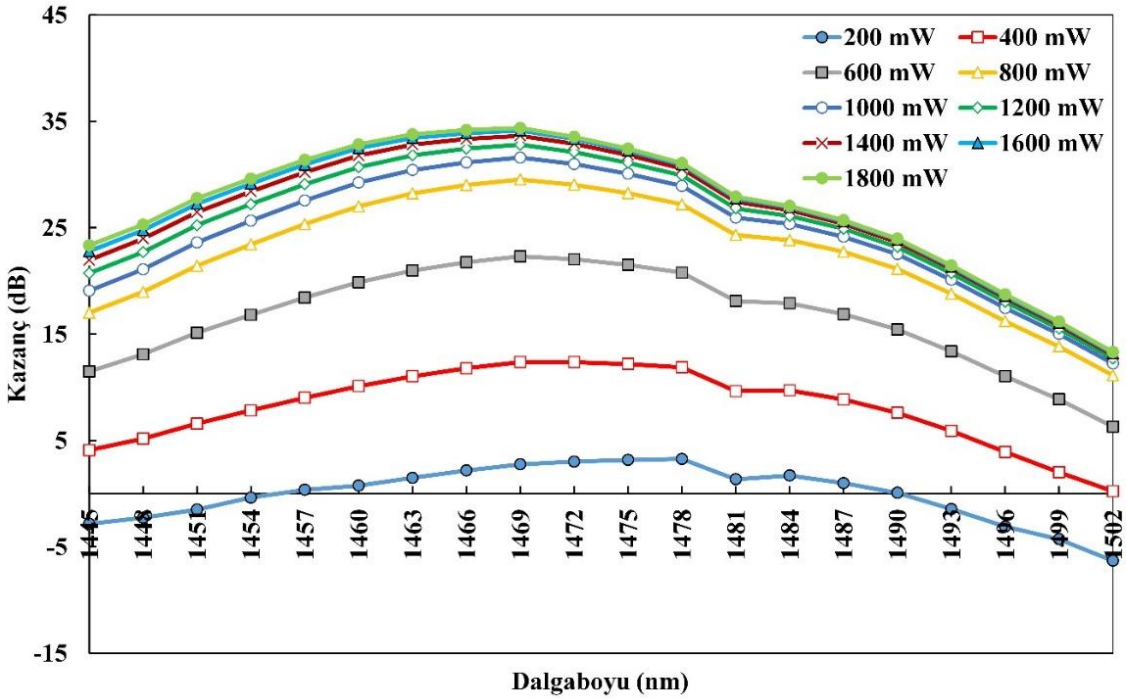


Şekil 6.66. ÜADG-TKFY II için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

Pompa gücü optimizasyonu

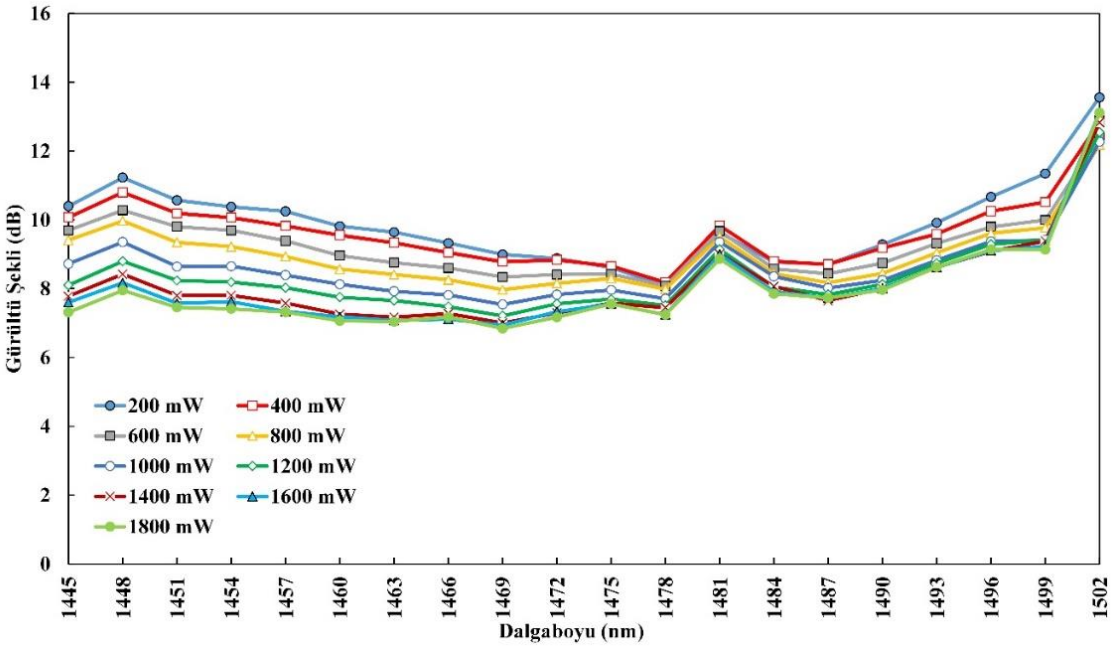
Pompa gücü optimizasyonunda -30 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 1800 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle

edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.67 incelendiğinde 1600 mW pompa gücünden sonra ÜADG-TKFY II'nin doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1600 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.67. ÜADG-TKFY II için pompa gücü-kazanç değişimi

Şekil 6.68'de 200-1800 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline sahiptir. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1600 mW pompa gücünün gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. Bu pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 7,5-8 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 8-9 dB aralığında bulunmaktadır.

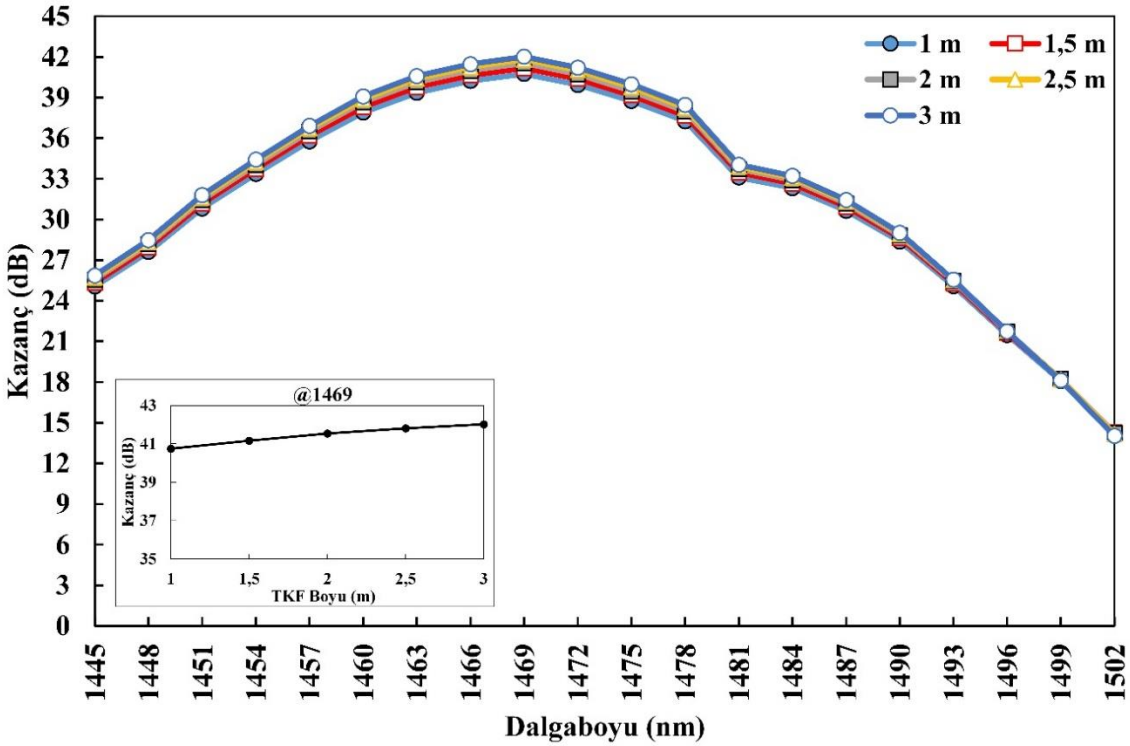


Şekil 6.68. ÜADG-TKFY II için pompa gücü-gürültü şekli değişimi

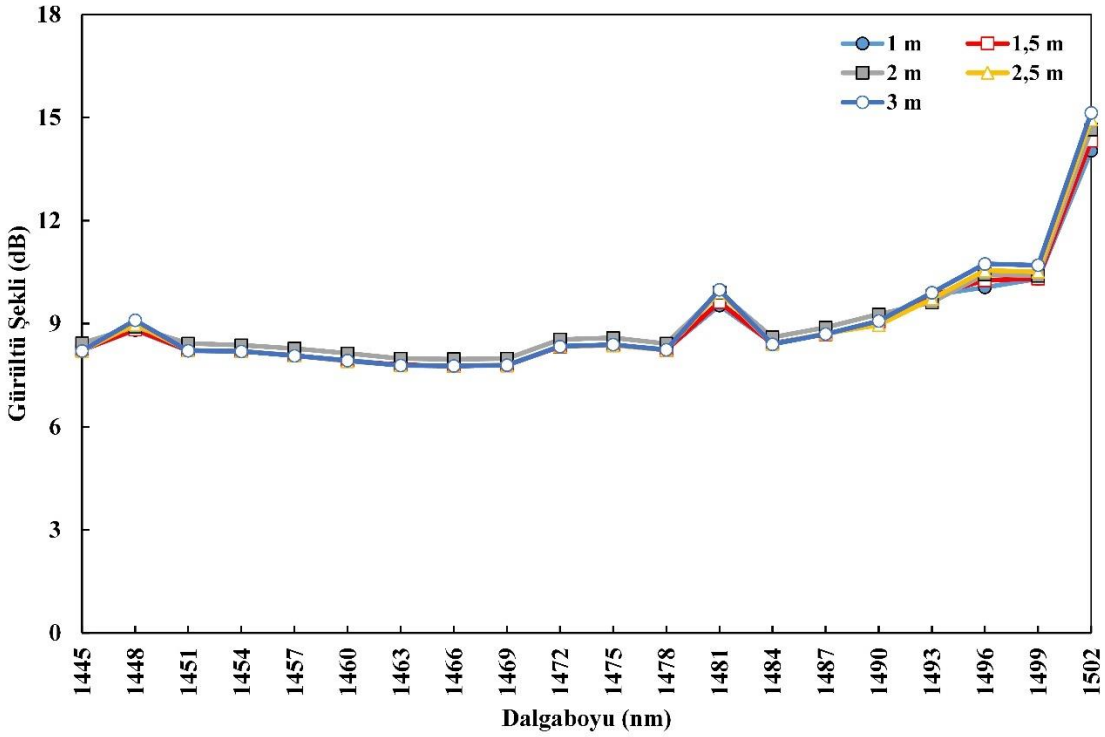
TKF boyu optimizasyonu

ÜADG-TKFY II optimizasyon çalışmalarında elde edilen -30 dBm giriş gücü ve 1600 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1 ve TKF 2 boyları optimize edilmiştir. Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 ve TKF 2 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 7 m ve TKF 2 değeri ise 10 m'dir.

Daha sonra TKF 1 ve TKF 2 boyları 7 m ve 10 m alınarak TKF 3 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 3 boyu 1 – 3 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.69 ve 6.70'deki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.69'da TKF 3 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.70'de ise TKF 3 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.69. ÜADG-TKFY II için TKF boyu-kazanç değişimi



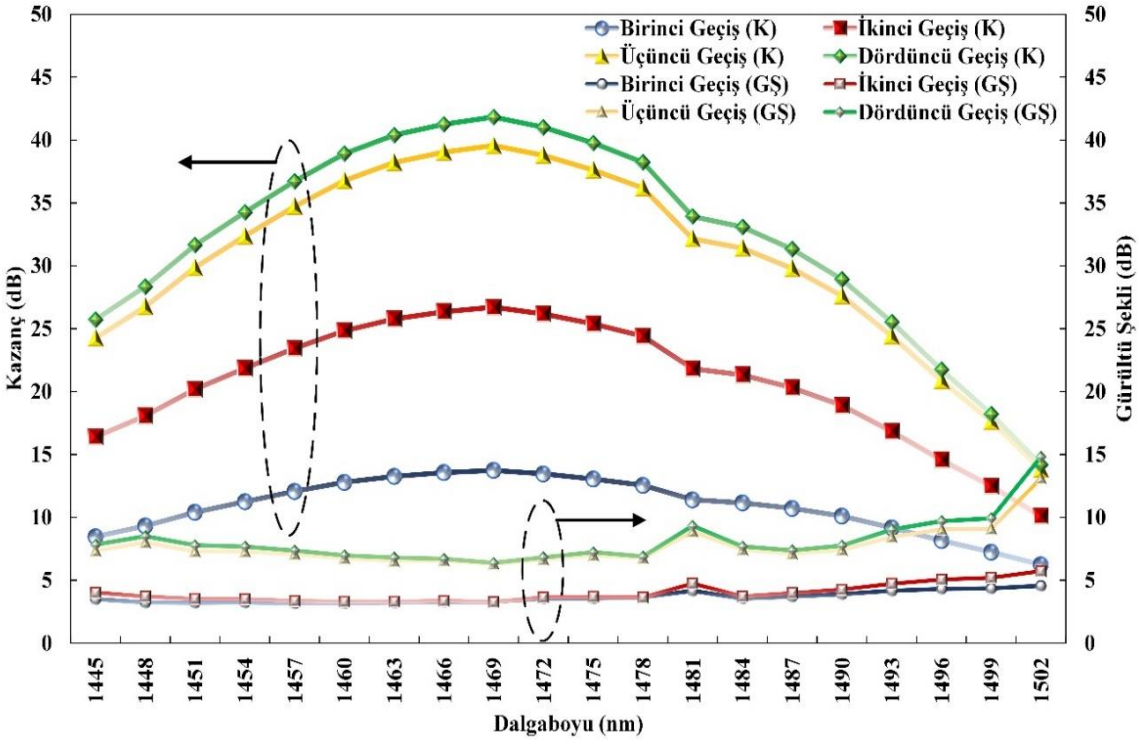
Şekil 6.70. ÜADG-TKFY II için TKF boyu-gürültü şekli değişimi

Optimize edilmiş ÜADG-TKFY II

ÜADG-TKFY II üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.12'de gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen ÜADG-TKFY II'nin ilk, ikinci, üçüncü ve dördüncü geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.71'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.12. ÜADG-TKFY II için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

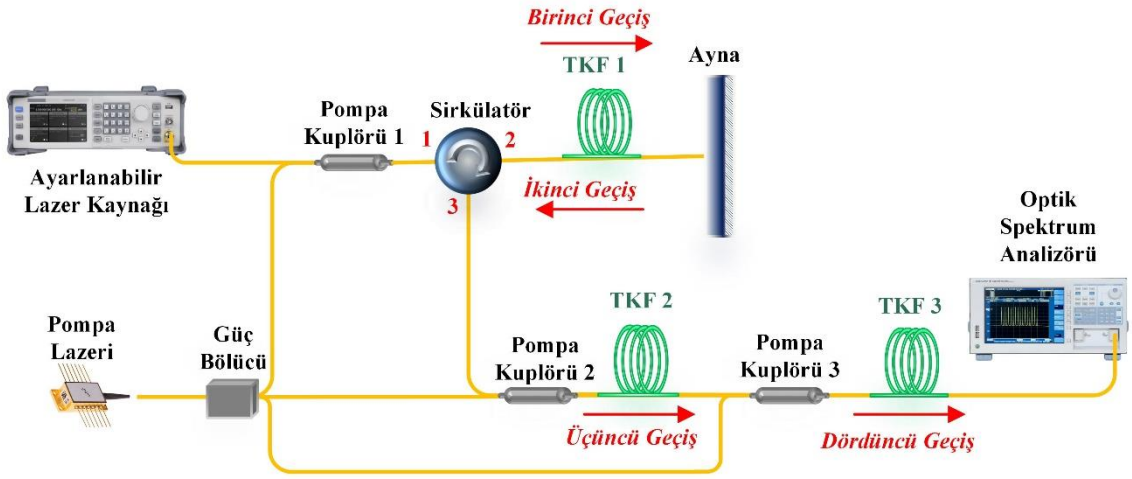
Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2+TKF3 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
ÜADG-TKFY II	-30	1600	7+10+2,5	41,80	7,60



Şekil 6.71. ÜADG-TKFY III konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

6.4.4. Üç aşamalı dört geçişli TKFY III

Şekil 6.72'de üç aşamalı dört geçişli (ÜADG) TKFY III tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, üç farklı TKF'den oluşan ve üç adet tek geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. TKF 1'den ayna yardımıyla iki kez yükseltilen sinyal, sırasıyla TKF 2 ve TKF 3'ten de birer defa daha geçerek toplamda dört kez yükseltilmektedir. Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile üçe ayrılarak paylaştırılmaktadır. Bu konfigürasyon ile pompa gücünün verimli kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.



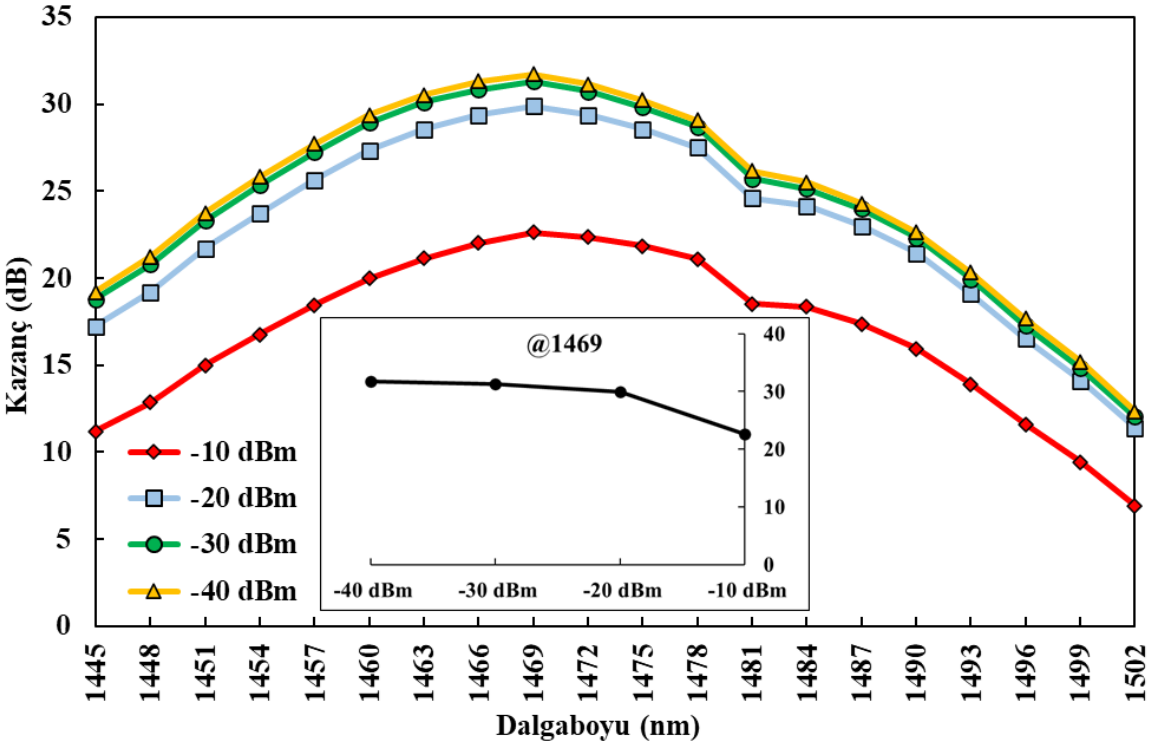
Şekil 6.72. Üç aşama dört geçiş TKFY III

ÜADG-TKFY III performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

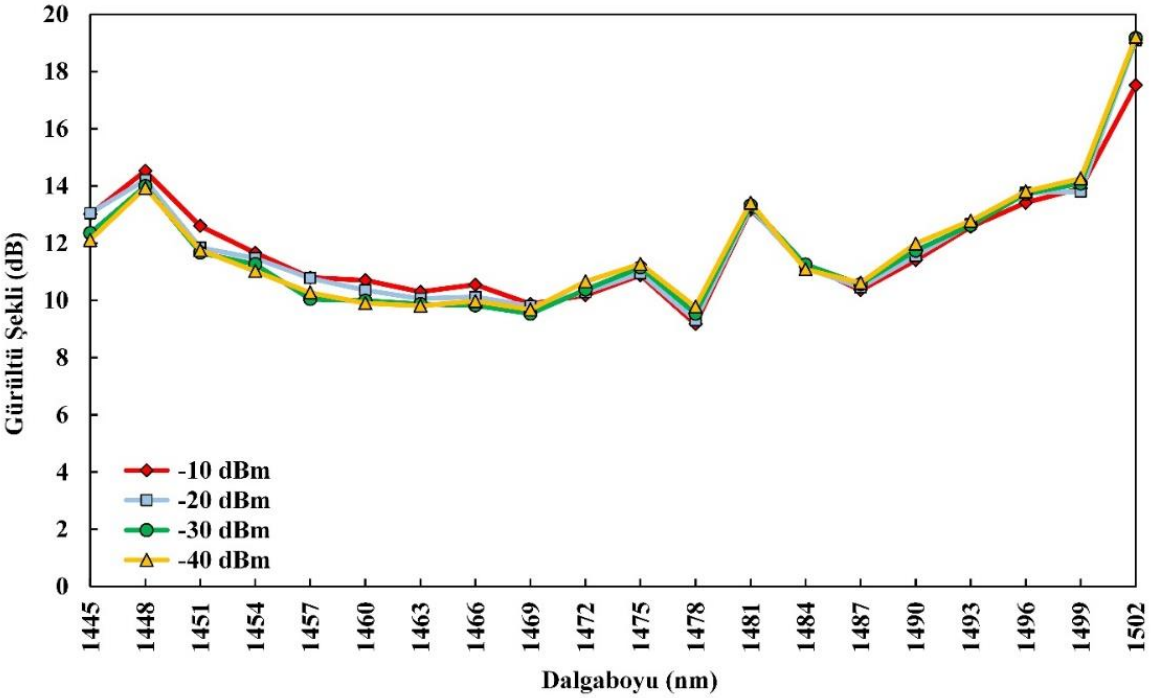
Giriş gücünün etkisi ve seçimi

Şekil 6.73'te görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -30 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi çok az olmaktadır. Yükselteç, giriş gücü -30 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan ÜADG-TKFY III konfigürasyonu için giriş gücü değeri -30 dBm alınmıştır. Şekil 6.74 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 1451-1478 nm dalgaboyu aralığında 10-12 dB, 1478-1499 nm dalgaboyu aralığında ise 12-14 dB arasında değiştiği

görülmektedir. Gürültü şekli, -10 dBm giriş gücü için yüksek seyrederken, diğer giriş gücü değerlerinin gürültü şekli birbirine cok yakın ve nispeten daha düşüktür.



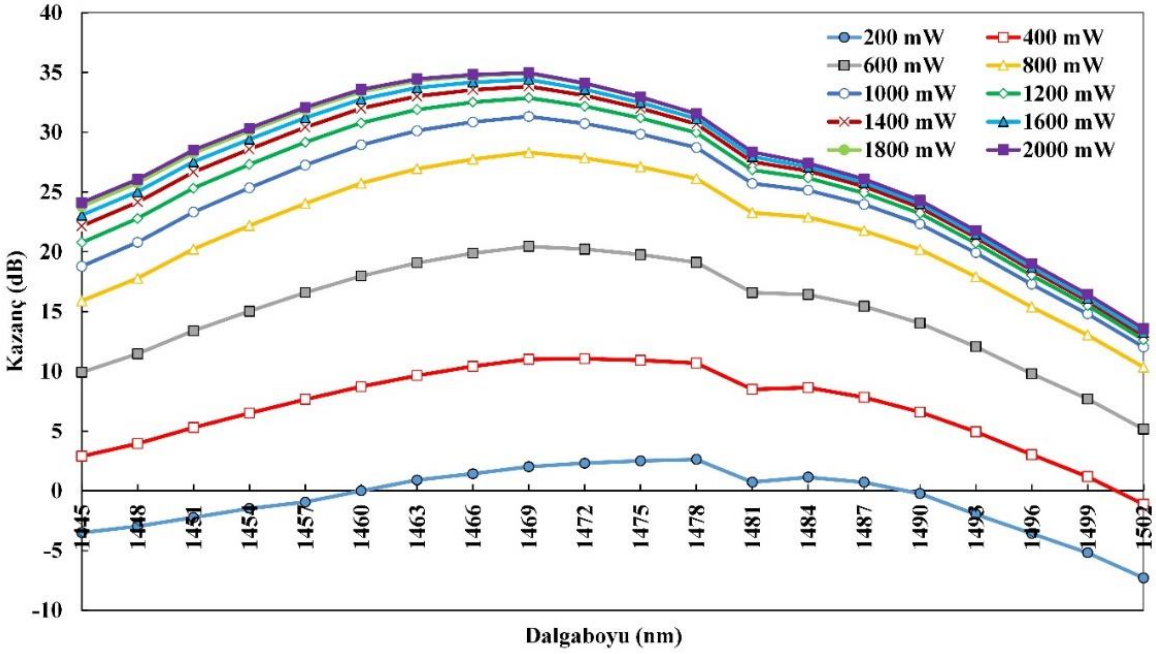
Şekil 6.73. ÜADG-TKFY III için giriş gücü-kazanç değişimi



Şekil 6.74. ÜADG-TKFY III için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

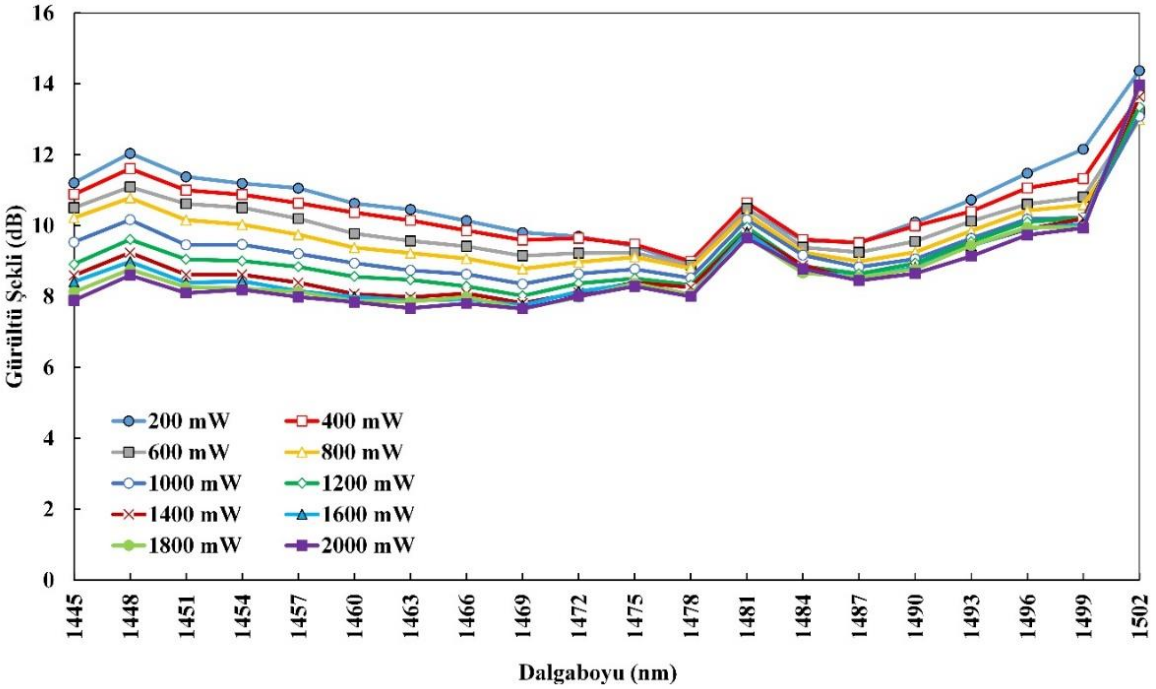
Pompa gücü optimizasyonu

Pompa gücü optimizasyonunda -30 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 2000 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında uygulanmıştır. Şekil 6.75 incelendiğinde 1800 mW pompa gücünden sonra ÜADG-TKFY III'ün doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 1800 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.75. ÜADG-TKFY III için pompa gücü-kazanç değişimi

Şekil 6.76'da 200-2000 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline sahiptir. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1800 mW pompa gücünün gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. Bu pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 8-8,5 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 8,5-9,5 dB aralığında bulunmaktadır.

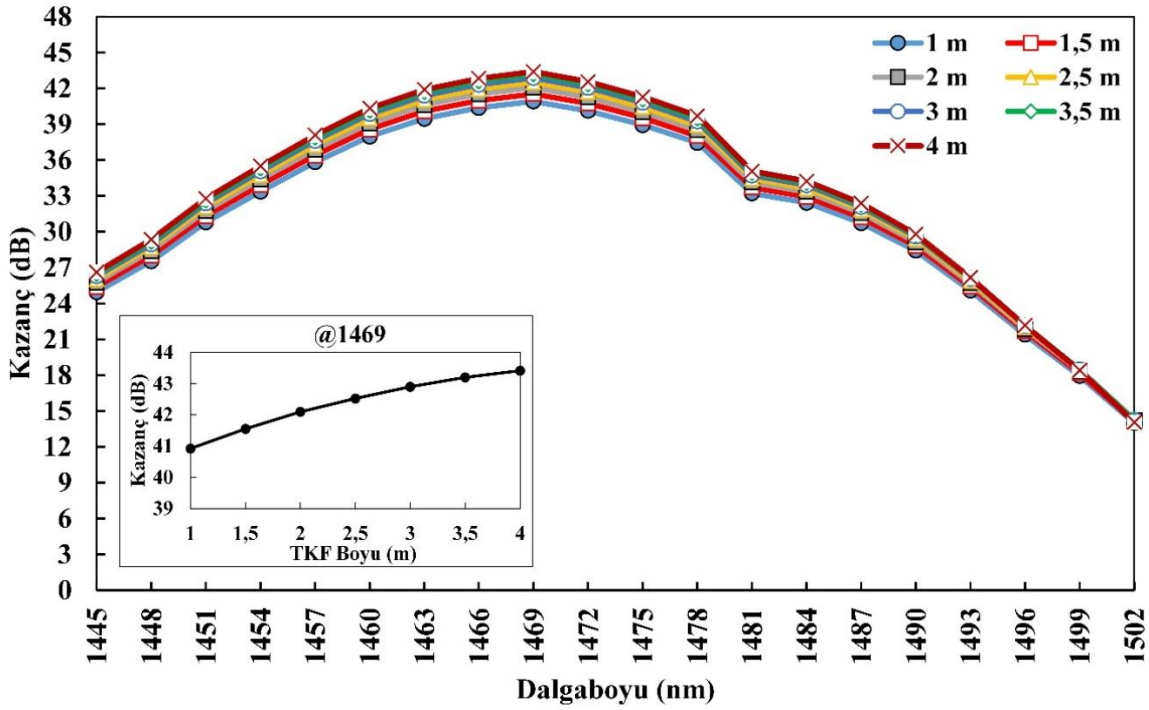


Şekil 6.76. ÜADG-TKFY III için pompa gücü-gürültü şekli değişimi

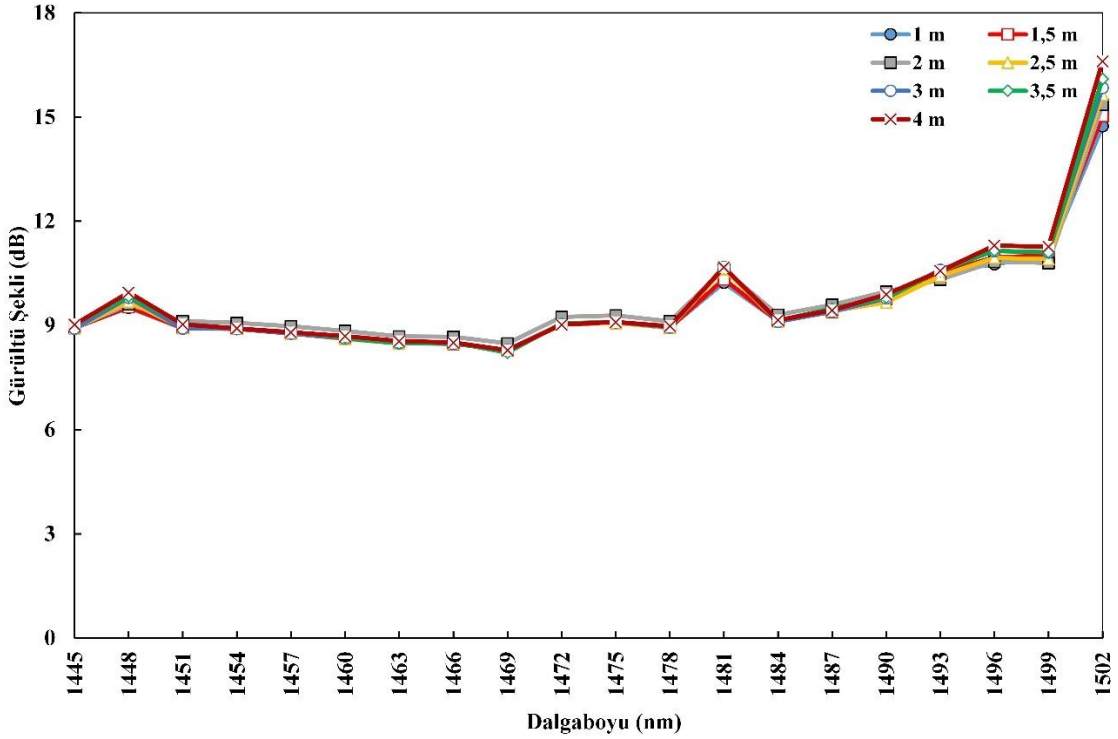
TKF boyu optimizasyonu

ÜADG-TKFY III optimizasyon çalışmalarında elde edilen -30 dBm giriş gücü ve 1800 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1, TKF 2 ve TKF 3 boyları optimize edilmiştir. Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 ve TKF 2 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 değeri 12 m ve TKF 2 değeri ise 4 m'dir.

Daha sonra TKF 1 ve TKF 2 boyları 12 m ve 4 m alınarak TKF 3 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 3 boyu 1 – 4 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile Şekil 6.77 ve 6.78'deki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.77'de TKF 3 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.78'de ise TKF 3 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.77. Üç aşamalı dört geçişli TKFY III için TKF boyu-kazanç değişimi



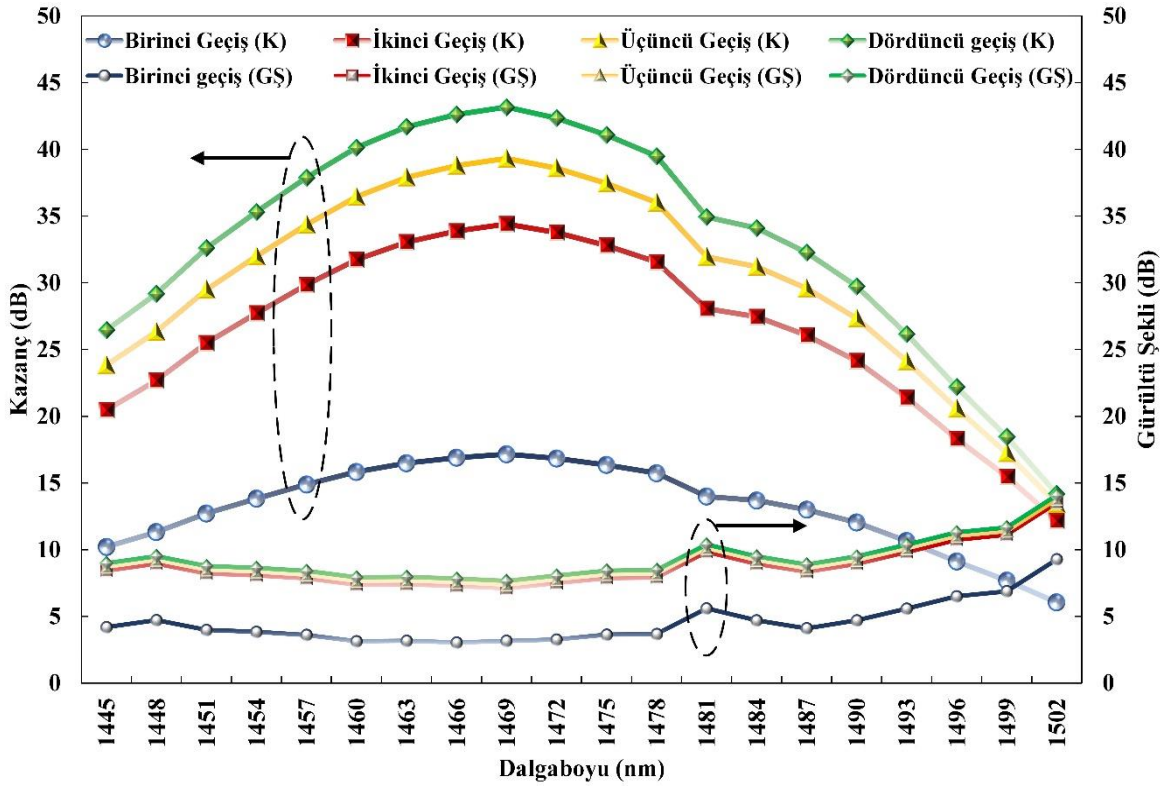
Şekil 6.78. Üç aşamalı dört geçişli TKFY III için TKF boyu-gürültü şekli değişimi

Optimize edilmiş ÜADG-TKFY III

ÜADG-TKFY III üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.13'te gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen ÜADG-TKFY III'nin ilk, ikinci, üçüncü ve dördüncü geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.79'da gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.13. ÜADG-TKFY III için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

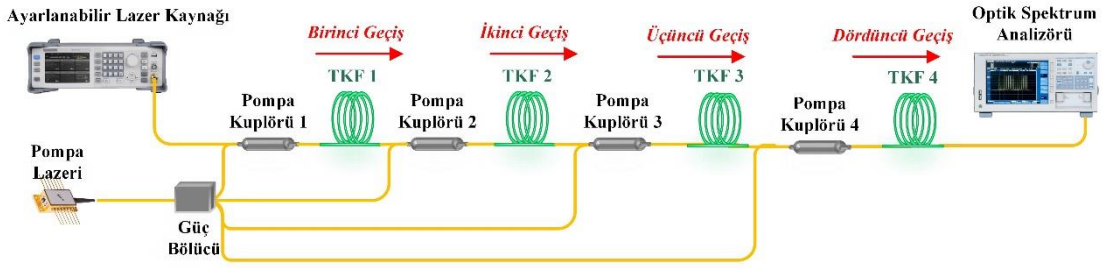
Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2+TKF3 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
ÜADG-TKFY III	-30	1800	12+4+3,5	43,20	8,22



Şekil 6.79. ÜADG-TKFY III konfigürasyonunun her dört geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

6.4.5. Dört aşamalı dört geçişli TKFY

Şekil 6.80'de dört aşamalı dört geçişli (DADG) TKFY tasarımı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, dört farklı TKF'den oluşan ve dört adet tek geçişli düzeneğin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. TKF 1'den geçerek yükseltilen sinyal, sırasıyla TKF 2, TKF3 ve TKF 4'ten de geçerek dört defa yükseltme işlemine uğramaktadır Pompa gücü, güç ayırıcı yardımı ile dörde ayrılarak paylaştırılmaktadır. Bu konfigürasyon ile pompa gücünün verimli kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.

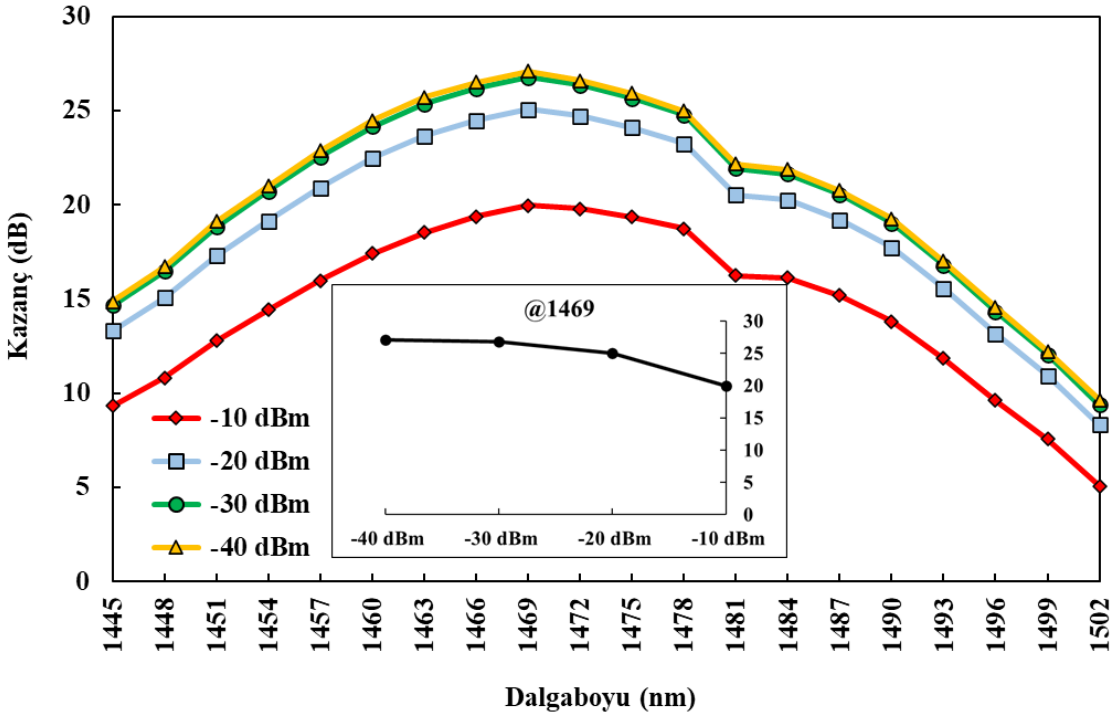


Şekil 6.80. Dört aşamalı dört geçişli TKFY

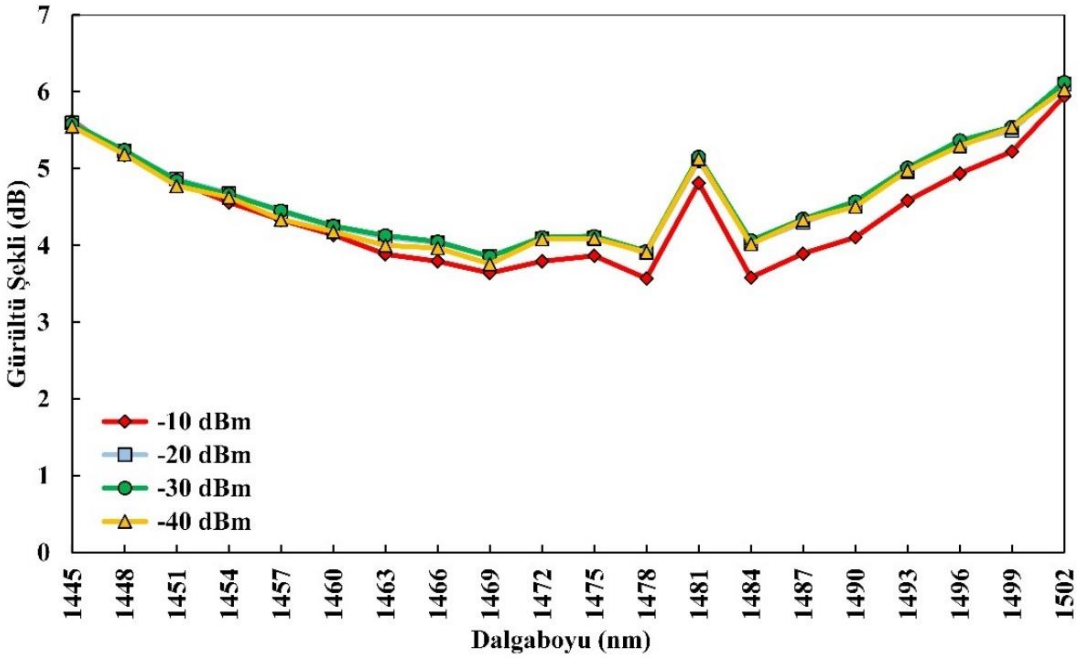
DADG-TKFY performansını ölçmek ve arttırmak için giriş gücü etkisi araştırılırken, pompa gücü ve TKF boyu optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen kazanç ve gürültü değerleri grafiklere yansıtılarak karşılaştırılmış, en verimli değerler belirlenmiştir.

Giriş gücünün etkisi ve seçimi

Şekil 6.81'de görüldüğü gibi, giriş gücü değeri -30 dBm üzerine çıktığında kazanç değerlerindeki değişimi çok az olmaktadır. Yükselteç, giriş gücü -30 dBm'de doyuma ulaşmıştır. Bu nedenle bundan sonraki pompa gücü ve TKF boyu optimizasyonu çalışmalarında, tasarlanan DADG-TKFY konfigürasyonu için giriş gücü değeri -30 dBm alınmıştır. Şekil 6.82 incelendiğinde ise, gürültü değerlerinin 3,5-5,5 dB aralığında değiştiği görülmektedir. Gürültü şekli, -30 dBm ve -20 dBm giriş güçleri için düşük seyrederken, -10 dBm giriş gücü değerlerinin gürültü şekli diğer ikisine nispeten daha yüksektir.



Şekil 6.81. DADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi

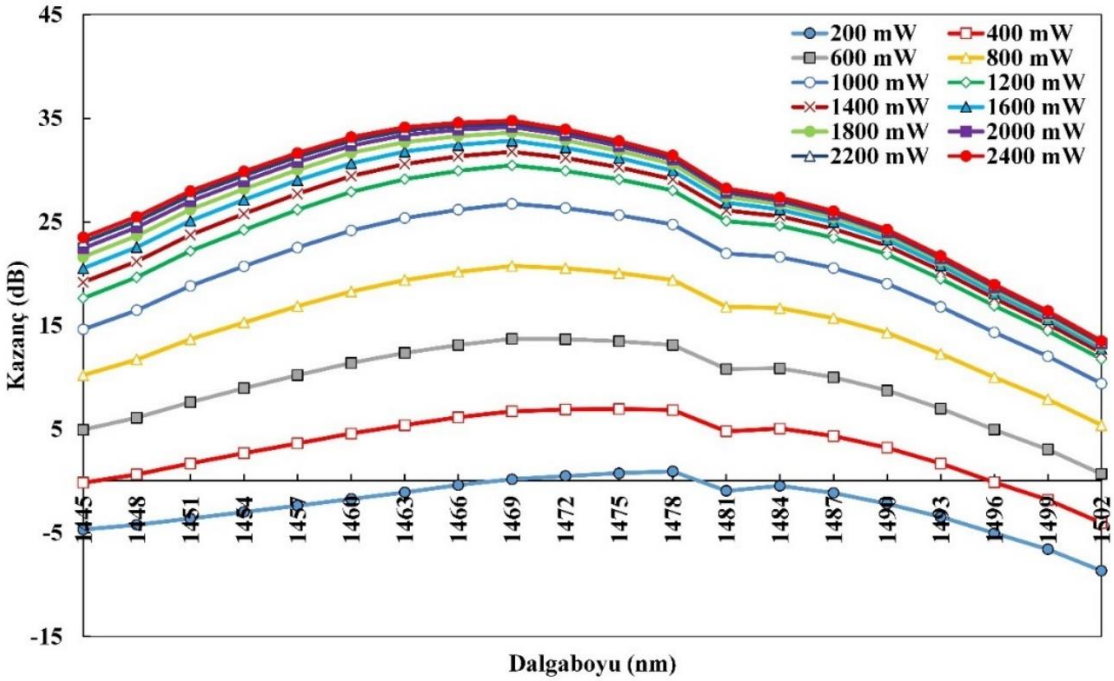


Şekil 6.82. DADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

Pompa gücü optimizasyonu

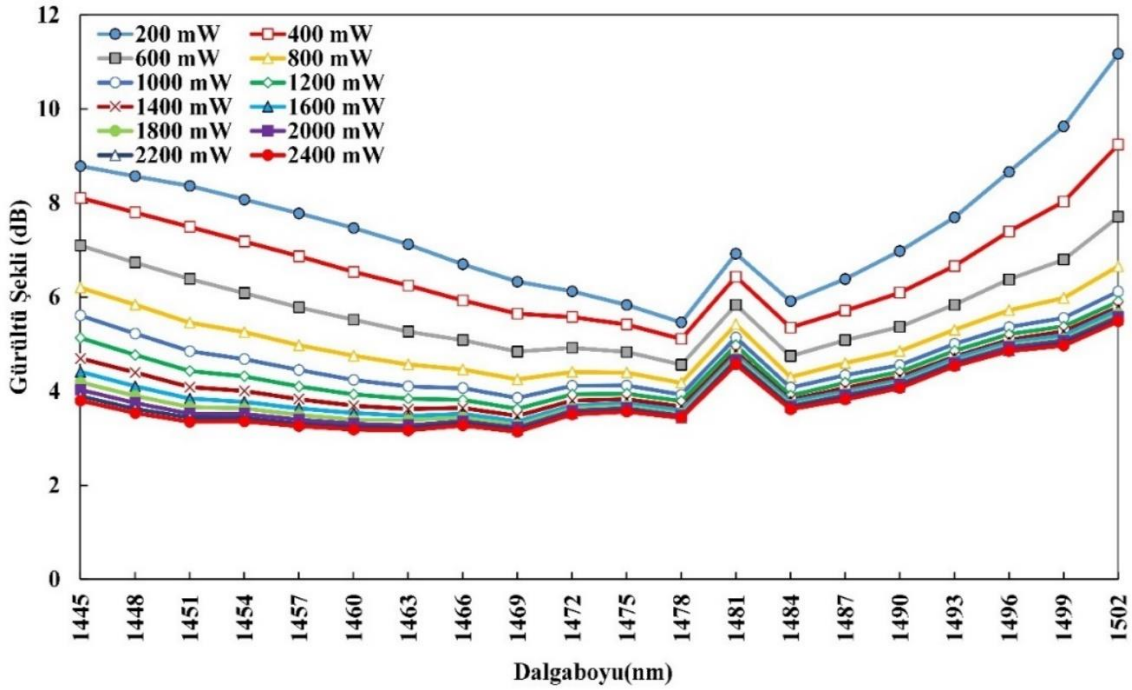
Pompa gücü optimizasyonunda -30 dBm giriş gücündeki sinyaller 200 mW ile 2400 mW arasındaki pompa güçlerinde her seferinde 200 mW artırılarak her tasarım ayrı ayrı simüle edilmiştir. Giriş sinyallerinin dalga boyları 1445-1502 nm dalgaboyu aralığında

uygulanmıştır. Şekil 6.83 incelendiğinde 2000 mW pompa gücünden sonra DADG-TKFY ‘nin doyuma ulaştığı, bu değerden sonra pompa gücü artışının sistem kazancına etkisi olmadığı görülmektedir. Bu konfigürasyon için 2000 mW pompa gücü optimum değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.83. DADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi

Şekil 6.84’te 200-2400 mW aralığında değişen pompa güçlerine karşılık meydana gelen gürültü şekli grafiği yer almaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, 200 mW pompa gücü en yüksek gürültü şekline sahiptir. Pompa gücü arttıkça gürültü değerleri düşmektedir. Yükselteci doyuma ulaştıran 1600-2400 mW aralığındaki pompa güçlerinin gürültü şekli değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. 2000 mW pompa gücünde gürültü şekli değerleri, 1445-1478 nm dalgaboyu aralığında 3,5-4 dB arasında seyrederken, 1478 nm dalgaboyundan sonra 4-5 dB aralığında bulunmaktadır.

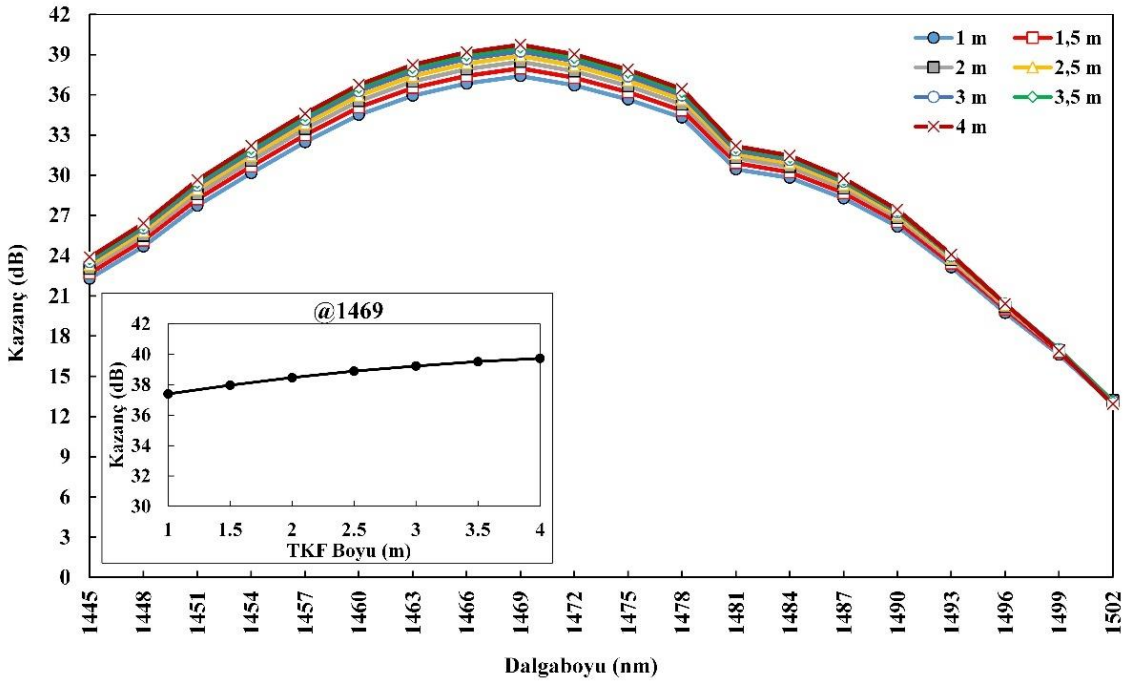


Şekil 6.84. DADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

TKF boyu optimizasyonu

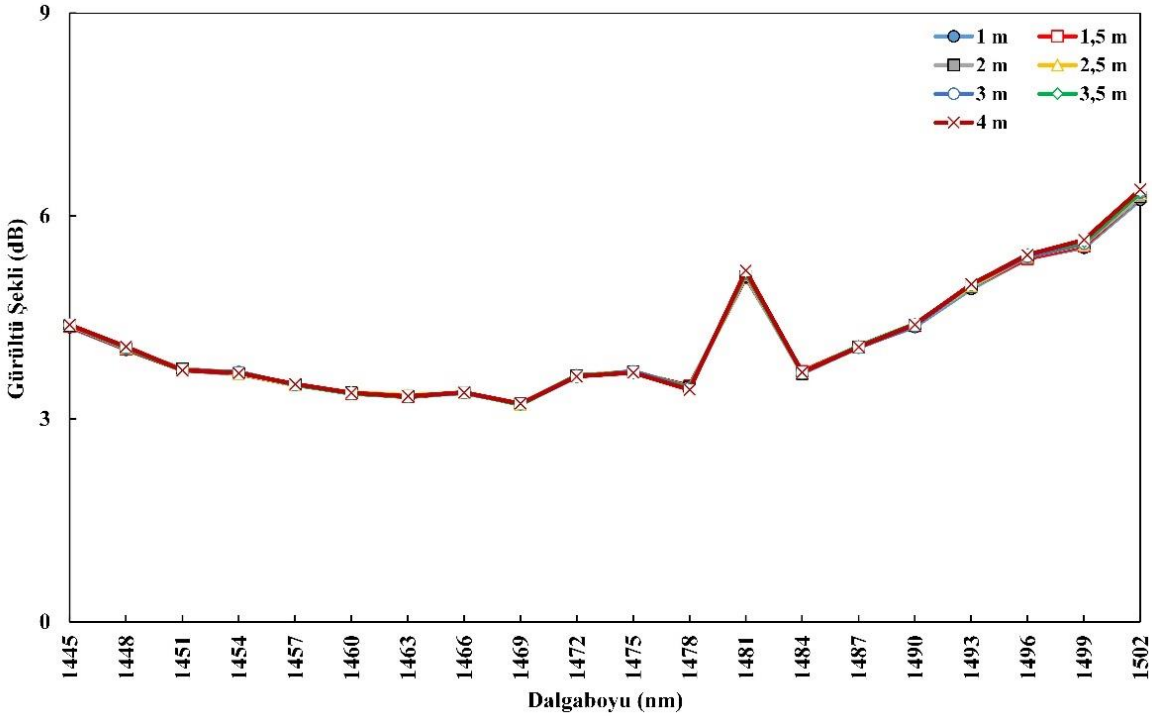
DADG-TKFY optimizasyon çalışmalarında elde edilen -30 dBm giriş gücü ve 2000 mW pompa gücü kullanılarak düzenekteki TKF 1, TKF 2, TKF 3 ve TKF 4 boyları optimize edilmiştir. Optisystem 21.0'de yer alan SPO optimizasyon seçeneği, "Maximize" optimizasyon tipi kulanılarak en yüksek çıkış gücünü veren TKF 1 ve TKF 2 değeri araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonunda elde edilen TKF 1 boyu 7 m, TKF 2 boyu 12 m ve TKF 3 boyu 5 m'dir.

Daha sonra elde edilen TKF1, TKF2 ve TKF 3 boyları kullanılarak TKF 4 optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada TKF 4 boyu 1 – 4 m aralığında her seferinde 0,5 m değiştirilerek, kazanç ve gürültü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak Şekil 6.85 ve 6.86'daki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.85'te TKF 4 boyu-kazanç değişim grafiği, Şekil 6.86'da ise TKF 4 boyu-gürültü şekli grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.85. DADG-TKFY için giriş gücü-kazanç değişimi

TKF 4 boyu-kazanç değişim grafiği incelendiğinde, kazanç artımı için TKF boyları uzadıkça az da olsa artmaktadır. Fiber boyu 3,5 m olduktan sonra ise yükselteç doyuma ulaştığı için kazanç artışı hemen hemen durmaktadır. Bu nedenle TKF 4 için 3,5 m yeterli görülmüştür. TKF 4 boyu-gürültü şekli grafiği incelendiğinde ise tüm fiber boyları için gürültü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. 1445-1481 nm band aralığında yüksek kazanç değerleri elde edilirken, bu aralığın gürültü şekli de diğer bölgeye göre daha düşük seyretmektedir. Bu aralıktaki gürültü şekli değeri 3-4,5 dB aralığında değişmektedir.1481 nm dalgaboyundan sonra ise kazanç düşerken gürültü şekli giderek artmaktadır.



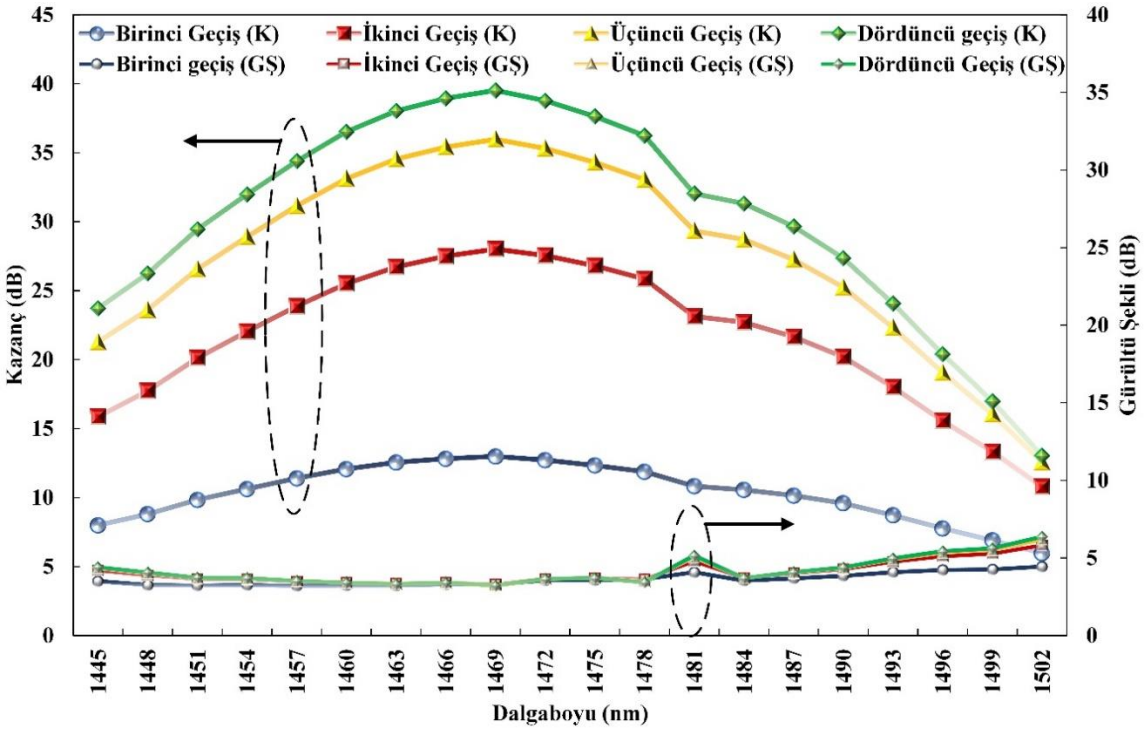
Şekil 6.86. DADG-TKFY için giriş gücü-gürültü şekli değişimi

6.4.6. Optimize edilmiş DADG-TKFY

DADG-TKFY üzerine şimdiye kadar yapılan giriş gücü seçimi, pompa gücü ve TKF uzunluğu optimizasyon çalışmalarında elde edilen değerler Çizelge 6.14'te gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak optimize edilen DADG-TKFY'nin ilk, ikinci, üçüncü ve dördüncü geçişteki kazanç ve gürültü şekli değerleri incelenmiştir. Elde edilen kazanç ve gürültü şekli verileri kullanılarak Şekil 6.87'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.14. DADG-TKFY için optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2+TKF3+TKF4 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
DADG-TKFY	-30	2000	6,5 + 13,5 + 6,5 + 3,5	39,52	3,20



Şekil 6.87. DADG-TKFY konfigürasyonunun her iki geçişinde elde edilen kazanç ve gürültü şekli değişimi

Şekil 6.87'de görüldüğü gibi 1469 nm dalgaboyundaki sinyal baz alındığında kazanç değeri birinci geçişte 12,98 dB, ikinci geçişte 28 dB, üçüncü geçişte 35,98 dB, dördüncü geçişte ise 39,52 dB'ye yükselmektedir. Bu da kazanç değerinin ikinci geçişte (ilk geçişe göre) %115,7, üçüncü geçişte (ikinci geçişe göre) %28,5, dördüncü geçişte (üçüncü geçişe göre) ise %9,84 arttığını göstermektedir. Gürültü şekli değerleri incelendiğinde ise, üç geçişte de değerlerin biribirine çok yakın ve çoğunlukla 4-5 dB civarında olduğu görülmektedir.

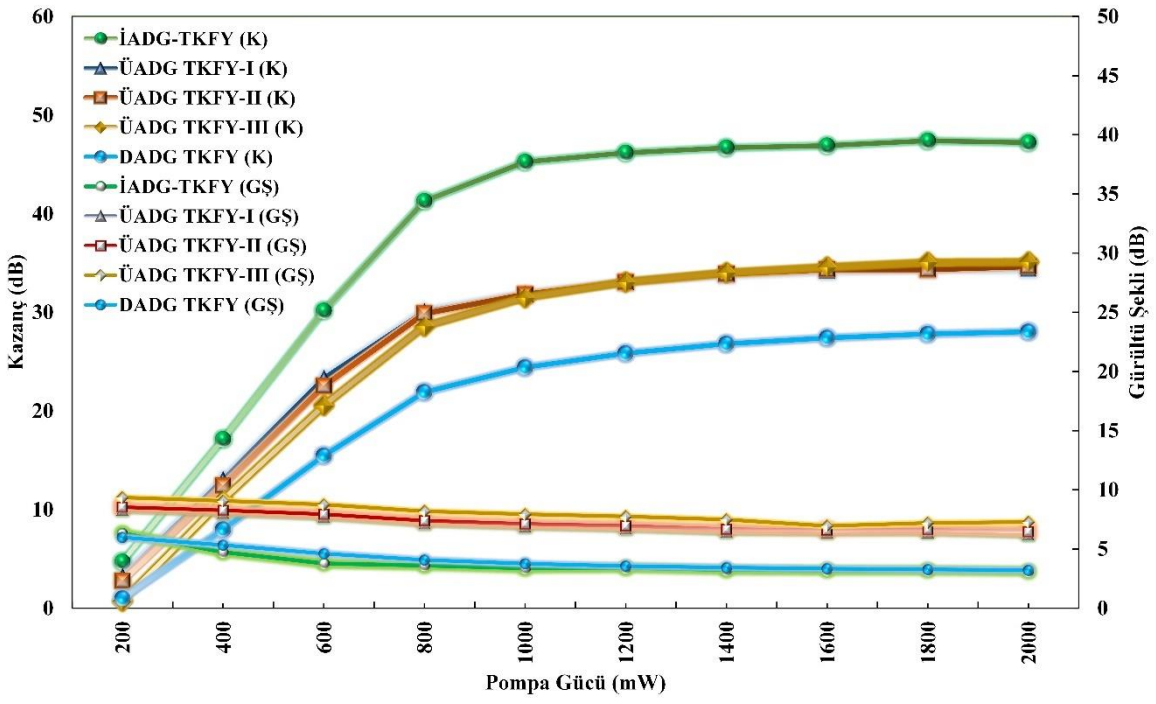
6.4.7. Dört geçişli TKFY konfigürasyonlarının karşılaştırılması

İADG-TKFY, ÜADG-TKFY I, ÜADG-TKFY II, ÜADG-TKFY III ve DADG-TKFY konfigürasyonları, kendi içinde ayrı ayrı optimizasyon yapılarak giriş gücü, pompa gücü ve TKF boylarının kazanç ve gürültü şekli üzerine etkisi incelenmiştir. Beş konfigürasyonda da en iyi performans farklı değerlerde elde edilmiştir ve bu değerler Çizelge 6.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.15. Dört Geçişli TKFY'lerin optimizasyon çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1+TKF2+TKF3+TKF4 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
İADG-TKFY	-30	1400	13 + 3,5	43,30	3,86
ÜADG-TKFY I	-30	1600	7+8+7,5	43,74	6,21
ÜADG-TKFY II	-30	1600	7+10+2,5	41,80	7,60
ÜADG-TKFY III	-30	1800	12+4+3,5	43,20	8,22
DADG-TKFY	-30	2000	6,5 + 13,5 + 6,5 + 3,5	39,52	3,20

Bu beş tasarımı karşılaştırma yapmak için mümkün olduğunca benzer şartlarda çalıştırmak gerekmektedir. Bu nedenle -30 dBm giriş gücünde ve 1469 nm dalgaboyundaki giriş sinyali için İADG-TKFY konfigürasyonu için 7,5+7,5 m TKF, ÜADG-TKFY I, ÜADG-TKFY II ve ÜADG-TKFY III konfigürasyonları için 5+5+5 m TKF ve ÜADG-TKFY için de 4 x 3,75 m TKF kullanılarak çalıştırılmış, 200 mW dan başlayarak artan giriş güçlerinde her beş düzeneğin de performansı incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak Şekil 6.88'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 6.88. İADG-TKFY, ÜADG-TKFY I, ÜADG-TKFY II, ÜADG-TKFY III ve DADG-TKFY tasarımlarının kazanç ve gürültü şekli karşılaştırması

Grafik incelendiğinde benzer koşullarda DADG-TKFY konfigürasyonunun kazanç değerleri diğer dört konfigürasyona göre düşüktür. Bununla beraber gürültü şekli ise İADG-TKFY ile yakın değerlerdeyken, diğer üç konfigürasyona kıyasla oldukça düşüktür. DADG-TKFY konfigürasyonunda pompa gücü 2000 mW olduğunda artık kazanç artışı giderek düşmektedir. Bu da yükseltecin yavaş yavaş doyuma yaklaştığını göstermektedir. 2000 mW pompa gücündeki kazanç – gürültü şekli değerleri sırasıyla 46,7 ve 3,2 dB'dir. İAÜG-TKFY I, II ve III konfigürasyonlarında kazanç artışı 1600 mW pompa gücünden sonra durmuştur. Bu üç tasarımda yükselteçlerin 1600 mW pompa gücünde doyuma ulaştığı söylenebilir. Kazanç ve gürültü şekili değerleri birine yakın ve yaklaşık 34,2 dB ve 6,5 dB civarındadır. İADG-TKFY tasarımının ise kazanç değeri diğer dört tasarıma göre oldukça yüksek, gürültü şekli değeri diğer dört tasarıma göre daha düşüktür. İADG-TKFY, 1400 mW pompa gücünde kazanç değeri 46,6 dB, gürültü şekli değeri ise 3,12 dB'dir. Bu nedenle, dört geçişli TKFY çalışmalarında en iyi performans İADG-TKFY'ye attir ve en verimli konfigürasyon tipi bu kategoride İADG-TKFY olarak belirlenmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında önyükselteç olarak kullanılacak daha yüksek optik güç ve verimlilik sağlayan çok geçişli TKFY konfigürasyonları oluşturulmuş ve araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak en uygun pompa dalgaboyunun 1050 nm ve pompalama yönünün ise ileri-ileri-geri yönlü olduğu tespit edilmiştir. Çalışmaya geri pompalama yönünün de eklenmesi iki, üç ve dört geçişli konfigürasyonlarda tasarım ihtimali sayısını arttıracağı ve karışıklığa yol açacağı için çalışmada sadece ileri yönlü pompalama kullanılmıştır. 1050 nm pompa dalgaboyu ve ileri yönlü pompalama kullanılarak muhtemel S-band çok geçişli TKFY konfigürasyonları oluşturulmuş ve sırası ile incelenmiştir. İnceleme sırasında öncelikle giriş gücünün her bir konfigürasyona etkisi araştırılıp en uygun giriş gücü belirlenmiş, daha sonra pompa gücü ve TKF uzunlukları optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan tüm tasarımlar, profesyonel bir ticari yazılım olan Optisystem 21.0 yazılım programı kullanılarak simüle edilmiştir.

7.1. Çok Geçişli TKFY ile Çok Geçişli EKFY'in Karşılaştırılması

Literatürde Çok Geçişli TKFY konfigürasyonları oluşturulurken şimdiye kadar kullanılan çok geçişli EKFY düzeneklerinden yararlanılmış ve bu düzeneklerin TKFY'ye adaptasyonu araştırılmıştır. Oluşturulan ve araştırılan tasarımlar iki, üç ve dört geçişli olmak üzere üç grupta toplanmıştır. Her bir grup içerisinde benzer konfigürasyonlar kullanılarak oluşturulan C-band Çok Geçişli EKFY ile S-band Çok Geçişli TKFY'ler Çizelge 6.16'da karşılaştırılmıştır.

Çift geçişli konfigürasyonlar incelendiğinde TKFY'lerde daha yüksek pompa gücü kullanıldığı görülecektir. Farklı dalgaboyları ve yükselteç çeşitleri farklı gereksinimlere sahiptir. İyon yoğunluğu, fiber uzunluğu gibi yükselteç parametreleri de pompa gücünü etkileyen faktörlerdendir. Bu grup içerisinde elde edilen iki geçişli TKFY ve EKFY kazanç değerleri birbirine yakındır. Gürültü değerleri ise EKFY'de nispeten daha yüksek seyretmektedir.

Çizelge 6.16. Mevcut çalışmada ve literatürde kullanılmış çok geçişli TKFY- çok geçişli EKFY karşılaştırması

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Sinyal Dalgaboyu (nm)	Pompa Gücü (mW)	Fiber Uzunluğu (m)	Kazanç (dB)	Gürültü (dB)
ÇG-TKFY	-20	1469	1200	10	34	3,1
İAÇG-TKFY	-20	1469	1200	5+5	20,7	3,0
İAÜG-TKFY I	-20	1469	1200	9+7	33,2	6,7
İAÜG-TKFY II	-20	1469	1400	11+3	34,3	8,8
ÜAÜG-TKFY	-20	1469	1800	7,5+9,5 +7,5	35,2	3,2
İADG-TKFY	-30	1469	1400	13+3,5	43,3	3,9
ÜADG-TKFY I	-30	1469	1600	7+8+7,5	43,7	6,2
ÜADG-TKFY II	-30	1469	1600	7+10+2,5	41,8	7,6
ÜADG-TKFY III	-30	1469	1800	12+4+3,5	43,2	8,2
DADG-TKFY	-30	1469	2000	6,5+13,5 +6,5+3,5	39,5	3,2
[6] ÇG-EKFY	-30	1554	100	10	~ 35,0	~ 16,0
[62] ÇG-TKFY	-30	1465	300	20	32,0	~ 7,0
[65] ÇG-TKFY	-30	1465	250	20	32,0	~ 7,0
[134] ÇG-TKFY	-20	1468	1000	6,8	~ 37,9	~ 3,2
[139] ÇG-TKFY	-37	1462	400	-	38	~ 8,0
[20] İAÇG-TKFY	0	1975	200	3+4	~19,6	~5,8
[144] İAÇG-EKFY	-15	1909	2500	4+2	~ 42,0	~ 13,0
[20] İAÜG-TKFY I	0	1975	200	3+4	19,9	~ 5,6
[45] İAÜG-EKFY I	-20	1550	100	10	~ 42,0	~ 7,0
[46] İAÜG-EKFY I	-20	1550	10+50	-	~ 55,0	~ 3,5
[48] İAÜG-EKFY I	-	-	150+240	-	78,7	3,3
[51] İAÜG-EKFY I	-30	1560	300	6+11	54,9	3,7
[134] İAÜG-TKFY I	-20	1469	1000+1000	5+4,8	~ 42,7	~ 10,0
[45] İAÜG-EKFY II	-20	1550	100	10	~ 41,0	~ 7,0
[46] İAÜG-EKFY II	-20	1550	10+50	-	~ 35,0	~ 3,9
[48] İAÜG-EKFY II	-	-	150+240	-	59,6	8,1
[49] İAÜG-EKFY II	-45	1550	30+70	10+7	~ 50,0	~ 5,7
[73] İAÜG-EKFY II	-30	1550	30+70	10+7	~ 42,0	~ 5,4
[46] ÜAÜG-EKFY	-20	1550	10+50+100	-	~ 40,0	~ 4,6
[48] ÜAÜG-EKFY	-	-	150+240 +290	-	58,5	7,0
[72] İADG-EKFY	-50	1550	10+165	8+7	62,6	~ 4,0
[146] İADG-EKFY	-50	1550	10+90	7+10	54,0	~ 12,0
[147] İADG-EKFY	-50	1550	100	11+15	61,7	6,4
[63] ÜADG EKFY I	-30	-	100+190 +240	-	~ 44,0	~ 10,0

Üç geçişli konfigürasyonlarda İAÜG-EKFY I ve II tasarımlarına dair oldukça çalışma bulunmaktadır. Çalışmalar genel olarak 1550 nm bandında yapılırken her çalışmanın giriş

gücü, fiber boyu, pompa gücü birbirinden farklıdır. Dolayısıyla elde edilen kazanç ve gürültü değerleri de farklı çıkmaktadır. 2000 nm bandında yapılan Çok Geçişli TKFY çalışmasında [20] pompa gücü dağıtım tekniği kullanılarak ve İAÇG-TKFY tasarımında ikinci aşamasına sirkülatör eklenerek İAÜG-TKFY tasarımına dönüştürülmesiyle kazançta yükselme sağlanmıştır.

Yükselteç kazancı arttıkça çoğunlukla kararlı kazanç aralığı daralmaktadır. Fakat S-bandında yapılan İAÜG-TKFY I çalışmasında [134] ile kararlı band aralığı değişmeksizin kazanç artışı gerçekleştirilmiştir. İAÜG-EKFY I tasarımlarında daha yüksek kazanç elde edildiği görülmektedir.

Dört geçişli konfigürasyonlar incelendiğinde İADG-EKFY'lerde 54-62 dB aralığında yüksek kazanç elde edildiği görülmektedir. Çalışmada kullanılan farklı fiber parametreleri ya da (-50) dBm gibi daha düşük bir giriş gücü kullanılmasından kaynaklanabilir. Gürültü figürü değerleri de İADG-TKFY'ye tasarımına göre yüksektir. ÜADG-EKFY I ve ÜADG-TKFY I tasarımlarının kazanç değerleri birbirine yakındır. Bu tasarım C ve S-bandında birbirine iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

Farklı çalışmalarda farklı parametreler, ekipmanlar ve teknikler kullanılarak çalışılan farklı çeşit yükselteçlerde kazanç ve gürültü şekli değerleri farklı olmaktadır. Genel anlamda Çok Geçişli EKFY konfigürasyonları baz alınarak oluşturulan Çok Geçişli TKFY konfigürasyonlarında da benzer kazanç değerleri elde edilmiştir. Kazanç değeri daha düşük kalan konfigürasyonlarda farklı pompalama yönü, pompa gücü dağıtım teknikleri, parametre değişiklikleri gibi faktörler denenerek kazanç değeri daha fazla yükseltilebilirken, pasif fiber ve çeşitli filtreler kullanılarak yüksek gürültü değerleri düşürülebilir.

7.2. En Verimli Çok Geçişli TKFY Konfigürasyonları

Oluşurulan konfigürasyonlar ile yapılan her bir çalışma sonunda elde edilen veriler kullanılarak kazanç ve gürültü şekli değişim grafikleri oluşturulmuştur. Optimize edilen konfigürasyonların her bir geçişi için kazanç ve gürültü şekli değişimleri de incelenmiştir. İki geçişli, üç geçişli ve dört geçişli konfigürasyonları kendi grupları içinde benzer koşullarda karşılaştırılarak, her grup için en verimli konfigürasyon belirlenmiştir. Çizelge

6.17'de belirlenen konfigürasyonların karşılaştırma çalışmalarında kullanılan ve elde edilen değerleri yer almaktadır.

Çizelge 6.17. Çok geçişli TKFY karşılaştırma çalışmalarında belirlenen en verimli tasarımlarda kullanılan ve elde edilen değerler

Konfigürasyon	Giriş Gücü (dBm)	Pompa Gücü (mW)	TKF1 Uzunluğu (m)	Kazanç (1469) (dB)	Gürültü (1469) (dB)
ÇG-TKFY	-20	1200	10	34	3,11
İAÜG-TKFY I	-20	1600	7,5+7,5	37,2	6,3
İADG-TKFY	-30	1400	7,5+7,5	46,9	3,20

İki geçişli konfigürasyonlar içerisinde yapılan çalışma sonucunda; ÇG-TKFY konfigürasyonundan daha yüksek verim elde edilmiştir. 1200 mW pompa gücünde ÇG-TKFY'nin kazanç değeri 34 dB iken, İAÇG-TKFY'nin kazanç değeri 20,7 dB'dir. Benzer koşullarda İAÇG-TKFY ile karşılaştırıldığında, ÇG-TKFY ile %64,25 daha fazla kazanç elde edilmiştir. Her iki konfigürasyonun gürültü şekli değerleri ise birbirine çok yakındır. İki geçişli TKFY çalışmalarında en iyi performans ÇG-TKFY'e attir.

Üç geçişli konfigürasyonlar içerisinde yapılan çalışma sonucunda; benzer koşullarda ÜAÜG-TKFY konfigürasyonunun kazanç ve gürültü figürü değerleri diğer iki konfigürasyona göre düşüktür. İAÜG-TKFY I ve II tasarımlarında kazanç değerleri yaklaşık olarak benzer iken, İAÜG-TKFY II konfigürasyonunun gürültü değeri, İAÜG-TKFY I konfigürasyonundan 3-5 dB daha fazladır. Bu nedenle, bu kategoride en verimli konfigürasyon tipi olarak İAÜG-TKFY I belirlenmiştir.

Dört geçişli konfigürasyonlar içerisinde yapılan çalışma sonucunda, benzer koşullarda DADG-TKFY konfigürasyonunun kazanç değerleri diğer dört konfigürasyona göre düşüktür. İAÜG-TKFY I, II ve III konfigürasyonlarında kazanç ve gürültü şekili değerleri birine yakın ve yaklaşık 34,2 dB ve 6,5 dB civarındadır. İADG-TKFY tasarımının ise kazancı diğer dört tasarıma göre oldukça yüksek ve gürültü şekli daha düşüktür. Bu nedenle, en verimli konfigürasyon tipi bu kategoride İADG-TKFY olarak belirlenmiştir.

7.3. Tezin Katkısı

Çok geçişli TKFY tasarımlarının, uzun mesafeli yeni nesil fiber optik haberleşme sistemlerinde ön yükselteç olarak kullanıldığında tekrarlayıcı mesafesinin arttırılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma ile ilk kez S-band üç ve dört geçişli TKFY düzeneği denenmiş olup, yeni ve özgün bilgi üretimi ve paylaşımı sağlanarak, literatürde bu alandaki boşluk doldurulmuştur. Gelişen teknoloji ile yakın gelecekte yaşanması öngörülen alternatif band arayışına çözüm olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights. (2023). It may be time to reinforce universal access to the ınternet as a human right, not just a privilege, high commissioner tells human rights council. *OHCHR*. Geneva.

2. Agrawal, G.P. (2016). *Optical communication: ıts history and recent progress, optics in our time*. (1. Baskı). Cham: Springer, 178-179.

3. Cvijetic, M., and Djordjevic, I. (2013). *Advanced optical communication systems and networks*. (1. Baskı). Norwood: Artech House, 7-14.

4. Hui, R. (2019) *Introduction to fiber-optic communications*. (1. Baskı). London: Academic Press, 6-8.

5. Keiser, G. E. (1999). A review of WDM technology and applications. *Optical Fiber Technology*, 5(1), 3-39.

6. Yucel, M., and Aslan, Z. (2013). The noise figure and gain improvement of double-pass c-band EDFA. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(11), 2525-2528.

7. Altuncu, A. (2006). Band selection in broadband loop ASE source using seed signal injection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(9), 1043-1045.

8. Yücel, M., Ozoglu, Y. A., Gunduz, A. E., Goktas, H. H., and Burunkaya M. (2019). Determination of the temperature independent quiescent regions for different types of erbium-doped fibers. *Optik*, 183, 619-628.

9. Urquhart, P., Lopez, O. G., Boyen, G., and Bruckmann, A. (2007). *Optical amplifiers for telecommunications*. 2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, Alcala de Henares, 1-6.

10. Jacquier, B., Bigot, L., Guy, S., and Jurdyc, A.M. (2005). *Spectroscopic properties of rare earths in optical materials*, Berlin: Springer, 431-467.

11. Durak, F. E., and Altuncu, A. (2018). All-optical gain clamping and flattening in l-band EDFAs using lasing-controlled structure with FBG. *Optical Fiber Technology*, 45, 217-222.

12. Sapre, S., and Gupta, N. (2015). Review of EDFA gain performance in c- and l-band. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 12(3), 559-563.

13. Chang, C. L., Wang, L., and Chiang, Y.J. (2006). A dual pumped double-pass l-band EDFA with high gain and low noise. *Optics Communications*, 267(1), 108-112.

14. Kani, J., and Jinno, M. (1999). Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510 nm by serial combination of a thulium-doped fluoride fiber amplifier and fiber raman amplifier. *Electronics Letters*, 35(12), 1004-1006.

15. Yam, S. H., and Kim, J. (2006). Ground state absorption in thulium-doped fiber amplifier: experiment and modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 12(4), 797-803.

16. Chen, S., Jung, Y., Alam, S., Richardson, D. J., Sidharthan, R., Ho, D., Yoo, S., and Daniel, J. M. O. (2019). Ultra-short wavelength operation of thulium-doped fiber amplifiers and lasers. *Optical Express*, 27(25), 36699-36707.

17. Singh, S. P., and Singh, R. S. (2012). Distributed raman fiber amplifier for s-band. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 6(11), 1157-1159.

18. Arwa, H. B., and Moustafa, H. A. (2020). Noise figure of distributed raman amplifier with different pumping configurations in s-band: A new approach. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4329-4334.

19. Prince, J., and Gupta, N. (2014). Comparative study of all optical amplifiers. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(11), 1522-1526.

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

21. El-Nahal, F. I., and Husein, A. H. M. (2013). Optimizing thulium doped fiber amplifier (TDFA) gain and noise figure for S-band 16x10 Gb/s WDM systems. *Optik*, 124, 4052-4057.

22. El-Nahal, F. I., and. Husein A. H. M. (2012). Thulium doped fiber amplifier (TDFA) for s-band WDM systems. *Open Journal of Applied Sciences*, 2, 5-9.

23. Dincer, A. ve Yücel, M. (2019). *Farklı pompalama yönleri için giriş sinyal gücünün Tulyum katkılı fiber yükselteç kazancına etkisi ve küçük sinyal kazancı analizi*. Uluslararası Karadeniz ile Kıyısı Olan Ülkeler Sempozyumu, Batum, 28-33.

24. Dincer, A. ve Yücel, M. (2019). *Tulyum katkılı fiber yükselteçlerde pompalama yönü, fiber uzunluğu ve iyon yoğunluğunun kazanç ve gürültüye etkisi*. Uluslararası Karadeniz ile Kıyısı Olan Ülkeler Sempozyumu, Batum, 333-339.

25. Qu, B. (2023). Gain optimization and data modeling of s-band of Tm-doped fiber amplifier based on genetic algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, Oxford, 2649.

26. Aozasa, S. (2006). S-band thulium-doped fiber amplifier employing high thulium concentration doping technique. *Journal of Lightwave Technology*, 24(10), 3842-3848.

27. Aozasa, S., and Shimizu, M., Masuda, H., and Yamada, M. (2007). Highly efficient s-band thulium-doped fiber amplifier employing high- thulium-concentration doping technique. *Journal of Lightwave Technology*, 25(8), 2108- 2114.

28. Sakamoto, T., Aozasa, S., Yamada, M., and Shimizu, M. (2006). Hybrid fiber amplifiers consisting of cascaded TDFA and EDFA for WDM signals. *Journal of Lightwave Technology*, 24(6), 2287- 2295.

29. Sakamoto, T., and Yamada, M. (2005). Gain spectra control of TDFA-EDFA hybrid fiber amplifiers employing pump loss control. *Optical Amplifiers and Their Applications*, Technical Digest, WB3.

30. Kumar, C., and Kumar, G. (2021). A high flatness gain subsisting of cascaded EDFA-TDFA hybrid optical amplifier for super dense wavelength division multiplexing system. *Optical and Quantum Electronics*, 53(10), 580.

31. Kaur, I., and Gupta, N. (2014). *Comparative analysis of hybrid TDFA-EDFA and hybrid EDFA-TDFA configurations for 96 channels DWDM system for S+C bands*. 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, 1-4.

32. Kaur, I., and Gupta, N. (2009) Statistical analysis of different configurations of hybrid doped fiber amplifiers. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 8, 517-522.

33. Kaur, I., Manna, M. S., and Marimuthu, (2021*). Implementing hybrid amplifiers for DWDM system using artificial intelligence methods*. 2021 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), Singapore, 1-5.

34. Kaur, I., and Gupta, N. (2010). *Effective and efficient conversion of solar energy using hybrid optical doped amplifiers.* 10th International Conference on Clean Energy (ICCE-2010), Famagusta, 15-17.

35. Singh, K., Singh, K., Devra, S., and Kaur, G. (2017). Some studies on gain spectra optimization of multi pumped Tm^{3+}-Rr^{3+} doped hybrid optical amplifier. *International Journal of Engineering and Techniques.* 3(4), 10-17.

36. Singh, K., Kaur, G., Singla, S. K., and Kaur, P. (2018). Enhanced gain in s+c band utilizing TDFA-FRA hybrid amplifier in cascaded and parallel configurations at reduced channel spacings for DWDM systems. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 20(1-2), 27-32.

37. Singh, R., and Singh, M. L. (2016). *Optimized hybrid silica TDFA-raman wideband amplifier yielding flat gain in s-band.* 2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies, New Delhi, 164-167.

38. Singh, R., and Singh, M. L. (2016). Silica based wideband raman–TDFA hybrid amplifier yielding flat gain in s-band. *Optik*, 127(2), 876-877.

39. Luthi, S. R., Silva, M. C., Bastos-Filho, C. J. A., Martins-Filho, J. F., and Gomes, A. S. L. (2005). TDFA/raman hybrid amplifiers covering the entire s-band pumped by a single laser. *IEEE photonics technology letters*, 17(10), 2050-2052.

40. Lin, Z., Tian, F., Wu, Y., Zhang, Q., Tian, Q., Wang, Y., and Yang, L. (2022). *Research on the novel hybrid amplifier based on raman and ZBLAN-TDFA.* 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), Shenzhen, 1-3.

41. Masum -Thomas, J., Crippa, D., and Maroney, A. (2001). *A 70 nm wide s-band amplifier by cascading TDFA and raman fibre amplifier.* Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest, Anaheim, WDD9.

42. Tench, R. E., Romano, C., Delavaux, J-M., Lenox, R., Byrne D., and Carney, K. (2020). In-depth studies of the spectral bandwidth of a 25 W 2 μm band PM hybrid Ho- and Tm-doped fiber amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 38(8), 2456-2463.

43. Tench, R., Amavigan, A., Romano, C., Traore, D., Delavaux, J-M., Robin, T., Cadier, B., Laurent, A., and Crochet, P. (2020). 3.5 W broadband PM hybrid amplifier at 2051 nm with holmium- and thulium-doped single-clad fibers. *Journal of Lightwave Technology*. 39(5), 1471-1476.

44. Obaid, H. M., Shahid, H., Zafrullah, M., Ali, M., Rashid, F., and Khan, B. (2023). Gain flattened s+c+l-band bidirectional thulium doped fiber/multi-section fiber optical parametric hybrid amplifier. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3), 102497.

45. Naji, A. W., Ibrahim, H. F. H., Ahmed, B., Harun S. W., and Mahdi, M. A. (2010). *Theoretical analysis of triple-pass erbium-doped fiber amplifier*. International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE'10), Kuala Lumpur, 1-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

55. Luo, X. (2023). Gain maximization of thulium-doped fiber amplifiers based on genetic algorithm with 1900 nm signal. *Journal of Physics: Conference Series*, 2649, 012022.

56. El-Nahal, F. I., and Husein, A. H. M. (2012). Thulium doped fiber amplifier (TDFA) for s-band WDM systems. *Optik*, 2(4B), 5-9.

57. Khamis, M. A., and Ennser, K. (2016). Theoretical model of a thulium-doped fiber amplifier pumped at 1570 nm and 793 nm in the presence of cross relaxation. *Journal of Lightwave Technology*, 34(24), 5675-5681.

58. Li, Z., Heidt, A.M., Daniel, J.M.O., Jung, Y., Alam, S.U., and Richardson, D.J. (2013). Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2μ. *Optical Express*, 21(8). 9289-9297.

59. Watekar, P.R., Ju, S., Han, W.T. (2006). A small signal power model for Tm-doped silica-glass optical fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(19), 2035-2037.

60. Singh, R., Singh, M.L. and Kaur, B. (2012). A novel triple pump 1050 nm+1400 nm+800 nm pumping scheme for thulium doped fiber amplifier. *Optik*, 123(20), 1815-1816.

61. Singh, R. and Singh, M.L. (2017). Performance evaluation of s-band thulium doped silica fiber amplifier employing multiple pumping schemes. *Optik*, 140, 565-570.

62. Emami, S.D., Harun, S.W., Abd-Rahman, F., Abdul-Rashid, H.A., Daud, S.A., Ghani, Z.A., and Ahmad, H. (2010). A theoretical study of double-pass: thulium-doped fiber amplifiers. *Optik*, 121(14), 1257-1262.

63. Gomes, A.S.L., Carvalho, M.T., Sundheimer, M.L., Bastos-Filho, C.J.A., Martins-Filho, J.F., Costa e Silva, M.B., von der Weid, J.P., and Margulis, W. (2003). Characterization of efficient dual-wavelength (1050+800 nm) pumping scheme for thulium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(2), 200-202.

64. Roy, F., Bayart, D., Sauze, A.L., and Baniel, P. (2001). Noise and gain band management of thulium-doped fiber amplifier with dual-wavelength pumping schemes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(8), 788-790.

65. Emami, S.D., Harun, S.W., Abd-Rahman, F., Abdul-Rashid, H.A., Daud, S.A., and Ahmad, H. (2009). Optimization of the 1050 nm pump power and fiber length in single-pass and double-pass thulium doped fiber amplifiers. *Progress In Electromagnetics Research*, 14, 431-448.

66. Peterka, P., Kubecek, V., Kasik, I., Matejec, V., Blanc, W., Faure, B., Dussardier, B., and Monnom, G. (2007). Thulium-doped silica-based optical fibers for cladding pumped fiber amplifiers. *Optical Materials*, 30 (1), 174-176.

67. Singh, R., and Singh, M.L. (2016). *Evaluating the effect of doping concentration and doping radius on the gain of silica based thulium doped fiber amplifier*. International Conference on Robotics and Automotion, Jaipur, 1-5.

68. Khamish, M.A., Ennser, K. (2019). Study of heavily thulium-doped fiber amplifier for optical telecom at 2μm. *Materials Science and Engineering*, 518(5), 052017.

69. Watekar, P.R., Ju, S., and Han, W.T. (2007). Analysis of 1064-nm pumped Tm-doped silica glass fiber amplifier operating at 1470 nm. *Journal of Lightwave Technology*, 25(4), 1045-1052.

70. Guimarães, G. F., Lüthi, S. R., Freitas, J. F. L., and Gomes, A. S. L. (2006). *S-band amplification and s-to c/l-band wavelength conversion using a TDFA/FOPA hybrid amplifier*. Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Technical Digest, CWM3.

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

72. 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.

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

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

75. Agrawal, G.P. (1997). Fiber Optic Communication Systems (1. Baskı). New York: John Wiley and Sons, 1-17.

76. Keiser, G. (1991). *Optical fiber communications*. Birleşik Krallık: McGraw-Hill, 376-396.

77. Senior, J.M. (1992) Optical Fibre Communications (3. Baskı). New York: Prentice Hall, 1-10.

78. Kikuchi N., and Sasaki, S. (1995). Analytical evaluation technique of self-phase modulation effect on the performance of cascaded optical amplifier systems. *Journal of Lightwave Technology*, 13(5), 868-878.

79. Islam, M. N. (2004). *Raman Amplifiers for Telecommunications-1*. New York: Springer, 9-12.

80. Sharma, H. B., Gulati, T., and Rawat. B. (2012). Evaluation of optical amplifiers. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(1), 663-667.

81. Yusuf, M., and Bhandari, V. (2019). Enhancement in the gain of EDFA in fibre optic communication. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(2), 411-417.

82. Urquart, P., (2011). *Advances in optical amplifiers*, Hırvatistan: InTech, 13.

83. Connelly, M. J. (2002). *Semiconductor optical amplifiers* (1. Baskı). Amerika Birleşik Devletleri: Kluwer Academic Publishers, Boston, 4-9.

84. Keiser, G. (2000). *Optical fiber communication* (3. Baskı). Singapur: McGraw Hill, 7-8.

85. Ghafouri-Shiraz, H. (2004). *The principles of semiconductor laser diodes and amplifiers*, London: Imperial College Press, 131-185.

86. Boydak, S., Yücel, M. (2017). Fiber kabloda meydana gelen Raman saçılmasının analizi. *Journal of Polytechnic*, 20(2), 257-265.

87. Yenilmez, G. (2014). *Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Optik Kazanç Kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 50-75.

88. Aslan, Z. (2013). *Çift Geçişli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Gürültü Faktörünün Azaltılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, 1-27.

89. Kale, R., Umesh, P., Mahadeo I., and Rameshwar T. M. (2013). Comparison of SRS & SBS (non linear scattering) in optical fiber. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 2(1), 118-122.

90. Torounidis, T., Andrekson P. A., and Olsson, B-E. (2006). Fiber-optical parametric amplifier with 70-dB gain, *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(10), 1194-1196.

91. Kylemark, P., Hedekvist, P. O., Sunnerud, H., Karlsson M., and Andrekson, P. A. (2004). Noise characteristics of fiber optical parametric amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 22(2), 409-416.

92. Norouzi, M., Badeka, P., Chahande P., and Briley, B. (2013). *A survey on rare earth doped optical fiber amplifiers*. IEEE International Conference on Electro-Information Technology, Rapid City, 1-11.

93. Sun, Y., Srivastava, A.K., Zhou, J. and Sulhoff, J.W. (1999), Optical fiber amplifiers for WDM optical networks. *Bell Labs Technical Journal*, 4(1), 187-206.

94. Li, Z., Heidt, A. M., Simakov, N., Jung, Y., Daniel, J. M. O., Alam, S. U., and Richardson, D. J. (2013). Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800- 2050 nm window. *Optics Express*, 21(22), 26450–26455.

95. Li, Z., Alam, S., Daniel, J., Shardlow, P., Jain, D., Simakov, N., Heidt, A., Jung, Y., Sahu, J., and Clarkson, W. (2014). *90 nm gain extension towards 1.7 μm for diode-pumped silica-based thulium-doped fiber amplifiers.* The European Conference on Optical Communication, Cannes, 1-3.

96. Heidt, A. M., Li, Z., and Richardson, D. J. (2014). High power diode-seeded fiber amplifiers at 2 μm from architectures to applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 20(5), 525–536.

97. Li, Z., Jung, Y., Daniel, J. M. O., Simakov, N., Shardlow, P. C., Heidt, A. M., Clarkson, A., Alam, S. U., and Richardson, D. J., (2015). *Extreme short wavelength operation*

(1.65-1.7μm) of silica-based thulium-doped fiber amplifier. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Los Angeles, 1-3.

98. Agger S. D., and Povlsen, J. H. (2006). Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers. *Optics Express*, 14(1), 50–57.

99. Simakov, N., Li, Z., Jung, Y., Daniel, J. M. O., Barua, P., Shardlow, P. C., Liang, S., Sahu, J. K., Hemming, A., Clarkson, W. A., Alam, S-U., and Richardson, D. J. (2016). High gain holmium-doped fibre amplifiers. *Optics Express*, 24(13), 13946-13956.

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

101. Supe, A., Olonkins, S., Udalcovs, A. Senkans, U., Mūrnieks, R., Gegere, L., Prigunovs, D., Grube, J., Elsts, E., Spolitis, S. (2021). Cladding-pumped erbium/ytterbium co-doped fiber amplifier for c-band operation in optical networks. *Applied Sciences*, 11(4), 1702.

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

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

104. Mirza, J., Ghafoor, S., Habib, N. (2021). Performance evaluation of praseodymium doped fiber amplifiers. *Optical Review*, 28(6), 611–618.

105. Nishida, Y., Yamada, M., Kanamori, T., Kobayashi, K., Temmyo, J., Sudo, S., and Ohishi Y. (1998). Development of an efficient praseodymium-doped fiber amplifier. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 34(8), 1332-1339.

106. Tawarayama, H., Ishikawa, E., Yamanaka, K., Itoh, K., Okada, K., Aoki, H., Yanagita, H., Matsuoka, Y. and Toratani, H. (2000). Optical amplification at 1.3 μm in a Praseodymium-doped sulfide-glass fiber. *Journal of the American Ceramic Society*, 83, 792-796.

107. Wannenmacher, S. (1996). *Praseodymium doped fibre amplifier for optical amplification at 1300 nm.* IEEE Global Telecommunications Conference, London, 1618-1623.

108. Alharbi, A.G., Mirza, J., Raza, M., and Ghafoor, S. (2022). Performance enhancement of praseodymium doped fiber amplifiers. *Computers, Materials & Continua*, 73(3), 1118-1129.

109. Kanwal, B., Armghan, A., Ghafoor, S., Atieh, A., Sajid, M., Kausar, T., Mirza, J., and Lu, Y. (2022). Design and analysis of an o+e-band hybrid optical amplifier for CWDM systems. *Micromachines*, 13, 1962.

110. Ramírez Martínez, N. J. (2021). *Development of Highly Efficient Thulium-Doped High Power Fibre Lasers*. Doctoral Thesis, University of Southampton, Southampton, 13.

111. Hauben, S. S. (1933). The derivations of the names of the elements. *Journal of Chemical Education*, 10(4), 227.

112. Rahmat, N. A. (2017). *Investigation of the Characteristics of Thulium Doped Alümina Nanoparticles for Applications in Silica-Based Fibers.* Master Thesis of Engineering Science, Multimedia University, Malaysia, 6-12.

113. Marques, A. J. (2020). *Optical Coherence Tomography for the Evaluation of Energy Seals and the Subsequent Evaluation of the Thulium Laser as a Hemostatic Instrument*. Master of Applied Science Thesis, Ryerson University, Canada, 7-32.

114. Kronenberg, P., and Olivier T. (2019). The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser-a systematic review. *Translational Andrology and Urology*, 8(4), 398.

115. Wang, W., Liu, H., and Xia, S. (2016). Thulium laser treatment for bladder cancer. *Asian Journal of Urology*, 3(3), 130-133.

116. Engels, E., Westlake, M., Li, N., Vogel, S., Gobert, Q., Thorpe, N., and Tehei, M. (2018). Thulium Oxide Nanoparticles: A new candidate for image-guided radiotherapy. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 4(4), 044001.

117. Zhang, N., Chen, M., Sun, H., Yang, Y., Chen, T., Chen, X., Xiao, M., Chen, B., and Luo Y. (2021). Optimization and application of high power thulium-doped fiber laser. *Journal of Physics: Conference Series*, 1746(1), 012083.

118. Niu, C., Wang, B., Xing, Y., Su, W., He, C., Xiao, L., Xu, Y., Zhao, S., Cheng, Y., and Shi, J-W., (2021). Thulium modified MnOx/TiO2 catalyst for the low-temperature selective catalytic reduction of NO with ammonia. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125858.

119. Internet: Tulyum, URL:https://www.britannica.com/science/thulium / Son Erişim Tarihi: 20.02.2024.

120. Ndebeka, W. I. (2011). *Characterization of Thulium Doped Fiber for mid Infrared Lazer Applications*. Doctoral dissertation, University of Stellenbosch, Stellenbosch, 42.

121. Jian, L. C. (2016). *Design, Development and Characterisation of S-band Optical Amplifier*. Doctoral dissertation, Multimedia University, Malaysia, 1-26.

122. Johnsen, U. (1958). Spectrum and Zeeman effect of trivalent thulium in thulium ethyl sulfate. *Zeitschrift fuer Physik*, 152(4), 454-469.

123. Gruber, J. B., and Conway, J. G. (1960). Electronic energy levels and crystal quantum states of Tm (IV). *The Journal of Chemical Physics*, 32(4), 1178-1182.

124. Miniscalco, W. J. (2001). *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers*, New York: Marcel Dekker, Inc., 17-112.

125. Peterka, P., Faure, B., Blanc, W., Karasek, M., and Dussardier, B. (2004). Theoretical modelling of s-band thulium-doped silica fibre amplifiers. *Optical and Quantum Electronics*, 36(1-3), 201-212.

126. Komukai, T., Yamamoto, T., Sugawa T., and Miyajima, Y. (1995). Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 /spl mu/m. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31(11), 1880-1889.

127. Antipenko, B., Mak, A., Raba, O Seĭranyan, K., Uvarova, T. (1983). New lasing transition in the Tm^{3+} ion. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 13, 558-560.

128. Shukla, P., and Kaur, K. P. (2013). Performance analysis of EDFA for different pumping configurations at high data rate. *Global Journals Inc*, 13(9) 19–23.

129. Yucel, M., and Goktas. H. H. (2008). Determination of minimum temperature coefficient of c-band EDFA. *Journal of Applied Sciences*, 8(23), 4464-4467.

130. Mahad, F. D., Supa'at, A. S. B. M., and Sahmah, A. (2009). EDFA gain optimization for WDM system. *Elektrika*, 11 (1), 34-37.

131. Semmalar, S., Poonkuzhali, and Devi, P. (2011). *Optimized gain EDFA of different lengths with an influence of pump power.* International Conference on Electronics, Communication and Computing Technologies, Villupuram, 90-95.

132. Cokrak, A. C., and Altuncu, A., (2004). Gain and noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFA). *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 4(2), 1111-1122.

133. Yucel, M., and 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), 1863-1870.

134. Yam, SS-H., et al. (2005). Novel pumping schemes for fluoride-based thulium-doped fiber amplifier at 690 and 1050 nm (or 1400 nm). *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(5), 1001-1003.

135. Miglani, R., Singh, G., Singh, G., and Agrwal, D.P. (2020). Gain optimization of 100×40 gbps high capacity DWDM fiber optical link using hybrid amplification techniques. *Journal of Optics*, 49, 323–331.

136. Ali, M. H., Abdullah, F., & Al-Mashhadani, T. F. (2020). Gain-control technique in double-pass parallel hybrid fiber amplifier. *Optical and Quantum Electronics*, 52, 1-7.

137. Saleh, M. A., Abass, A. K., & Ali, M. H. (2022). Enhancing performance of WDM-RoFSO communication system utilizing dual channel technique for 5G applications. *Optical and Quantum Electronics*, 54(8), 497.

138. Kaur, A., Singh, M. B., Atieh A. (2019). SOA/EDFA/RAMAN optical amplifier for DWDM systems at the edge of l & u wavelength bands, *Optical Fiber Technology*, 52, 101971.

139. Bastos-Filho, C. J. A., Martins-Filho J. F., and Gomes, A. S. L. (2003). *38 dB gain from a double-pass single-pump thulium doped fiber amplifier*. Proceedings of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Foz do Iguacu, 1, 125-128.

140. Kasamatsu, T., Yano, Y., and Sekita, H. (1999). Novel 1.50-μm band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier by using dual wavelength pumping of 1.05 μm and 1.56 μm. *Optical Amplifiers and their Applications*, 30, NW1.

141. Dunya, M. Z., and Hammadi, A.K. (2021). Performance analysis on double-pass thulium-doped fiber amplifier for 16-channel WDM system at s-band. *Journal of Optical Communications*, 000010151520200313.

142. Jawad, M., Atieh, A., Menhas, M.I., Ghafoor, S., Magam, M., Jamal, L., Sheikh, S. I. M., Qureshi, K.K. (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.

143. Emami, S. D., Harun, S. W., Rahman, F. A., Abdul-Rashid, H.A., Ahmad, H. (2008). Effects of an auxiliary pump on the performance of TDFA. *Laser physics*, 18, 977-982.

144. Tench, R. E., Amavigan, A., Chen, K., Delavaux, J., and Robin, T., Cadier, B., and Laurent, A. (2020). Experimental performance of a broadband dual-stage 1950 nm PM single-clad tm-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 32(15), 956-959.

145. Tench, R. E., Clement, R., and Delavaux, J.M. (2018). Multistage single clad 2 μm TDFA with a shared l-band pump source. *Applied Optics*, 57(21), 5948-5955.

146. Al-Khateeb, K. A., Sellami, A. and Belloui, B., A. (2006). *High gain EDFA using double-pass dual-stage amplification*. Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering, Kuala Lumpur, 812-814.

147. Naji, A. W., Mohammed, M. A., Zaidan, B.B., Zaidan, A. A., ALKhateeb, W., Al-Khateeb, K. A. S. and Mahdi, M. A. (2011). A novel theoretical analysis of quadruple pass erbium doped fiber amplifier. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(10), 2393-2398.



Gazili olmak ayrıcalıktır