



**HALKA TİPİ ERBİYUM KATKILI FİBER LAZERLERDE GÜRÜLTÜ
ŞEKLİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Bengisu ÜNALAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- 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 çalışmada 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.

Bengisu Ünalın

20/06/2022

HALKA TİPİ ERBİYUM KATKILI FİBER LAZERLERDE GÜRÜLTÜ ŞEKLİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Bengisu ÜNALAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Erbiyum katkılı fiber lazerler (EKFL); kolay kurulumları, yüksek çıkış güçleri, yüksek sinyal-gürültü oranları ile fiber optik haberleşmede, optik sensör tasarımlarında, biyofotonik çalışmalarda, sinyal işlemede ve spektroskopi çalışmalarında oldukça önemli rol oynamaktadır. EKFL'lere ait gürültünün bastırılması ile daha yüksek optik sinyal-gürültü oranı (OSGO) elde edilir ve bu sayede optik sistem, daha yüksek bir bant genişliğine sahip olur, bunun sonucunda da daha hızlı çalışır. Gürültüdeki bu iyileştirme, dalga boyu bölmeli çoğullamalı (DBÇ) sistemler için önemlidir. Bu tez çalışmasında OptiAmplifier 4.0 benzetim programı kullanılarak EKFL tasarımları yapılmıştır. Lazer kavitesindeki erbiyum katkılı fiber (EKF) boyunun seçiminde en yüksek çıkış gücünü elde etmek üzere optimizasyon yapılmıştır ve sonrasında elde edilen uzunluk değeri ile döngü tipi erbiyum katkılı fiber yükselteç (EKFY) tasarımına dayanan halka tipi EKFL'ye ait benzetim ve deneysel kurulum sonuçları elde edilmiştir. Klasik halka tipi EDFL sonuçları için hem 1480 nm ileri yönlü pompalama; hem de 1480 nm ileri, 980 nm geri pompalama olmak üzere çift yönlü pompalama yapılmıştır. İlk olarak; literatürde daha önce çalışılmış olan döngü EKFY tabanlı EKFL tasarımında, çıkış kuplöründen önce bir 1x2 kuplör daha eklenmiştir (%1-%99 ve %50-%50 bölme oranları denenmiştir) ve OSGO'yu sırası ile ~15 dB ve ~23 dB iyileştirdiği görülmüştür. İkinci tasarımda ise ikinci kuplör eklenmiş olan yeni EKFL düzenine doğrusal olmayan yükselteç döngü aynası (DOYDA) eklenmiş ve daha da yüksek OSGO elde edildiği görülmüştür (~29 dB). Bununla birlikte, tüm yeni tasarımlarda çıkış gücünde azalma olduğu tespit edilmiştir (sırasıyla 11,14 dBm; 5,4 dBm ve 0,83 dBm). Tüm deneysel düzeneklerde, pompalama lazerindeki güç artışıyla; EKFL çıkışında daha yüksek güç elde edildiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 90532
Anahtar Kelimeler : Halka tipi erbiyum katkılı fiber lazer, gürültü şekli iyileştirilmesi, DOYDA
Sayfa Adedi : 83
Danışman : Prof. Dr. Murat YÜCEL

IMPROVING NOISE FACTOR IN RING TYPE ERBIUM DOPED FIBER LASERS

(M. Sc. Thesis)

Bengisu ÜNALAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

Erbium doped fiber lasers (EDFLs) are very important for optical fiber communication, optical sensor designs, biophotonic studies, signal processing and spectroscopy studies due to their easy setup, high output power and high signal-noise ratio. By reducing the noise in EDFLs, higher optical signal-noise ratio (OSNR) value is achieved, consequently the optical system gets broader bandwidth and works faster. This improvement in noise is important for wavelength division multiplexing systems. In this thesis, EDFLs have been designed in OptiAmplifier 4.0 simulation program. Optimization for achieving the highest output power has been used for determining the length of erbium doped fiber (EDF) that is in the laser cavity. Following this, simulation and experiment values (output power and OSNR) for ring type EDFL based on loop type erbium doped fiber amplifier (EDFA) in optimized length have been obtained. In conventional ring type EDFL, both 1480 nm forward pumping and 1480 nm - 980 nm bi-directional pumping have been implemented for measurement. Firstly, a 1x2 coupler (1%-99% and 50%-50% coupler ratios have been analyzed) has been added before the output coupler of ring type EDFL based on loop type EDFA that studied in the literature and it has been observed that it improved the OSNR by ~15 dB and ~23 dB, respectively. In the second design, a non-linear amplifying loop mirror (NALM) has been added to the new EDFL design that has the second coupler and it has been observed that even higher OSNR was obtained (~29 dB). However, reductions in output power have been found for all new designs (11,14 dBm; 5,4 dBm and 0,83 dBm, respectively). In all experimental setups it has been observed that with the power increase in the pumping laser; higher power is obtained at the EDFL output.

Science Code : 90532

Key Words : Ring type erbium doped fiber laser, improving noise figure, NALM

Page Number : 83

Supervisor : Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Öğrencisi olmaktan mutluluk duyduğum, her zaman bana yol gösterici olan ve akademisyenlik yolunda adım atmama ilham olan değerli hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL'e ve her koşulda beni destekleyen canım anneme, babama, ikizime sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK TEMELLER	8
2.1. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Teorisi	8
2.2. Erbiyum Katkılı Fiber Lazer Teorisi	11
3. ERBİYUM KATKILI FİBER LAZER TASARIMI	14
3.1. Gürültüyü Bastırmak İçin Uygulanan Tasarımlar	15
3.1.1 Doğrusal olmayan optik döngü aynası	15
3.1.2 Doğrusal olmayan yükselteç döngü aynası	16
4. ERBİYUM KATKILI FİBER LAZER TASARIMLARINA AİT BENZETİM VE DENEYSEL KURULUM SONUÇLARI	18
4.1. Erbiyum Katkılı Fiber Lazer Bileşenleri	18
4.2. İleri Yönlü Pompalanmış Erbiyum Katkılı Fiber Lazer	19
4.3. Çift Yönlü Pompalanmış Erbiyum Katkılı Fiber Lazer	38
4.4. Ön kuplörlü Döngü Tipi EKY Tabanlı Erbiyum Katkılı Fiber Lazer.....	49
4.5. Ön kuplörlü Döngü Tipi EKY Tabanlı ve Doğrusal Olmayan Yükselteç Aynalı Erbiyum Katkılı Fiber Lazer	68

	Sayfa
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kullanılan EKF'nin parametreleri	18
Çizelge 4.2. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri	22
Çizelge 4.3. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının benzetim değerleri	24
Çizelge 4.4. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri	28
Çizelge 4.5. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının benzetim değerleri	30
Çizelge 4.6. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri	34
Çizelge 4.7. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının benzetim değerleri	36
Çizelge 4.8. %10 çıkış kuplöründe, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri	39
Çizelge 4.9. %10 çıkış kuplöründe, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri	40
Çizelge 4.10. %10 çıkış kuplöründe, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri	41
Çizelge 4.11. %10 çıkış kuplöründe, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri	42

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.12. %10 çıkış kuplöründe, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	43
Çizelge 4.13. %10 çıkış kuplöründe, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	44
Çizelge 4.14. %10 çıkış kuplöründe, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	45
Çizelge 4.15. %10 çıkış kuplöründe, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	46
Çizelge 4.16. %10 çıkış kuplöründe, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	47
Çizelge 4.17. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	50
Çizelge 4.18. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	51
Çizelge 4.19. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	52
Çizelge 4.20. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	53

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.21. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	54
Çizelge 4.22. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	55
Çizelge 4.23. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	56
Çizelge 4.24. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	57
Çizelge 4.25. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	58
Çizelge 4.26. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	59
Çizelge 4.27. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	60
Çizelge 4.28. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	61
Çizelge 4.29. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	62

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.30. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	63
Çizelge 4.31. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	64
Çizelge 4.32. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	65
Çizelge 4.33. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	66
Çizelge 4.34. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri.....	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Erbiyum iyonlarına ait üç seviyeli enerji diyagramı.....	8
Şekil 2.2. OSGO değerinin hesaplanması örnekleri a) 1480 nm ileri yönlü pompalamada 1535 nm’de OSGO b) %50 ön kuplörlü EKFL’ye ait 1550 nm’de OSGO c) DOYDA eklenmiş ön kuplörlü EKFL’ye ait 1562 nm’de OSGO	13
Şekil 3.1. Lineer kaviteli erbiyum katkılı fiber lazer	14
Şekil 3.2. Halka tipi erbiyum katkılı fiber lazer.....	14
Şekil 3.3. Doğrusal olmayan optik döngü aynası	15
Şekil 3.4. Doğrusal olmayan yükselteç döngü aynası.....	17
Şekil 4.1. İleri yönlü pompalanmış EKFL	19
Şekil 4.2. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait benzetim verileri	20
Şekil 4.3. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait benzetim verileri	20
Şekil 4.4. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin benzetim verileri	21
Şekil 4.5. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait deneysel veriler	22
Şekil 4.6. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	23
Şekil 4.7. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin deneysel kurulum verileri.....	23
Şekil 4.8. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompa gücünde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması.....	25
Şekil 4.9. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada optimum pompa gücünde benzetim ve deneysel verilere ait dalgalanma	25
Şekil 4.10. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait benzetim verileri	26

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait benzetim verileri	26
Şekil 4.12. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin benzetim verileri	27
Şekil 4.13. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait deneysel veriler	28
Şekil 4.14. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	29
Şekil 4.15. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin deneysel kurulum verileri.....	30
Şekil 4.16. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompa gücünde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması.....	31
Şekil 4.17. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada optimum pompa gücünde benzetim ve deneysel verilere ait dalgalanma	31
Şekil 4.18. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait benzetim verileri	32
Şekil 4.19. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait benzetim verileri	33
Şekil 4.20. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin benzetim verileri	33
Şekil 4.21. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait deneysel veriler	34
Şekil 4.22. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	35
Şekil 4.23. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin deneysel kurulum verileri.....	36
Şekil 4.24. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompa gücünde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.25. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada optimum pompa gücünde dalgalanma miktarları.....	37
Şekil 4.26. Çift yönlü pompalanmış EKFL	38

Şekil	Sayfa
Şekil 4.27. %10 çıkış kuplöründe, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	39
Şekil 4.28. %10 çıkış kuplöründe, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	40
Şekil 4.29. %10 çıkış kuplöründe, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	41
Şekil 4.30. %10 çıkış kuplöründe, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	42
Şekil 4.31. %10 çıkış kuplöründe, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	43
Şekil 4.32. %10 çıkış kuplöründe, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	44
Şekil 4.33. %10 çıkış kuplöründe, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	45
Şekil 4.34. %10 çıkış kuplöründe, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	46
Şekil 4.35. %10 çıkış kuplöründe, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler.....	47
Şekil 4.36. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü ve 980 nm geri yönlü pompalamada maksimum pompa güçlerinde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması	48
Şekil 4.37. Çift yönlü pompalanmış EKFL'nin maksimum ve minimum pompa güçlerinde dalgalanma miktarları	48
Şekil 4.38. Ön kuplörlü döngü tipi EKY tabanlı EKFL	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.39. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	50
Şekil 4.40. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	51
Şekil 4.41. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	52
Şekil 4.42. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	53
Şekil 4.43. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	54
Şekil 4.44. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	55
Şekil 4.45. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	56
Şekil 4.46. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	57
Şekil 4.47. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	58
Şekil 4.48. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	59
Şekil 4.49. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	60
Şekil 4.50. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	61

Şekil	Sayfa
Şekil 4.51. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	62
Şekil 4.52. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	63
Şekil 4.53. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	64
Şekil 4.54. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	65
Şekil 4.55. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	66
Şekil 4.56. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşı lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler	67
Şekil 4.57. Ön kuplörlü döngü tipi EKY tabanlı ve doğrusal olmayan optik döngü aynalı erbiyum katkılı fiber lazer	68
Şekil 4.58. 1 m EKF içeren doğrusal olmayan yükselteç döngü aynalı EKFL deneysel veriler	68
Şekil 4.59. DOYDA eklenmiş ön kuplörlü EKFL'ye ait maksimum pompalama güçlerinde dalgalanma	69
Şekil 4.60. Tüm tasarımlara ait maksimum pompalama gücünde EKFL çıkış güçleri ..	70
Şekil 4.61. Tüm tasarımlara ait maksimum pompalama gücünde EKFL'nin OSGO değerleri	70
Şekil 4.62. Benzetim programında farklı EKFL tasarımlarına ait lazer çıkış güçleri.....	71
Şekil 4.63. Benzetim programında farklı EKFL tasarımlarına ait OSGO değerleri.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Kendiliğinden yayılma oranı
A₂	2. Seviye kendiliğinden düşme oranı
A₂₁	Seviye 2'den 1'e kendiliğinden düşme oranı
A₂₁^r	Seviye 2'den 1'e ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A₂₁^{nr}	Seviye 2'den 1'ye ışımasız kendiliğinden düşme oranı
A₃^r	3. seviye ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A₃₁^r	Seviye 3'den 1'e ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A₃₂	Seviye 3'den 2'ye kendiliğinden düşme oranı
A₃₂^r	Seviye 3'den 2'ye ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A₃₂^{nr}	Seviye 3'den 2'ye ışımasız kendiliğinden düşme oranı
α	Kuplör bölme oranı
dB	Desibel
Er³⁺	Erbiyum
Er	Erbiyum
 E_{giriş} 	Kuplöre giren ışık yoğunluğu
 E_{iletilen} 	Kuplör çıkış portundan iletilen ışık yoğunluğu
 E_{yansıtılan} 	Kuplörden geriye yansıtılan ışık yoğunluğu
H	Planck sabiti
Hz	Hertz
L	Fiber boyu
mW	Miliwatt
μs	mikro saniye
N₁	1. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
N₂	2. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
N₃	3. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
Nm	Nanometre

Simgeler**Açıklamalar**

Nr	Işımasız yayılma
P_p	Pompa gücü
P_{YKY}[±]	Çift yönlü kendiliğinden yükseltilmiş yayılma gücü
R	Işımalı yayılma
R	Pompalama oranı
R₁₃	1. seviyeden 3. seviyeye pompalama oranı
R₃₁	3. seviye ile 1. seviye arasındaki pompalama oranı
T	Foton ömrü
W	Uyarılmış yayılma oranı
W₁₂	Seviye 1'den seviye 2'ye uyarılmış soğurum oranı
W₂₁	Seviye 2'den seviye 1'ye uyarılmış yayılım oranı
Λ	Optik sinyalin dalga boyu
Φ	Faz kayması
ρ	İyon yoğunluğu

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DBÇ	Dalga boyu bölmeli çoğullama
dBm	1 mW ile ilgili desibel
EKF	Erbiyum katkılı fiber
EKFL	Erbiyum katkılı fiber lazer
EKFY	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
FBI	Fiber Bragg ızgara
MEMS	Mikro elektro mekanik sistem
MZG	Mach Zender girişimölçer
OSA	Optik spektrum analizörü
OSGO	Optik sinyal-gürültü oranı
YKY	Yükseltilmiş kendiliğinden yayılım
YMBO	Yan mod bastırma oranı
DOODA	Doğrusal olmayan optik döngü aynası
DOYDA	Doğrusal olmayan yükselteç döngü aynası

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde artan iletişim kapasitesi ve yüksek hızda veri iletimi ihtiyacıyla birlikte fiber optik iletişim teknikleri oldukça önem kazanmıştır. Kolay kurulum, düşük maliyet, çevre koşullarına karşı dayanıklılık, düşük gürültü, elektromanyetik dalgalardan etkilenmeme, yüksek bant genişliği ve buna bağlı olarak yüksek hızda veri iletimi, düşük güç kaybı ile uzak mesafelere daha rahat veri aktarımı gibi avantajlar, fiber optik teknolojisini daha da tercih edilir kılmaktadır. Bu avantajların yanında; ek yapımındaki zorluk, alıcı ve verici arasındaki mesafenin artışı ile optik sinyalin güçlendirilmesi gerekmesi, fiber optik kablonun bakır kablolarla kıyasla daha kırılkan ve hassas olması bu teknolojinin olumsuz tarafları olarak sayılabilir.

Nadir toprak katkılı fiberler ile ışık yükseltme işlemi 60 yıldan daha eski bir tarihe dayanmaktadır. Schawlow ve Townes'in 1958 yılında gerçekleştirdikleri ilk optik mazer tasarımı; fiber optik lazerler için önemli bir dönüm noktası olmuştur. 1960 yılında ise Maiman, ilk kez lazer etkisini tanımlamıştır. 1961 yılında Snitzer, optik fiberi; kazanç ortamı olarak kullanmıştır ve bir yıl sonra da neodmiyum katkılı baryum fiberler ile de deneysel olarak kanıtlamıştır [1].

Temel anlamı ile tamamen bir erbiyum katkılı fiber yükselteçten (EKFY) tasarlanabilen, tümüyle optik ekipmanlarla kurulabilen erbiyum katkılı fiber lazerlerin (EKFL) emisyon spektrumu, EKFY'lerin kazanç spektrumu ile eşleşmektedir ve optik haberleşme için çok önemli olan, en az zayıflamanın yaşandığı 1550 nm civarında geniş bir bant aralığında dalga boyları ayarlanabilmektedir. Çeşitli dalga boylarında kullanılabilen pompa lazerleri, dalga boyu bölmeli çoğullama (DBÇ) kuplör ile EKF'ye iletilir. Erbiyum katkılı fiber (EKF) içerisindeki Er^{3+} iyonları, pompalama fotonlarının emilimi ile, seçilen pompa dalga boyuna bağlı olarak toprak seviyesinden yarı kararlı seviyeye ya da 3. seviyeye geçiş yaparlar. 980 nm pompa lazeri kullanılması halinde 3. seviyeye çıkan Er^{3+} iyonları, hızlı bir şekilde ($<1\mu$ sn) yarı kararlı seviyeye düşerler. Pompalama için 1480 nm kullanılması halinde, Er^{3+} iyonları direkt yarı kararlı seviyeye çıkmaktadırlar. Yarı kararlı seviyede bulunan Er^{3+} iyonları kendiliğinden toprak seviyesine inmektedirler ve bu iniş zamanında iki seviye arasında (yarı kararlı seviye ve toprak seviyesi) foton yayılımı gerçekleşir. Gerçekleşen bu foton yayılımı EKF içerisinde farklı yönlerde doğru, farklı polarizasyonlarda ve farklı

fazlarda olmaktadır. Bu durumda sistem içerisinde EKFY'lerdeki gibi herhangi bir giriş sinyali uygulanmaması durumunda EKFL'nin yükseltilmiş kendiliğinden yayılım (YKY) spektrumu elde edilir. Bu spektrum; EKFL'nin çıkış spektrumu ile aynıdır. EKFY tasarımına giriş sinyali uygulanması durumunda; giriş sinyalinin yükseltme seviyesi YKY spektrumuna bağlıdır. Pompalama işleminin ardından lazer çıkışında istenen dalga boyunun seçimi için filtre kullanılmaktadır. Filtreyle; istenilen dalga boyuna ait sinyal, istenen bant genişliğinde seçilir ve geri kalan YKY spektrumu bastırılmış olur. EKFL için, ayarlanan bu dalga boyunun bir kısmı çıkış olarak alınıp optik spektrum analizöründe (OSA) gözlemlenir ve belli bir oranı tekrar döngü içerisine yönlendirilip EKFY tasarımındaki giriş sinyali olarak görev alır. Filtrenin düzenek içerisinde yerleştirildiği konum, lazerin gürültü seviyesini etkilemektedir. Filtrenin, çıkış kuplöründen önce yerleştirilmesi; YKY gürültüsünde önemli derecede azalma olduğu göstermiştir [2].

Basit bir düzenekle kurulabilen EKFL'ler yüksek sinyal-gürültü oranına, yüksek çıkış gücüne, sensör ve DBÇ teknolojisi için oldukça önemli olan dar bant genişliğine, günümüzdeki gelişmelerle birlikte daha kolay bir şekilde elde edilebilen geniş bir bant aralığında düz çıkış eğrisine sahiplerdir.

EKFL'ler optik sensörlerde [3-7], DBÇ ağlarda [8,9], fiber optik haberleşme tekniklerinde [10-12], biyofotonik çalışmalarda [13-16], sinyal işlemede [17-19], cihazların testinde [20,21] ve spektroskopide [22-24] sıkça kullanılmaktadır.

EKFL'nin gürültü oranının bastırılması ile daha geniş bir bant aralığında veri iletimi yapılabilmektedir. Bu sayede sisteme ait sinyal-gürültü oranının artması; fiber optik ağlar, optik sensörler, optik haberleşme teknolojisi, spektroskopi çalışmaları ve sinyal işlemede oldukça avantaj sağlamaktadır; sistem verimi artmaktadır.

Literatür çalışmaları

Cai ve Liao (2020) halka tipi kaviteli EKFL deney düzeneklerinde yüksek konstantrasyonlu EKF ve akortlama cihazı olarak polarizasyon denetleyicisi kullanmışlardır. Modlar arası yarışmayı bastırmak için 3 dB kuplör ile doğrusal olmayan optik döngü aynası (DOODA) düzeneği sağlanmıştır ve bu döngü içerisinde 3 km tek modlu fiber (TMF) kullanılmıştır. Böylece doğrusal olmayan faz kayması elde edilmiştir ve farklı dalga boyları arasındaki güç eşitlenip yan mod bastırma oranı (YMBO) iyileştirilmiştir. Her 10 dakikada ölçüm alınmıştır ve boy optimizasyonu yapılan deney düzeneğinde çıkış dalga boyları arasındaki güç farklı 0,08 dB; optimizasyonsuz düzenekte ise 0,23 dB elde edilmiştir. Düzeneklere ait YMBO değerleri sırasıyla 25,584 dB ve 33,243 dB'dir [25].

Zhao ve diğerleri (2020), çalışmalarında DOODA ve doğrusal olmayan yükselteç döngü aynası (DOYDA) yapılarının yoğunluğa bağlı kayıp etkisi ile çoklu dalga boylarında stabil bir çıkış elde etmişlerdir. Doğrusal olmayan döngü tarafından etki eden yoğunluk kaybı, dalga boyları arasındaki çekişmeyi bastırmada kullanılmıştır. Polarizasyon denetleyicilerinin ayarlanması ile dalga boyları arasındaki aralık ve çıkış dalga boylarının sayısı ayarlanmıştır. DOYDA kullanımıyla DOODA ile ortalama 6-8 olan çıkış dalga boyu sayısı 10'a yükselmiştir. Düzeneğe DOODA ya da DOYDA eklenmesi ile düz kazanç eğrisinden uzaklaştığı görülmüştür [26].

Yamashita ve Nishihara (2001) C bant erbiyum katkılı fiber lazerlerde kullanılan EKF'in boyunu arttırarak lazer spektrumunun arttırılabileceğini gözlemlemişlerdir. Bu sayede L bandını da kapsayacak şekilde 1520 nm – 1600 nm arasında bir çıkış spektrumu elde edilmiştir. Bununla birlikte daha kısa EDF boylarında daha yüksek çıkış gücü elde edildiği gözlemlenmiştir. Tasarım içerisinde çıkış dalga boyunun ayarlanabilmesi için Fabry-Perot filtre; daha düşük YKY gürültüsü oluşması amacıyla %10 değerinde seçilen çıkış kuplöründen önce yerleştirilmiştir ve pompalama dalga boyu 1480 nm seçilmiştir [27].

Bouzid (2010), lineer kavite ve halka tipi kaviteye sahip fiber lazerlerin çıkış karakteristikleri incelemiştir. Deney için lineer kaviteli fiber lazerler; tek aşamalı fiber lazerler ve çift aşamalı fiber lazerler olmak üzere çift başlık altında araştırılmıştır. Tek aşamalı ve halka tipi kaviteli fiber lazerlerin çıkış özelliklerinin karşılaştırılması ile, tek

aşamalı fiber lazerlerde daha yüksek çıkış gücü, daha düz bir çıkış eğrisi ve daha yüksek yan bantları bastırma oranı elde edildiği görülmüştür. Tasarımlar içerisinde en yüksek çıkış gücü ise çift geçişli lineer kaviteli lazerlerde 18 dBm olarak elde edilmiştir. Tüm konfigürasyonlarda pompa gücündeki artışın, lazer çıkış gücünde artış sağladığı görülmüştür [2].

Wang, Shang, Mu, Quiao ve Yu (2020) çoklu dalga boyu yayılmasını bastırmak için üç halkalı yeni bir tasarım geliştirmişlerdir. Bu halka yapısı, tek dalga boyunda çalışmayı güçlendiren mod bastıran filtre olarak görev almıştır. 40 dakika boyunca alınan ölçümlerde 0,01 dB güç kayması ve 0,08 nm dalga boyu kayması elde edilmiştir. Düzenek, 64 dB yüksek OSGO oranına sahiptir [28].

Sadık, Durak ve Altuncu (2020) döngü tipi EKFY ve çift geçişli EKFY tasarımına dayanan iki yeni EKFL tasarımı yapmışlardır. C ve L bandı kapsayan 70 nm dalga boyu aralığında ortalama -3 dB çıkış gücü; yaklaşık 60 dB OSGO değeri ile elde edilmiştir. Döngü EKFL yapısında, çift taraflı pompalanmış olan EKF'nin YKY sinyalleri 3 dB kuplörle birleştirilmiştir. Birleştirilen bu YKY sinyalleri sirkülatörle halka döngü içerisine iletilmiştir. Çift geçişli EKFL tasarımında ise sirkülatörle bağlantısı olmayan ikinci pompa tarafında optik ayna kullanılarak sinyalin tekrar EKF'ye geçmesi sağlanmıştır. Dalga boyu seçimi için mikro elektro mekanik sistem (MEMS) tabanlı elektronik bir ayarlanabilir bant geçiren filtre kullanılmıştır. Çıkış kuplörü için %50 ve %10 olmak üzere iki değerde sonuçlar alınmıştır. Yüksek bölme oranına sahip kuplörde yaklaşık 6,67 dB daha yüksek çıkış gücü elde edilmiştir fakat çıkış spektrum aralığında daralma olduğu gözlemlenmiştir [29].

Yang ve diğerleri (2019) ikinci bir halka yapısının içerisinde pompalanmamış olarak EKF kullanmışlardır. Bu şekilde doyurulabilir soğurucu olarak görev alan EKF, mod bastırıcı filtre ve otomatik takip eden dar bant filtre olarak çoklu mod osilasyonunu engellemiştir. 1546 nm - 1580 nm aralığında lazer çıkış gücü -6,9 dBm – 5,3 dBm arasında değerler almıştır ve OSGO oranı da 30,7 dB – 39,6 dB aralığında elde edilmiştir. Ayrıca ikinci halka yapısı ile lazerin spektrum aralığının yaklaşık olarak 20 nm arttığı gözlemlenmiştir [30].

Shang ve diğerleri (2022) lineer kavite içerisinde iki adet sirkülatör kullanımı ile geri yönlü YKY gürültüsünü bastırıp kavitedeki gürültüyü azaltmışlardır. Düzenekte; doyurulabilir soğurucu olarak pompalanmamış EKF kullanılmıştır. 100 mW pompalama gücü ile 48 dB OSGO ve ultra dar bant genişliği (528 Hz) elde edilmiştir. Lazer dalga boyu seçimi için fiber Bragg ızgara (FBI) kullanılmıştır [31].

Yeh, Lee ve Chi (2003) 1480 nm - 1522 nm bant aralığında 30 dB yan mod bastırma oranına (bu değer, 1508 nm’de yüksek kazanç ve YKY etkisinin bastırılması etkisi ile 64,2 dB’ye yükselmiştir); 1482 nm - 1517 nm bant aralığında yaklaşık -2 dBm çıkış gücüne sahip S bant EKFL tasarlamışlardır. Kullanılan S bant EKFY içerisinde 2 aşama vardır ve iki aşamanın karakterleri farklıdır; bu iki aşama arasında geri yönlü YKY gürültüsünü engellemek amacı ile izolatör kullanılmıştır. Deneyler sonucunda en yüksek çıkış gücü 5,1 dBm olarak 1498 nm’de; en düşük çıkış gücü ise -11 dBm olarak 1522 nm’ elde edilmiştir [32].

Sadık, Durak ve Altuncu (2018) çalışmalarında; EKFL tasarımında fiber boyunun, çıkış kuplör oranının, pompa gücünün, filtre konumunun çıkış gücüne etkisini incelemişlerdir. Filtrenin çıkış kuplöründen önceki konumunda L bandında düşük güç (yaklaşık -17 dBm), sonraki konumunda ise yaklaşık 3 dBm güç elde edilmiştir. Bu sebeple yüksek güç uygulamaları için filtrenin, çıkış kuplöründen sonra konumlandırılması gerektiğine ulaşılmıştır. Fakat bununla birlikte YKY gürültüsünde de artış olduğu görülmüştür. EKF boyunun artışı ile daha düşük çıkış gücü; pompa gücündeki artış ile daha yüksek çıkış gücü elde edilmiştir. Yüksek bölme oranına sahip kuplörlerde dalga boyu ayarlama aralığının oldukça düşük fakat lazer çıkış gücünün yüksek olduğu; düşük bölme oranına sahip kuplörlerde ise çıkış gücünün daha düşük fakat dalga boyu ayarlama aralığı daha yüksek olduğu görülmüştür [33].

Bellemare ve diğerleri (2001) EKFY’yi yüksek doyum bölgesinde çalıştırılarak geniş bir bant aralığında (1480 nm - 1620 nm) düz bir lazer çıkış gücü elde etmişlerdir. Geniş bir ayarlanabilir bant aralığı için kavite içi kayıpların az olması gerektiğine ulaşmışlardır. Ayrıca kaybın artışı ile düz kazanç yapısından uzaklaşıldığı görülmüştür. Çalışmada EKFL içerisindeki EKF boyunun çıkış karakteristiğine etkisi de incelenmiştir. 10 m EKF için, yüksek dalga boylarında (1605 nm) kazancı sağlayamadığı; 25 m EDF için de 1500 nm

altındaki dalga boyları için ayarlayamadığı için çok uzun olduğu görülmüştür. Filtrenin, çıkış kuplörünün önüne yerleştirilmesi ile yüksek OSGO elde edildiğine ulaşılmıştır [34].

Fei ve diğerleri (2021) DOODA düzeneğine bağlı olarak TMF'in doyurulabilir soğurucu olarak kullanılmasıyla pasif mod kilitleme çalışması yapmışlardır. Diğer tekniklere göre oldukça kolay kurulum ile elde edilebilen doyurulabilir soğurucu olarak kullanılan DOODA ile dürtüler arası aralık ve dürtülerin genişliği kontrol edilmiştir. Kuplör oranı ve TMF boyunun optimizasyonu ile yüksek güçte ve kararlılıkta çıkış elde edilebildiği görülmüştür [35].

Zhang ve Kang (2008) 3,5m pompalanmamış EKF'yi, Fabry-Perot filtresini takip eden FBI filtresi olarak kullanılmışlardır. 1520 nm - 1570 nm bant aralığında 0,7 kHz'den dar bant genişlikli sinyaller elde edilmiştir. Sinyaller arasındaki güç değişimi 1 dB'den azdır. Lazerin eşik değeri 45 mW; dönüşüm verimliliği %5 olarak ölçülmüştür. Düşük dönüşüm verimliliğinin temel sebebi optik döngü içerisindeki yüksek emilim kaybıdır [36].

He, Zhu, Dong, Lou ve Luo (2018) MZG ve ayarlanabilir filtre tabanlı, tek ve çift dalga boyunda ayarlanabilir EKFL tasarlamışlardır. 1539,4 nm - 1561,6 nm aralığında tek dalga boyu ile çalışan lazerin, dalga boyları arasındaki fark 0,6 nm'den azdır ve güçler arasındaki dalgalanma da 0,4 dB'den azdır. 3 dB bant genişliği 0,02 nm, OSGO değeri ise 36 dB'den yüksek elde edilmiştir. Çift dalga boyunda çalışan lazer tasarımında ise dalga boyları arasındaki aralık 0,6 nm'dir ve OSGO değerleri 32,51 dB'den daha yüksek; çıkış güçleri arasındaki dalgalanma ise 0,43 dB'den daha az olarak elde edilmiştir. Çift dalga boyunda çalışan EKFL tasarımı için 2 adet 1x2 kuplör, kavite içerisinde kombinasyon filtesi olarak konumlandırılmıştır. Dalga boyları arası ayarlama için MZG kullanılmıştır [37].

Ali, Al-Kateeb ve Bouzid (2008) çift aşamalı lineer kaviteli EKFL'e 2 adet sirkülatör ekleyerek bu sirkülatörleri ayna görevinde kullanmışlardır. Ayna olarak kullanılan sirkülatörlerin döngüleri içerisinde ayarlanabilir filtreler konumlandırılmıştır. Bu şekilde çift filtreleme metodu ile çalışan EKFL'de daha yüksek çıkış gücü ve daha düşük YKY gürültüsü elde edilmiştir. 1560 nm'de 18 dBm çıkış gücü ve 64 dB'den daha yüksek YMBO gözlemlenmiştir [38].

Amin, Kureshi ve Hossain (2018), EKFL ayarlanabilir bant genişliği aralığını pompalama tasarımına ve EKF boyuna bağlı olarak incelemişlerdir. Çift yönlü pompalama ve ileri yönlü pompalama tabanlı deney düzeneklerinin karşılaştırılması üzerine, çift taraflı EKFL tasarımının daha geniş bir bant aralığında çalıştığı görülmüştür (1525 nm-1645 nm aralığında 120 nm; ileri pompalamada ise 1528 nm- 1625 nm aralığında 97 nm). Ayrıca pompalama için 980 nm ve 1480 nm lazerler karşılaştırılmıştır. 980 nm pompalamada fiber sonunda daha yetersiz popülasyon çevrimi yaptığı gözlemlenmiştir. C+L band EKFL için 1480 nm pompalamanın daha iyi bir tercih olacağı belirtilmiştir. Optimum tasarım için EKF, 1480 nm pompa lazeri ile çift taraflı olarak pompalanmıştır, ortalama çıkış gücü 6 dBm olarak elde edilmiştir [39].

He, Li, Zhu, Dong ve Luo (2017) 2 adet 3 dB kuplörden oluşturulmuş ayarlanabilir çift geçişli MZG filtresi içerisinde gecikme hattı ve polarizasyon kontrolcüsü kullanmışlardır. MZG filtresinin diğer tarafındaki döngüde ise izolatör kullanılmıştır. MZG filtre döngüsünün içindeki polarizasyon denetleyicisi ile MZG spektrumunun düz bir bant genişliği ayarlanmıştır. Halka kavite içerisindeki polarizasyon kontrolcüsü ile lazer dalga boyu ayarlanmaktadır. Anahtarlanabilir tek, çift, üçlü ve dördü dalga boyunda çalışan lazer çıkışları; 34,9 dB'den daha yüksek OSGO, 3 dB bant genişliği 0,05 nm'den daha dar, tepe noktaları arasındaki güç dalgalanması 0,912 dB'den daha iyi şekilde elde edilmiştir [40].

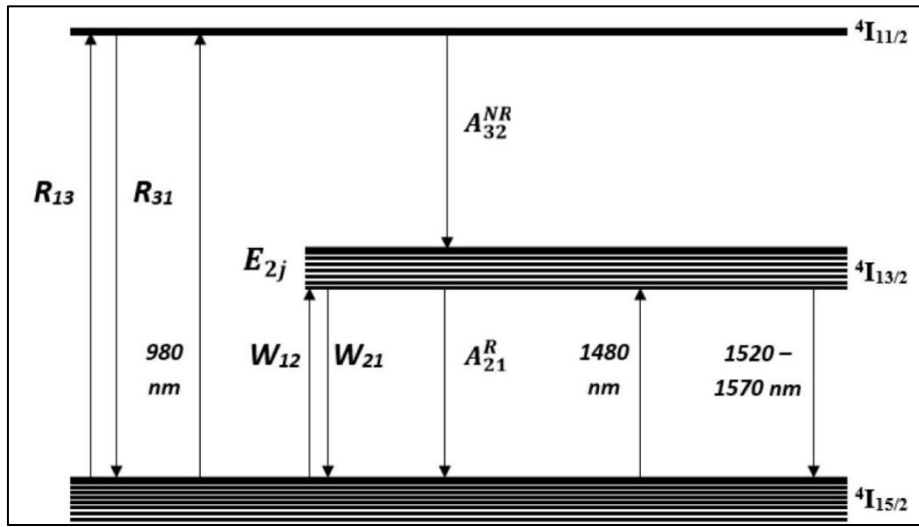
Araştırmanın amacı

OSGO, sinyal ve gürültü arasındaki ilişki hakkında bilgi verir; sistemdeki alıcının sinyali alabilme yeteneğini belirler. Yüksek OSGO, optik sistemler için oldukça önemlidir. Tezde önerilen iki yeni EKFL tasarımı, filtre çıkışındaki istenen dalga boyunun yanındaki bantları bastırıp tek çizgili lazer çıkışı elde etmeye yönelik çalışılmıştır ve bu amaçta başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

2. TEORİK TEMELLER

2.1. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Teorisi

EKFY'lerin ve EKFL'lerin teorik analizi için 3 enerji seviyeli ve 2 enerji seviyeli modellerden faydalanılabilir. Birinci seviye toprak seviyesi (taban seviyesi de denmektedir), ikinci seviye yarı kararlı seviye, üçüncü seviye ise pompalama seviyesi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.1. Erbiyum iyonlarına ait üç seviyeli enerji diyagramı [41]

R_{13} , toprak seviyesinden pompalama seviyesine gerçekleşen pompalama oranını, R_{31} pompalama seviyesinden toprak seviyesine gerçekleşen uyarılmış ışımaya oranını göstermektedir. Erbiyum iyonlarının pompalama seviyesindeki ömürleri çok kısadır ve yaklaşık 1 μs 'den daha kısa süre içerisinde yarı kararlı seviyeye düşmektedirler. Bu sebeple pompalama seviyesinden, toprak seviyesine uyarılmış ışımaya gerçekleşmeden kendiliğinden ışımasız olarak yarı kararlı seviyeye düşerler [42]. Toprak seviyesi ve yarı kararlı seviye arasındaki uyarılmış soğurma W_{12} , uyarılmış ışımaya ise W_{21} ile; kendiliğinden ışımaya ise A_{21} ile gösterilmektedir. Kendiliğinden ışımalı ve ışımasız yayılımlar 2. seviyeden düşmeye neden olur. Eş. 2.2'de belirtilen τ , iyon ömrü olarak tanımlanır [43].

$$A_2 = A_{r21} + A_{nr21} \quad (2.1)$$

$$A_{r21} = 1/\tau \quad (2.2)$$

Bu üç seviyeye ait iyon yoğunlukları N_1 , N_2 ve N_3 ile tanımlanmaktadır ve atomik iyon denklemleri Eş. 2.3; Eş. 2.4 ve Eş. 2.5'te verilmiştir.

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + A_{21}N_2 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + A_{32}N_3 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3 \quad (2.5)$$

Sistem, kararlı hale geçtiğinde tüm seviyelerdeki iyon sayılarının zamana göre değişimi eşitlenmiş olur ve $a = R_{31} + A_{32}$ ve $b = W_{21} + A_{21}$ eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler, iyon yoğunlukları denklemlerinde yerine yazılması ile Eş. 2.6 ve Eş. 2.7'deki denklemler elde edilmektedir.

$$W_{12}N_1 - bN_2 + A_{32}N_3 = 0 \quad (2.6)$$

$$R_{13}N_1 - aN_3 = 0 \quad (2.7)$$

EKF içerisindeki toplam iyon yoğunluğu ρ ile gösterilmektedir. Tüm enerji seviyelerindeki erbiyum iyonlarının sayılarının toplamı ve pompalama seviyesindeki iyon yoğunluğu Eş. 2.8 ve Eş. 2.9'dadır.

$$N_1 + N_2 + N_3 = \rho \quad (2.8)$$

$$N_3 = \rho - N_1 - N_2 \quad (2.9)$$

Toprak seviyesi ve yarı kararlı seviyeye ait iyon yoğunlukları Eş. 2.10 ve Eş. 2.11'dedir.

$$N_1 = \rho \frac{ab}{b(a + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}} \quad (2.10)$$

$$N_2 = \rho \frac{aW_{12} + R_{13}A_{32}}{a(b + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}} \quad (2.11)$$

A_{21} , A_{32} , a ve b terimlerinin yerine konulmasıyla:

$$N_1 = \rho \frac{(1 + W_{21}\tau)(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}})}{(1 + W_{21}\tau) \left(1 + \frac{R_{13} + R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{21}\tau \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau} \quad (2.12)$$

$$N_2 = \rho \frac{R_{13}\tau + W_{12}\tau(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}})}{(1 + W_{21}\tau) \left(1 + \frac{R_{13} + R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{21}\tau \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau} \quad (2.13)$$

$A_{32} \gg R_{13,31}$ ve $R = R_{13}$ durumlarının kabul edilmesiyle:

$$N_1 = \rho \frac{(1 + W_{21}\tau)}{(1 + W_{12}\tau + W_{21}\tau + R\tau)} \quad (2.14)$$

$$N_2 = \rho \frac{(R\tau + W_{21}\tau)}{(1 + W_{12}\tau + W_{21}\tau + R\tau)} \quad (2.15)$$

Denklemden anlaşılacağı üzere $N_3 = \rho - N_1 - N_2 = 0$ olacaktır. Yani pompalama seviyesindeki iyonlar çok hızlı bir biçimde yarı-kararlı seviyeye ışımasız düşeceği için, kalıcı hal durumunda N_3 popülasyonu sıfıra eşit olacaktır [44].

2.2. Erbiyum Katkılı Fiber Lazer Teorisi

EKFL’lerde, erbiyum iyonlarının pompalama seviyesindeki kısa ömründen dolayı 2 seviyeli sistem modellemesi tercih edilebilir. Bunun sonucunda toprak seviyesi ve yarı kararlı seviyedeki erbiyum iyonlarının yoğunluğu Eş. 2.16 ve Eş. 2.17’de tanımlanmıştır.

$$\frac{dn_1(z,t)}{dt} = -[W_{sa}(z) + W_p(z)]n_1(z,t) + \left[W_{se}(z) + \frac{1}{\tau_{21}}\right]n_2(z,t) \quad (2.16)$$

$$\frac{dn_2(z,t)}{dt} = -\left[W_{se}(z) + \frac{1}{\tau_{21}}\right]n_2(z,t) + [W_{sa}(z) + W_p(z)]n_1(z,t) \quad (2.17)$$

τ_{21} , erbiyum iyonunun yarı kararlı seviyedeki kendiliğinde yayılım ömrünü; W_{sa} uyarılmış soğurumu, W_{se} uyarılmış yayılımı ve W_p pompalama oranını göstermektedir.

$$W_{sa}(z) = \frac{1}{A_{ef}} \int_0^\infty \frac{\sigma_{12}(v)}{hv} \cdot [P_{YKY+}(z,v) + P_{YKY-}(z,v)\eta(v)dv] \quad (2.18)$$

$$W_{se}(z) = \sigma_{21}(v_p) \frac{P_p^+(z) + P_p^-(z)}{hv_p A_{ef}} \eta_p + \frac{1}{A_{ef}} \int_0^\infty \frac{\sigma_{12}(v)}{hv} \cdot [P_{YKY+}(z,v) + P_{YKY-}(z,v)\eta(v)dv] \quad (2.19)$$

$$W_p(z) = \sigma_{21}(v_p) \frac{P_p^+(z) + P_p^-(z)}{hv_p A_{ef}} \eta_p \quad (2.20)$$

Yukarıdaki eşitliklerde σ_{ij} (i, j ilgili seviyeler olmak üzere) yayılım ve soğurum kesit alanlarını, h Plank sabitini, v frekansında sırasıyla P_{YKY-} ve P_p^- geri yöne yayılan YKY ve pompalama gücünü, P_{YKY+} ve $P_p^+(z)$ ileri yöne ilerleyen YKY ve pompalama gücünü; A_{ef} ise efektif fiber nüve alanını göstermektedir.

Geri ve ileri yönle ilerleyen pompalama ve YKY güçleri; Eş. 3.6 ve Eş. 3.7’de tanımlanmaktadır:

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \pm[\mathcal{G}_a(z, v_p) - \mathcal{G}_e(z, v_p)]P_p^\pm(z) \quad (2.21)$$

$$\frac{dP_{YKY}^{\pm}}{dz} = \pm 2h\nu\Delta\nu g_e(z, \nu) \pm [g_e(z, \nu) - g_a(z, \nu)]P_{YKY}^{\pm}(z, \nu) \quad (2.22)$$

Denklemdaki $g_e(z, \nu)$, $g_a(z, \nu)$ değerleri aşağıdaki Eş. 3.8 ve Eş. 3.9.'da belirtilmiştir.

$$g_e(z, \nu) = \eta(\nu)\sigma_{12}(\nu)n_2(z) \quad (2.23)$$

$$g_a(z, \nu) = \eta(\nu)\sigma_{21}(\nu)n_1(z) \quad (2.24)$$

İleri ve geri yönlü YKY ve pompa güçlerine ait yayılım denklemleri Eş. 3.10, Eş. 3.11, Eş. 3.12 ve Eş. 3.13'te verilmiştir. Denklemlerin çözümü için 4. Dereceden Range-Kutta Metodu ile çözüm yapılabilir [45]. Denklemlerdeki k ; iterasyon adımını, β_{halke} kavite içerisindeki tüm kayıpları, $\beta_{izolatör}$ tasarımda izolatör kullanılması durumunda optik izolatörün izolasyon miktarını, $F(\nu)$ ise optik bant geçiren filtrenin bağıl geçirgenlik değerini göstermektedir.

$$P_p^-(z = L) = P_p^- \quad (2.25)$$

$$P_p^-(z = 0) = P_p^+ \quad (2.26)$$

$$P_{YKY}^k(z = L, \nu) = P_{YKY}^{k-1}(z = 0, \nu)F(\nu)\beta_{halke}\beta_{izolatör} \quad (2.27)$$

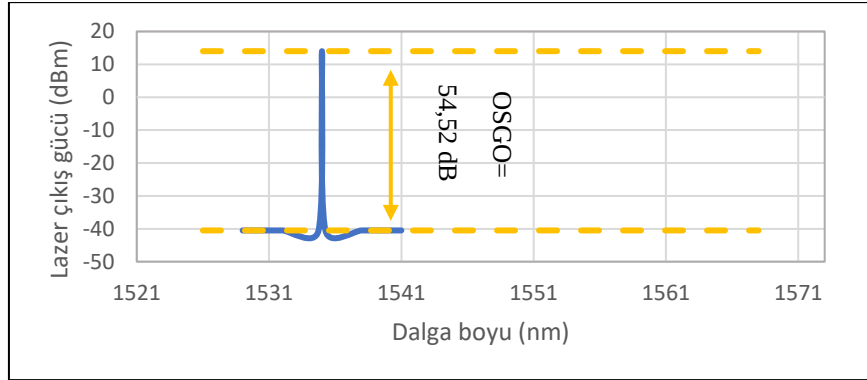
$$P_{YKY}^k(z = 0, \nu) = P_{YKY}^{k-1}(z = L, \nu)F(\nu)\beta_{halke} \quad (2.28)$$

Optik Sinyal – Gürültü Oranının (OSGO) Hesaplanması

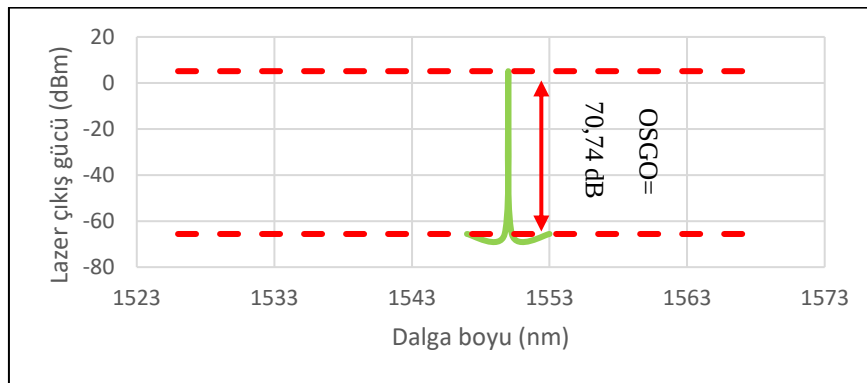
OSGO, optik sinyal gücü ve gürültü seviyesi arasındaki ilişki hakkında bilgi verir. Sinyal dalga boyuna ait güçten ve yan bantlardaki gürültüye ait güç çıkartılarak OSGO değerine ulaşılabilir.

$$OSGO = 10 \log_{10}(P_{sinyal}/P_{gürültü}) = dB(sinyal) - dB(gürültü) \quad (2.29)$$

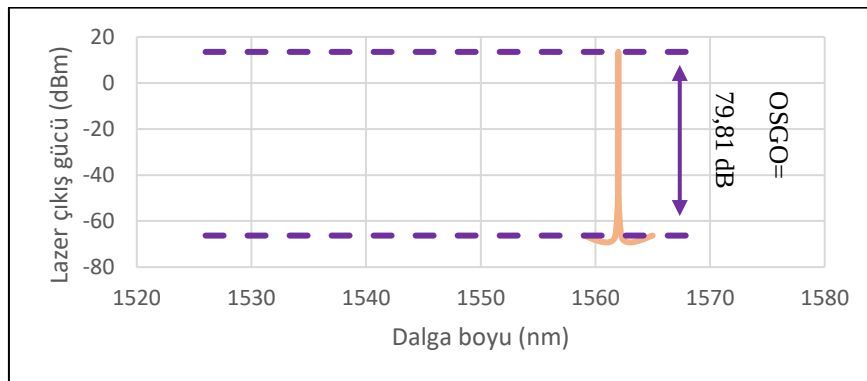
Deneysel ölçümlerde alınan veriler ile örnek OSGO hesabına yönelik hesaplama Şekil 2.2.'de verilmiştir.



a)



(b)

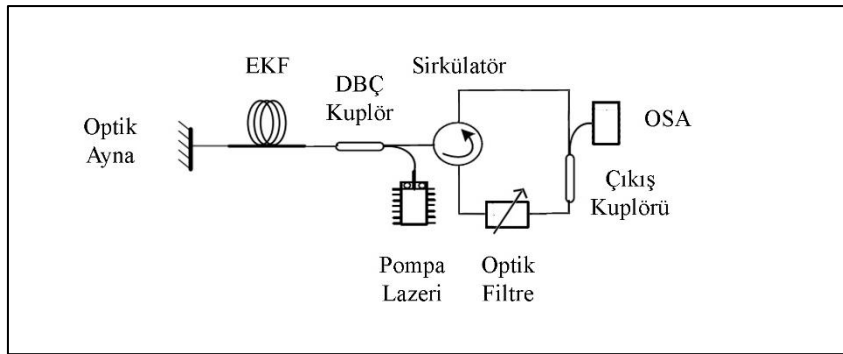


(c)

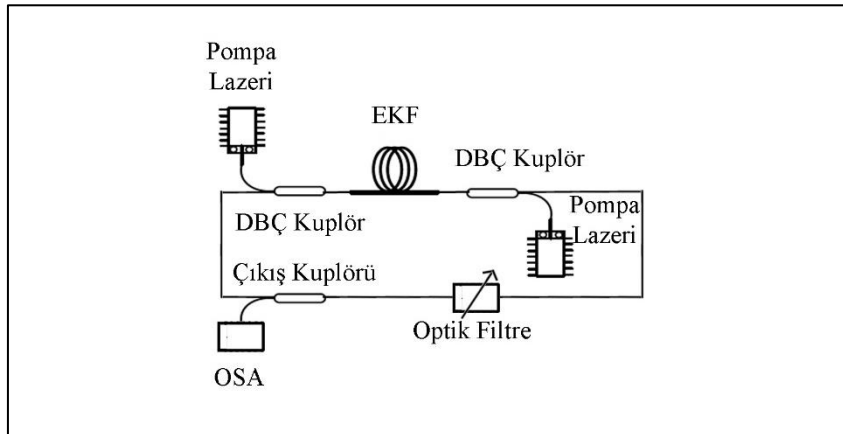
Şekil 2.2. OSGO değerinin hesaplanması örnekleri a) 1480 nm ileri yönlü pompalamada 1535 nm’de OSGO b) %50 ön kuplörlü EKFL’ye ait 1550 nm’de OSGO c) DOYDA eklenmiş ön kuplörlü EKFL’ye ait 1562 nm’de OSGO

3. ERBİYUM KATKILI FİBER LAZER TASARIMI

Erbiyum katkılı fiber lazerlerin tasarımı, lineer kaviteli [47-49] ve halka kaviteli [50,51] olmak üzere iki temel başlıkta incelenebilir. Basit bir tasarımla kurulabilen; tek boylamsal modda ışık iletimini destekleyen lineer kaviteli fiber lazerlerde ışık, tasarımın iki ucundaki aynalar arasında sürekli olarak hareket ederken birbiri ile zıt yönde iletimde olan dalgalar etkileşime geçerek duran dalga iletimini oluştururlar. Halka tipi kaviteli fiber lazerlerde ise ışık; düzenek içerisinde tek yönlü olarak ilerlemektedir, yürüyen dalga iletimi oluşur.



Şekil 3.1. Lineer kaviteli erbiyum katkılı fiber lazer



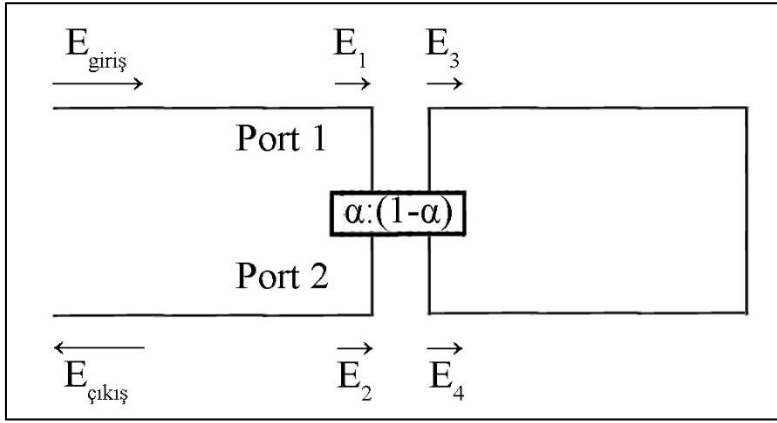
Şekil 3.2. Halka tipi erbiyum katkılı fiber lazer

Aynı pompalama gücü ve pompalama dalga boyunda gözlemlenen lineer kavite ve halka tipi kaviteye sahip EKFL'lerde, lineer kaviteye sahip olan lazerin daha yüksek çıkış gücüne ve daha iyi yan mod bastırma oranına sahip olduğu görülmüştür [50]. Bununla birlikte halka tip kavite tasarımlarında daha homojen bir çıkış elde edilmektedir [51]. EKFL çıkışları, yapılan tasarıma göre tek çizgili, çok çizgili ve darbeli çıkış olarak ayarlanabilmektedir [50].

3.1. Gürültüyü Bastırmak İçin Uygulanan Tasarımlar

3.1.1. Doğrusal olmayan optik döngü aynası

Herhangi bir fiber optik lazer, mod kilitlemeye yönelik bir tasarım eklenmediği sürece sürekli dalga modunda iletim yapmaktadır [52]. Anahtarlama modunda çalışarak, darbeli çıkış elde etmeye yönelik çalışmalar Mach-Zender girişimölçer, doğrusal olmayan polarizasyon rotasyonu ve doğrusal olmayan kuplaj tabanlı yapılabilmektedir [53]. Bu tasarım seçeneklerine ek olarak daha kolay şekilde kurulumla elde edilebilen doğrusal olmayan optik döngü aynaları da kurulum içerisinde darbeli lazer çıkışı elde etmede ve tek mod osilasyonu desteklemede kullanılmaktadır.



Şekil 3.3 Doğrusal olmayan optik döngü aynası

Kuplöre giren ışık, kuplörün bölme oranına bağlı olarak iki kola ayrılmaktadır. Kuplör değerinin %50'den farklı olması durumunda, kendiliğinden faz modülasyonu meydana gelir; %50'ye yakın olması durumunda yansıma daha yüksek; uzak olması durumunda ise iletilen güç daha yüksektir [54]. Birbirine ters yönde ilerleyen bu dalgalar, döngüyü eş sürede tamamlar ve tekrar kuplörde birleşirler. DOODA tasarımına ait geri yansıtılan ve iletilen elektrik alanların denklemi; kendiliğinden faz modülasyonu sonucu elde edilen faz kayması aşağıda belirtilmiştir. n_2 , Kerr katsayısını; L , döngü uzunluğunu; λ dalga boyunu; α kuplör bölme oranını ve ϕ ise oluşan faz kayması miktarını belirtmektedir.

$$\phi = \frac{2\pi n_2 |E_{giriş}|^2 L}{\lambda A_{ef}} \quad (5.1)$$

Kuplör bölme oranına göre iki kola ayrılan E_3 ve E_4 elektrik alanları:

$$E_3 = \alpha^{1/2} E_1 + i(1 - \alpha)^{1/2} E_2 \quad (5.2)$$

$$E_4 = i(1 - \alpha)^{1/2} E_1 + \alpha^{1/2} E_2 \quad (5.3)$$

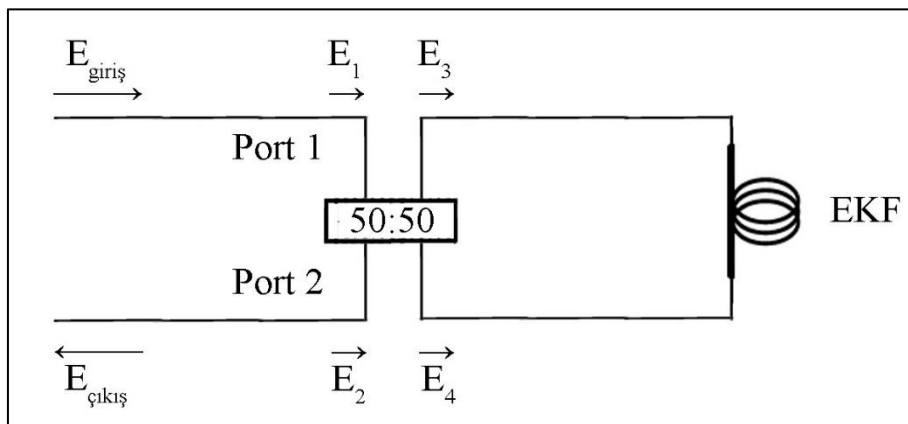
Kuplörde birleştikten sonra tekrar birinci porttan geriye yansıtılan ve ikinci porttan iletilen ışıkların yoğunlukları:

$$|E_{yansıtılan}|^2 = |E_{giriş}|^2 2\alpha(1 - \alpha) \left\{ 1 + \cos \left[(1 - 2\alpha) 2\pi n_2 |E_{giriş}|^2 \frac{L}{\lambda A_{ef}} \right] \right\} \quad (5.4)$$

$$|E_{iletilen}|^2 = |E_{giriş}|^2 1 - 2\alpha(1 - \alpha) \left\{ 1 + \cos \left[(1 - 2\alpha) 2\pi n_2 |E_{giriş}|^2 \frac{L}{\lambda A_{ef}} \right] \right\} \quad (5.5)$$

3.1.2. Doğrusal olmayan yükselteç döngü aynası

Doğrusal olmayan yükselteç optik döngülerin tasarım mantığı tek noktada DOODA'lerden ayrılmaktadır. DOYDA tasarımında, döngü içerisinde optik yükselteç de bulunmaktadır. Kuplör bölme oranı %50 seçilir ve eşit miktarda iki kola ayrılan ışıklar, yükselteçle yükseltelen ve yükseltilmeyen olarak yoğunluk farkına ulaşırlar. Farklı güçteki bu dalgalar, kuplörde tekrar birleşir; kuplör giriş portundan yansıtılan ve kuplör çıkış portundan iletilen olmak üzere tekrar iki kola ayrılırlar.



Şekil 3.4. Doğrusal olmayan yükselteç optik döngü aynası

Kendiliğinden faz modülasyonu sonucu oluşan faz kayması:

$$\phi = \frac{2\pi n_2 |E_{giriş}|^2 L}{\lambda A_{ef}} \quad (5.6)$$

Kavite içerisindeki kazanç, doyum kazancından çok daha fazla olduğu için kazancın üslüsü yoğunluğa bağlı olur ve azalarak 0'a yaklaşır [55]. $E_{saturasyon}$, küçük sinyal kazancı $\mathcal{G}$ 'nin düşük yoğunluklu güç değerinin yarısına düştüğü doyum hali yoğunluğudur.

$$\mathcal{G}(|E_{giriş}|^2) = \frac{\mathcal{G}_0}{1 + \frac{|E_{giriş}|^2}{|E_{saturasyon}|^2}} \quad (5.7)$$

İletim ve geri yansıma denklemlerinde kullanılacak olan G değeri kazancı tanımlar:

$$G = e^{g L_{Er}} \quad (5.8)$$

İletim ve geri yansıma yoğunlukları:

$$|E_{yansıtılan}|^2 = |E_{giriş}|^2 G (2\alpha(1 - \alpha) \left\{ 1 + \cos \left[(\alpha - G(1 - \alpha)) |E_{giriş}|^2 \frac{N_L L}{A_{ef}} \right] \right\}) \quad (5.9)$$

$$|E_{iletilen}|^2 = |E_{giriş}|^2 G (1 - 2\alpha(1 - \alpha) \left\{ 1 + \cos \left[(\alpha - G(1 - \alpha)) |E_{giriş}|^2 \frac{N_L L}{A_{ef}} \right] \right\}) \quad (5.10)$$

4. ERBİYUM KATKILI FİBER LAZER TASARIMLARINA AİT BENZETİM VE DENEYSEL KURULUM SONUÇLARI

4.1. Erbiyum Katkılı Fiber Lazer Bileşenleri

Halka tipi kaviteli EKFL'lere ait çıkış gücü ve OSGO değerleri için sırasıyla; klasik tasarım EKFL (1480 nm ileri yönlü pompalama ve 1480 nm ileri yönlü – 980 nm geri yönlü olmak üzere çift yönlü pompalama analizleri yapılmıştır.), döngü tipi EKY tabanlı EKFL ve sonrasında bu EKFL'e eklenen ön kuplörlü EKFL; son olarak ise DOYDA eklenmiş olan ön kuplörlü EKFL tasarımları yapılmıştır.

Kavite içerisindeki EKF boyu, maksimum çıkış gücü sağlayacak şekilde optimize edilmiş ve 14 m sonuç bulunmuştur. Benzetim çalışmalarında; deneysel kurulumda da kullanılacak olan EKF'ye ait parametreler yüklenmiştir. Bu parametreler Çizelge 6.1'de verilmiştir. Benzetim programında, 50 iterasyon sonunda sonuçlar alınmıştır.

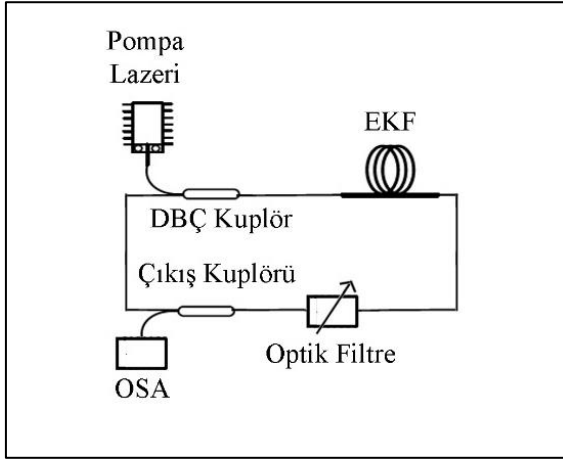
Çizelge 4.1. Kullanılan EKF'nin parametreleri

Nümerik açıklık	0,23
İyon ömrü (ms)	10
Soğurma (980 nm) (dB/m)	5,1
Öz yarıçapı (μm)	1,55
Er^{3+} yoğunluğu (ppm)	440
Erbium yarıçapı (μm)	1,45

Tasarımlarda; pompa lazerinin çıkışı, DBÇ kuplörün pompa girişi portuna ek yapılmıştır ve DBÇ kuplörünün çıkışı da EKF'ye yönlendirilmiştir. Tek yönlü pompalama yapılması durumunda, EKF'nin diğer ucu Yenista Optik Filtre'ye yönlendirilmiştir. İki yönlü pompalamada ise EKF'nin diğer ucuna, 2. DBÇ kuplörün çıkış portu ek yapılmıştır. İkinci DBÇ kuplörünün sinyal giriş ucu ise optik filtreye yönlendirilmiştir. Filtre sonrasında çıkış kuplörü ek yapılmıştır; %1, %10 ve %50 bölme oranlarının etkisi OSA'ya yönlendirilerek analiz edilmiştir (Deneyde ve benzetimde çözünürlük 0,07 nm olarak ayarlanmıştır.). Kuplörün diğer çıkış ucu ise 1. DBÇ kuplörün sinyal giriş bacağına ek yapılmıştır.

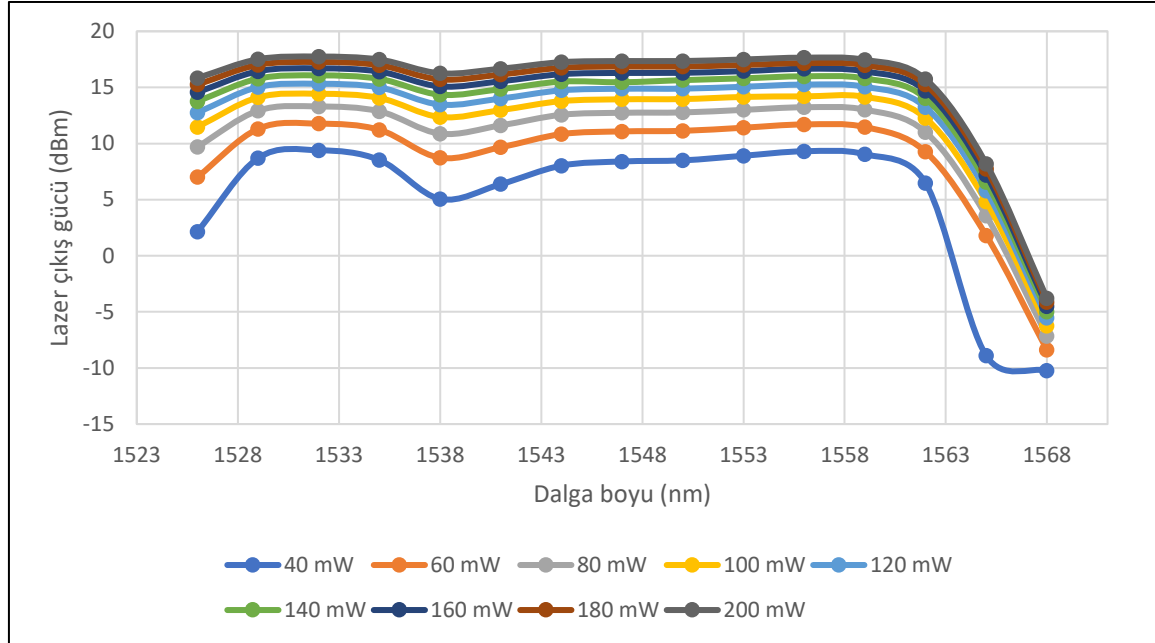
4.2. İleri Yönlü Pompalanmış Erbiyum Katkılı Fiber Lazer

1480 nm pompalama için FİTEL AC202FWA03 pompa lazeri kullanılmıştır. Pompa lazerinin gücü 40 mW'tan başlatılıp 20 mW aralıklarla arttırılmıştır ve maksimum pompa gücü olarak lazerin en yüksek çalışabileceği güç olan 200 mW aşılmamıştır. Pompa lazerinden gelen optik sinyal, 1480/1550 nm DBÇ kuplör ile maksimum çıkış gücü elde etmek üzere benzetim programında boy optimizasyonu yapılmış olan EKF'ye yönlendirilmiştir. EKF boyu 14 m olarak ayarlanmıştır, FIBERCORE marka I6 tipi erbiyum katkı fiber kullanılmıştır. Kullanılan EKF'ye ait parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir. EKF çıkışı, optik filtreye yönlendirilmiştir. Yenista optik filtrenin dalga boyu 1526 nm – 1568 nm aralığında 3 nm aralıklarla ve 0,5 nm bant aralığında manuel olarak ayarlanmıştır. Optik filtrenin çıkış portu, çıkış kuplörü olarak kullanılan 1x2 kuplöre ek yapılmıştır. %1-%99, %10-%90 ve %50-50 değerinde çıkış kuplörleri denenmiştir. Ölçümler için %1, %10 ve %50 bölme oranlarına sahip kuplör çıkışları, OSA'ya yönlendirilmiştir; %99, %90 ve %50 oranları ise DBÇ kuplörün sinyal girişine ek yapılarak tekrar kavite içerisine iletilmiştir. Ölçümlerde OSA 0,07 çözünürlük ayarında kullanılmıştır. Deney kurulumu içerisinde yapılan tüm ekler, kaybı azaltmak amacıyla füzyon ek yapılmıştır.

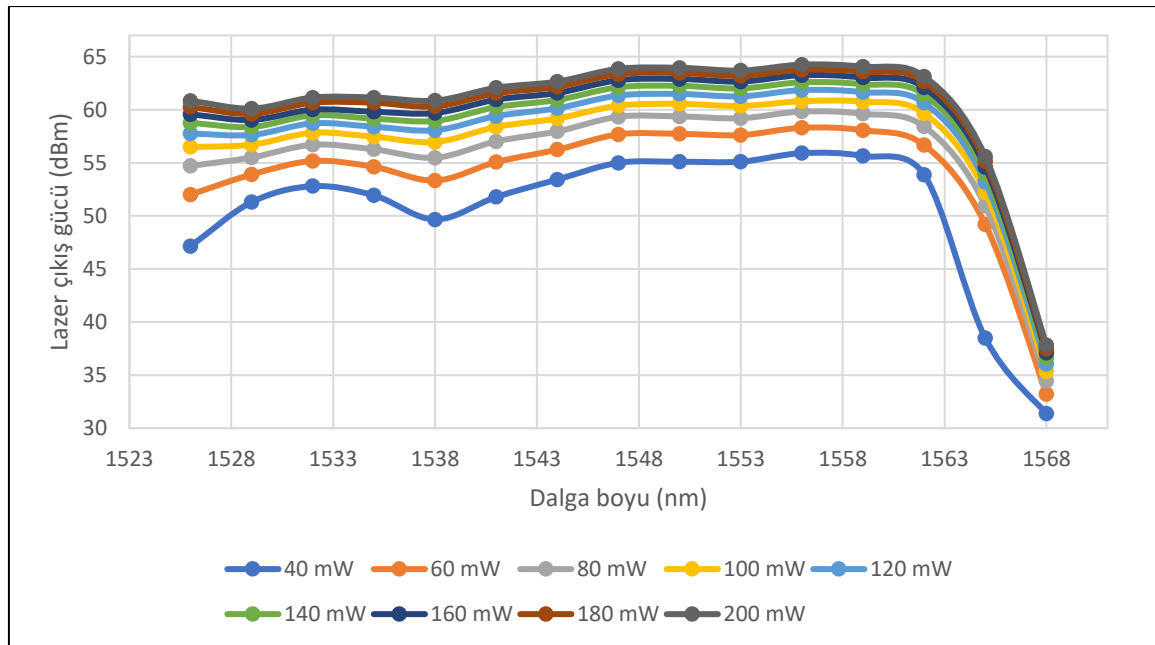


Şekil 4.1. İleri yönlü pompalanmış EKFL

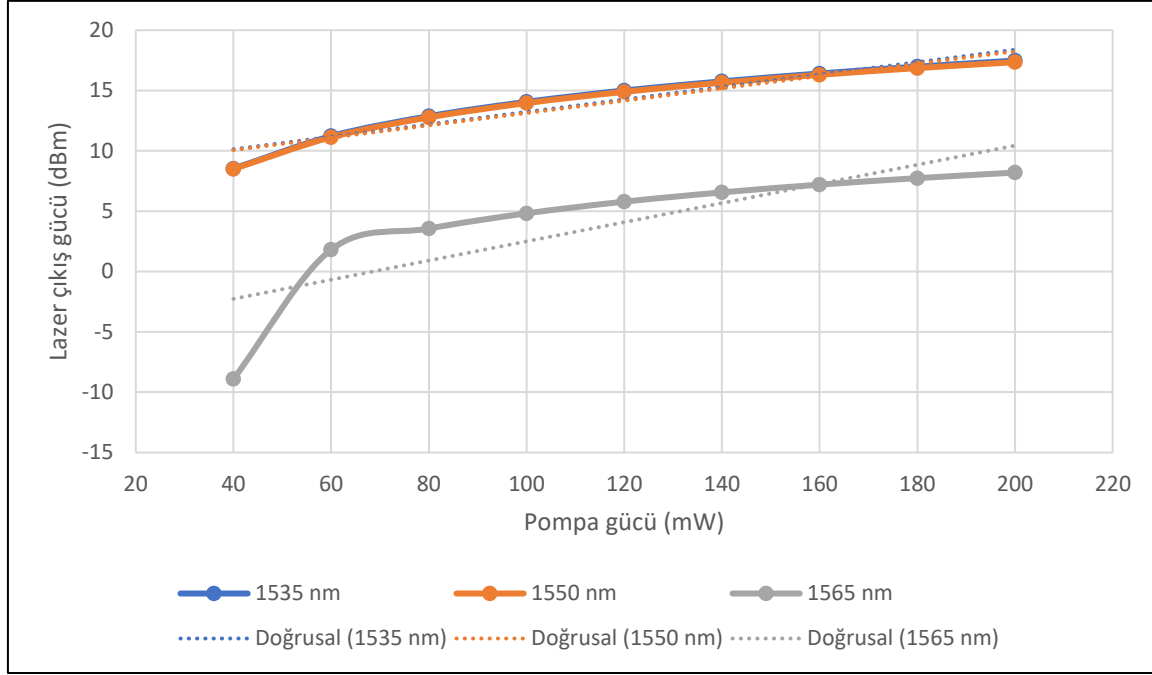
%1 Çıkış kuplörü ile alınan sonuçlar



Şekil 4.2. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait benzetim verileri



Şekil 4.3. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü OSGO ilişkisine ait benzetim verileri



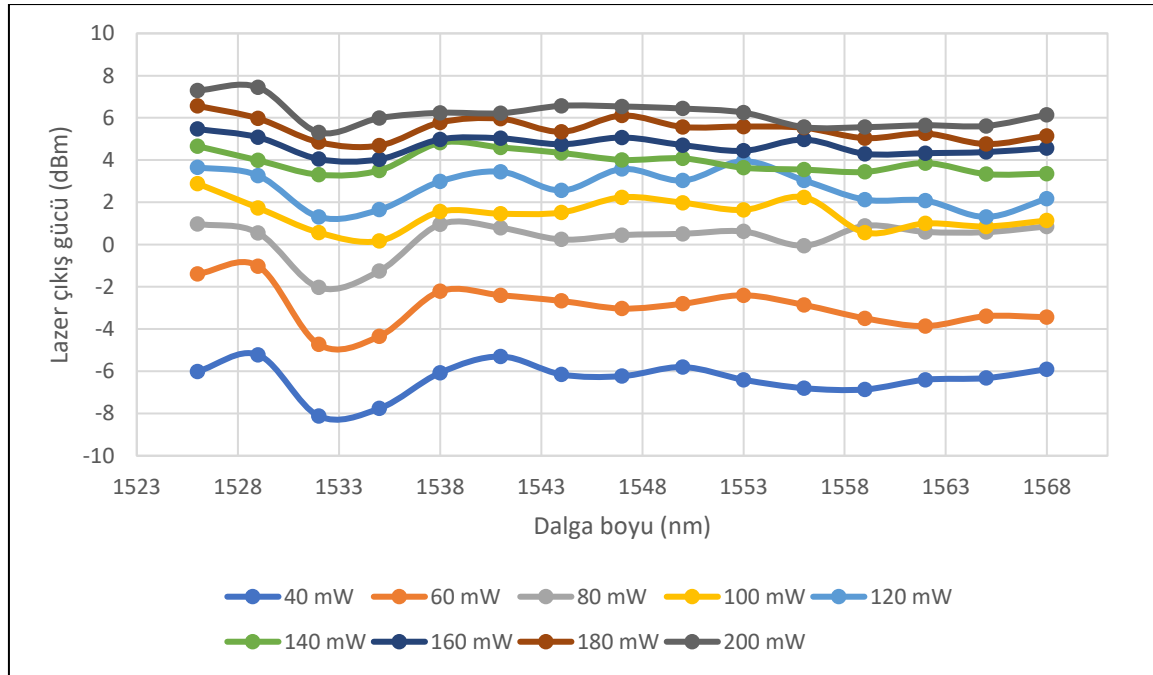
Şekil 4.4. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin benzetim verileri

Şekil 4.4.'te verildiği üzere, çalışmada; lazer spektrumunun başlangıç,orta ve son noktalarından birer tane örnek dalga boyu seçilmiş ve çıkış güçlerinin pompalama gücüyle ilişkisi incelenmiştir. Spektrumun (1526 nm – 1568 nm) başlangıç ve orta noktalarında (1535 nm ve 1550 nm) lazer çıkış güçleri birbirine oldukça yakındır fakat spektrum sonunda (1565 nm) çıkış gücü düşmektedir. Bunun sebebi, kullanılan pompa lazerinin, kurulumdaki EKF boyunda, çıkış spektrumunun sonuna yakın dalga boyları için yetersiz kalmasıdır. Tüm dalga boylarında pompalama gücündeki artışla, çıkış gücünün ve OSGO'nun arttığı; dalgalanma miktarında azalma olup düz bir çıkış spektrumuna yaklaşıldığı görülmektedir. Pompalama gücünün kademeli olarak 120 mW'a artırılmasıyla, çıkış gücünde daha hızlı bir artış olmuştur fakat 120 mW'ın sonrasında artış miktarında azalma görülmektedir. Bunun sebebi, EKFL'nin doyuma yaklaşmasıdır. Şekil 4.2., Şekil 4.3., ve Şekil 4.4.'te gösterilen tüm ölçüm değerleri, Çizelge 4.2'de ayrıca verilmiştir. Lazerler için önemli olan düz bir çıkış spektrumu elde edebilmek amacıyla çizelgedeki değerler 1526 nm – 1562 nm aralığında alınmıştır.

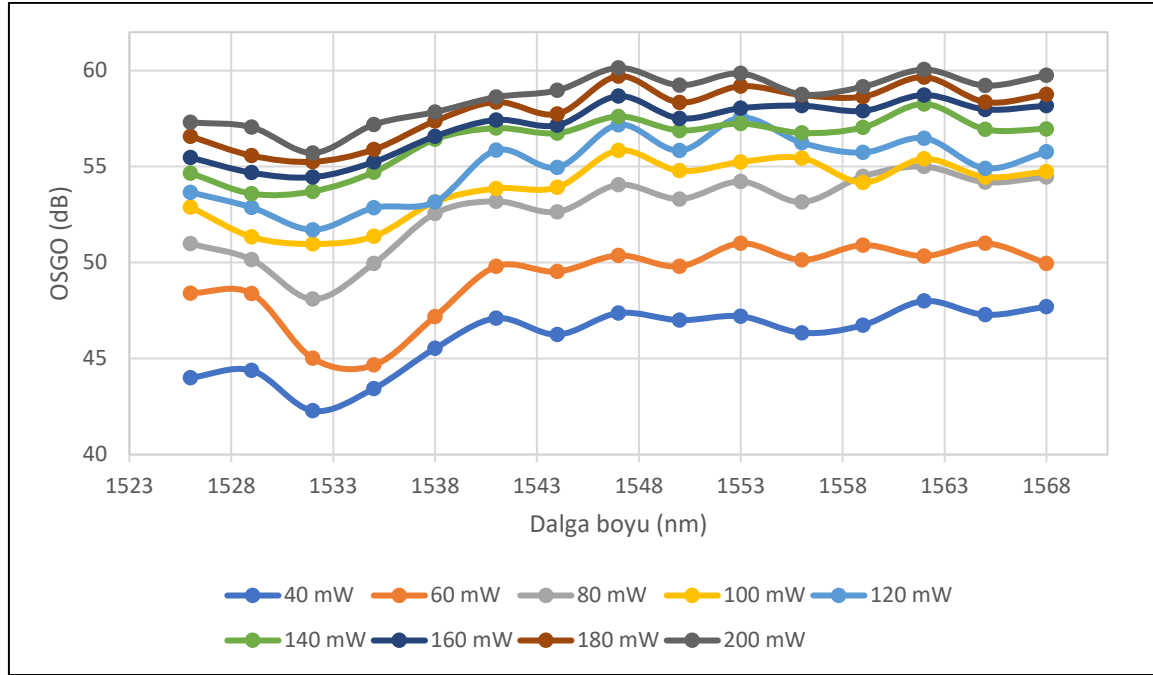
Çizelge 4.2. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının benzetim değerleri

	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW	120 mW	140 mW	160 mW	180 mW	200 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	7,60	10,50	12,28	13,52	14,51	15,29	15,98	16,55	17,06
Ortalama OSGO (dB)	52,97	55,87	57,64	58,88	59,87	60,66	61,33	61,93	62,44
Dalgalanma (dBm)	7,25	4,76	3,59	2,95	2,56	2,31	2,13	2,01	2,01

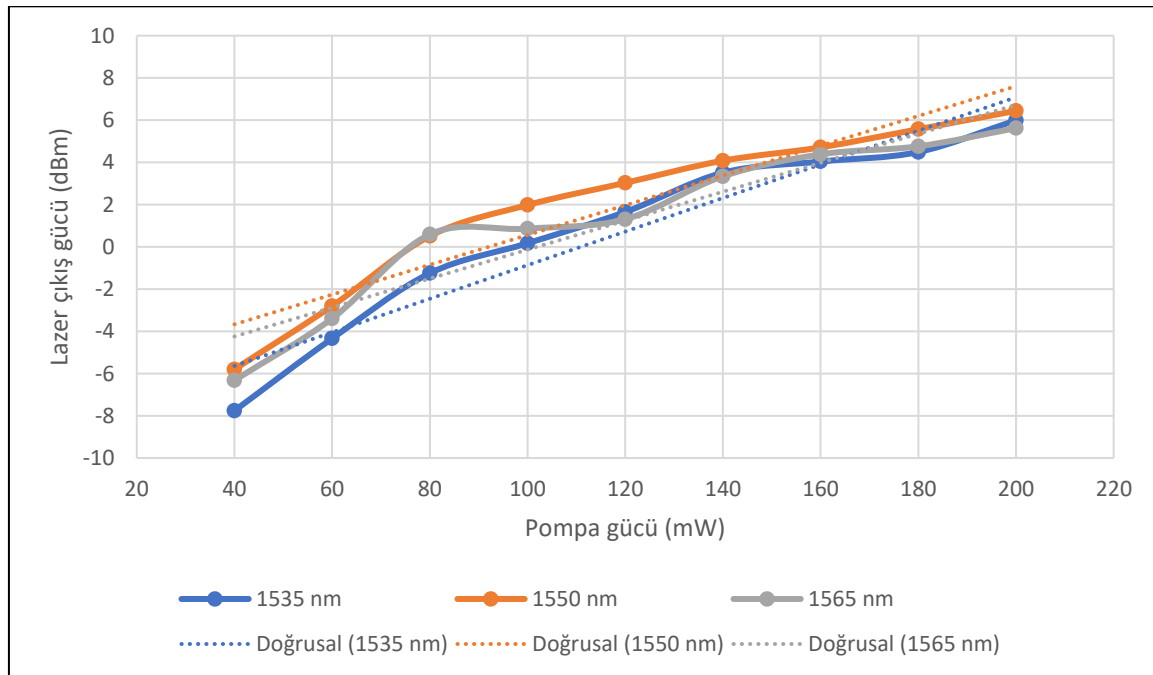
Benzetim programında denenmiş olunan kurulumun, laboratuvar ortamında da ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.5., Şekil 4.6., ve Şekil 4.7. ile Çizelge 4.3 bu ölçümlere ait verileri göstermektedir.



Şekil 4.5. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait deneysel veriler



Şekil 4.6. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler



Şekil 4.7. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin deneysel kurulum verileri

Çizelge 4.3. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

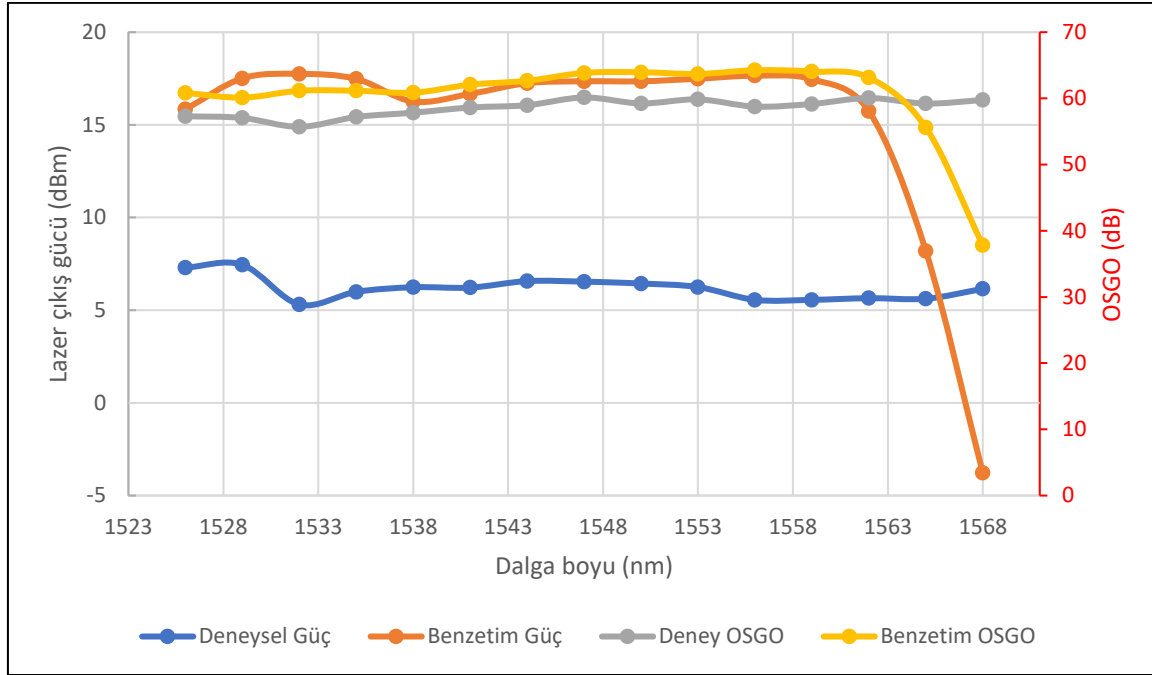
	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW	120 mW	140 mW	160 mW	180 mW	200 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-6,35	-2,93	0,31	1,43	2,67	3,90	4,67	5,47	6,19
Ortalama OSGO (dB)	46,04	49,10	52,69	53,88	54,98	56,30	57,07	57,87	58,59
Dalgalanma (dBm)	2,9	3,71	3,01	2,72	2,64	1,51	1,43	1,88	2,14

Benzetim sonuçlarında olduğu gibi, pompalama gücündeki artışla birlikte lazer çıkış gücünün arttığı fakat belli bir pompa gücünden sonra bu artışın azaldığı görülmüştür. Deneysel kurulum için bu sonuç, dalgalanmanın da en az şekilde görüldüğü 140 mW olarak belirlenebilir.

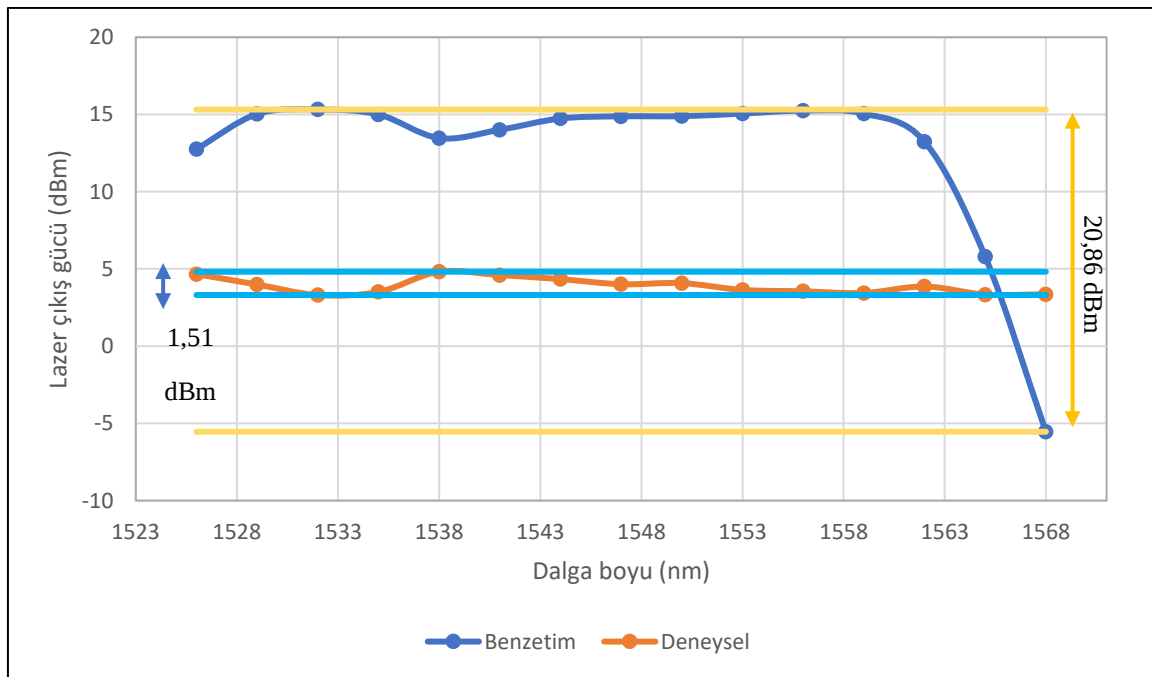
Benzetim ve deneysel kurulum sonuçları karşılaştırıldığında deneysel ölçümde maksimum pompalama gücünde yaklaşık 10 dBm daha düşük güç ve yaklaşık 4 dB daha düşük OSGO elde edilmiştir fakat çıkış spektrumunun 6 nm daha artıp genişlediği görülmüştür, benzetim programında oldukça düşük güç elde edilen 1565 nm ve 1568 nm dalga boylarında da yüksek çıkış gücü alınabilmektedir.

Benzetim programında alınan ölçümlerde istenen dalga boyuna ait yan bant güçleri yaklaşık olarak -45 dBm ölçülmüştür. Bu değer, optik filtrede ayarlanmış olan dalga boyunun sağında ve solunda bulunan gürültü seviyesinin miktarıdır; düşük olması, optik sistemdeki genel gürültü seviyesi için önemlidir. Deneysel kurulumda ise bu değer yaklaşık -52 dBm bulunmuştur. Benzetim programına göre yan bantlar daha iyi bastırılmış ve sonucunda da daha yüksek OSGO elde edilmiştir.

Kullanılan 1480 nm pompanın maksimum gücü olan 200 mW için alınan benzetim ve deneysel kurulum ölçümlerinin karşılaştırılması Şekil 4.8.'de verilmiştir.



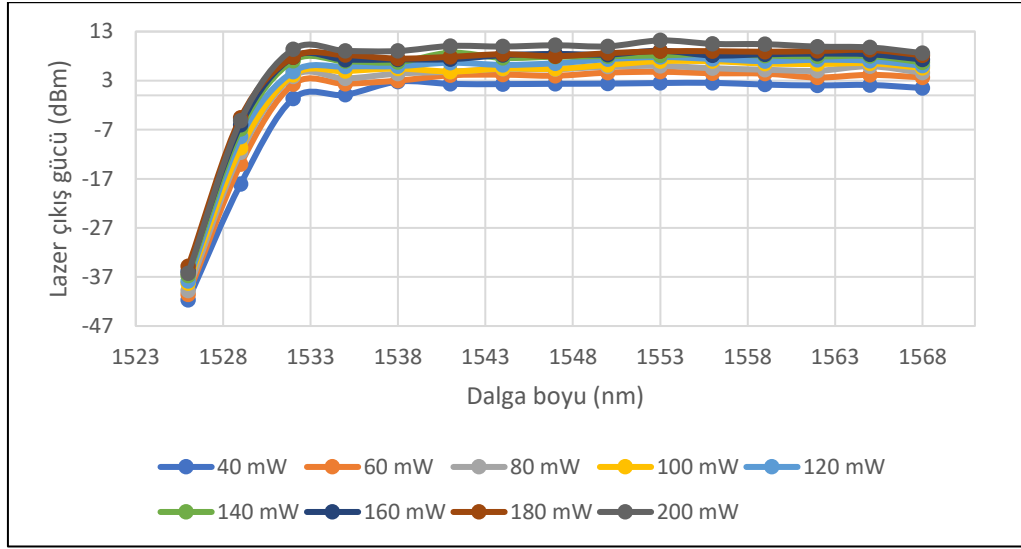
Şekil 4.8. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompalama gücünde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması



Şekil 4.9. %1 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada optimum pompalama gücünde benzetim ve deneysel verilere ait dalgalanma

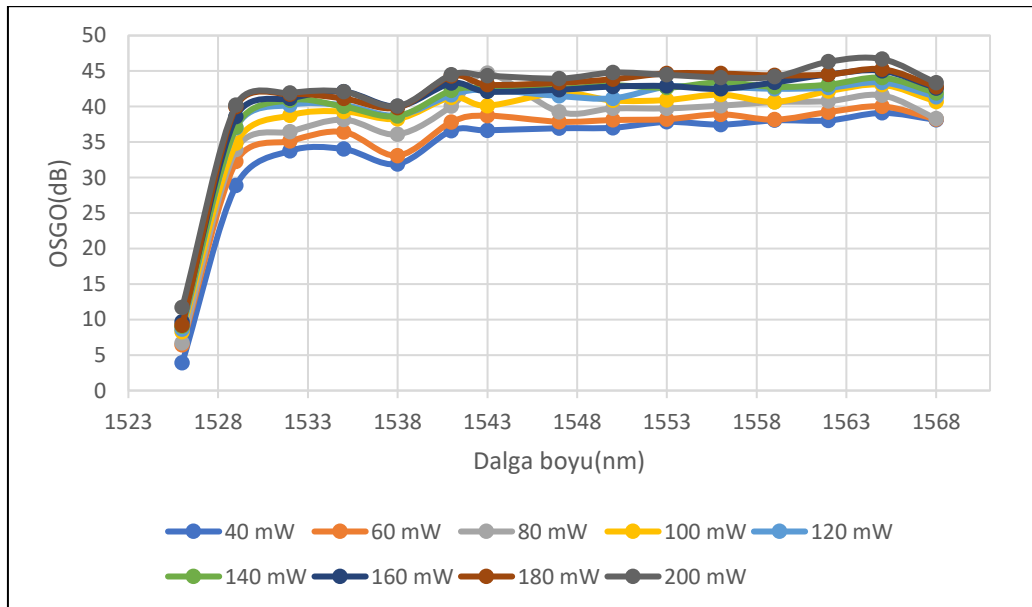
Şekil 4.9.'da görüldüğü üzere, spektrum üzerinde belli bir aralık seçilmeden tüm dalga boylarına bakılırsa deneysel sonuçlarda daha düz bir çıkış spektrumu elde edilmektedir.

%10 Çıkış kuplörü

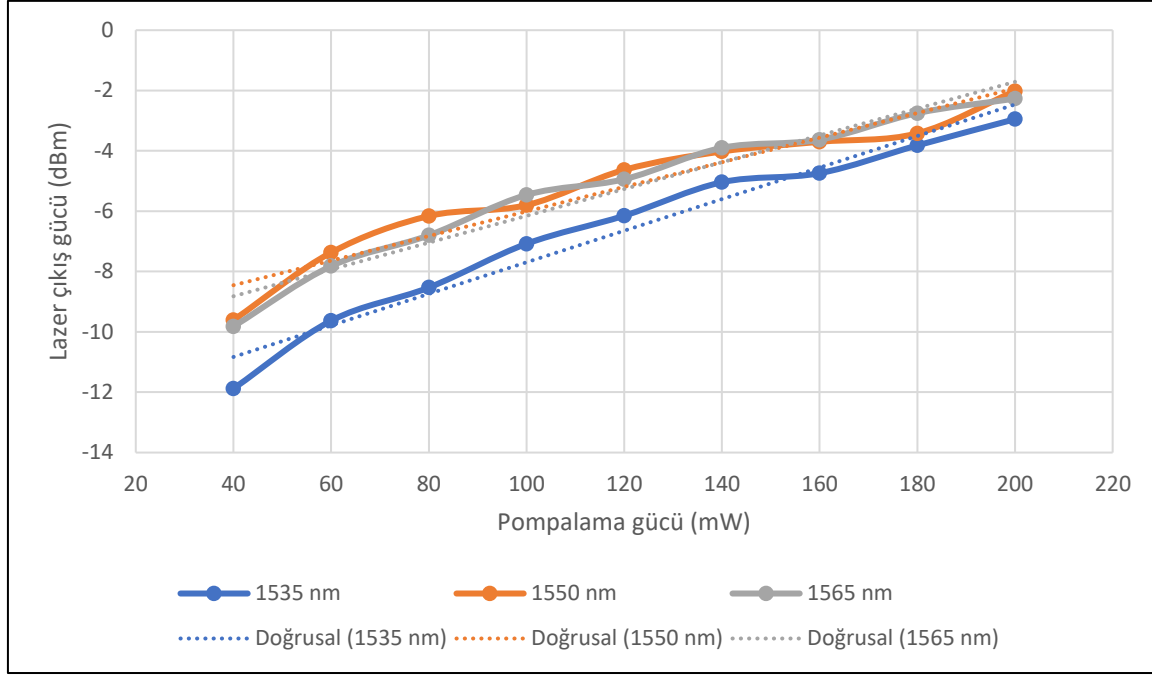


Şekil 4.10. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait benzetim verileri

%10 çıkış kuplörü ile, %1 kuplörde yüksek çıkış değeri alınamayan 1565 nm ve 1568 nm’de de yüksek çıkış gücü elde edilmiştir; bu sayede spektrumda 6 nm genişleme elde edilmiştir.



Şekil 4.11. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait benzetim verileri



Şekil 4.12. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin benzetim verileri

Spektruma ait başlangıç, orta ve son noktalarına yakın dalga boyları için örnek amaçlı seçilen 1535 nm, 1550 nm ve 1565 nm lazer çıkış güçleri ile pompalama gücündeki artış arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 4.12.'de belirtilmiştir. 1535 nm lazer çıkışı, 1550 nm ve 1565 nm lazer çıkışına göre daha düşük güçtedir fakat tüm dalga boylarındaki çıkış güçlerinin pompalama gücündeki artışla arttığı gözlemlenmiştir. Dalga boyları arasındaki dalgalanma miktarı, pompa gücündeki artışla beraber azalmaktadır, daha düz bir çıkış spektrumuna yakınlaşmaktadır; en az dalgalanma miktarı 200 mW'ta elde edilmiştir.

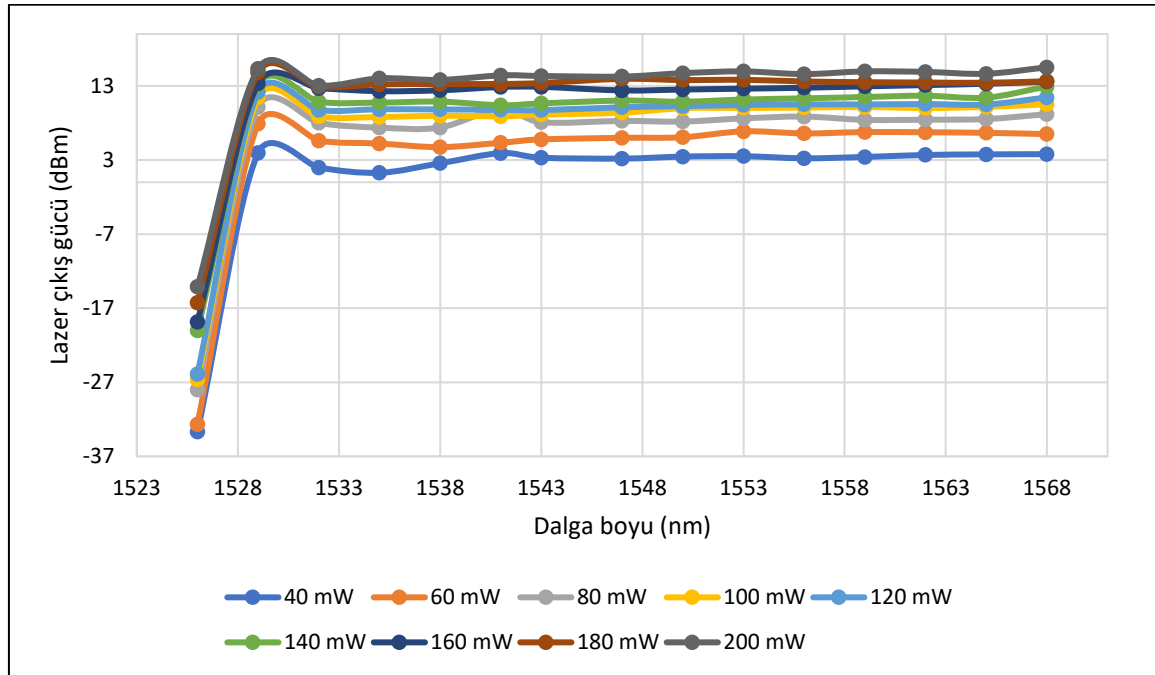
Şekil 4.10., Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de belirtilen tüm çıkış güçleri ve OSGO değerleri, Çizelge 4.4'te de ayrıca verilmiştir. Pompalama gücündeki artışla lazer çıkış gücü ve OSGO'nun arttığı görülmüştür fakat bu artış hızı belirli bir pompa değerinden sonra yavaşlamaktadır. Yüksek OSGO ve çıkış gücünün arttığı 120 mW-140 mW optimum pompalama gücü olarak belirlenebilir.

Çizelge 4.4. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının benzetim değerleri

	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW	120 mW	140 mW	160 mW	180 mW	200 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	1,88	3,82	5,02	5,79	6,61	7,71	8,02	8,42	9,84
Ortalama OSGO (dB)	36,57	37,67	39,65	40,74	41,63	42,13	42,67	43,34	43,89
Dalgalanma (dBm)	3,47	2,54	2,55	2,82	2,98	1,96	1,83	1,76	2,59

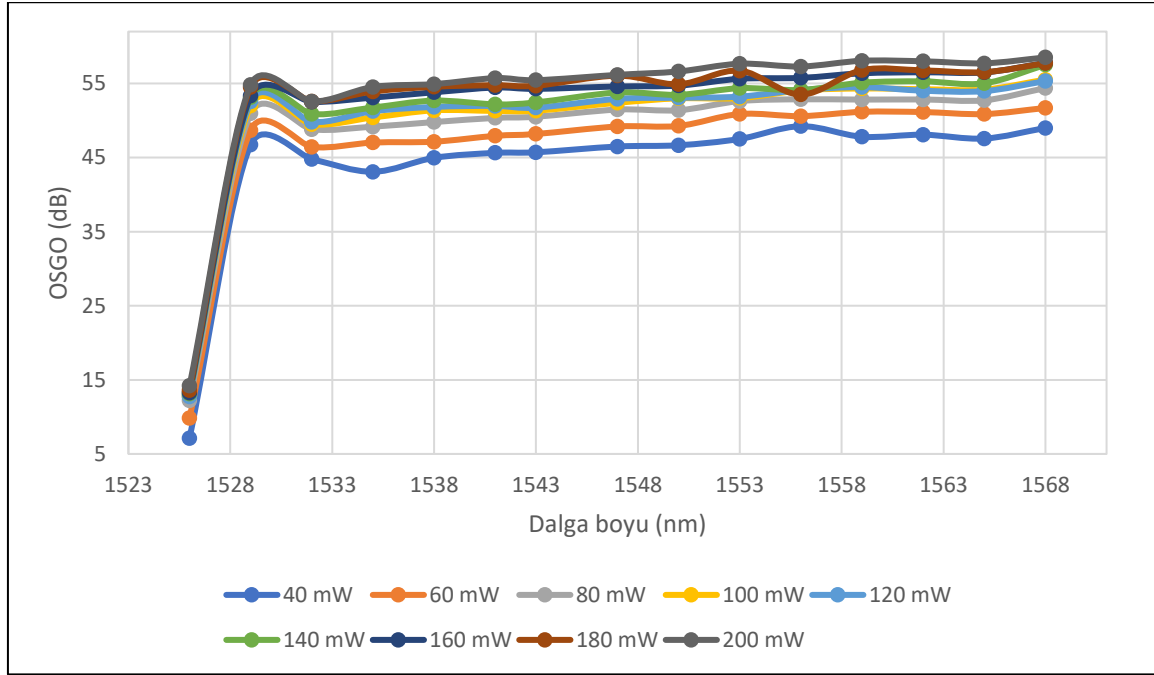
Çizelge 4.4'te belirtilen değerler daha düz bir spektrum elde edebilmek için 1532 nm – 1568 nm aralığında alınmıştır.

Benzetim programında kurulan düzeneğin aynısı laboratuvar da kurulmuştur ve Şekil 4.13., Şekil 4.14., Şekil 4.15. ile Çizelge 4.5'te verilmiştir.



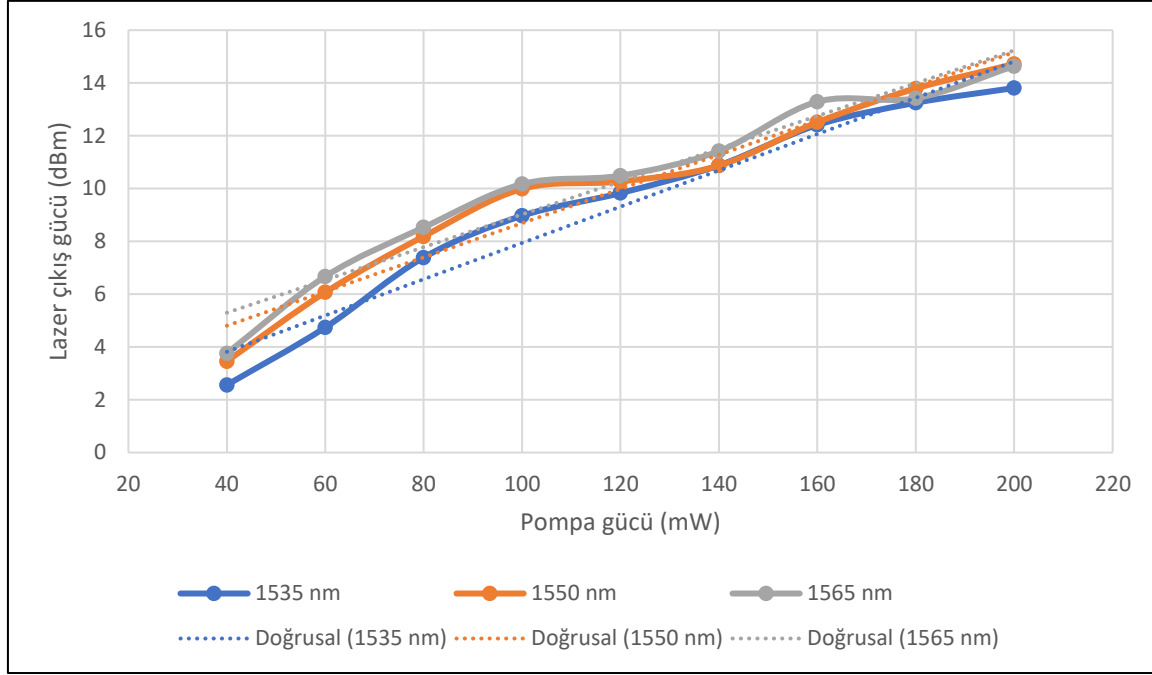
Şekil 4.13. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait deneysel veriler

Şekil 4.13.'te görüldüğü üzere, deneysel kurulumda %1 çıkış kuplöründe 1526 nm lazer çıkış dalga boyunda yüksek çıkış gücü alınabilirken %10 çıkış kuplöründe alınamamaktadır. Bu açıdan çıkış spektrumunda 3 nm azalma olduğu görülmektedir fakat bu azalmayla birlikte çıkış gücünde yaklaşık 7 dBm artış elde edilmiştir.



Şekil 4.14. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

%1 çıkış kuplörüne göre %10 çıkış kuplörüyle alınan sonuçlarda maksimum pompalama gücünde OSGO'da yaklaşık 2 dB azalma olmuştur. Daha yüksek çıkış gücünde daha düşük OSGO elde edilmesi yan bant bastırım oranının azaldığını yani gürültü miktarında artış olduğunu göstermektedir.



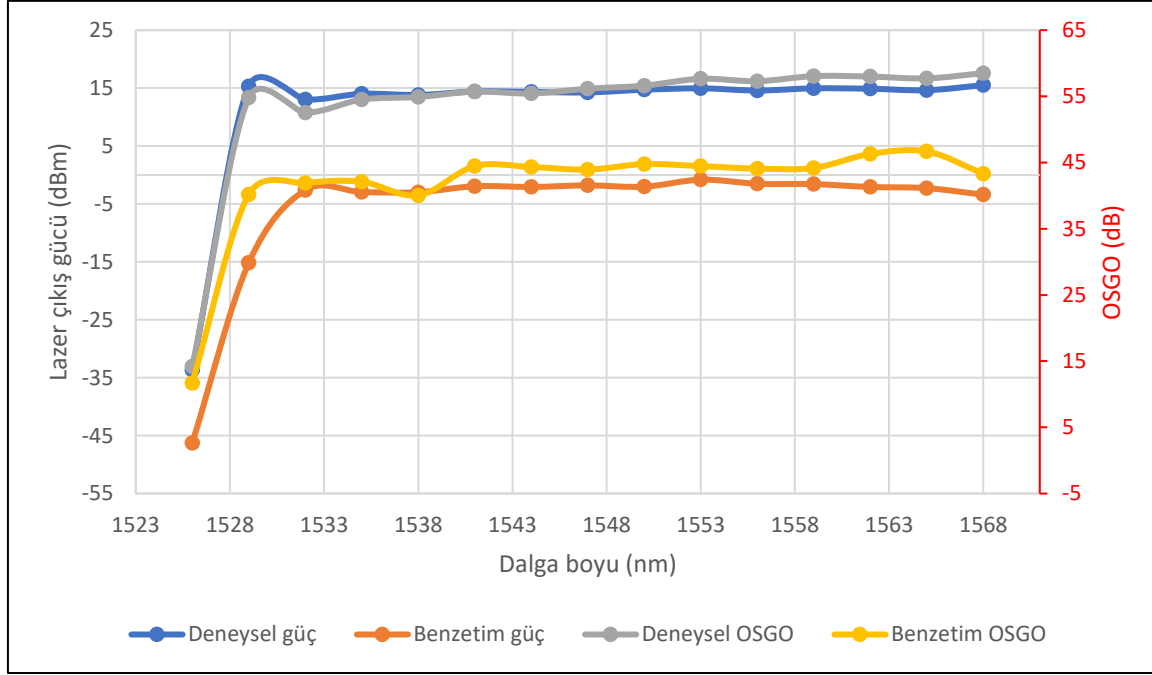
Şekil 4.15. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin deneysel kurulum verileri

Pompalama gücündeki artışla lazer çıkış gücünde artış olduğu görülmektedir. En az dalgalanmanın elde edildiği ve 13,44 dBm yüksek çıkış gücü, 55,54 dB yüksek OSGO değerlerine ulaşılan 160 mW pompalama gücü, optimize güç olarak belirlenebilir.

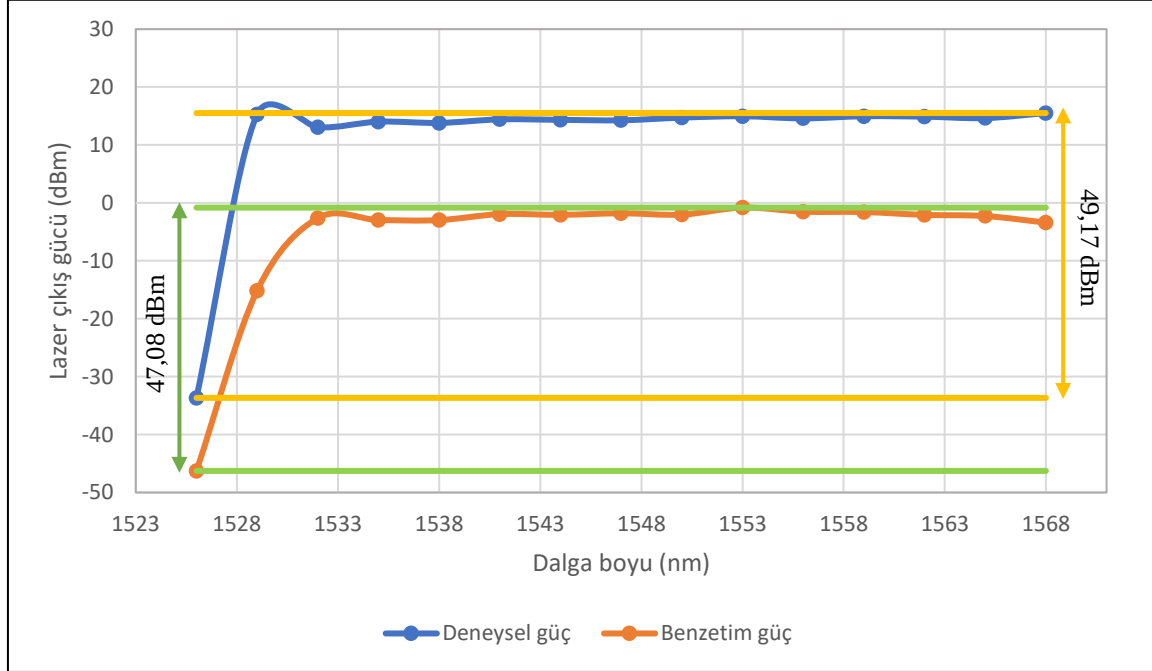
Çizelge 4.5. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW	120 mw	140 mW	160 mW	180 mW	200 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	3,87	7,19	9,66	10,97	11,80	13,01	13,44	14,22	15,40
Ortalama OSGO (dB)	47,87	50,19	52,66	53,77	53,94	55,31	55,54	56,12	56,65
Dalgalanma (dBm)	2,67	3,15	2,78	2,61	2,43	2,74	1,28	1,94	2,46

Dalgalanma ve ortalama çıkış gücü değerleri alınırken daha düz bir çıkış eğrisi kazanabilmek için lazer dalga boyunun çıkışı 1529-1568 nm arası ayarlanmıştır.

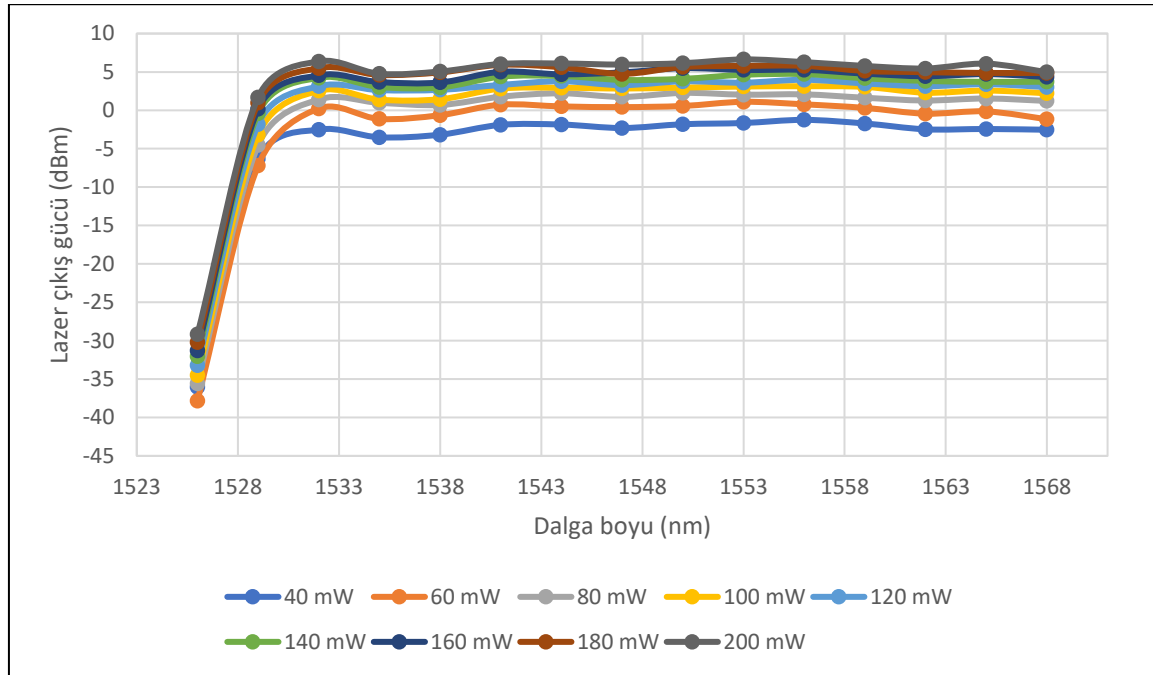


Şekil 4.16. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompalama gücünde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması



Şekil 4.17. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompalama gücünde benzetim ve deneysel verilerin dalgalanma karşılaştırılması

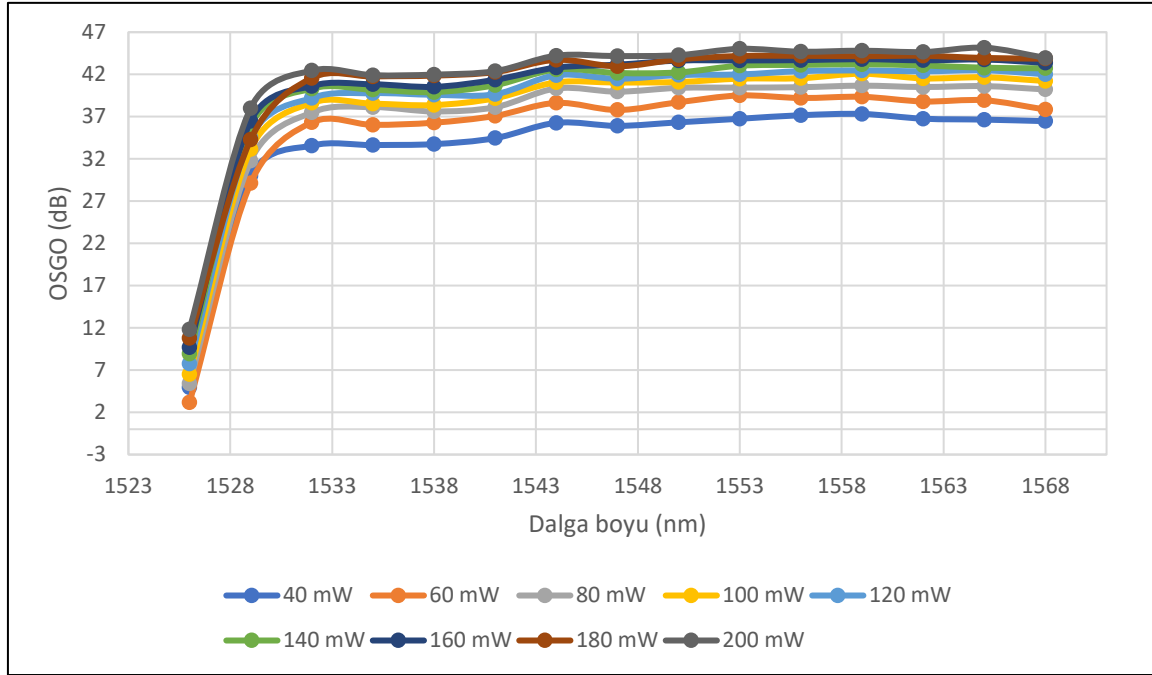
%50 Çıkış kuplörü



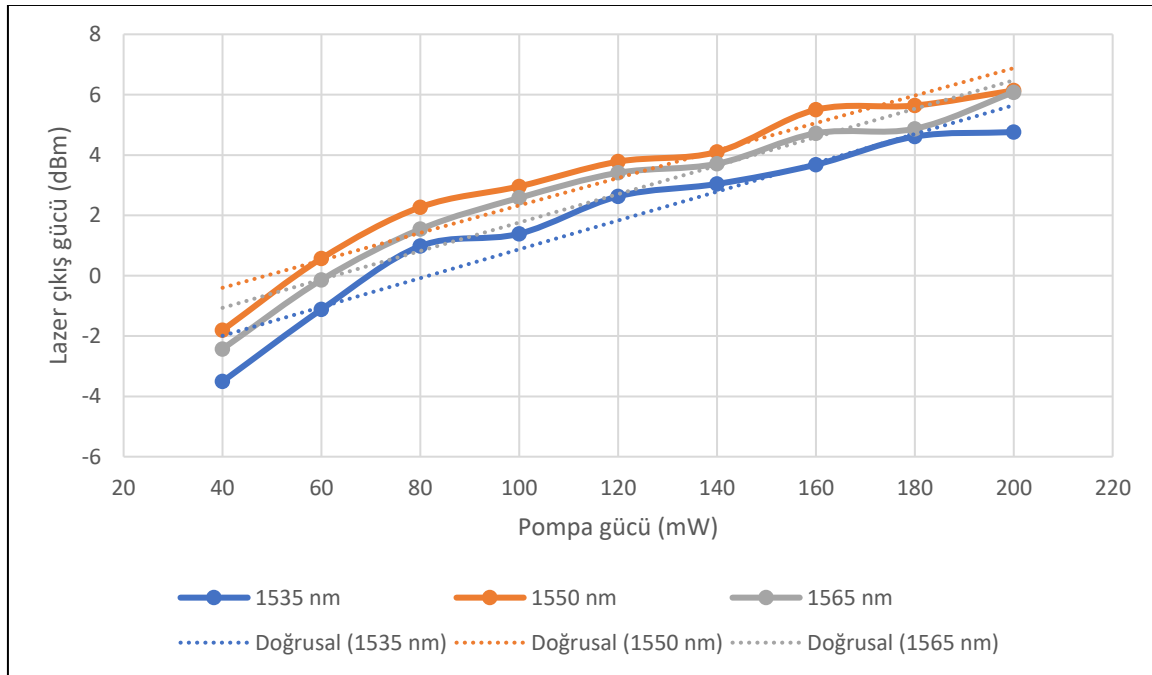
Şekil 4.18. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait benzetim verileri

Çıkış kuplörünün bölme oranı %50'ye arttırıldığında benzetim programlarında alınan sonuçlarda 1526 nm ve 1529 nm dalga boylarında düşük güç elde edildiği görülmektedir. Düz ve yüksek güçlü bir çıkış spektrumu elde edebilmek adına bu iki dalga boyunun değerlendirmeye alınmadığı durumda maksimum pompalama gücünde ortalama 5,81 dBm çıkış gücü elde edilmektedir. Başlangıç olarak seçilen 40 mW pompalama gücünün 120 mW'ye arttırılması ile 1,35 dBm değerinde en düşük dalgalanmaya sahip 3,32 dBm ortalama çıkış gücünde çalışan EKFL elde edilmektedir, 120 mW sonrasında çıkış gücündeki artış miktarında azalma olmaktadır; bu sebeple optimum pompa gücü olarak belirlenebilir.

Benzetim programında alınan OSGO verileri Şekil 4.19.'da verilmiştir. Aynı pompalama gücü ve lazer çıkış gücü arasındaki ilişkide olduğu gibi pompalama gücü ve OSGO değeri doğru orantılıdır ve belli bir pompalama gücünden sonra artışında azalma olmaktadır. Maksimum ve minimum pompalama gücü arasında yaklaşık 8 dB OSGO artışı olmaktadır.



Şekil 4.19. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü OSGO ilişkisine ait benzetim verileri



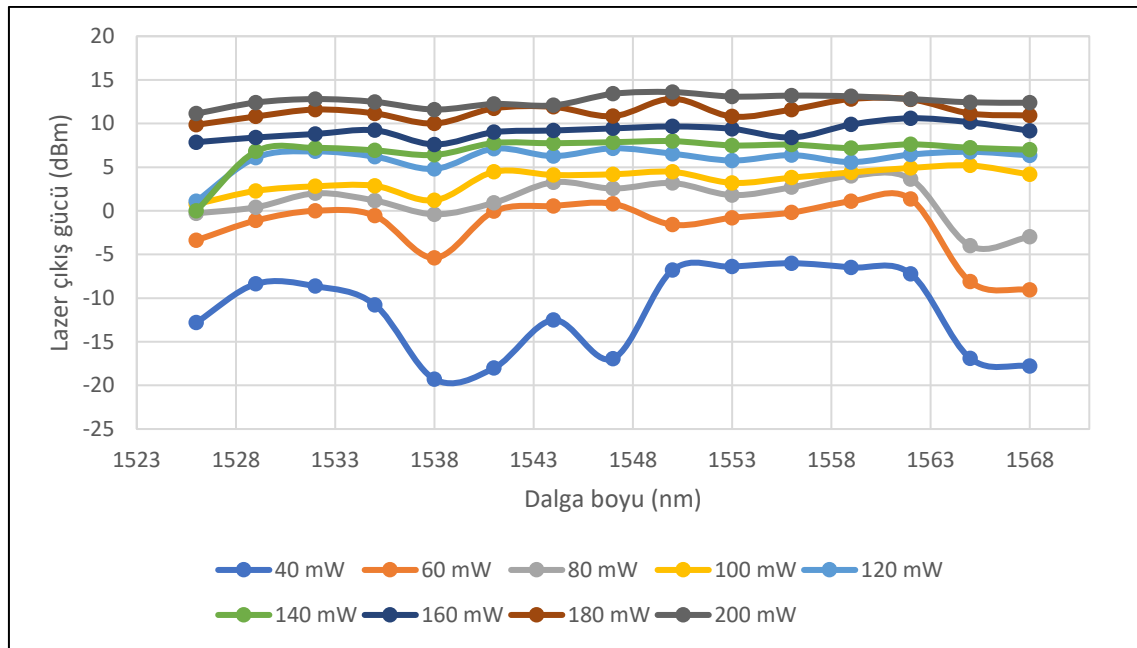
Şekil 4.20. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı pompa farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin benzetim verileri

Benzetim programında 20 mW aralıklarla arttırılan pompa gücüne karşılık lazerin ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değeri ve maksimum ve minimum güçler arasındaki dalgalanma miktarı grafiklerle birlikte Çizelge 4.6’da verilmiştir.

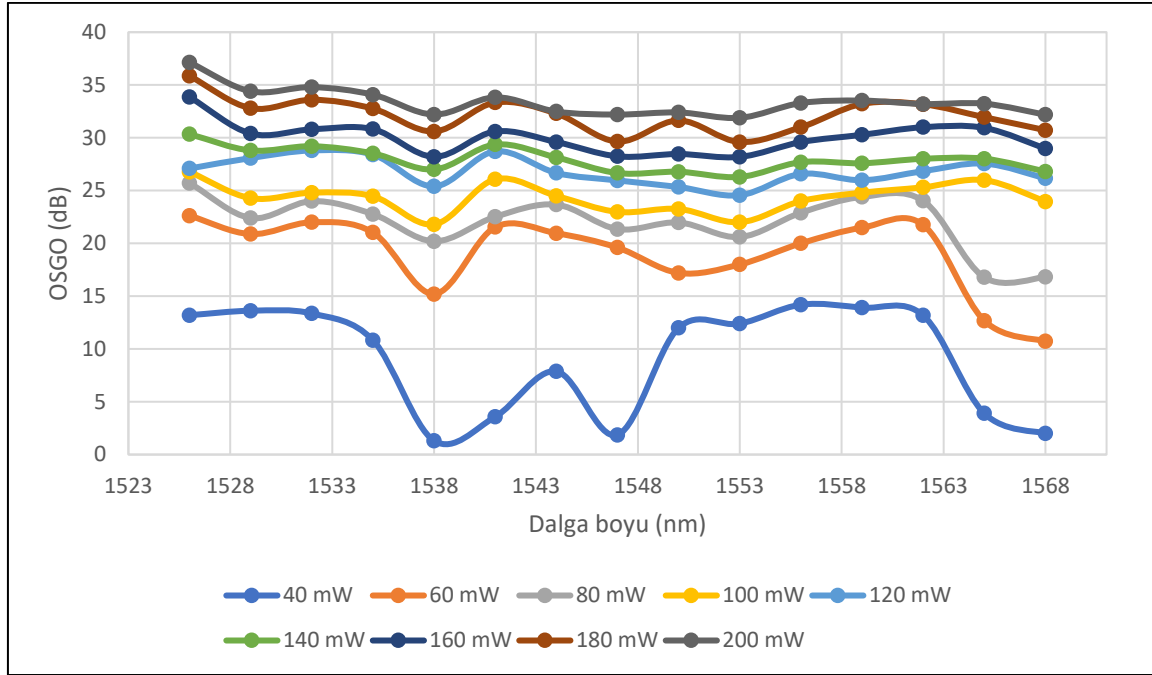
Çizelge 4.6. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının benzetim değerleri

	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW	120 mW	140 mW	160 mW	180 mW	200 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-2,23	0,09	1,60	2,56	3,32	3,99	4,67	5,25	5,81
Ortalama OSGO (dB)	35,77	38,03	39,61	40,57	41,33	42,00	42,68	43,26	43,82
Dalgalanma (dBm)	2,27	2,27	1,57	1,75	1,35	1,73	1,87	1,32	1,87

Benzetim programında kurulan %50 çıkış kuplörülü, ileri yönlü pompalanmış EKFL, laboratuvar ortamında da kurulup analiz edilmiştir. Çıkış gücü ve OSGO değerlerine ait grafik ve değerler Şekil 4.21., Şekil 4.22., Şekil 4.23. ile Çizelge 4.7’de verilmiştir.



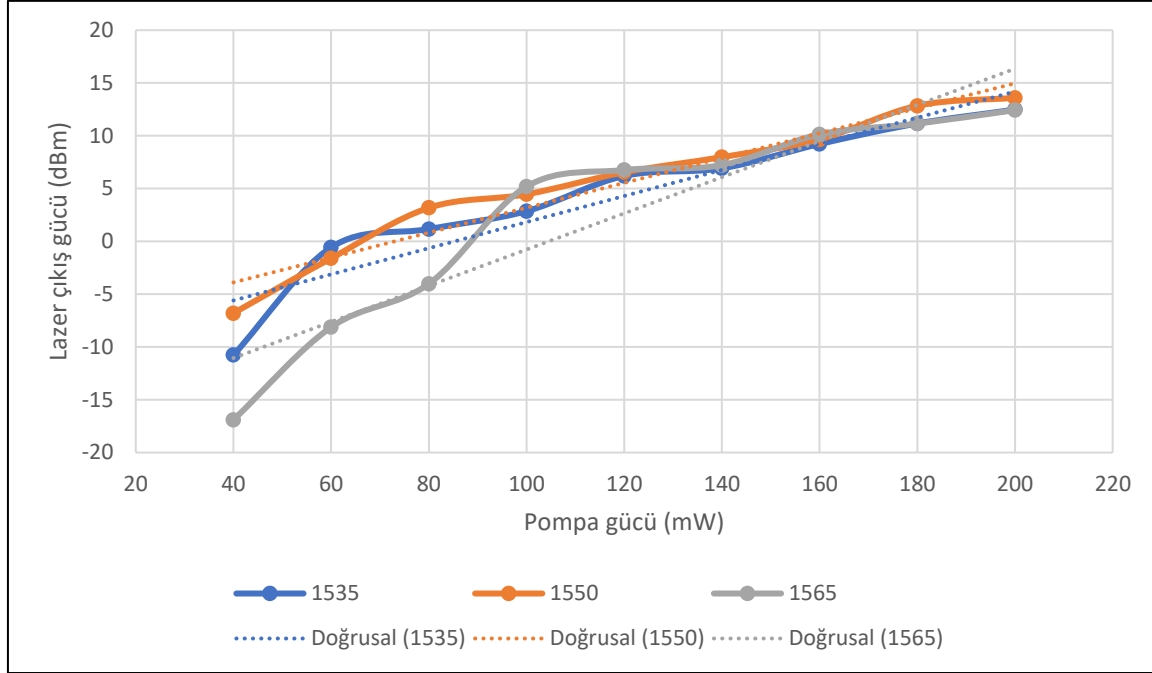
Şekil 4.21. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü ve lazer çıkış gücü ilişkisine ait deneysel veriler



Şekil 4.22. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücü OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Pompalama gücünün 140 mW'a geldiği noktaya kadar çıkış gücünde hızlı bir artış olduğu görülmektedir. 40 mW'da ortalama -11,66 dBm olan çıkış gücü, yaklaşık 18 dBm artış ile 140 mW'da 7,33 dBm'e yükselmiştir; 200 mW'de ise bu güç 12,58 dBm'e yükselmektedir. Lazerin doyum bölgesine yaklaştığı anlaşılmaktadır.

40 mW pompalamada düşük çalışma gücünün yanında çok fazla dalgalanma olduğu görülmektedir, lazerin karasız çalıştığı anlaşılmaktadır. Bu durum optik sistem tasarımlarında istenmeyen bir durumdur. Pompalama gücünün artışı ile çıkış gücü de artmaktadır fakat belirli bir noktadan sonra bu artışla birlikte dalgalanma da artmaktadır. En düşük dalgalanma 140 mW'da elde edilmiştir.

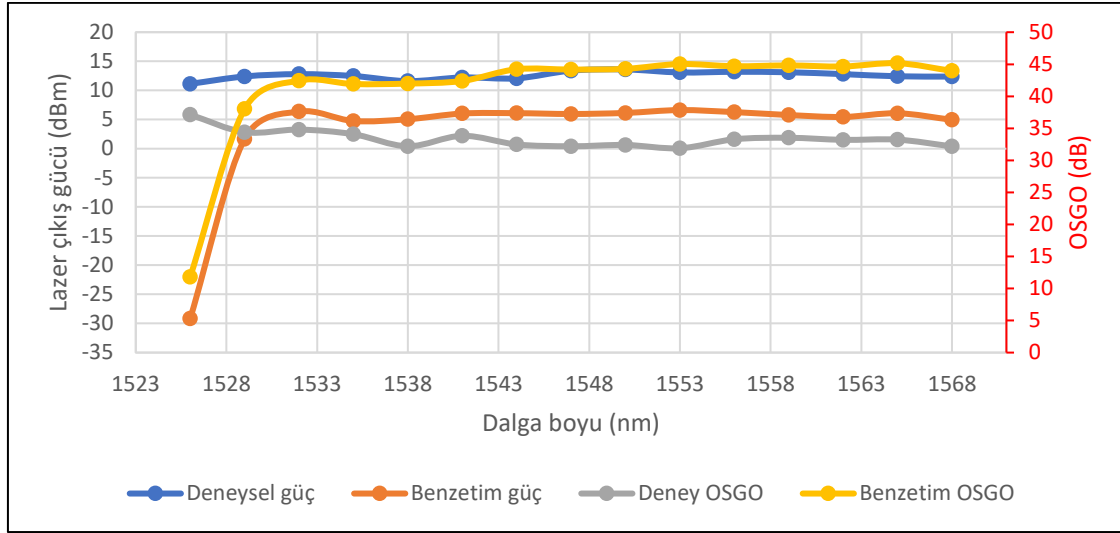


Şekil 4.23. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada farklı dalga boylarına ait EKFL çıkış güçlerinin deneysel kurulum verileri

Şekil 4.23.'te de görüldüğü üzere en düşük dalgalanma 140 mW'da elde edilmiştir. Bu pompalama gücünde OSGO 27,94 dB ve çıkış gücü de 7,33 mW'dir. Optimum pompalama gücü olarak belirlenebilir. Alınan ölçümler Çizelge 4.7'de ayrıca verilmiştir.

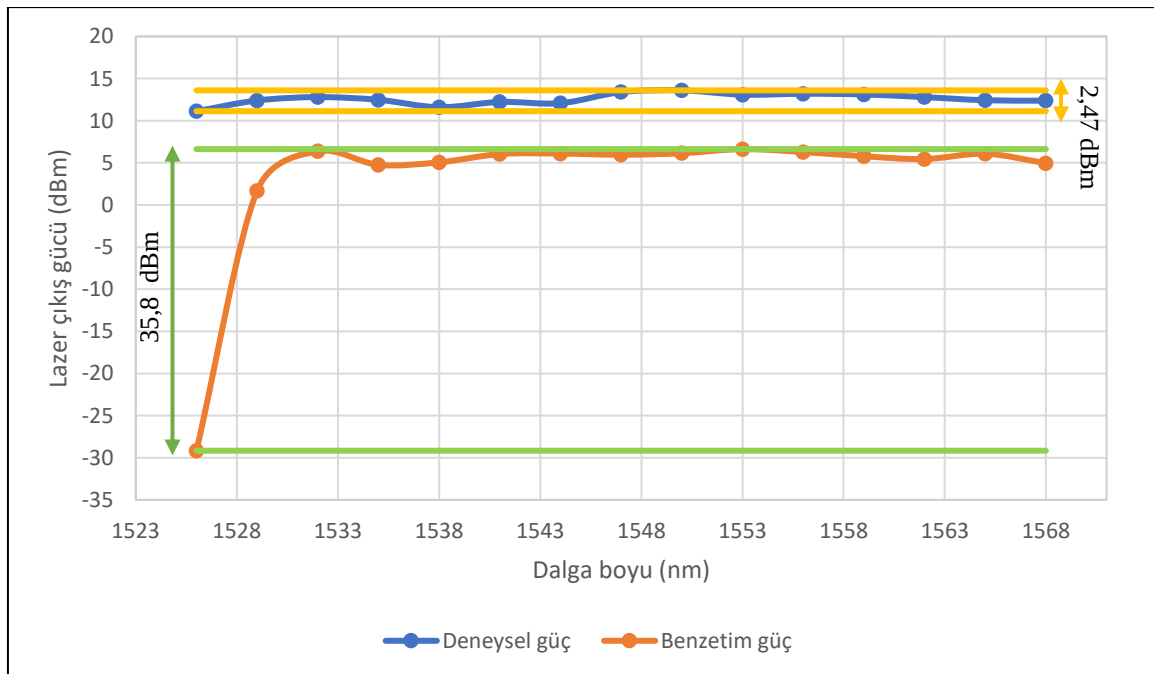
Çizelge 4.7. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada artan pompa gücünde ortalama çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW	120 mw	140 mW	160 mW	180 mW	200 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-11,66	-1,76	1,19	3,51	5,95	7,33	9,12	11,38	12,58
Ortalama OSGO (dB)	9,14	19,04	22,00	24,33	26,80	27,94	29,98	32,14	33,38
Dalgalanma (dBm)	13,28	10,42	8,02	4,42	6,07	1,58	3	2,99	2,47



Şekil 4.24. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompalama gücünde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması

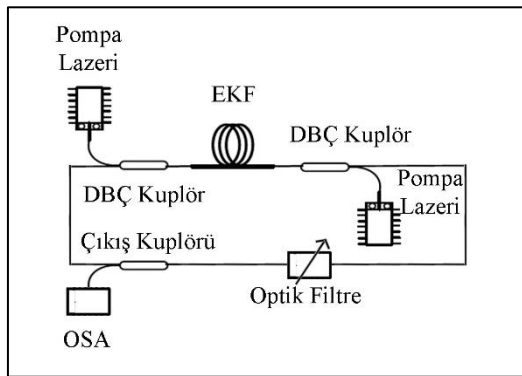
Şekil 4.24.'de görüldüğü üzere maksimum pompalama gücünde benzetim ve deneysel sonuçlar arasında yaklaşık 7 dBm fark vardır ve 1526 nm'de de çıkış gücünde farklılık gözükmemektedir. Bununla birlikte deneysel olarak daha düşük OSGO oranı elde edilmiştir.



Şekil 4.25. %50 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri yönlü pompalamada maksimum pompalama gücünde dalgalanma miktarları

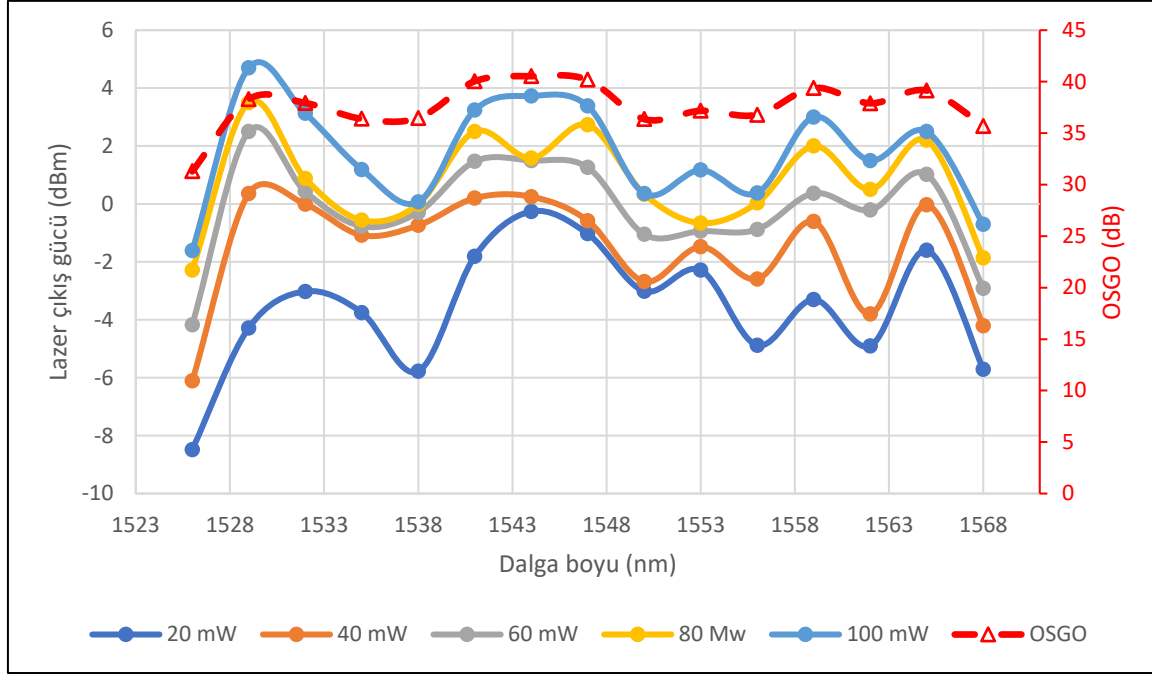
4.3. Çift Yönlü Pompalanmış Erbiyum Katkılı Fiber Lazer

1480 nm pompalama için FITELE AC202FWA03 pompa lazeri; 980 nm pompalama için BUCKAM NT8W35FH pompa lazeri kullanılmıştır. 1480 nm pompa lazerinin gücü 40 mW'tan başlatılıp 20 mW aralıklarla arttırılmıştır ve maksimum pompa gücü olarak 200 mW uygulanmıştır; 980 nm pompa lazerinin gücü ise 20 mW aralıklarla 40 mW-100 mW arasında arttırılmıştır. Çıkış kuplörü, optimum olarak belirlenen %10 bölme oranına sahiptir.



Şekil 4.26. Çift yönlü pompalanmış EDFA

Alınan ölçümler için 1480 nm ve 980 nm pompalama lazerlerinin gücü kademeli olarak arttırılıp bu değişimlerin OSGO ve çıkış güçlerine etkisi incelenmiştir. Öncelikle 1480 nm pompalama lazerinin gücü 40 mW'ye ayarlanmış ve 980 nm pompalama lazerinin gücü 20 mW'dan başlatılıp 100 mW'a kadar arttırılmıştır. Ardından 1480 nm pompalama lazerinin gücü 60 mW'ye çıkartılıp aynı şekilde 980 nm pompalama lazerinin gücü 20 mW - 100 mW aralığında 20 mW aralıklarla arttırılmıştır. En son ölçüm basamağı için 1480 nm pompalama lazeri 200 mW'de; 980 nm pompalama lazeri ise 100 mW'de kullanılmıştır. Lazerlerin maksimum çalışma gücü aşılmamıştır. Bölüm 4.2'de benzetim programında ölçümlerin alınıp optimizasyon işlemlerinin tamamlanmasının ardından EKFL, tekrar benzetim programında kurulmamıştır. Doğrudan deneysel kurulum değerleri alınmıştır. Artan pompalama gücü ile OSGO'nun da arttığı görülmüştür, bu sebeple grafiklerde karışıklığı önlemek adına tek OSGO çizimi yapılmıştır. Bu değer, iki pompalama lazerinin de maksimum güçte çalıştığı duruma aittir.

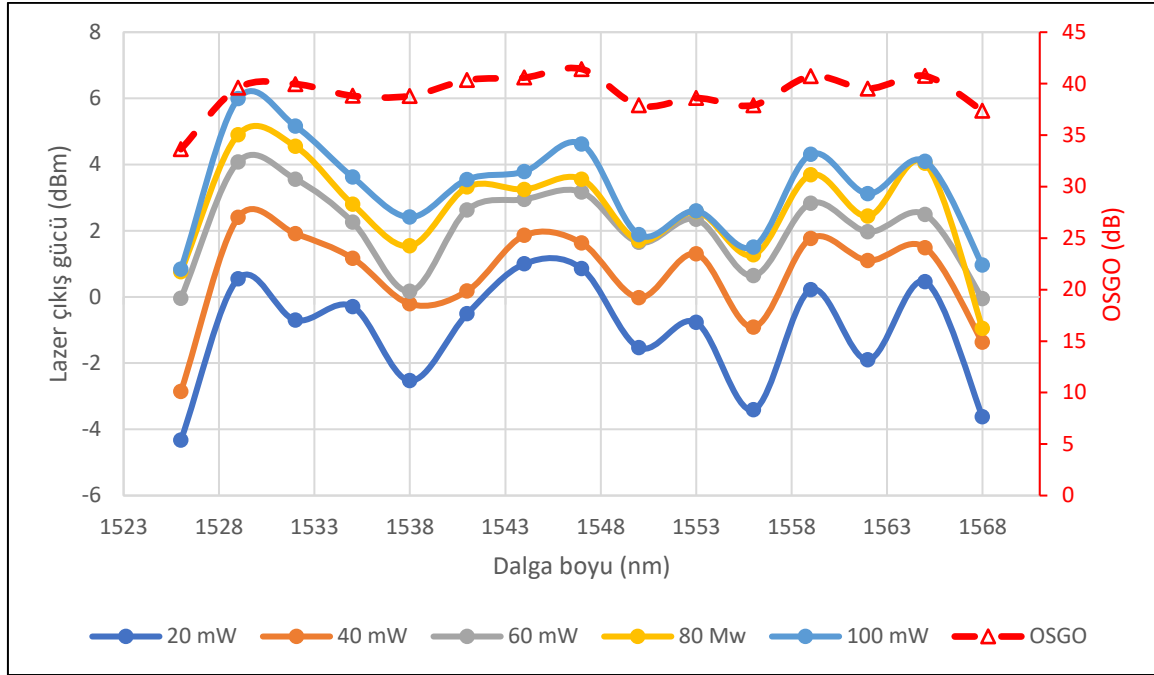


Şekil 4.27. %10 çıkış kuplöründe, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

980 nm pompalama lazerinin çalıştığı en düşük güç 20 mW ve en yüksek güç 100 mW arasında yaklaşık 5 dBm güç farkı olduğu Çizelge 4.8.'de görülmektedir. Bununla birlikte en düşük dalgalanma 980 nm pompalama lazerinin 80 mW'da çalıştığı durumda elde edilmektedir. Pompa gücündeki artışla beraber çıkış gücünün de arttığı fakat yaklaşık 60 mW sonrasında bu artış hızının yavaşladığı görülmektedir.

Çizelge 4.8. %10 çıkış kuplöründe, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-3,60	-1,54	-0,17	0,72	1,73
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	37,57				
Dalgalanma (dBm)	8,22	6,47	6,67	5,78	6,31

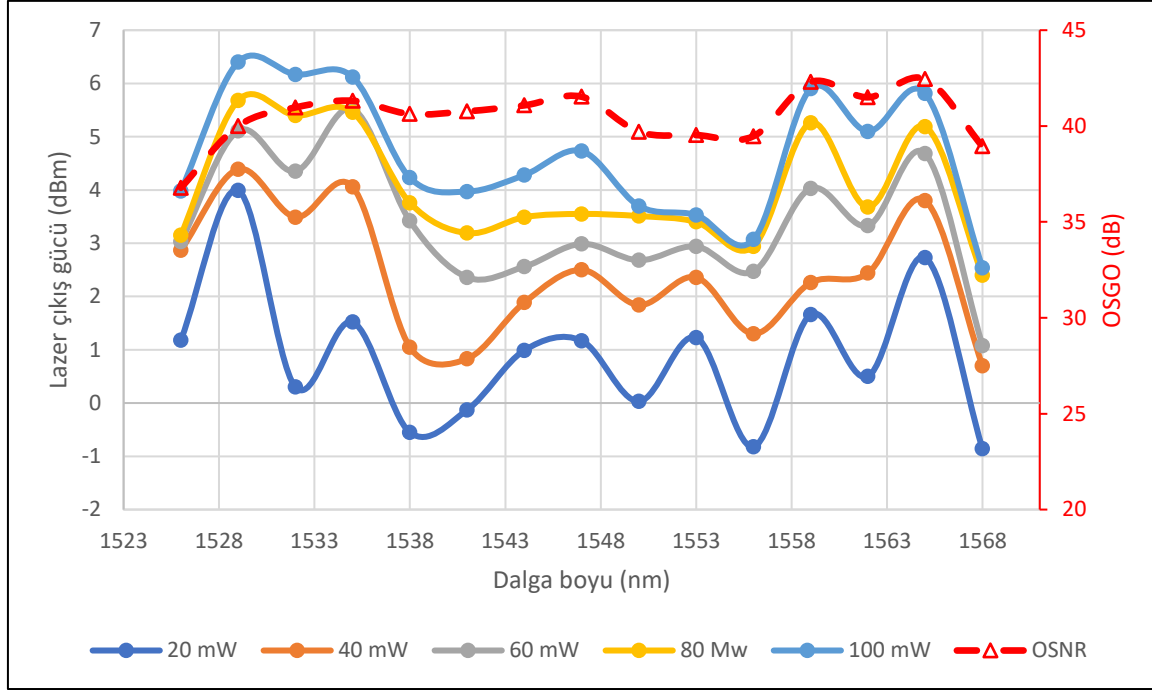


Şekil 4.28. %10 çıkış kuplöründe, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.9. %10 çıkış kuplöründe, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-1,1	0,62	2,04	2,63	3,23
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	39,06				
Dalgalanma (dBm)	5,33	5,23	4,13	5,85	5,15

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 40 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) yaklaşık 1,5 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 1,16 dBm azalma olmuştur, OSGO 1,47 dB artmıştır.

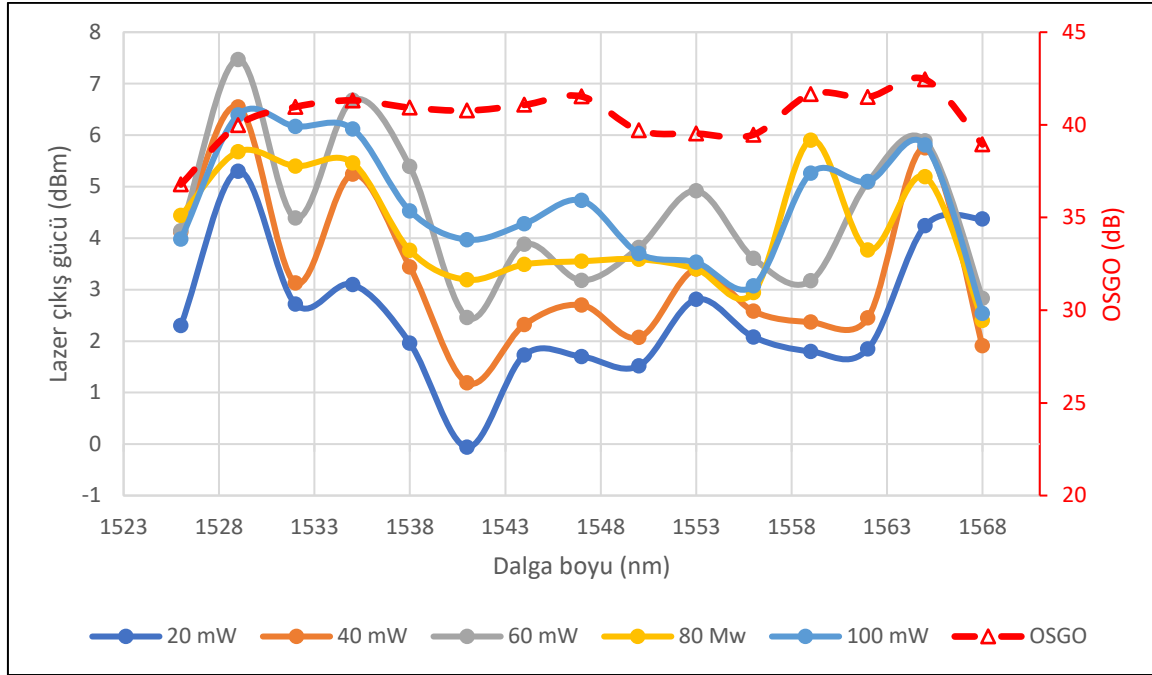


Şekil 4.29. %10 çıkış kuplöründe, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.10. %10 çıkış kuplöründe, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	0,86	2,34	3,37	3,98	4,63
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	40,46				
Dalgalanma (dBm)	3,13	3,69	4,44	3,28	3,86

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 60 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW'da çalıştığı durum) yaklaşık 1,4 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 1,29 dBm azalma olmuştur, OSGO 1,41 dB artmıştır.

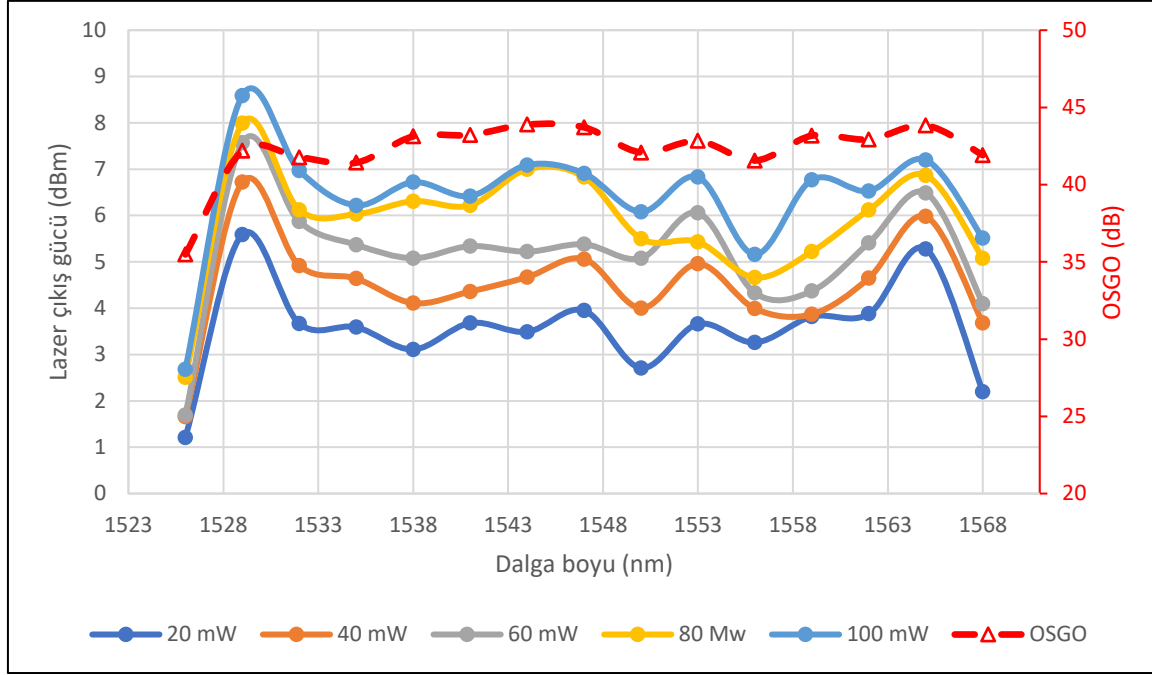


Şekil 4.30. %10 çıkış kuplöründe, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.11. %10 çıkış kuplöründe, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	2,49	3,28	4,46	4,14	4,61
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	40,44				
Dalgalanma (dBm)	5,36	5,37	5,01	3,5	3,85

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 80 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,02 dBm daha düşük güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,01 dBm azalma olmuştur, önceki basamakla değişim olmadığı kabul edilebilir. OSGO 0,02 dB azalmıştır.

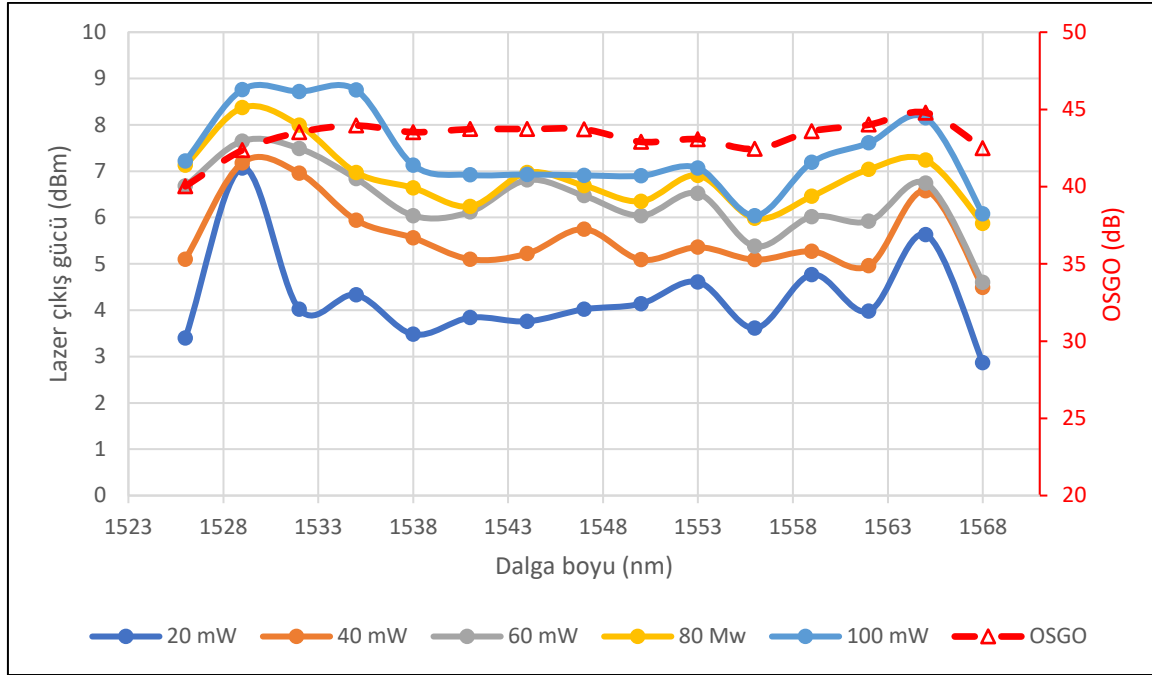


Şekil 4.31. %10 çıkış kuplöründe, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.12. %10 çıkış kuplöründe, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	3,54	4,48	5,15	5,85	6,37
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	42,20				
Dalgalanma (dBm)	4,38	5,06	5,88	5,48	5,91

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 100 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW'da çalıştığı durum) 1,76 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 2,06 dBm artma olmuştur, lazer daha kararsız çalışmaktadır. OSGO 1,76 dB artmıştır.

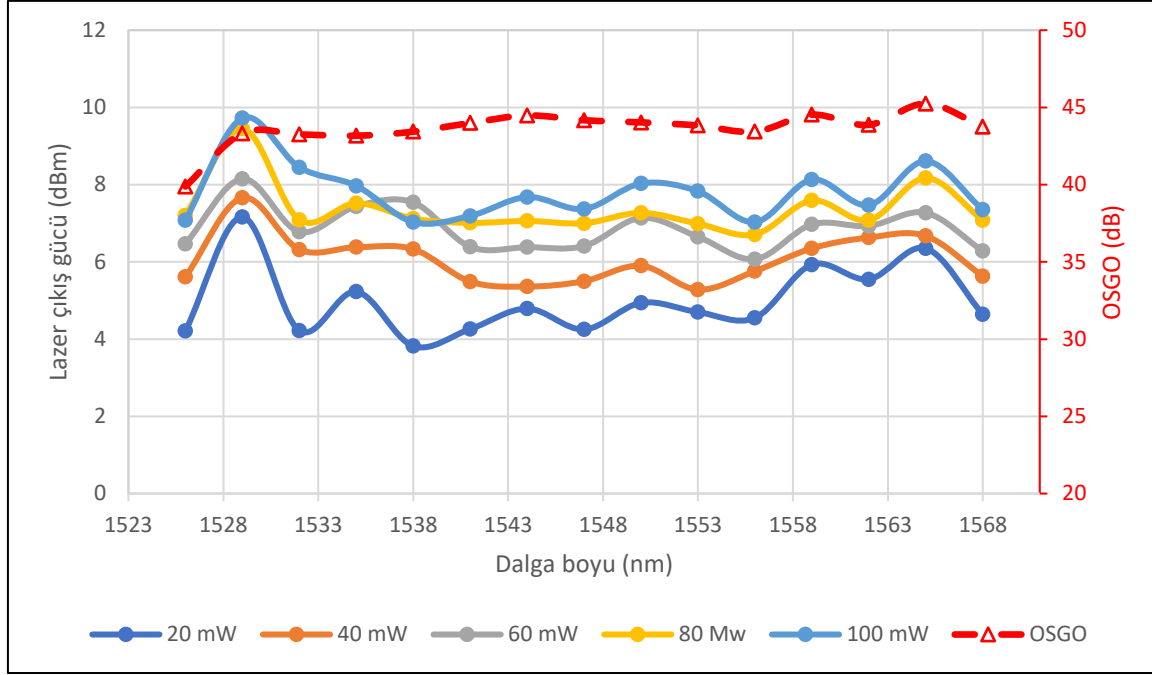


Şekil 4.32. %10 çıkış kuplöründe, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.13. %10 çıkış kuplöründe, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	4,23	5,57	6,35	6,85	7,35
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	43,18				
Dalgalanma (dBm)	4,2	2,69	3,05	2,5	2,72

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 120 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW'da çalıştığı durum) 0,98 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 3,19 dBm azalma olmuştur, lazerin daha düz bir spektrumda çalıştığı görülmüştür. OSGO 0,98 dB artmıştır.

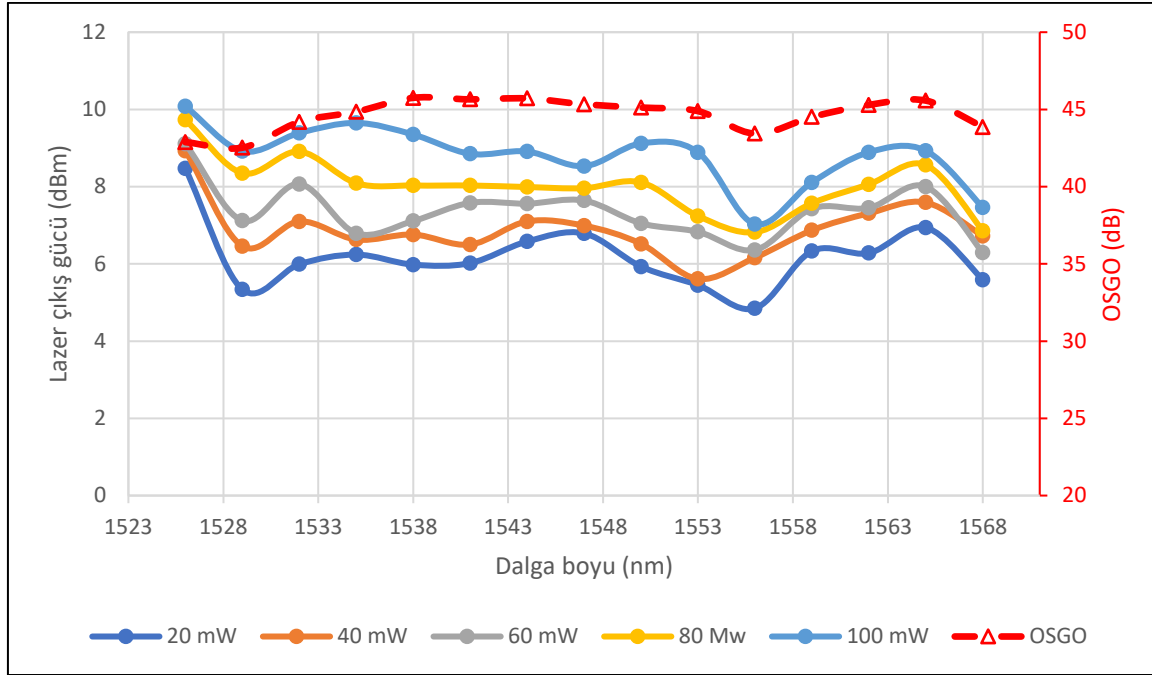


Şekil 4.33. %10 çıkış kuplöründe, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.14. %10 çıkış kuplöründe, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	4,97	6,05	6,58	7,35	7,79
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	43,62				
Dalgalanma (dBm)	3,34	2,38	2,08	2,74	2,69

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 140 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW'da çalıştığı durum) 0,44 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,03 dBm azalma olmuştur, büyük bir değişim olmadığı görülmektedir. OSGO 0,44 dB artmıştır.

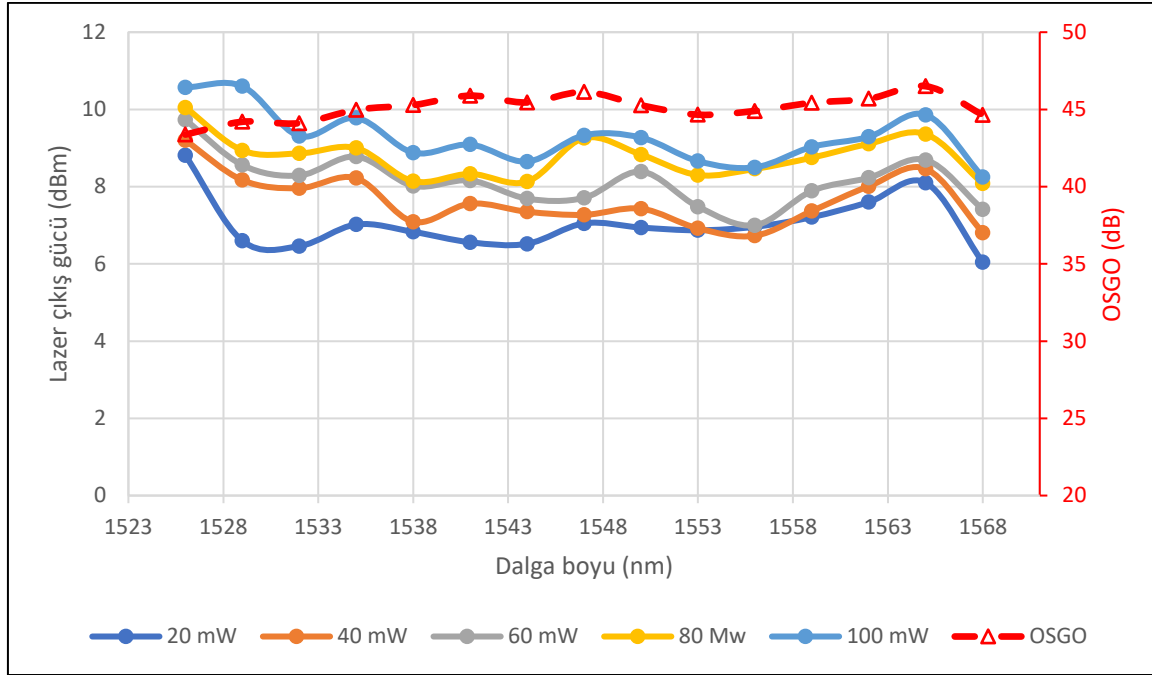


Şekil 4.34. %10 çıkış kuplöründe, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.15. %10 çıkış kuplöründe, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	6,18	6,88	7,35	8,02	8,80
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	44,63				
Dalgalanma (dBm)	3,62	3,32	2,82	2,91	3,05

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 160 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW'da çalıştığı durum) yaklaşık 1 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,36 dBm artış olmuştur. OSGO değerinde yaklaşık 1 dB artış gözlemlenmiştir.

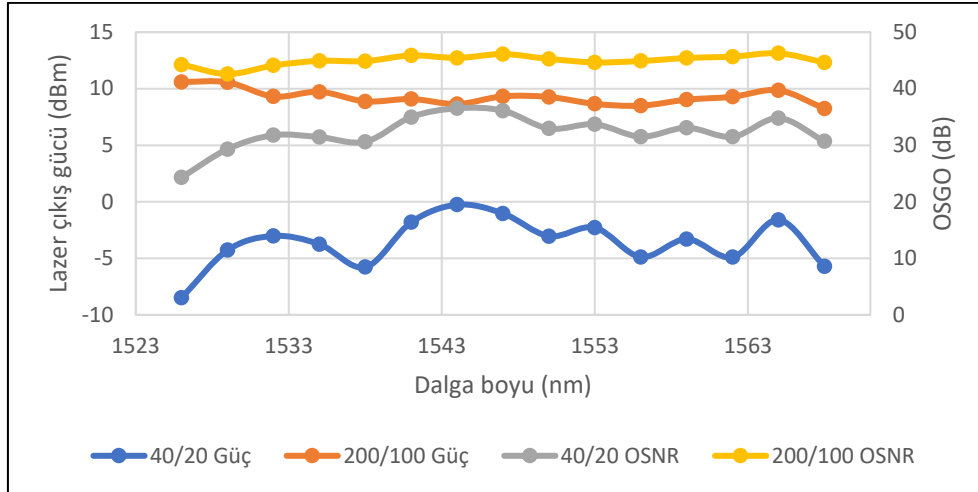


Şekil 4.35. %10 çıkış kuplöründe, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.16. %10 çıkış kuplöründe, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

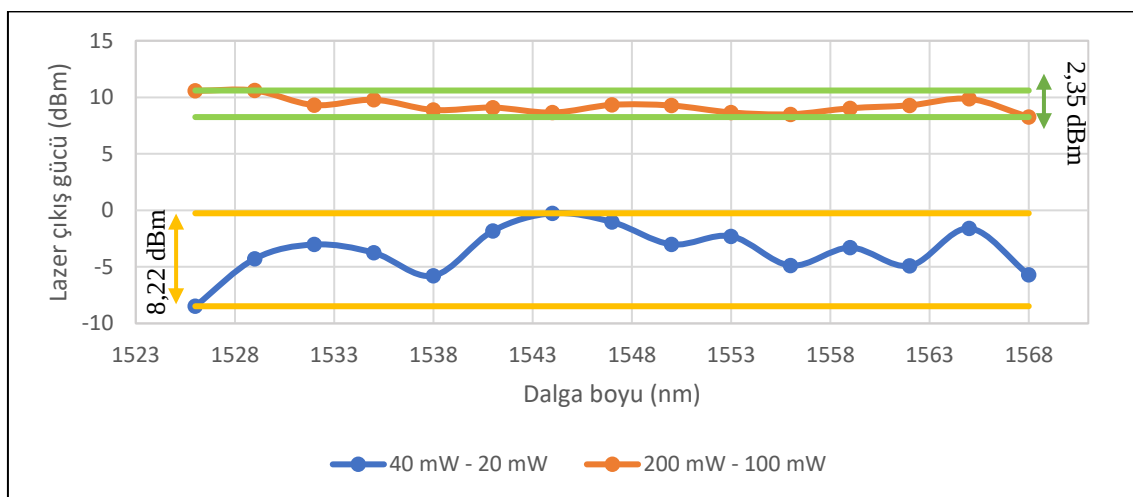
	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	7,03	7,63	8,13	8,77	9,21
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	45,10				
Dalgalanma (dBm)	2,77	2,47	2,73	2,74	1,97

Bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 180 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) yaklaşık 0,41 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 1,08 dBm azalma olmuştur. OSGO değerinde yaklaşık 0,47 dB artış gözlemlenmiştir. Çift pompalama için en yüksek OSGO ve ortalama çıkış gücü gözlemlenmiş olup, 1,97 dB düşük dalgalanma elde edilmiştir.



Şekil 4.36. %10 çıkış kuplöründe, 1480 nm ileri ve 980 nm geri yönlü pompalamada maksimum ve minimum pompalama güçlerinde benzetim ve deneysel verilerin karşılaştırılması

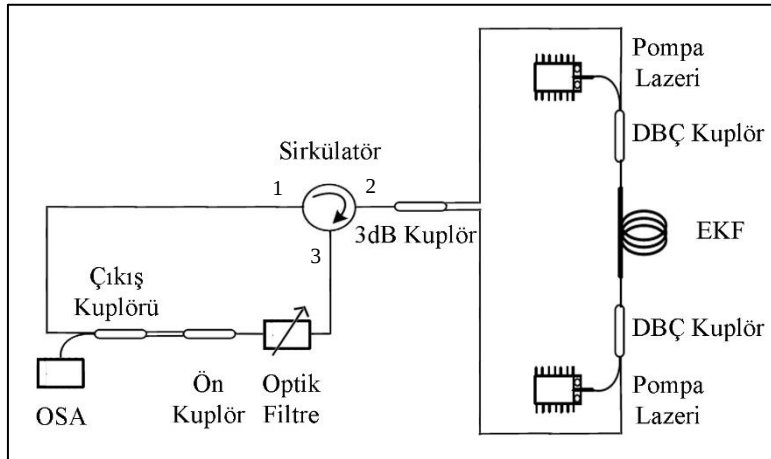
Şekil 4.36.'da görüldüğü üzere 1480 nm pompalama lazerinin minimum çıkış gücü 40 mW ve 980 nm pompalama lazerinin minimum çıkış gücü 20 mW'de çalışan lazerlerle kurulmuş olan çift pompalanmış EKFL çok fazla dalgalanma değerine sahiptir, düz bir çıkış spektrumundan oldukça uzaktır. İki pompalama lazerinin de maksimum çalışma gücüne çıkarılmasıyla (1480 nm için 200 mW ve 980 nm için 100 mW) pompalama değerinde 12,81 dBm artış olmuştur ve daha düz bir çıkış spektrumu elde edilmektedir. Bununla birlikte lazerin her dalga boyu için OSGO'da da artış olmuştur.



Şekil 4.37. Çift yönlü pompalanmış EKFL'nin maksimum ve minimum pompa güçlerinde dalgalanma miktarları

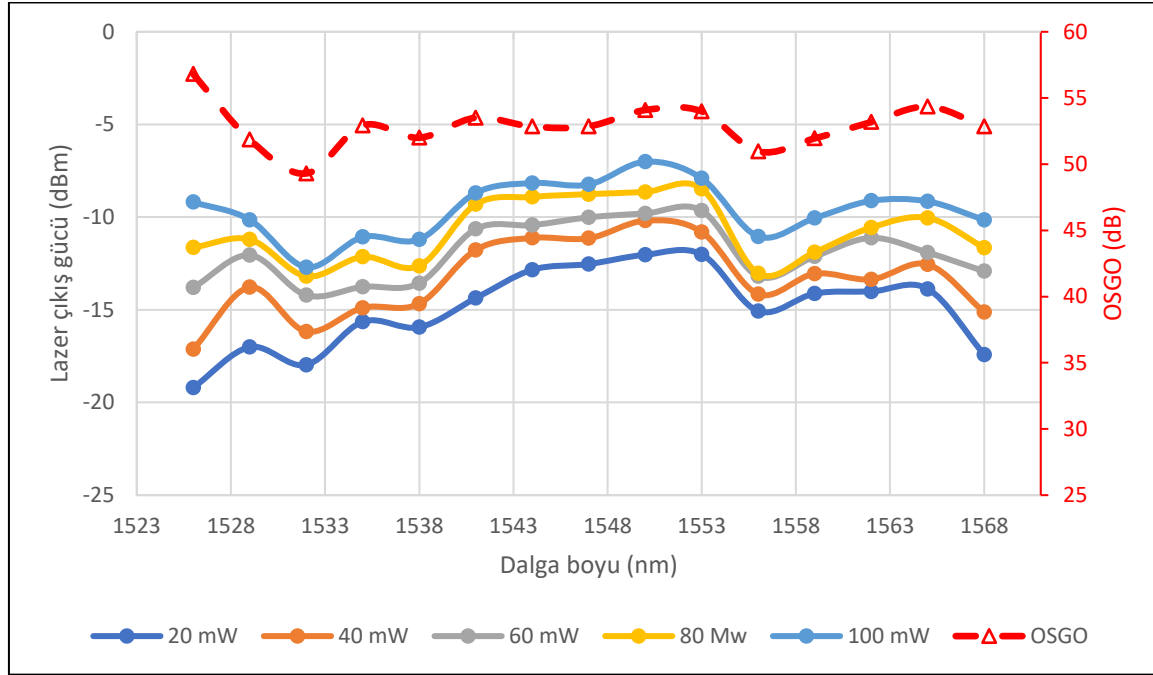
4.4. Ön kuplörlü Döngü Tipi EKY Tabanlı Erbiyum Katkılı Fiber Lazer

Önerilen bu yeni tasarımda 1480 nm ileri pompalama; 980 nm geri pompalama olmak üzere çift yönlü pompalama yapılmıştır. 1480 nm tek yönlü pompalamada yüksek çıkış gücü ve yüksek OSGO %10 çıkış kuplörü ile elde edildiği için çıkış kuplörü bu tasarımda da %10 olarak seçilmiştir. Kullanılan 2 DBÇ kuplörün pompa lazerleriyle ek yapılmamış olan kısımları, 1x2 3 dB kuplör ile (%50-%50 bölme oranına sahiptir.) birleştirilmiştir ve bu kuplörün diğer ucu da sirkülatörün 2? numaralı bacağı ile ek yapılmıştır. Sirkülatörün 3 numaralı bacağı ve optik filtrenin giriş portu arasında bağlantı yapılmıştır. 2 numaralı bacağından gelen sinyal, filtrenin bağlı olduğu 3 numaralı porta geçiş yapmaktadır. Filtrenin çıkış portu direkt çıkış kuplörüne yönlendirilmemiştir; onun yerine farklı bir kuplörle bağlantısı yapılmıştır. Bu eklenen kuplör, çıkış kuplörünün önüne yerleştirildiği için ön kuplör denmiştir. Tasarıma yeni eklenen bu kuplörler için %1 ve %50 bölme oranına bağlı sonuçlar alınmıştır. Eklenen bu kuplörler, 2x2 çıkış kuplörü ile ek yapılmıştır ve aynı şekilde çıkış kuplörünün %10'luk portu gözlem için OSA'ya yönlendirilmiş; %90'luk portu ise tekrar döngü içerisine sokulmuştur.



Şekil 4.38. Ön kuplörlü döngü tipi EKY tabanlı EKFL

Ön koplör bölme oranı: %1

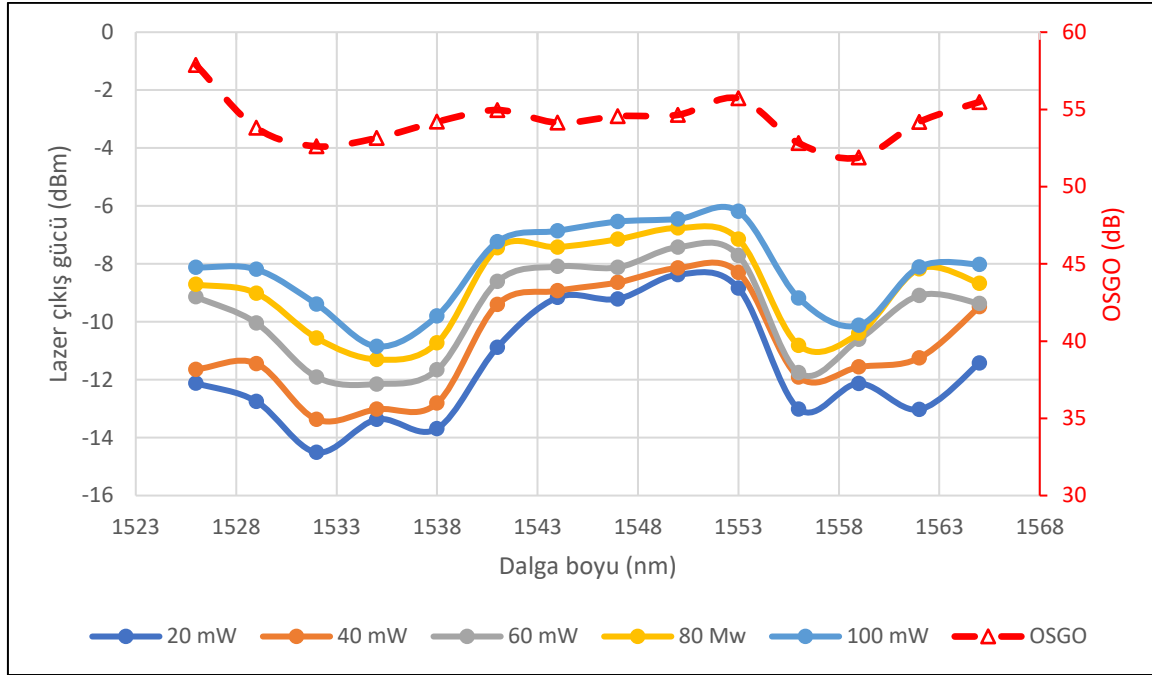


Şekil 4.39. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.17. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-14,93	-13,32	-11,94	-10,80	-9,58
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	52,89				
Dalgalanma (dBm)	7,19	6,94	4,56	4,72	5,69

980 nm pompalama lazerinin minimum çalışma gücü 20 mW'dan maksimum gücü 100 mW'a artışı ile EKFL çıkış gücünde yaklaşık 5 dBm artış olmuştur. Dalgalanma miktarında ise 1,5 dBm sonuç elde edilmiştir.

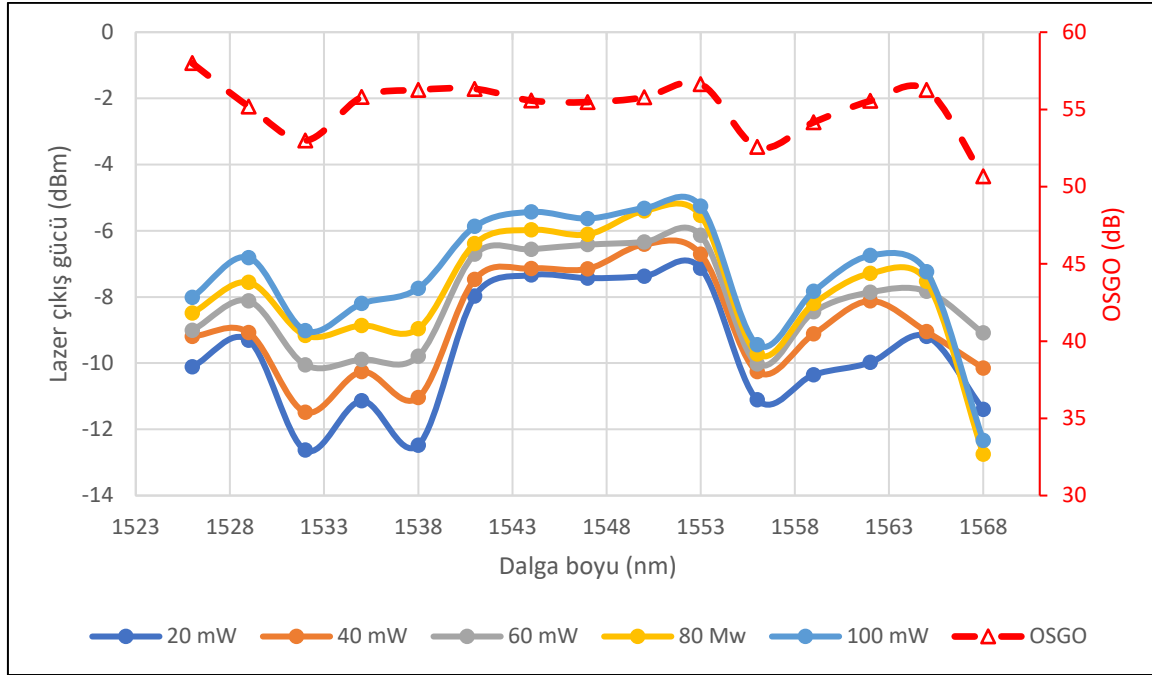


Şekil 4.40. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.18. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-11,60	-10,70	-9,69	-8,87	-8,21
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	54,28				
Dalgalanma (dBm)	6,14	5,233	4,73	4,54	4,66

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 40 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 1,37 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 1,03 dBm azalma olmuştur. OSGO 1,39 dB artmıştır.

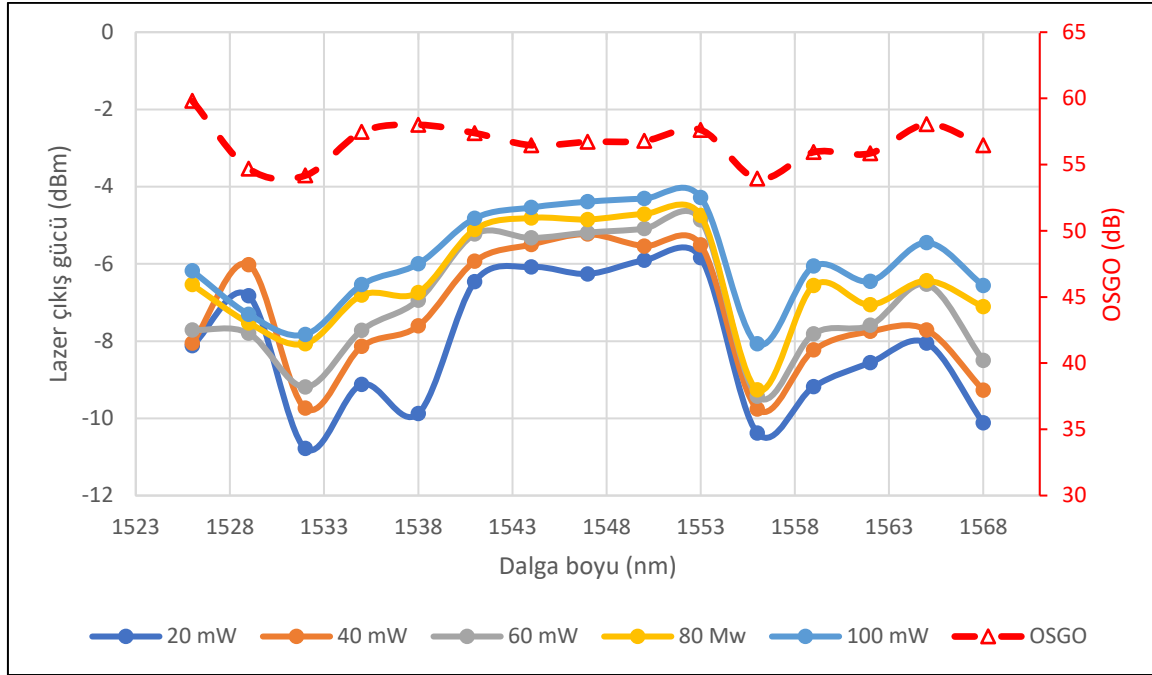


Şekil 4.41. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.19. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-9,66	-8,84	-8,15	-7,86	-7,39
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	55,14				
Dalgalanma (dBm)	5,5	5,07	3,91	7,35	7,08

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 60 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,82 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 2,42 dBm artış olmuştur. OSGO 4,86 dB artmıştır.

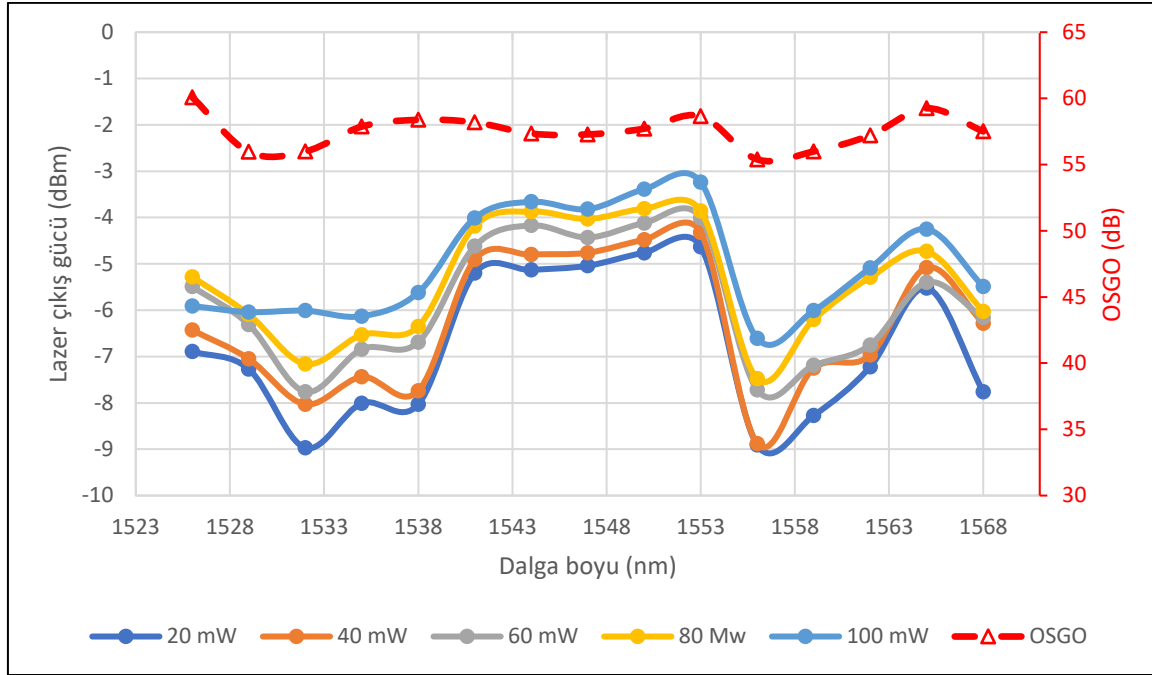


Şekil 4.42. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.20. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-8,10	-7,33	-6,99	-6,42	-5,91
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	56,62				
Dalgalanma (dBm)	4,94	4,53	4,57	4,55	3,79

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 80 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 1,48 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 3,29 dBm azalma olmuştur. OSGO 1,48 dB artmıştır.

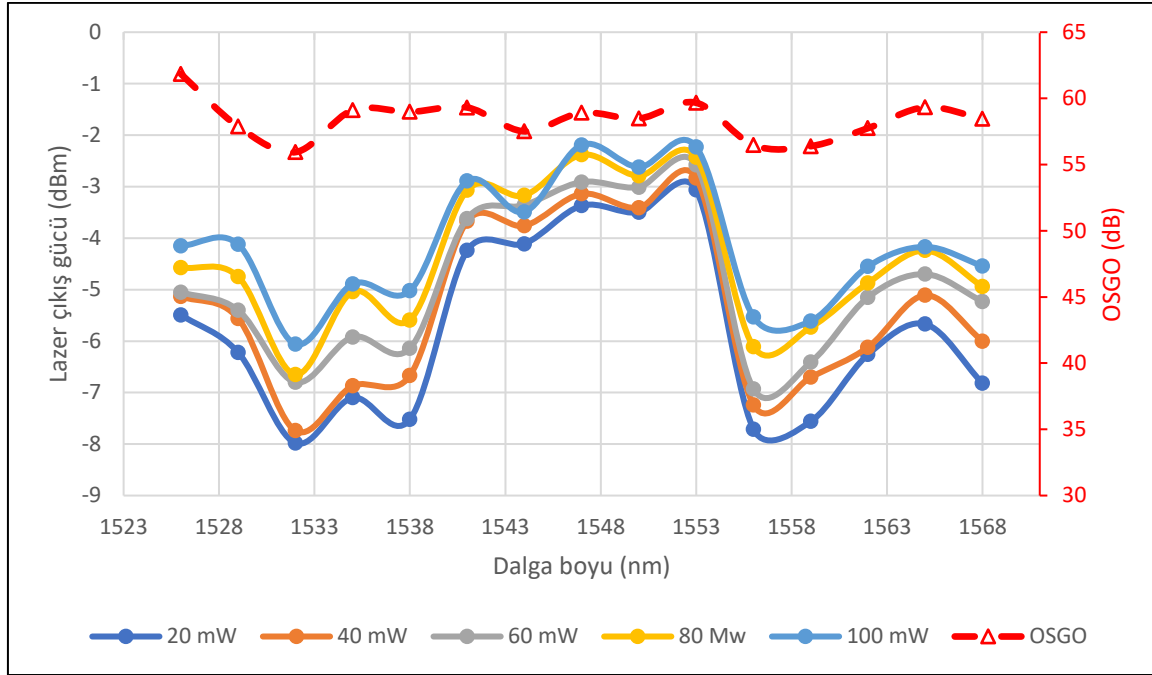


Şekil 4.43. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.21 Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-6,77	-6,29	-5,84	-5,39	-5,01
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	57,52				
Dalgalanma (dBm)	4,34	4,56	3,75	3,67	3,37

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 100 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW'da çalıştığı durum) 0,90 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,42 dBm azalma olmuştur. OSGO 0,91 dB artmıştır.

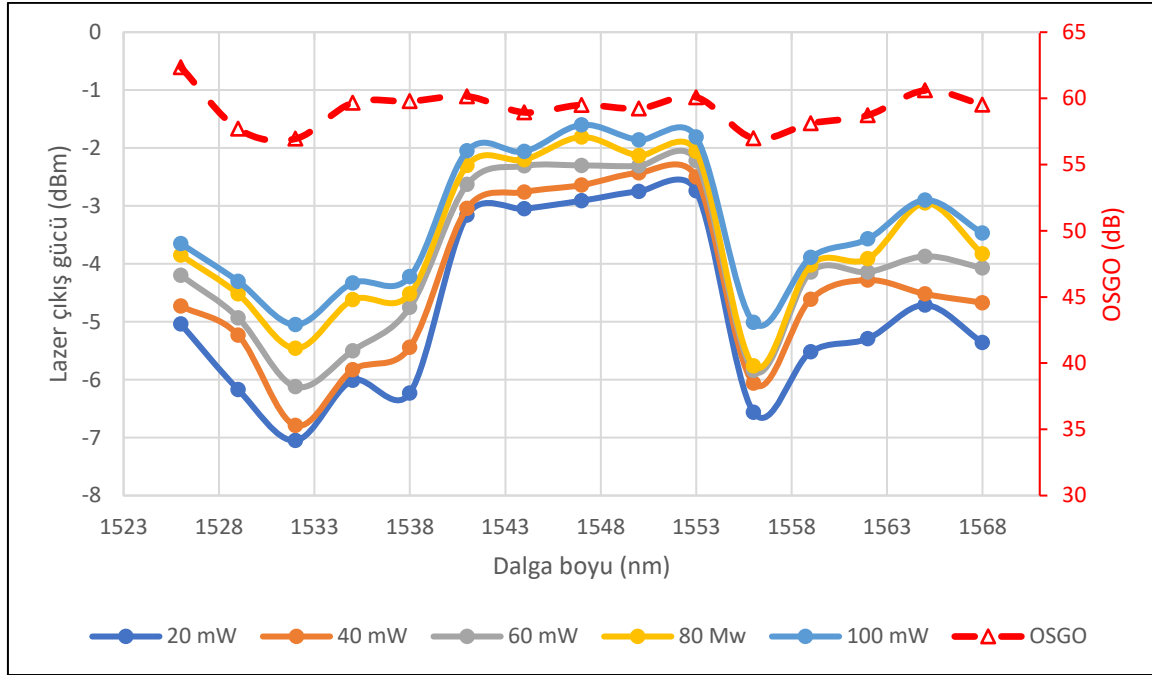


Şekil 4.44. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.22. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 140 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-5,77	-5,33	-4,88	-4,42	-4,13
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	58,40				
Dalgalanma (dBm)	4,92	4,91	4,35	4,27	3,87

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 120 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,88 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,50 dBm artış olmuştur. OSGO 0,88 dB artmıştır.

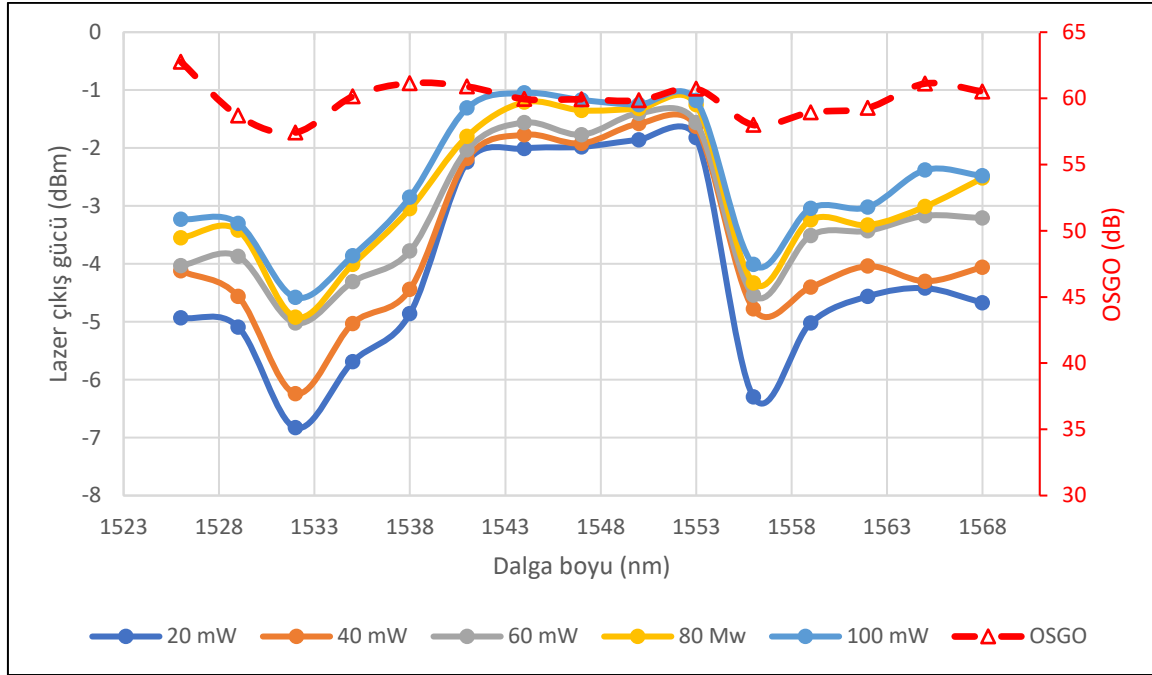


Şekil 4.45. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.23. Ön koplör %1, %10 çıkış koplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-4,83	-4,36	-3,95	-3,59	-3,31
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	59,22				
Dalgalanma (dBm)	4,31	4,36	3,9	3,95	3,45

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 140 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,82 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,42 dBm azalma olmuştur. OSGO 0,88 dB artmıştır.

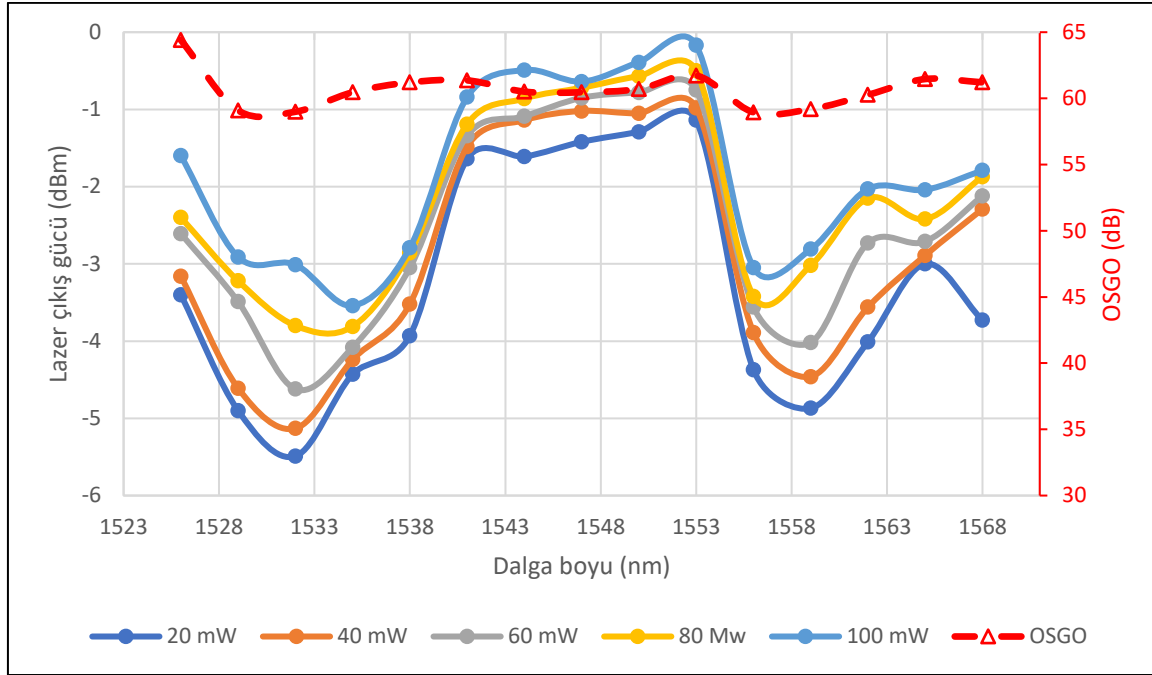


Şekil 4.46. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.24 Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-4,15	-3,67	-3,14	-2,82	-2,58
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	59,95				
Dalgalanma (dBm)	5,01	4,66	3,62	3,71	3,53

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 160 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,73 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,08 dBm artış olmuştur. OSGO 0,73 dB artmıştır.



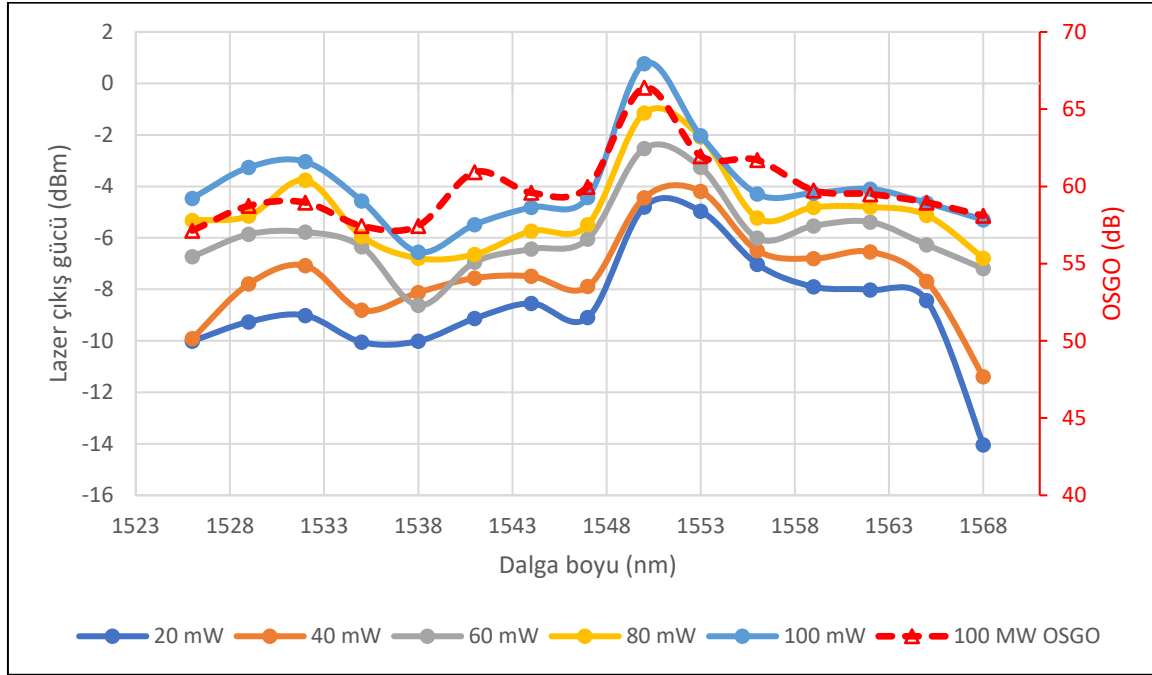
Şekil 4.47. Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.25 Ön kuplör %1, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-3,28	-2,89	-2,52	-2,18	-1,87
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	60,66				
Dalgalanma (dBm)	4,35	4,15	3,87	3,31	3,37

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 180 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,71 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,16 dBm azalma olmuştur. OSGO 0,71 dB artmıştır.

Ön kuplör bölme oranı %50

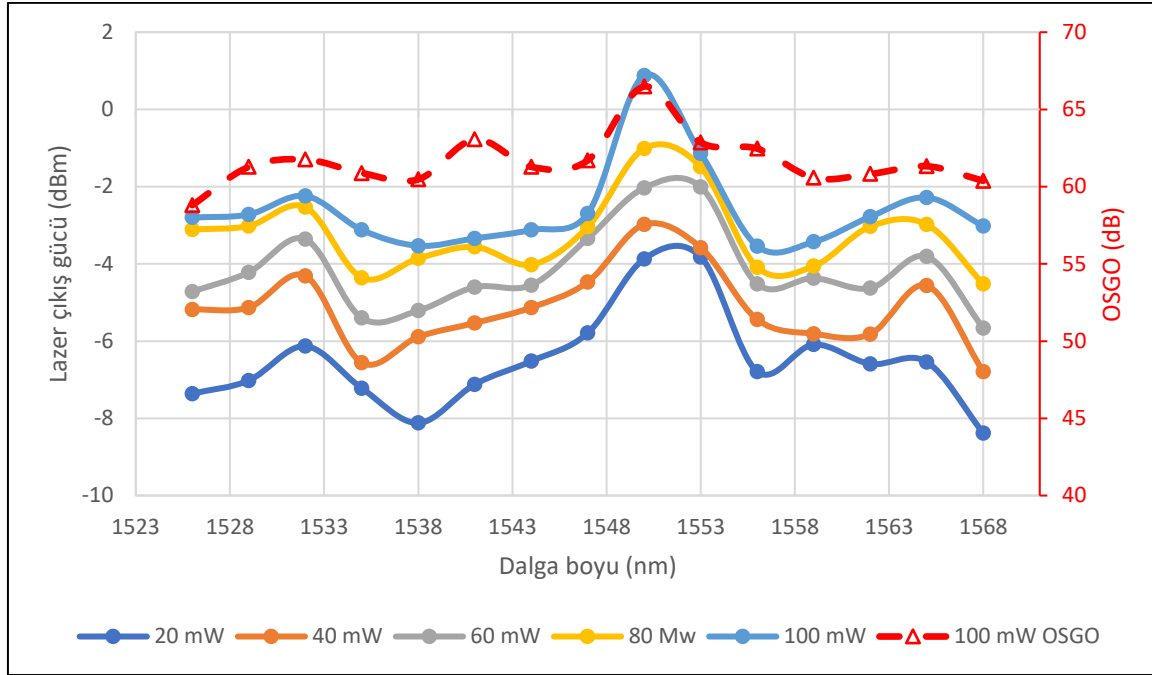


Şekil 4.48. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.26 Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 40 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-8,68	-7,47	-5,92	-4,98	-4,02
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	59,77				
Dalgalanma (dBm)	9,24	7,2	6,09	5,64	7,32

980 nm pompalama lazerinin çalıştığı en düşük güç 20 mW ve en yüksek güç 100 mW arasında yaklaşık 4.5 dBm güç farkı olduğu Çizelge 6.17.'de görülmektedir. Bununla birlikte en düşük dalgalanma 980 nm pompalama lazerinin 80 mW'da çalıştığı durumda elde edilmektedir. Pompa gücündeki artışla beraber çıkış gücünün de arttığı fakat 60 mW -80 mW aralığı sonrasında bu artış hızının yavaşladığı görülmektedir.

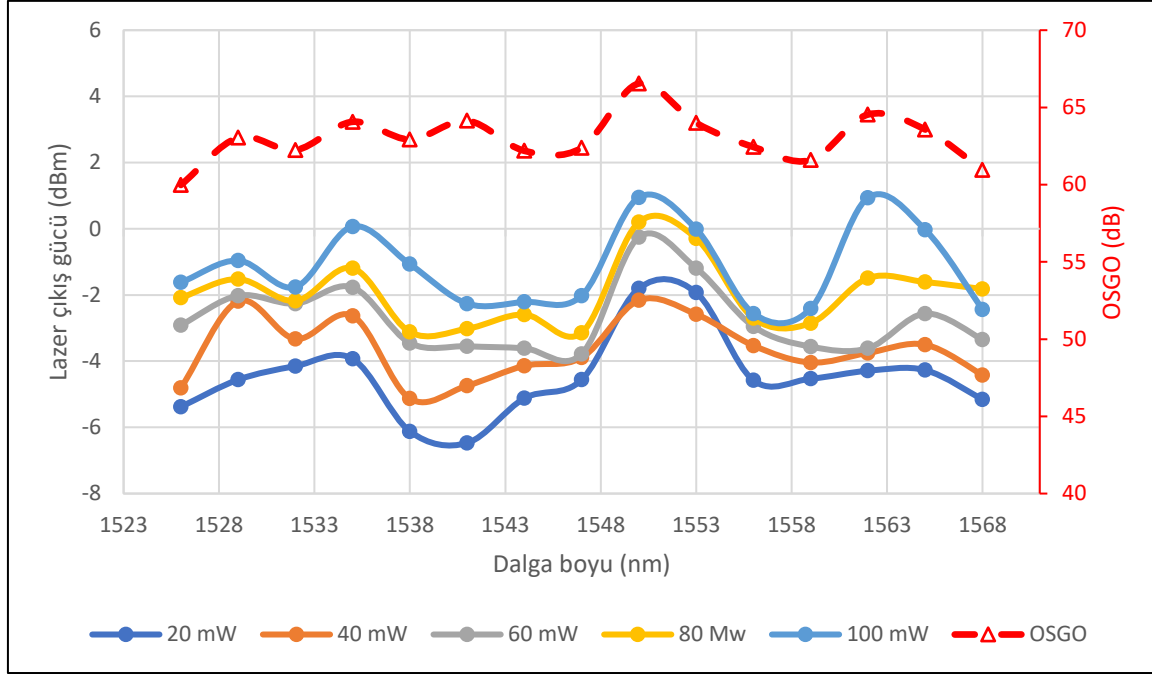


Şekil 4.49. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.27 Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 60 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-6,49	-5,14	-4,16	-3,24	-2,59
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	61,60				
Dalgalanma (dBm)	4,56	3,81	3,65	3,51	4,42

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 40 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW'da çalıştığı durum) 1,43 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 2,90 dBm azalma olmuştur. OSGO 1,83 dB artmıştır.

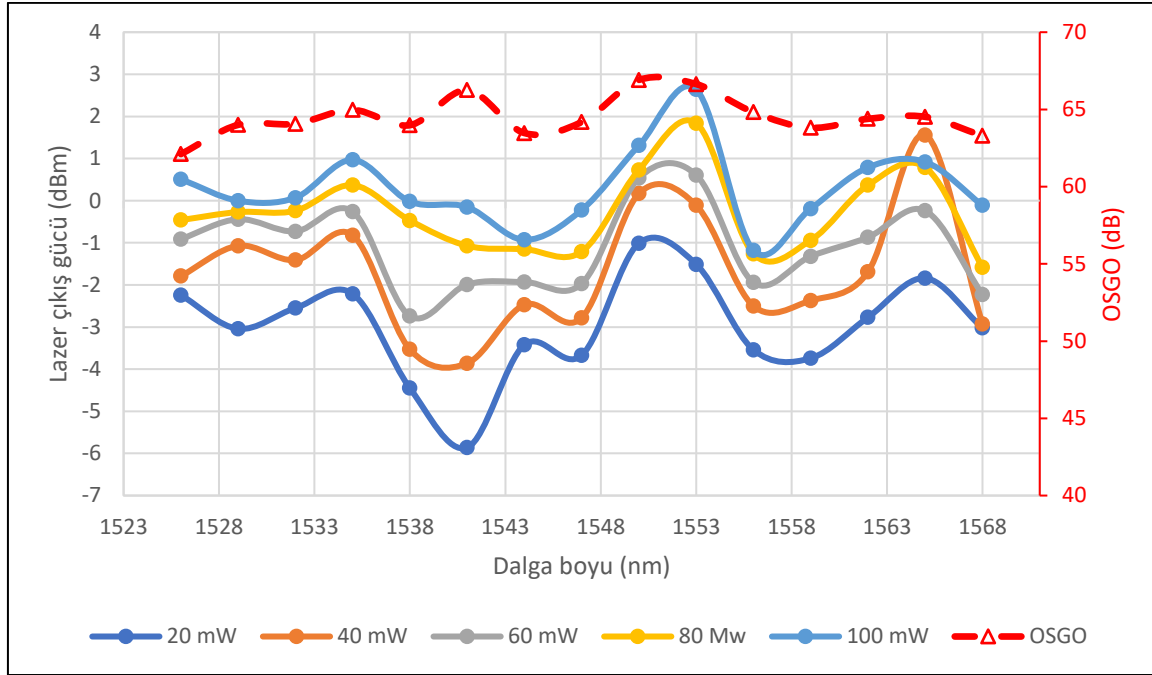


Şekil 4.50. Ön koplör %50, %10 çıkış koplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.28 Ön koplör %50, %10 çıkış koplörü, 80 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-4,45	-3,65	-2,72	-1,96	-1,15
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	62,97				
Dalgalanma (dBm)	4,67	2,97	3,53	3,34	3,51

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 60 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 1,44 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,62 dBm azalma olmuştur. OSGO 1,37 dB artmıştır.

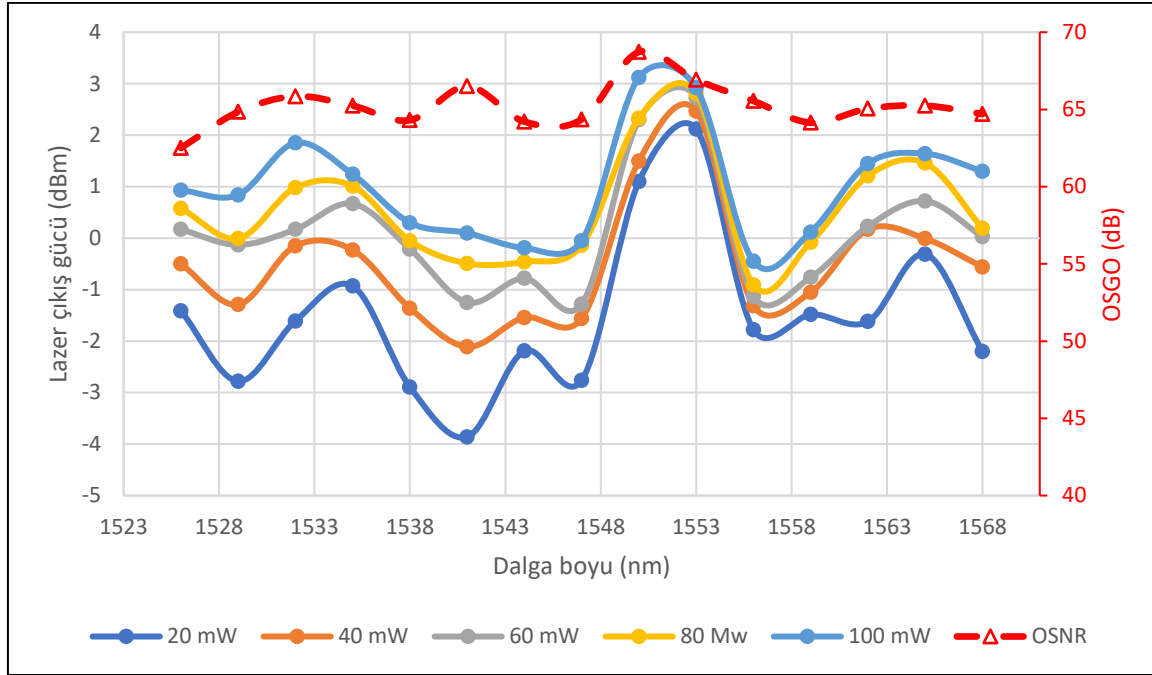


Şekil 4.51. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.29 Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 100 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mw
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-2,99	-1,70	-1,09	-0,30	0,29
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	64,49				
Dalgalanma (dBm)	4,85	5,42	3,35	3,42	3,82

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 80 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 1,44 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,31 dBm artış olmuştur. OSGO 1,52 dB artmıştır.

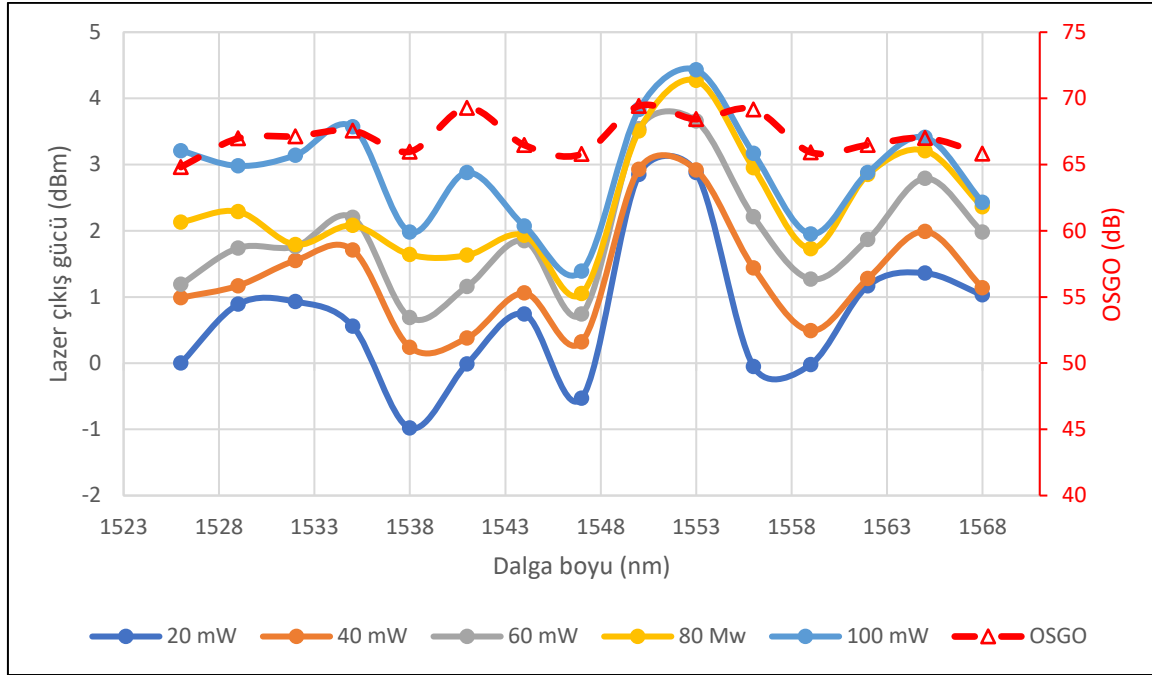


Şekil 4.52. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.30 Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 120 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	-1,50	-0,50	0,09	0,56	1,00
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	65,20				
Dalgalanma (dBm)	5,98	4,58	4,01	3,72	3,57

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 100 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,71 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,25 dBm azalma olmuştur. OSGO 0,71 dB artmıştır.

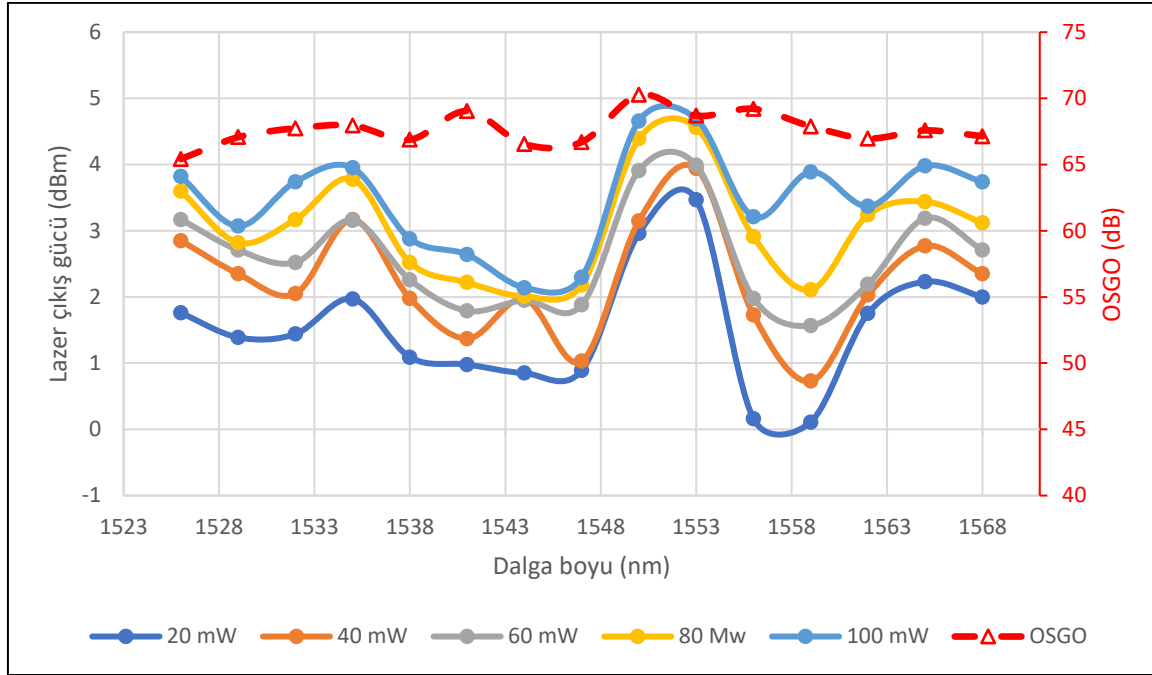


Şekil 4.54. Ön koplör %50, %10 çıkış koplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.32. Ön koplör %50, %10 çıkış koplörü, 160 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pompalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	0,72	1,30	1,91	2,36	2,88
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	67,08				
Dalgalanma (dBm)	3,86	2,69	2,97	3,22	3,04

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 140 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,78 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,34 dBm artış olmuştur. OSGO 0,78 dB artmıştır.

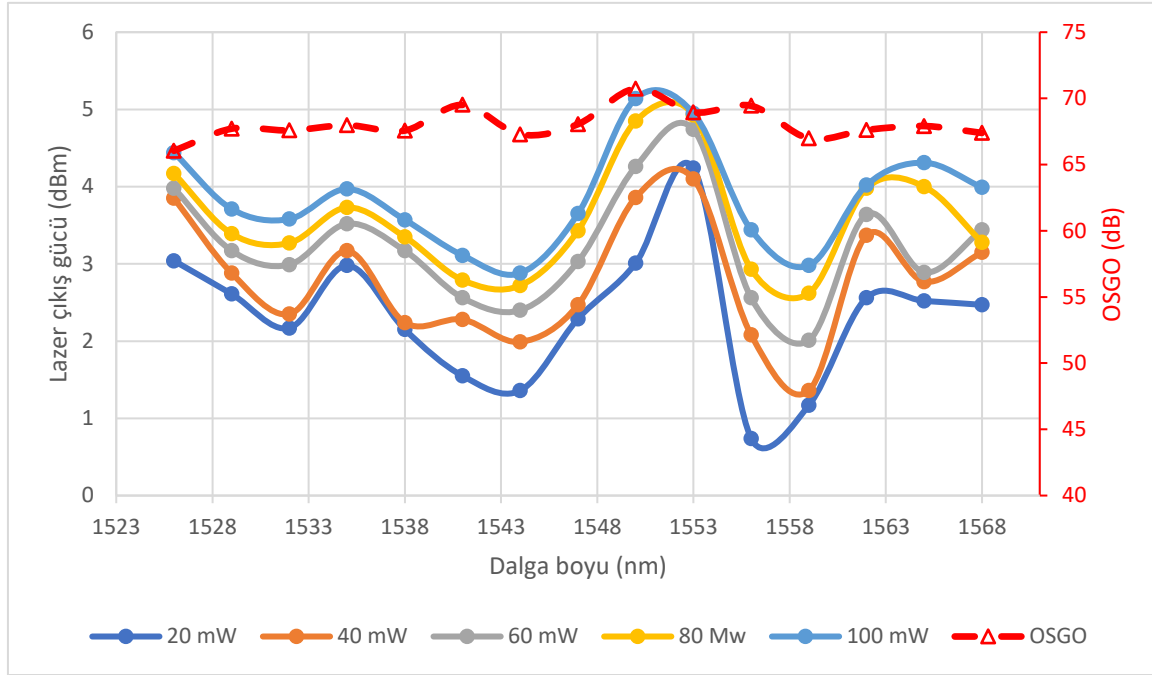


Şekil 4.55. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

Çizelge 4.33. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 180 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pomapalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	1,53	2,21	2,59	3,07	3,42
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	67,68				
Dalgalanma (dBm)	3,36	3,21	2,42	2,55	2,56

Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 160 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,54 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,48 dBm azalma olmuştur. OSGO 0,60 dB artmıştır.



Şekil 4.56. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, artan geri yönlü 980 nm pompa gücüne karşılık lazer çıkış gücü ve OSGO ilişkisine ait deneysel veriler

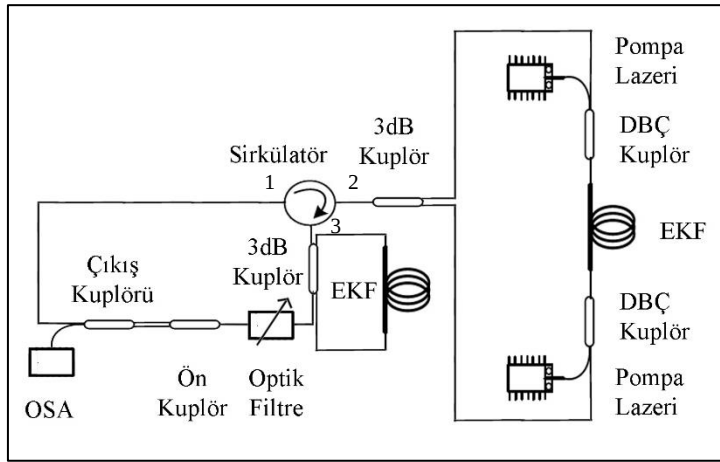
Çizelge 4.34. Ön kuplör %50, %10 çıkış kuplörü, 200 mW, 1480 nm ileri yönlü pompalamada, 980 nm geri yönlü pompalamada lazer çıkış gücü, ortalama OSGO değerleri ve çıkış güçleri arasındaki dalgalanma miktarlarının deneysel kurulum değerleri

	20 mW	40 mW	60 mW	80 mW	100 mW
Ortalama çıkış gücü (dBm)	2,32	2,79	3,22	3,56	3,84
Maksimum pompa gücünde ortalama OSGO (dB)	68,04				
Dalgalanma (dBm)	3,5	2,74	2,73	2,31	2,26

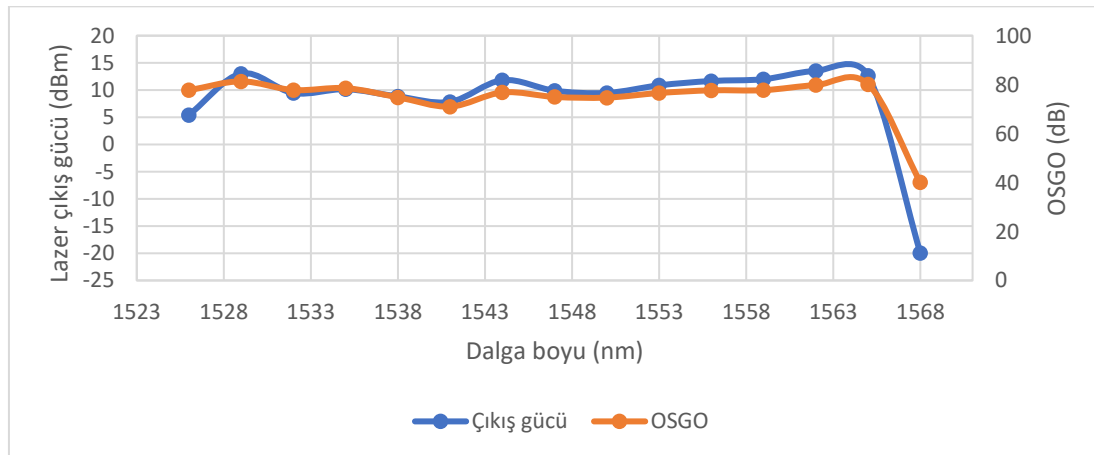
Maksimum pompalama gücünde bir önceki basamağa göre (1480 nm pompalama lazerinin 180 mW, 980 nm pompalama lazerinin maksimum gücü 100 mW’da çalıştığı durum) 0,42 dBm daha yüksek güç elde edilmiştir. Dalgalanma miktarında 0,30 dBm azalma olmuştur. OSGO 0,36 dB artmıştır.

4.5. Ön kuplörlü Döngü Tipi EKY Tabanlı ve Doğrusal Olmayan Yükselteç Döngü Aynalı Erbiyum Katkılı Fiber Lazer

Bölüm 4.4.'te incelenmiş olan ön kuplörlü EKFL tasarımına optik filtre öncesinde DOYDA eklenmiştir. Sirkülatörün 3 numaralı bacağından gelen optik sinyal %50-%50 bölme oranına sahip 2x2 kuplöre yönlendirilmiştir. Döngü içerisinde 1 m I6 EKF kullanılmıştır; parametreleri EKFL tasarımında kullanılan erbiyum katkılı fiber ile aynıdır. Ön kuplör için önceki ölçümlerde en yüksek gücü verdiği görüldüğü %50 kuplör kullanılmıştır. Önceki tüm ölçümlerden elde edilen bilgiler doğrultusunda sadece iki pompa lazerinin de maksimum güçte çalıştığı durumdaki EKFL çıkış gücü ve OSGO değeri Şekil 4.58.'de verilmiştir.

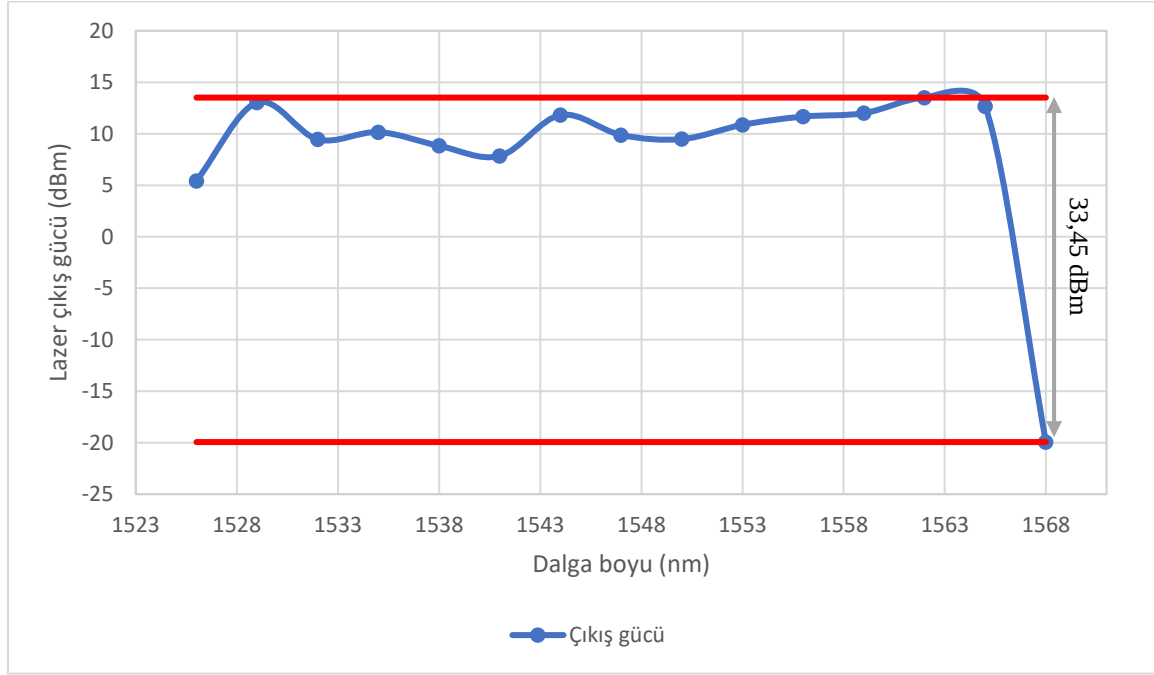


Şekil 4.57. Ön kuplörlü döngü tipi EKY tabanlı ve doğrusal olmayan optik döngü aynalı erbiyum katkılı fiber lazer



Şekil 4.58. 1 m EKF içeren doğrusal olmayan yükselteç döngü aynalı EKFL deneysel veriler

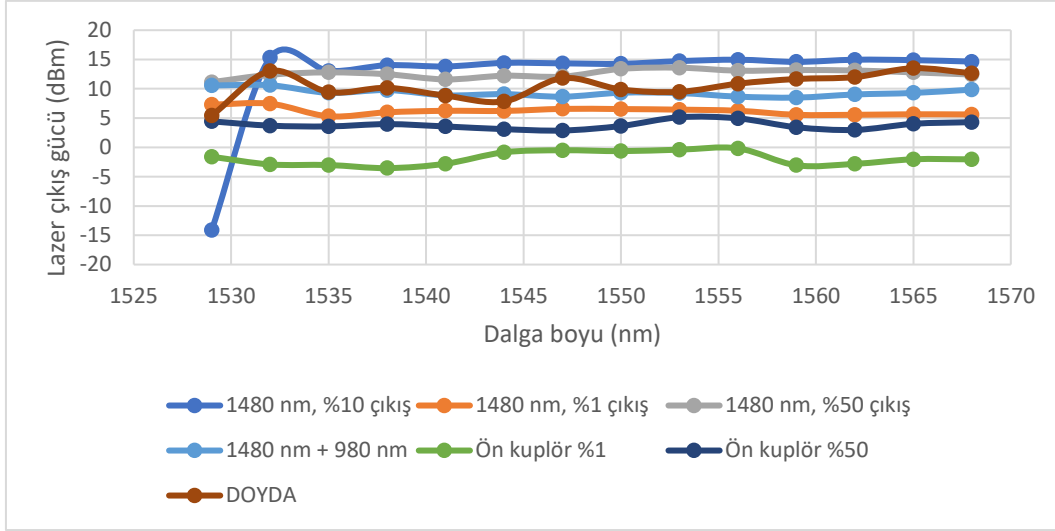
Şekil 6.54.'te DOYDA eklenmiş olan ön kuplörli EKFL tasarımına ait 1480 nm pompalama lazerinin maksimum çıkış gücü 200 mW; 980 nm pompalama lazerinin 100 mW'de çalıştığı durumdaki lazer çıkış güçleri ve OSGO değerleri gözükmemektedir. 1526 nm – 1565 nm aralığında ortalama 10,47 dBm çıkış gücü elde edilmektedir. 1568 nm'de çıkış gücü yetersiz kalmaktadır (-19,94 dBm). Ortalama OSGO 77,12 dB'dir.



Şekil 4.59. DOYDA eklenmiş ön kuplörli EKFL'ye ait maksimum pompalama güçlerinde dalgalanma

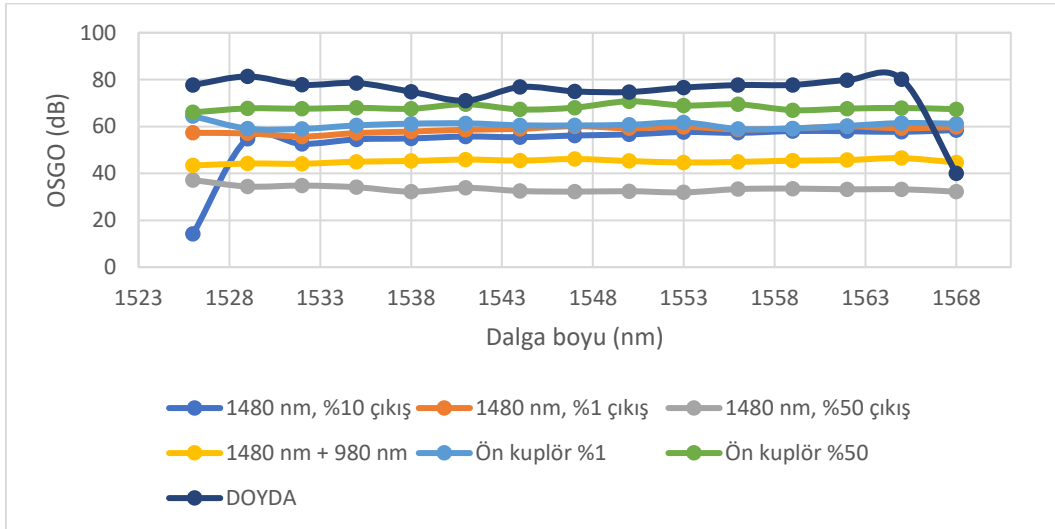
Şekil 4.59.'da görüldüğü üzere tüm dalga boylarındaki çıkış güçleri karşılaştırılırsa (1526 nm – 1568 nm) 33,45 dBm dalgalanma değeri elde edilmektedir. Düz bir çıkış elde edilmesi amacıyla 1526 nm – 1565 nm arasında ölçümler değerlendirilirse dalgalanma değeri 8,08 dBm'e düşmektedir.

Tüm tasarımların çıkış güçlerine ait spektrumları karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.60. verilmiştir. 1480 nm ileri pompalamada çıkış kuplörünün %1, %10 ve %50 olduğu tasarımlar, 1480 nm – 980 nm çift yönlü pompalama, %1 ve %50 bölme oranlı ön kuplörli EKFL ve DOYDA eklenmiş olan ön kuplörli EKFL değerleri verilmiştir.



Şekil 4.60. Tüm tasarımlara ait maksimum pompalama gücünde EKFL çıkış güçleri

Şekil 4.60.'da görüldüğü üzere düz bir çıkış spektrumundan en fazla uzaklaşmış olan tasarım DOYDA eklenmiş ön kuplörli EKFL'dir. 1480 nm ileri yönlü pompalamada %1 çıkış kuplörü; ve ön kuplörli tasarımda ön kuplörün %1 ve %50 değerinde olduğu tasarımlarda çıkış gücü oldukça düşüktür. Şekil 4.61.'e bakıldığında, çıkış güçleri düşük olan bu tasarımların yüksek OSGO sağladığı görülmektedir.

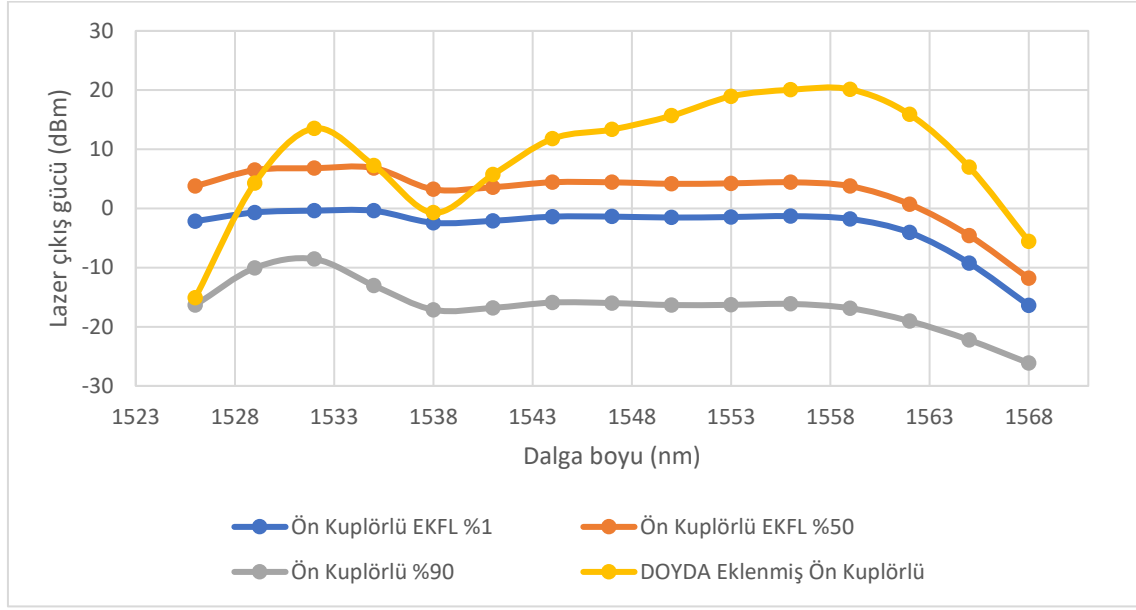


Şekil 4.61. Tüm tasarımlara ait maksimum pompalama gücünde EKFL'in OSGO değerleri

En yüksek OSGO, DOYDA eklenmiş ön kuplörli EKFL tasarımında elde edilmektedir. Bununla birlikte DOYDA eklenmemiş olan ön kuplörli EKFL tasarımlarının da yüksek

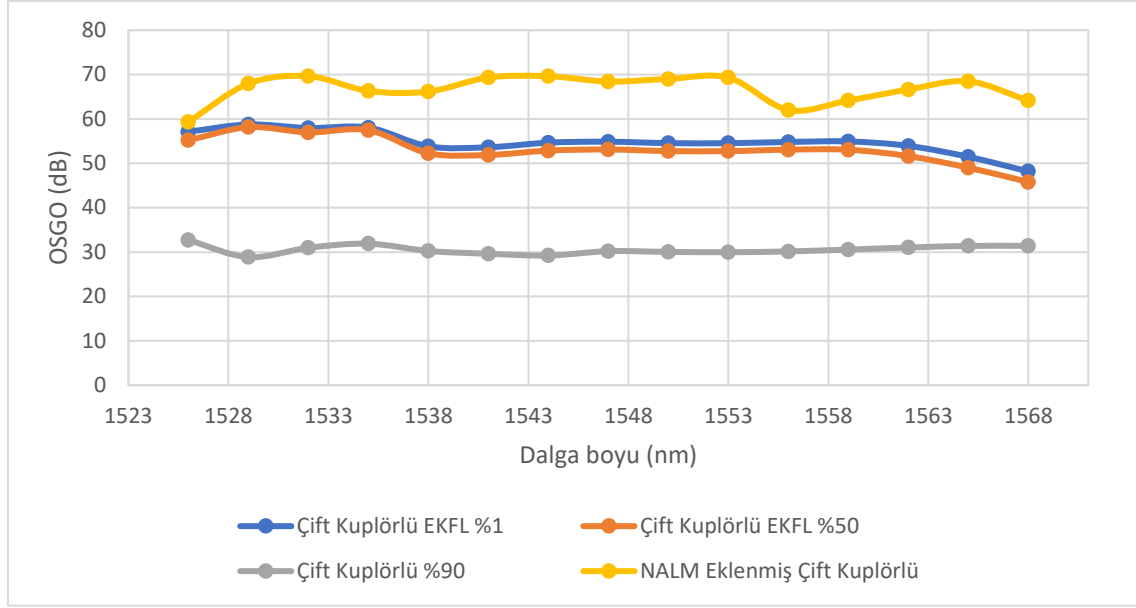
OSGO sağladığı görülmüştür. Bu 2 yeni tasarım, OSGO değerini arttırıp EKFL gürültüsünü bastırmak amacıyla önerilmiştir ve başarılı olduğu görülmektedir.

Benzetim sonuçları



Şekil 4.62. Benzetim programında farklı EKFL tasarımlarına ait lazer çıkış güçleri

Ön kuplörli EKFL tasarımlarının ve DOYDA eklenmiş olan ön kuplörli EKFL'nin çıkış spektrumlarını ve OSGO değerlerini karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.62. ve Şekil 4.63. verilmiştir. Deneysel kurulumda analiz edilmemiş olan %10-%90 çıkış kuplörü değişimi görmek amacıyla benzetim programında simüle edilmiştir. Ön kuplörli EKFL tasarımlarında %1 ön kuplör oranının %50'ye arttırılması ile 1526 nm – 1565 nm aralığında alınan spektrum 1526 nm – 1562 nm aralığına kaymıştır, spektrumda 3 nm daralma gözlemlenmiştir. Bu daralmayla birlikte, maksimum pompalama güçlerinde ortalama çıkış gücü yaklaşık 6 dBm artışla -2,16 dBm'den 4,36 dBm'e yükselmiştir. Ön kuplör bölme oranının biraz daha arttırılıp %90'a çıkartılmasıyla düz spektrumdan uzaklaşmıştır ve dalga boyları arasındaki dalgalanma miktarında ciddi artış olup 1526 nm – 1568 nm aralığında 17,57 dBm'e çıkmıştır. 1529 nm – 1559 nm aralığında ortalama çıkış gücü -14,82 dBm'dir. Düz çıkış spektrumundan en fazla uzaklaşan tasarım DOYDA eklenmiş olan ön kuplörli EKFL'dir. Tüm çıkış güçlerinin gözlemlendiği 1526 nm – 1568 nm aralığında dalgalanma miktarı 35,22 dBm'dir. 1529 nm – 1565 nm spektrum aralığında 11,75 dBm ortalama çıkış gücü elde edilmiştir.



Şekil 4.63. Benzetim programında farklı EKFL tasarımlarına ait OSGO değerleri

Ön kuplör oranının %1'den %50'ye arttırılması ile benzetim kurulumlarına ait OSGO değerinde yaklaşık 2 dB azalma olmaktadır. Bölme oranının %90 olarak belirlenmesi halinde OSGO 30,55 dB'ye düşmektedir. En yüksek OSGO, DOYDA eklenmiş olan ön kuplörli EKFL tasarımında 67,46 dB olarak elde edilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında farklı tasarımlardaki erbiyum katkılı fiber lazerler, OptiAmplifier 4.0 benzetim programında ve deneysel kurulumla incelenmiş; EKFL bileşenlerinin lazer çıkış güçleri ile OSGO değerlerine etkisi analiz edilmiştir.

Yüksek çıkış gücü amaçlandığı için öncelikle benzetim programında bu amaçla optimizasyon yapılmıştır; programa, deneysel tasarımda da kullanılacak olan EKF'nin parametreleri, bileşenler arasındaki ve optik filtre kaynaklı güç kaybının değerleri de tanımlanmıştır. Literatür taramaları sonucu, pompa gücündeki artış ile lazer çıkış gücündeki artışın doğru orantılı olduğu bilindiğinden pompalama lazerleri maksimum güçte ayarlanmıştır. Öncelikle klasik halka tipi EKFL kurulmuştur, pompalama lazeri 1480 nm'de 200 mW olarak seçilmiştir ve ileri yönlü pompalama yapılmıştır. Optik filtre bant genişliği 0,5 nm olarak ayarlanmıştır. Çıkış kuplörünün bölme oranı %1, %10 ve %50 olarak değiştirilmiştir. Deneysel kurulumlarda; %1 çıkış kuplöründe, 1526 nm – 1568 nm aralığında, 6,19 dBm ortalama çıkış gücü, 58,59 dB ortalama OSGO ve 2,01 dBm dalgalanma gözlemlenmiştir. %10 çıkış kuplörü ile 1529 nm – 1568 nm aralığında ortalama olarak 15,40 dBm çıkış gücü ve 56,65 dB OSGO elde edilmiştir. Spektrum aralığında farklı dalga boylarına ait lazer çıkış güçleri arasındaki maksimum ve minimum fark 2,46 dBm olarak saptanmıştır. %50 çıkış kuplöründe ise 1526 nm – 1568 nm aralığında 12,58 dBm ortalama çıkış gücü, 33,38 dB OSGO ve 2,47 dBm dalgalanma elde edilmiştir. Tüm bu kuplörlerle kurulan tasarımlarda, pompa gücündeki artışın lazer çıkış gücü ve OSGO değerine etkisi de incelenmiştir. Pompalama gücü 40 mW – 200 mW arasında 20 mW basamaklarla arttırılmıştır. Artan pompa gücüyle OSGO ve gücün de arttığı görülmüştür, bu artış hızı düşük pompa güçlerinde daha fazladır ve ortalama 140 mW sonrasında artış miktarı azalmaktadır. Sonuçlar ışığında, çıkış kuplörünün bölme oranının artması ile OSGO değerinde azalma olduğu görülmüştür. Kuplörün %1'den %10'a arttırılmasının ardından ortalama lazer çıkış gücünde 9,21 dBm artış olduğu fakat lazer spektrum aralığında 3 nm azalma olduğu saptanmıştır. Bölme oranının, %10'dan %50'ye arttırılmasının spektrum 3 nm artmıştır fakat OSGO'de 20,09 dB; çıkış gücünde ise 2,82 dBm azalma olmuştur. Ardından klasik halka tipi EKFL'ye 980 nm dalga boyunda, 100 mW maksimum pompalama gücünde geri yönlü pompa lazeri eklenmiştir. Yüksek çıkış gücü ve yüksek OSGO'yi aynı anda sağlayabildiği için çıkış kuplörü %10 değerinde seçilmiştir. İki lazerin de maksimum pompalama gücünde çalıştığı durumda 1526 nm – 1568 nm spektrum

aralığında ortalama 9,21 dBm çıkış gücü, 45,10 dB OSGO ve 1,97 dBm dalgalanma elde edilmiştir. 1480 nm ileri pompalanmış EKFL'ye göre ortalama 2,75 dB daha az çıkış gücü ve 8,37 dB daha az OSGO değerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte dalgalanma miktarında 0,49 dB iyileştirme görülmüştür. Çıkış gücündeki düşmenin sebebi, çift pompalanmış EKF'nin doyuma gitmesidir. Düz çıkış spektrumunun daha önemli olduğu çalışmalarda, daha düşük çıkış gücü ve OSGO değerleri ile çalışılabileceği saptanmıştır. Literatürde çalışılmış olan döngü tipi EKY tabanlı EKFL'nin çıkış kuplöründen önce yeni bir kuplör daha eklenerek ön kuplörün, lazerin OSGO ve çıkış gücü değerlerine etkisi analiz edilmiştir. Eklenen bu ikinci kuplör %1 ve %50 değerlerinde denenmiştir. Tasarımdaki iki pompa lazerinin de maksimum pompalama gücünde kullanıldığı durumda %1 kuplör oranında ortalama -1,87 dBm çıkış gücü, ortalama 60,66 dB OSGO ve 3,37 dB dalgalanma elde edilmiştir. %50 kuplör oranında ise ortalama 3,84 dBm çıkış gücü, 68,04 OSGO ve 2,26 dBm dalgalanma gözlemlenmiştir. Kuplör bölme oranının artması ile dalgalanma miktarının 1,11 dBm azaldığı ve OSGO ile lazer çıkış gücünde iyileşme olduğu görülmüştür (sırasıyla 7,38 dB ve 1,97 dBm). Analiz edilen son tasarım ise döngü tabanlı, ön kuplörlü EKFL'e DOYDA eklenmiş düzenektir. Ön kuplörlü tasarımda, yeni eklenen kuplörün %50 değerinde olması durumunda daha yüksek OSGO ve daha yüksek çıkış gücü elde edilmesi ile bu tasarımda ön kuplörün bölme oranı %50 olarak seçilmiştir. DOYDA tasarımlı, ön kuplörlü EKFL, 1526 nm – 1565 nm aralığında, maksimum pompa güçlerinde ortalama 74,68 dBm OSGO, ortalama 8,44 dBm çıkış gücüne ve 8,08 dBm dalgalanma miktarına sahiptir. Deneysel olarak analiz yapılan tasarımlarda, amaçlanan gürültü iyileştirme oranı önerilen iki yeni tasarımda da elde edilmiştir. Aynı çıkış kuplörü ve pompalama gücüne sahip tasarımlarda, klasik halka tipi EKFL tasarımına göre DOYDA'lı EKFL ile 21,18 dB OSGO iyileşmesi ortalama 6,96 daha düşük lazer çıkış gücü ile elde edilmiştir. Bununla birlikte literatürde de belirtildiği gibi düz kazanç spektrumundan uzaklaşmıştır, yaklaşık 5,62 dBm daha fazla salınım oluşmuştur. Bu durum, tasarımın olumsuz özelliğidir fakat düz kazanç spektrumuna göre yüksek OSGO oranının daha önemli olduğu çalışmalar için yeni bir EKFL tasarımı elde edilmiştir. Ön kuplörlü EKFL'nin %50-%50 olarak tasarlandığı EKFL de ise klasik halka tipi EKFL'ye göre 11,56 dBm düşük çıkış gücü, 11,39 dB daha yüksek OSGO gözlemlenmiştir. Dalgalanma miktarında 0,20 dBm iyileşme olmuştur. Sonraki tasarımlar için bu yüksek OSGO değerlerinin, düz çıkış spektrumunda elde edilmesine yönelik çalışmaların yapılması literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Xu L., Chen X., Li M., Zhang B., Hu Q., Liu Q. and Li P. (2022). All-fiber all-normal-dispersion passively mode-locked neodymium-doped fiber laser operation at 1064 nm. *Laser Physics*, 32(2), 1–3.
2. Bouzid, B. (2010). *Design Effect on EDFL Output*. International Conference On Photonics 2010, Malaysia.
3. Martinez-Ríos A., Anzueto-Sanchez G., Selvas-Aguilar R., Guzman A. A. C., Toral-Acosta D., Guzman-Ramos V. and Duran-Ramirez M. V. (2015). High Sensitivity Fiber Laser Temperature Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15(4), 2399-2402.
4. Cong S., Sun Y., Pan L., Fang Y., Tian J., Yang Y. and Yong Y. (2011). Demodulation of a Fiber Bragg Grating Sensor System Based on a Linear Cavity Multiwavelength Fiber Laser. Popp J., Matthews D. L., Tian J. and Yang C. (Editörler). *Optical Sensors and Biophotonics III*, s. 1-7.
5. Woon S., Kwan K., Chong W., Lin H. and Pua C. (2017). Cascaded Acoustic Wave Sensors Based on Erbium-Doped Fiber Laser Dynamics for Intrusion Zone Identification. *IEEE Sensors Journal*, 17(6), 1893-1898.
6. Woon S. L., Pua C. H., Lin H. S. and Faidz Abd Rahman. (2018). *Application of Erbium-Doped Fibre Laser Dynamics in Pipeline Leak Detection and Location Estimation*. IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP), Malaysia.
7. Li Y., Tian J., Yao Y., Xu K. and Xiao J. (2019, 17-20 June). *Study on a Multi-channel Switchable and Environment Self-adaptive Ultrasonic Sensor in an EDFRL*. Paper presented at 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Rome.
8. Achaerandio E., Jarabo S., Abad S. and Lopez-Amo M. (1999). New WDM Amplified Network for Optical Sensor Multiplexing. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(12), 1644-1646.
9. Park N., Dawson J. W. and Vahala K. J. (1992). Multiple Wavelength Operation of an Erbium-Doped Fiber Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(6), 540-541.
10. Lopera J. A., Granada J. J., Cardenas A. M. and Zapata J. D. (2019). *Ultrashort Pulse Generation in EDFL Cavities using Graphene as Saturable Absorber for applications in optical communications systems*. IEEE Colombian Communications Conference (COLCOM) 2019 Colombia.
11. Lopera J. A., Arroyave K. and Juan D. Zapata. (2019). *Repetition rate and spectral performance for short EDFL cavities using a D-shaped fiber/graphene saturable absorber*. IEEE Colombian Communications Conference (COLCOM) 2019 Colombia.
12. Lin G., Chang Y. and Wu J. (2004). Rational Harmonic Mode-Locking of Erbium-Doped Fiber Laser at 40 GHz Using a Loss-Modulated Fabry–Pérot Laser Diode. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(8), 1810-1812.

13. Lin G., Chang Y. and Wu J. (2004). Rational Harmonic Mode-Locking of Erbium-Doped Fiber Laser at 40 GHz Using a Loss-Modulated Fabry-Pérot Laser Diode. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(8), 1810-1812.
14. Huang L., Chonga S. H., Mills A., Jones D. and Tang S. (2014). *Multiphoton microscopy using frequency-doubled compact femtosecond erbium-doped fiber laser*. SPIE BiOS 2014, San Francisco, United States.
15. Kim D., Ilev I. K., and Kang J. U. (2008). Fiberoptic Confocal Microscopy Using a 1.55- μm Fiber Laser for Multimodal Biophotonics Applications. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 14(1), 82-87.
16. Stachowiak D., Bogusławski J., Głuszek A., Hudzikowski A., Łaszczych Z., Wojtkowski M. and Soboń G. (2020). *Generation of 60 fs pulses at 780 nm by frequency doubling of Er-doped fiber laser with tunable repetition rate for TPEF imaging*. EUROPHOTON 2020 (Virtual Conference).
17. Huang L., Mills A., Jones D., Zhao Y. and Tang S. (2015). *Compact multiphoton microscopy system based on frequencydoubled femtosecond erbium-doped fiber laser*. OMP 2015, Vancouver Canada.
18. Feng X., Lu C., Tam H. Y. and Wai P. K. A. (2007). Reconfigurable Microwave Photonic Filter Using Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(17), 1334-1336.
19. Li X., Mou J., Li Xiong L., Wang Z. and Xu J. (2021). Fractional-order double-ring erbium-doped fiber laser chaotic system and its application on image encryption. *Optics and Laser Technology* (140), 107074.
20. Chen D., Fu H., Liu W., Wei Y. and He S. (2008). Dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fibre laser based on fibre Bragg grating pair and its application in microwave signal generation. *Electronics Letters*, 44(7), 459-461.
21. Slavik R. and LaRochelle S. (2002). *Multiwavelength Single Mode Erbium Doped Fiber Laser for FFH-OCMA Testing*. OFC 2002 California.
22. Lu Z. G., Sun F. G, Xiao G. Z. and Grover C. P. (2004). A Tunable Multiwavelength Fiber Ring Laser for Measuring Polarization-Mode Dispersion in Optical Fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(5), 1280-1282.
23. Han Y. R., Won-Kyu L, Han S. M. and Ho S. S. (2006). Tunable erbium-doped fiber ring laser for applications of infrared absorption spectroscopy. *Optics Communications* 275(2), 379–384.
24. Jie C., Xin Z., Zuun Y., Ting L., Qian L., Shuguo X., Jiansheng L. and Zheng Z. (2019). Dual-comb spectroscopy of methane based on a free-running Erbium-doped fiber laser. *Optics Express* 11406, 27(8), 11406-11412.
25. Cousin J., Masselin P., Chen W., Boucher D., Kassi S., Romanini D. and Szriftgiser P. (2006). Tunable erbium-doped fiber ring laser for applications of infrared absorption spectroscopy. *Optics Communications* 275(2), 379–384.

26. Cai P. and Liao T. (2020). Multi-wavelength fiber laser based on highly erbium-doped fiber and nonlinear effects in SMF. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics* 206, 164257.
27. Zhao Q., Pei L., Wang J., Xie Y. and Ruan Z. (2020). Interval-Adjustable Multi-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser With the assistance of NOLM or NALM. *IEEE Access*, 9, 16316-16322.
28. Yamashita S. and Nishihara M. (2001). Widely Tunable Erbium-Doped Fiber Ring Laser Covering Both C-Band and L-Band. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 7(1), 41-43.
29. Wang Z., Shang J., Mu K., Quiao Y. and Song Y. (2020). Single-longitudinal-mode fiber laser with an ultra-narrow linewidth and extremely high stability obtained by utilizing a triple-ring passive subring resonator. *Optics and Laser Technology* 130, 106329.
30. Sadık Ş. A., Durak F. A. and Altuncu A. (2020). Widely tunable erbium doped fiber ring laser based on loop and double-pass EDFA design. *Optics and Laser Technology* 124, 105979.
31. Yang Y.L., Yeh C.H, Tsai C.K., Xie Y.R., Luo C.M., Chang Y.J., Chen J.H. and Chow C.W. (2019). Single-mode erbium fiber dual-ring laser with 60-nm workable wavelength tunability. *Optics and Laser Technology* 114, 16-19.
32. Shang J., Wang Z., Li S., Zhu E., Yu S. and Qiao Y. (2022). Tunable narrow linewidth linear cavity fiber laser based on a one-way round-trip structure. *Optical Fiber Technology* 68, 102780.
33. Yeh C., Lee C. and Chi S. (2003). A Tunable S-Band Erbium-Doped Fiber Ring Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(8), 1053-1054.
34. Sadık Ş. A., Durak F. A. and Altuncu A. (2018). *Spectral Characterization of an Erbium-Doped Fiber Ring Laser for Wideband Operation*. 2018 Advances in Wireless and Optical Communications, Latvia.
35. Antoine Bellemare, Miroslav Karásek, Christophe Riviere, François Babin, Gang He, Vincent Roy and Gregory W. Schinn (2001). A Broadly Tunable Erbium-Doped Fiber Ring Laser: Experimentation and Modeling. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 7(1), 22-29.
36. Zhou F., Zhou X., Bi M., Yang G., Hu M. and Lu Y. (2021). Study of the output characteristics of nonlinear optical loop mirror on an erbium-doped mode-locked fiber laser. *Optoelectronics Letters*, 17(5), 282-286.
37. Zhang K. and Kang J. U. (2008). C-band wavelength-swept single-longitudinal mode erbium-doped fiber ring laser. *Optics Express*, 16(18), 14173-14180.
38. He W., Zhu L., Dong M., Lou X. and Luo F. (2018). Wavelength-switchable and stable-ring-cavity, erbium-doped fiber laser based on Mach-Zehnder interferometer and tunable filter. *Laser Physics* 28(4), 45104-45110.

39. Ali S., Al-Khateeb K. A. S. and Bouzid B. (2008). *A Novel Erbium-Doped Fiber Laser Source (EDFL)*. Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering 2008, Malaysia.
40. Amin M. Z., Qureshi K. K. and Md Mahbub Hossain M. M. (2018). *C-band wavelength-swept single-longitudinal mode erbium-doped fiber ring laser*. 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology Dhaka.
41. He W., Li D., Zhu L., Dong M. and Luo F. (2017). Tunable Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Laser Employing PM-FBG and Mach-Zehnder Interferometer with Optical Fiber Delay Line. *IEEE Photonics Journal*, 9(3), 7202108.
42. Bebawi J. A., Kandas I., El-Osairy M. A. and Aly M. H. (2018). A Comprehensive Study on EDFA Characteristics: Temperature Impact. *Applied Sciences* 8, 1640.
43. Yücel M. (2008). *Kazancı Düzleştirilmiş Geniş Bandlı Fiber Yükselteçlerin Tasarımı*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
44. Aslan Z. (2013). *Çift Geçişli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Gürültü Faktörünün Azaltılması*. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
45. Srivastava M., Venkitesh D. and Srinivasan B. (2018) Effects of Wavelength Filtering on Pulse Dynamics in a Tunable, Actively Q-Switched Fiber Laser. *Optics & Laser Technology*, 98(21), 190-197.
46. Song Y. W., Havstad S. A., Starodubov D., Xie Y., Willner A. E. and Feinberg J. (2001). 40-nm-Wide Tunable Fiber Ring Laser With Single-Mode Operation Using a Highly Stretchable FBG. *IEEE Photonic Technology Letters*, 13(11), 1167-1169.
47. Dong X., Ngo N.Q and Shum P. (2003). Linear cavity erbium-doped fiber laser with over 100 nm tuning range. *Optics Express*, 11(14), 1689-1694.
48. Monga K. J., Martínez-Manuel R., Meyer J., Silvia Diaz S. and Sompó J. M. (2021). Stable and narrow linewidth linear cavity CW-active Q-switched erbium-doped fiber laser. *Optics & Laser Technology* 140, 107013.
49. Fu Z.H., Wang Y.X., Yang D.Z. and Shen Y.H. (2009). Single-frequency linear cavity erbium-doped fiber laser for fiber-optic sensing applications. *Laser Phys. Lett.*, 6(8), 594–597.
50. Dong X., Shum P., Ngo N. Q. and Chan C. C. (2003). Effects of active fiber length on the tunability of erbium-doped fiber ring lasers. *Optics Express*, 11(26), 3622-3627.
51. Park N. and Wysocki P. F. (1996). 24 Line Multiwavelength Operation of Erbium-Doped Fiber-Ring Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8(11), 1459-1461.
52. Lai W. J., Shum P. and Binh L. N. (2005). NOLM–NALM Fiber Ring Laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 41(7), 986-993.
53. Doran N. J. and Wood D. (1988). Nonlinear-optical loop mirror. *Optics Letters*, 13(1), 56-58.

54. Schmieder D. and Swart P. L. (2005). *Switching Behavior of NOLM-NALM Mirror Configurations*. SPIE Proceedings 2005, California.
55. Schmieder D. and Swart P. L. (2005). Serial and Parallel Arrangements of NOLM and NALM Loop Mirrors. *Chinese Optics Letters*, 3(S1), 109-114.



GAZİ GELECEKTİR..