
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YÜKSEK GÜÇLÜ DÜZ KAZANÇLI GENİŞ BANT ASE IŞIK KAYNAĞI TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Özcan AKÇEŞME

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

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

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

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

Özcan AKÇEŞME

18/07/2025

YÜKSEK GÜÇLÜ DÜZ KAZANÇLI GENİŞ BANT ASE IŞIK KAYNAĞI TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Özcan AKÇEŞME

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu çalışmada, fotonik teknolojilerinin kritik ihtiyaçlarına yanıt verebilecek, yüksek çıkış gücüne, geniş bant genişliğine ve düz kazanç profiline sahip yenilikçi bir ASE (Amplified Spontaneous Emission) ışık kaynağının tasarımı, optimizasyonu ve prototiplendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın motivasyonu, optik iletişimden hassas sensörlere ve tıbbi görüntülemeye dek geniş bir alanda bu tür kaynaklara yönelik artan taleptir. Literatür incelemesi ve simülasyonların ardından, çift geçişli ve çift yönlü pompalama (980 nm ileri, 1480 nm geri) mimarisi benimsenmiştir. Aktif kazanç ortamı olarak, iyon kümelenmesini minimize ederek yüksek verimlilik sunan, Doğrudan Nanopartikül Biriktirme (DND) teknolojisiyle üretilmiş 17 metrelik Liekki Er30(4/125) erbiyum katkılı fiber kullanılmıştır. Geliştirilen prototip, bir STM32 mikrodenetleyici tabanlı gömülü kontrol sistemi ile donatılmıştır. Sistemin en yenilikçi yönü, pompa akımlarını sistematik olarak tarayarak spektral dalgalanmayı otonom olarak minimize eden ve optimum çalışma noktalarını kalıcı hafızaya kaydeden bir optimizasyon algoritmasıdır. Deneysel sonuçlar, 30 mW çıkış gücünde, C+L bandında 80 nm'lik kesintisiz bir 3 dB bant genişliği elde edildiğini göstermektedir. Bu geniş bant içerisinde, 57 nm'lik bir aralıkta kazanç dalgalanması 1,98 dB gibi rekabetçi bir değerde sınırlandırılmıştır. Geliştirilen bu akıllı prototip, optik düzenek bakımından literatürdeki birçok çalışmaya kıyasla üstün bir spektral düzlük ve bant genişliği dengesi sunmaktadır. Sonuç olarak, tez çıktısı prototip ürün, ileri fotonik sistemler için yüksek verimli, kompakt ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır.

Bilim Kodu	:	93428
Anahtar Kelimeler	:	Erbiyum katkılı fiber, kendiliğinden yükseltilmiş yayılma, otomatik kazanç kontrolü, elektronik kontrol, ASE kaynağı
Sayfa Adedi	:	123
Danışman	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH POWER FLAT GAIN BROADBAND ASE SOURCE

(Ph. D. Thesis)

Özcan AKÇEŞME

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

This study aims to design, optimize, and prototype an innovative Amplified Spontaneous Emission (ASE) light source featuring high output power, broad bandwidth, and a flat gain profile to address the critical needs of photonic technologies. The motivation for this work arises from the increasing demand for such sources in a wide range of fields, from optical communications to precision sensors and biomedical imaging. Following a literature review and simulations, a double-pass and bidirectional pumping architecture (980 nm forward, 1480 nm backward) was adopted. A 17-meter Liekki Er30(4/125) erbium-doped fiber, fabricated using Direct Nanoparticle Deposition (DND) technology to minimize ion clustering and enhance efficiency, was used as the active gain medium. The prototype is equipped with an STM32 microcontroller-based embedded control system. The system's most innovative feature is an optimization algorithm that autonomously minimizes spectral ripple by systematically scanning pump currents and storing the optimal operating points in non-volatile memory. Experimental results show a continuous 80 nm 3-dB bandwidth across the C+L band at 30 mW output power. Within this bandwidth, the gain variation is limited to a competitive 1.98 dB over a 57 nm span. This intelligent prototype, in terms of its optical configuration, offers a superior balance of spectral flatness and bandwidth compared to many existing studies. Consequently, the resulting prototype product provides a highly efficient, compact, and cost-effective solution for advanced photonic systems.

Science Code : 93428

Key Words : Erbium-doped fiber, amplified spontaneous emission, automatic gain control, electronic control, ASE source

Page Number : 123

Supervisor : Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok saygıdeğer değerli Hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL'e teşekkürü bir borç bilirim. Her daim desteğini esirgemeyen, hayatıma mutluluk katan sevgili eşim Ayşegül AKÇEŞME'ye bütün kalbimle teşekkür ederim. Ayrıca 7210457 numaralı proje ile destek sağlayan TÜBİTAK'a, FGA-2022-7452 numaralı proje ile destek için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (GAZİ-BAP) ve Yimi Elektronik Haberleşme Ltd. Şti'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 7

3. METODOLOJİ VE YÖNTEM 31

3.1. ASE Üretim Teknikleri 31

3.2. Teorik Analiz 32

3.2.1. Pompalama mekanizmaları ve ters birikme 34

3.2.2. Temel oran ve foton yayılım denklemleri 36

3.2.3. C+L-Bandı ASE üretiminin teorik temelleri 39

3.2.4. Optimizasyon parametreleri ve sınırlayıcı faktörler 40

3.3. Kullanılan Yöntemler 42

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI 45

4.1. Simülasyon Ortamı ve Analiz Yöntemleri 45

4.2. C-Band ASE Üretim Düzeneklerinin Simülasyonu 50

4.2.1. Düzenek 1 50

4.2.2. Düzenek 2-C 55

Sayfa

4.3. L-Band ASE Üretim Düzeneklerinin Simülasyonu 58
4.3.1. Düzenek 2-L 58
4.3.2. Düzenek 3 60
4.3.3. Düzenek 4 61
4.4. C+L-Band ASE Üretim Düzeneklerinin Simülasyonu 63
5. ÇOKLU POMPA LAZER SÜRÜCÜ TASARIMI 67
5.1. Lazer Sürücü 69
5.2. TEC Sürücü 70
5.3. TFT Dokunmatik LCD Ekran 71
5.4. Güç Kaynağı Seçimi 72
5.5. Baskı Devre Tasarımları 73
5.6. Lazer Sürücü Kontrol Yazılımı 77
5.7. Arayüz Tasarımı 78
6. DENEYSEL KURULUM 83
6.1. Simülasyon Sonuçlarına Göre Kurulan Düzenek 84
6.2. ASE Spektrum İyileştirme Çalışmaları 87
6.2.1. Liekki Er30(4/125) EKF 88
6.2.2. Pompa lazer diyotlar ve çift yönlü pompalama mimarisi 89
6.2.3. Pasif optik bileşenler ve spektrum şekillendirme 91
6.2.4. Gömülü kontrol sistemi ve optimizasyon algoritması 93
6.3. Otomatik Ölçüm Alma Yazılımı 101
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 111
KAYNAKLAR 115
ÖZGEÇMİŞ 123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Farklı fiber türlerine ait parametreler 50

Çizelge 4.2. 1 numaralı düzenek için iterasyon parametreleri 51

Çizelge 4.3. 2-C numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri 55

Çizelge 4.4. 2-L numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri 58

Çizelge 4.5. 3 numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri 61

Çizelge 4.6. 4 numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri 62

Çizelge 5.1. Elektronik kontrol kartında bulunan komponentlerin güç değerleri..... 73

Çizelge 6.1. Farklı bantlar ve çıkış güçleri için optimize edilmiş akım değerleri 96

Çizelge 7.1. Yapılan tez çalışmasının literatürdeki benzerleri ile kıyaslanması..... 114

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Stark etkisi ile oluşan farklı dalgaboylarında oluşan ışımalar 33

Şekil 3.2. Er3+ iyonlarının enerji seviyeleri 35

Şekil 3.3. Temel üç seviyeli lazer sistemi enerji seviye diyagramı 37

Şekil 4.1. 1 numaralı düzenek 50

Şekil 4.2. 1 nolu düzeneğin M12 fiberi ile elde edilen en iyi 3 iterasyonun spektrum verileri 53

Şekil 4.3. 1 nolu düzeneğin ER-1550C3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum verileri 54

Şekil 4.4. 1 nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum verileri 54

Şekil 4.5. 2 numaralı düzenek 55

Şekil 4.6. 2-C nolu düzeneğin M12 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü 56

Şekil 4.7. 2-C nolu düzeneğin ER-1500C3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü 57

Şekil 4.8. 2-C nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü 57

Şekil 4.9. 2-C nolu düzeneğin I25 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü 58

Şekil 4.10. 2-L nolu düzeneğin ER-1500C3 fiberi ile elde edilen en iyi 3 iterasyonun spektrum görünümü 59

Şekil 4.11. 2-L nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü 59

Şekil 4.12. 2-L nolu düzeneğin Er30 fiberi ile elde edilen en iyi 4 iterasyonun spektrum görünümü 60

Şekil 4.13. 3 numaralı düzenek 60

Şekil 4.14. 3 nolu düzeneğin Er30 fiberi ile elde edilen en iyi 4 iterasyonun spektrum görünümü 61

Şekil 4.15. 4 numaralı düzenek 62

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.16. 4 nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 3 iterasyonun spektrum görünümü..... 62

Şekil 4.17. 4 nolu düzeneğin Er30 fiberi ile elde edilen en iyi 5 iterasyonun spektrum görünümü..... 63

Şekil 4.18. [2-M12] + [2-ER-1550]- konfigürasyonlar ile oluşturulan C+L-band düzenek..... 63

Şekil 4.19. [2-M12] + [3-ER30] konfigürasyonları ile oluşturulan C+L-band düzenek..... 64

Şekil 4.20. C+L-band düzeneklerinden elde edilen spektrum çıktıları..... 64

Şekil 5.1. Lazer sürücü sisteminin çalışmasını gösteren genel blok diyagramı..... 68

Şekil 5.2. Lazer sürücü blok diyagramı 69

Şekil 5.3. TEC sürücü blok diyagramı..... 71

Şekil 5.4. TFT dokunmatik ekran görüntüleri 72

Şekil 5.5. Dört katmanlı lazer sürücü kartının katman görüntüleri..... 74

Şekil 5.6. Pompa lazer sürücü kartı 75

Şekil 5.7. Pompa lazer montaj kartı..... 76

Şekil 5.8. Lazerleri kontrol edecek ve ürünün diğer fonksiyonlarını yerine getirecek olan anakart 77

Şekil 6.1. C-band ASE kaynağı düzeneği..... 84

Şekil 6.2. C-band için elde edilen spektrum çıktısı 85

Şekil 6.3. L band ASE kaynağı düzeneği 85

Şekil 6.4. L-band spektrum çıktısı..... 86

Şekil 6.5. C+L band ASE kaynağı düzeneği 86

Şekil 6.6. C+L-band ASE spektrum çıktısı..... 87

Şekil 6.7. Önerilen çift geçişli çift yönlü pompalamalı deneysel optik düzenek..... 88

Şekil 6.8. Füzyon ek ve fiber adaptör kullanılarak elde edilen ASE çıkış spektrumları 92

Şekil 6.9. Gömülü sistemin genel görünümü..... 93

Şekil 6.10. Spektrum optimizasyon algoritmasına ait akış diyagramı..... 95

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.11. Pompa güçlerinin optimizasyonundan önce alınan ASE spektrumları..... 97

Şekil 6.12. Cihazın bant ve güç seçim işlemine ait akış diyagramı..... 97

Şekil 6.13. Prototip cihazdan elde edilen spektrum çıktıları 98

Şekil 6.14. ASE kaynağının C-band spektrum çıktısı..... 99

Şekil 6.15. ASE kaynağının L-band spektrum çıktısı..... 99

Şekil 6.16. ASE kaynağının C+L-band spektrum çıktısı..... 100

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. OptiAmplifier genel pencere görünümü 45
Resim 4.2. "Parameter Sweeps" sekmesi 46
Resim 4.3. OptiAmplifier "View" sekmesi 47
Resim 4.4. İterasyonlara ait ham veriler 47
Resim 4.5. İterasyon sonuçlarının metin dosyalarına aktarılmış hali 48
Resim 4.6. Ham veri içeren metin dosyası örneği 48
Resim 4.7. Veri aktarımı için geliştirilen excel çalışma sayfası 49
Resim 4.8. Düzeneklere ayrılan excel çalışma sayfası görünümleri 52
Resim 4.9. 1 nolu düzeneğin M12 fiberi ile elde edilen verilerin grafik hali 52
Resim 5.1. Fanlı alüminyum soğutucu bloğu 70
Resim 5.2. Haberleşme portu seçim ekranı 79
Resim 5.3. Cihaz bilgilerinin geldiği ekran 79
Resim 5.4. Ana kontrol ekranı 80
Resim 5.5. Gelen verilerin ekrana yansıması 80
Resim 5.6. Geliştirici ekranı 81
Resim 6.1. Cihazın son haline ait çeşitli görüntüleri 101
Resim 6.2. HPLD4004 cihazına ait kontrol ekranı 103
Resim 6.3. MS9710B cihazına ait kontrol ekranı 104
Resim 6.4. MS9710B cihazına ait kontrol ekranı 104
Resim 6.5. CLD1015 cihazına ait kontrol ekranı 105
Resim 6.6. TSL-210V cihazına ait kontrol ekranı 106
Resim 6.7. Ayarlanabilir Filtre cihazına ait kontrol ekranı 106
Resim 6.8. YECLDC Lazer Sürücü cihazına ait kontrol ekranı 107
Resim 6.9. CEDFA-Kompakt EDFA cihazına ait kontrol ekranı 108
Resim 6.10. Cihaz ekleme-kaldırma menüsü 109

Resim **Sayfa**

Resim 6.11. Deneyde kullanılacak parametrelerin seçim ekranı 109

Resim 6.12. Deney düzeneğine ait önizleme ekranı 110

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Er^{3+}	Erbiyum iyonu
Tm^{3+}	Tulyum iyonu
Tb^{3+}	Terbiyum iyonu
$a\text{-}SiO_2$	Amorf silika
$^4I_{15/2}$	Erbiyum iyonunun temel enerji seviyesi
$^4I_{13/2}$	Erbiyum iyonunun yarı-kararlı veya metastabil enerji seviyesi
$^4I_{11/2}$	Erbiyum iyonunun pompa enerji seviyesi
$^4I_{9/2}$	Erbiyum iyonunun daha yüksek bir enerji seviyesi
η (eta)	Pompalama verimliliği
P_OUT	ASE kaynağının optik çıkış gücü
P_F	İleri yönlü
P_B	Geri yönlü
λ (lambda)	Dalgaboyu
R	Yansıtıcılık
P_1 , P_2	Birinci ve ikinci pompa lazerlerinin güçleri
L , L_1 , L_2	Fiber uzunluklarını temsil eden değişkenler
R_L	Fiber uzunluk oranı
R_p	Pompa oranı
dB	Desibel
dBm	Desibel-miliwatt
nm	Nanometre
µm	Mikrometre
m	Metre
mW	Miliwatt
W	Watt
mA	Miliamper

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
V	Volt
kV	Kilovolt
°C	Santigrat derece
g	Yerçekimi ivmesi
Hz	Hertz
GHz	Gigahertz
ns	Nanosaniye
ppm	Milyonda bir parça

Kısaltmalar	Açıklamalar
AFM	Atomik güçlü mikroskop
AMS	Otomatik ölçüm alma yazılımı
APC	Otomatik güç kontrolü
ASE	Amplified spontaneous emission
CW	Sürekli dalga
DBÇ	Dalgaboyu bölmeli çoğullama
DND	Doğrudan nanopartikül biriktirme
DPB	Çift geçişli geri
DPF	Çift geçişli ileri
DWDM	Dense wavelength division multiplexer
EDF	Erbium doped fiber
EDFA	Erbium doped fiber amplifier
EKF	Erbiyum katkılı fiber
EKFY	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
FBG	Fiber bragg ızgarası
FLM	Fiber loop mirror
FOG	Fiber optik jiroskop
FWHM	Yarı yükseklikte tam genişlik

Kısaltmalar	Açıklamalar
FWM	Dört dalga karışımı
GFF	Kazanç düzleştirici filtre
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
LPFG	Uzun periyotlu fiber ızgarası
MCVD	Modifiye kimyasal buhar biriktirme
NF	Gürültü faktörü
NOLM	Doğrusal olmayan optik döngü aynası
OADM	Optik ekle-çıkar çoklayıcı
OCT	Optik koherens tomografi
OSA	Optik spektrum analizörü
OSNR	Optik sinyal-gürültü oranı
PCB	Baskı devre kartı
PHFA	Paralel hibrit fiber kuvvetlendirici
QD-SOA	Kuantum noktası tabanlı yarı iletken optik yükselteç
RDOF	Nadir toprak elementi katkılı optik fiber
RFA	Raman fiber yükselteci
RoF-WDM	Fiber Tabanlı Radyo ve Dalgaboyu Bölmeli Çoklama
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SFS	Süperfloresan fiber kaynağı
SMF	Tek modlu fiber
SNR	Signal to Noise Ratio
SOA	Yarı iletken optik yükselteç
SPB	Tek geçişli geri
SPF	Tek geçişli ileri
SPM	Kendi faz modülasyonu
SRS	Uyarılmış raman saçılması
TDF	Thulium doped fiber
TEC	Termo elektrik soğutucu
WDM	Dalga boyu bölmeli çoğullayıcı
YDBÇ	Yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama

1. GİRİŞ

Fotonik teknolojileri, içinde bulunduğumuz bilgi çağında vazgeçilmez bir rol oynamakta olup, iletişimden algılamaya, tıbbi teşhisten savunma sanayiine kadar geniş bir yelpazede devrim niteliğinde yeniliklere öncülük etmektedir. Fotonikte yaşanan bu ivmelenmenin temelinde, yüksek hızlı, düşük kayıplı ve güvenilir optik ağların ihtiyaç duyduğu geniş bant ve kararlı spektral özelliklere sahip ışık kaynaklarını üretme zorluğu yatmaktadır. Özellikle optik fiber tabanlı sistemler, yüksek bant genişliği, düşük kayıp ve elektromanyetik girişime karşı bağışıklık gibi avantajlarıyla modern haberleşme altyapılarının temelini oluşturmaktadır. Bu sistemlerin kalbinde yer alan önemli bileşenlerden biri de yüksek performanslı ışık kaynaklarıdır [1–3].

ASE (Amplified Spontaneus Emission), yayılımın yükseltilmiş kendiliğinden yayılımı olarak adlandırılan bir ışık yayılımıdır. Bir optik kazanç ortamı, optik/elektriksel olarak pompalandığında kendiliğinden ışık yayar ve kazanç ortamının pompalanması yeterince güçlüyse, "spontan" yayılım, "uyarılmış" yayılma yoluyla yükseltilir [4, 5].

ASE kaynakları, geniş spektral bant genişlikleri, düşük koheransları ve kararlı yapıları sayesinde optik fiber iletişim sistemleri, fiber optik sensörler, optik test ve ölçüm cihazları ile biyomedikal görüntüleme gibi birçok alanda kritik bir öneme sahiptir [6–8]. Türkiye'de de fotonik alanındaki hızlı gelişim ve artan pazar payı, ASE kaynaklarına yönelik ilgiyi artırmakta ve bu alandaki Ar-Ge faaliyetlerini hızlandırmaktadır. Üniversiteler, kamu kurumları, Ar-Ge merkezleri, savunma sanayi kuruluşları ve fiber sensör/komponent üreticileri, bu yenilikçi ışık kaynaklarının potansiyelinden yararlanma konusunda büyük bir motivasyona sahiptir.

Optik fiber iletişim sistemleri, ilk olarak uzak mesafeler arası yüksek hızlı veri transferini mümkün kılarak küresel bağlantı çağını başlatmıştır. Bu sistemlerin performansı, kullanılan ışık kaynaklarının özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Geleneksel olarak yarı iletken lazer diyotlar (LD) ve ışık yayan diyotlar (LED) yaygın olarak kullanılsa da bu kaynakların spektral genişlik ve kararlılık gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Özellikle Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (DBÇ- WDM) gibi ileri optik iletişim tekniklerinin gelişmesiyle, geniş ve düz bir spektrum sunabilen ışık kaynaklarına olan ihtiyaç artmıştır.

ASE kaynakları, lazerlerin aksine, optik kaviteler veya geri besleme mekanizmaları kullanmadan aktif bir ortamda kendiliğinden yayılan fotonların amplifikasyonu prensibine dayanır. Bu özellikleri, onlara kendine özgü avantajlar sağlar. ASE kaynakları, özellikle erbiyum katkılı fiberler (EKF) gibi geniş bantlı kazanıma sahip aktif ortamlar kullanılarak çok geniş bir spektral aralıkta emisyon yapabilirler. Bu, DBÇ sistemlerinde daha fazla kanalın taşınmasına veya spektral tarama gerektiren sensör uygulamalarında yüksek çözünürlük elde edilmesine olanak tanır.

Düşük koherans özellikleri, Rayleigh saçılması gibi optik fiberlerde istenmeyen girişim etkilerini azaltır, bu da özellikle optik sensörlerde ve optik test ekipmanlarında sinyal gürültü oranını iyileştirir. Katı hal lazerlerine kıyasla daha az hassasiyet gösterirler ve sıcaklık dalgalanmaları, titreşim gibi dış etkenlere karşı daha dayanıklıdırlar.

Özellikle, nadir toprak elementi katkılı optik fiberden (Rare doped optical fiber- RDOF) yapılan ASE ışık kaynakları, fiber özünde ASE üretilmesi ve bu nedenle kuplajının kolay olması, çok düşük bağlantı kaybı olan tek modlu fiber kullanılması, fiber, bir optik fiberin özünün dairesel yapısı dolayısıyla çıkışın doğal olarak polarize olmaması, RDOF'dan gelen yayılımın genellikle çok geniş olması nedenlerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. RDOF'dan ASE, fiber lazerler ve fiber yükselteçler ile benzer şekilde üretilir. Eşiğin altındaki fiber lazerler ve sinyal girişi olmayan fiber yükselticilerin her ikisi de ASE kaynaklarıdır.

Erbiyum katkılı fiberler (EKF'ler), 1550 nm civarındaki C-bandı ve 1570 nm civarındaki L-bandı gibi optik iletişim için kritik olan dalgaboyu pencerelerinde yüksek kazanç sağlama yetenekleri nedeniyle ASE kaynaklarının ve optik amplifikatörlerin temelini oluşturur. Bu tez çalışması özelinde, C+L-bandında çalışan ASE kaynaklarının geliştirilmesi hedeflenmektedir. C+L-bandı iletişim kapasitesini artırmak için büyük potansiyel sunmakta olup, geniş bantta yüksek performanslı ve düz kazanımlı ASE kaynaklarının tasarımı büyük bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Araştırmada ele alınan problem

Modern fotonik uygulamalar, ASE kaynaklarından daha yüksek çıkış gücü ve daha düz bir spektral tepki beklemektedir. Ancak mevcut tasarımlarda karşılaşılan bazı temel problemlere

değinecek olursak özellikle geniş spektral bantlarda yüksek çıkış gücü elde etmek, genellikle yüksek pompalama gücü gerektirir ve bu da sistemin toplam verimliliğini düşürebilir. ASE spektrumunda istenmeyen dalgalanmalar veya tepecikler, özellikle DBÇ sistemlerinde kanal performansı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Düz bir spektrum, tüm kanallarda dengeli bir güç dağılımı sağlayarak sinyal kalitesini artırır. Belirli uygulamalar için çok geniş spektral bant genişliği gereklidir, ancak geleneksel ASE kaynakları bu ihtiyacı her zaman karşılayamamaktadır.

Araştırmanın amacı

Bu doktora tez çalışması, yukarıda bahsedilen zorlukların üstesinden gelerek, üniversiteler, kamu kurumları, Ar-Ge merkezleri, savunma sanayi, fiber sensör ve fiber komponent üreticileri gibi geniş bir kullanıcı kitlesinin ihtiyaçlarını karşılayacak yüksek güçlü, düz kazançlı ve geniş bantlı ASE ışık kaynaklarının tasarımına odaklanmaktadır. Tez kapsamında, mevcut literatürdeki en iyi uygulamaları temel alarak ve ileri optik fiber konfigürasyonları ile optimize edilmiş pompalama stratejilerini kullanarak yeni nesil ASE kaynağı geliştirmektir.

Araştırmanın literatüre katkısı

Çift geçişli, çift yönlü pompalama ve/veya yardımcı pompalama tekniklerini kullanarak, geleneksel sistemlere göre daha yüksek güç verimliliği ve spektral düzlük sağlayacak iyileştirilmiş ASE kaynak tasarımları önerilmiştir. Fiber uzunluğu, pompalama gücü, fiber türü ve optik geri besleme mekanizmaları gibi kritik parametrelerin ASE kaynaklarının performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve en uygun çalışma koşulları belirlenmiştir. Geliştirilen ASE kaynaklarının çıkış gücü, spektral bant genişliği, spektral düzlük (ripple) ve kararlılık gibi temel performans parametreleri deneysel olarak karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tezin başlığında da belirtildiği üzere, C+L-bandındaki uygulamalar için tasarlanan bu ASE kaynaklarının optik fiber iletişim, sensör teknolojileri ve diğer fotonik uygulamalarındaki potansiyeli bağlamında değerlendirilmiştir.

Araştırmanın önemi

Yüksek güçlü, düz kazanımlı ve geniş bantlı ASE ışık kaynakları, optik haberleşme, biyomedikal görüntüleme ve sensör teknolojileri gibi birçok alanda gelecekteki potansiyel uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Özellikle OCT sistemlerinde çözünürlüğün artırılması, çeşitli biyolojik dokuların daha detaylı incelenmesine olanak tanır. Optik haberleşmede, ultra geniş bantlı ASE kaynakları, terabit düzeyinde veri iletim hızlarına ulaşmak için temel bir bileşen olabilir. Ancak, bu tür kaynakların tasarımında bazı zorluklar bulunmaktadır. Düz kazanım elde etmek, farklı dalga boylarındaki güç yoğunluğunu homojen hale getirmek için karmaşık optik tasarımlar gerektirebilir. Ayrıca, yüksek güç çıkışını korurken termal yönetim ve doğrusal olmayan etkilerin kontrolü de önemli mühendislik sorunlarıdır. Gelecekteki araştırmalar, yeni nesil aktif optik malzemelerin geliştirilmesi, entegre fotonik devrelerde ASE kaynaklarının minyatürleştirilmesi ve yapay zeka destekli tasarım algoritmalarının kullanılması gibi alanlara odaklanacaktır. Bu gelişmeler, daha verimli, kompakt ve maliyet etkin ASE ışık kaynaklarının önünü açarak, tıp, iletişim ve savunma sanayii gibi stratejik sektörlerde çığır açıcı yeniliklere zemin hazırlayacaktır.

Bu tez çalışması, fotonik alanındaki bilgi birikimine katkıda bulunarak, Türkiye'nin bu alandaki teknolojik yeteneklerini güçlendirmeyi ve yerel sanayinin ihtiyaç duyduğu ileri optik bileşenlerin geliştirilmesine destek olmayı hedeflemektedir. Nihayetinde, bu çalışma ile geliştirilecek yüksek performanslı ASE kaynakları, geleceğin optik ağlarının ve sensör sistemlerinin temelini oluşturan önemli bir teknoloji olarak konumlandırılacaktır.

Tezin organizasyonu

Bu tez çalışması, C+L bandında çalışan, yüksek güçlü, geniş bantlı ve düz kazançlı bir ASE ışık kaynağının tasarımından nihai prototipin gerçekleştirilmesine uzanan süreci sistematik bir bütünlük içinde sunmak amacıyla yedi ana bölüm halinde yapılandırılmıştır. Her bölüm, bir önceki bölümün üzerine inşa edilerek, okuyucuyu teorik altyapıdan pratik uygulamalara doğru adım adım ilerletmeyi hedeflemektedir.

İkinci bölümde, tez çalışmasının üzerine inşa edildiği bilimsel temelleri atmaktadır. İlk olarak, Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayılım olgusunun altında yatan temel fiziksel

mekanizmalar, Erbiyum (Er^{3+}) iyonlarının enerji seviyesi dinamikleri ve Stark etkisi gibi kuantum mekaniksel olgular detaylı bir şekilde incelenmektedir. Pompalama mekanizmaları, ters birikme ve ASE'nin ortaya çıkış süreci açıklanarak, C ve L bantlarındaki yayılımın teorik altyapısı sunulmaktadır. Ayrıca, spektral düzlüğü sağlamak için kullanılan farklı tekniklere ve yaklaşımlara da bu bölümde yer verilmiştir. Bu bölüm, sonraki bölümlerde ele alınacak olan tasarım kararlarının ve optimizasyon stratejilerinin nedenlerini anlamak için gerekli olan temel teorik çerçeveyi sunar.

Üçüncü bölümde, ASE ışık kaynakları üzerine daha önce yapılmış olan akademik ve endüstriyel çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Pompalama konfigürasyonları (ileri, geri, çift yönlü), kazanç düzleştirme teknikleri, kullanılan aktif fiber türleri ve çok aşamalı yükselteç mimarileri gibi temel yaklaşımlar analiz edilmiştir. Başarılı tasarımların yanı sıra, mevcut teknolojilerin sınırlılıkları ve karşılaşılan zorluklar da vurgulanarak, literatürdeki araştırma boşlukları tespit edilmektedir. Bu bölüm, tezin bilimsel özgünlüğünü ve alana getirdiği yenilikleri konumlandırmak için kritik bir referans noktası görevi görür.

Dördüncü bölümde, teorik analizler ve literatür taramasından elde edilen bilgiler ışığında, potansiyel ASE kaynağı konfigürasyonlarının performansını öngörmek ve optimize etmek amacıyla yürütülen kapsamlı simülasyon çalışmaları sunulmaktadır. Profesyonel optik simülasyon yazılımı (OptiAmplifier) kullanılarak, farklı Erbiyum katkılı fiber türleri, fiber uzunlukları, pompa güçleri ve mimariler için çok sayıda iterasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar, C-bandı, L-bandı ve birleşik C+L-bandı için en umut vadeden tasarımların belirlenmesini sağlamış ve deneysel çalışmalara geçmeden önce sistem davranışına dair derin bir anlayış kazanılmasına olanak tanımıştır. Bu bölüm, deneysel kurulum için seçilen nihai konfigürasyonun arkasındaki rasyonel ve nicel verileri ortaya koyar.

Beşinci bölüm, optik tasarımdan elektronik donanım gerçekleştirmesine bir geçiş niteliğindedir. Geliştirilen ASE kaynağının kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için hayati öneme sahip olan özel tasarım çoklu pompa lazer sürücü sisteminin tasarım ve üretim süreçleri detaylandırılmaktadır. Yüksek güçlü lazer diyotların hassas akım ve sıcaklık kontrolünü sağlayan bu sistemin mimarisi, baskı devre kartı tasarımları, bileşen seçimleri ve güvenlik mekanizmaları bu bölümde açıklanır. Ayrıca, tüm sistemi bir araya getirecek olan ana kontrol kartının ve kullanıcı arayüzünün (dokunmatik ekran) donanım altyapısı da bu bölümde sunulmaktadır.

Altıncı bölüm, tezin ana odağını oluşturan deneysel çalışmaları ve bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkan nihai prototipi ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. Simülasyon sonuçları ve teorik analizler doğrultusunda seçilen çift geçişli, çift yönlü pompalama mimarisine sahip optik düzenek, kullanılan tüm aktif ve pasif bileşenlerin teknik özellikleri ve sistemdeki rolleriyle birlikte sunulur. Özellikle, spektrumdaki istenmeyen lazerleşme (spike) olgusunu bastırmak için geliştirilen özgün çözüm bu bölümde açıklanır. Ardından, çalışmanın en yenilikçi yönlerinden biri olan ve spektral düzlüğü otonom olarak optimize eden gömülü yazılım algoritmasının çalışma prensibi bir akış diyagramı eşliğinde adım adım anlatılır. Bu algoritmanın, farklı çalışma modları için en uygun pompa akım değerlerini nasıl bulduğu ve bu değerleri cihazın hafızasına nasıl kaydettiği gösterilir. Bölümün sonunda, optimize edilmiş prototipten elde edilen nihai spektral sonuçlar (çıkış gücü, bant genişliği, kazanç düzlüğü) sunularak, tezin hedeflerine ne ölçüde ulaşıldığı nicel verilerle kanıtlanır. Altıncı bölümün son kısmında, laboratuvar ortamında deney yapmayı daha sistematik ve bilimsel hale getiren yazılım altyapısı tanıtılmaktadır. Deney sürecini otomatikleştirmek, veri toplamayı kolaylaştırmak ve tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla geliştirilen "Otomatik Ölçüm Alma Yazılımı"nın (AMS) mimarisi ve yetenekleri açıklanır. Bu alt bölüm, tezin sadece bir optik sistem tasarımı değil, aynı zamanda akıllı bir enstrümantasyon projesi olduğunu vurgular.

Yedinci ve son bölümde yapılan çalışmanı sonuçları değerlendirilip, literatürdeki benzer çalışmalar ile kıyaslaması yapılarak çalışmanın öneminden bahsedilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, çalışmanın konusu olan ASE kaynaklar ile ilgili olarak literatürdeki önceki araştırmalar incelenmiştir. Tarihsel ve teknik açıdan kapsamlı bir inceleme yapılarak, çalışmanın temeli olan bilgilerin güncel ve geçmiş literatürle ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. Bu derleme, araştırmanın bilimsel altyapısını oluşturmak ve yöntemin geliştirilmesine ışık tutmak adına kritik verilere odaklanmaktadır.

Wang ve Huang, tek bir optik anahtar ile seçilebilen C-bant veya L-bant ASE kaynağı için iki yöntem önermiştir. Birincisinde, geri ASE besleme tekniğiyle, 5 m ve 14 m'lik iki ardışık yüksek katkılı EKF, 1480 nm lazer, optik izolatör ve fiber aynadan oluşan bir sistemde, optik anahtar port 1'de C-bant (27,6 mW), port 2'de ise çift geçişli yapı sayesinde L-bant (11,8 mW) ASE elde edilmiştir. İkinci yöntem olan bileşik pompalama tekniğinde, 100 mW'lık pompa gücü ikiye ayrılarak EKF'ye hem ileri hem de geri yönlü uygulanmış ve anahtar portuna göre C-bant veya L-bant seçimi yapılmıştır. Bu şekilde, C-bantta 27,2 mW, L-bantta ise 24,5 mW gücünde, yaklaşık 40 nm genişliğinde ve filtre gerekmeden düz spektrumlu ASE kaynakları üretilmiştir. Her iki yöntem, hızlı bant geçişi ve dengeli güç sağlarken, bileşik pompalamada iki bandın güç dengesi optimize edilmiştir [1].

Tsai ve arkadaşları, yüksek güçlü ve düz spektrumlu bir L-bant ASE kaynağı üretmek için çift geçişli, çift yönlü pompalama konfigürasyonu kullanmıştır. Deneysel kurulumda, 93 m uzunluğunda erbiyum katkılı fiber, iki adet 1480 nm lazer diyot (40 mW ileri, 130 mW geri), iki DBÇ kuplör, bir uçta %30 yansıtıcılı fiber ayna ve değişken optik zayıflatıcı ile tasarlanmıştır. Geri yönlü ve ileri yönlü ASE ışınımları aynada yansıtılarak fiberden iki kez geçirilmiş; konfigürasyon, lazer ışıması riskini azaltarak daha yüksek pompa gücünde çalışmaya olanak sağlamıştır. En iyi sonuçlar, 1584,3 nm merkez dalga boyu, 41,6 nm spektral bant genişliği, 71,8 mW çıkış gücü ve yalnızca 0,5 dB spektral dalgalanma ile elde edilmiştir. Pompalama dönüşüm verimliliği %42,2 olup, bu değer klasik yapılara göre anlamlı derecede yüksektir. Bu ASE kaynağı, harici spektral düzleştirici olmaksızın yüksek güç ve düz spektrum sunmaktadır [9].

Zhu ve arkadaşları, yalnızca bir adet 976 nm lazer diyot pompasıyla ve aynı katkı oranına sahip iki ardışık EKF kullanarak, yüksek düzlüğe sahip C+L bant ASE kaynağı gerçekleştirmiştir. Yapıda, pompa ışığı bir kuplör ile iki parçaya ayrılır ve EDF1 kısa

tutularak geri yönlü C-bant ASE üretimi sağlanırken, ana uzun EDF2'de C-band ASE ile L-band ASE elde edilir ve fiber döngüsel yansıtma (fiber loop mirror-FLM) ile verimlilik artırılır. EKF uzunlukları optimize edilerek 0,12 m EDF1 ve 16 m EDF2 kullanılmış olup dış filtresiz olarak 1540-1610 nm aralığında ±0,91 dB, 1520-1610 nm'de ±1,65 dB spektral düzlüğe ulaşılmıştır. Bu yöntem, sistemi sadeleştirip maliyeti düşürmesinin yanında, optimize edilen fiber uzunluklarıyla geniş bant ve yüksek düzlükte ASE kaynağı sunmaktadır ve optik haberleşme, sensörler ile komponent karakterizasyonu gibi uygulamalar için uygundur [10].

Tsai ve arkadaşları çalışmasında, 1570-1610 nm aralığındaki L-bantta çalışabilen tek-pompalı erbiyum katkılı fiber ASE kaynağı için dört farklı konfigürasyon (tek geçişli ileri-SPF, tek geçişli geri-SPB, çift geçişli ileri-DPF ve çift geçişli geri-DPB) deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Her bir konfigürasyon, çıkış gücü, ortalama dalga boyu, spektral bant genişliği ve pompa dönüşüm verimliliği gibi parametreler bakımından değerlendirilmiştir. Deneysel düzenekte, sistemler 100 mW'lık 1480 nm lazer diyot ile pompalanmış, çeşitli uzunluklarda (60, 100, 130 m) EKF kullanılmış ve geri yansıtıcı değerler (R = 0, 4%, 8%, 80%) fiber uçlarında farklı yapılar için denenmiştir. Sonuçlar, SPF ve SPB gibi konfigürasyonların L-bantta yetersiz kaldığını, özellikle SPB ve DPB konfigürasyonlarının yüksek çıkış gücüne rağmen ortalama dalga boyunun L-bant dışında kaldığını göstermiştir. SPF ise çok düşük çıkış gücü üretmektedir. Çalışmanın bulgularına göre, yalnızca çift geçişli ileri (DPF, R=8%) konfigürasyonu L-band ASE kaynağı için uygundur; bu yapı ile 100 mW pompa altında 13,8 mW çıkış gücü, 1585,7 nm ortalama dalga boyu, 40,9 nm spektral bant genişliği ve %13,8 pompa dönüşüm verimliliği elde edilmiştir, ayrıca spektral ripple ±0,6 dB'den küçüktür. DPF dışındaki konfigürasyonların spektrumunda ana güç yoğunluğu C-bantta toplanmakta ve uygulama açısından uygun bulunmamaktadır. Sonuç olarak, L-bant ASE kaynağı tasarımında optimum konfigürasyonun çift geçişli ileri yönlü (DPF) olduğu ve diğer yapıların pratikte faydasının sınırlı olduğu vurgulanmıştır [11].

Huang ve arkadaşları, Tulyum (Tm^{3+}) katkılı silika mikroküre lazerlerin ASE kaynağıyla pompalanmasını inceledikleri bu çalışmada, geleneksel tek dalga boylu lazer pompalama yöntemleriyle karşılaştırıldığında, ASE'nin çevresel kararsızlıklara karşı daha dayanıklı olup olamayacağı araştırılmıştır. Deneysel düzenekte, sol-jel yöntemiyle üretilmiş Tm^{3+} iyon katkılı silika mikroküreler kullanılmış; mikroküreye optik fiberden ASE ışığı aktarılmış ve 2 μm dalga boyunda lazer çıktısı gözlemlenmiştir. Geniş bantlı ASE kaynağı, yüksek

güçlü bir erbiyum katkılı fiber ile sağlanmış, pompalama ise 980 nm lazer diyotları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Deneylerde mikroküre lazer çıkışı, çıkış gücü, mod kararlılığı, eşik değeri ve spektral özellikler bakımından değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, ASE kaynağı kullanılarak 0,86 mW eşik gücü ile tek modlu, dar spektral bantlı (0,26 nm FWHM) ve yüksek yan mod bastırmalı (16,85 dB) lazer çıktısı elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, ASE ile pompalanan sistemde çevresel titreşim ve sıcaklık değişimlerine bağlı mod kaymalarının önlendiği, geleneksel pompa lazerlerine kıyasla üstün kararlılık sağladığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu metodolojiyle ASE pompalamanın, sensör ve medikal lazer uygulamaları gibi hassasiyet ve kararlılığın kritik olduğu alanlarda klasik dar bantlı pompa lazerlerine güçlü bir alternatif sunduğu gösterilmiştir [12].

Espindola ve ekibi, geniş bantlı, spektral olarak düzleştirilmiş ve yüksek güçlü bir ASE kaynağı üretmek amacıyla iki ardışık erbiyum katkılı fiber düzeneği kullanmışlardır. İlk aşamada 46 metre uzunluğunda ve düşük-ortalama ters birikmesi seviyesine sahip bir yoğun katkılı erbiyum fiberi bulunur; bu fiber yalnızca uzun dalga boylu (L-bant: 1560-1640 nm) ASE üretir. Bu aşamanın çıkışı, optik izolatör üzerinden ikinci aşamadaki (toplam 10 metre, ikiye bölünmüş) fiber bölgeye yönlendirilir; burada ise yüksek tersleme ile kısa dalga boylu (C-bant: 1530-1560 nm) ASE oluşturulur. İki fiber bölümü arasına yerleştirilen uzun periyotlu fiber ızgara (Long Period Fiber Bragg Grating – LPFBG) filtresiyle spektral dalgalanma minimize edilmiştir. Pompalama, tek bir 140 mW'lık 1480 nm lazer diyodu ile yapılır; çıkan pompa gücünün %30'u birinci aşamayı, %70'i ise ikinci aşamayı besler. Birinci aşamanın başında %90 yansıtıcı geniş bant reflektör, geri yönde üretilen ASE'yi tekrar fiber içine yönlendirerek ileri yönde daha fazla güç elde edilmesini ve verimliliğin artmasını sağlar. Ayrıca, birinci ve ikinci aşama arasında kullanılan düşük geri yansıtmalı izolatör, yüksek çıkış gücü için kritik olup, aşamalar arası geri beslemenin önüne geçerek her aşamada spektral içeriğin ve toplam güç dengesinin tamamen bağımsız şekilde kontrol edilmesini mümkün kılar. Sonuçlarda, bu yapı ile birlikte 80 nm bant genişliği ve 1 dB spektral düzlük elde edilmiş, düzeneğin toplam çıkış gücü ise 20 mW (+13 dBm) olarak ölçülmüştür. Bu iki aşamalı tasarım yüksek bant genişliği, spektral düzlük ve yüksek optik çıkışın bir arada istenen uygulamalar için oldukça verimli bir çözüm sunmaktadır [13].

Maeda ve arkadaşları Tm^{3+}-Tb^{3+} katkılı florür fiber kullanılarak 1700 nm bandında çalışan bir ASE kaynağı geliştirilmiş ve bu kaynak düşük konsantrasyonlu organik çözücülerin sudaki tespiti için orta-kızılötesi spektroskopi sistemine entegre edilmiştir. Kaynak

tasarımında, önce geniş bantlı ASE üretebilen bir fiber, ardından çıkış karakteristiğini iyileştiren ek bir fiber parçası ve iki aşamalı pompalama (1,2/1,8 μm WDM ve optik izolatör ile birlikte geri yönlü pompa şeması) kullanılmıştır. ASE kaynağının ürettiği spektrum, cam hücre içerisindeki ultra saf su ve çözücülerin spektral tepkileriyle analiz edilmiştir. Deneysel olarak, %0,3'e kadar düşük konsantrasyonlarda etanol, metanol ve DMSO sulu çözeltilerinin varlığı tespit edilmiş, her bir çözücü için belirlenen absorpsiyon tepe dalga boylarının şiddetinin konsantrasyonla doğrusal değişim gösterdiği saptanmıştır. Böylelikle, sistem organik maddelerin sulu fazda hassas, düşük maliyetli ve güvenilir analizine olanak sağlamıştır [14].

Wang ve arkadaşları, iki aşamalı bir EKF konfigürasyonu kullanılarak geniş bantlı bir C+L-band ASE kaynağı tasarlamışlardır. Bu yöntemde, birinci aşamada üretilen C-band ASE spektrumu, ikinci aşamadaki uzun EKF'ye enjekte edilerek L-band ASE spektrumunun gücü önemli ölçüde artırılmıştır. C+L-band ASE kaynağı, her iki aşamadan gelen güçlendirilmiş L-band ASE ve C-band ASE spektrumlarının birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Farklı fiber uzunlukları ve pompa güçleri karşılaştırılarak yapılan optimizasyon sonucunda, en iyi performansı sağlayan konfigürasyon belirlenmiştir. Bu konfigürasyonda, birinci aşamadaki EKF 5 metre, ikinci aşamadaki EKF 30 metre olarak seçilmiştir. Pompa güçleri ise sırasıyla 110 mW ve 70 mW olarak ayarlanmıştır. Bu optimize edilmiş iki aşamalı yapı ile, 180 mW'lık toplam pompa gücü kullanılarak yaklaşık 80 nm bant genişliğine ve 15,9 dBm çıkış gücüne sahip, spektral olarak düz bir ASE kaynağı elde edilmiştir. Bu sonuç ile %21,6'lık bir pompa dönüşüm verimliliği elde edilmiştir [15].

Meng ve ekibinin yaptığı çalışmada, geniş bant ASE kaynağı, spektrum dilimleme ve dinamik olarak yapılandırılabilir optik ekle-çıkar çoklayıcı (OADM) ile entegre edilerek fiber tabanlı radyo ve dalgaboyu bölmeli çoklama (RoF-WDM) optik ağ sistemlerinde kullanılmıştır. Deneysel düzende yalnızca tek bir geniş bant ASE kaynağıyla çoklu dalgaboylu iletim sağlanmış, spektrum dilimleme ile kanallar oluşturulmuş ve optik sinyal-gürültü oranı ile çıkış güçlü sinyal elde edilmiştir. Güç dengeleme ve sinyal iyileştirme için eşitleme optimizasyonu ve yarı iletken optik yükselteç (SOA) teknolojileri eklenmiş; toplam sistemde düşük kanal karışması, yüksek optik güç ve 160 km'ye kadar az kayıplı iletim başarılmıştır. Sonuçlar, bu yaklaşımın çok kanallı uzun mesafe fiber iletişim ağlarında maliyet, basitlik ve performans avantajı sunarak, esnek ve genişletilebilir altyapı sağlar nitelikte olduğunu göstermiştir [16].

Adikan ve arkadaşları, L-bant EKFY'nin kazanç ve gürültü performansını ASE pompası kullanılarak ve geleneksel 980 nm pompa diyotu ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, üç L-bant giriş sinyali (1570, 1575, 1580 nm) -30 dBm güçle sisteme verilmiş, 38 m uzunluğundaki EKFY'de hem 980 nm pompa hem de ASE kaynağı çeşitli yapılandırmalarda bir arada kullanılmıştır. Dört temel pompalanma konfigürasyonu analiz edilmiştir. 980 nm ve ASE'nin her birinin ileri (co-) ve ters (counter-) yönde uygulanması denenmiştir. Bulgular, sistemi doğrudan ASE ile pompalamanın L-bant kazanç değerini en fazla 6 dB artırabildiğini göstermiştir ancak bu durumda, gürültü değeri yaklaşık 1 dB yükselmiştir. Hem 980 nm pompa hem de ASE birlikte kullanıldığında, pompanın ileri, ASE'nin ters yönde (980 nm co-propagating, ASE counter-propagating) uygulandığı konfigürasyon, ortalama 7,7 dB ve maksimum 12,7 dB kazanç ile en iyi performansı göstermiş ve gürültü katsayısı ortalama 3,9 dB olarak ölçülmüştür. Deneyler, EKFY'nin L-bant kazanç düzleştirmesi ve verimliliği açısından ASE pompasının etkin bir ikincil pompalama kaynağı olduğunu, ancak doğrudan ASE pompalamanın gürültü dezavantajı getirdiğini göstermektedir. En ideal kombinasyonun 980 nm pompasının ileri, ASE pompasının ise ters yönde uygulanması olduğu vurgulanmıştır [17].

Chen ve ekibi, sıcaklık değişimlerine karşı duyarsız, spektral olarak düzleştirilmiş ve geniş bant ASE kaynağı elde etmek amacıyla erbiyum katkılı fiber, pompa lazer diyodu ve harici kazanç düzleştirici filtre (GFF) içeren deneysel bir düzenek kullanmışlardır. Çalışmada, 976 nm pompalama ile 7 metreye kadar farklı uzunluklarda erbiyum katkılı fiberler test edilmiştir; fiberin ileri ve geri ASE çıkışları farklı pompa güçlerinde (100-400 mW) kıyaslanmıştır. Fiber uzunluğu, pompa gücü ve GFF dahil edilmesiyle hem toplam çıkış gücü hem de spektral düzlük optimize edilmiştir. Özellikle 5–7 m fiber uzunluğunda, 40 nm bant genişliğinde ve %0,5'ten az spektral dalgalanma ile optimum düzlük sağlanmış, GFF'nin toplam çıkışta 5-7 dB kayba yol açtığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sistemi −18,9 °C ila 50 °C sıcaklık aralığında çalıştırarak ASE çıkış gücü ve spektrum stabilitesi test edilmiş, çıkışlarda en fazla %1,5 değişim, 25°C ila 50°C aralığında ise %0,65'in altında değişim gözlenmiştir. Sonuç olarak, pompa dalga boyunun ve güç optimizasyonunun yanı sıra GFF entegrasyonu ile, düşük sıcaklık hassasiyetli, yüksek kararlılığa ve spektral düzlüğe sahip geniş bant bir ASE kaynağı geliştirilmiştir [18].

Yu ve arkadaşları, tek bir organik mikrofiberde ASE üretimini inceleyen bu çalışmada, DCJTB katkılı polistiren (PS) mikrofiberler, eritme esaslı elektrospinning yöntemiyle

üretilmiştir. Deneysel olarak, 240 °C'de karıştırılan DCJTB ile PS ve polietilen vaks, 15 kV'luk gerilim ve yaklaşık 5 cm enjeksiyon mesafesinde bir toplama folyosuna çekilmiş, böylece homojen ve silindirik (~80 µm çapında) mikrofiberler elde edilmiştir. Fiberlerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik güçlü mikroskop (AFM) ile doğrulanmış, optik deneylerde fiberler darbeli 532 nm Nd:YAG lazerle uyarılmıştır. Çıkış spektrumu, uyarı eşiği altı ve üstü için kaydedilmiş ve eşiğin aşılmasıyla, yayım bandında FWHM'nin 7 nm'ye düşmesiyle belirgin bir spektral daralma ve ASE oluşumu gözlenmiştir. Net optik kazanç, değişken şerit uzunluğu yöntemiyle 0,2 mW pompa gücünde 31,4 cm^{-1} olarak belirlenmiştir. Ayrıca, eşiğin çok düşük (0,08 mW) olduğu gösterilmiş ve fiberin silindirik yapısının, kapalı döngü optik geri besleme ve mod kavitesi yaratarak, düşük eşik ve yüksek kazançlı ASE oluşumunu mümkün kıldığı doğrulanmıştır. Sonuçlar, tek bir organik mikrofiberin güçlü yönlendirme, düşük uyarı eşiği ve yüksek optik kazanç özellikleriyle mikro-lazer ve entegre fotonik uygulamaları için umut vadettiğini göstermiştir [19].

Wang ve arkadaşları, bizmut katkılı erbiyum katkılı fiber kullanarak 88 nm bant genişliğine sahip geniş bant ASE kaynağının üretimini hedeflemişlerdir. Deneysel çalışmada iki aşamalı bir kaynağa odaklanılmıştır: Birinci aşamada, bizmut katkılı EKF'ler çeşitli uzunluklarda optimize edilerek pompa gücü, fiber uzunluğu ve katkı oranı parametreleri incelenmiştir. ASE kaynağı, hem 980 nm hem de 1480 nm pompa diyotları ile test edilmiştir. Ayrıca fiberlerin farklı bölümlerinde geri ve ileri pompalama konfigürasyonları karşılaştırılmıştır.

Elde edilen bulgulara göre, 1,7 W pompa gücü ve en uygun fiber uzunluğu ile toplam çıkış gücü 21,3 dBm'e ulaşmış, optimum koşullarda ASE spektral genişliği 1542-1630 nm aralığında 88 nm olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kaynak performansı, konvansiyonel silika tabanlı EKF ile karşılaştırılmış ve bismut katkısının ASE çıkış gücünü ve spektral genişliği anlamlı düzeyde iyileştirdiği gösterilmiştir. Sonuç olarak bizmut bazlı fiberlerin, geniş spektrumlu ve yüksek güçlü ASE kaynakları için geleneksel teknolojilere kıyasla daha verimli ve uygulamaya elverişli yeni bir alternatif sunduğunu ortaya koymuştur [20].

Harun ve ekibi, düz kazançlı bir EKFY ve fiber döngü aynası (loop mirror) kullanarak iki farklı deneysel konfigürasyon olan tek geçişli (single-pass) ve çift geçişli (double-pass) şemalar ile çok dalga boylu (multiwavelength) ışık kaynağı geliştirmiştir. Deneysel düzenekte IsoGainTM tipi, 14 metrelik düz kazançlı EKF içinde 980 nm pompalama

uygulanmış ve fiberin ASE spektrum çıktısı, 3 dB optik splitter ve 14,5 m polarizasyon-koruyan fiber ile kurulan fiber ayna ile filtreden geçirilerek istenen çoklu dalga boylu çıkışlar üretilmiştir. Çift geçişli şemada, fiber ayna bir optik sirkülatör ile sisteme entegre edilmiş ve filtrelenen sinyaller geri gönderilip tekrar EKF'de güçlendirilmiştir. Sonuçlar, 1550 nm merkezli 10 nm'lik spektral bant içinde 0,4 nm kanal aralığıyla 25'e kadar farklı kanalın eşzamanlı üretilebildiğini göstermiştir. Çif geçişli yapı, tek geçişliye göre çıkış gücünde 15 dB'in üzerinde artış (yaklaşık −41 dBm çıkış gücü) sağlamıştır; ancak bu yapıdaki sinyal-gürültü oranı (SNR) yaklaşık 4 dB olarak düşük bulunmuştur. Tek geçişli şemada ise sinyal gürültü oranı (SNR) >60 dB ile çok daha yüksek sinyal kalitesi elde edilmiştir. Kanal aralığının, polarizasyon koruyan fiberin uzunluğu ile ayarlanabilir olduğu ve güç dalgalanmasının düşük seyrederek sistemin yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (YDBÇ-DWDM) ağları ve komponent karakterizasyonu gibi yoğun kanal istikrarı gerektiren uygulamalara uygun olduğu gösterilmiştir [21].

Gürkaynak ve arkadaşları, geniş düzlüğe sahip verimli kazanç bant genişliği sağlayan paralel hibrit fiber kuvvetlendirici (PHFA) deneysel olarak önermişlerdir. Kurulumda iki paralel amplifikatör dalı kullanılmıştır: Birinci dalda seri olarak EKFY ve Raman fiber yükselteci (RFA) ardışık olarak yer alırken, ikinci dalda yalnızca RFA yer alır. Üç farklı Raman pompa birimi (1410, 1480 ve 1495 nm) ile çeşitli optik iletişim bantlarında Raman kazancı hedeflenmiştir. Optimum pompa güçlerinde ve -30 dBm sinyal giriş gücünde, 83 nm'lik (1527-1610 nm) bant genişliğinde ortalama 18,5 dB kazanç ve maksimum 3 dB kazanç salınımı elde edilmiştir. Daha büyük giriş sinyal gücünde (+5 dBm), bant genişliği 92 nm'ye (1525-1617 nm) çıkarılmış ve ortalama kazanç seviyesi 13 dB olmuştur. Raman kazanç tepe noktaları (1510 ve 1595 nm), EKFY'nin kazanç tepe aralığından uzakta seçilerek yükseltecin doygunluğunun ve kazanç örtüşmesinin önüne geçilmiştir. Ayrıca, artan pompa verimi için artık Raman pompası geri dönüştürülmüş ve böylece yüksek bant genişliği sağlanmıştır. Sonuç olarak, önerilen PHFA yapısı hem küçük hem de büyük giriş güçlerinde geniş bant genişliği ve düz bir kazanç, yüksek ortalama kazanç ve düşük gürültü karakteristikleri ile literatürde benzerlerine kıyasla üstün performans sergilemiştir [22].

Wan ve ekibi çalışmasında, tek tepeye sahip yaklaşık Gauss (near-Gaussian) spektrum elde etmek için çift kademeli enerji eşleştirme ve ardışık uzun periyot fiber ızgarası (LPFG) filtreleme yöntemleri birleştirilmiştir. Sistemin ilk aşamasında 15 m'lik erbiyum katkılı fiberde öne doğru tek geçişli pompalama, ikinci aşamasında ise 26,5 m'lik fiberde geriye

doğru pompalama uygulanmıştır. ASE ışığının spektral enerjisi, iki aşamalı enerji eşlemesiyle uzun dalga boyu (1560 nm civarı) bölgesine yoğunlaştırılmıştır; ardından, fazlalık kısa dalga boyu (~1530 nm) bileşenlerini ortadan kaldırmak amacıyla iki ardışık LPFG filtre kullanılmıştır. Deneylerde pompa güçleri optimize edilerek (birinci ve ikinci kademe için sırasıyla 50 mW ve 360 mW), çıkış gücü 10,17 mW, spektral genişlik 19,77 nm, 3 dB bant genişliği yaklaşık 12 nm ve ortalama dalga boyu stabilitesi −0,978 ppm/mW elde edilmiştir. Sistem, pompa güçleri değiştikçe tek tepeye sahip yaklaşık Gauss spektrum şekli koruyabilmekte ve üretilen spektrumun ortalama dalga boyu yüksek kararlılıkla ayarlanabilmektedir. Elde edilen bu fiber kaynağı, özellikle fiber optik jiroskoplar gibi yüksek spektral kararlılık gerektiren uygulamalar için potansiyel bir aday olarak sunulmuştur [23].

Muniz-Canovas ve arkadaşları çalışmasında, düşük katkılı EKF'de 976 nm pompalama ile elde edilen dar bantlı ASE'nin polarize ve polarize olmamış halinde sahip olduğu özgül gürültü özellikleri ve bunun fiberde kendi faz modülasyonu (self-phase modulation, SPM) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneysel olarak, fiber Bragg ızgaralarıyla optik bant daraltma, fiber polarizörle polarizasyon kontrolü ve 25-GHz fotodedektör ile 16-GHz osiloskop kullanılarak ASE gürültüsünün zamansal analizleri yapılmıştır. Sonuçlar hem polarize hem de polarize olmayan ASE'nin M-katmanlı Bose-Einstein dağılımına uyduğunu, her ikisinde de ASE gürültüsünün rassal büyüklük, genişlik ve aralıklarla dağılan Gauss tipi darbe trenleri şeklinde oluştuğunu göstermiştir. Yüksek şiddetteki darbe genişliğinin ortalama değeri büyüdükçe darbe dağılımı daha simetrik ve kararlı hale gelmektedir. Deneyler ayrıca ASE kaynaklı optik spektrumun, uzun haberleşme fiberlerinde ilerlerken SPM etkisiyle güç arttıkça simetrik, üçgen benzeri bir şekilde (yarı-logaritmik ölçekte) genişlediğini, oluşan spektral genişliğin ASE sinyalinin zamansal türevlerinin istatistiğiyle belirlendiğini göstermiştir. Sonuç olarak, dar bantlı ASE kaynaklı gürültü, fiber optik sistemlerde SPM temelli spektral genişleme üzerinde belirleyici olmakta, polarize kaynaklar yüksek genlikli darbe ve spektral türevde daha geniş dağılım sunarak SPM etkisini güçlendirmektedir [24].

Michie ve ekibi, yarı iletken optik yükselteçlerin (SOA) otomatik güç kontrolü (APC) sistemlerinde, çıkıştaki sinyal ve ASE bileşenlerinin toplamının klasik algılama yöntemleriyle birbirinden ayrılamaması ve bunun özellikle düşük giriş sinyali seviyelerinde ciddi hata kaynağı oluşturmasını ele almışlardır. Metodolojide, SOA çıkışında toplam optik

gücün ve sürücü akımının birlikte ölçülerek, çıkıştaki net sinyal gücünün 3-boyutlu bir harita (lookup table) üzerinden belirlenmesi öngörülmüş ve bu harita, farklı giriş sinyali ve akım düzeylerinde çıkış gücü ile istenen sinyal arasındaki ilişkileri deneysel olarak çıkarılmıştır. Mikrodenetleyiciye gömülen bu harita, gerçek zamanda toplam çıkış gücü ve sürücü akımı bilgisinden yola çıkarak, ASE'nin katkısını çıkartır ve doğrusal olmayan bölgelerde bile çıkış sinyal gücünün hedef değere getirilmesini sağlar. Sonuç olarak ASE telafisiz klasik APC'de düşük giriş sinyali seviyelerinde 2,5 dB'ye varan hata olduğunu, önerilen yöntemle ise bu hatanın 0,2 dB'ye indirilebildiğini göstermiştir. Yöntem, dar bantlı optik filtre gereksinimini ortadan kaldırırken dalga boyu bağımsız ve düşük maliyetli, yüksek doğrulukta bir güç kontrolü yaklaşımı sunmakta olup sistem doğruluğu ise optimum haritalama ve işlemci kapasitesi ile ilişkilidir [25].

Sinivasagam ve arkadaşları çalışmasında, erbiyum katkılı silika fiber üzerinde C-bant ve L-bantta seçilebilir ASE kaynağı üretimi için deneysel bir yaklaşım sunulmuştur. Metodolojide, 50 m uzunluğunda ve 320 ppm Er^{3+} katkılı aluminosilikat fiber, 980 nm pompa diyotu ile beslenmiş ve sistemin anahtarlama özellikleri bir 1×2 optik anahtar ile kurulmuştur. Optik anahtar, geri ASE'nin (backward ASE) bir optik sirkülatör üzerinden tekrar fiber içine beslenmesini (feedback sistemi, L-bant için) veya çıkıştaki 3 dB kuplörden doğrudan çıkmasını (nonfeedback sistemi, C-bant için) sağlamaktadır. Pompa gücü iki durumda da 44,5 mW'ta sabit tutulmuştur. Çıkış portunda bir optik izolatör yer alarak istenmeyen optik geri yansımaları önlemiştir. Bulgular, geri ASE beslemesi yokken çıkışın C-bantta 1515-1601 nm aralığında 85,6 nm bant genişliği ile gerçekleştiğini, geribesleme devreye alındığında ise ASE'nin L-bant spektrumuna 1545-1612 nm aralığında 67,3 nm bant genişliği ile kaydığını göstermiştir. L-bant kısmına geçtiğinde toplam spektral güçte 0,3 dB'lik iyileşme, ortalama güç yoğunluğunda ise 18,9 dB'lik artış elde edilmiştir. Maksimum güç yoğunluğu, geribesleme sisteminde 10,4 dBm'e ulaşmıştır. Yapının C-bant/L-bant arasında anahtarlanabilir olması, sistemin YDBÇ cihaz karakterizasyonunda ve spektrum dilimlemeli veri iletimi gibi uygulamalarda esnek kaynak olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle seçici yükleme/indirme kanal ayırma gerektiren metro ağlarda, ek modül gereksinimi olmaksızın band seçimi sağlanabilmektedir [26].

Wang, Ming ve Huang, deneysel olarak C-bant ve L-bant arasında anahtarlanabilir, band seçici bir ASE kaynağı geliştirmişlerdir. Metodolojide, pompa olarak 100 mW'lık 1480 nm lazer diyot, iki kademeli erbiyum katkılı fiber, araya yerleştirilen bir optik izolatör, 50:50

oranında fiber kuplör, geniş bant fiber ayna ve 1x2 optik anahtar kullanılmıştır. Sistemin ana prensibi, optik anahtarın konumuna göre çıkışta ya sadece C-bant ASE (anahtarlama portu 1, geri yönlü, geri besleme yok) ya da L-bant ASE (anahtarlama portu 2, geri yönlü ASE, geri besleme mevcut) elde edilmesidir.

Deneysel bulgulara göre, C-bant modunda (anahtar portu 1'de) 27,6 mW çıkış gücü elde edilirken, L-bant modunda (anahtar portu 2'de) çıkış gücü 11,8 mW ve 40 nm civarında bir bant genişliği elde edilmiştir; ayrıca L-bant için herhangi bir spektral düzleştirici filtreye gerek kalmadan oldukça düz bir spektrum elde edilmiştir. Optik izolatörün kullanımı, iki fiber segmenti arasında geri beslemenin istenmeyen etkilerini önlemiş ve modlar arası etkileşimi azaltmıştır. Sonuç olarak, bu band seçici ASE kaynağı, ilave bir modül veya donanım gerektirmeden C ve L-bant arasında anahtarlanabilir geniş bant ve yeterli çıkış gücü sunarak, çift bantlı YDBÇ cihaz karakterizasyonu ve metro ağları gibi uygulamalarda kullanıma uygun ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır [5].

Wang ve Huang, hem C-bant (1525-1565 nm) hem de L-bant (1565-1605 nm) spektrumunda çalışabilen, anahtarlanabilir bant seçici bir ASE geniş bant ışık kaynağı tasarlamış ve deneysel olarak göstermiştir. Yöntemde, tek bir 980 nm lazer diyot üzerinden geri yönlü pompalama yapılmakta, iki bölümden oluşan (EDF1 ve EDF2) erbiyum katkılı fiberin arasına bir 1×2 optik anahtar ve pompa kuplörleri yerleştirilmiştir. Anahtar port 1 konumunda iken klasik çift geçişli geri yönlü pompalama (DPB) konfigürasyonu kurularak enerji doğrudan EKF'den geçmekte ve sistem C-bant ASE üretmektedir. Optik anahtar port 2'ye çevrildiğinde ise, EDF1 (pompalanmamış fiber) pompadan yalıtılır, sadece EDF2 pompa uyarımı alır ve sistemden çıkan geri yönlü C-band ASE, EDF1'de ikincil pompa kaynağı gibi davranarak L-band ASE üretimini mümkün kılar. L1 (pompalanmamış fiber) ve L2 (pompalanan fiber) oranları optimizasyonla belirlenmiş, en iyi L-bant performansı için L/L1 oranının 0,158 (3 m/19 m) olması gerektiği bulunmuştur. Ölçümlerde, sadece optik anahtarın durumu değiştirilerek 40,09 mW C-bant ya da 37,5 mW L-bant ASE çıkışı elde edilmiştir ve güç kararlılığı her iki bant için de 2 saatlik ölçümde 0,05 dB'nin altındadır. Tasarlanan yapı hem ilave modül hem de ek yükseltici gerektirmeden, hızlı anahtarlama ile dengeli ve yüksek güçlü C/L bant ASE kaynağı sağlamaktadır. Bu özelliğiyle, özellikle çift bant YDBÇ cihaz karakterizasyonu ve metro ağlarındaki esnek kaynak ihtiyacında kullanılmaya elverişli olduğu gösterilmiştir [27].

Altuncu çalışmasında, geniş bantlı bir döngüsel ASE kaynağında bant seçimi yapmak üzere tohum sinyal (seed signal) enjeksiyonu yöntemini deneysel olarak incelemiştir. Kurulan optik fiber düzeneğinde, düz kazançlı 980 nm pompalı EKF, kapalı döngü yapı (loop) ve band seçimini sağlayacak ayarlanabilir lazer kaynağı yer almıştır. Temel yöntemde ASE kaynağı, bir optik sirkülatör üzerinden hem C-bandı hem de L-bandı kapsayan spektrumda çalışacak şekilde konumlandırılmış, ardından belirli bir merkez dalga boyuna sahip zayıf (düşük güçlü) harici tohum sinyali (örn. 1540 nm veya 1590 nm) fiber düzeneğe enjekte edilmiştir. Deneylerde, tohum sinyali enjekte edildiğinde, bu dalga boyunda spektral tepe ve çıkış gücünde belirgin bir artış gözlenmiş ve kaynağın spektral içeriği seçici olarak kontrol edilebilmiştir. Tohum sinyali olmayan durumda ASE spektrumu tipik düz ve geniş bantlı olurken, sinyal enjekte edildiğinde, ilgili dalga boyunda belirgin dar tepe (gain peak) oluşmuştur. Böylelikle C-bandı ve L-bandı sınırlarında seçici spektral çıkış elde edilmiş, tohum sinyali gücünün artırılmasıyla istenen bantta ASE çıkışı optimize edilebilmiştir. Ayrıca, tohum sinyalinin dalga boyu değiştirilerek çeşitli merkezlerde band kontrolü sağlanmış; böylece klasik filtreleme yerine, hızlı ve esnek bir spektral ayarlama gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tohum sinyali enjeksiyonu ile ASE kaynağının spektral dağılımının aktif ve dinamik olarak kontrol edilebileceğini, bu yaklaşımın YDBÇ sistemlerinde ve çok bantlı optik komponent karakterizasyonunda yüksek verimlilik ve kolay uygulanabilirlik sunduğunu göstermiştir [28].

Al-Azzawi ve ekibi, Hafniyum-Bizmut bazlı erbiyum birlikte katkılı fiberlerle (HB-EKF) gerçekleştirilen geniş bant ASE kaynağına yönelik çalışmada, toplam 2 m aktif fiber kullanılarak hem paralel hem de seri konfigürasyonlarda ASE üretimi deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneğinde, C-bandı (50 cm HB- EKF) 980 nm ile, L-bandı (150 cm HB-EDF) ise 1480 nm pompa diyotu ile uyarılmıştır. ASE sinyalleri bir C/L-DBÇ ile birleştirilmiştir. Paralel konfigürasyonda, her fiber bölümü bağımsız olarak optimum pompa gücünde (140 mW C-bant, 170 mW L-bant) çalıştırılmış ve 56 nm bant genişliğinde, ±7 dB spektral dalgalanmalı, 20,1 mW toplam güce (%6 verimlilik) ulaşılmıştır. Seri konfigürasyonda ise, C-bandı çıkışı doğrudan L-bant fiberine aktarılmış ve etkileşimli pompalama ile daha yüksek performans sağlanmıştır. Optimum koşullarda (170 mW C-bant, 110 mW L-bant) 57 nm bant genişliği, ±7,5 dB dalgalanma ve 20,8 mW toplam çıkış (%7 verim, 280 mW toplam pompa gücü) elde edilmiştir. Seri konfigürasyon, paralel yapıya kıyasla daha yüksek bant genişliği, güç, verimlilik ve daha düşük sistem karmaşıklığı sunmuştur. Ayrıca HB-EKF'nin silika içeriği, konvansiyonel tek modlu fiber (Single Mode

Fiber - SMF) ile uyumlu olup düşük bizmut oranı sayesinde ek avantaj sağlamıştır. Çalışmanın bulguları, kısa fiber uzunluğuyla geniş bant, yeterli güç ve düşük dalgalanmalı, S+C+L bantlarını kapsayan yeni nesil ASE kaynak tasarımlarında HB-EKF'nin etkinliğini ve uygulanabilirliğini göstermektedir [29].

Rößner ve arkadaşları, uzay uygulamaları için güvenilir, kararlı ve yüksek güçlü bir ASE tabanlı geniş bant ışık kaynağının tasarımı, uygulaması ve doğrulamasını ele almışlardır. Çalışmada, fiber Bragg ızgarası (FBG) tabanlı sensör sistemlerinde kullanılmak üzere, 1550 nm civarında yoğunlaşan ve düşük polarizasyon derecesine sahip bir ışık kaynağı gereksinimine odaklanılmıştır. Laboratuvar ortamında, iki farklı tür erbiyum katkılı fiber (biri uzay şartlarına özelleştirilmiş karbon kaplamalı) kullanılarak prototip oluşturulmuştur. Sistemin temelinde, 975 nm'de çalışan bir yarı iletken diyot lazer pompası ve DBÇ ile pompalanan, uçlarında izolasyon ve termal dengeleme sağlanan bir EKF yer almaktadır. Optik bir izolatör istenmeyen geri yansımaları önlerken, tüm opto-elektronik bileşenler ısıl yönetim ve mekanik/termal koruma sağlayan özel bir gövdede toplanmıştır. Çıkış spektrumu ve testlerde, uzay şartları için geliştirilen karbon kaplamalı fiber ile 50 mW toplam çıkış gücü elde edilmiştir. Kaynağın polarizasyon derecesi %1'in altında bulunmuş, bu da FBG sensörleriyle kullanım için idealdir. Uzun süreli kararlılık testinde çıkış gücündeki dalgalanma %0,5'in altında ve sıcaklık değişimlerinde (−20°C - +60°C) dalgalanma %10 seviyesindedir. Bu durum ölçüm uygulamalarında spektral kaymanın sistem kurgusu itibariyle kritik olmadığını göstermiştir. Gürültü analizinde kaynak odaklı güç dalgalanmasının yalnızca %0,08 olduğu belirtilmiştir. Titreşim testlerinde ise standardın ötesinde 12,2 g rms ve 14,7 g tepe ivmeler altında dahi sistem hasar almadan çok düşük çıkış gücü dalgalanması ile çalışmıştır. Sonuç olarak, elde edilen kaynak uzay ortamında FBG tabanlı sıcaklık, yük ve sağlık izleme amaçlı fiber optik sistemlerin ana gereksinimlerini karşılar nitelikte olup, düşük polarizeli, yüksek kararlılık ve uzay için uygunluktadır. Çalışma ayrıca, daha yüksek güç ve bant genişliği için çift kılıflı fiberler, spektral düzleştirme ve yeni filtreleme çözümleri gibi gelişmiş tasarım önerilerine de değinmektedir [8].

Zhang, Max ve Kassi, hem ileri hem de geri yönde çalışan ASE ışığı kullanan, çift geçişli bir konfigürasyon ve buna bağlı optimizasyon süreçlerini temel almıştır. Sistemde, iki farklı pompa kaynağı ve iki aşamalı erbiyum katkılı fiber (EKF1 ve EKF2) entegre edilmiştir; ilk aşamada L-bant ASE, ikinci aşamada ise C-bant ASE üretilmiş ve bu iki spektral bant

birleştirilmiştir. Simülasyon ve deneyler, pompa güçleri ve fiber uzunluklarının ayarlanmasıyla C-bant ve L-bant arasında spektral düzlüğü ve güç dengesini optimize etmiştir. 35 metre (L-bant için) ve 5 metre (C-bant için) seçilen fiber uzunluklarıyla, 80,6 nm bant genişliği ve 5,22 dB spektral düzlük elde edilmiş; pompalama-dönüşüm verimliliği ise %18,9'a ulaşmıştır. Bilimsel açıdan, bu yüksek bantlı, düz spektrumlu ve güçlü ASE kaynağı özellikle geniş algılama aralığı, yüksek hız ve çok sayıda sensörün tek kaynakla aynı anda sorgulanabilmesi için avantaj sunmaktadır. Geliştirilen kaynak, prototip FBG interrogator sistemlerinde 5 kHz'e varan örnekleme hızına imkân tanır, hiçbir hareketli mekanik parça olmaksızın yüksek hızlı ve çoklu FBG sensör ölçümleri yapılabilmesini sağlar. Böylece sistem, dinamik olayların (ör. titreşim, darbe, yüksek hızlı yük değişimleri) hassas ve gerçek zamanlı olarak izlenmesi için ideal olmaktadır. Uygulamada yüksek çıkış gücü ve geniş bant kombinasyonu sayesinde sinyal-gürültü oranı artırılarak çok kanallı sensör ağlarında güvenilir ve geniş dinamik aralıklı FBG sorgulama mümkün kılındığı belirtilmektedir [30].

KanwaI ve ekibi, eş zamanlı sürekli dalga (CW) lazer ve mod-kilitli darbe treni üretimi için iki kademeli C+L-bant seçilebilir erbiyum katkılı fiber lazer tasarımı üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, her iki fiber lazer kaviteli sistem bir fiber Bragg ızgarası (FBG) ile bağlanmış, 1480 nm tek pompa kaynağından çıkan güç ikiye ayrılarak her iki kaviteli sistemde kullanılacak şekilde optimize edilmiştir. Metodolojik olarak; ilk kavite, bir intra-kavite ayarlanabilir optik filtre (TOF) ile seçilen dalga boyunda (1555-1625 nm arası) CW lazer üretirken, aynı zamanda FBG üzerinden ikinci kaviteye mod-kilitlenmiş darbeler oluşturmak için tohum sinyali gönderir. İkinci kavitede ise, fiberden alınan tohum ve aynı pompanın ikinci kısmı ile aktif mod-kilitli çalışmaya olanak sağlanır. Her iki kaviteli yapının dalga boyları bağımsız biçimde ayarlanabilmekte, böylece iki farklı dalga boyunda veya aynı dalga boyunda eş zamanlı CW ve mod-kilitli darbe üretimi yapılabilmektedir.

Çalışmada, fiber uzunluğu ve doping konsantrasyonu gibi tasarım parametreleri optimize edilmiş, ilk kavitede 70 nm dalga boyu aralığında (1555-1625 nm) 0,01 nm çizgi genişliğine sahip, ortalama 22,6–24,6 dBm gücünde ve 81,4–99 dB OSNR değerinde CW ışık elde edilmiştir. İkinci kaviteli sistemde ise, ortalama 21–22 dBm güç, 60–87 dB OSNR ve 38 ns FWHM'ye sahip mod-kilitli darbe treni elde edilmiştir. Son olarak, birinci kavitenin çıkıştan çekilen oranının artırılması, ikinci kavitede mod-kilitlenme süreci ve darbe gücünde artışa yol açmıştır böylece sistemin genel çıkış gücü ve OSNR dengesi bu parametreyle hassas

şekilde kontrol edilebilmektedir. Sonuç olarak, önerilen bu tasarım düşük maliyetli, geniş ayarlanabilir dalga boyu aralığına ve yüksek stabiliteye sahip olup, optik haberleşme ve mikrodalga fotoniği gibi çeşitli fotonik uygulamalarda aynı anda CW ve mod-kilitli darbe gerektiren uygulamalar için pratik avantajlar sunmaktadır [31].

Xu ve arkadaşları, 1480 nm pompalı L-bant erbiyum katkılı fiber ASE kaynaklarının üç ana konfigürasyonu karşılaştırmalı olarak incelemiştir:

1. Tek kademeli çift geçişli ileri yönlü pompalama (one-stage double-pass forward pump)
2. İki kademeli, C-bant ASE enjeksiyonlu yapı (two-stage with C-band ASE injection)
3. Tek kademeli çift geçişli çift yönlü pompalama (one-stage double-pass bi-directional pump).

Tüm yapılar Lucent üretimi, yüksek katkılı standart EKF ve toplamda 160 mW pompa gücüyle, optimum fiber uzunluklarında çalıştırılmıştır. C-bant ASE ile enjeksiyon yapılan iki kademeli konfigürasyon ilk aşamada çift geçişli geri yönlü pompalama ile C-bant ASE üretip bunu daha uzun ikinci aşamada L-bant ASE üretimi için kullanırken; çift yönlü pompalamalı yapı ise iki adet 1480 nm lazer ile fiberin iki ucundan senkronize olarak beslenmekte, böylece L-bant çıkış hem ileri hem geri yönlü ASE ile güçlendirilmektedir. Her yapı üzerinde çıkış gücü, pompa dönüşüm verimliliği, bant genişliği ve ortalama dalga boyu stabilitesi gibi temel parametreler deneysel olarak ölçülüp karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, tüm yapıların yaklaşık aynı bant genişliği (~40 nm) sunduğu ancak “tek kademeli çift yönlü pompalama” konfigürasyonunun en yüksek çıkış gücü ve pompa verimliliğine sahip olduğu, ayrıca ortalama dalga boyu stabilitesinin iyileştirildiği gösterilmiştir. Özellikle, optimize edilen fiber uzunluğu ile elde edilen spektrumun 1.5 dB’den düşük spektral dalgalanma ile oldukça düz olduğu, bu yapının L-bant ASE kaynak tasarımında optimal çözüm olarak öne çıktığı vurgulanmıştır [32].

Wang, Huang ve Cai, L-bant süperfloresan fiber kaynağı (SFS) özelliklerini iyileştirmek için yeni bir yöntem olarak, bir bölüm pompalanmamış (unpumped) erbiyum katkılı fiberin sisteme eklenmesi önerilmiştir. Deneysel kurulumda, klasik çift geçişli çift yönlü pompalama (DP-BD) konfigürasyonuna, reflektör ile DBÇ kuplör arasına belirli uzunlukta bir pompalanmamış EKF yerleştirilmiştir. İki ana aşamadan oluşan bu sistemde, ikinci EKF bölgesi hem ileri hem geri (bi-directional) 980 nm pompa lazeriyle pompalanırken, birinci EKF bölgesi herhangi bir pompalanma yoktur. Pompalanmayan EKF’nin görevi, geri yönde

yayılan ASE'yi yeniden toplayıp, daha uzun dalga boyunda (L-bantta) tohum ASE kaynağı oluşturmaktır.

Simülasyonlar ve deneyler, pompasız bölümün toplam fiber uzunluğuna oranı ve pompa gücü dağılımının, çıkış spektrumunun bant genişliği ve çıkış gücü üzerinde temel belirleyiciler olduğunu göstermiştir. En iyi performans, sadece ileri yönde pompa uygulanan tekli pompalama konfigürasyonunda ve 14 m pompasız / 5 m pompalanan fiber (toplam 19 m EKF) ile elde edilmiştir. Sonuçlara göre, bu yöntemle pompa gücünden bağımsız, sabit ortalama dalga boyuna sahip ve 50,2 nm spektral bant genişliği ile 60,2 mW çıkış gücü üreten, geniş ve sabit spektrumlu bir L-bant süperfloresan fiber kaynağı elde edilmiştir. Düzenek klasik eş-zamanlı pompalamaya göre daha basit donanım gerektirirken, spektral genişlik ve güç açısından da daha avantajlıdır. Bu yapı, özellikle fiber optik jiroskop ve geniş bantlı optik sensör uygulamaları için yüksek kararlılık ve geniş bant gereklerini etkin biçimde karşılamaktadır [33].

Arabanian ve Massudi, C-bant süperfloresan fiber kaynağının (SFS) spektral düzlüğünü ve verimliliğini artırmak amacıyla, optimizasyonu yapılmış erbiyum katkılı fiber ve nanometre hassasiyetli ayarlanmış fiber Bragg ızgarayı birlikte kullanmıştır. Sayısal analizle, optimum EKF uzunluğu (11 m) ve tepe absorpsiyon katsayısı (6,4 dB/m) ile, FBG'nin bant genişliği (34 nm) ve merkez dalga boyu (1555 nm) optimum parametre olarak belirlenmiştir. Deneysel kurulumda, iki 976 nm lazer diyotuyla EKF iki farklı yönden pompalanmıştır. FBG hem yüksek yansıtıcı ayna hem de spektral düzleştirici filtre görevi görerek, ASE spektrumundaki C-banttaki 1530 nm civarındaki sivri pikleri bastırmış ve toplamda 22 nm'lik bir 3-dB bant genişliği ile spektral olarak düz bir çıkış üretmiştir. Farklı çift geçişli (double-pass) yapıların karşılaştırılması için DPF (double-pass forward), DPB (double-pass backward) ve DPF+DPB konfigürasyonları deneysel olarak test edilmiştir. Tüm konfigürasyonlarda çıkan ASE spektrumları büyük oranda benzerlik göstermiştir; bununla birlikte, DPB konfigürasyonu hem en yüksek verim (%26), hem de en iyi spektral düzlüğü (<0,73 dB) ve 22 nm bant genişliği sunmuştur. DPF konfigürasyonunda minimum spektral dalgalanma (0,6 dB) 40 mW pompa gücünde ve 8 mW çıkış gücünde elde edilirken, DPB'de bu değer 60 mW pompa gücünde ve 15,4 mW çıkış gücünde yakalanmıştır. FBG'li sistem, klasik çıkış noktasına filtre yerleştirilmesine göre daha düşük kayıp ve maliyetle, daha iyi spektral düzlük sağlamıştır. Böylece, DPB konfigürasyonu özellikle fiber optik jiroskop gibi

yüksek bant genişliği, güç ve spektral kararlılık gerektiren uygulamalar için en avantajlı yapı olarak öne çıkmıştır [34].

Wang ve arkadaşları, yüksek güçlü L-bant ASE kaynağı elde etmek amacıyla iki aşamalı, çift ileri pompalı (dual-forward pump) iki farklı konfigürasyon kuramsal olarak karşılaştırılmış ve deneysel olarak değerlendirilmiştir. Her iki yapı da iki adet EKF ve iki adet 1480 nm lazer diyottan oluşmaktadır ancak konfigürasyonlar arasında, çıkışta yer alan (a) uzun EKF ya da (b) kısa EKF'in rolü değişmektedir. Konfigürasyon (a)'da, uzun EKF doğrudan L-bant ASE üretirken, kısa EKF aşamasında iki yönlü pompa ile elde edilen C-bant ASE, uzun EKF'yi ikincil pompa olarak desteklemektedir. Konfigürasyon (b)'de, uzun EKF'de üretilen L-bant ASE, kısa EKF aşamasında güçlendirilerek çıkışa alınır. Simülasyon ve deneylerde her iki yapı için fiber uzunlukları ve pompa oranları optimize edilmiş; ~5 m kısa ve ~14 m uzun EKF ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Her iki konfigürasyon, yaklaşık 40 nm bant genişliğine ulaşırken, toplam pompa gücü artırıldıkça ortalama dalga boyunun kararlılığı yükselmiştir. Ancak, çıkış gücü ve pompa dönüşüm verimliliği bakımından, konfigürasyon (b) daha üstün bulunmuştur. Deneysel olarak, en iyi durumda 76 mW L-bant ASE çıkış gücü ve %36,2 pompa dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Bu sonuçlar, çift aşamalı ve kısa-uzun EKF optimizasyonlu tasarımın L-bantta yüksek güç ve verimli ASE kaynağı için uygun bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir [35].

Wang ve ekibi, C+L bant kapsamasına sahip, yüksek çıkış gücü ve eğim verimliliğiyle (slope effficiency) dikkat çeken iki aşamalı bir süperfloresan fiber kaynak (SFS) yapısı deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Kurulumda, ilk aşama 11 m orta katkılı ve 58 m düşük katkılı erbiyum katkılı fiberlerin ardışık olarak ileri pompalandığı, ağırlıklı olarak L-bant kazanç spektrumunu sağlayan bir yapıdan oluşmaktadır; ikinci aşama ise yalnızca C-bant kazancını üretmek için 10,8 m'lik düşük katkılı fiberin geri pompalanmasıyla elde edilmiştir. L-bant ASE, ilk aşamada 52,3 mW eşik ve %35,82 eğim verimliliğiyle elde edilmiş; izolatör üzerinden ikinci aşamaya aktarılmış, burada 5,1 mW eşikte ve %13,48 verimlilikle C-bant ASE elde edilmiştir. L-bant ve C-bant ASE'leri birleştirilerek çıkışta geniş bantlı (C+L-bandı bir arada) bir ASE kaynağı oluşturulmuştur. Optimize edilen fiber parametreleri ve her iki aşamadaki pompa gücü oranlarının ayarlanması sayesinde, herhangi bir kazanç düzleştirici filtre olmaksızın, 63,7 nm (1536-1600 nm) bant genişliğinde, 3 dB spektral dalgalanmasını aşmayan düz bir spektruma sahip, maksimum 33 mW çıkış gücüyle ve yüksek kararlılıkla çalışan bir kaynak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, geri beslemeli C-bant

ASE enjeksiyonunun L-bant çıkışını ve genel spektral düzlüğü artırdığını göstermektedir. Bu yöntem ile YDBÇ cihaz karakterizasyonu ve spektrum dilimlemeli sistemlerde kullanılabilecek, düşük spektral dalgalanmalı, geniş bant ve kararlı bir ASE kaynağı sağlanmıştır [36].

Tian ve arkadaşları, düz ve geniş bantlı bir erbiyum katkılı fiber ASE kaynağı, simetrik doğrusal olmayan optik döngü ayna (NOLM) tabanlı spektral düzleştirme yöntemiyle geliştirilmiştir. Yöntemde, 15 m uzunluğunda yüksek katkılı EKF ve 100 mW'lık tek yönlü 1480 nm pompa kaynağı kullanılmıştır. Pompa gücüyle üretilen ASE'nin bir kısmı doğrudan alınırken, %90'ı NOLM devresine yönlendirilmiştir. NOLM'un güç bağımlı kayıp (intensity-dependent loss, IDL) karakteristiği sayesinde, yüksek güçlü spektral bileşenler daha fazla zayıflatılarak ASE spektrumu düzleştirilmiş ve bant genişliği artırılmıştır. Deneysel olarak, NOLM ile 3 dB bant genişliği 14,8 nm'den 53 nm'ye yükselmiş, spektral dalgalanma 0,9 dB seviyesine kadar indirgenmiştir. Ayrıca, pompa gücü ve fiber uzunluğu değiştiğinde de NOLM, spektrumun düzleştirme ve genişletme etkisini etkin şekilde sürdürmüştür. Çalışma, bu mimarinin pompa gücü ve fiber parametrelerinde geniş bir aralıkta uygulanabilir ve pratik düz spektrumlu ASE kaynağına olanak tanıdığını göstermiştir [37].

Lin ve Chang, geniş spektrumlu ve yüksek güçlü bir C+L-bant ASE kaynağı oluşturmak için çift geçişli ve çift yönlü pompalama konfigürasyonu sunmuşlardır. Tasarımda, 16 m (EDF1) ve 3 m (EDF2) olmak üzere iki farklı uzunlukta erbiyum katkılı fiber, bir optik sirkülatörün her iki ucunda yerleştirilmiş; 1480 nm (42 mW) ile ileri yönde (EDF1'e), çift 980 nm pompa diyotlarıyla (her biri 250 mW) çift yönlü (EDF2'ye) pompalama yapılmıştır. Sisteme iki adet 3 dB optik kuplör dâhil edilerek, ASE geri beslemesi sağlanmış ve harici spektral düzleştirici filtreye gerek kalmadan, spektrumun dalgalanması bastırılmıştır. Optik sirkülatör, yalnızca tek yönlü ASE akışına izin vererek, istenmeyen lazer rezanatör etkisinin önüne geçmiş ve güç kararlılığına katkıda bulunmuştur. Uygulanan yöntem sayesinde, 81 nm genişlikte (1525-1606 nm) ve 177,8 mW çıkış gücüne sahip, spektral dalgalanması 5 dB ile sınırlı bir ASE kaynağı elde edilmiştir. Ayrıca güç kararlılığı ±0,013 dB (8 saat, 20–30°C arası) olarak ölçülmüş ve pompalama verimliliği %32,8'e ulaşmıştır. Sonuçlar, tasarımın hem harici düzleştirici gereksinimini ortadan kaldırdığını hem de optik iletişimde (DWDM, spektrum dilimleme vb.) yüksek güç, geniş bant ve yüksek kararlılık gerektiren uygulamalar için uygun olduğunu göstermiştir [38].

Tsai ve ekibi, yüksek güç ve düz spektrum elde etmek amacıyla iki aşamalı, çift ileri pompalamalı (dual forward-pumping) L-bant erbiyum katkılı fiber ASE kaynağı tasarlanmış ve deneysel olarak optimize edilmiştir. Deneysel düzenekte, ilk aşama için 80 m uzunluğunda (EDF1), ikinci aşama için 13 m uzunluğunda (EDF2) olmak üzere iki erbiyum katkılı fiber segmenti, üç adet 1480 nm DBÇ kuplör ve iki adet 1480 nm pompa diyotuyla beslenmiştir. Sistem sonunda çıkıştaki geri yansımaları bastırmak için optik izolatör ve değişken optik zayıflatıcı kullanılmış ve bir uçta ise fiber yansıtıcı yer alarak geri yansıtmalı lazer ile ışıma etkisi kontrol altına alınmıştır. Pompa güçlerinin (P1 ve P2) oranları, fiber uzunlukları ve ayna yansıtıcılığı parametreleri sistematik olarak değiştirilmiş, optimum koşullar belirlenmiştir. Bulgular, en iyi performansın P_1=60 mW ve P_2=140 mW olmak üzere toplam 200 mW pompa gücünde, ayna yansıtıcılığının %30 seçilmesiyle elde edildiğini göstermiştir. Bu koşullarda 72,2 mW çıkış gücü, %36,1 pompa dönüşüm verimliliği, 40,8 nm spektral bant genişliği ve 0,7 dB spektral dalgalanma elde edilmiştir. Tek pompalı klasik yapılara göre pompalama verimliliğinde ciddi artış sağlanmış, harici spektral düzleştirici filtreye gerek kalmadan yüksek güçlü, düz kazançlı ve geniş bantlı L-bant ASE kaynağı üretildiği gösterilmiştir. Bu konfigürasyon, uygulamalarda yüksek güç ve spektral düzlük gerektiren optik sistemler için avantaj sunmaktadır [39].

Yücel ve Yiğit, farklı ticari fiber tipleri (I6, I25, M5, M12) ile iki aşamalı ve üç geçişli bir erbiyum katkılı fiber yükselteç (EKFY) tasarlamış, giriş sinyal dalga boyu ve gücü, fiber uzunlukları ve pompa lazeri güçleri sekiz aşamalı bir optimizasyon protokolüyle sistematik olarak optimize etmişlerdir. Tasarımda, ilk fiberden ilk ve tek geçiş, ikinci fiberden ise yansıtıcı kullanımıyla iki kez toplam üç geçiş sağlanmıştır. Optimizasyonlar OptiSystem yazılımı ile simülasyon ortamında yapılmıştır. Sonuçlara göre, M5 için 1555 nm, diğer fiberler için ise 1560 nm giriş dalga boyunda; 1480 nm pompa lazeriyle I6, I25, M5 ve M12 lifleri için sırasıyla 54,9, 54,3, 53,3 ve 54,7 dB maksimum kazanç, 3,7, 3,8, 3,9 ve 3,3 dB minimum gürültü faktörü elde edilmiştir. Optimizasyon sonrası, kısa fiber uzunlukları ile yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü sağlanmış, maliyet-etkin ve yüksek performanslı bir EKFY tasarımının mümkün olduğu gösterilmiştir [40].

Nafchi ve arkadaşları çalışmasında, bir ASE kaynağının kazanç düzleştirmesi için iki ardışık çok uzun periyotlu fiber Bragg ızgara (ultra-long period fiber grating-ULPFG) geliştirmişledir. Yöntemde, birincisi klasik (25 segment, 39 mm uzunluk), ikincisi ise bir uçtan diğer ucu bastırarak yazılan, daha kalın (‘fat’) segmentlere sahip LPG olarak SMF-28

fiber üzerine yaygın ve ekonomik bir ark deşarj tekniğiyle üretilmiştir. Deneyde, 3 m EKF ve 100 mW tek geçişli geri pompalama ile ASE elde edilmiş, önceki tek LPG uygulamasında dalgalanma 6,3 dB'ye inerken, ikinci aşamada eklenen 5 segmentli fat LPG ile 3,4±1,7 dB'ye kadar düşürülmüştür. Optimum durumda, 1524-1565 nm aralığında ve 41 nm bant genişliğinde, kompakt ve uygulanabilir bir kazanç düzleştirme sağlanmıştır. Bu teknik, klasik yöntemlere kıyasla düşük maliyetli, kısa fiberli ve basit ekipmanlı olmaya ek olarak, yüksek düzlemsel spektral performans sunmuştur [2].

Huang ve ekibi çalışmasında, tek aşamalı ve sözde kısa uzunluklu (37 m) bir EKF'de, ileri yönde 1480 nm lazer diyotu (LD) ve geri yönde 980 nm lazer diyotu kullanılarak geniş bant aralığına (80 nm) ve düşük spektral dalgalanmaya sahip bir ASE kaynağı üretimi deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel kurulumda, %90 yansıtıcılı geniş bant reflektör ile geri saçılan ASE'nin çoğu fiber içine yeniden yönlendirilmiş, böylece hem kısa fiber uzunluğu hem de düşük pompa gücüyle geniş bantlı ve güçlü ASE üretimi mümkün olmuştur. 1480 nm pompa LD ve 980 nm pompa LD sırasıyla 16,7 mW ve 79 mW olarak çalıştırılmış, toplam 95,7 mW pompa gücü ile 13,5 dBm çıkış gücü elde edilmiştir. Çalışmada, 1480 nm lazer diyotun gücü değiştirilerek ASE spektrumunun genişliği ve düzlüğü optimize edilebilmiştir. Sonuçlar, uygun pompa gücü ve reflektör kullanımı ile C-bant ve L-bant kapsayan, 80 nm düz ve düşük dalgalanmalı ASE kaynağı üretilebildiğini gösteriyor. Diğer çalışmalardan farklı olarak, bu sonuç sadece bir fiber ve pompa konfigürasyonuyla, iki aşamalı veya harici düzleştirici filtreye gerek kalmadan elde edilmiştir. Sonuç olarak tek aşama, kısa fiber ve düşük güç gereksinimiyle yüksek bant genişliği ve düşük spektral dalgalanma başarıyla sağlanmıştır ve yapı, pratik uygulamalar için maliyet-etkin ve kompakt bir çözüm sunmaktadır [41].

Cadier ve ekibi çalışmasında, radyasyon ortamında uzun süreli kararlılığa sahip ASE kaynağı ve fiber optik jiroskop (fiber optic gyroscope-FOG) uygulamaları için yeni nesil radyasyona dayanıklı erbiyum katkılı fiberlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Metodoloji olarak, farklı erbiyum ve alüminyum konsantrasyonlarına sahip fiber örnekleri tasarlanmış; çekirdek yapısı, kesim dalga boyu ve çeşitli katkı bileşenleri sistematik olarak değiştirilmiştir. Fiberlere radyasyon etkisi altında (60Co kaynağıyla, 310 Rad/h hızda, toplam 100 kRad'a kadar) ve termal çevrim testi uygulanmıştır. ASE kaynaklarında en iyi kararlılık çift geçişli pompalama mimarisiyle elde edilmiş, tüm fiber örneklerinde ASE optik gücü ve spektrumu radyasyon öncesi, sırasında ve sonrasında, ayrıca sıcaklık çevrimlerinde

ölçülmüştür. Özellikle “#B” numaralı fiber, klasik FOG referans fiberine kıyasla iki kat daha yüksek radyasyon direnci göstermiş; 100 kRad sonunda çıkış gücündeki kayıp sadece 2 dB ile sınırlanmıştır. Ek olarak, maksimum çıkış gücü (40 mW), sıcaklık çevrimleri sırasında ve radyasyon sonrasında düşük spektral ve güç kaymasıyla korunmuş, referans fiberde ise bu değer 25 mW ile sınırlı kalmıştır. Sonuçlar, optimize edilen bu yeni fiberin, uzay ve radyasyon ortamlarında uzun ömür, düşük gürültü ve kararlı ASE kaynağı gerektiren FOG uygulamalarında mevcut teknolojilere göre üstün performans sunduğunu, FOG deneylerinde de ataletsel performansın referans sistemlerle benzer kaldığını göstermektedir [42].

Silva, Rodrigues ve Sakamoto, çift geçişli erbiyum katkılı fiber ASE kaynağının spektral kararlılığını pompa gücündeki ve ortam sıcaklığındaki değişimlerin etkisi incelenerek değerlendirmiştir. Deneysel düzenekte, 980 nm pompalama ile 20 metre uzunluğunda EKF kullanılmış ve fiberin çıkış ucu %4 yansıtıcı özelliğe sahip bir ayna ile kaplanmıştır. Pompa gücü 10-130 mW aralığında değiştirilmiş, ortam sıcaklığı ise 15°C ile 35°C arasında kontrol edilmiştir. Spektral ölçümler, çıkış gücü, ortalama dalga boyu ve spektrumun kayma miktarı yönünden yapılmıştır. Sonuçlar, artan pompa gücü ile çıkış spektrumunda 1 nm’ye kadar küçük bir kayma gözlendiğini, ortam sıcaklığındaki değişimlerde ise spektral pozisyonun ve çıkış gücünün 0,5 dB’den az değiştiğini göstermiştir. Özellikle sıcaklık artışının, spektral pozisyonda 0,15 nm’den daha az bir kaymaya yol açtığı ve çıkış gücü üzerinde minimal etkiler yarattığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, çift geçişli yapıdaki ASE kaynaklarının güç ve spektral kararlılık açısından yüksek performans sunduğunu, ortam koşullarına karşı oldukça dirençli ve güvenilir bir ışık kaynağı olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur [3].

Yue ve arkadaşları, C+L bant (1525-1602 nm) kapsayan, düşük spektral dalgalanmalı ve yüksek güçlü bir ASE fiber kaynağının spektral düzleştirilmesi için uzun periyotlu fiber ızgarası (LPFG) kullanmıştır. Yöntemde, çift aşamalı, çift geçişli bir erbiyum katkılı fiber yapı kurulmuş olup ilk aşama 12 m, ikinci aşama ise 10 m uzunluğunda yüksek katkılı fiberden oluşmaktadır. İkinci aşama ikiye bölünerek, LPFG farklı pozisyonlara yerleştirilmiş ve spektral düzlüğe etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Deneyler göstermiştir ki, LPFG çıkış ucuna konduğunda 1530 nm civarında aşırı güç kaybı oluşmakta, LPFG ikinci aşamada ise ara bir pozisyona yerleştirildiğinde (8 m ve 1,5 m fiber segmenti arasında) spektral denge optimize edilmektedir. Sonuç olarak, optimum yerleşim ve pompa gücü koşullarında, 77 nm bant genişliğinde (1525,5-1602,5 nm), ±1,6 dB spektral dalgalanmaya ve 42 mW çıkış

gücüne sahip bir ASE kaynağı elde edilmiştir. Araştırma, LPFG'nin doğru segmentte ve uygun fiber uzunluğunda konumlandırılmasının, harici düzleştirici ihtiyacı olmadan spektral düzleşme sağladığını ayrıca sistem parametrelerinin (fiber uzunluğu, pompa oranı, LPFG yerleşimi) optimize edilmesiyle yüksek güçlü ve geniş bantlı düz spektrumlu ASE kaynaklarının üretilebileceğini göstermiştir [43].

Durak ve Altuncu, L-bant erbiyum katkılı fiber yükselteçlerde (L-EKFY), 1533 nm merkezli fiber Bragg ızgaraları aracılığıyla ASE'nin ileri ve/veya geri yönde yeniden enjekte edilmesinin kazanç ve gürültü katsayısı (NF) üzerindeki etkileri deneysel olarak incelemiştir. Deneysel düzenekte, 20 m EKF iki yönden 974/976 nm ile pompalanmış, FBG1 ve FBG2 ile 1533 nm'de ileri ve geri yönlü ASE yeniden enjekte edilmiştir. Sonuçlarda, her iki FBG ile hem ileri hem geri ASE enjeksiyonu uygulandığında, kazançta 4,5 dB artış ve NF'de 1 dB azalma sağlanmıştır (1585 nm'de, -30 dBm giriş sinyal gücünde). FBG'ler olmadan yapılan konvansiyonel L-EKFY tasarımı ile karşılaştırıldığında, en yüksek kazanç ve en düşük NF performansının ancak FBG1+FBG2 konfigürasyonunda elde edildiği belirlenmiştir. Bu yöntemin, L-bant EKFY'lerde kazanç ve gürültü iyileştirmesi için etkin olduğu gösterilmiştir [44].

Jazi ve arkadaşları, C ve L bantlarında düz, kararlı ve yüksek güçlü çıkış sağlayan bir süperfloresan fiber kaynağı (SFS) tasarımı için tek geçişli ileri (SPF), tek geçişli geri yönlü (SPB), çift geçişli ileri yönlü (DPF), çift geçişli geri yönlü (DPB), ayrıca SPF+SPB ve DPF+DPB gibi konfigürasyonları karşılaştırmışlardır. Deneysel düzenekte, 20 m'lik EKF, iki 980 nm pompa diyotu ve ayna kullanarak çift geçişli yapı ile farklı SFS topolojileri oluşturulmuş, çıkış spektrumu ve güçteki değişimler kaydedilmiştir. Tek geçişli ileri konfigürasyonu L-bantta düz geniş bant verirken çıkış gücü düşüktür; Tek geçişli geri yönlü, C-bantta daha yüksek güç üretir, ancak spektrumu dardır. En uygun sonuç, DPF+DPB ile elde edilmiştir. Hem C hem de L-bantta 1525-1605 nm aralığında, toplamda 32 mW güç ve düz bir spektrum (dalgalanma 3 dB'den düşük) elde edilmiştir. 3 dB kuplörün reflektör olarak kullanılması, geniş bant ve kararlı çıkışta klasik çözümlere kıyasla iyi performans sağlamıştır [45].

Wang ve Clarkson, ayarlanabilir (tunable) dar hat genişlikli bir Yb-katkılı fiber ASE kaynağı geliştirmiştir. Sistem, çekirdek çapı 20 μm ve iç kaplama çapı 400 μm olan standart çift kaplamalı Yb-katkılı bir fiberden oluşmaktadır. Optik geribeslemeyi baskılamak için fiber

uçları yaklaşık 10° açıyla polisajlanmıştır. Pompalama, 915 nm dalga boyunda fiberle kuplajlı bir diyot lazer ile 5,5 m uzunluğundaki fiberin bir ucundan yapılmış, pompa emilim verimi %60 olarak ölçülmüştür. ASE çıkışı, artık pompayı bloklayan dikroik ayna ile elde edilmiştir. Dalga boyu ayarı, harici bir geribildirim kavitesine yerleştirilen 65% yansıtıcılı dielektrik ayna ve 600 çizgi/mm'lik yontulmuş hacimsel ağ (blazed bulk grating) içeren bir spektrometre ile sağlanmıştır ve ayna açısı değiştirilerek ASE çıkışının merkez dalga boyu 1034 nm'den 1084 nm'ye ayarlanabilmiştir. Deneylerde, 3 W emilen pompa gücüyle 1040 nm'de 135 mW dar (FWHM <0,5 nm) ASE çıkışı elde edilmiştir. Spektral ayarlama sonucunda sinyalin arka plan ASE'ye göre tipik olarak 12 dB ve üzeri şiddette daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Performans, düşük geri yansımalı fiber uç kullanımı ve ilave yükselteç aşamalarının eklenmesiyle çok daha yüksek çıkış güçlerine ölçeklenebilecektir. Sonuçlar, darbantlı ve spektral olarak ayarlanabilir Yb-katkılı fiber ASE kaynaklarının, lazer osilatörlerinde görülen relaksasyon salınımı ve kendiliğinden atım yerine son derece kararlı, mod serbest (longitudinal mod içermeyen) ve güvenilir bir çıkış sağladığını göstermektedir [46].

Wang ve ekibi makalesinde, yüksek verimde, geniş bantlı ve düz bir L-bant süperfloresan fiber kaynağı (SFS) geliştirmek amacıyla ardışık çift aşamalı geri yönlü pompalama (cascaded dual-backward-pumped) konfigürasyonu sunmuşlardır. Tasarımda, iki adet konvansiyonel yüksek katkılı erbiyum fiberi (EDF1 ve EDF2), iki adet 1480 nm pompa diyotu ve fiber döngü ayna (çift geçişli yapı için) kullanılmıştır. Sistem parametreleri OASIX simülasyon yazılımı ile optimize edilmiş olup lif uzunluğu, pompa oranları ve fiber kademeleri arasındaki dağılımlar hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Yöntemde öncelikle lif uzunluk oranı (RL) ve pompa oranı (Rp) optimize edilmiş, en geniş spektral bant genişliği ve en yüksek verim için yaklaşık 20 m toplam fiber uzunluğu seçilmiştir. Simülasyon ve deneyler, RL < 0,25 ve Rp ≈ 0,875 olduğunda, 52,6 nm spektral bant genişliği, 132,8 mW çıkış gücü, %50,1 pompa verimi ve 1578,2 nm ortalama dalga boyuyla ultra-verimli, düşük dalgalanmalı ve geniş bantlı L-bant SFS elde edilebildiğini göstermiştir. Ayrıca, bu yapı ile rezonanslı lazer ışıması riski olmaksızın yüksek pompa gücünde kararlı çalışma sağlanmıştır. Sonuçlar, dış spektral düzleştirici filtre gerektirmeden, L-bant YDBÇ karakterizasyonu ve spektral dilimlemeli sistemler için ideal, düz ve yüksek güçlü bir ASE kaynağı geliştirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir [47].

Chen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, tulyum katkılı florür fiberler (TDF) ile geniş ayarlanabilirliğe sahip S-bant fiber-halka lazerleri ve geniş bant ASE kaynakları geliştirilmiştir. İki farklı çift dalga boylu pompa konfigürasyonu (1550+1050 nm ve 1550+1400 nm) kullanılarak, sırasıyla 94 nm (1418-1512 nm) ve 85 nm (1430-1515 nm) sürekli ayarlama aralığına sahip, 400 MHz çizgi genişlikli ve 60 dB sinyal/kaynak gürültü oranı (SNR) sunan fiber halkalı lazerler elde edilmiştir. Lazerler, 1 mW civarında düşük çıkış gücünde çalışmış ve yüksek güçte güç kararlılığı ve dar çizgi genişliği özellikleri korunmuştur. Ayrıca, TDF ve EKF'nin hibrit kullanımıyla, 1465-1535 nm arasında >15 dBm/nm güç yoğunluğuna sahip, güçlü ve düzgün spektrumlu geniş bant ASE kaynağı tasarlanmıştır. Sonuçlar, tulyum katkılı fiber yükselteçlerin (TKFY) konfigürasyon ve pompalama tipiyle spektrumun optimize edilebileceğini ve bu yapıların optik test, sensör ve haberleşme uygulamalarında yüksek performans için uygun olduğunu göstermiştir [48].

Yiğit ve Yücel çalışmasında, ticari olarak temin edilen dört farklı fiber tipi (I6, I25, M5, M12) kullanılarak üç aşamalı altı geçişli (three-stage six-pass) EKFY önyükselteç tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Her çift geçişli blok, bir EKF, bir kuplör, bir sirkülatör ve bir yansıtıcıdan oluşmakta olup bu blok üç kez ardışık şekilde uygulanarak toplamda sinyal altı kez amplifiye edilmektedir. Tasarımda EKF uzunlukları ve pompa güçleri OptiSystem yazılımı ile optimize edilmiş, -50 dBm giriş gücü ve 1532 nm merkez dalga boyunda, üçlü 200 mW pompa ile 57,36-59,23 dB kazanç ve 3,11-3,86 dB gürültü katsayısı elde edilmiştir. Kazanç artışlarının ilk dört geçişte belirgin olduğu, toplam fiber uzunluklarının kısa tutulmasının maliyet ve verimlilik açısından avantaj sağladığı gösterilmiştir. Sonuçlar, bu özgün altı geçişli EKFY yapısının yüksek kazanç, düşük gürültü ve ekonomik tasarım avantajı sunduğunu ortaya koymuştur [49].

Wang ve ekibi, 50 m uzunluğunda 320 ppm Er^{3+} katkılı aluminosilikat fiber üzerine kurulu, 980 nm ile pompalı bir ASE kaynak sistemi tasarlanmıştır. Sistemde, 1×2 optik anahtar ve sirkülatör sayesinde geri ASE'nin (backward ASE) fiberde tekrar dolaşıma sokulup sokulmamasına göre bant seçimi yapılmaktadır. Anahtar portu 1'de (geri beslemesiz), çıkışta C-bant ASE (1515,4-1601,0 nm, 85,6 nm bant genişliği) elde edilirken, port 2'de (geri beslemeli), geri ASE sirkülatörle yeniden fiber içine yönlendirilerek L-bant ağırlıklı çıkış (1545,2-1612,5 nm, 67,3 nm bant genişliği) elde edilmiştir. L-bant çıkışında ortalama güç yoğunluğunda (1565-1605 nm) 18,9 dB, toplam spektral güçte ise 0,3 dB iyileşme gözlemlenmiştir. Sonuçlar, optik anahtar ve sirkülatör ile tek kaynaktan hızlı, seçimli bant

geçişinin, özellikle YDBÇ cihaz karakterizasyonu ve metro şebeke uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir [50].

Yücel ve Göktaş, EKFY'lerin kazanç ve çıkış gücüne, pompalama dalga boyu (980 nm ve 1480 nm) ile pompalama yönünün (ileri, geri ve iki yönlü) etkisi deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir. Temel oran denklemleri kullanılarak yapılan simülasyonlarda aynı fiberde farklı pompalama koşulları değerlendirilmiştir. Bulgular, 1480 nm dalga boyunda ileri pompalama ile en yüksek çıkış sinyal gücü ve kazancın elde edildiğini, 980 nm pompalamanın ise daha düşük ASE seviyesi sağladığını göstermiştir. İki yönlü pompalama, diğer konfigürasyonlara göre ASE gürültüsünü asgari seviyeye indirirken, çıkış sinyal gücü ileri pompalamaya kıyasla daha düşüktür. Sonuç olarak, uzun mesafeli sistemlerde 1480 nm ileri pompalama yüksek kazanç için tercih edilirken, kısa mesafede 980 nm ve iki yönlü pompalama düşük ASE ve gürültü açısından avantajlıdır ve iki yönlü pompalamanın ise maliyet artışına yol açacağı belirtilmiştir [51].

Literatürdeki çalışmalar, yüksek güçlü ve spektral olarak düz ASE kaynaklarının geliştirilmesinin, temel olarak pompalama konfigürasyonları ve fiber mimarilerinin optimizasyonuna dayandığını göstermektedir. Özellikle, çift yönlü ve çift ileri yönlü pompalama şemalarının, geleneksel tek yönlü sistemlere kıyasla hem çıkış gücünü hem de pompalama verimliliğini belirgin şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, çift geçişli ve çok aşamalı tasarımların, C+L bandını kapsayan daha geniş ve düz spektrumlar elde etmede kritik rol oynadığı görülmüştür. Bu ileri düzey konfigürasyonlar, fiber uzunluğu ve pompa gücü gibi parametrelerin dikkatli optimizasyonuyla birleştiğinde, 80 nm'ye varan bant genişlikleri ve yüksek pompa dönüşüm verimlilikleri sağlamaktadır. İncelenen bu temel yaklaşımların yanı sıra, spektral kararlılığı artıran, gürültü değerini düşüren ve yeni nesil aktif ortamlardan faydalanan çok sayıda ek kaynak da bu tezin teorik altyapısını şekillendirmek üzere değerlendirilmiştir [4, 7, 52–91].

3. METODOLOJİ VE YÖNTEM

ASE optik mühendisliği ve fotonikte geniş bantlı, kararlı ve yüksek güçlü ışık kaynakları olarak büyük önem taşımaktadır. Lazerlerden farklı olarak, ASE kaynakları koherens özellik göstermezler, bu da onları optik fiber iletişim sistemlerinde gürültü kaynağı olarak kullanılmalarının yanı sıra, özellikle optik koherens tomografi (OCT) gibi biyomedikal görüntüleme uygulamalarında ve optik sensörlerde ideal bir araç haline getirir. Geniş spektral bant genişliği, yüksek güç çıkışı ve düşük koherens özellikleri, bu kaynakları çeşitli bilimsel ve endüstriyel alanlarda vazgeçilmez kılmaktadır. Özellikle optik haberleşmede, DBÇ sistemlerinde daha fazla kanal kapasitesi sağlaması ve spektral dilimleme ile çoklu dalga boyu üretimi gibi uygulamalar için temel bir bileşen olması, ASE'nin önemini artırmaktadır.

3.1. ASE Üretim Teknikleri

ASE üretim teknikleri, kullanılan ortama ve mekanizmaya göre çeşitlilik gösterir. En yaygın yaklaşımlardan biri, nadir toprak elementleri (örneğin Er, Yb, Tm) katkılı optik fiberlerin kullanıldığı fiber tabanlı ASE kaynaklarıdır. Bu fiberler, pompalama ışığı ile uyarılır ve kendiliğinden emisyon yoluyla geniş bantlı ASE spektrumları üretir. Özellikle Erbiyum katkılı fiber yükselteçler (EKFY'ler), optik iletişimde uzun mesafeli sinyal iletimi için standart bir çözüm olmuştur. Fiber tabanlı sistemlerin avantajları arasında yüksek güç çıkışı, iyi ışın kalitesi ve uzun ömür yer alırken, dezavantajları ise boyut ve pompalama gereksinimleridir.

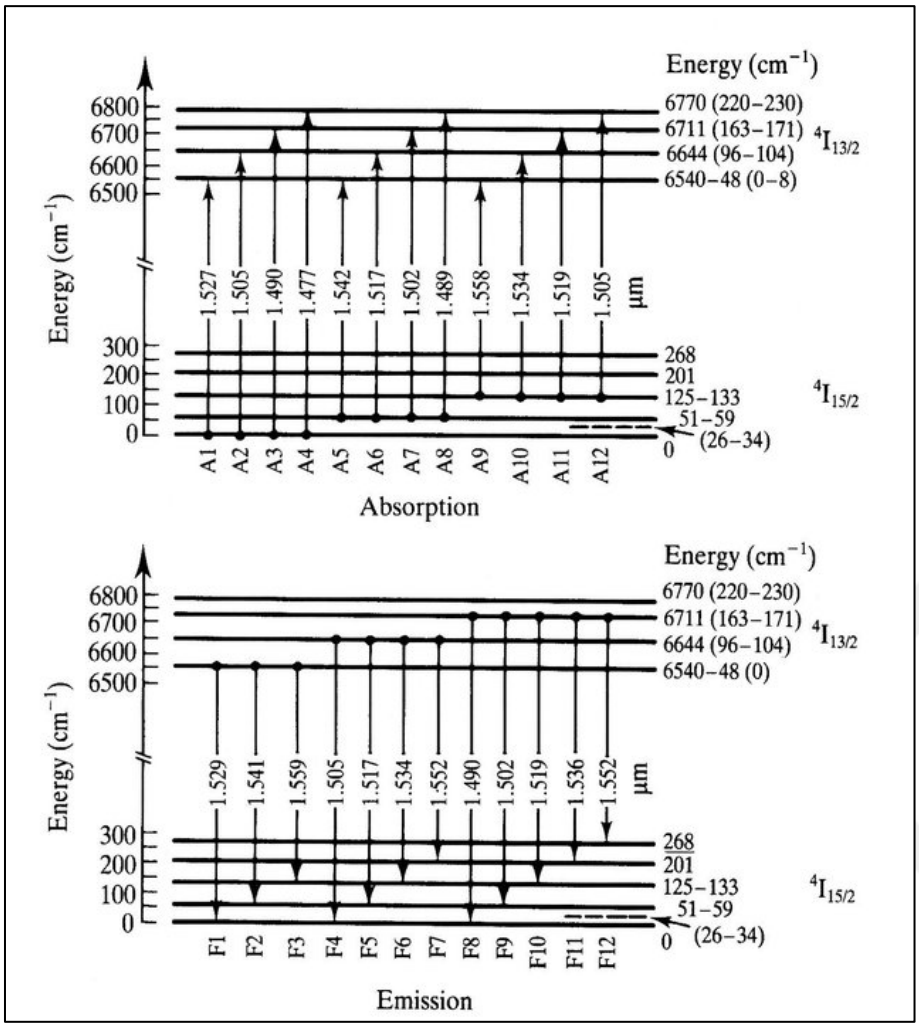
Bir diğer önemli teknik ise, yarı iletken optik yükselteçler (SOA) ile ASE üretimidir. SOA'lar, kompakt boyutları, elektrikle pompalama kolaylığı ve geniş kazanç bant genişliği sunmaları nedeniyle özellikle entegre fotonik uygulamalar için cazip hale gelmiştir. Ancak, SOA tabanlı ASE kaynakları genellikle fiber tabanlı sistemlere kıyasla daha düşük güç çıkışına ve daha fazla gürültüye sahip olabilir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, hibrit yapıların ve farklı pompalama konfigürasyonlarının kullanılmasıyla bu kaynakların performansını artırmaya odaklanmıştır. Örneğin, kuantum noktaları içeren SOA'lar, daha geniş bant genişliği ve daha yüksek güç yoğunluğu potansiyeli sunmaktadır. Ayrıca, Raman fiber yükselteçlerde, geniş ve esnek bant genişliği sağlamaları nedeniyle ASE üretimi için aktif olarak araştırılan bir diğer alandır.

Bu alanda yapılan güncel araştırmalar, farklı pompalama teknikleri ve hibrit optik konfigürasyonların kullanımına odaklanmıştır. Örneğin, çift yönlü pompalama veya çoklu pompalama dalga boylarının kullanımı, ASE spektrumunun düzlüğünü ve çıkış gücünü artırabilir. Ayrıca, fotonik kristal fiberler gibi yeni nesil fiber yapıları da ASE özelliklerini geliştirmek için araştırılmaktadır.

Kuantum noktası (quantum dot) tabanlı yarı iletken optik yükselteçler (QD-SOA), geleneksel SOA'lara kıyasla daha geniş spektral bant genişliği ve daha yüksek doygunluk gücü sunma potansiyeline sahiptir. Bu özellikler, onları özellikle geniş bantlı ASE kaynakları için cazip hale getirmektedir. Bu alandaki çalışmalar, QD-SOA'ların performansını optimize etmeye ve entegre fotonik uygulamalara yönelik potansiyelini keşfetmeye odaklanmıştır.

3.2. Teorik Analiz

Bu tez çalışmasında tasarlanan yüksek güçlü, düz kazançlı ve geniş bantlı ASE ışık kaynağının teorik altyapısı, nadir toprak elementlerinden olan Erbiyum (Er^{3+}) iyonlarının, amorf silika cam (a-SiO_2) matrisi içindeki karmaşık spektroskopik davranışlarına ve enerji seviyesi dinamiklerine dayanmaktadır. ASE sürecinin anlaşılması, Er^{3+} iyonlarının temel kuantum mekaniksel özelliklerinin incelenmesiyle başlar. Er^{3+} iyonları, optik telekomünikasyon sistemlerinin kritik önem taşıyan C-bandı ve L-bandı pencereleriyle mükemmel bir uyum sergileyen dalga boylarında emisyon yapabilme kapasitesine sahip, temel olarak üç enerji seviyeli bir sistem olarak modellenebilir. Bu seviyeler; temel hal (ground state, $^4I_{15/2}$), yarı-kararlı veya metastabil hal (metastable state, $^4I_{13/2}$), ve pompa seviyesi (pump level, $^4I_{11/2}$) olarak tanımlanır. Şekil 3.1'de görünen bu enerji seviyeleri, aslında tek bir enerji değerine sahip olmayıp, Stark etkisi olarak bilinen bir fenomen nedeniyle her biri birden çok alt enerji seviyesine ayrılmıştır.



Şekil 3.1. Stark etkisi ile oluşan farklı dalgaboylarında oluşan ışımalar [92]

Bu bölünme, Er^{3+} iyonunu çevreleyen silika cam matrisinin düzensiz yapısından kaynaklanan yerel elektrik alanlarının iyonun enerji seviyeleri üzerindeki pertürbatif etkisinden ileri gelir. Sonuç olarak ortaya çıkan genişlemiş enerji bantları, Erbiyum katkılı fiberlerin (EKF) neden tek bir dalga boyunda değil, geniş bir spektral bantta kazanç sağlayabildiğinin temel nedenidir.

Pertürbatif etki açılanacak olursa; ideal veya teorik bir sistemin, dışarıdan gelen küçük ama önemli bir etki veya "rahatsızlık" (perturbation) nedeniyle davranışının nasıl değiştiğidir. Kuantum mekaniği ve spektroskopi bağlamında bu, bir atomun veya iyonun enerji seviyelerinin, çevresel faktörler yüzünden ideal durumlarından sapması anlamına gelir.

Erbiyum Katkılı Fiber (EKF) özelinde ise "pertürbatif etki" şu anlama gelir: Eğer bir Erbiyum (Er^{3+}) iyonunu tamamen boşlukta, tek başına hayal edilseydi, enerji seviyeleri

($^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$) son derece keskin ve net tanımlanmış tekil enerji değerlerine sahip olurdu. Bu durumda, bir seviyeden diğerine geçiş sadece tek bir, belirli bir dalga boyunda ışık salınımıyla sonuçlanırdı. Ancak, EKF içinde Er^{3+} iyonları tek başına değildir. Amorf, yani kristal olmayan, düzensiz bir silika cam (SiO_2) yapısının içine "hapsedilmiş" durumdadırlar. Bu silika matrisinin yapısı, atomların rastgele dizildiği donmuş bir sıvıya benzer. Her bir Er^{3+} iyonu, etrafındaki Silisyum (Si) ve Oksijen (O) atomlarının farklı konfigürasyonları ve mesafeleriyle çevrilidir. Bu atomların yarattığı yerel elektrik alan, her bir Er^{3+} iyonu için benzersizdir ve mükemmel simetriden yoksundur. İşte bu düzensiz ve asimetrik yerel elektrik alan, ideal Er^{3+} iyonu üzerinde bir "pertürbatif etki" yaratır. Bu pertürbatif etki, Stark Etkisi olarak bilinen fiziksel bir olguyu tetikler. Stark Etkisi, bir atomun veya iyonun enerji seviyelerinin, harici bir elektrik alanın varlığında birden çok, birbirine çok yakın alt enerji seviyesine (manifold) bölünmesidir.

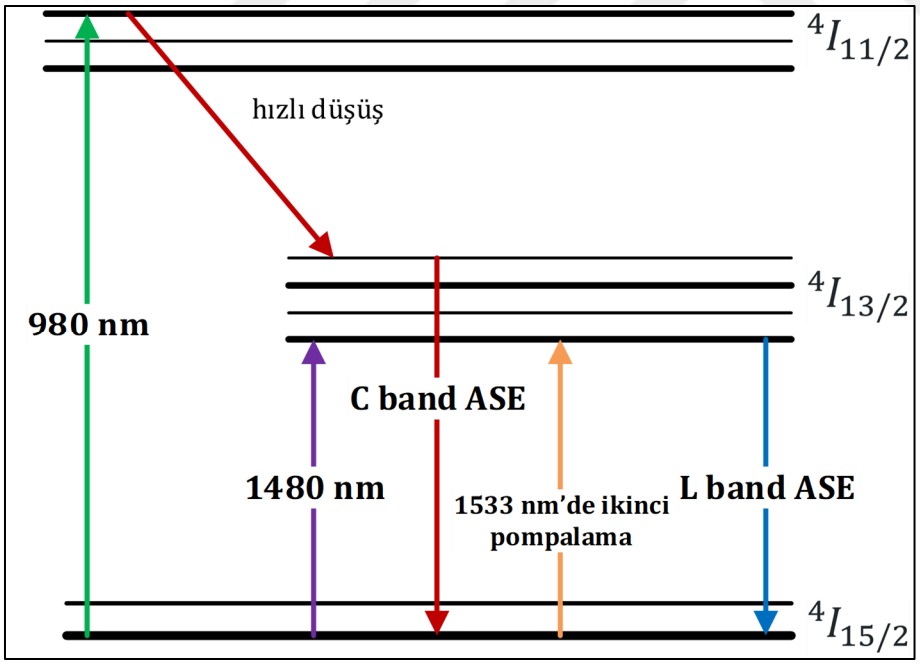
Özetle Pertürbatif Etki: Silika camın düzensiz yapısının her bir Erbiyum iyonu etrafında yarattığı benzersiz ve asimetrik yerel elektrik alandır. İdealde tek bir çizgi olması gereken enerji seviyeleri, bir "bant" veya "manifold" şeklinde onlarca alt seviyeye ayrılır. Bu durum, ASE üretimi için hayati öneme sahiptir. Çünkü enerji seviyeleri artık tek bir değer değil, bir banttır. Bu sayede $^4I_{13/2}$ (yarı-kararlı hal) ve $^4I_{15/2}$ (temel hal) seviyeleri arasındaki geçişler, tek bir dalga boyunda değil, geniş bir dalga boyu aralığında (örneğin, 1530 nm'den 1625 nm'ye kadar) gerçekleşebilir.

Sonuç olarak "pertürbatif etki" den bahsedildiğinde, Erbiyum katkılı fiberlerin neden lazerler gibi tek bir dalga boyunda değil de, C ve L bantları gibi geniş bir spektrumda ışık üretebildiğinin ve güçlendirebildiğinin temel fiziksel nedeni ifade edilmektedir. Bu, "homojen olmayan genişleme" (inhomogeneous broadening) olarak da bilinen olgunun temelidir [93–96].

3.2.1. Pompalama mekanizmaları ve ters birikme

ASE kaynağının çalışması için temel gereklilik, ters birikme (population inversion) durumunun oluşturulmasıdır; yani, yarı-kararlı $^4I_{13/2}$ seviyesindeki iyon sayısının, temel hal $^4I_{15/2}$ seviyesindeki iyon sayısını aşmasıdır. Bu durum, harici bir optik pompalama kaynağı kullanılarak sağlanır. Bu tez kapsamında da kullanılan en yaygın pompalama şeması, Şekil 3.2'de gösterilen temel konfigürasyonda olduğu gibi, 980 nm dalga boyunda

yüksek güçlü bir lazer diyot ile gerçekleştirilir. 980 nm dalga boyundaki pompa fotonları, Er^{3+} iyonları tarafından verimli bir şekilde soğurularak bu iyonları temel halden doğrudan $^4I_{11/2}$ pompa seviyesine uyarır. Bu seviyedeki iyonların ömrü oldukça kısadır (mikrosaniye mertebesinde) ve çok hızlı, ışımasız bir bozunumla (non-radiative decay) enerjilerinin bir kısmını çevreleyen silika matrisine ısı (fonon) olarak aktararak $^4I_{13/2}$ yarı-kararlı enerji seviyesine düşerler. Bu yarı-kararlı seviyenin ömrü ise oldukça uzundur (milisaniye mertebesinde), bu da iyonların bu seviyede birikmesine ve ters birikmenin kolayca elde edilmesine olanak tanır. Yeterli ters birikme sağlandığında, $^4I_{13/2}$ seviyesindeki bazı iyonlar, kendiliğinden (spontaneous) olarak tekrar $^4I_{15/2}$ temel haline dönerken bir foton salar. Bu kendiliğinden salınan fotonlar, fiberin dalga kılavuzu yapısı içinde ilerlerken diğer uyarılmış Er^{3+} iyonlarıyla etkileşime girer ve onları da uyarılmış emisyon (stimulated emission) yoluyla foton salmaya tetikler. Bu yeni fotonlar, orijinal fotonla aynı yönde, aynı fazda ve aynı dalga boyundadır. Süreç, bir çığ etkisiyle katlanarak devam eder ve sonuçta fiber boyunca ilerleyen yüksek yoğunluklu, geniş bantlı bir ışık olan ASE ortaya çıkar.



Şekil 3.2. Er^{3+} iyonlarının enerji seviyeleri

Alternatif bir pompalama şeması ise 1480 nm dalga boyunda gerçekleştirilir. Bu yöntemde, pompa fotonları iyonları temel halden ($^4I_{15/2}$) doğrudan yarı-kararlı ($^4I_{13/2}$) seviyenin en üst enerji seviyelerine uyarır. 1480 nm pompalama, pompa ve sinyal fotonlarının enerji seviyeleri arasındaki daha küçük fark nedeniyle teorik olarak daha yüksek bir kuantum

verimliliğine sahiptir. Ancak, 980 nm pompalama, daha eksiksiz bir ters birikmesi sağlayabildiği için genellikle daha düşük bir gürültü faktörü (Noise Figure- NF) sunar ve bu nedenle yüksek güçlü ve düşük gürültülü ASE kaynakları ve yükselteçler için sıklıkla tercih edilir.

3.2.2. Temel oran ve foton yayılım denklemleri

Şekil 3.2'de basitleştirilmiş enerji seviye diyagramı ve silikadaki Er^{3+} iyonlarının çeşitli geçiş işlemleri görülmektedir. Aşağıdaki denklemler, pompa ve sinyal güçlerinin fiber boyunca nasıl değiştiğini ve Erbiyum iyonlarının enerji seviyelerindeki popülasyon dağılımını modellemektedir.

Pompa gücü (P_p) ve ASE sinyal gücünün ($P_s^{\pm}$) fiberin uzunluğu (z) boyunca değişimini tanımlayan temel denklemler aşağıdaki gibidir. Bu denklemler, sinyal ve pompanın soğurulmasını ve uyarılmış emisyon ile güçlenmesini hesaba katar.

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \gamma_p(z)P_p(z) \tag{3.1}$$

$$\frac{dP_s^{\pm}(z,v_i)}{dz} = \pm[G_e(z,v_i)(P_s^{\pm}(z,v_i) + P_0) - G_a(z,v_i)(P_s^{\pm}(z,v_i)] \tag{3.2}$$

$$P_0 = 2hv\Delta v \tag{3.3}$$

Bu denklemlerde $P_p(z)$ fiberin z konumundaki pompa gücünü, $P_s^{\pm}(z,v_i)$ z konumunda, v_i frekansında ileri (+) ve geri (-) yönde yayılan ASE gücü, $\gamma_p(z)$ konuma bağlı pompa soğurma katsayısı, $G_e(z,v_i)$ ve $G_a(z,v_i)$ sırasıyla, emisyon (kazanç) ve soğurma katsayıları olup bu katsayılar hem konuma (z) hem de frekansa (v_i) bağlıdır. P_0 Bir fotonun tek bir moddaki eşdeğer gürültü gücü olup ASE'nin oluşumunu başlatan "tohum" gürültüsünü temsil eder ve z fiber boyunca uzunlamasına koordinata tekabül eder [92].

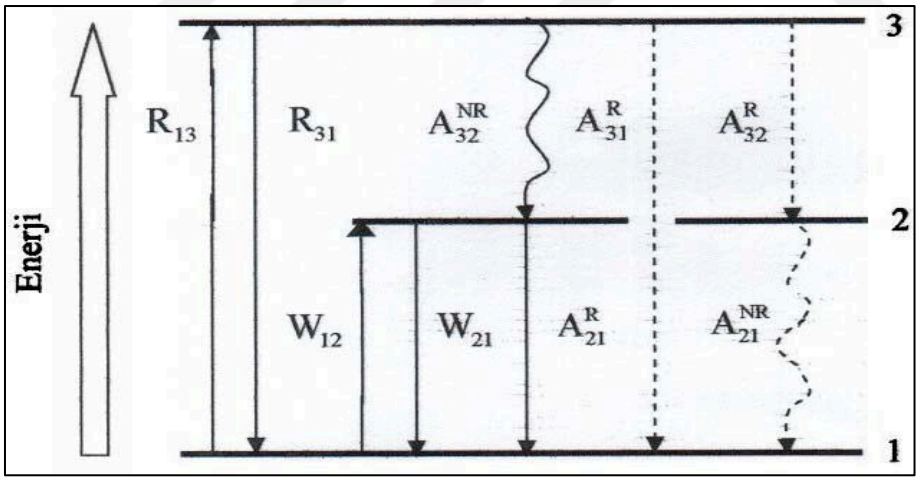
$$d\eta(v) = \mathrm{A}_{21}g(v)\delta v\frac{\Delta\Omega}{4\pi}dV\int_s N_2(r,\theta)\psi_s(r,\theta)r\,dr\,d\theta \tag{3.4}$$

Lazer ortamının sonsuz küçük bir dV hacmi içinde, pozitif z yönünde, v ve v + δv frekans aralığında kendiliğinden oluşan ve fiber moduna bağlanan rastgele polarize fotonların sayısı Eş 3.4'te ile verilmiştir. Burada g(v) çizgi şekli fonksiyonu $A_{21} = 1/\tau$ kendiliğinden bozunma

oranı, $\Delta\Omega/4\pi$ fiber tarafından yakalanan kendiliğinden ışığın kesri ve integral terimi uyarılmış iyonların yoğunluk dağılımı ile kılavuzlanan mod arasındaki örtüşmeyi hesaba katar. Çizgi şekli fonksiyonu $g(v) = 8\pi n^2\tau\sigma(v)/\lambda_s^2$ olarak tanımlanır, burada n ortamın kırılma indisidir. Yakalama katı açısı $\Delta\Omega$, kılavuzlanmamış bir lazer kavitesindeki bir kara cisim moduna karşılık gelene benzer bir şekilde tanımlanabilir yani $\Delta\Omega = \lambda^2/n^2\pi\omega_s^2$ ve hacim elemanı $dV = \pi\omega_s^2\, dz$ olarak tanımlanabilir. Birim frekans başına karşılık gelen kendiliğinden emisyon gücü $dP_{sE} = hvdn(v)$ ile verilir. Bu tanımlarla, δv bant genişliğindeki kendiliğinden emisyon gücünün oluşum hızı şu hale gelir:

$$\frac{dP_{se}}{dz} = 2P_0\sigma_e(v)\int_s N_2(r,\theta)\psi_s(r,\theta)r\,dr\,d\theta \tag{3.5}$$

Burada $P_0 = h\nu\delta\nu$, δv bant genişliğindeki bir kendiliğinden gürültü fotonunun gücüdür. P_0 terimi, yüksek kazanç koşullarında fiber boyunca üretilen toplam kendiliğinden emisyonun, δv bant genişliğindeki mod başına bir hayali giriş sinyal fotonunun yükseltilmesine eşdeğer olduğu için, genellikle eşdeğer giriş gürültüsü olarak adlandırılır [92].



Şekil 3.3. Temel üç seviyeli lazer sistemi enerji seviye diyagramı [51]

Şekil 3.3'te gösterilen enerji seviye diyagramında, lazerleme aktivitesi temel durum olan seviye 1 ile yarı kararlı durum olan seviye 2 arasında gerçekleşir. Bu sistemdeki temel etkileşimler; R ile simgelenen pompalama hızı, W ile ifade edilen uyarılmış emisyon hızı ve A ile gösterilen kendiliğinden ışıma hızıdır. Bu sembollerin üzerindeki "R" ve "NR" üst simgeleri, geçişlerin sırasıyla ışıma yaparak (radyatif) veya ışıma yapmadan (non-radyatif) gerçekleştiğini belirtir.

Sistem, atomların seviye 1'den seviye 3'e R_{13} hızıyla pompalanmasıyla başlar. Bunun tersi olan uyarılmış emisyon süreci ise R_{31} hızıyla ifade edilir. Seviye 3'teki uyarılmış bir atom, ışıma yaparak (toplam hızı $A_3^R = A_{32}^R + A_{31}^R$) veya ışıma yapmadan (hızı A_{32}^{NR}) daha düşük bir enerji seviyesine inebilir. Bu sistemde, seviye 3'ten gerçekleşen kendiliğinden geçişlerde ışımasız yolun çok daha baskın olduğu varsayılır ($A_{32}^{NR} >> A_3^R$).

Lazerlemenin gerçekleştiği seviye 1 ve seviye 2 arasındaki uyarılmış soğurma ve emisyon hızları ise sırasıyla W_{12} ve W_{21}'dir. Benzer şekilde, seviye 2'deki atomlar da kendiliğinden bozunmaya uğrar, bu durum $A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR}$ olarak ifade edilir ve foton ömrü τ olmak üzere $A_{21}^R = 1/\tau$'dir. Bu seviyedeki temel varsayım ise kendiliğinden bozunmanın büyük ölçüde ışıma yaparak gerçekleştiğidir ($A_{21}^R >> A_{21}^{NR}$). Bu kabuller altında, seviye 3 ve seviye 2'deki temel kendiliğinden bozunma süreçleri sırasıyla A_{32} ve A_{21} olarak basitleştirilebilir.

Sistemdeki toplam lazer iyonu yoğunluğu ρ ile gösterilirken; N_1, N_2 ve N_3 sırasıyla 1, 2 ve 3 numaralı enerji seviyelerindeki göreceli atom yoğunluklarını (popülasyonları) temsil eder. Doğal olarak, bu popülasyonların toplamı, toplam iyon yoğunluğuna eşittir (Eş. 3.6).

$$N_1 + N_2 + N_3 = \rho \tag{3.6}$$

Bunlara karşılık gelen atomik oran denklemleri Eş. 3.7, Eş. 3.8 ve Eş. 3.9'daki gibi yazılabilir.

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + A_{21}N_2 \tag{3.7}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + A_{32}N_3 \tag{3.8}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3 \tag{3.9}$$

Bu sistemde iyon nüfuslarının zamanla değişmediği kararlı durumlar dikkate alınırsa; $dNi\ dt = 0$ (i=1,2,3). $a = R_{31} + A_{32}$ ve $b = W_{21} + A_{21}$. Eş. 3.8 ve Eş. 3.9'dan aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$W_{12}N_1 - bN_2 + A_{32}N_3 = 0 \tag{3.10}$$

$$R_{13}N_1 - aN_3 = 0 \tag{3.11}$$

N1, N2 için yukarıdaki ifadelerde $N_3 = \rho - N_1 - N_2$ yazılırsa,

$$N_1 = \frac{ab}{b(a + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}} \tag{3.12}$$

$$N_2 = \rho \frac{R_{13}A_{32} + aW_{12}}{b(a + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}} \tag{3.13}$$

halini alır. Eş. 3.12 ve Eş. 3.13'de A_{21}, A_{32} terimleri ile $a\ ve\ b$ tanımları yerlerine koyulursa;

$$N_1 = \rho \frac{(1 + W_{21}\tau)(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}})}{(1 + W_{21}\tau)\left(1 + \frac{R_{13}+R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau\left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau} \tag{3.14}$$

$$N_2 = \rho \frac{R_{13}\tau + W_{21}\tau(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}})}{(1 + W_{21}\tau)\left(1 + \frac{R_{13}+R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau\left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau} \tag{3.15}$$

olur. Işımasız bozulma oranı A_{32}'yi, pomplama oranı $R_{13,31}$'in çok üzerinde kabul ederek ($A_{32} \gg R_{13,31}$), $R = R_{13}$ alınırsa Eş. 3.14 ve Eş. 3.15'ten;

$$N_1 = \rho \frac{1 + W_{21}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau} \tag{3.16}$$

$$N_2 = \rho \frac{R\tau + W_{21}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau} \tag{3.17}$$

elde edilir ve bu sonuçla $N_3 = \rho - N_1 - N_2 = 0$ bulunur. Hakim olan ışımasız bozulma karşısında (A_{32}) pompalama seviyesindeki iyon nüfusu ihmal edilebilir ve A_{32}'den yarı kararlı seviye 2'ye düşer [51].

3.2.3. C+L-Bandı ASE üretiminin teorik temelleri

C ve L bantlarını kapsayan geniş bantlı bir spektrumun (C+L-band) üretimi, Er^{3+} iyonlarının sofistike enerji seviyesi yapısının ve fiber içindeki ışık-madde etkileşiminin bir sonucudur. Daha önce belirtildiği gibi, Stark etkisiyle genişleyen $^4I_{13/2}$ ve $^4I_{15/2}$ seviyeleri arasındaki geçişler, geniş bir emisyon spektrumu oluşturur.

C-Bandı (yaklaşık 1530-1565 nm): Bu banttaki ASE üretimi, $^4I_{13/2}$ yarı-kararlı seviyesinin daha yüksek enerjili alt seviyelerinden temel hale geçişler tarafından domine edilir. Bu bölge, Erbiyum'un en yüksek kazanç katsayısına sahip olduğu bölgedir ve standart Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde (EKFY) sinyal güçlendirmesi için kullanılan temel mekanizmadır.

L-Bandı (yaklaşık 1565-1625 nm): Bu banttaki emisyon ise, aynı yarı-kararlı seviyenin daha düşük enerjili alt seviyelerinden gerçekleşen geçişlere karşılık gelir.

Tek bir ileri yönlü pompalama (forward-pumping) şeması kullanılarak verimli bir L-bandı ASE üretimi, "intra-band" veya bant-içi pompalama olarak bilinen ikincil ve kritik bir sürece dayanır. Fiberin giriş bölümünde 980 nm pompa ışığı tarafından verimli bir şekilde üretilen yüksek yoğunluklu C-bandı ASE fotonları, fiber boyunca ilerlerken henüz temel halde bulunan Er^{3+} iyonları tarafından kısmen yeniden soğurulur. Erbiyum'un soğurma kesiti (absorption cross-section), C-bandı dalga boylarında da önemli bir değere sahiptir. Bu yeniden soğurma süreci, iyon sayısını C-bandında tüketirken, iyonları $^4I_{13/2}$ seviyesi içinde daha uzun dalga boylarında emisyon yapmaya zorlar. Esasen, fiberin ilerleyen kısımlarında C-bandı ASE, L-bandı ASE'nin oluşumu için bir nevi dağıtılmış ikincil bir pompa kaynağı görevi görür. Bu fiziksel mekanizmadan ötürü, L-bandı kazancı C-bandına göre doğal olarak daha düşüktür ve etkin bir L-bandı üretimi, sistem parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerektirir.

3.2.4. Optimizasyon parametreleri ve sınırlayıcı faktörler

Etkin, düz ve geniş bantlı bir C+L-bandı ASE kaynağının tasarımı, çeşitli rekabetçi fiziksel süreçler arasında hassas bir denge kurmayı gerektiren çok değişkenli bir optimizasyon problemidir. Optimize edilmesi gereken ana parametreler aşağıda açıklanmıştır.

Erbiyum katkılı fiber uzunluğu

L-bandı verimliliğini artırmanın en temel yollarından biri, standart EKFY'lerde kullanılan fiberlerden daha uzun EKF'ler kullanmaktır. Uzun fiber, C-bandı fotonlarının L-bandı üretimi için bir pompa kaynağı olarak daha fazla etkileşim mesafesi bulmasını sağlar. Ancak, fiber uzunluğu optimum değerin üzerine çıktığında, C-bandındaki sinyallerin aşırı derecede yeniden soğurulması ve fiberin içsel kayıpları (background loss) nedeniyle toplam çıkış gücünde belirgin bir düşüş gözlemlenir. Bu tezdeki simülasyon ve deneysel çalışmalar, her bir EKF türü ve pompa gücü için optimum bir fiber uzunluğu olduğunu doğrulamıştır.

Erbiyum katkı konsantrasyonu

Daha yüksek katkı konsantrasyonuna sahip fiberler, birim uzunluk başına daha fazla pompa gücü emilimi sağlayarak daha kompakt düzeneklerin kurulmasına olanak tanır. Fakat konsantrasyon belirli bir eşiği aştığında (tipik olarak ~10^{25} iyon/m^3), verimliliği düşüren ve sistem performansını ciddi şekilde sınırlayan istenmeyen etkiler ortaya çıkar. Bunların en önemlisi, iyon kümelenmesi (ion-pair clustering) ve buna bağlı kooperatif yukarı-dönüşüm (cooperative up-conversion) süreçleridir [10, 97]. İyonlar birbirine çok yakın konumlandığında, komşu iki uyarılmış Er^{3+} iyonu etkileşime girebilir. Bu etkileşimde, bir iyon enerjisini diğerine aktararak onu daha yüksek bir enerji seviyesine (örneğin, $^4I_{9/2}$) çıkarırken, kendisi ışımasız olarak temel hale döner. Yüksek seviyeye çıkan iyon da genellikle ışıma yapmadan hızla bozunur. Net sonuç, sinyal üretimine katkıda bulunabilecek iki uyarılmış iyonun kaybedilmesidir. Bu süreç, ters birikmeyi azaltır, kazancı düşürür ve pompa verimliliğini önemli ölçüde sınırlar.

Pompalama gücü ve konfigürasyonu

Pompa gücünün artırılması, genel olarak daha yüksek bir ters birikmesi ve dolayısıyla daha yüksek bir ASE çıkış gücü anlamına gelir. Ancak, aşırı yüksek pompa güçleri, yukarıda bahsedilen doğrusal olmayan etkileri ve potansiyel olarak fotokararma (photodarkening) süreçlerini tetikleyebilir. Pompalama konfigürasyonu da kritik bir rol oynar. İleri yönlü pompalamaya (co-propagating) ek olarak, geri yönlü (counter-propagating) veya çift yönlü (bi-directional) pompalama şemaları da kullanılabilir. Geri yönlü pompalama, genellikle

fiberin çıkış ucunda daha yüksek bir ters birikmesi sağlayarak L-bandı verimliliğini artırabilir ve daha düz bir kazanç profili sunabilir.

Sonuç olarak, bu teorik analiz, "Yüksek Güçlü Düz Kazanımlı Geniş Bantlı ASE Kaynağı Tasarımı" hedefinin altında yatan temel fiziksel prensipleri ve mühendislik zorluklarını ortaya koymaktadır. Başarılı bir tasarım, Er^{3+} iyonlarının spektroskopik özelliklerinin derinlemesine anlaşılmasını ve fiber uzunluğu, katkı konsantrasyonu, pompa gücü ve konfigürasyonu gibi birbiriyle ilişkili çok sayıda parametre arasında dikkatli bir optimizasyon yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu tez kapsamında yürütülen simülasyon ve deneysel çalışmalar, bu teorik temeller üzerine inşa edilmiş ve bu karmaşık parametre uzayında optimum çözümü bulmayı amaçlamıştır.

3.3. Kullanılan Yöntemler

Bu tez çalışmasının metodolojik temeli, öncelikli olarak mevcut literatürün kapsamlı bir şekilde taranmasına dayanmaktadır. Araştırmanın ilk aşamasında, yüksek güçlü ve geniş bantlı ASE kaynakları üzerine yayınlanmış akademik çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan deneysel düzenekler derinlemesine incelenmiştir. Tezin hedefleriyle uyumlu bulunan konfigürasyonlar, kullanılan aktif fiber türleri, pompalama şemaları ve elde edilen spektral sonuçlar (çıkış gücü, bant genişliği, kazanç düzlüğü vb.) gibi kritik veriler, sistematik bir yaklaşımla bir araya getirilerek özel bir veri tabanında listelenmiştir. Bu sistematik derleme, mevcut teknolojilerin güçlü ve zayıf yönlerinin analiz edilmesi ve araştırma boşluklarının net bir şekilde tanımlanması için sağlam bir zemin oluşturmuştur.

Literatür taramasını takiben, teorik ve pratik analizlerin bir sonraki adımı olarak simülasyon çalışmalarına geçilmiştir. Bu aşamada, literatürde öne çıkan ve potansiyel vadeden düzenekler, profesyonel optik simülasyon yazılımları kullanılarak yeniden modellenmiştir. Simülasyonlardan elde edilen spektral çıktılar, ilgili makalelerde sunulan sonuçlarla titizlikle karşılaştırılarak modellerin doğruluğu teyit edilmiştir. Bu doğrulama süreci, kullanılan simülasyon araçlarının ve modellerinin güvenilirliğini kanıtlamanın yanı sıra, düzenekleri oluşturan optik bileşenlerin ve parametrelerin (örneğin pompalama gücü, yönü, aktif fiber uzunluğu) çıkış spektrumu üzerindeki etkileşimlerini derinlemesine anlama imkanı tanımıştır. Parametrelerdeki değişimlerin spektral karakteristiği nasıl

şekillendirdiğinin gözlemlenmesi, sistem dinamiğine olan hakimiyeti artırmış ve teze özgü yenilikçi tasarımların geliştirilmesi için gerekli olan temel bilgiyi sağlamıştır.

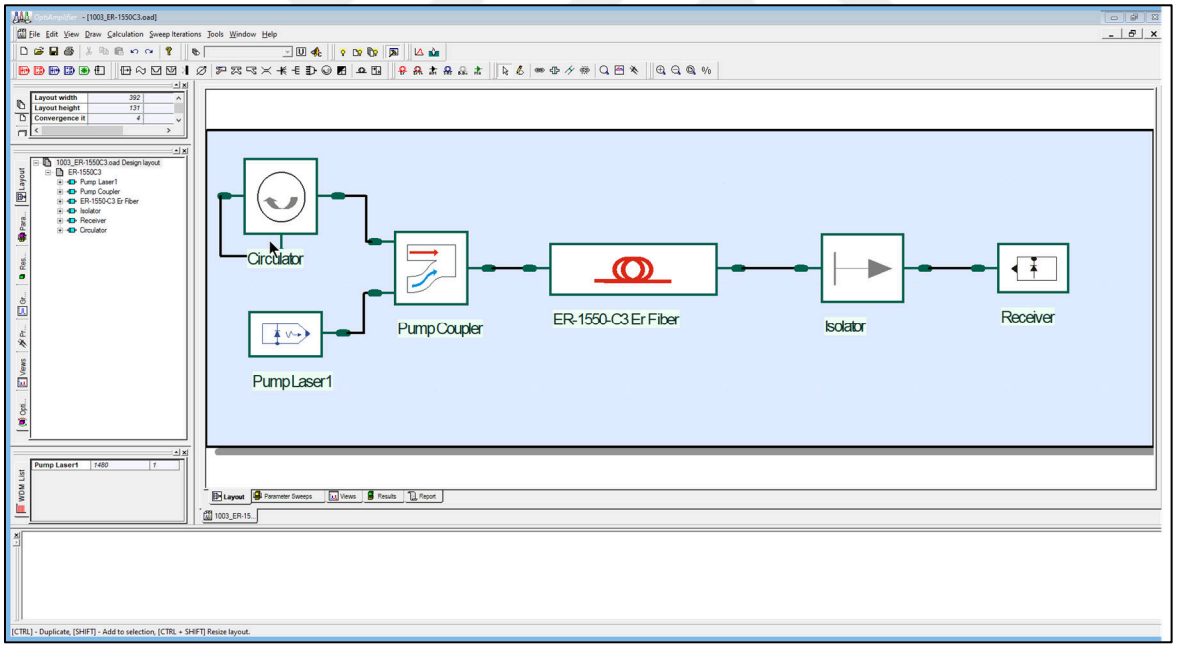
Simülasyon çalışmalarının gerçek dünya koşullarıyla maksimum uyum göstermesi amacıyla, modellemelerde kullanılan EKF parametreleri, tez kapsamında tedarik edilen ve laboratuvarda fiziksel olarak mevcut olan fiberlerin üretici veri föylerinden alınmıştır. Her bir EKF'nin soğurma ve emisyon tesir kesitleri, iyon yoğunluğu ve sayısal aralık gibi özgün fabrikasyon verileri simülasyon ortamına birebir aktarılmıştır. Bu titiz yaklaşım sayesinde, pompalama dalga boyları, EKF uzunlukları ve sinyalin fiber içerisindeki geçiş sayısı gibi kritik parametreler üzerine kapsamlı bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Gerçekleştirilen bu ayrıntılı analizler neticesinde, tezin "Yüksek Güçlü Düz Kazanımlı Geniş Bantlı ASE Kaynağı" hedefine ulaşmak için en uygun düzenek konfigürasyonları ve EKF türleri belirlenmiş ve bu bulgular ışığında deneysel çalışmalara geçiş yapılmıştır.

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, ASE kaynağı tasarımına yönelik gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları detaylı olarak sunulmaktadır. Simülasyon çalışmaları OptiAmplifier yazılımında gerçekleştirilmiştir. Alt başlıklara giriş yapmadan önce simülasyondan elde edilen verilerin analizinde izlenen metodoloji detaylandırılacaktır.

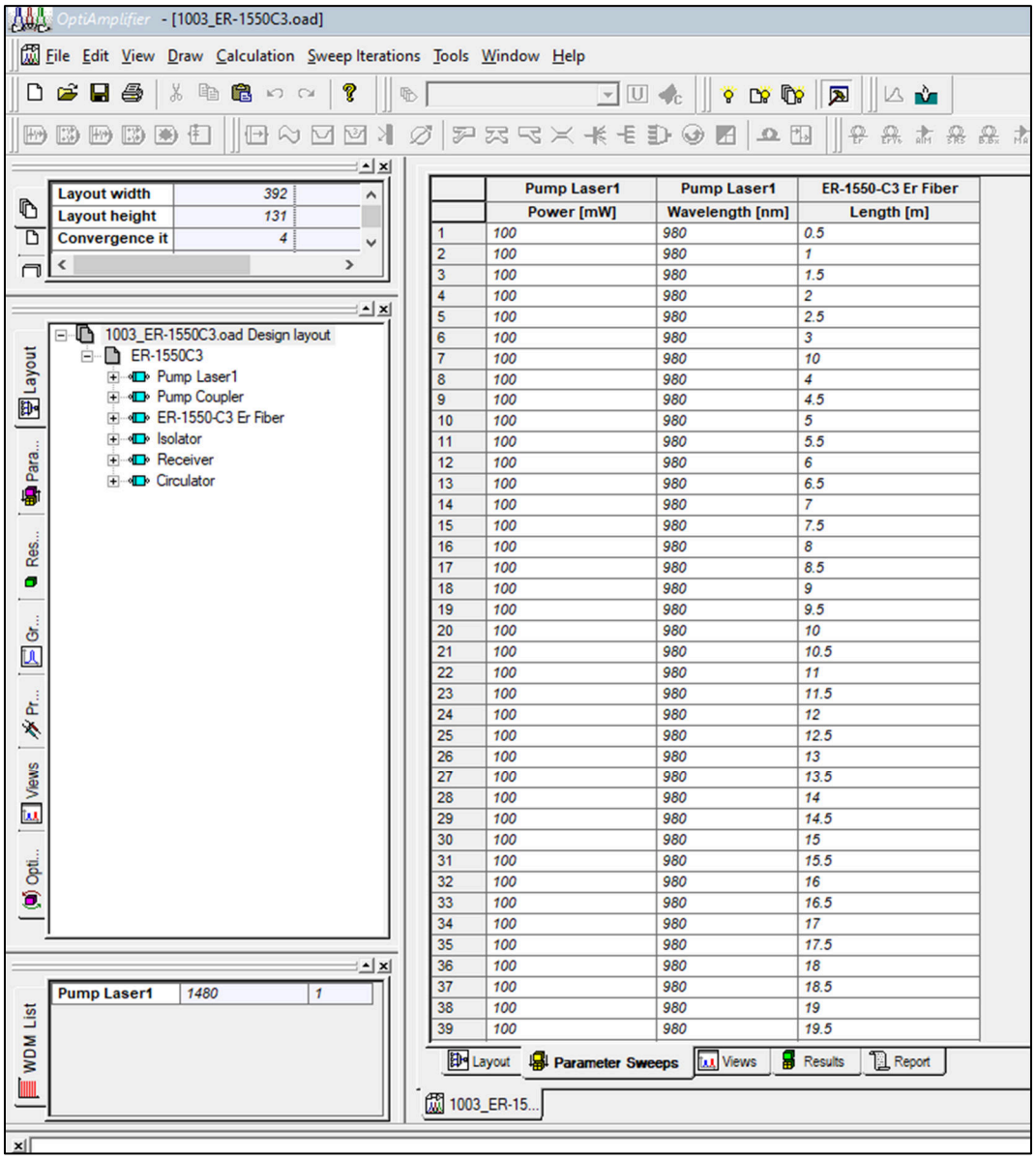
4.1. Simülasyon Ortamı ve Analiz Yöntemleri

OptiAmplifier yazılımının genel arayüzü, Resim 4.1'de gösterildiği gibi beş ana sekmeden oluşmaktadır. Deney düzeneğinin tasarlandığı "Layout", parametrik taramaların tanımlandığı "Parameter Sweeps", sonuçların grafiksel olarak incelendiği "Views", bileşenlere özgü sonuçların yer aldığı "Results" ve son olarak raporlamaların yapıldığı "Reports" sekmesi olmak üzere 5 ayrı kısımdan oluşmaktadır.



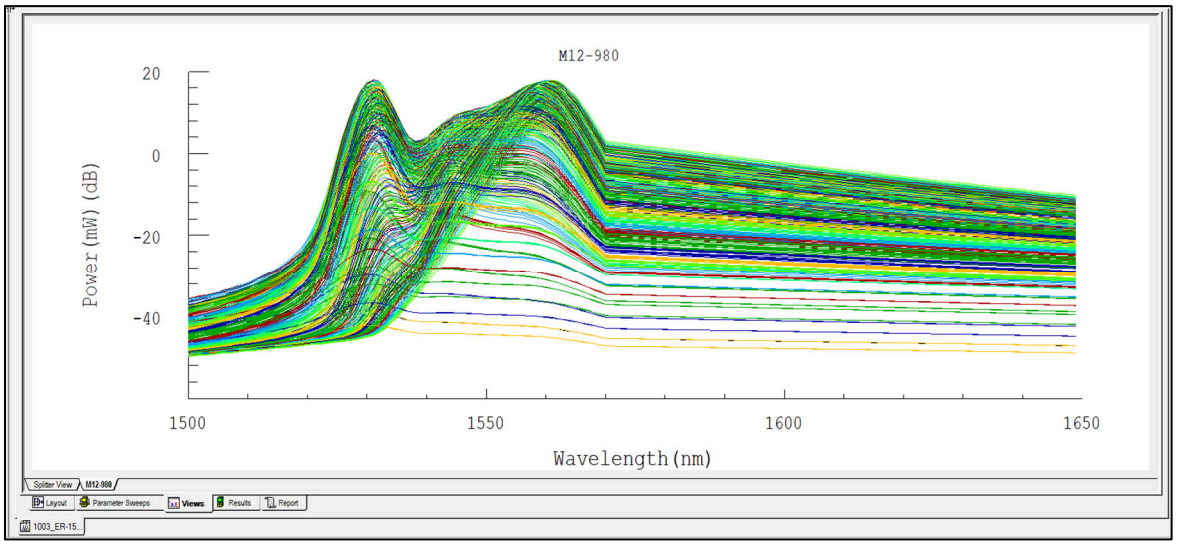
Resim 4.1. OptiAmplifier genel pencere görünümü

Parametrik analizler, Resim 4.2'de görülen "Parameter Sweeps" sekmesi üzerinden yönetilmiştir. Bu arayüz, farklı parametre kombinasyonlarına göre çok sayıda iterasyonun otomatik olarak çalıştırılmasına olanak tanımaktadır.



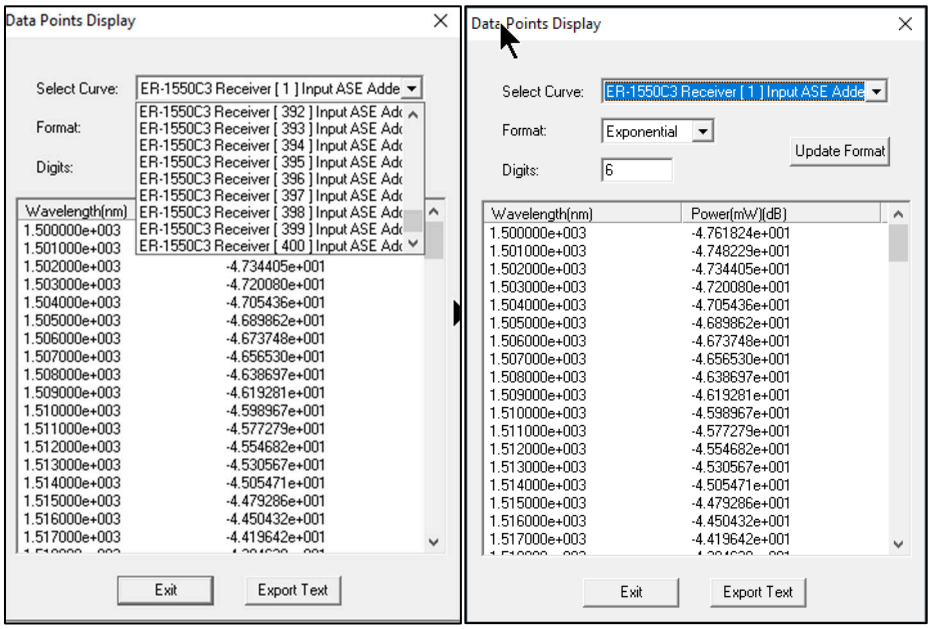
Resim 4.2. "Parameter Sweeps" sekmesi

Simülasyonlar tamamlandıktan sonra elde edilen grafiksel sonuçlar, Resim 4.3'te gösterilen "Views" sekmesinde incelenmiştir. Ancak, yazılımın entegre grafik araçlarının, serilerin hangi parametrelere ait olduğunu doğrudan göstermemesi ve veri serilerini yönetmenin verimsiz olması gibi kısıtlamaları nedeniyle, detaylı analizler için harici bir yönteme başvurulması gerekmiştir.



Resim 4.3. OptiAmplifier "View" sekmesi

OptiAmplifier yazılımı, simülasyon sonuçlarını doğrudan Microsoft Excel gibi harici platformlara aktarma seçeneği sunmamaktadır. Verilere, Resim 4.4'te gösterildiği gibi, her bir iterasyon için ayrı ayrı "Export Text" butonu kullanılarak metin (.txt) dosyası formatında erişilebilmektedir. Yüzlerce iterasyon içeren bir simülasyon setinde bu işlemin manuel olarak yapılması, aşırı zaman alıcı ve hataya açık bir süreçtir.



Resim 4.4. İterasyonlara ait ham veriler

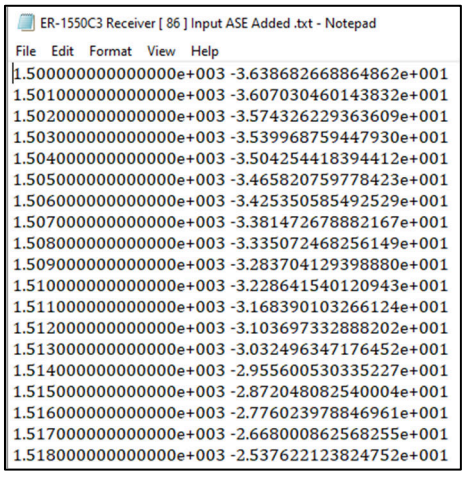
Bu işlemi tek tek yapmak çok uzun vakit alacağından ötürü bilgisayarda makro kaydı yapılarak aynı bilgisayarda başka bir simülasyon çalıştırılırken diğer bir açılan pencereden

de hesaplama işlemleri biten verilerin klasöre kayıt işlemleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle zaman kaybı minumuma indirilmiştir. Resim 4.5'de görüldüğü gibi metin dosyası olarak kaydedilen dosyalar ilgili iterasyonun klasörüne aktarılmıştır.



Resim 4.5. İterasyon sonuçlarının metin dosyalarına aktarılmış hali

Metin dosyasının içine bakıldığında program çıktı olarak Resim 4.6'daki gibi bir içerik vermektedir. Bu içeriği excel'in anlayabileceği biçime dönüştürmek ve excel'de gerekli tablolara veri olarak girmek gerekmektedir.

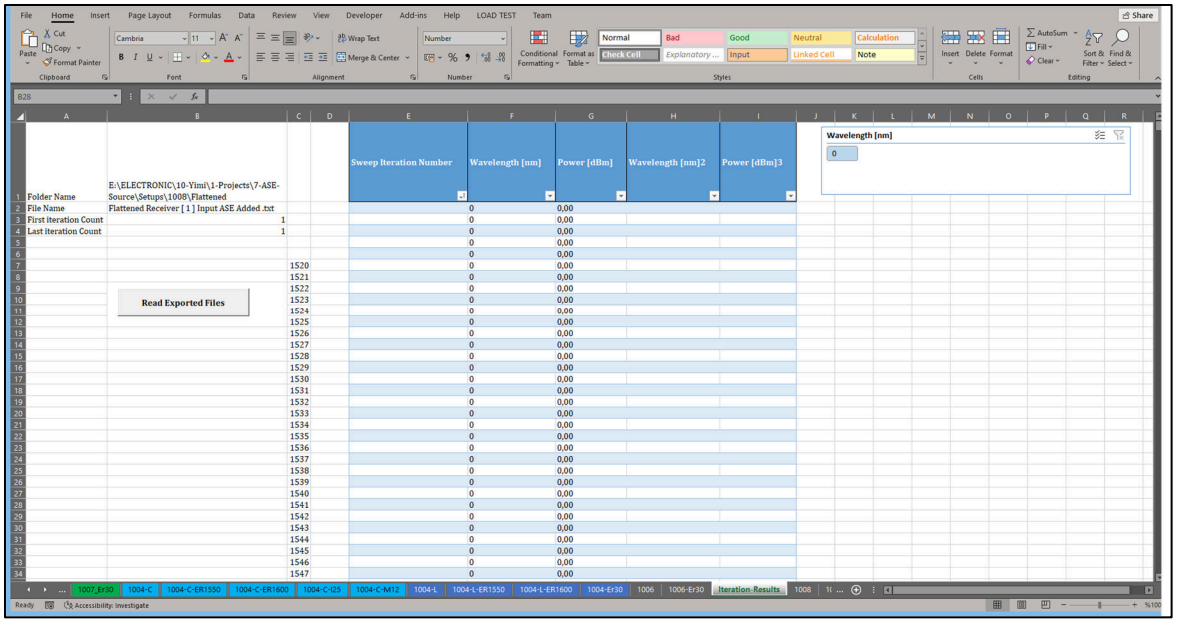


Resim 4.6. Ham veri içeren metin dosyası örneği

Ayrıca her deneyde farklı iterasyon sayıları ve konfigürasyonlar olabileceğinden bu metin dosyalarını adaptif bir şekilde okuyup ilgili yere aktarmasını sağlamak gerekmektedir.

Bunun için excel'in geliştirici sekmesinde bulunan "Visual Basic" kısmı kullanılmıştır. Bu kısımda Excel'e istenilen her iş yaptırabilir.

Resim 4.7'de arayüzü görülen özel bir Excel çalışma sayfası geliştirilmiştir. Bu araç, metin dosyalarının bulunduğu klasör yolunu, dosya adlandırma yapısını ve iterasyon aralığını parametre olarak almaktadır. Geliştirilen VBA uygulaması, bu parametreler doğrultusunda tüm metin dosyalarını otomatik olarak okumakta, verileri yapılandırarak ilgili sütunlara aktarmakta ve analiz için hazır hale getirmektedir. Tezdeki tüm simülasyon sonuçları bu yöntem kullanılarak analiz edilmiştir.



Resim 4.7. Veri aktarımı için geliştirilen excel çalışma sayfası

Simülasyonlarda kullanılan erbiyum katkılı fiberler, tez kapsamında temin edilen ve laboratuvarda fiziksel olarak mevcut olan fiberlerdir. Kullanılan farklı fiber türlerine ait temel parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı fiber türlerine ait parametreler

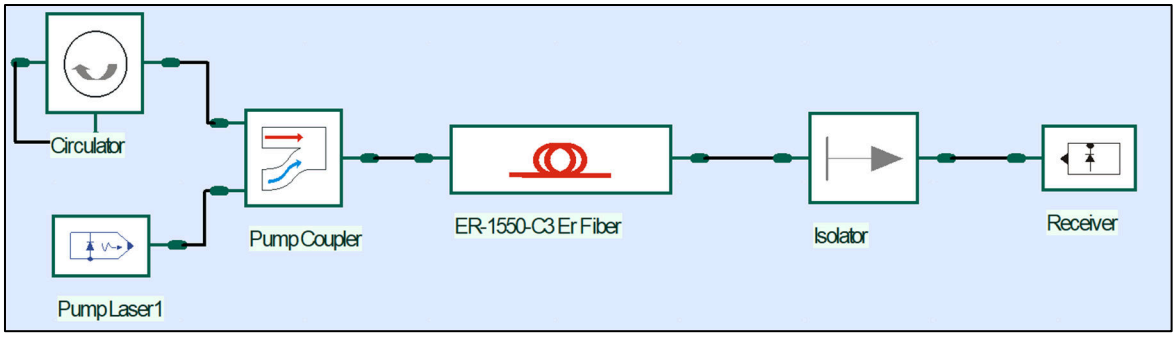
EKF Adı	M5	M12	I6(980/125)	I25(980/125)	Er30(4/125)	ER-1550C3	ER-1600L3
Üretici	FiberCore	FiberCore	FiberCore	FiberCore	Liekki®	Corning	Corning
Nümerik Açıklık	0,23	0,22	0,23	0,24	0,2	0,23	0,23
İyon Ömrü (ms)	10	10	10	10	9	10	10
Emilim (dB/m @980 nm)	5	12	5,1	25	-	2,5	-
Emilim (dB/m @1530 nm)	-	-	8	40	30	10	29
Mod Alan Çapı (µm @980 nm)	3,5	3,7	-	-	-	3,5	-
Mod Alan Çapı (µm @1550 nm)	5,9	6,2	5,9	5,7	6,5	5,5	5,5
Çekirdek Yarıçapı (µm)	1,6	1,7	1,55	1,4	1,45	1,22	1,11
Erbiyum Yarıçapı (µm)	1,5	1,6	1,45	1,3	1,45	1,01	0,93
İyon Yoğunluğu (ppm)	400	900	440	2200	1900	811	2280
İyon Yoğunluğu (m^-3)	4E+24	9E+24	4,40E+24	2,20E+25	1,90E+25	8,11E+24	2,28E+25
Kayıp @ 1300 nm (dB/km)	5,8	5,2	5,6	6,9	8	4,15	12,46

4.2. C-Band ASE Üretim Düzeneklerinin Simülasyonu

Denenecek düzeneklerin sayısı fazla olduğundan düzeneklerden elde edilen sonuçların karıştırılmaması ve doğru bir şekilde yönetimi için her deney düzeneğine bir numara verilmiştir. Böylelikle düzenekleri kendi aralarında kıyaslama yaparken excelde bu işlem oldukça kolay bir hale gelmektedir.

4.2.1. Düzenek 1

C-band ASE üretimi için Şekil 4.1'de gözüken 1 numaralı en basit düzenek olan temel bir EKFY'nin giriş sinyali kısmına bir yansıtıcı görevi görecek olan sirkülatör bağlanarak başlandı.



Şekil 4.1. 1 numaralı düzenek

Simülasyonlar, Çizelge 4.2'de özetlenen parametreler ile altı farklı EKF türü (M5, M12, ER-1550C3, ER-1600L3, I25, I6) için çalıştırılmıştır. Elde edilen ön sonuçlar neticesinde, en

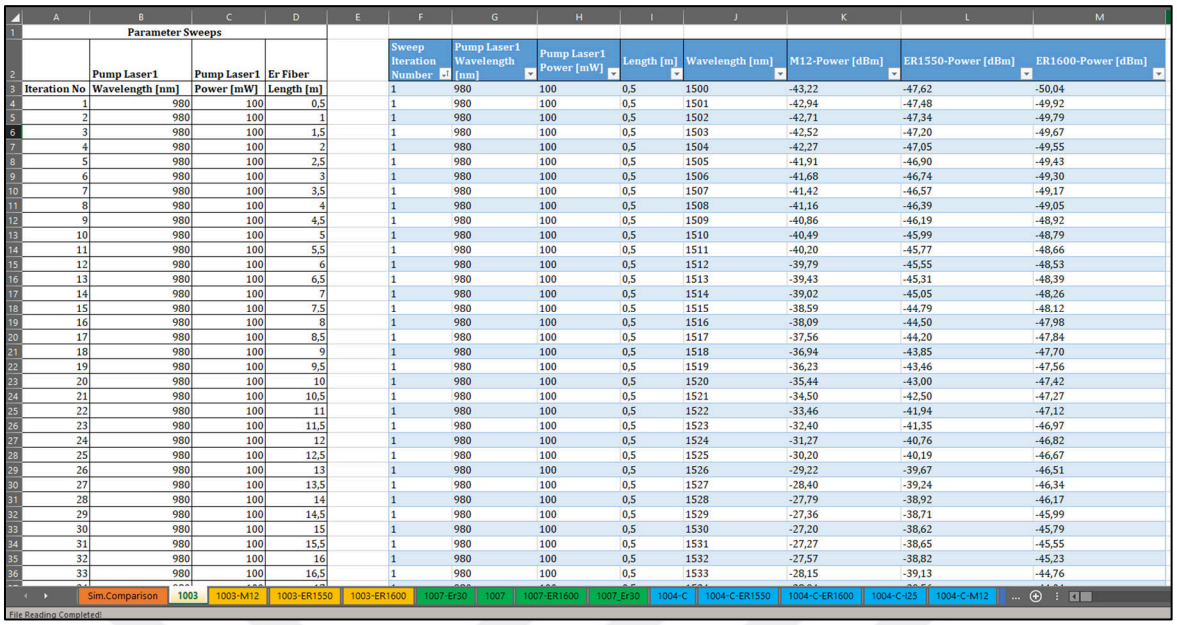
yüksek performansı sergileyen M12, ER-1550C3 ve ER-1600L3 fiberleri ile detaylı analizlere devam edilmiştir. Bu analizler sonucunda toplam 180 000 adet dalgaboyu-çıkış gücü verisi üretilmiştir.

Çizelge 4.2. 1 numaralı düzenek için iterasyon parametreleri

Düzenek Numarası	Çıkış Spektrumu		Pompa Lazer Gücü		Pompa Lazer Dalgaboyu	EKF-1 Uzunluk (m)		EKF Türü
	Aralık (nm)	Adım Miktarı (nm)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Aralık (nm)	Aralık (m)	Adım Miktarı (m)	Aralık
1	1500-1650	1	100-500	100	980,1480	0,5-20	0,5	M12, ER-1550C3, ER1600L3

İlk olarak M12 fiberi ile 400 iterasyondan oluşan deney çalıştırıldı. İterasyonlarda pompa lazer dalgaboyu 980 nm ve 1480 nm olacak şekilde iki farklı dalga boyunda denendi. Pompa gücü ise 100 ile 500 mW arasında 100'er mW'lık aralıklarla, EKF uzunluğu ise 0,5 ile 20 metre arasında 0,5'er metre aralıklarla değiştirilerek 1500-1650 nm aralığındaki spektrumda çıkış güçleri elde edilmiştir.

Resim 4.8'de görüldüğü üzere 1 numaralı düzenek için 4 farklı çalışma sayfası oluşturulmuştur. "1" ismine sahip olan sayfada veriler tablo halinde bulunmaktadır. 1 nolu düzeneğe ait 3 farklı fiber türü için ise ayrı sayfalar açılarak grafik analizleri bu sayfalarda yapılmıştır.



Parameter Sweeps

Iteration No	Pump Laser1 Wavelength [nm]	Pump Laser1 Power [mW]	Er Fiber Length [m]
1	980	100	0,5
2	980	100	1
3	980	100	1,5
4	980	100	2
5	980	100	2,5
6	980	100	3
7	980	100	3,5
8	980	100	4
9	980	100	4,5
10	980	100	5
11	980	100	5,5
12	980	100	6
13	980	100	6,5
14	980	100	7
15	980	100	7,5
16	980	100	8
17	980	100	8,5
18	980	100	9
19	980	100	9,5
20	980	100	10
21	980	100	10,5
22	980	100	11
23	980	100	11,5
24	980	100	12
25	980	100	12,5
26	980	100	13
27	980	100	13,5
28	980	100	14
29	980	100	14,5
30	980	100	15
31	980	100	15,5
32	980	100	16
33	980	100	16,5

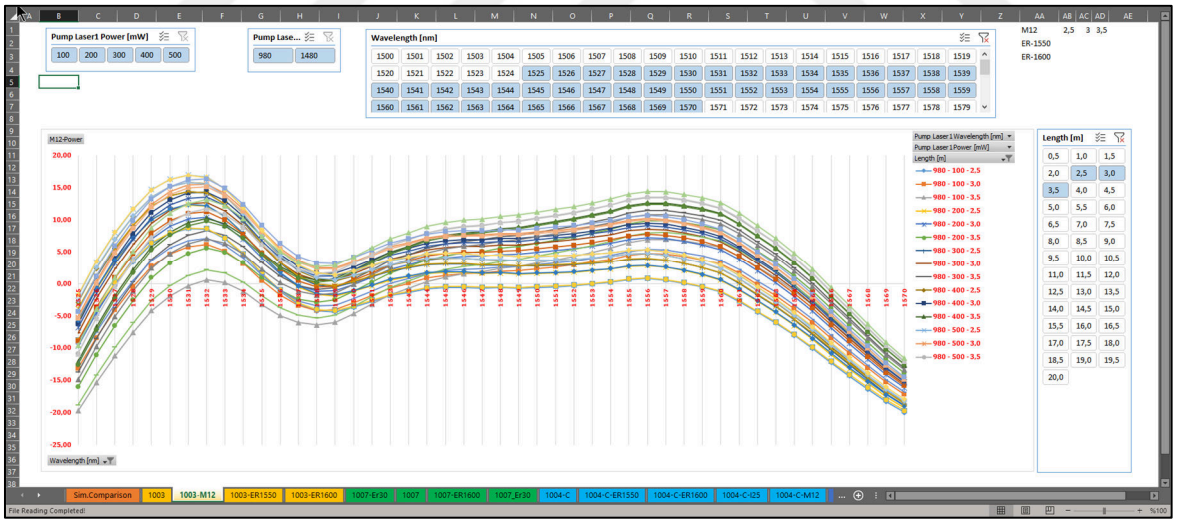
Sweep Iteration Number	Pump Laser1 Wavelength [nm]	Pump Laser1 Power [mW]	Length [m]	Wavelength [nm]	M12-Power [dBm]	ER1550-Power [dBm]	ER1600-Power [dBm]
1	980	100	0,5	1500	-43,22	-47,62	-50,04
1	980	100	0,5	1501	-42,94	-47,48	-49,92
1	980	100	0,5	1502	-42,71	-47,34	-49,79
1	980	100	0,5	1503	-42,52	-47,20	-49,67
1	980	100	0,5	1504	-42,27	-47,05	-49,55
1	980	100	0,5	1505	-41,91	-46,90	-49,43
1	980	100	0,5	1506	-41,68	-46,74	-49,30
1	980	100	0,5	1507	-41,42	-46,57	-49,17
1	980	100	0,5	1508	-41,16	-46,39	-49,05
1	980	100	0,5	1509	-40,86	-46,19	-48,92
1	980	100	0,5	1510	-40,49	-45,99	-48,79
1	980	100	0,5	1511	-40,20	-45,77	-48,66
1	980	100	0,5	1512	-39,79	-45,55	-48,53
1	980	100	0,5	1513	-39,43	-45,31	-48,39
1	980	100	0,5	1514	-39,02	-45,05	-48,26
1	980	100	0,5	1515	-38,59	-44,79	-48,12
1	980	100	0,5	1516	-38,09	-44,50	-47,98
1	980	100	0,5	1517	-37,56	-44,20	-47,84
1	980	100	0,5	1518	-36,94	-43,85	-47,70
1	980	100	0,5	1519	-36,23	-43,46	-47,56
1	980	100	0,5	1520	-35,44	-43,00	-47,42
1	980	100	0,5	1521	-34,50	-42,50	-47,27
1	980	100	0,5	1522	-33,46	-41,94	-47,12
1	980	100	0,5	1523	-32,40	-41,35	-46,97
1	980	100	0,5	1524	-31,27	-40,76	-46,82
1	980	100	0,5	1525	-30,20	-40,19	-46,67
1	980	100	0,5	1526	-29,22	-39,67	-46,51
1	980	100	0,5	1527	-28,40	-39,24	-46,34
1	980	100	0,5	1528	-27,79	-38,92	-46,17
1	980	100	0,5	1529	-27,36	-38,71	-45,99
1	980	100	0,5	1530	-27,20	-38,62	-45,79
1	980	100	0,5	1531	-27,27	-38,65	-45,55
1	980	100	0,5	1532	-27,57	-38,82	-45,23
1	980	100	0,5	1533	-28,15	-39,13	-44,76

Sim.Comparison | 1003 | 1003-M12 | 1003-ER1550 | 1003-ER1600 | 1007-Er30 | 1007 | 1007-ER1600 | 1007_Er30 | 1004-C | 1004-C-ER1550 | 1004-C-ER1600 | 1004-C-I25 | 1004-C-M12

File Reading Completed!

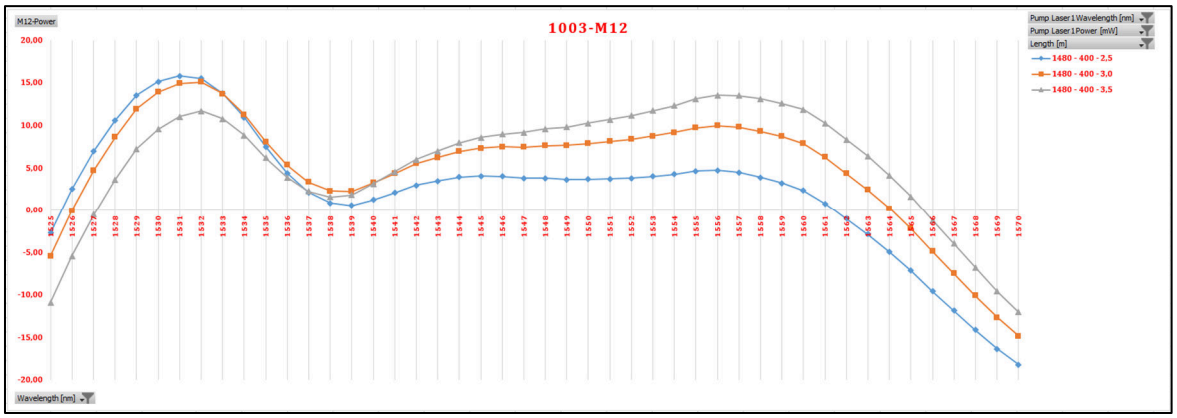
Resim 4.8. Düzeneklere ayrılan excel çalışma sayfası görünümleri

Her bir fiber türü için 400 seriden oluşan grafikler Resim 4.9'da göründüğü gibi excel de her fibere ait özet tablosuna dilimleyiciler eklendikten sonra analiz edilmiştir.



Resim 4.9. 1 nolu düzeneğin M12 fiberi ile elde edilen verilerin grafik hali

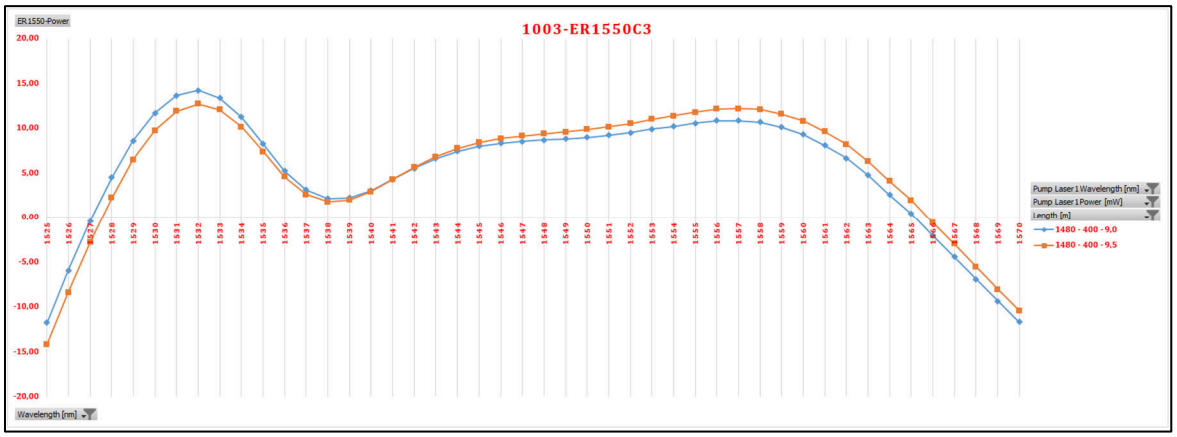
Sonuç olarak M12 fiberi için 1480 nm dalga boyunda 400 mW pompa gücünde 3 farklı fiber boyuna kadar seçenekler daraltılmıştır. Şekil 4.2'de görülen 3 farklı seride en iyi sonucu 1538 nm'de en az çökmeye sahip olan ve 1543-1563 nm aralığında daha yüksek çıkış gücüne sahip olan 3,5 metrelik fiber uzunluğuna sahip gri renkli iterasyonda elde edilmiştir. Bu iterasyonda 1530-1565 nm bant genişliğinde maksiumum tepe gücü 1556 nm'de +13,54 dBm olurken güç salınımı ise 11,97 dB olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. 1 nolu düzeneğin M12 fiberi ile elde edilen en iyi 3 iterasyonun spektrum verileri

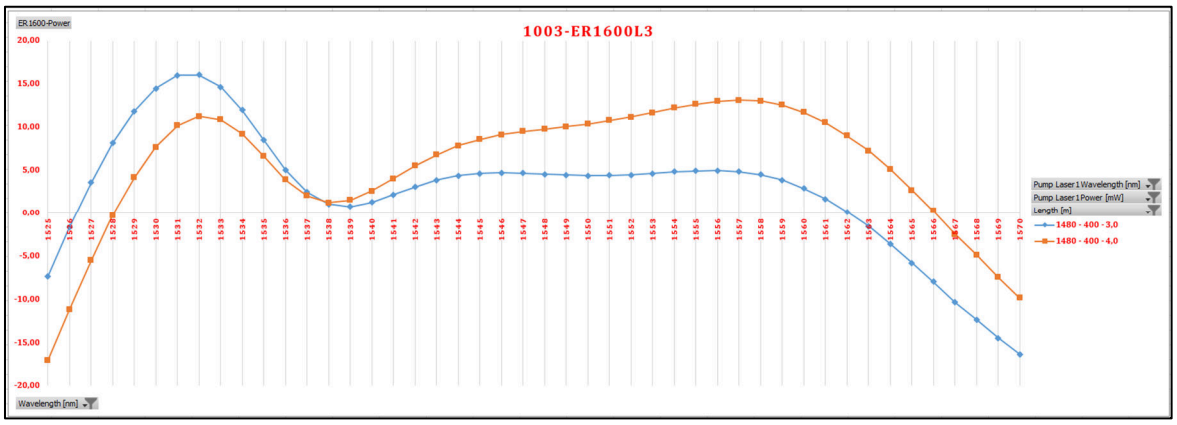
Gerçek deneyler yapılırken kullanılabilecek pompa lazerler 500 mW maksimum çıkış gücüne sahiptirler. Bu lazerler eğer sınır gücü olan 500 mW seviyesinde çalıştırılırsa lazerlerin aşırı ısınmasına ve gerekli soğutma işlemi yapılmazsa pompa lazerlerin zarar görmesi anlamına gelmektedir. Eldeki imkanlar göz önüne alındığında lazerlerin sınır gücünde çalıştırmak mantıklı bir seçenek olmamaktadır. Önceki yapılan çalışmalar sonucunda lazerlerin sınır gücü 500 mW yerine 400 mW'lık bir çıkış gücünde çalıştırılması uygun görülmektedir. Bundan dolayı ileride incelenecek simülasyonlarda pompa güçleri maksimum 400 mW olacak şekilde seçilmiştir.

1 numaralı düzenekte ER-1550C3 fiber kullanıldığında ise çıkış grafiği Şekil 4.3'teki gibi olmuştur. Grafik incelendiğinde en iyi iki seri 1480 nm pompa dalga boyunda 400 mW pompa gücünde 9 ve 9,5 metrelik EKF uzunluklarında olduğu görülmektedir. İki serinin de değerleri birbirlerine oldukça yakındır.



Şekil 4.3. 1 nolu düzeneğin ER-1550C3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum verileri

1538 nm'deki çıkış gücü çöküşü ikisinde de birbirlerine çok yakın olduğu göz önüne alınırsa aralarından en iyisini seçmek gerektiğinde turuncu renkli olan seriyi ele almak mantıklı olacaktır. Turuncu ile mavi serinin 1532 nm'de tepe güçleri +12,69 ve +14,21 dBm olmuştur. Mavi serinin 1546-1565 nm aralığındaki bantta daha düşük güçlü kalmasından dolayı turuncu renkli yani 9,5 metrelik uzunluğa sahip olan konfigürasyonu seçmek daha avantajlı olacaktır. Bu seçenekte maksimum tepe gücümüz +12,69 dBm, minumum tepe gücü ise +1,75 dBm olmaktadır. 1530-1565 nm aralığında çıkış gücü salınımı 10,94 dB olarak hesaplanabilir.



Şekil 4.4. 1 nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum verileri

1 numaralı düzenekte ER-1600L3 fiber kullanıldığında ise çıkış grafiği Şekil 4.4'teki gibi olmuştur. Grafik incelendiğinde en iyi iki seri 1480 nm pompa dalga boyunda 400 mW pompa gücünde 3 ve 4 metrelik fiber uzunluklarında olduğu görülmektedir. 1538 nm'deki

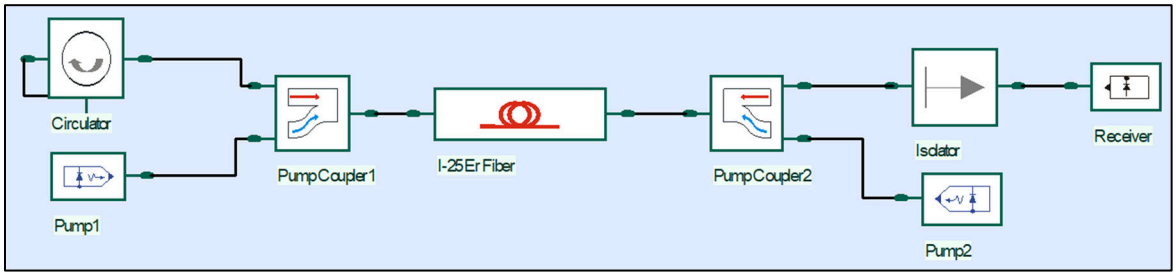
çıkış gücü çöküşü ikisinde de birbirlerine çok yakın olduğu göz önüne alınırsa aralarından en iyisini seçmek gerektiğinde toplam çıkış gücüne göre kıyaslanırsa turuncu renkli olan seri bu durumda en iyisi olacaktır. Bu seride maksimum tepe gücümüz 1557 nm'de +13,11 dBm, minumum tepe gücü ise 1538 nm'de +1,22 dBm olmaktadır. 1530-1565 nm aralığında çıkış gücü salınımı 11,89 dB olarak hesaplanabilir.

4.2.2. Düzenek 2-C

Şekil 4.5'de görünen 2-C numaralı düzenek Çizelge 4.3'de verilen parametrelere göre iterasyon yaptırıldığında 4 faklı fiber türü için toplamda 217 560 adet dalgaboyu-çıkış gücü verisi oluşmuştur.

Çizelge 4.3. 2-C numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri

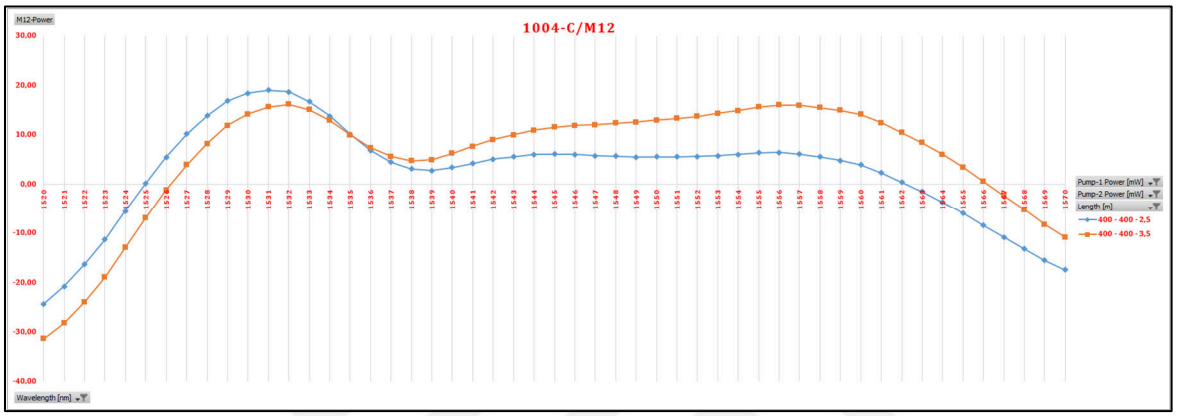
Düzenek Numarası	Çıkış Spektrumu		Pompa Lazer Gücü-1		Pompa Lazer Gücü-2		Pompa Lazer Dalgaboyu	EKF-1 Uzunluk (m)		EKF Türü
	Aralık (nm)	Adım Miktarı (nm)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Sabit	Aralık (m)	Adım Miktarı (m)	Aralık
2-C	1520-1630	1	25-475	75	25-475	75	1480 nm	0,5-9,5	1	M12, ER-1550C3, ER1600L3, I25



Şekil 4.5. 2 numaralı düzenek

Şekil 4.5'de gözüken 2 numaralı düzenekte tek bir EKF'yi ileri ve geri yönde pompalama yaparak ASE üretimi gerçekleştirilmiştir. Çift geçişli çift pompalamalı bu düzenekte öncelikle kısa fiber boylarında simülasyonlar yapılıp C bandında ASE üretilmeye çalışılmış olup daha sonra yine aynı düzeneği kullanarak EKF boyu daha uzun bir aralıkta seçilerek L bandında ASE üretilmiştir.

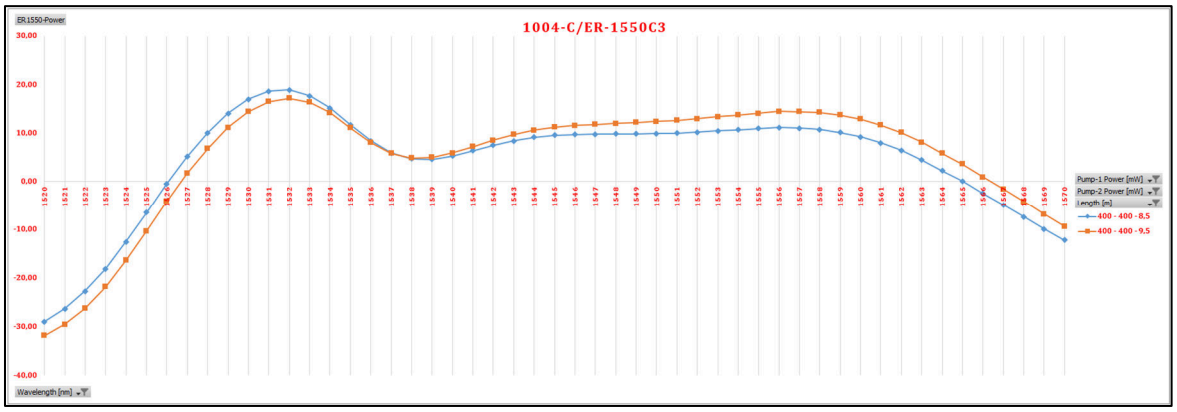
İlk olarak M12 fiberine bakılacak olursa Şekil 4.6'da görüldüğü gibi en iyi iki iterasyon 2,5 ve 3,5 metre uzunlukta fiberlerde elde edilmiştir. Bu ikisi arasında kıyaslama yapılacak olursa 1540-1565 nm aralığındaki bantta daha yüksek çıkış gücüne sahip olması ve 1531 nm'de mavi serinin 19,01 dBm turuncu renkli serinin ise 15,57 dBm çıkış gücü arasında farkın az olması ve genel olarak 1525-1565 nm aralığında bakılacak olursa toplam çıkış gücünün 3,5 metre uzunluğa sahip seride olduğu söylenebilir.



Şekil 4.6. 2-C nolu düzeneğin M12 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü

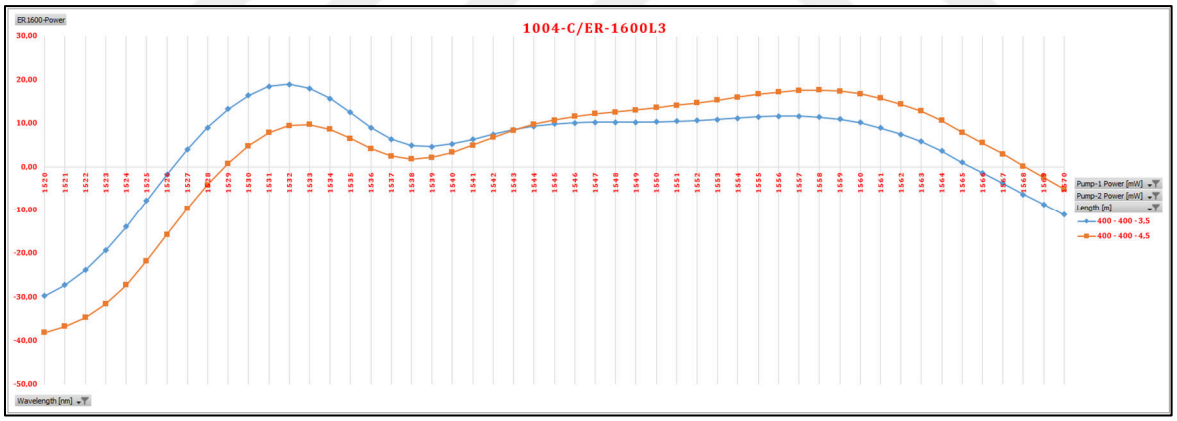
Bundan dolayı bu düzenek için en iyi spektrumun 3,5 metre uzunlukta 1556 nm'de +15,99 dBm maksimum tepe gücü, 1538 nm'de minumum +4,73 dBm'lik çıkış gücü ile çıkış gücü salınımın ise 11,26 dB olarak elde edildiği söylenebilir.

İkinci olarak ER-1550C3 fiberinden elde edilen Şekil 4.7'deki grafiğe bakılırsa 9,5 metre EKF uzunluğuna sahip olan turuncu renkli serinin toplam çıkış gücü ve çıkış gücü dalgalanması açısından en iyi iterasyon olduğu söylenebilir. Bu seride 1530-1564 nm aralığındaki bantta maksimum tepe gücü +17,13 dBm olurken minumum ise +4,82 dBm olup güç dalganlanması ise 12,31 dB olmaktadır.



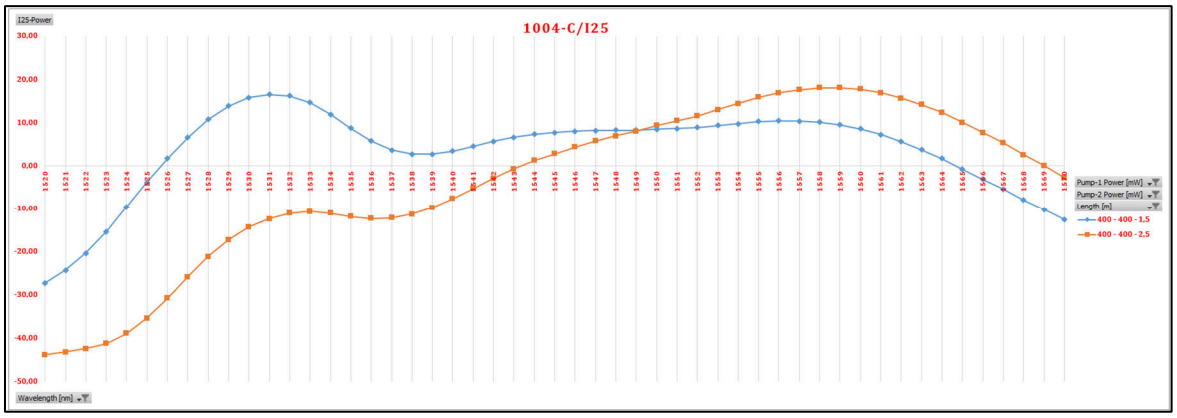
Şekil 4.7. 2-C nolu düzeneğin ER-1500C3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü

Üçüncü sırada ER-1600L3 kodlu fiberden alından sonuçlar Şekil 4.8'deki gibi olmuştur. Grafik incelenek olunursa mavi renkli 3,5 metrelik EKF ile alınan sonuçlar ortalama toplam güç ve çıkış gücü salınımı açısından daha iyi olduğu gözükmektedir. Bu seride ise 1530-1564 nm aralığında maksimum tepe gücü 1532 nm'de +18,97 dBm olurken minumum tepe gücü ise 1564 nm'de +3,61 dBm olup güç salınımı ise 15,36 dB olmuştur.



Şekil 4.8. 2-C nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü

Dördüncü sırada ise I25 kodlu fiberden alınan sonuçlar Şekil 4.9'da gözükmektedir. Grafikten açık bir şekilde anlaşılabileceği gibi 2,5 metrelik fiberden 0 dBm'in üstündeki güçleri 1544 nm'den sonra elde edildiği için bu EKF türünde en iyi iterasyon 1,5 metre uzunluğa sahip konfigürasyon olmuştur. Bu iterasyonda ise 1530-1564 nm aralığında maksimum tepe gücü 1531 nm'de +16,48 dBm olurken minumum tepe gücü ise 1564 nm'de +1,62 dBm olup güç salınımı ise 14,86 dB olmuştur.



Şekil 4.9. 2-C nolu düzeneğin I25 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü

4.3. L-Band ASE Üretim Düzeneklerinin Simülasyonu

Bu kısımda L-band ASE üretim için çalıştırılan 3 farklı düzeneğin simülasyonu yapılmıştır.

4.3.1. Düzenek 2-L

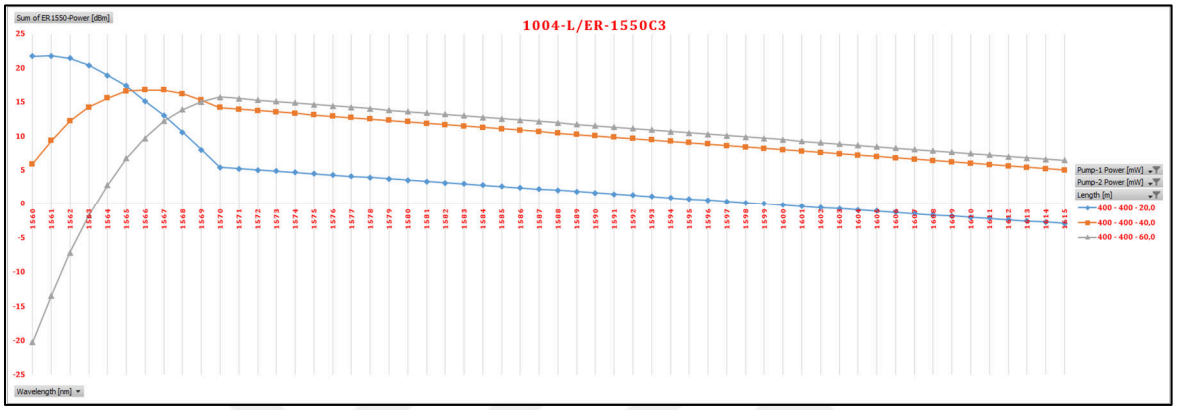
2-L numaralı düzenek 2-C numaralı düzenekle aynı bağlantı şemasına sahip olup aralarındaki fark sadece farklı parametrelerde çalıştırılmış olmasıdır. 2 nolu düzenek Çizelge 4.4'te verilen parametrelere göre iterasyon yaptırıldığında 3 farklı fiber türü için toplamda 82 320 adet dalgaboyu-çıkış gücü verisi içermektedir.

Çizelge 4.4. 2-L numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri

Düzenek Numarası	Çıkış Spektrumu		Pompa Lazer Gücü-1		Pompa Lazer Gücü-2		Pompa Lazer Dalgaboyu	EKF-1 Uzunluk (m)		EKF Türü
	Aralık (nm)	Adım Miktarı (nm)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Sabit	Aralık (m)	Adım Miktarı (m)	Aralık
2-L	1560-1615	1	25-475	75	25-475	75	1480 nm	20-200	20	ER-1550C3, ER1600L3, Er30

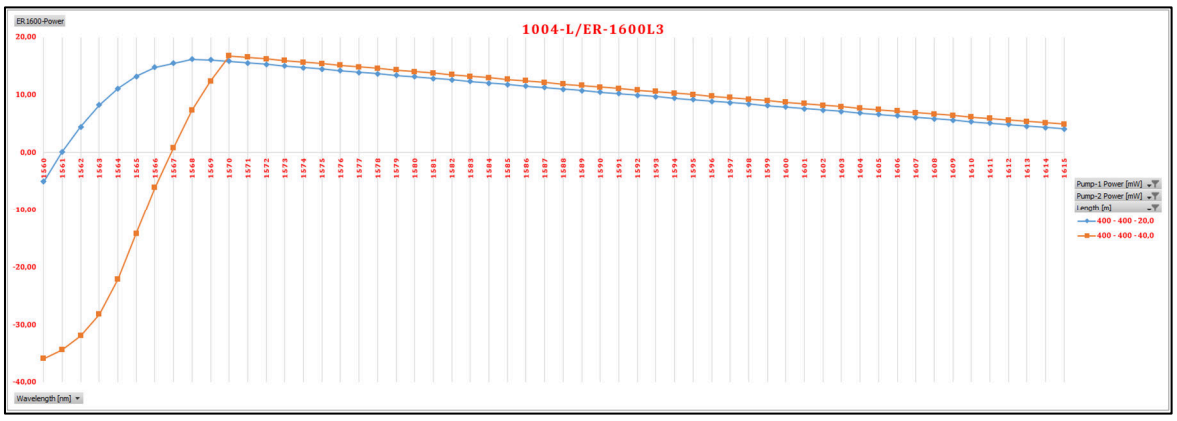
ER-1550C3 fiberinden elde edilen Şekil 4.10'daki grafiğe göre mavi renkli 20 metre uzunluğa sahip konfigürasyonun aralarındaki en zayıf güce sahip olduğu açıkça gözükmektedir. 40 ve 60 metrelik konfigürasyonlar kıyaslanacak olursa 1570 nm'den sonra aralarındaki tepe gücü farkı yaklaşık 1,5 dBm olup 1615 nm'e kadar aynı devam etmektedir. Bu iki iterasyon arasındaki en büyük fark başlangıç bantlarındaki çıkış güçleri olmaktadır.

Burada da C-band için yapılan simülasyonlarda fark edilebileceği üzere 1560 nm'den sonra çıkış gücü düşmeye başladığı için C+L bantta daha iyi bir değer elde edebilmek için 40 metrelik turuncu renkli serinin tercih edilmesi mantıklı olacaktır. Bu seride 1565-1610 nm aralığındaki bantta maksimum tepe gücü +16,81 dBm olurken minumum ise +6,03 dBm olup güç dalganlanması ise 10,78 dB olmaktadır.



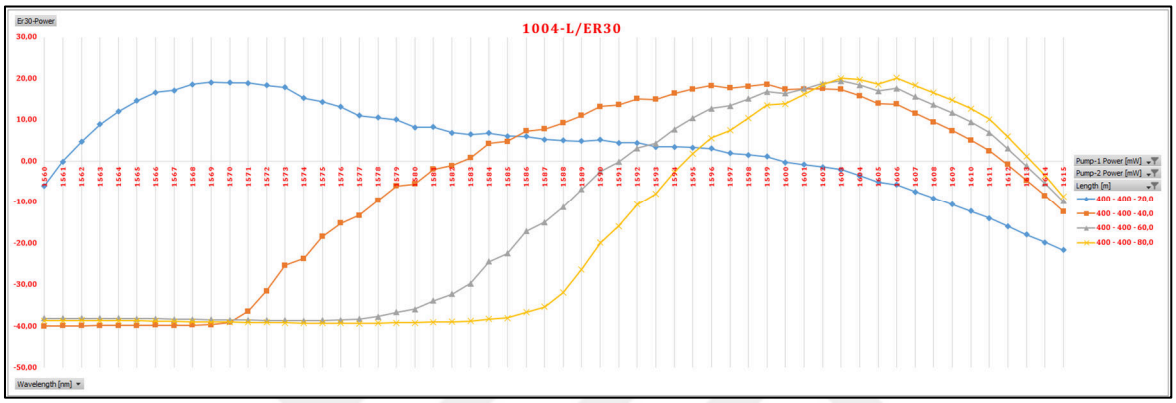
Şekil 4.10. 2-L nolu düzeneğin ER-1500C3 fiberi ile elde edilen en iyi 3 iterasyonun spektrum görünümü

ER-1600L3 kodlu fiberden alından sonuçlar Şekil 4.11'deki gibi olmuştur. Grafik incelenek olunursa mavi renkli 20 metrelik EKF ile alınan sonuçlar ortalama toplam güç ve çıkış gücü salınımı açısından daha iyi olduğu gözükmektedir. Bu seride ise 1565-1610 nm aralığında maksimum tepe gücü 1568 nm'de +16,20 dBm olurken minumum tepe gücü ise 1610 nm'de +6,18 dBm olup güç salınımı ise 10,02 dB olmuştur.



Şekil 4.11. 2-L nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 2 iterasyonun spektrum görünümü

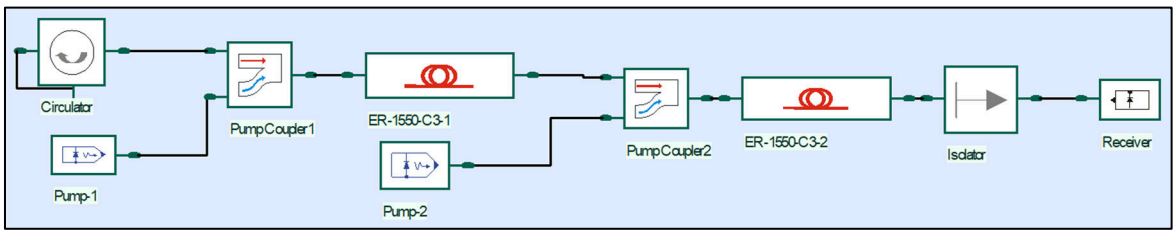
Er30 kodlu fiberden alından sonuçlar da Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu fiber türü önceki iki fiberden çok daha farklı bir tepki vermiştir. Grafikten de görülebileceği üzere 1565-1610 nm aralığında en iyi olan seriyi seçmek bu fiberde mümkün değildir. Burada en iyi sonucu 20 metrelik çıkış sprektrumu ile 40 metrelik çıkış spektrumunu birleştirerek elde etmek mümkün olacaktır. 20 metrelik seride maksimum tepe gücü 1569 nm'de +19,04 dBm olurken 40 metrelik seride maksimum tepe gücü 1599 nm'de +18,56 dBm olmuştur.



Şekil 4.12. 2-L nolu düzeneğin Er30 fiberi ile elde edilen en iyi 4 iterasyonun spektrum görünümü

4.3.2. Düzenek 3

Şekil 4.13'te 3 numaralı düzenek görülmektedir. Bu düzenek çift geçişli ileri yönlü pompalamalı bir konfigürasyon olup 1.etapta bulunan EKF'ler 20 metreden fazla olacak şekilde tercih edilmiş olup bu kısımda L-band ASE elde ettikten sonra ikinci etapta ise üretilen bu ASE ekstra bir optik yükseltme işlemine tabi tutulacak ve iterasyon parametreleri Çizelge 4.5'deki gibi ayarlanmıştır.

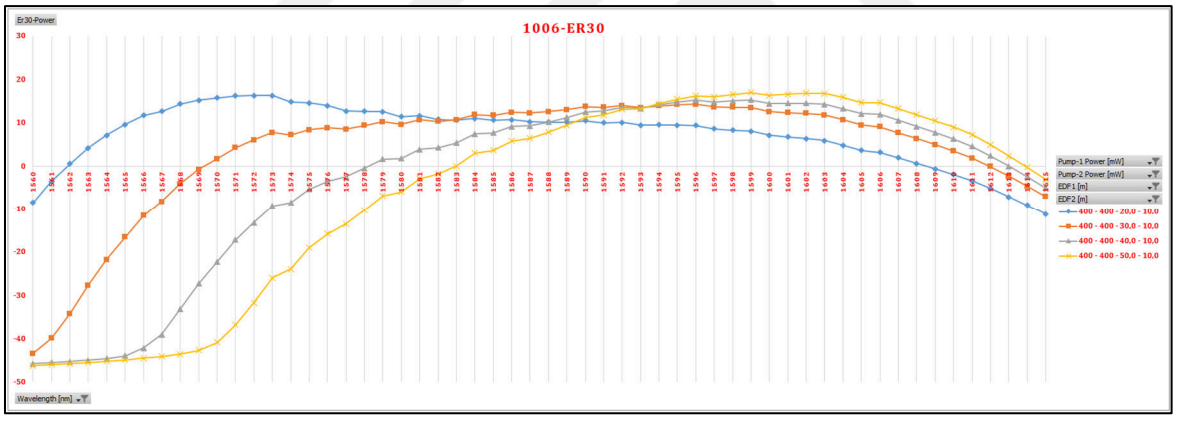


Şekil 4.13. 3 numaralı düzenek

Çizelge 4.5. 3 numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri

Düzenek Numarası	Çıkış Spektrumu		Pompa Lazer Gücü-1		Pompa Lazer Gücü-2		Pompa Lazer Dalgaboyu	EKF-1 Uzunluk (m)		EKF-2 Uzunluk (m)		EKF Türü
	Aralık (nm)	Adım Miktarı (nm)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Sabit	Aralık (m)	Adım Miktarı (m)	Aralık (m)	Adım Miktarı (m)	Sabit
3	1560-1615	1	100-400	100	100-400	100	1480 nm	10-80	10	5-15	5	Er30

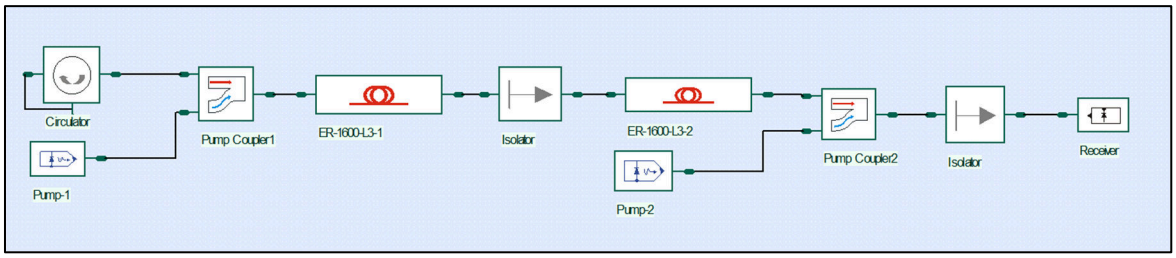
Er30 kodlu fiberden alından sonuçlar Şekil 4.14'de görülmektedir. Grafik incelenek olunursa gri ve sarı renkli seriler 1565-1578 nm aralığında 0 dBm'in altında kaldıkları için baştan elenebilirler. Bu düzenektede 2 numaralı düzenekte olan durumun bir benzeri görülmektedir. Tek başına bir iterasyon 1565-1610 nm aralığını kapsayamamaktadır. Bu düzenekte de iki iterasyon birleştirilip ortak bir çıkışta toplamanın daha umut vadeden bir sonuç vereceği düşünülmektedir.



Şekil 4.14. 3 nolu düzeneğin Er30 fiberi ile elde edilen en iyi 4 iterasyonun spektrum görünümü

4.3.3. Düzenek 4

4 numaralı düzenek Şekil 4.15'de gözükmektedir. Bu konfigürasyon 3 numaralı düzeneğe benzer olup farkı ikinci etaptaki EKF'yi geri yönlü pompalanacak şekilde çalışmasıdır. Ayrıca iki aşamayı izolatör ile birbirinden kısmen ayrıldığı söylenebilir. Bu şekilde ikinci etapta geri yönde oluşacak ASE'nin birinci etaba geçişi önlenmiş olmaktadır. Çizelge 4.6'da verilen iterasyon parametrelerine göre düzenek çalıştırılmıştır.

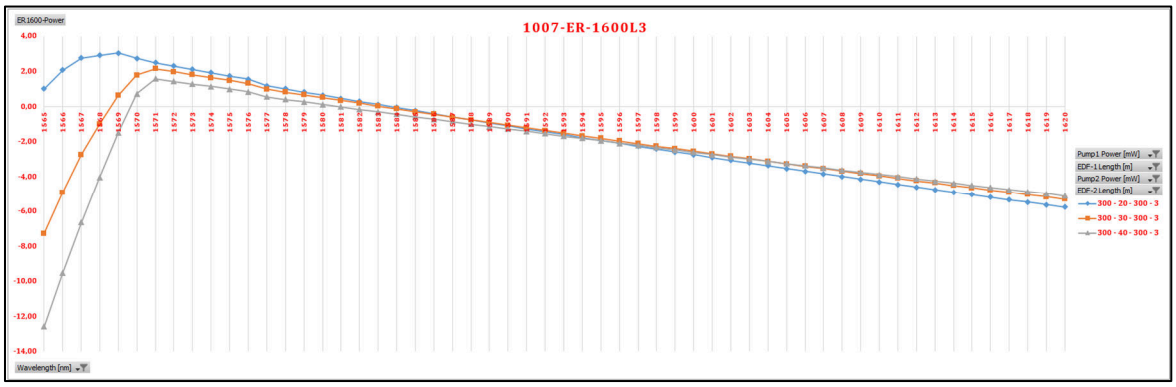


Şekil 4.15. 4 numaralı düzenek

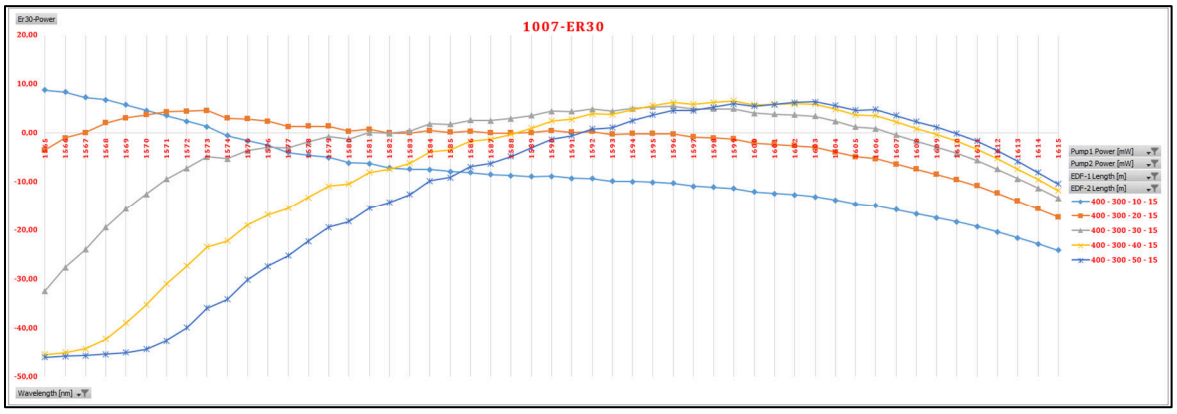
Çizelge 4.6. 4 numaralı düzenek için çalıştırılan iterasyon parametreleri

Düzenek Numarası	Çıkış Spektrumu		Pompa Lazer Gücü-1		Pompa Lazer Gücü-2		Pompa Lazer Dalgaboyu	EKF-1 Uzunluk (m)		EKF-2 Uzunluk (m)		EKF Türü
	Aralık (nm)	Adım Miktarı (nm)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Aralık (mW)	Adım Miktarı (mW)	Sabit	Aralık (m)	Adım Miktarı (m)	Aralık (m)	Adım Miktarı (m)	Sabit
4	1565-1620	1	50-300	50	50-300	50	1480 nm	20-120	10	3-15	3	ER-1600L3, Er30

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de görüldüğü gibi daha önceki düzeneklerle kıyaslandığında bu düzenekten elde edilen 2 farklı EKF türü içinde sonuçlar daha kötü olmuştur. Bundan dolayı ilerideki çalışmalarda 4 nolu düzenek ele alınmayacaktır.



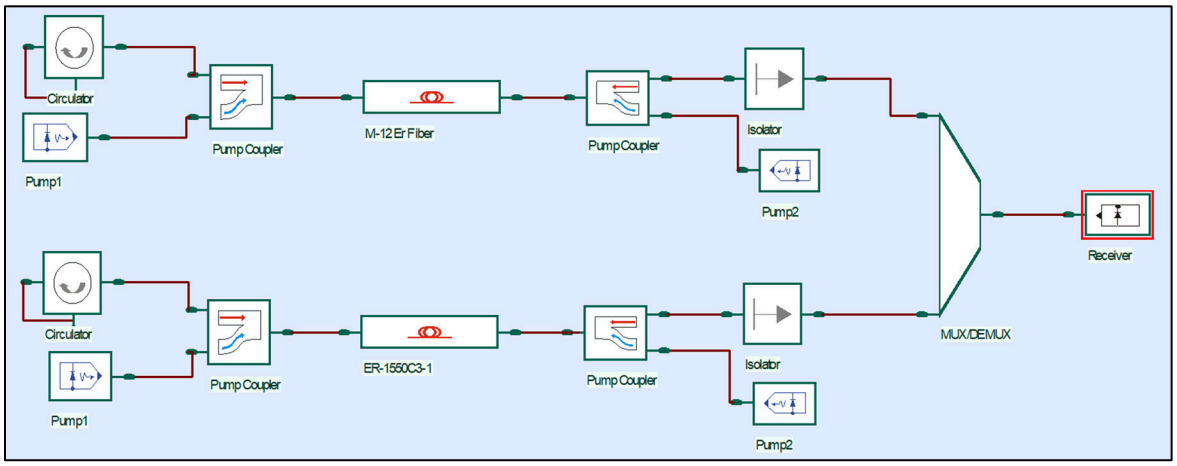
Şekil 4.16. 4 nolu düzeneğin ER-1600L3 fiberi ile elde edilen en iyi 3 iterasyonun spektrum görünümü



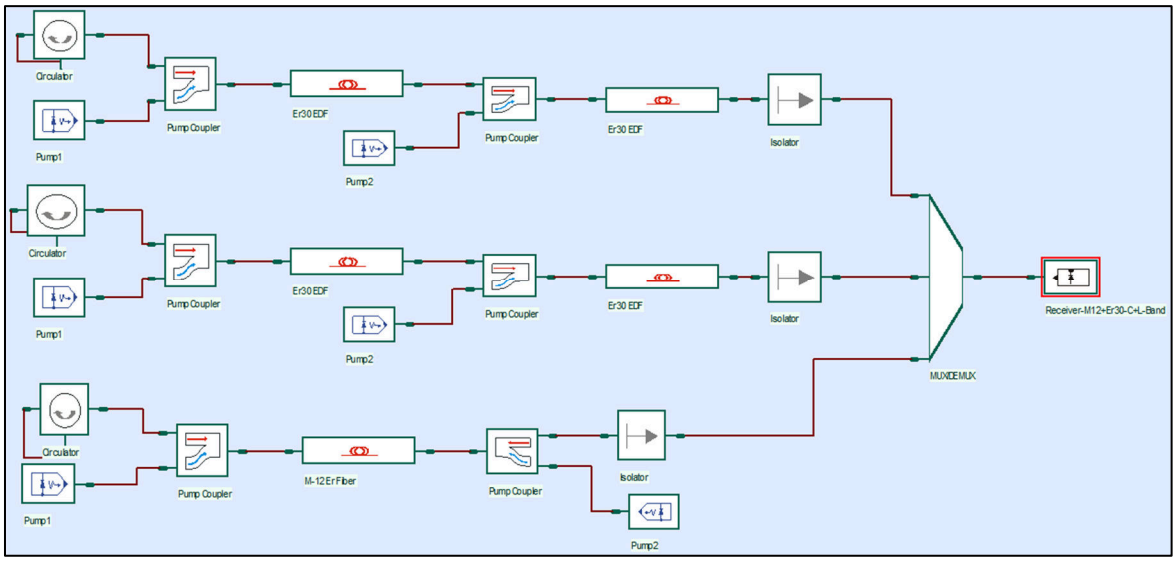
Şekil 4.17. 4 nolu düzeneğin Er30 fiberi ile elde edilen en iyi 5 iterasyonun spektrum görünümü

4.4. C+L-Band ASE Üretim Düzeneklerinin Simülasyonu

C+L-bantta ASE üretimi için önceki başlıklarda yapılan çalışmaların en iyileri MUX ile birleştirilip 2 farklı deney düzeneği kurulmuştur. C-band için en iyi düzenek olan 2 nolu düzenekte 3,5 metrelik M12 fiberi ile çift yönlü pompalama ile elde edilen konfigürasyon olmuştur. L-band ASE üretimi için Şekil 4.18'de görülen 2 nolu düzenekte ER-1550C3 fiberi ile yapılan çalışmadan elde edilen spektrumun birleştirilmesi ile C+L-band ASE kaynağı oluşturulmuştur.

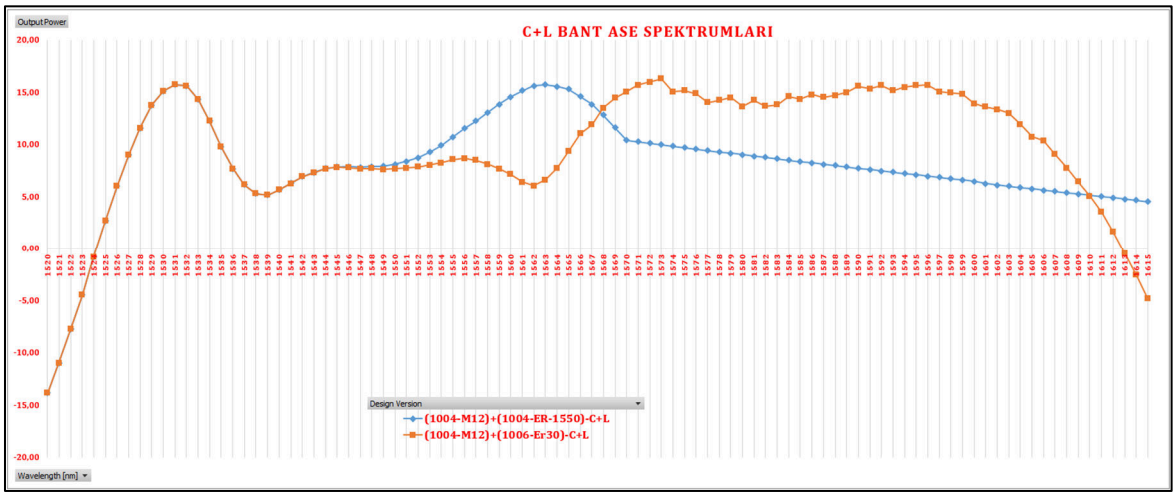


Şekil 4.18. [2-M12] + [2-ER-1550]- konfigürasyonlar ile oluşturulan C+L-band düzenek



Şekil 4.19. [2-M12] + [3-ER30] konfigürasyonları ile oluşturulan C+L-band düzenek

İkinci C+L-band ASE üretimi için birleştirilen düzenekler Şekil 4.19'da görülmektedir. Bu düzenekte öncekine göre değişen kısım L-band üretimi için kullanılan düzenek olmuştur. L-band ASE üretimi için 3 nolu düzenekte 1.etapta 20 metrelik fiber uzunluğuna sahip olan düzenek ile yine 3 nolu düzenekte 1.etapta 30 metrelik fiber uzunluğuna sahip düzenek birleştirilmiştir. Bu iki düzenekte 2.etapta kullanılan EKF'nin uzunluğu 10 metredir.



Şekil 4.20. C+L-band düzeneklerinden elde edilen spektrum çıktıları

Şekil 4.20'de C+L-band düzeneklerine ait spektrumlar gözükmektedir. İki düzeneği kendi arasında kıyaslayacak olursak Şekil 4.19'de kurulan düzeneğin toplam güç ve istenilen bant genişliğinde daha iyi sonuç verdiği açık bir şekilde gözükmektedir. Buradan anlaşılabileceği

üzere C+L-band ASE üretimi için M12 ve Er30 fiberlerinin farklı düzenekler ile kurulup bir araya getirilmesi gerekmektedir.

5. ÇOKLU POMPA LAZER SÜRÜCÜ TASARIMI

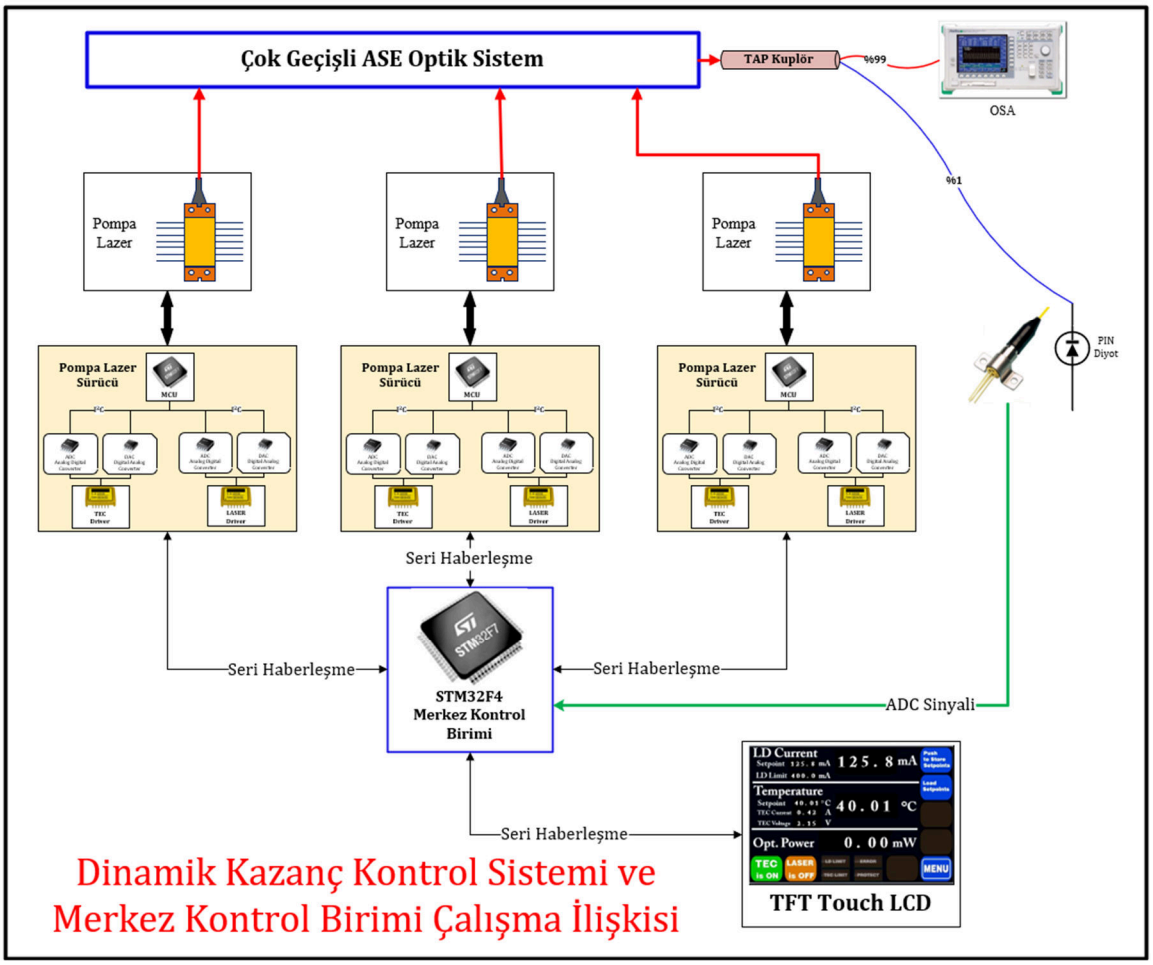
Simülasyon çalışmaları sonucunda ihtiyaç duyulacak olan lazer sayısının 3 olabileceği öngörülmüştür. Gerçek deneylerden alınan sonuçlara göre bu sayının artma ihtimali de olduğundan lazer sürücü kartlarını esnek ve çoğaltılabilir şekilde tasarlamak gerekmektedir. Kullanılacak olan lazerlerden en azı 200 mW optik çıkış gücüne yaklaşık 1 A akım ile çıkabilmektedir. Bu durum 500 mW'lik güce sahip lazerlerde ise 4 A'e kadar çıkabilmektedir. Burada bahsi geçen akım değerlerini verebilecek lazer sürücüler genellikle "yüksek güçlü lazer sürücüler" sınıfına girmektedir. Bundan dolayı tasarlanacak olan lazer sürücü kartlarının yüksek güçlü lazerleri sürebilecek nitelikte olması gerekmektedir.

Bu gibi akımlar söz konusu olduğunda kullanılacak olan yarı iletkenlerde açığa çıkan ısı miktarı artmaktadır ve aktif soğutma yapılması gerekmektedir. Yukarıda anlatılan durumlar göz önüne alındığında tek bir kartta 3 lazeri aynı anda sürebilecek bir tasarım yapmak esnek olmayacağı gibi tasarım açısından da mantıklı olmayacaktır. Bu kartların birbirleriyle paralel çalışması lazer sürücünün nominal çalışma fonksiyonlarını sekteye uğratabileceğinden 3 lazerin parametrelerini aynı anda kontrol edebilecek başka bir anakart tasarımı yapılmıştır. Böylelikle yapılan ana kontrol kartı ile 5 adete kadar lazer sürücü kartı bağlanabilecektir. Ayrıca lazer sürücü kartları da ihtiyaca göre dizileceğinden ekonomik anlamda da daha mantıklı bir seçim olacaktır.

Bu mantık ile lazerlerde son derece mühim olan sıcaklık kontrolü ve akım kontrolünü yapacak olan işlemci başka bir görev ile meşgul edilmeyecek olup, akım ve özellikle de sıcaklık kontrolünün üst seviyelerde yapılması mümkün olacaktır. Tasarlanacak olan ana kontrol kartı lazerlere gerekli komutları gönderip istenilen parametrelerde lazerlerin çalışmasını sağlarken aynı zamanda da kullanıcıdan gelen talepleri dokunmatik LCD ekran üzerinden veya bilgisayar üzerinden algılayıp lazerlere gerekli koumutları gönderecektir. Ayrıca ilerleyen aşamalarda ayarlanabilir filtre veya optik anahtar gibi elemanların kullanılması durumunda bu elemanların kontrolünü de yine bu anakart üzerinden yaptırılması planlanmıştır. Ayrıca tüm sistemin optik çıkış gücü de sisteme eklenecek bir PIN diyot yardımı ile takibi yapılması ve kullanıcıya ekranda gösterilmesi planlanmıştır.

ASE ışık kaynağı bu tez çalışmasının sonunda bir kutuya sığdırılıp ürün haline getirilmesi planladığından dolayı piyasada satılan hazır lazer soketler kullanılırsa ürün kutusunda

gereksiz bir fiziksel genişlemeye sebep olacaktır. Bu da ürünün ergonomikliğini bozacaktır. Bundan dolayı pompa lazerlerin yerleştirileceği soketleri de özgün olarak tasarlamaya karar verilmiş olup aynı zamanda bunlara uygun alüminyum soğutucu plakaları da bu karta uygun bir şekilde kestirilmiştir. Lazer sürücülerin nasıl çalışacağına dair genel blok diyagramı Şekil 5.1'de verilmiştir.

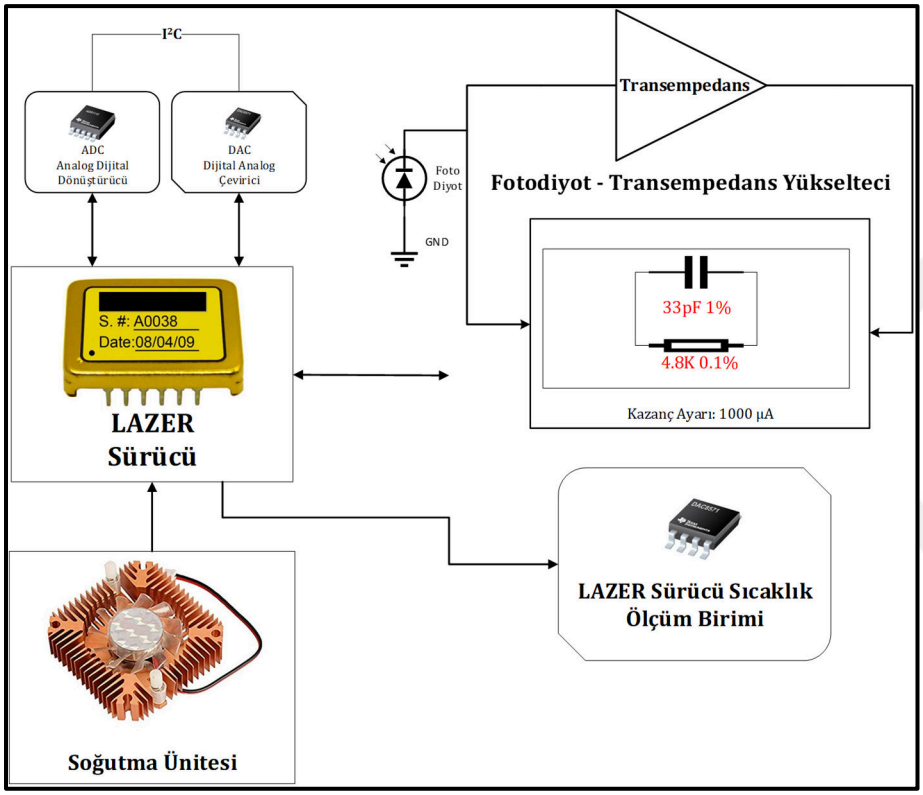


Şekil 5.1. Lazer sürücü sisteminin çalışmasını gösteren genel blok diyagramı

Lazer sürücü kartı temel olarak 3 ayrı başlıkta incelenebilir. Bunlardan ilki lazerin sabit akımda sürmekten görevli olan kısmı, ikincisi lazer diyotun sıcaklık kontrolünü yapacak kısım olan TEC sürücü devresi ve üçüncü olarak ta geriye kalan sistemleri sayabiliriz.

5.1. Lazer Sürücü

Şekil 5.2'de lazer sürücüye ait blok diyagramı görünmektedir. Lazer sürücünün kontrolü DAC ve ADC entegreleriyle I^2C haberleşme sayesinde yapılmaktadır. Lazerin optik gücünü okumak için ise transempedans yükselteci kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Lazer sürücü blok diyagramı

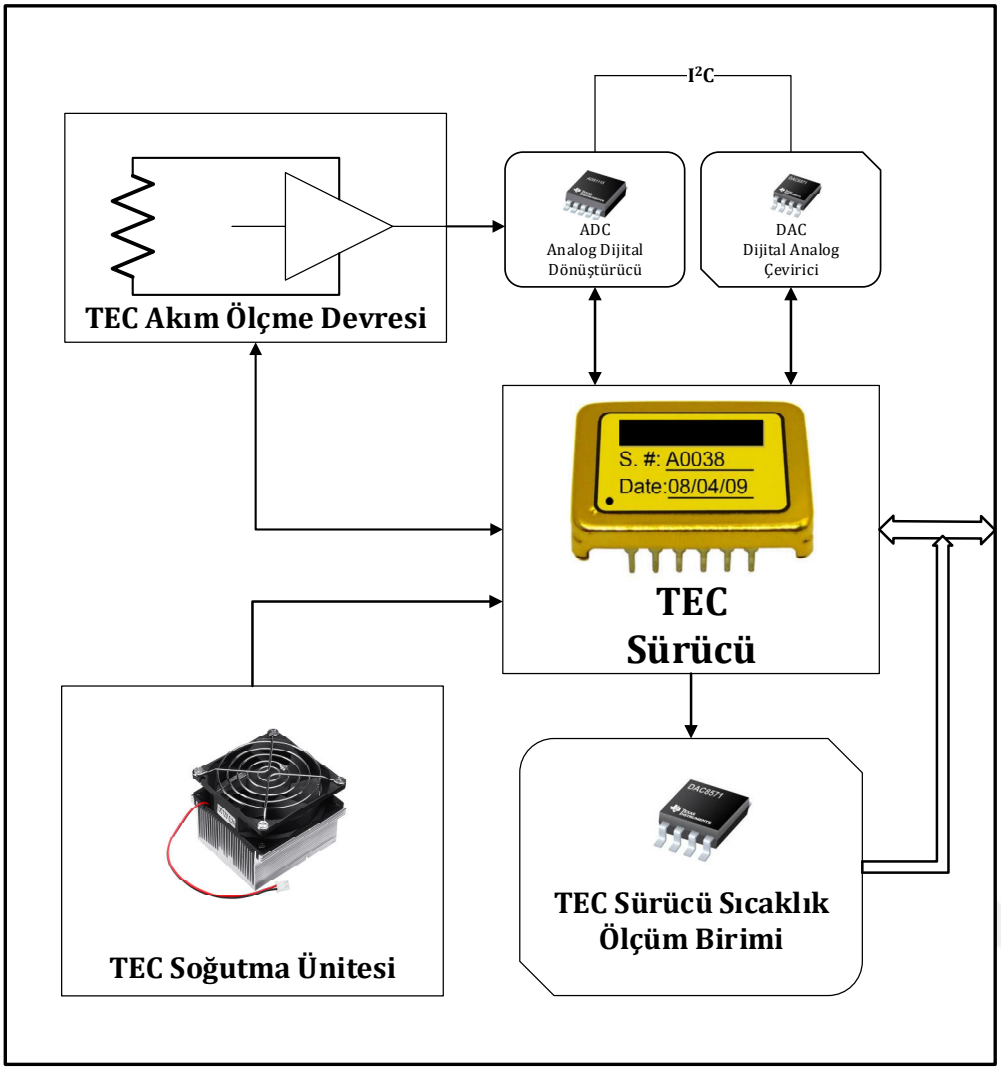
Yüksek akım geçen lazer sürücü zaman geçtikçe ısınacak ve soğutulmaya mecburdur. Eğer soğutma işle düzgün yapılmazsa sürücünün verimi düşüp sağlayabildiği güç değeri de düşmekle kalmayıp belirli bir sıcaklıktan sonra da kendini kapatacaktır. Bundan dolayı sürücünün iyi şekilde soğutulması gerekmektedir. Soğutma işini yapmak için seçilen fanlı alüminyum soğutucu bloğu Resim 5.1'de görülmektedir. Sürücünün kılıfına iliştirilecek olan termistör yardımıyla sıcaklık değeri okunup merkezi işlem birinin kontrolünde gerekli aktif soğutma işlemi soğutucu bloğun üstünde bulunan fan yardımı ile yapılacaktır.



Resim 5.1. Fanlı alüminyum soğutucu bloğu

5.2. TEC Sürücü

TEC sürücü ait blok diyagramı Şekil 5.3'de görüldüğü gibi tasarlanmıştır. Lazer sürücüde olan ısınma problemlerinin aynısı burada da söz konusu olmaktadır. Bundan dolayı bu sürücünün metal kılıfının da üstüne Resim 5.1'de görülen soğutucu bloktan da montaj yapılmıştır. Aynı şekilde kılıfın üzerine yerleştirilen bir termistör yardımı ile sıcaklık bilgisi okunup gerekli soğutma merkezi işlem birimi tarafından yapılacaktır.



Şekil 5.3. TEC sürücü blok diyagramı

5.3. TFT Dokunmatik LCD Ekran

Yapılan sürücü kartılarının kontrolleri bu ekran üzerinden yapılmaktadır. Bazı menülere ait görüntüler Şekil 5.4'de verilmiştir. Ekran işlemci ile UART üzerinden haberleşecek olup 3.5" büyüklüğe sahiptir.



Şekil 5.4. TFT dokunmatik ekran görüntüleri

5.4. Güç Kaynağı Seçimi

Çalışmada kullanılacak olan TEC ve lazer sürücülerin besleme gerilimi 5V için 18A'lik bir anahtarlamalı güç kaynağı tercih edilmiştir. Son yıllarda çıkan anahtarlamalı güç kaynakları lineer güç kaynaklarına göre verimi daha yüksek olup fiziksel olarak daha küçük boyutlarda olduğu için bu tip kaynak tercih edilmiştir. Tasarlanan kartta lazer ve TEC sürücü 4'er A'lik bir yük beslemesine sahip olacaktır. %96'ya varan verimleri sayesinde besleme akım için 4,5 A yeterli olabilmesine rağmen herhangi bir güç problemi yaşanmaması için her sürücü için 1,5 kat fazla akım kapasitesi sağlayabilecek şekilde hesaplanmış olup Çizelge 5.1'de verilen komponentlerin besleme güçleri de hesaba katılıp 18A'lik bir güç kaynağı tercih edilmiştir.

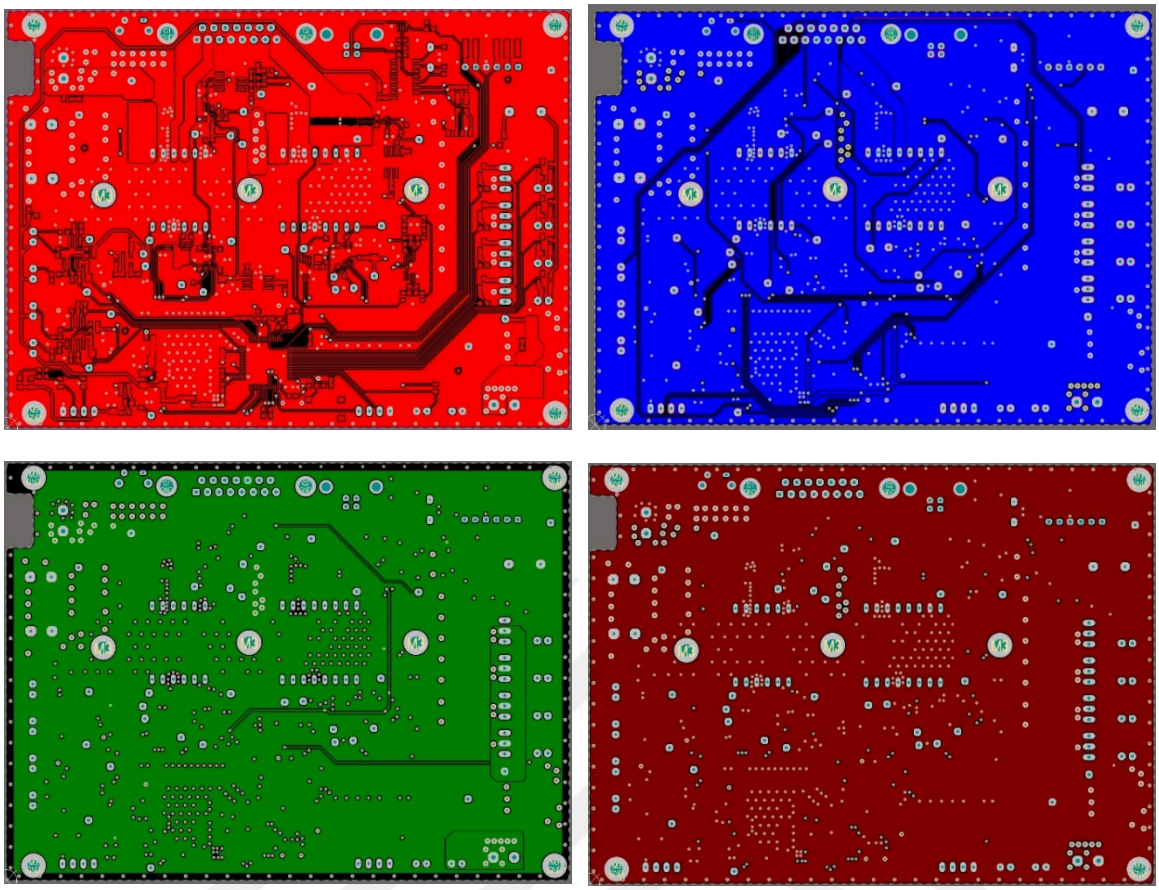
Çizelge 5.1. Elektronik kontrol kartında bulunan komponentlerin güç değerleri

Kaynak	Açıklama	Komponent	Miktar	Anma Akımı	Kaynak Gerilimi	Toplam Anma Akımı	Tüketim Gücü
+REF_TEC_5V	LASER-ADC	ADS1115	1	0,150 mA	5,00 V	0,150 mA	0,75 mW
+REF_TEC_5V	LASER-DAC	DAC8571	1	0,160 mA	5,00 V	0,160 mA	0,80 mW
+REF_TEC_5V	LASER/TEC-DAC	DAC8574	1	0,950 mA	5,00 V	0,950 mA	4,75 mW
+REF_TEC_5V	TEC-DAC	DAC8571	1	0,160 mA	5,00 V	0,160 mA	0,80 mW
+REF_TEC_5V	TEC-Current-Sense	INA213	1	0,100 mA	5,00 V	0,100 mA	0,50 mW
+REF_TEC_2V5	TEC-Current-Sense	INA213	1	0,035 mA	2,50 V	0,035 mA	0,09 mW
+REF_TEC_5V	TEC-ADC	ADS1115	1	0,150 mA	5,00 V	0,150 mA	0,75 mW
+REF_TEC_5V	TECCRT-DAC	MCP4725A0	1	0,400 mA	5,00 V	0,400 mA	2,00 mW
+3V3	MCU	STM32F732RET6	1	200,0 mA	3,30 V	200,0 mA	660,00 mW
+REF_3V3	MCU-Analog Vref	STM32F732RET6	1	0,500 mA	3,30 V	0,500 mA	1,65 mW
+3V3	LEDs	805 LED	6	5,000 mA	3,30 V	30,000 mA	99,00 mW
+3V3	Thermistor Reference	REF200	3	0,200 mA	3,30 V	0,600 mA	1,98 mW
+REF_3V3	Thermistor Op-Amps	OPA2320	1	3,000 mA	3,30 V	3,000 mA	9,90 mW
+REF_3V3_2	Thermistor Op-Amps	OPA2320	2	3,000 mA	3,30 V	6,000 mA	19,80 mW
+3V3	USB-UART	CH340G	1	12,000 mA	3,30 V	12,000 mA	39,60 mW

Kutu içinde bulunacak olan lazer ve TEC sürücünün soğutucuları ayrıca kutu içerisindeki sıcak havayı dışarı atacak olan fanın ve diğer bazı komponentlerin besleme gerilimleri 12V olduğundan bunlarda Çizelge 5.1'deki gibi hesaplanıp 3 A'lik bir anahtarlamalı güç kaynağı tercih edilmiştir.

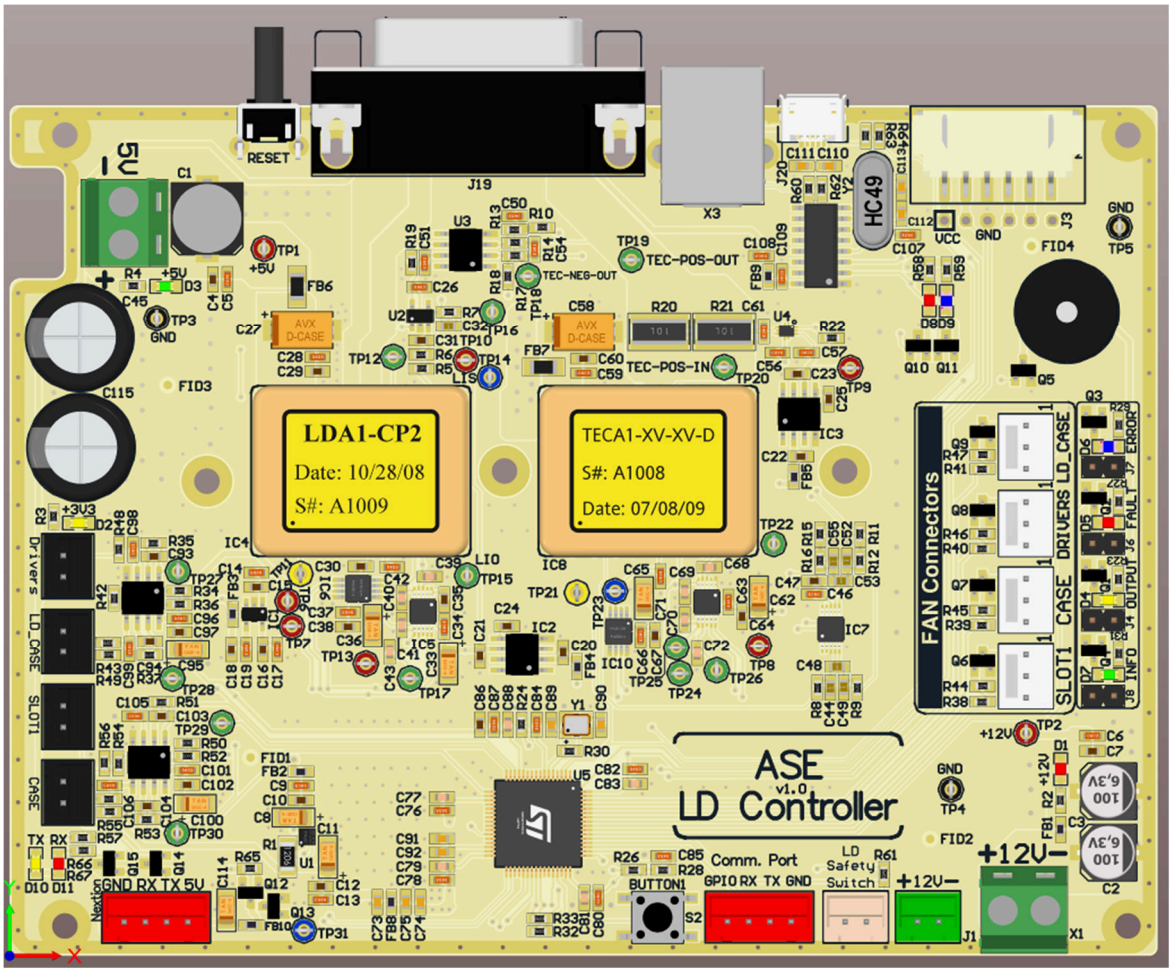
5.5. Baskı Devre Tasarımları

Yukarıda anlatılan tasarımlar Altium Designer 21.1'de IPC standartlarına uygun olabilecek şekilde 4 katmanlı olarak çizilmiş olup baskı devre kartları Çin'de üretilmiştir. Baskı devreye ait çizim görüntüleri Şekil 5.5'de verilmiştir.



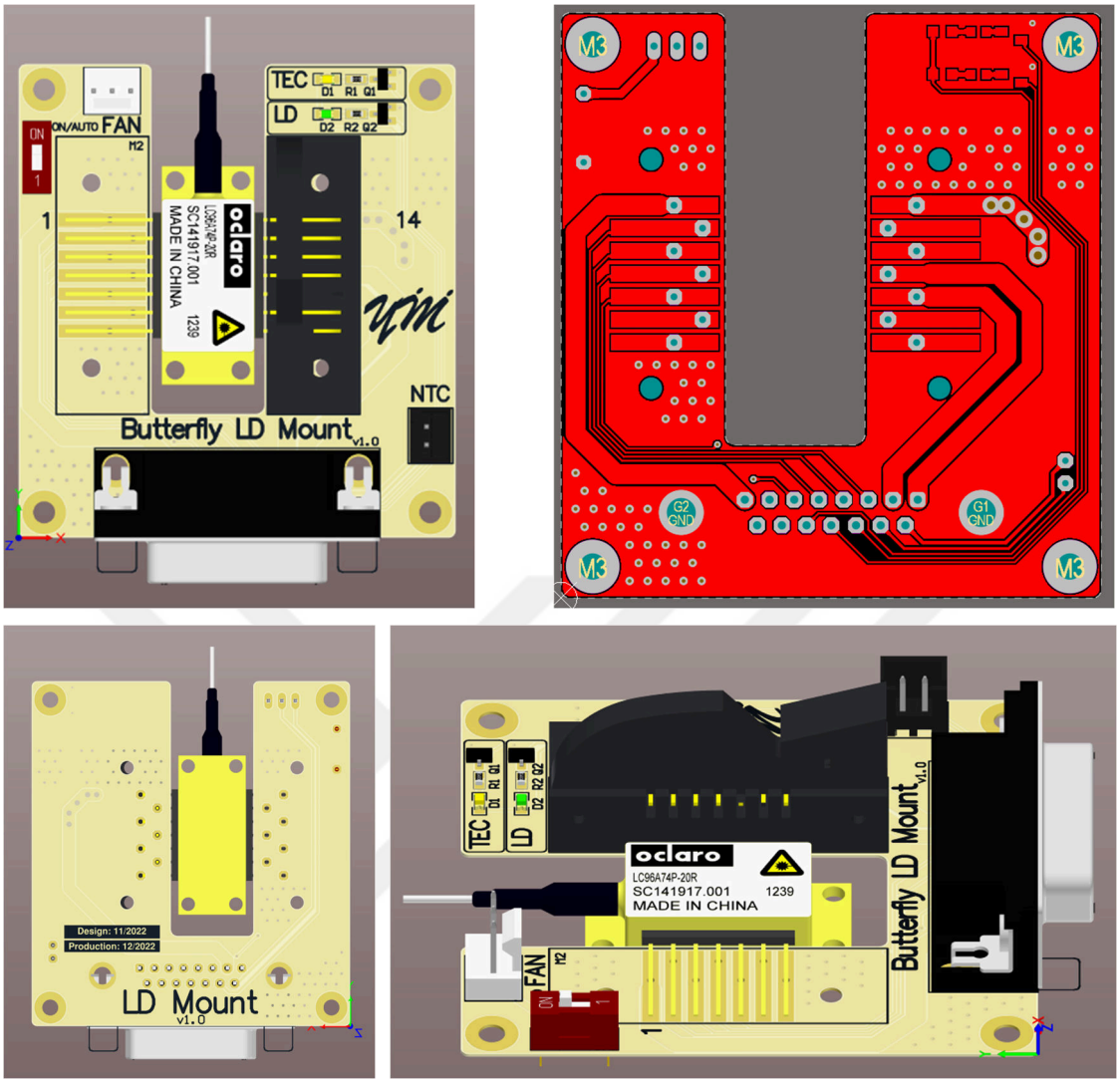
Şekil 5.5. Dört katmanlı lazer sürücü kartının katman görüntüleri

Lazer sürücü kontrolör kartına ait 3 boyutlu görselleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Lazerlerin monte edileceği PCB Şekil 5.7'de verilmiştir. Bu yapılan tasarım sayesinde piyasada bulunan diğer lazer montaj ürünlerinde olmayan bazı özellikleri bu çalışmadan çıkacak olan ürüne kazandırılmıştır. Bu özelliklerden başlıca gerekli olan özellik lazerin kılıf sıcaklığının takibinin yapılmasıdır. Yüksek güçlü lazerlerin iç sıcaklıklarını sabit tutarken TEC akımları yükselmekte ve lazerin içi soğuk tutulurken dış kılıfına aktarılan ısı miktarı artmaktadır. Bu da lazerin kılıfının ısınmasına neden olmaktadır. Normal durumlarda bu ısı lazerin oturtulduğu alüminyum soğutucu ile pasif soğutma yapılarak lazerin kılıfından atılmaktadır. Fakat yüksek güçlü lazerlerde bu ısı belirli bir zamandan sonra lazerin kılıfından yeterince ısı atılamaması ile sonuçlanmaktadır. Bu durumda da lazerin içi yeterince soğutulamamakta olup, TEC akımı daha da çok artarak lazerin kılıfının daha da çok ısınmasına sebep olmaktadır.



Şekil 5.6. Pompa lazer sürücü kartı

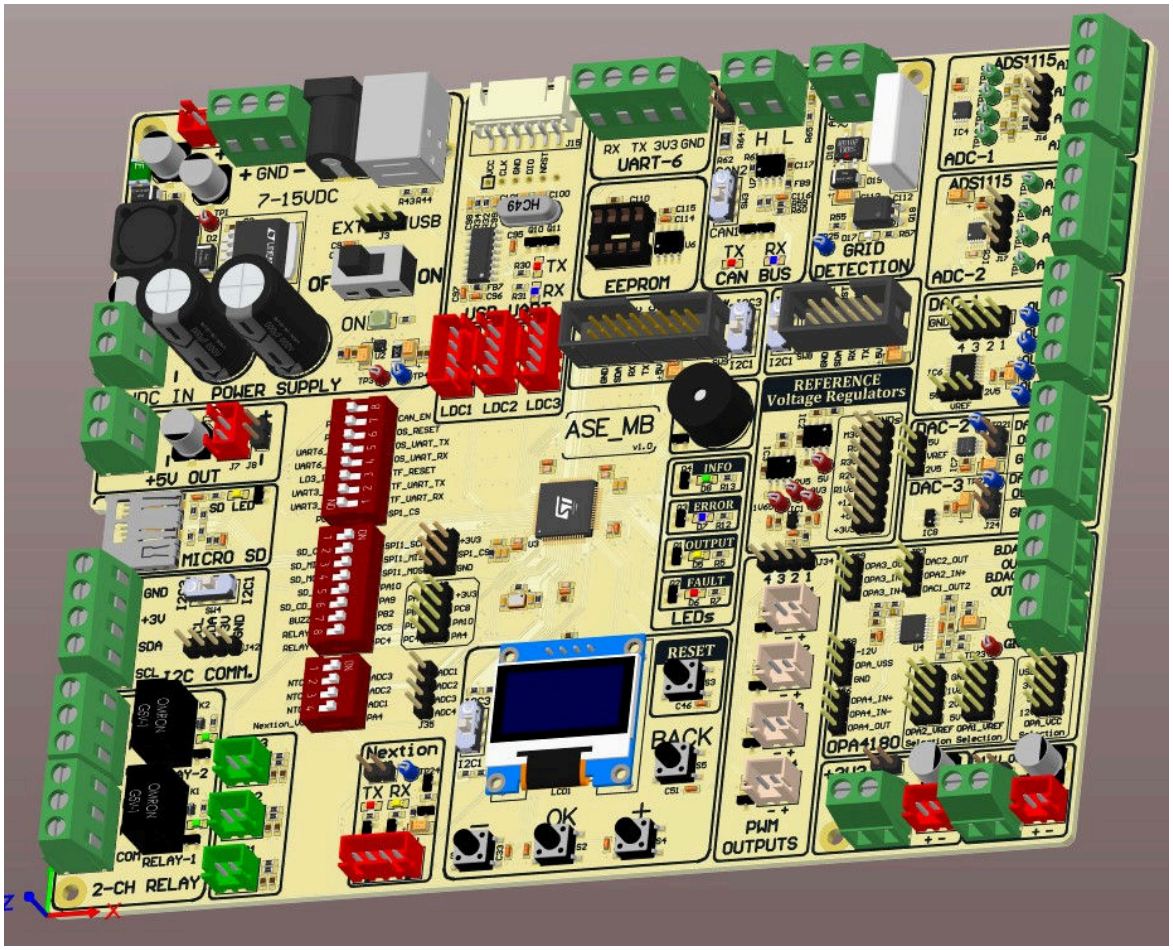
Bu sonsuz döngüye müdahale edilmezse lazer belirli bir maksimum sıcaklık değerinden sonra bozulmaktadır. Bundan dolayı lazer soketlerine bir sıcaklık sensörü girişi ve fan çıkışı eklenmiştir. Böylelikle her lazer kendi kontrol kartından dış kılıf sıcaklığı da takip edilerek kendisinin bağlı bulunduğu alüminyum soğutucuya montajı yapılacak olan fan tarafından soğutularak kutu içerisine ısının yayılması sağlanacaktır. Kutunun içinin ısınması da kutuda bulunacak olan daha güçlü bir fan ile kutu içindeki ısıyı sabit bir sıcaklıkta tutacak şekilde otomatik olarak kontrol edilerek, gereksiz fan gürültüsünün de önüne geçilecektir.



Şekil 5.7. Pompa lazer montaj kartı

Anakartın görselleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Bu kart yukarıda bahsedilen özellikleri gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış olup sonradan lazım olma ihtimali olan başka özellikler de eklenerek çizimi yapılmıştır. Anakartın en büyük özelliklerinden birisi de elektrik kesintilerinde lazerlerin kontrollü bir şekilde kapanmasını sağlayacak olmasıdır. Kartta bulunan şebeke gerilimi algılayıcı devresi elektrik kesintisinde mikroişlemciye bilgi vererek elektrik kesintisi tespiti yapılacaktır. Bu sırada kartlarda bulunan yüksek kapasiteli kondansatörler sayesinde kartın besleme gerilimi olan 5V gerilimi hemen düşmeyip belirli bir süre daha kartı besleyebilecek durumda tasarımlar yapılmıştır. Kapasitörlerin sayesinde çalışmaya devam eden kartlar böylelikle lazerlerin veya diğer sistemlerin kontrollü bir şekilde kapatılması için gereken süreyi sağlayacaklardır.

Tasarımları ve çizimleri yapılan kartların prototip üretimi için Çin'e gönderilmiştir. Anakart ve lazer soket kartları 2 katmanlı, lazer sürücü kartı iste 4 katmanlı çizilmiştir. Özellikle lazer sürücü kartı 4 katmanlı olduğu için ülkemizdeki PCB üreticilerinin kalitesi yetersiz olduğundan Çin'de daha kaliteli PCB üretimi yapan fabrikalardan hizmet alınması tercih edilmiştir. PCB'ler ile birlikte her kart için ayrı çelik elek siparişi de verilmiştir. Çelik elek sayesinde SMD malzemelerin dizgisinde daha az problem çıkmakta olup lehim ve dizgi işleri daha hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.



Şekil 5.8. Lazerleri kontrol edecek ve ürünün diğer fonksiyonlarını yerine getirecek olan anakart

5.6. Lazer Sürücü Kontrol Yazılımı

Lazer sürücünün haberleşmesi USB üzerinden seri port dönüştürücü yardımıyla yapılmaktadır. Sürücünün bilgisayar ile haberleşmesinde kullanılacak olan bütün komutlar gömülü sistemine yazılarak haberleşmesi sağlanmıştır.

Örnek verecek olursak;

Lazerin gücünü açmak veya kapatmak için aşağıdaki gibi bir komut seri port üzerinden lazer sürücüye gönderilerek yapılabilmektedir.

“LD,P,ON,\r\n” → Lazer gücünü aç.

“LD,P,OFF,\r\n” → Lazer gücünü kapat.

Lazerin hedef akım değerini ayarlamak için,

“LD,S,C,400.2,\r\n” → Lazer hedef akımını 400.2 mA’e ayarla.

Buradaki “LD” lazeri, “S” ayarla anlamına gelen “SET” ifadesini, “C” “curren setpoint” i ifade etmekte olup komutları ayırmak için ise “,” sembolü kullanılmıştır.

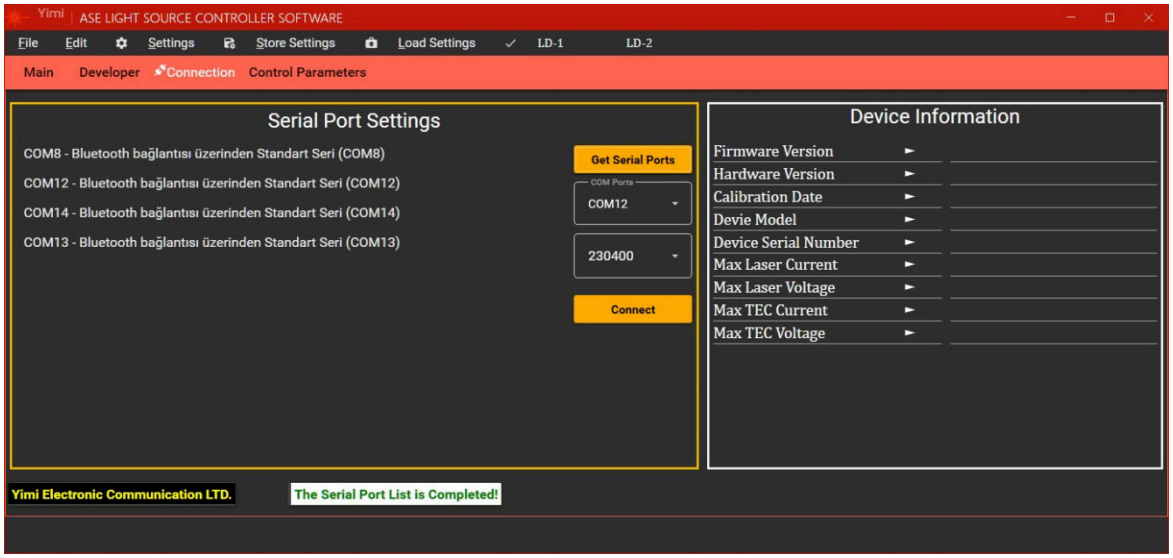
Yukarda verilen örneklerde olduğu gibi lazer sürücünün, TEC sürücüsünün ve cihazın kalan ayarlarını da kontrol etmek için buna benzer komutlar yazılıp cihazın bilgisayar ile haberleşmesi sağlanmış olunmaktadır.

5.7. Arayüz Tasarımı

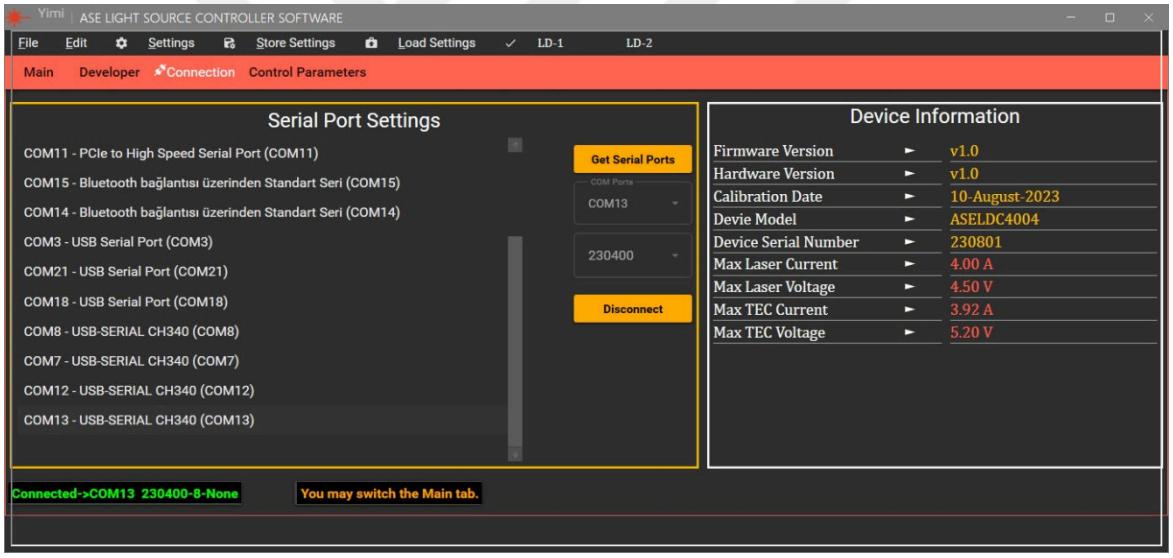
Arayüz tasarımı “wpf” uygulaması ile yapılmıştır. Programın evrensel olması hedeflenmiş olup şu an için sadece İngilizce dil desteği ile hazırlanmıştır. Program bilgisayara kurulduktan sonra açılış ekranı olarak Resim 5.2’de görülen cihaz ile iletişime geçilecek olan seri haberleşme portu seçilmesi istenmektedir.

Haberleşme portu seçildikten sonra “Connect” butonuna tıklanıp bağlantı durumu pencerenin en altında bulunan bilgi ekranından takip edilebilmektedir.

Resim 5.3’de görülebileceği üzere bağlantı kurulduktan sonra ekranın alt kısmında bulunan “You may switch the Main tab” yazısı göründükten sonra arayüzün ana ekranına geçiş yapılacaktır. Bağlantı işlemlerinin yapıldığı bu ekranın sağında ise başarılı bir bağlantı kurulduğunda cihazın özelliklerini içeren kısımdaki bilgiler yüklenmektedir.

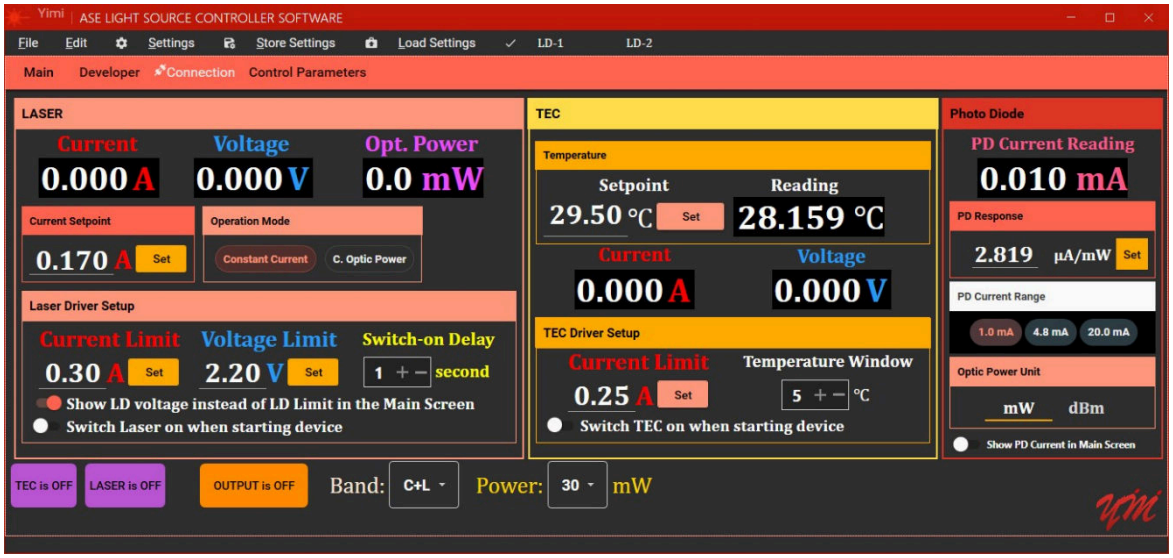


Resim 5.2. Haberleşme portu seçim ekranı



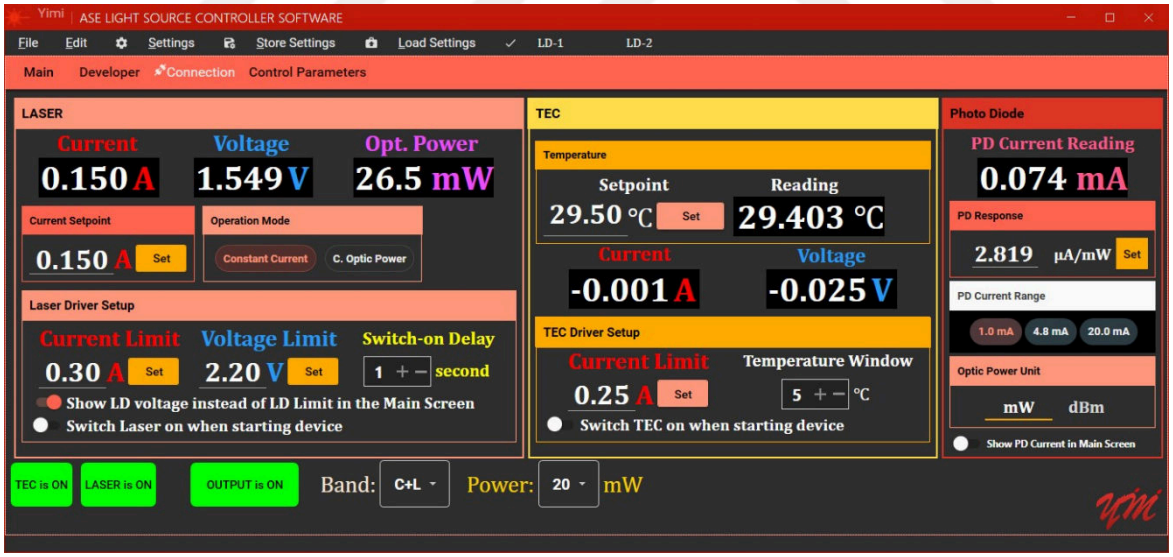
Resim 5.3. Cihaz bilgilerinin geldiği ekran

Ana ekran pencere görünümü Resim 5.4'deki gibidir. Bu ekran temel olarak 3'e ayrılmıştır. Soldaki ilk bölüm lazerin paremetrelerine, ortadaki bölüm TEC için ayrılmış olup sıcaklık ayarının yapıldığı kısım olmaktadır. Üçüncü bölüm ise lazerin fotodiyotu ile ilgili parametrelerin bulunduğu kısımdır. Sürücü üzerinde üç ayrı sayfada yapılabilen bu ayarlar bilgisayar üzerinden kullanırken hepsi tek bir ekran üzerinden ayarlanabilmektedir.



Resim 5.4. Ana kontrol ekranı

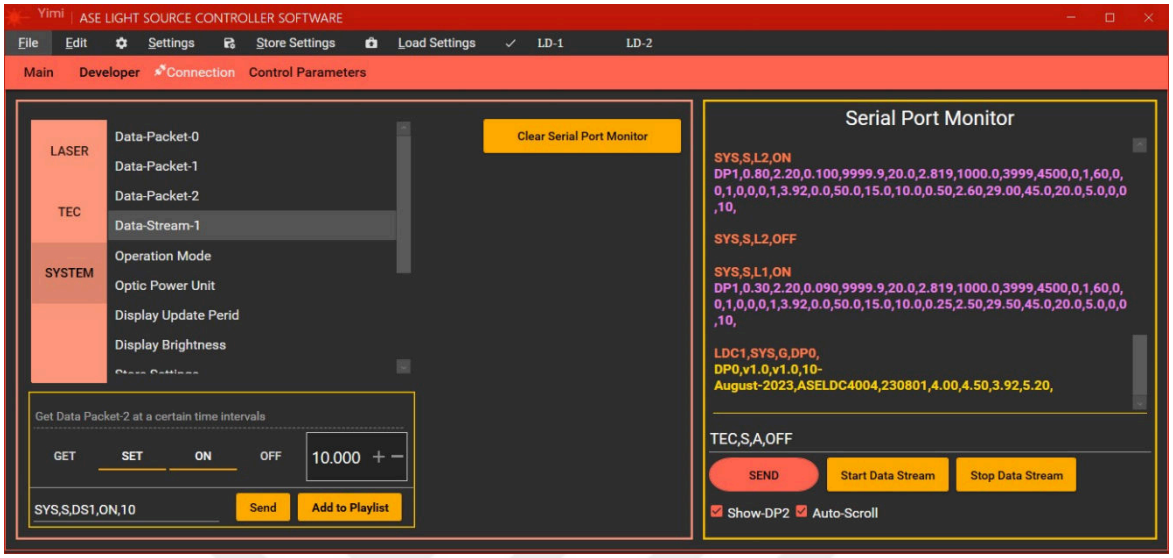
Lazer ve TEC açıldıktan sonra sürücü üzerinden bütün parametreler belirli bir periyotta sürekli olarak bilgisayara gönderilmektedir. Gelen veriler ise Resim 5.5'de görülen ekranda ilgili yerlerde gösterilmesini sağlanarak arayüzün çalışması gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.5. Gelen verilerin ekrana yansıması

Resim 5.6'da görülen "Devoloper" sekmesinde ise bir "serial port monitor" ekranı tasarlanmış olup buradan sürücü ile bilgisayar arasındaki yapılan haberleşmede kullanılan veri paketleri izlenebilmektedir. Ayrıca ekranın sol kısmında sürücünün kontrol komutlarını içeren veri gurupları bulunmaktadır. Bu sayede laboratuvarda çalışan geliştirici niteliğinde

olan araştırmacılar için cihazın komutlarını basit anlamda nasıl kullanıldığını deneyimlemeleri mümkün hale gelmektedir.



Resim 5.6. Geliştirici ekranı

6. DENEYSEL KURULUM

Bu tez çalışmasının temel amacı, C+L bandında çalışan, yüksek optik çıkış gücüne, geniş bir spektral bant genişliğine ve özellikle düz bir kazanç profiline sahip bir ASE ışık kaynağının tasarlanması, gerçekleştirilmesi ve optimizasyonudur. Bu hedeflere ulaşmak amacıyla kurulan deneysel düzenek, teorik analizler ve kapsamlı simülasyon çalışmaları ışığında titizlikle tasarlanmıştır. Deneysel kurulumun temelini, ileri ve geri yönlü olmak üzere çift pompalama mimarisine sahip, çift geçişli (double-pass) bir EKF oluşturmaktadır.

Bu bölümde, deneysel düzenekte kullanılan tüm aktif ve pasif optik bileşenlerin seçim kriterleri, teknik özellikleri ve sistem içerisindeki rolleri ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır. Aktif kazanç ortamı olarak seçilen Erbiyum katkılı fiberin özelliklerine, özellikle de Doğrudan Nanopartikül Biriktirme (Direct Nanoparticle Deposition - DND) üretim teknolojisinin getirdiği avantajlara derinlemesine yer verilecektir. Benzer şekilde, çift yönlü pompalama şemasında kullanılan 980 nm ve 1480 nm dalga boylu pompa lazerlerinin seçimi, bu dalga boylarının erbiyum iyonları üzerindeki fiziksel etkileşimleri ve sistem performansına katkıları detaylandırılacaktır. Kurulumun optik mimarisini tamamlayan pasif bileşenler; dalga boyu bölmeli çoğullayıcılar (WDM), fiber ayna ve spektrum düzlüğünü iyileştirmek amacıyla özel olarak kullanılan fiber adaptör gibi elemanların işlevleri ve seçim nedenleri tartışılacaktır.

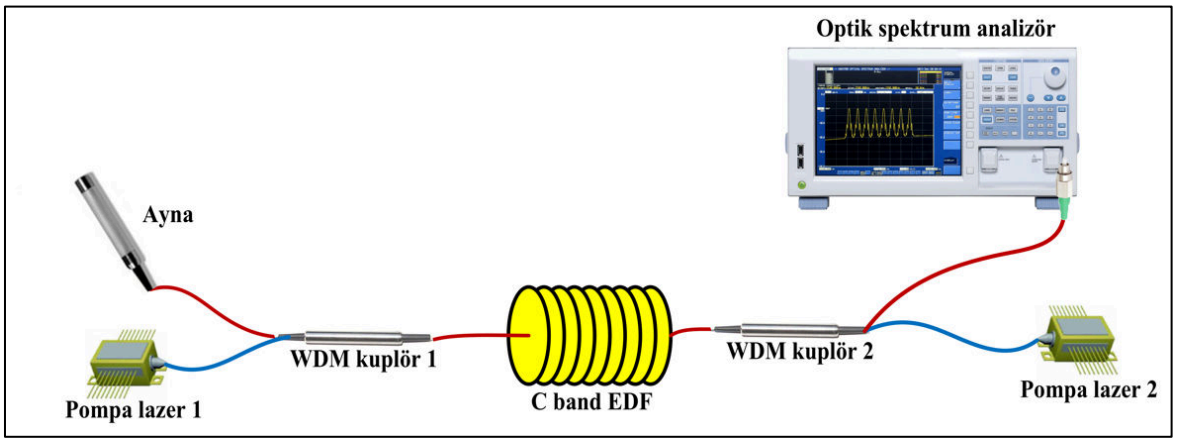
Deneysel düzenek, optimum performansı elde etmek üzere dikkatle seçilmiş bileşenlerden oluşmaktadır. Sistemin kalbini oluşturan aktif kazanç ortamından, bu ortamı uyaran pompa kaynaklarına ve sinyal yolunu yöneten pasif elemanlara kadar her bir bileşen, bütüncül bir tasarım felsefesiyle bir araya getirilmiştir.

Son olarak, sistemin yalnızca bir optik düzenek olmaktan çıkıp, akıllı ve otonom bir prototipe dönüşmesini sağlayan gömülü kontrol sisteminin mimarisi, donanım bileşenleri ve en önemlisi, spektral düzlüğü optimize etmek için geliştirilen yazılım algoritmasının çalışma prensibi adım adım açıklanacaktır. Bu kapsamlı yaklaşım, ASE kaynağının performansını en üst düzeye çıkarmak için atılan her adımı ve yapılan her seçimin arkasındaki bilimsel ve mühendislik gerekçelerini ortaya koymaktadır.

ASE kaynağının çıkış gücünü ölçmek için bir optik güç ölçer ve spektral özelliklerini (dalga boyu aralığı, düzlük vb.) detaylı bir şekilde analiz etmek için MS9710B optik spektrum analizörü (OSA) kullanılmıştır.

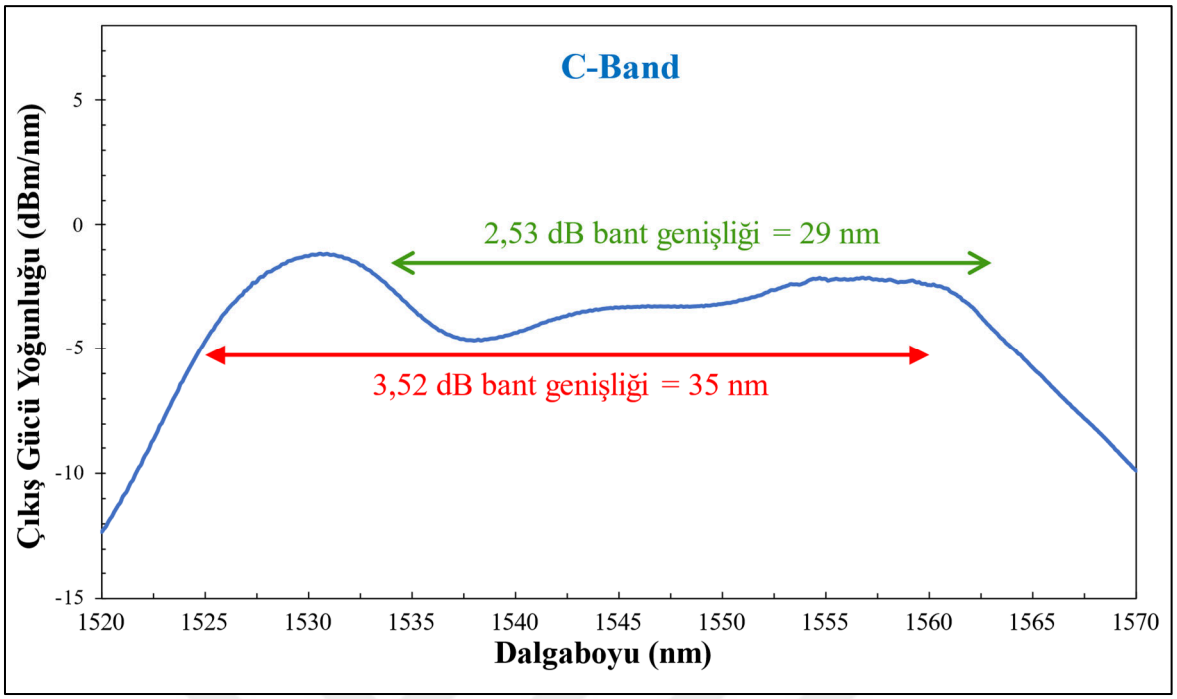
6.1. Simülasyon Sonuçlarına Göre Kurulan Düzenek

Simülasyon sonuçlarına göre C-band ASE elde etmek için Şekil 6.1'de gözüken düzenek kurulmuştur. Düzenekte 3,5 metre M12 EKF kullanılmış olup, pompa lazerlerin gücü 300 mW olacak şekilde ayarlanmıştır.



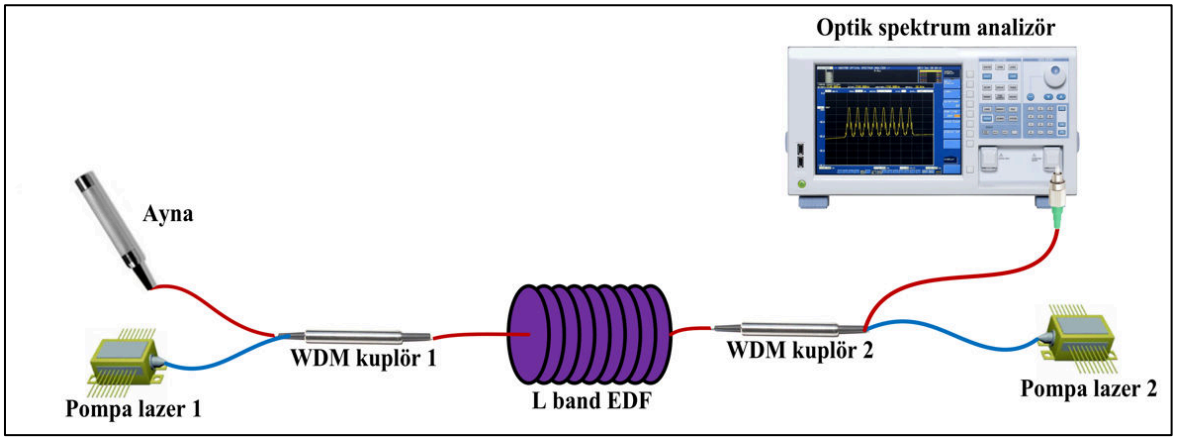
Şekil 6.1. C-band ASE kaynağı düzeneği

Şekil 6.1'deki düzenekten elde edilen spektrum çıktısı Şekil 6.2'de gözükmektedir. C-bandı için çıkış spektrumu 1525-1560 nm aralığında 35 nm bant genişliğinde 3,52 dB'lik bir dalgalanmaya ve 1534-1563 nm aralığında 29 nm bant genişliğinde 2,53 dB'lik bir dalgalanmaya sahiptir. Ortalama çıkış gücü itibari ile de +13,09 dBm optik çıkış gücü ölçülmüştür.



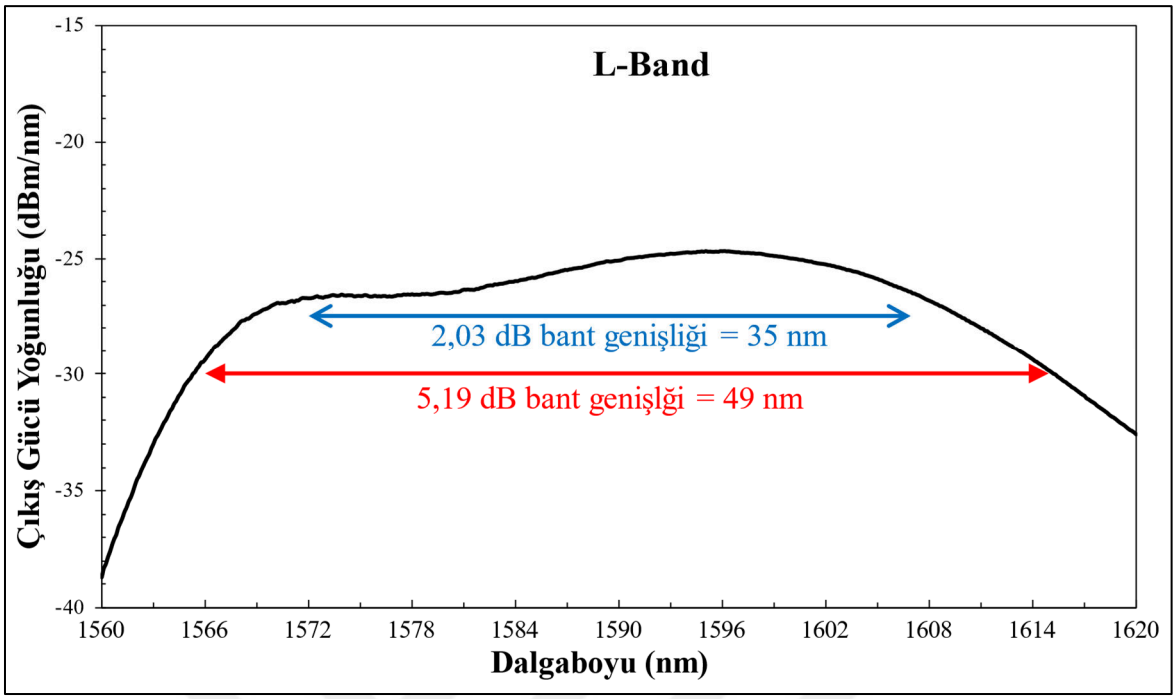
Şekil 6.2. C-band için elde edilen spektrum çıktısı

L-band ASE elde etmek için Şekil 6.3'de gözüken düzenek kurulmuştur. Düzenekte 15 metre ER-1550C3 fiber kullanılmış olup pompa lazer güçleri 400 mW olacak şekilde ayarlanmıştır.



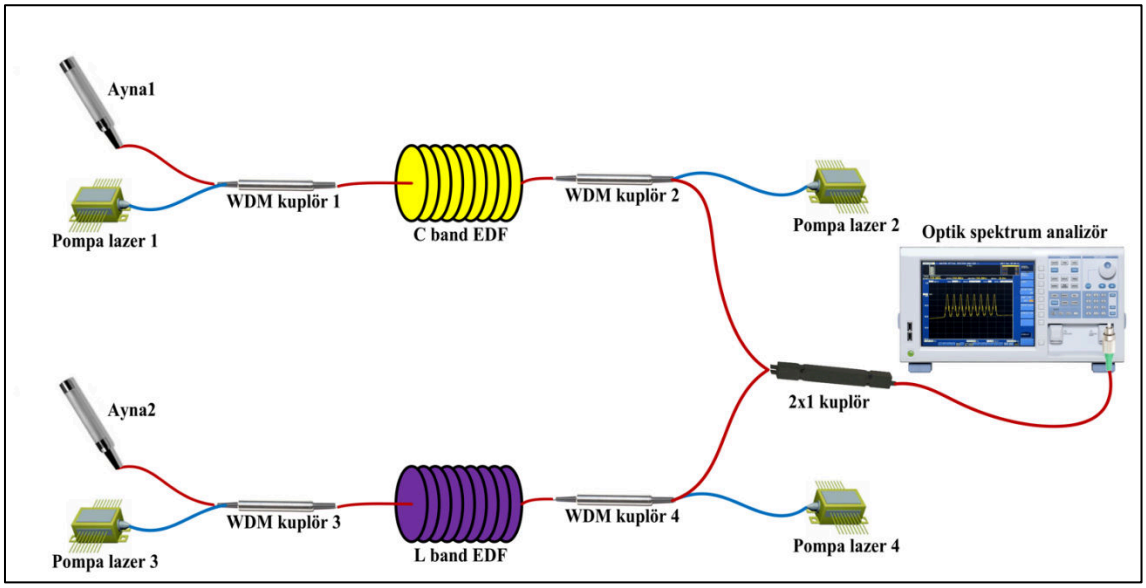
Şekil 6.3. L band ASE kaynağı düzeneği

Şekil 6.3'deki düzenekten elde edilen spektrum çıktısı Şekil 6.4'de gözükmektedir. L-bandı için çıkış spektrumu 1566-1615 nm aralığında 49 nm bant genişliğinde 5,19 dB'lik bir dalgalanmaya ve 1572-1607 nm aralığında 35 nm bant genişliğinde 2,03 dB'lik bir dalgalanmaya sahiptir. Ortalama çıkış gücü itibari ile de -9,17 dBm optik çıkış gücü ölçülmüştür.



Şekil 6.4. L-band spektrum çıktısı

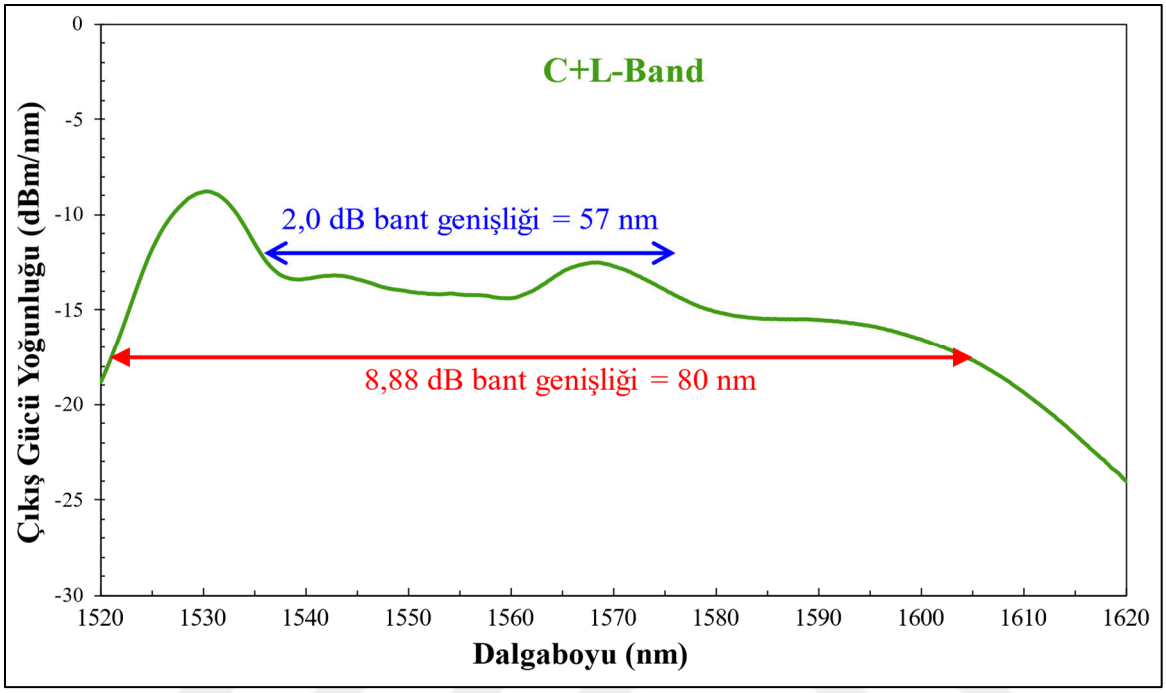
C+L-band ASE üretmek için simülasyon sonuçlarında bulunduğu gibi iki farklı düzenek 50:50 1x2 kuplör ile birleştirilerek düzenek kurulumuştur. Düzenek önceki belirtilen parametrelere göre çalıştırılmış olup spektrum çıkıtısı Şekil 6.6'daki gibi olmuştur.



Şekil 6.5. C+L band ASE kaynağı düzeneği

Şekil 6.5'deki düzenekten elde edilen spektrum çıktısı Şekil 6.6'de gözükmektedir. C+L-bandı için çıkış spektrumu 1521-1605 nm aralığında 84 nm bant genişliğinde 8,88 dB'lik bir

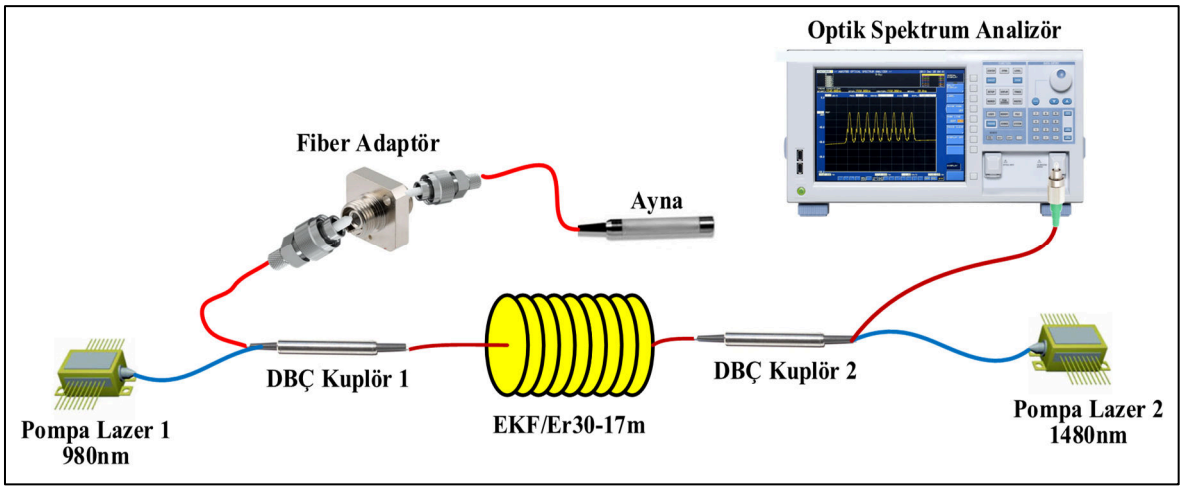
dalgalanmaya ve 1536-1576 nm aralığında 40 nm bant genişliğinde 2,03 dB'lik bir dalgalanmaya sahiptir. Ortalama çıkış gücü itibari ile de +5,84 dBm optik çıkış gücü ölçülmüştür.



Şekil 6.6. C+L-band ASE spektrum çıktısı

6.2. ASE Spektrum İyileştirme Çalışmaları

Simülasyon sonuçlarını temel alarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tezin amacına uygun bir ASE kaynağı elde edilememiştir. Bu aşamada doğrudan uygulama üzerinde simülasyon ortamında yapılan iterasyonlardan çok daha büyük adımlar ile denemeler yapılarak sonuçların ne aşamada iyi hale geldiği gözlemlenerek yeni bir yol belirlendi. Bu yolun sonunda Liekki Er30(4/125) fiberinin kullanılmasına kesin bir şekilde karar verilmiştir. Deney düzeneği Şekil 6.7'de görülmekte olup düzenekte yer alan komponentlerin her biri alt başlıklar halinde verilen bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 6.7. Önerilen çift geçişli çift yönlü pompalamalı deneysel optik düzenek

6.2.1. Liekki Er30(4/125) EKF

Liekki (günümüzde nLIGHT firmasının bir parçasıdır) tarafından geliştirilen bu fiber, Doğrudan Nanopartikül Biriktirme (DND) adı verilen yenilikçi bir üretim teknolojisi ile imal edilmektedir. Geleneksel MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) yöntemine kıyasla DND, nadir toprak elementlerinin silika matris içerisindeki dağılımı üzerinde çok daha hassas bir kontrol imkanı sunar. Bu teknolojinin getirdiği avantajlar, yüksek güçlü ASE kaynağı hedefi için kritik öneme sahiptir [98].

Yüksek dönüşüm verimliliği ve düşük kümelenme (clustering) etkisi

Erbiyum gibi nadir toprak elementleri, silika cam içerisinde yüksek konsantrasyonlarda katkılandığında, iyonlar birbirine çok yakın konumlarda toplanarak "küme" adı verilen yapılar oluşturma eğilimindedir. Bu kümelenme olayı, iyonlar arasında meydana gelen ve "kooperatif yukarı dönüşüm" (cooperative upconversion) gibi istenmeyen enerji transfer mekanizmalarını tetikler. Bu mekanizmalar, pompa enerjisinin bir kısmının ısı olarak kaybolmasına veya sinyal bandı dışında emisyonlara dönüşmesine neden olarak, sistemin kuantum verimliliğini ciddi şekilde düşürür. DND teknolojisi, erbiyum iyonlarını barındıran nanopartiküllerin silika matris içerisinde son derece homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu sayede, çok yüksek katkı konsantrasyonlarında bile kümelenme etkisi minimum seviyede tutulur. Sonuç olarak, Liekki Er30 fiberi, pompa gücünü ASE sinyaline olağanüstü yüksek bir verimlilikle dönüştürür.

Düşük fotokararma (photodarkening)

Yüksek güçlü pompa lazerlerine (özellikle 980 nm) uzun süre maruz kalan fiberlerde, zamanla "fotokararma" olarak bilinen bir olgu gözlemlenir. Bu, fiberin çekirdeğinde renk merkezlerinin oluşmasıyla sonuçlanır ve özellikle kısa dalga boylarında ek bir kayba (loss) neden olur. Bu durum, cihazın ömrü boyunca çıkış gücünün azalmasına ve performansının kararsızlaşmasına yol açar. DND ile üretilen fiberler, erbiyum iyonlarının yerel çevresinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi sayesinde fotokararmaya karşı çok daha yüksek bir dirence sahiptir. Bu, uzun ömürlü ve kararlı bir ASE kaynağı için vazgeçilmez bir özelliktir.

Yüksek hasar eşiği

Kullanılan yüksek güçlü pompa lazerleri, fiberin giriş yüzeyinde ve çekirdeğinde termal hasara neden olabilir. DND fiberlerinin sahip olduğu üstün malzeme kalitesi, bu tür hasarlara karşı daha yüksek bir dayanıklılık sağlar.

Daha kısa fiber kullanım imkanı

Yüksek katkı konsantrasyonu, istenen kazancı ve çıkış gücünü elde etmek için gereken fiber uzunluğunun önemli ölçüde kısalmasını sağlar. Bu çalışmada 17 metre EKF kullanılmıştır. Daha kısa fiber kullanmanın en büyük avantajı, "doğrusal olmayan etkiler" olarak bilinen ve fiber optik sistemlerde performansı sınırlayan olguların bastırılmasıdır. Özellikle dört dalga karışımı (FWM) ve uyarılmış Raman saçılması (SRS) gibi etkiler, fiber uzunluğu ile birlikte artar ve spektrumun bozulmasına, istenmeyen gürültü bileşenlerinin oluşmasına neden olabilir. 17 metrelik optimize edilmiş uzunluk hem C hem de L bandında yeterli kazancı sağlarken, bu doğrusal olmayan etkileri kabul edilebilir bir seviyede tutmak için ideal bir denge noktası sunar.

6.2.2. Pompa lazer diyotlar ve çift yönlü pompalama mimarisi

ASE üretiminin temel prensibi, EKF içerisindeki erbiyum iyonlarının harici bir ışık kaynağı (pompa lazeri) ile daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılmasına dayanır. Bu çalışmada, C+L bandında geniş ve düz bir spektrum elde etmek için en etkin yöntemlerden biri olan çift

yönlü (bidirectional) pompalama mimarisi tercih edilmiştir. Bu mimaride, fiberin her iki ucundan farklı dalga boylarında pompa ışığı uygulanır.

İleri yönlü pompalama için 974,36 nm dalgaboyuna sahip bir lazer diyot kullanılmıştır. 980 nm bandından yapılan pompalama, Erbiyum iyonlarını temel enerji seviyesinden ($^4I_{15/2}$) doğrudan yüksek bir enerji seviyesine ($^4I_{11/2}$) çıkarır. Bu seviyedeki iyonlar, çok hızlı bir şekilde (mikrosaniyeler mertebesinde) ve ışımasız olarak bozunarak, ASE emisyonunun gerçekleştiği yarı kararlı (metastable) enerji seviyesine ($^4I_{13/2}$) düşerler. 980 nm pompanın en büyük avantajı, yüksek soğurma tesir kesitine sahip olmasıdır. Bu, pompa gücünün fiberin ilk birkaç metresinde çok verimli bir şekilde soğurulmasını sağlar ve özellikle C-bandında (yaklaşık 1530-1565 nm) güçlü bir ASE üretimi için idealdir. Bu görev için, maksimum 350 mW çıkış gücüne sahip oemarket/LDM-980-200-F-S-FA model bir lazer diyot kullanılmıştır. Ancak, termal kararlılık ve uzun ömürlü çalışma sağlamak amacıyla, gömülü sistem tarafından bu lazerin maksimum çalışma gücü 300 mW ile sınırlandırılmıştır.

Geri yönlü pompalama için 1479,9 nm dalgaboyuna sahip bir lazer diyot kullanılmıştır. 1480 nm bandından yapılan pompalama, "bant-içi" (in-band) pompalama olarak da bilinir. Bu yöntemde iyonlar, temel enerji seviyesinden ($^4I_{15/2}$) doğrudan yarı kararlı enerji seviyesinin ($^4I_{13/2}$) üst kısımlarına uyarılır. Bu pompalama şemasının gürültü figürü (noise figure) daha düşüktür ve özellikle L-bandı (yaklaşık 1565-1610 nm) sinyallerini yükseltmek için daha yüksek bir güç dönüşüm verimliliği sunar. Geri yönlü konfigürasyonda kullanılmasının stratejik bir öneme sahip olup ileri yönde ilerleyen ve C-bandında oluşan güçlü ASE sinyali, pompa gücünü tüketerek fiberin sonlarına doğru zayıflar. Tam bu noktada, fiberin sonundan giren 1480 nm'lik geri yönlü pompa, L-bandı dalga boyları için gerekli olan kazancı sağlayarak spektrumun bu bölgedeki gücünü ve düzlüğünü artırır. Bu görev için, maksimum 500 mW çıkış gücüne sahip Fitel/FOL1437R50-857-1480 model bir lazer diyot seçilmiştir. Benzer şekilde, bu lazerin maksimum çalışma gücü de gömülü sistem tarafından 400 mW ile sınırlandırılmıştır.

Bu iki pompalama şemasının birleşimi, fiberin farklı bölgelerinde farklı spektral bantların hedeflenmesini sağlayarak, C+L bandının tamamında geniş ve dengeli bir ASE spektrumu elde etmenin anahtarını oluşturur.

6.2.3. Pasif optik bileşenler ve spektrum şekillendirme

Aktif bileşenlere ek olarak, sinyal yolunu doğru bir şekilde yönlendirmek ve spektrumu istenen forma sokmak için çeşitli pasif bileşenler kullanılmıştır.

Dalga boyu bölmeli çoğullayıcılar

DBÇ'ler, farklı dalga boylarındaki ışık sinyallerini tek bir fibere birleştirmek veya tek bir fiberden gelen sinyalleri dalga boylarına göre ayırmak için kullanılan üç portlu cihazlardır. Bu düzenekte iki adet DBÇ kullanılmıştır. 980/1550 DBÇ (Oemarket/ WDM-F-14CL-0-N), 974.36 nm'lik ileri yönlü pompa lazerinin çıkışını, ana sinyal yolu olan EKF'ye minimum kayıpla aktarmak için kullanılır.

1480/1550 DBÇ (Oemarket/ WDMC-915-P-0-N), 1479.9 nm'lik geri yönlü pompa lazerinin çıkışını, EKF'nin çıkış ucundan sisteme dahil etmek için kullanılır. Bu bileşenlerin seçiminde, sinyal ve pompa dalga boyları için düşük ekleme kaybı (insertion loss) ve yüksek izolasyon değerleri kritik öneme sahiptir. Yüksek izolasyon, kullanılmayan pompa ışığının sistemin çıkışına sızmasını veya hassas ölçüm cihazlarına (OSA gibi) zarar vermesini engeller.

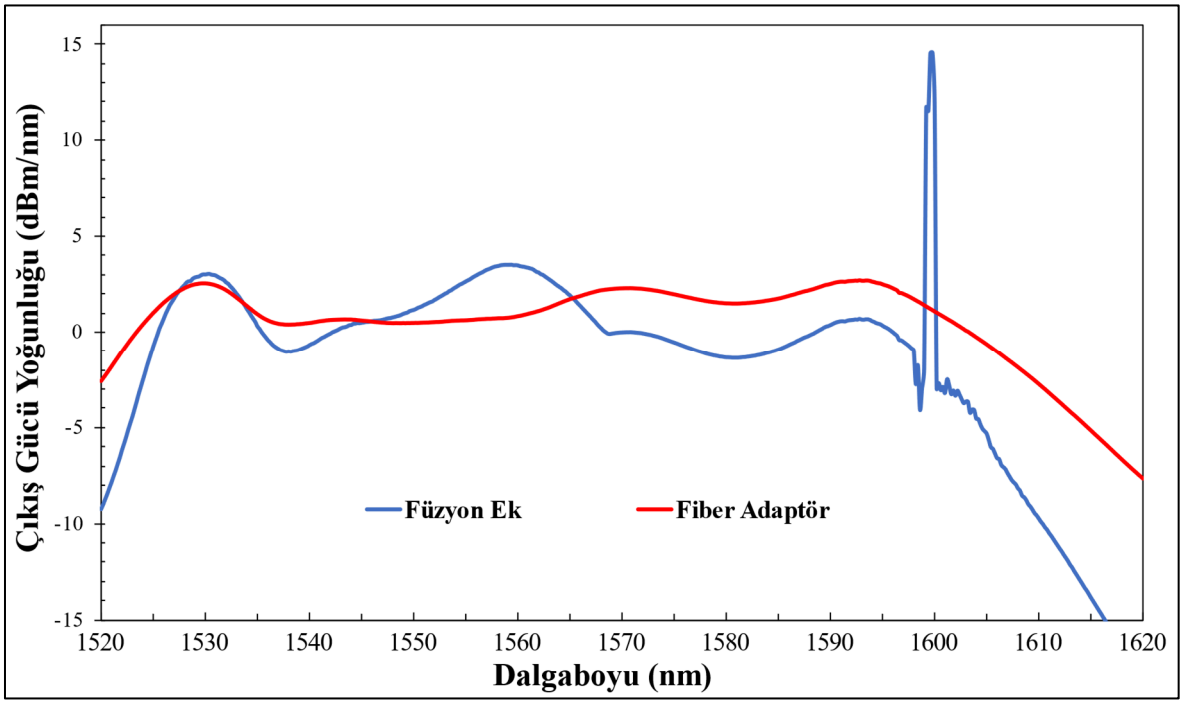
Ayna ve çift geçişli (double-pass) konfigürasyon

EKF'nin çıkışına yerleştirilen yüksek yansıtıcılığa sahip bir ayna (Newport/ F-FRM-2-JK-NC), ASE sinyalinin EKF içerisinden ikinci kez geçmesini sağlar. EKF'de üretilen ve ileri yönde ilerleyen ASE sinyali aynadan yansır ve geri dönerek EKF boyunca tekrar yükseltilir. Bu çift geçişli mimari, fiberin efektif kazanç uzunluğunu neredeyse iki katına çıkarır. Bu, özellikle tek geçişte yeterli kazancın sağlanamadığı, gücü daha zayıf olan L-bandı sinyalleri için son derece etkilidir. Aynı zamanda, belirli bir çıkış gücü seviyesi için gereken pompa gücünü azaltarak sistemin toplam verimliliğini artırır.

Fiber adaptör: istenmeyen lazerleşme (spike) olgusunun bastırılması

Çift geçişli konfigürasyonun getirdiği yüksek kazanç, bir dezavantajı da beraberinde getirmiştir. Özellikle L-bandının sonlarına doğru (1590-1610 nm aralığında), sistemdeki

toplam kazanç, kaçınılmaz olarak var olan küçük geri yansımalardan kaynaklanan kayıpları aştığında, ASE kaynağı bir lazer gibi davranmaya başlamaktadır. Şekil 6.8'de görülen bu durum, spektrum üzerinde "spike" olarak adlandırılan çok dar ve yüksek güçlü tepeciklerin oluşmasına neden olmuş ve ASE kaynağının geniş bantlı ve düz kazançlı olma özelliğini bozmuştur.

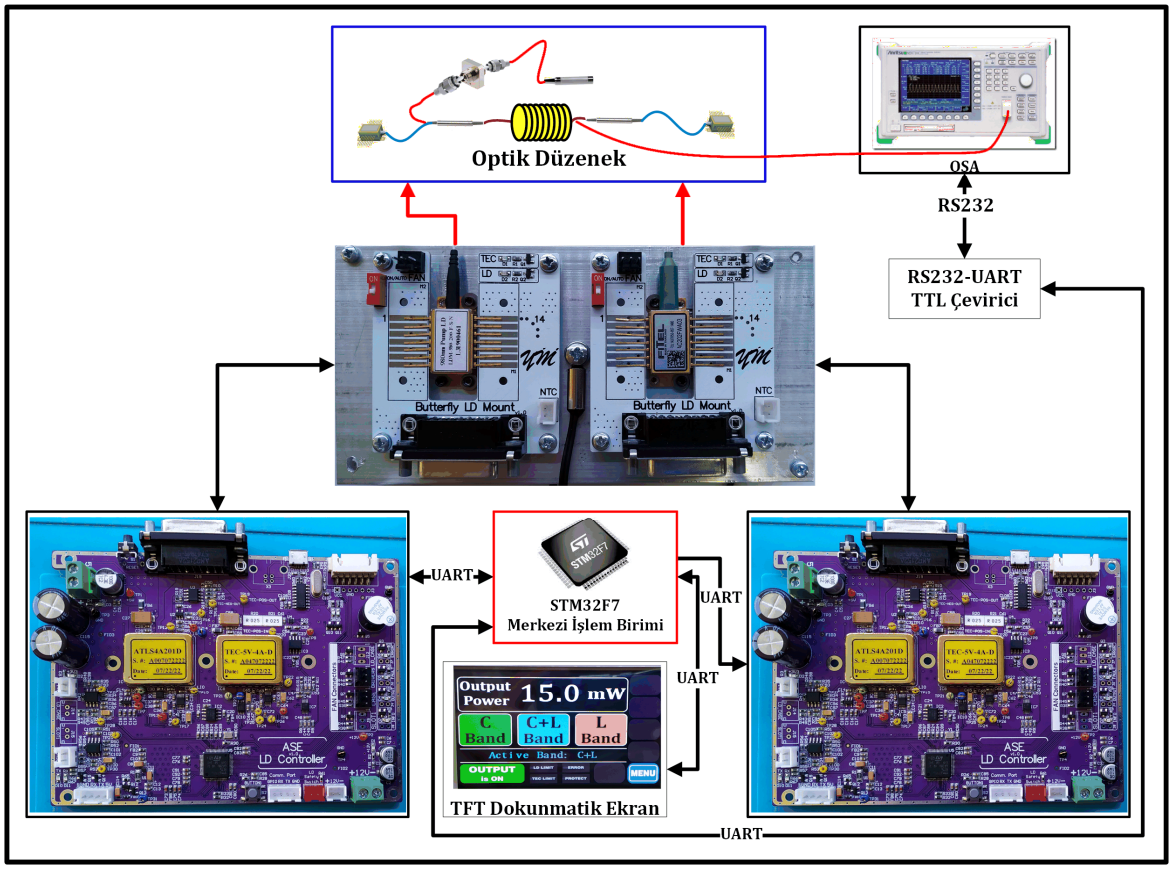


Şekil 6.8. Füzyon ek ve fiber adaptör kullanılarak elde edilen ASE çıkış spektrumları

Bu sorunu çözmek için, ayna ile fiber arasına kasıtlı olarak bir fiber adaptör yerleştirilmiştir. Normalde iki fiberi birbirine bağlamak için kullanılan bu adaptör, burada kontrollü bir kayıp elemanı olarak görev yapmıştır. Adaptörün içindeki iki fiber ucunun tam olarak temas etmemesi (küçük bir hava boşluğu bırakılması), Fresnel yansıması prensibine dayalı olarak yaklaşık 0,5 dB'lik bir kayıp oluşturmuştur. Bu 0,5 dB'lik küçük kayıp, lazer gibi davranmaya neden olan rezonans koşulunu ortadan kaldırmak için yeterli olmuştur. Bu kayıp, aynanın %99,9 olan yansıtıcılığını efektif olarak %89,17'ye düşürmüş ve bu sayede "spike" oluşumu, ASE spektrumunun genel şeklini bozmadan tamamen engellenmiştir. Aynı zamanda bu kontrollü kaybın spektrumun genel düzlüğünü de bir miktar iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

6.2.4. Gömülü kontrol sistemi ve optimizasyon algoritması

Bu ASE kaynağını laboratuvar ortamındaki bir düzenekten, son kullanıcıya hitap eden kararlı ve kullanımı kolay bir prototipe dönüştüren en önemli unsur, özel olarak tasarlanmış gömülü kontrol sistemidir. Şekil 6.9'da şeması verilen bu sistem, lazerlerin hassas kontrolünü, kullanıcı arayüzü yönetimini ve en önemlisi çıkış spektrumunun otonom optimizasyonunu gerçekleştirir.



Şekil 6.9. Gömülü sistemin genel görünümü

Sistemin beyni, tüm operasyonları yöneten bir mikrodenetleyicidir. Bu işlemci (STM32F732RET6), lazer sürücülerine komut göndermek, dokunmatik ekrandan gelen girdileri işlemek ve optik spektrum analizör ile seri haberleşme yaparak spektrum verilerini almakla görevlidir.

Lazer diyotlar, çıkış güçleri ve dalga boyları, üzerlerinden geçen akıma ve çalışma sıcaklıklarına son derece duyarlı cihazlardır. Bu nedenle, onları beslemek için basit bir güç kaynağı yeterli değildir. Sistemde, her bir lazer diyot için özel olarak tasarlanmış, yüksek

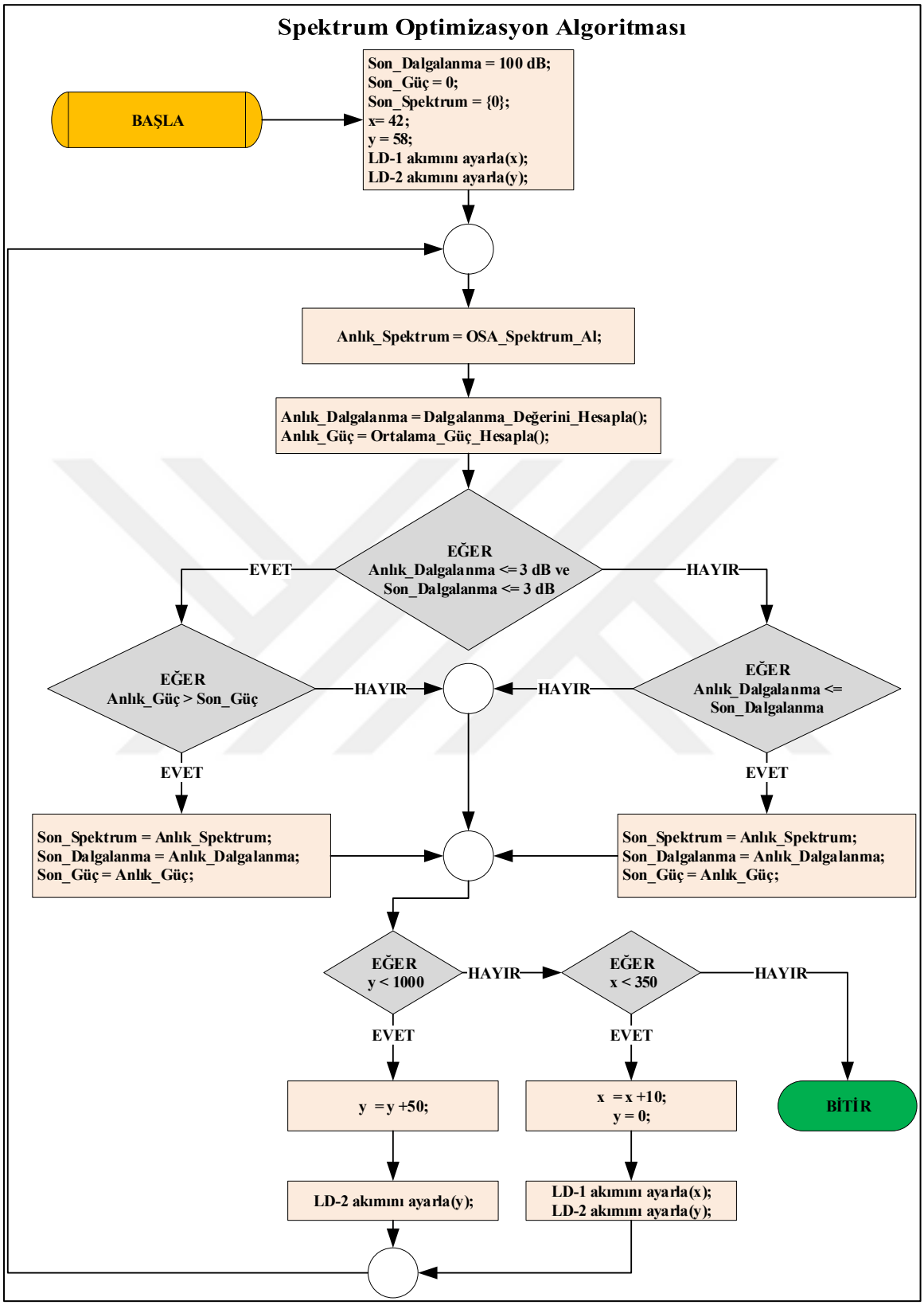
kararlılıkta ve düşük gürültülü akım sağlayan hassas lazer sürücü devreleri bulunmaktadır. Bu sürücüler, merkezi işlemciden gelen dijital komutlara göre lazer akımlarını hassas bir şekilde ayarlar. Ayrıca, aşırı akım koruması ve yumuşak başlatma (soft-start) gibi güvenlik mekanizmalarını da içerirler.

Cihazın ön paneline yerleştirilmiş bir dokunmatik ekran, kullanıcı ile sistem arasındaki etkileşimi sağlar. Kullanıcı bu ekran üzerinden, istediği çalışma bandını (sadece C-Bandı, sadece L-Bandı veya birleşik C+L-Bandı) ve hedeflenen optik çıkış gücünü kolayca seçebilir.

Cihazın en yenilikçi özelliği, manuel ayarlamalara gerek kalmadan en düz spektrumu elde etmek için pompa lazer güçlerini kendi kendine ayarlayabilmesidir. Bu işlem, Şekil 5'te akış diyagramı verilen bir optimizasyon algoritması tarafından yürütülür. Bu algoritma, cihazın kalibrasyon aşamasında bir kez çalıştırılır ve lazerlerin çalışması gereken optimum lazer akımlarını işlemcinin flash belleğine kaydederek saklamaktadır.

Şekil 6.10’da optimizasyon algoritmasının akış diyagramı verilmiştir. Algoritma, bellekteki en iyi dalgalanma (ripple) değerini, fiziksel olarak ulaşılamayacak kadar yüksek bir değere (örneğin 100 dB) ayarlar. Bu, ölçülen ilk gerçek değerin kesinlikle daha iyi olmasını ve "en iyi" olarak kaydedilmesini garanti eder. Lazer akımları, ışık üretimi için gerekli olan minimum eşik değerlerine (threshold) ayarlanır.

Sistem, 980 nm ve 1480 nm lazer diyotlar için tanımlanmış güvenlik limitleri (sırasıyla 350 mA ve 1000 mA) dahilindeki tüm olası akım kombinasyonlarını sistematik olarak tarayan bir döngü başlatır. Döngünün her bir adımında, belirlenen akım değerleri lazer sürücülerine uygulanır. Kısa bir bekleme süresinin ardından, merkezi işlemci, seri port üzerinden optik spektrum analizöre bağlanarak o anki ASE çıkış spektrumunun tamamını dijital veri olarak alır. Alınan ham spektrum verisi üzerinde iki temel değer hesaplanır. Hedeflenen bant genişliği (örneğin C+L bandı için 1524-1604 nm) içindeki maksimum ve minimum güç değerleri arasındaki fark dB cinsinden hesaplanarak spektral düzlüğün birincil ölçütü bulunmuş olur.



Şekil 6.10. Spektrum optimizasyon algoritmasına ait akış diyagramı

Aynı bant genişliği içindeki toplam optik güç ise yine alınan spektrumdaki noktalara ait güç değerlerini kullanarak ortalama toplam gücü hesaplar.

Hesaplanan yeni dalgalanma değeri, bellekte saklanan "o ana kadarki en iyi dalgalanma" değeri ile karşılaştırılır. Eğer yeni dalgalanma değeri, bellektekinden daha düşükse (yani spektrum daha düz ise), bu yeni akım ayarları ve yeni dalgalanma değeri "en iyi sonuç" olarak belleğe kaydedilir.

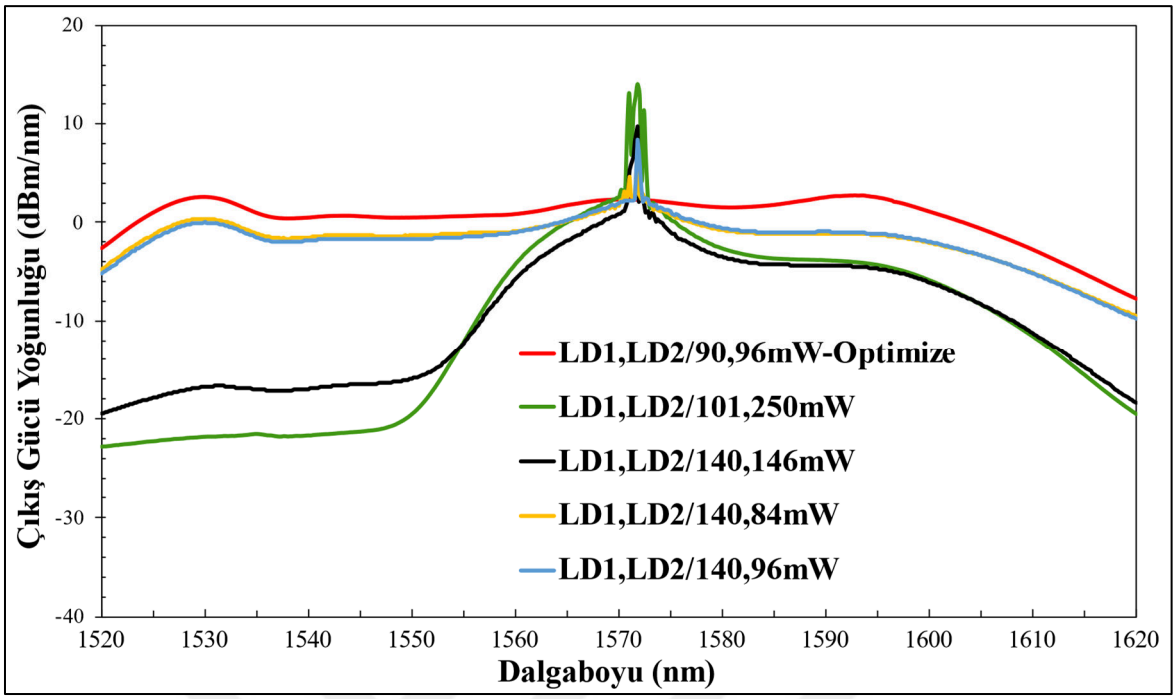
Algoritmada belirtilen "dalgalanma değeri 3 dB'den az ise ortalama güce bakılır" ifadesi, birincil hedefin dalgalanmayı minimize etmek olduğunu, ancak çok benzer düzlük değerleri elde edildiğinde, daha yüksek ortalama gücü üreten ayarın tercih edildiği bir optimizasyon stratejisini ifade eder. Döngü, tanımlanan tüm akım kombinasyonları test edildikten sonra sona erer. Bu sürecin sonunda, her bir çalışma modu (C-Bandı 30mW, L-Bandı 30mW, C+L-Bandı 30mW vb.) için en düz spektrumu sağlayan optimum 980 nm ve 1480 nm lazer akım değerleri çifti bulunmuş olur. Bu değerler, Çizelge 6.1'de gösterildiği gibi, cihazın kalıcı (non-volatile) flash belleğindeki bir arama tablosuna kaydedilir.

Çizelge 6.1. Farklı bantlar ve çıkış güçleri için optimize edilmiş akım değerleri

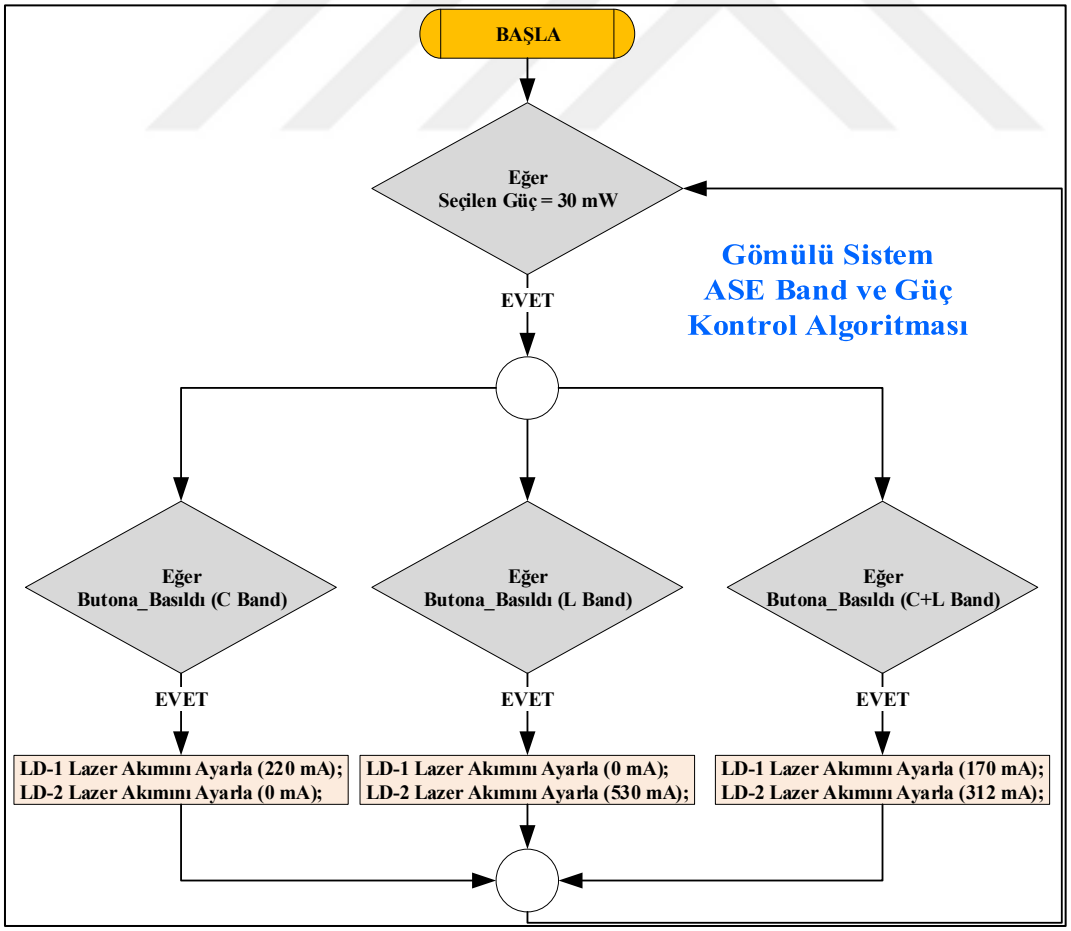
Çıkış Gücü	C Band		L Band		C+L Band	
	LD-1	LD-2	LD-1	LD-2	LD-1	LD-2
10 mW	120 mA (48 mW)	0 mA (0 mW)	0 mA (0 mW)	300 mA (81 mW)	90 mA (30 mW)	100 mA (24 mW)
20 mW	170 mA (90 mW)	0 mA (0 mW)	0 mA (0 mW)	400 mA (122 mW)	150 mA (72 mW)	250 mA (70 mW)
30 mW	220 mA (115 mW)	0 mA (0 mW)	0 mA (0 mW)	530 mA (170 mW)	170 mA (90 mW)	312 mA (96 mW)

Optimize edilmemiş pompa güçleriyle elde edilen ASE spektrumları Şekil 6.11'de gösterilmektedir. Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, aktif pompa gücü optimizasyonu ASE spektrumunu önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Optimizasyon sonuçlarından belirlenen lazer akımları, gömülü sisteme kaydedilir ve cihazın bant seçim düğmelerini kontrol eden fonksiyonlar için girdi olarak kullanılır. Gömülü sistemin çalışmasını açıklayan akış şeması Şekil 6.12'de gösterilmektedir. Şekil 6.12'deki akış şemasında gösterildiği gibi, seçilen çıkış gücü değeri ve bant seçeneği, Çizelge 6.1'den karşılık gelen lazer akımlarını belirler ve bu değerleri anında lazer sürücülerine uygulayarak, ASE kaynağının milisaniyeler içinde istenen kararlı, düz ve güçlü spektrumu üretmesini sağlar. Bu yaklaşım, her kullanımda zaman alıcı optimizasyon sürecini tekrarlama ihtiyacını ortadan kaldırır ve son derece tutarlı ve tekrarlanabilir bir performans sunar.

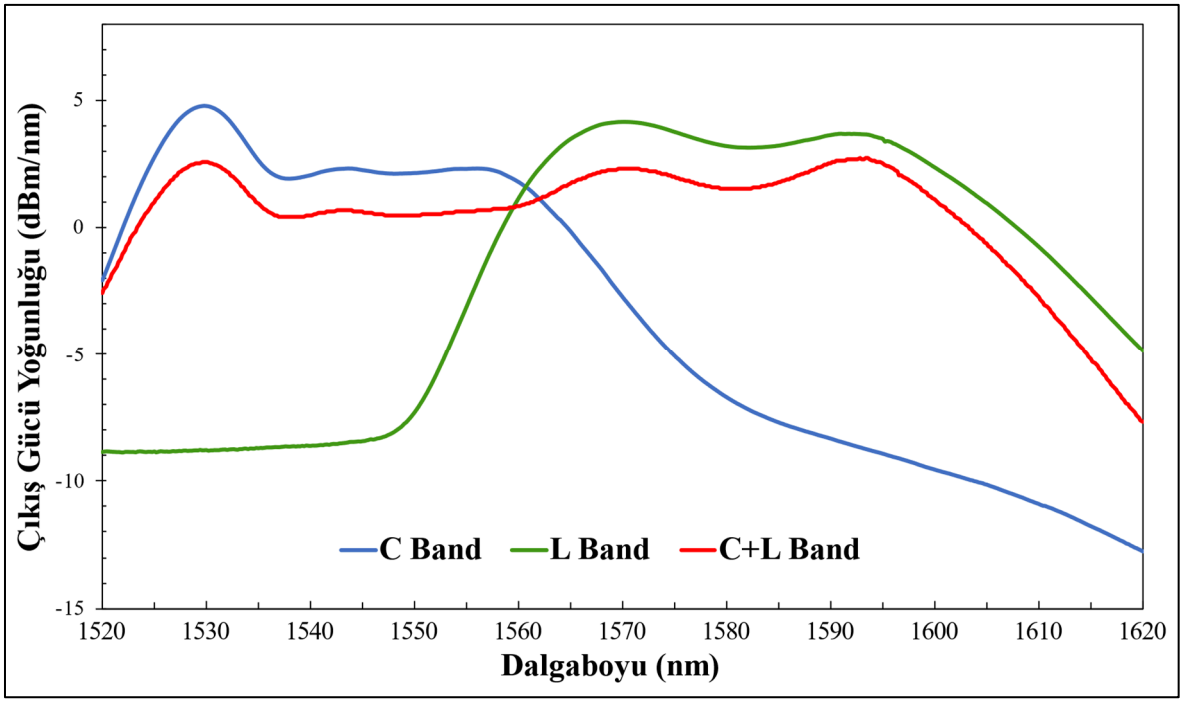


Şekil 6.11. Pompa güçlerinin optimizasyonundan önce alınan ASE spektrumları



Şekil 6.12. Cihazın bant ve güç seçim işlemine ait akış diyagramı

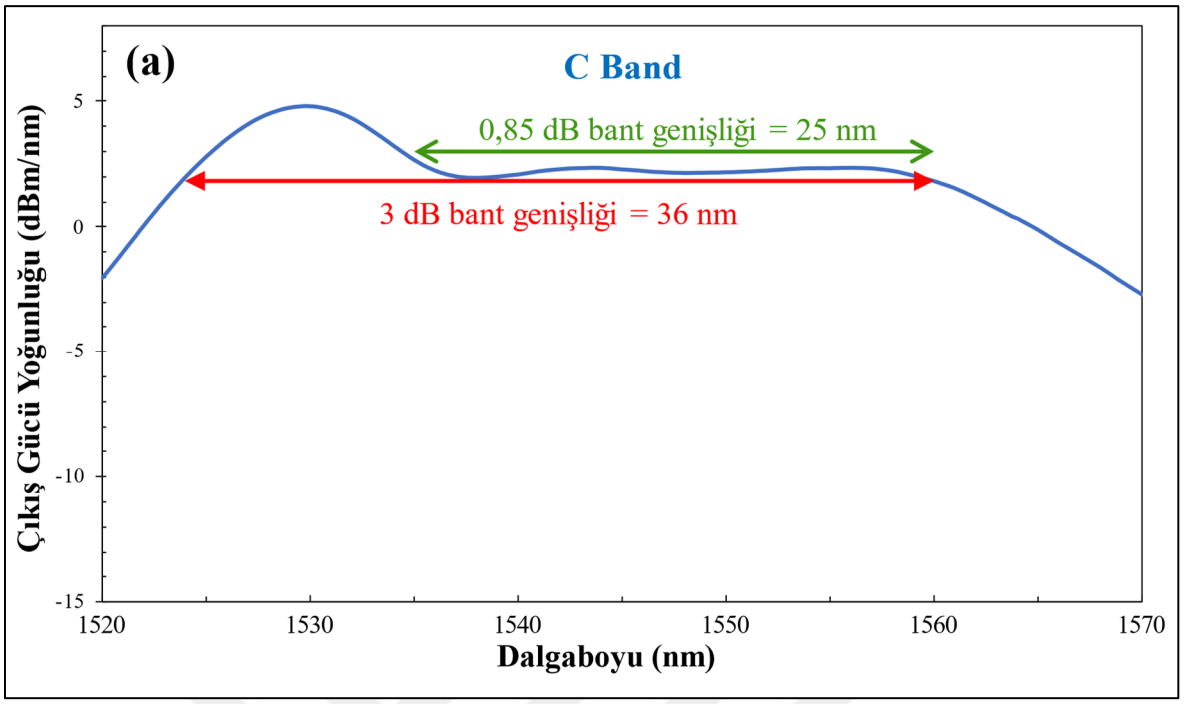
Prototip üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen çıkış spektrumları Şekil 6.13'de gözükmektedir. Tüm bantlar için 30 mW'lık (+14,80 dBm) bir hedef çıkış gücü elde edilmiştir. Ek olarak, Cihazda bulunan lazer ayarları menüsünden lazerlerin gücünü optimal değerlerin üzerine çıkararak spektral düz kazançtan bir miktar ödün verilerek daha yüksek optik çıkış güçlerini elde etmek mümkündür.



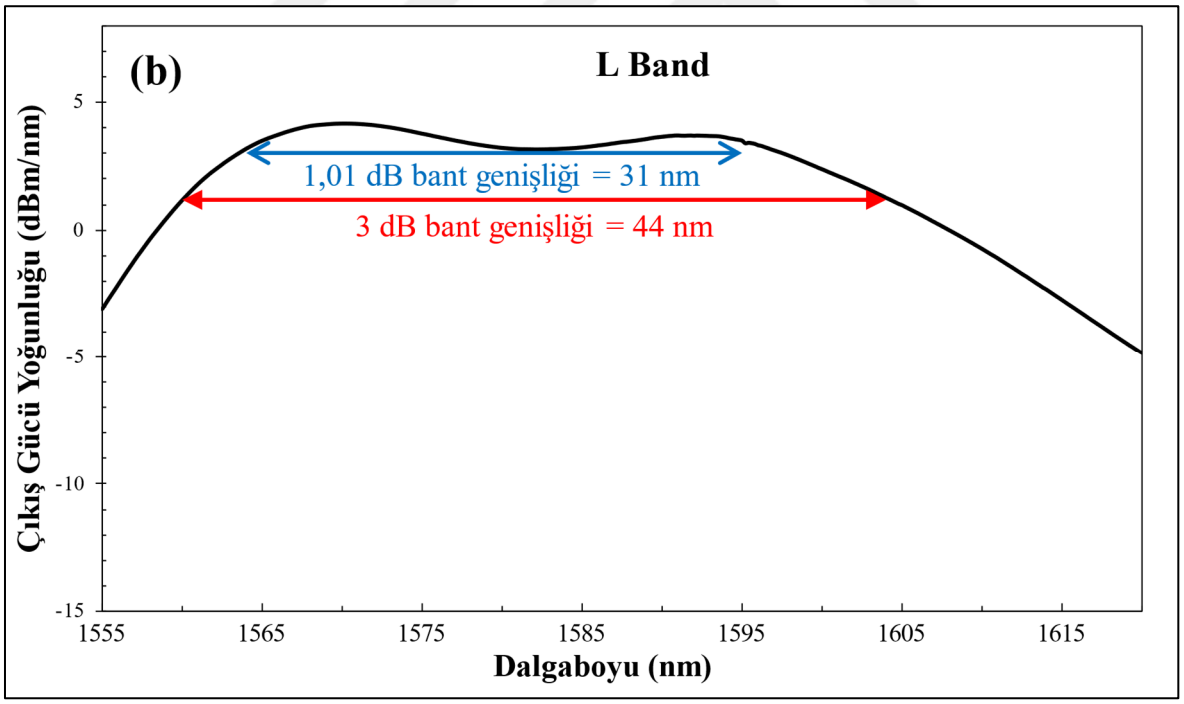
Şekil 6.13. Prototip cihazdan elde edilen spektrum çıktıları

Düzenek sadece C-bandı modunda çalıştırıldığında, ASE kaynağı Şekil 6.14'te gözüktüğü üzere 1524-1560 nm aralığında 36 nm'lik geniş bir 3 dB bant genişliği sergilemektedir. Daha da önemlisi, spektrumun en düz olduğu bölge olan 1535-1560 nm aralığında, 25 nm'lik bir bant genişliği boyunca dalgalanma değeri yalnızca 0,85 dB olarak ölçülmüştür. Bu son derece düşük dalgalanma değeri, sistemin özellikle DBÇ uygulamaları için ne kadar uygun olduğunu göstermektedir.

L-bandı modunda, Şekil 6.15'ten de anlaşılabileceği üzere 1560-1604 nm aralığında 44 nm gibi oldukça geniş bir 3 dB bant genişliğine ulaşılmıştır. Bu bant içindeki 1564-1595 nm aralığında ise, 31 nm'lik bir bant genişliği boyunca dalgalanma değeri 1,01 dB gibi rekabetçi bir değerde olmaktadır. Bu sonuç, 1480 nm geri yönlü pompanın ve çift geçişli mimarinin L-bandı kazancını etkin bir halde şekillendirdiğini kanıtlamaktadır.



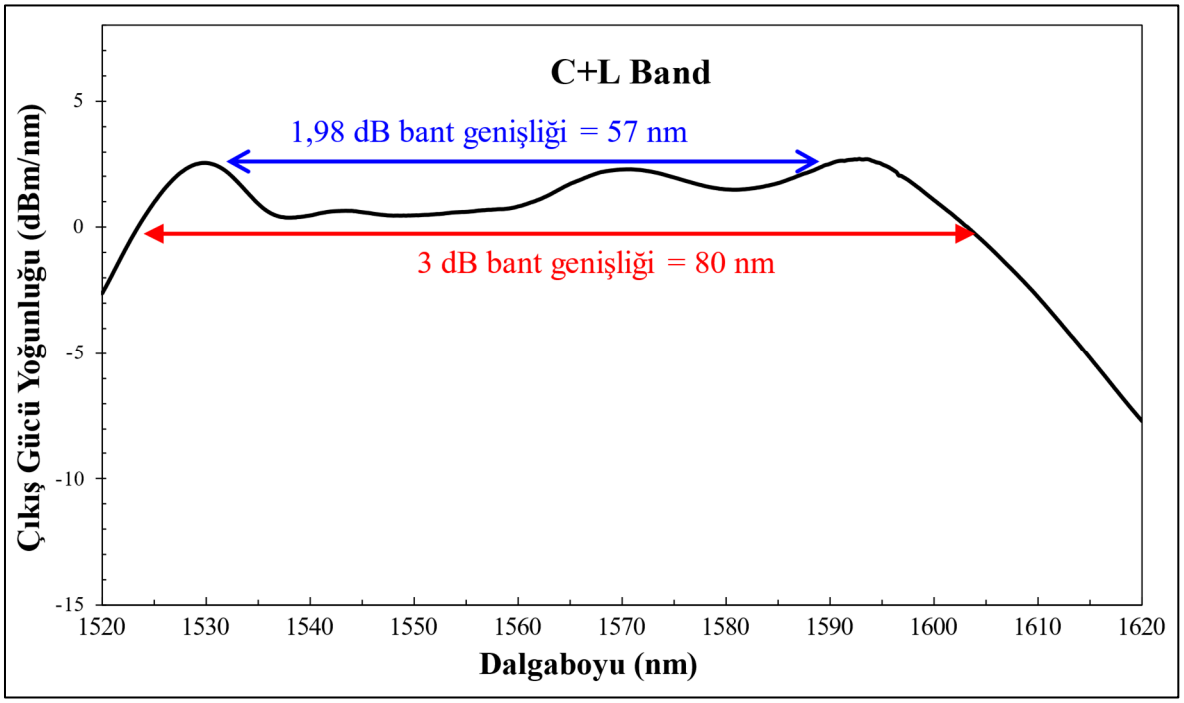
Şekil 6.14. ASE kaynağının C-band spektrum çıktısı



Şekil 6.15. ASE kaynağının L-band spektrum çıktısı

Prototipin en dikkat çekici başarısı, C ve L bandlarını birleştiren modda ortaya çıkmıştır. Şekil 6.16'dan görülebileceği üzere bu modda, 1524 nm'den 1604 nm'ye uzanan toplam 80 nm'lik kesintisiz bir 3 dB bant genişliği elde edilmiştir. Bu geniş bant boyunca kazanç düzlüğünü korumak zorlu bir optimizasyon problemidir. Geliştirilen algoritma sayesinde,

1532-1589 nm aralığını kapsayan 57 nm'lik çok geniş bir bantta dalgalanma değeri 1,98 dB gibi iyi bir seviyede sınırlandırılmıştır. 80 nm'lik toplam bant genişliği ve bu bant içinde 2 dB'nin altında bir dalgalanma, bu ASE kaynağının telekomünikasyondan fiber optik sensörlere ve optik bileşen testlerine kadar çok geniş bir uygulama yelpazesi için değerli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.



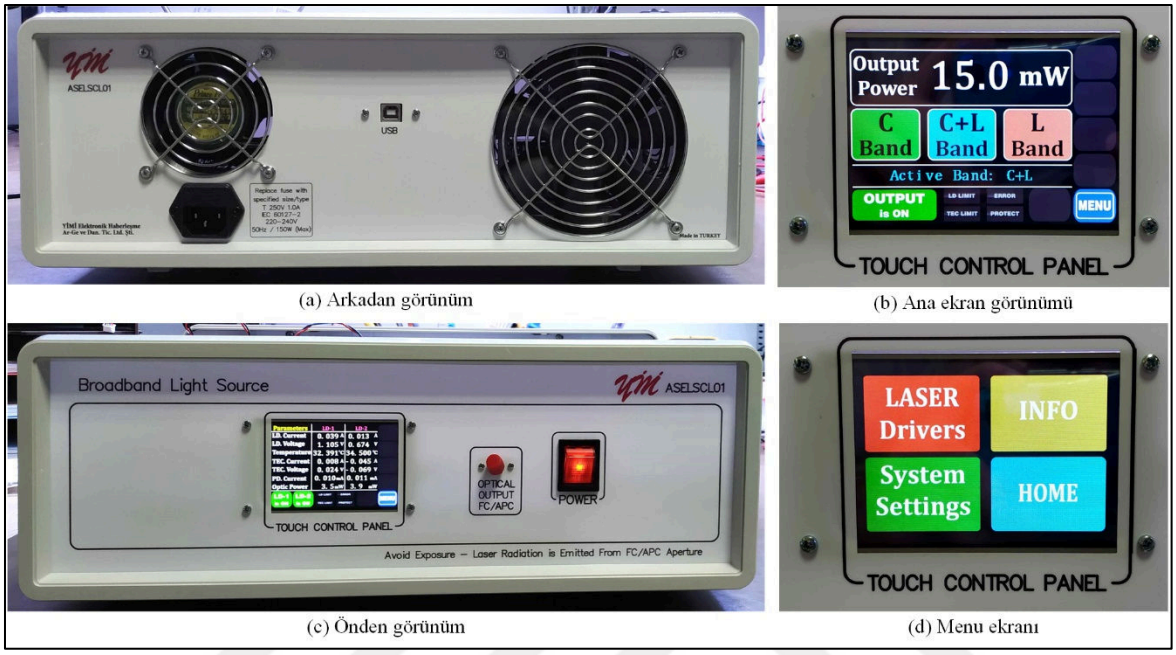
Şekil 6.16. ASE kaynağının C+L-band spektrum çıktısı

Sistemin verimliliği, tüketilen toplam pompa gücünün ne kadarının faydalı ASE çıkış gücüne dönüştürüldüğünü gösteren pompalama verimliliği η ile analiz edilmiştir. Eş. 6.1'deki denklem kullanılarak verim hesabı yapılabilir.

$$\eta = P_{OUT}/(P_F + P_B) \tag{6.1}$$

C+L bandında 30 mW çıkış gücü elde edilirken, ileri yönlü 980 nm pompanın gücü $P_F = 90$ mW ve geri yönlü 1480 nm pompanın gücü $P_B = 96$ mW olarak ayarlanmıştır. Bu değerler formülde yerine konulduğunda, pompalama verimliliği %16,12 olarak hesaplanmıştır. Bu verimlilik oranı, spektral düzlüğün maksimize edilmesinin birincil hedef olduğu bu tür çift yönlü pompalanan sistemler için tipik ve kabul edilebilir bir değerdir.

Deneysel çalışmalar sonucunda tüm hedeflere başarıyla ulaşılmış ve laboratuvar ortamındaki optik düzenek, Resim 6.1'de çeşitli açılardan görselleri sunulan, son kullanıcıya hazır, sağlam ve kompakt bir prototip cihaza dönüştürülmüştür.



(a) Arkadan görünüm (b) Ana ekran görünümü

(c) Önden görünüm (d) Menu ekranı

Resim 6.1. Cihazın son haline ait çeşitli görüntüleri

6.3. Otomatik Ölçüm Alma Yazılımı

Otomatik ölçüm alma programı (Automatic Measurement Software), kısa adıyla AMS deneyler gerçekleştirilirken birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler, cihazlara ait olanlar ya da kullanılan komponentlere ait olabilmektedir. Deney sırasında, kullanılan malzeme ya da cihazların bu parametrelerini kayıt altında tutulmalı ve deney sırasında hangi parametreler hangi cihazdan ölçüldü, cihazdan ölçüldüğünde o anda cihazın ayar parametrelerini kaydedip daha sonradan bakmak çok elzemdir. Bilimsel çalışma yaparken, bu tür verilerin sistemli bir şekilde tutulup saklanması gerekmektedir. Böylece, ilerleyen süreçlerde makale yazımında ya da rapor yazımında deneyden elde edilen sonuçlar değerlendirilirken bu parametreler göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

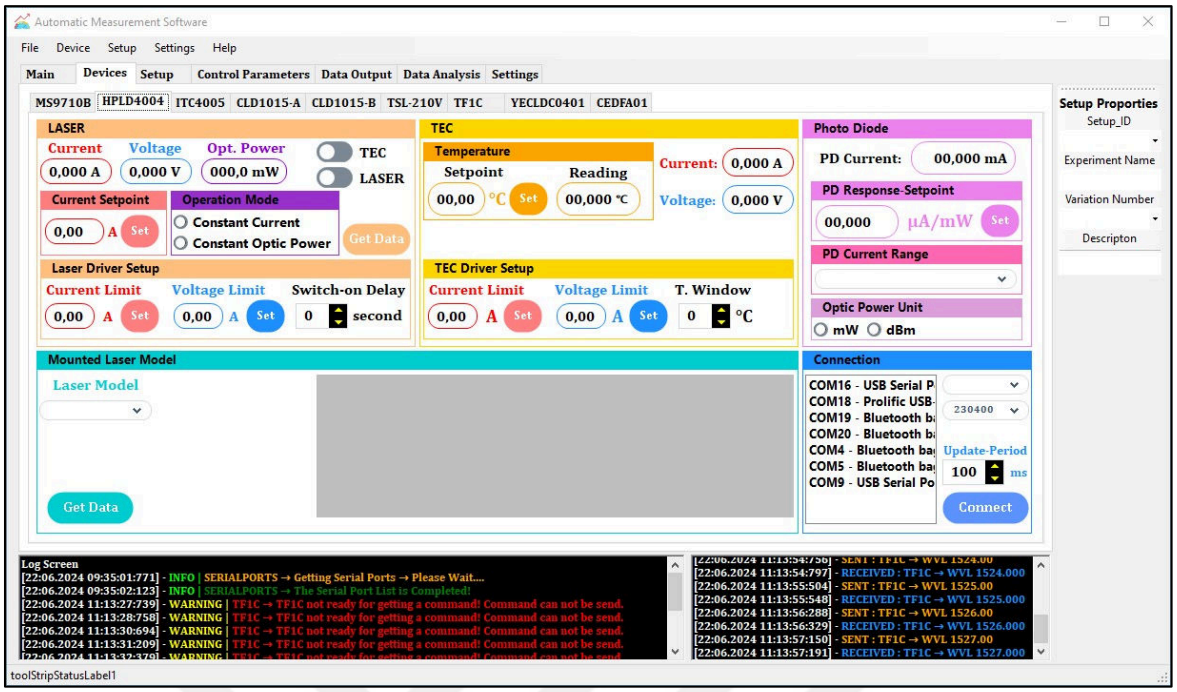
Laboratuvarda deney yaparken, normalde yukarıda bahsedilen olayların hepsi manuel bir şekilde, yani el ile tek tek bakılması, kayıt tutulması gerekir ve her değişen parametreyi sistematik bir şekilde kaydetmek mümkün olmamaktadır. İşte bu gibi sorunların önüne geçilebilinmesi için bu deney aşamalarını sistematik bir şekilde yapmamızı sağlayacak ve

bunların hepsinin aynı zamanda deney sırasında başımıza gelen olayları, cihazlarda çıkan sorunları ya da bilgilendirmeleri değişen komponent parametre gibi özelliklerin hepsini kayıt altında tutulması ancak bir yazılım ile olması mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ortaya çıkan bu yazılım sayesinde sistematik bir şekilde gerçek anlamda bilimsel deneyler yapılabilir ve elde edilen sonuçlar kayıt altına alınabilmektedir. Aynı zamanda, bu program her deneyi el ile yapmaya göre ciddi anlamda bir zaman tasarrufu da sağlamaktadır. Otomatik ölçüm alma programı sayesinde, bir deneyde hangi parametreler hangi sırayla değiştirilip sonucunda ise hangi verinin alınması gerektiği belirlenir ve hepsi bir kere programa baştan kaydedilip sadece programa ölçüm almayı başlat tuşuna tıklayarak bütün bu işlerin otomatik olarak ilerlemesi sağlanmaktadır. Burada, bu işlem sürerken cihazların kendilerine ait veri alma süreleri, bekleme süreleri, kalibrasyon süreleri gibi bütün bekleme işlemleri de otomatik olarak yapılarak tek tuşla deneylerde iterasyon yapılması mümkün hale gelmektedir.

Deney süreci devam ederken, programdan gelen geri bildirimler neticesinde deneyin daha sağlıklı yapılabilmesi için uyarılar da verilerek deneyin sağlıklı olması amaçlanmaktadır. Buna örnek olarak, bir cihazın kalibrasyonunun kayması ya da beklenen sonuçların çok dışında verilerin alınması gibi durumlarda program size uyarı vererek bu tarz problemlerin önüne geçilmesi sağlanmaktadır.

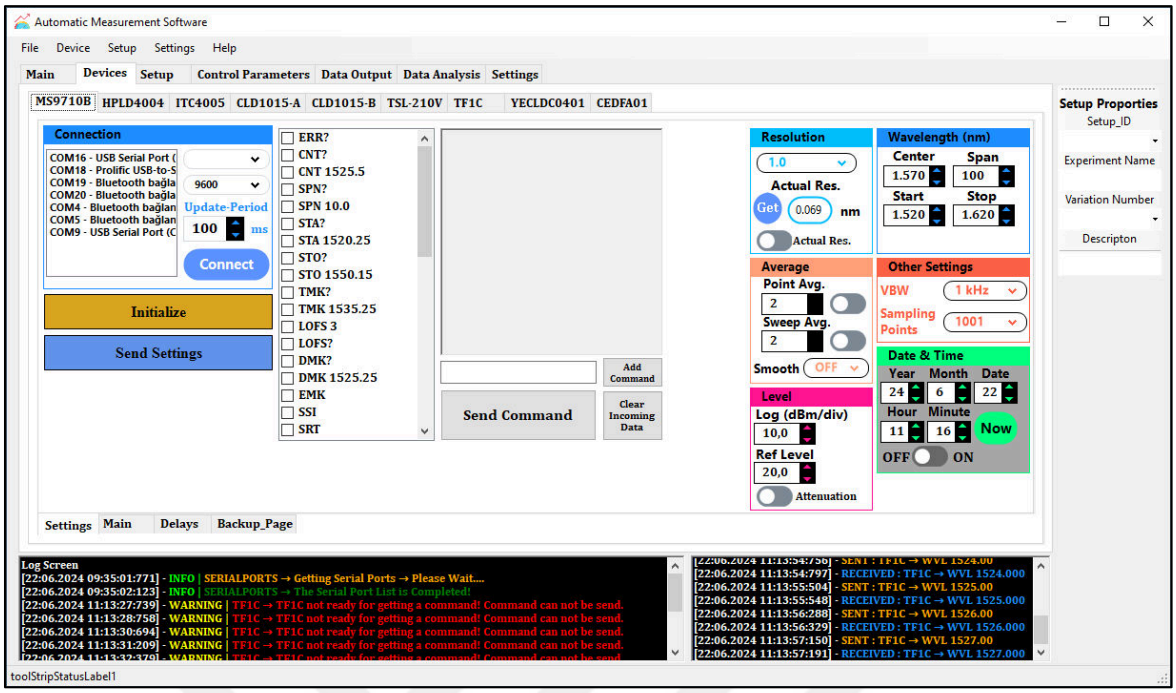
Resim 6.2'de görünen ekran görüntüsünde, Yimi elektronik tarafından geliştirilen HPLD4004 kodlu lazer sürücü kontrol cihazına ait ekran gözükmektedir. Bu ekranda lazer ve Termo Elektrik Soğutucu (TEC) kontrolüne ait çeşitli parametreler ve ayar kısımları bulunmaktadır. Bu arayüz sayesinde, öncelikle sağ alttaki bağlantı ekranından doğru USB port seçildikten sonra cihaz doğrudan bu ekran üzerinden tüm özellikleri kontrol edilebilir hale gelmektedir. Ayrıca, sol altta bulunan cihaza takılan lazer modeli de seçilerek, o an kullanılan lazere göre lazer diyotun maksimum dayanabileceği akım, gerilim limitleri ve TEC limitleri de tablodan bakılarak, ister elle istenirse de otomatik olarak limit ayalarması yapılabilir.



Resim 6.2. HPLD4004 cihazına ait kontrol ekranı

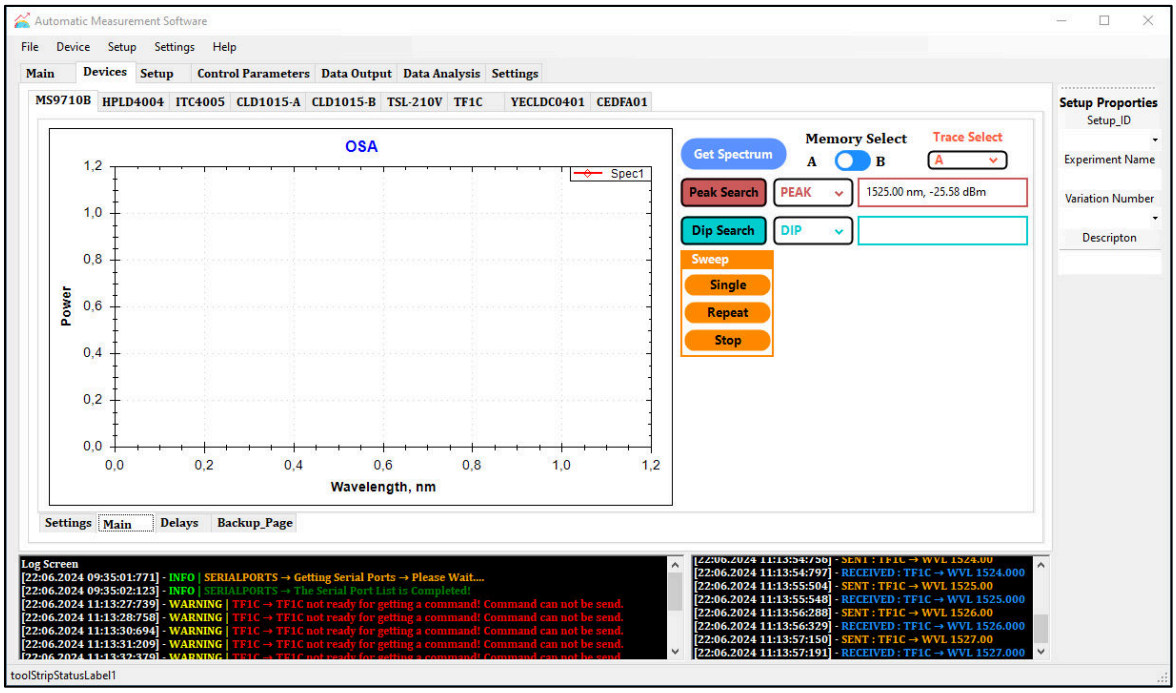
Programın en alt kısmında iki kayıt ekranı bulunmaktadır. Soldaki ekran, "Log Screen" olarak adlandırılır ve cihazların haberleşmeleriyle ilgili programdaki hatalar, cihazlardaki bilgilendirme uyarıları gibi kısımlar kayıt altına alınmaktadır. Sağ taraftaki ekran ise, anlık olarak hangi cihaza ne veri gönderildi ne veri geldiğini kayıt defteri olarak tutmaktadır. Bu ekranlar, deneyin yapıldığı esnada çıkan hataları takip etmek ve daha sonraki programda hata ayıklama üzerine kullanılabilmek için eklenmiştir.

Resim 6.3'de laboratuvarda bulunan optik spektrum analizörün MS9710B kodlu cihaza ait kontrol ekranı gözükmektedir. Bu ekranda, seri port bağlantısı yapıldıktan sonra, ilk ayarların gönderilmesi yapılmaktadır. Ortada bulunan komut listesinde cihaza ait çok farklı komutlar bulunmaktadır ve onun sağında bulunan ekran ve butonlar yardımıyla cihazda komut gönderimi manuel bir şekilde yapılabilmektedir. Sağ kısmında bulunan grup kutularında ise cihaza ait farklı ayarların değiştirebildiği kısımlar mevcuttur. Bu kısım cihaza ait ilk sekmedir ve buradan temel ayarlar yapılmaktadır.



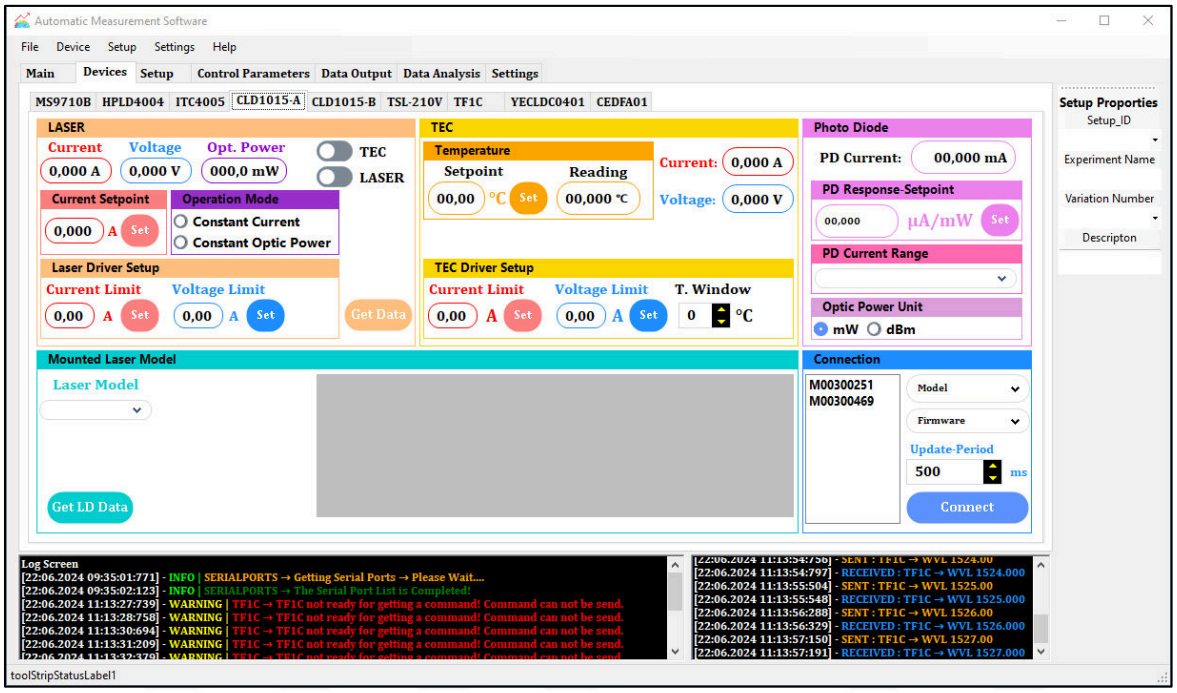
Resim 6.3. MS9710B cihazına ait kontrol ekranı

Resim 6.4'te ise optik spektrum analizöre ait temelde kullanılacak spektrum analizi, tepe değeri arama, dip değeri arama gibi farklı fonksiyonların çalıştırılabileceği ve spektrum verisinin alınabildiği ve görüntülenebildiği bir sekmedir.



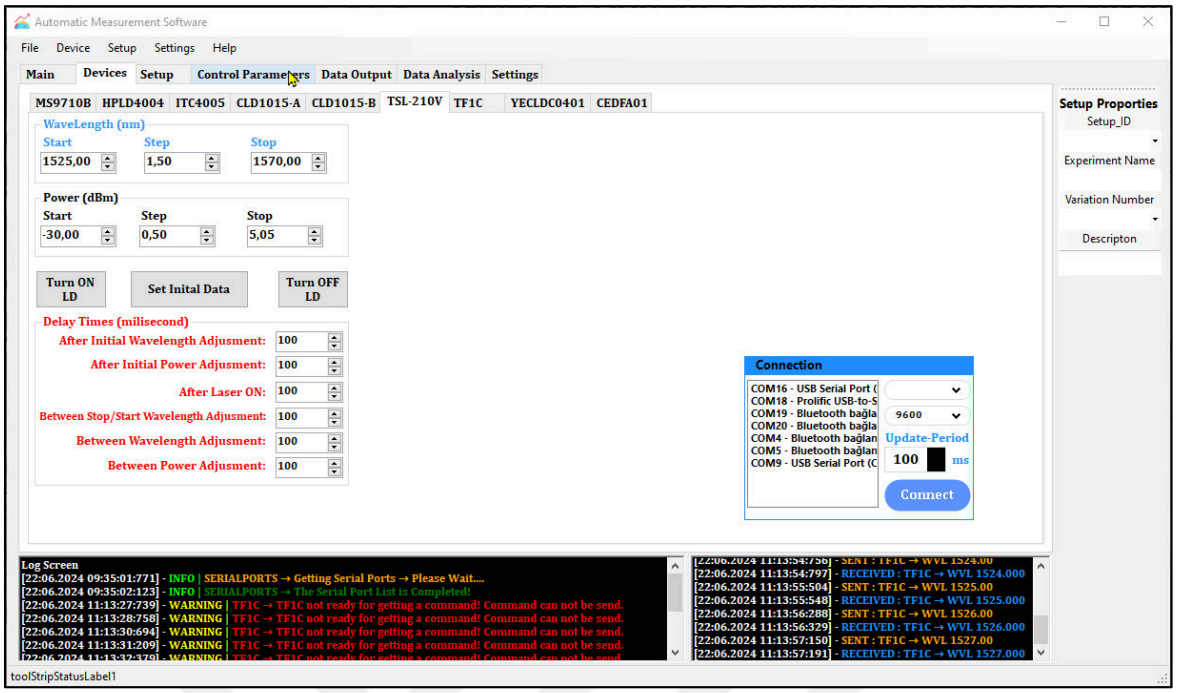
Resim 6.4. MS9710B cihazına ait kontrol ekranı

Resim 6.5'te laboratuvarda bulunan Thorlabs'a ait CLD1015 model numaralı pompa lazer sürücülerine ait kontrol ekranı gözükmektedir. Bu kontrol arayüzünde, yine benzer şekilde, önce sağ alttan bağlantısının sağlanıp, diğer kısımlarda olduğu gibi HPLD4004 kodlu üründe olduğu gibi ayar ve kullanım imkanı mevcuttur.



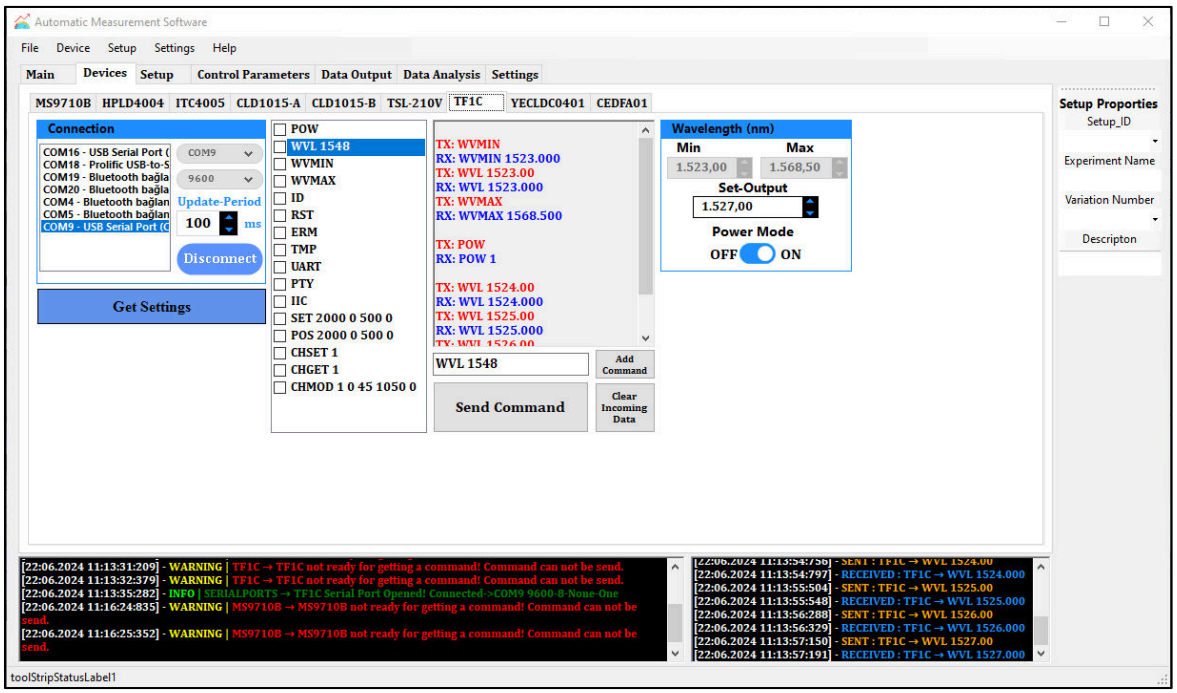
Resim 6.5. CLD1015 cihazına ait kontrol ekranı

Resim 6.6'da laboratuvarında bulunan Santec adlı firmaya ait ayarlanabilir lazer kaynağı mevcuttur. Bu kaynağın da ayar düğmeleri ekranda gözüktüğü gibi güç ya da dalgaboyu ayarlamaları yapılarak kullanılabilmektedir.



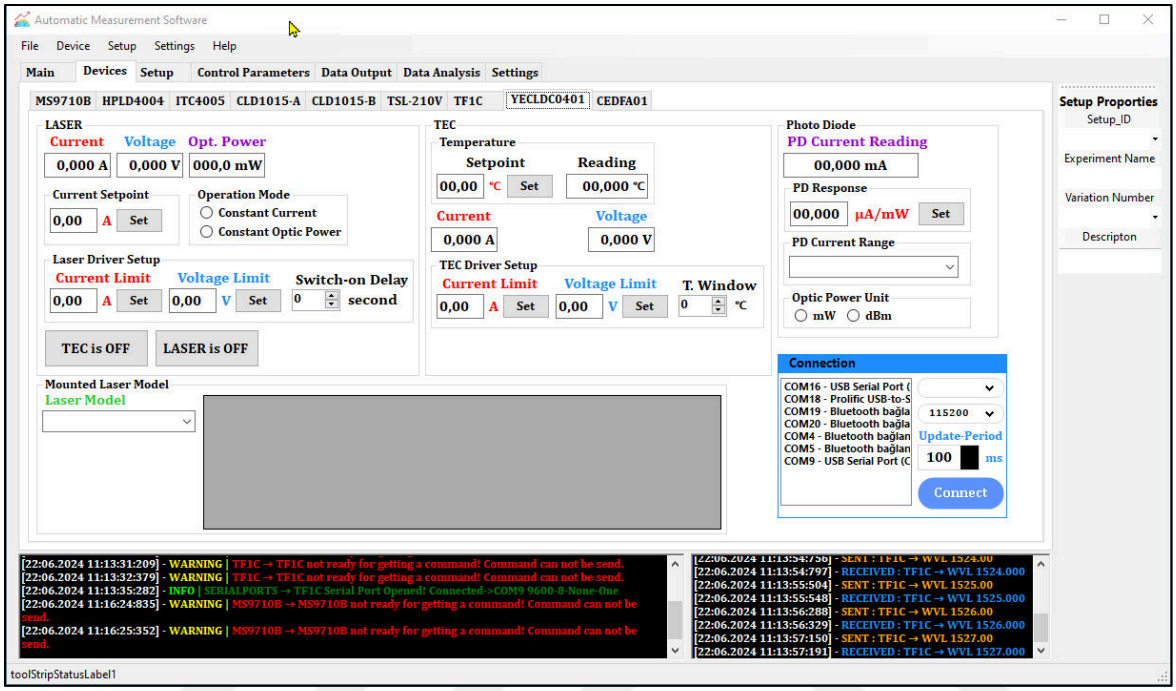
Resim 6.6. TSL-210V cihazına ait kontrol ekranı

Resim 6.7'de Sercalo firmasına ait ayarlanabilir filtre kontrol ekranı mevcuttur. Bağlantısı yapıldıktan sonra komut listesinden komutlar seçilerek cihaz kontrol edilir. Bunun dışında, normalde bu cihazı kullanmak için gerekli olan kısım, sağ üstte verilen mavi çizgili karede bulunan çıkış dalga boyu ayarı ve "Power Mode" ayarı ise buradan kullanılabilmektedir.



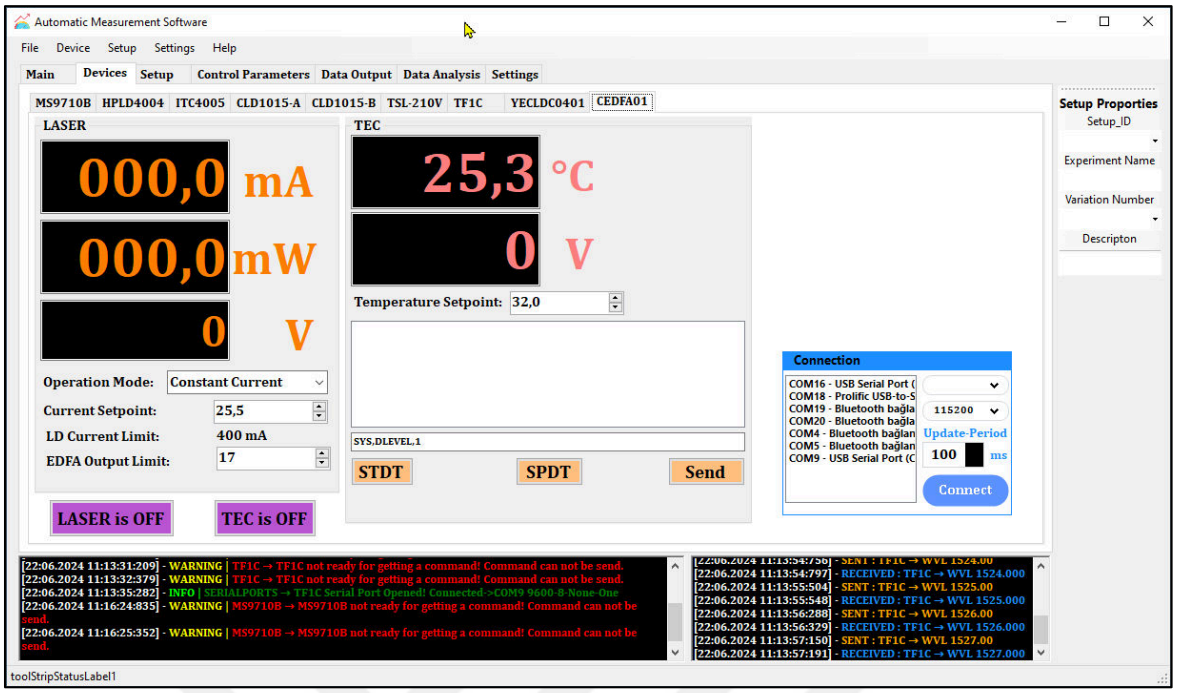
Resim 6.7. Ayarlanabilir Filtre cihazına ait kontrol ekranı

Resim 6.8'de yine Yimi Elektronik'in geliştirmiş olduğu kompakt lazer diyot sürücüsüne ait kontrol ekranı bulunmaktadır. Bu da daha önceden bahsedilen lazer sürücülere birebir aynı kontrol ekranına sahiptir.



Resim 6.8. YECLDC Lazer Sürücü cihazına ait kontrol ekranı

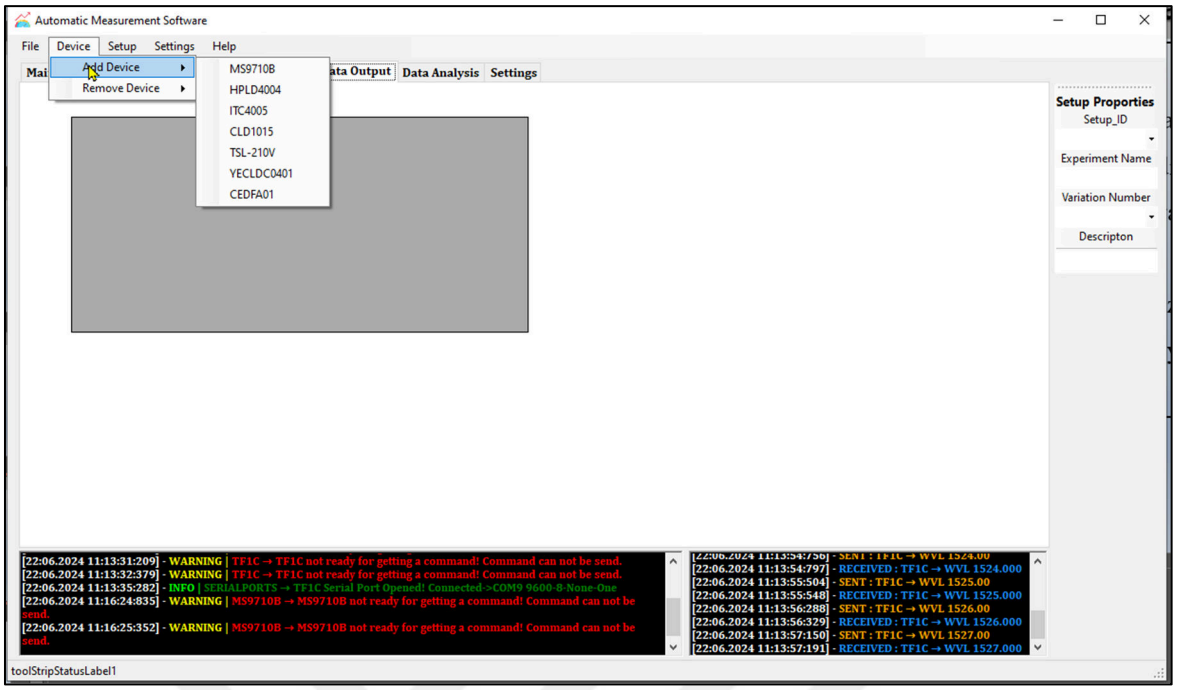
Resim 6.9'da Yimi Elektronik'in geliştirmiş olduğu "Kompakt EDFA" isimli cihaza ait kontrol ekranı gözükmektedir. Bu ekranda da EDFA'nın ayarlanabilir lazer akımı ve çalıştığı sıcaklık gibi ayarlar değiştirilip EDFA'nın karakterizasyonu değiştirilebilmektedir.



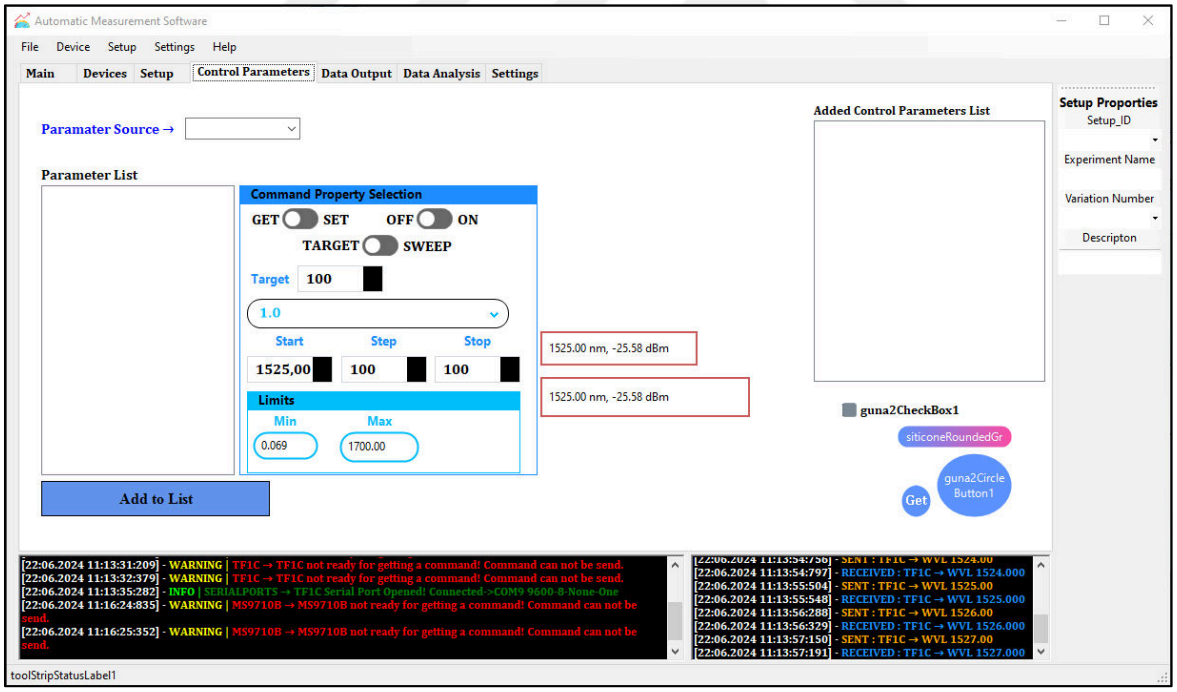
Resim 6.9. CEDFA-Kompakt EDFA cihazına ait kontrol ekranı

Resim 6.10'da deneyde kullanılacak aktif olan cihazları seçmek için cihaz “Ekle” ve “Kaldır” menüsü gözükmektedir. Her deneyde bütün cihazlar aynı anda kullanılmamaktadır. Bundan dolayı, o deneyde kullanılan aktif cihazlar seçilerek kontrol parametresi ekranında sadece o cihazlara ait parametrelerin gözükmesi sağlanarak gereksiz parametrelerin listelenmesinin önüne geçilmektedir. Bu menüde aynı zamanda henüz ekranda gözükmeyen fakat sonradan eklenecek olan “Komponent Ekle” butonu da yer alacaktır.

Resim 6.11’de görünen kontrol parametre ekranı bu programın en önemli kısmını oluşturmaktadır. Bu ekranda “Parameter Source” adı verilen yerden aktif cihazlara ait ya da pasif komponentlere ait kaynak seçildikten sonra o cihaza ya da komponente ait değiştirilebilir parametreler Sol altta verilen “Parameter List” isimli liste kutusunda gösterilecektir. Kullanıcı bu listeden değiştirmek istediği veya verisini almak istediği parametreyi seçerek ve sağda bulunan komut özellik seçim ekranından o komutla ilgili cihaza verimi göndermek istiyor yada cihazdan verimi almak istiyor yoksa bir tarama mı yaptırmak istiyor gibi ayarlar yapıldıktan sonra “Listeye ekle” butonuna tıklanarak sağ taraftaki komut oynatma listesine eklenerek bu komutların sıradan işletilmesi sağlanmaktadır.



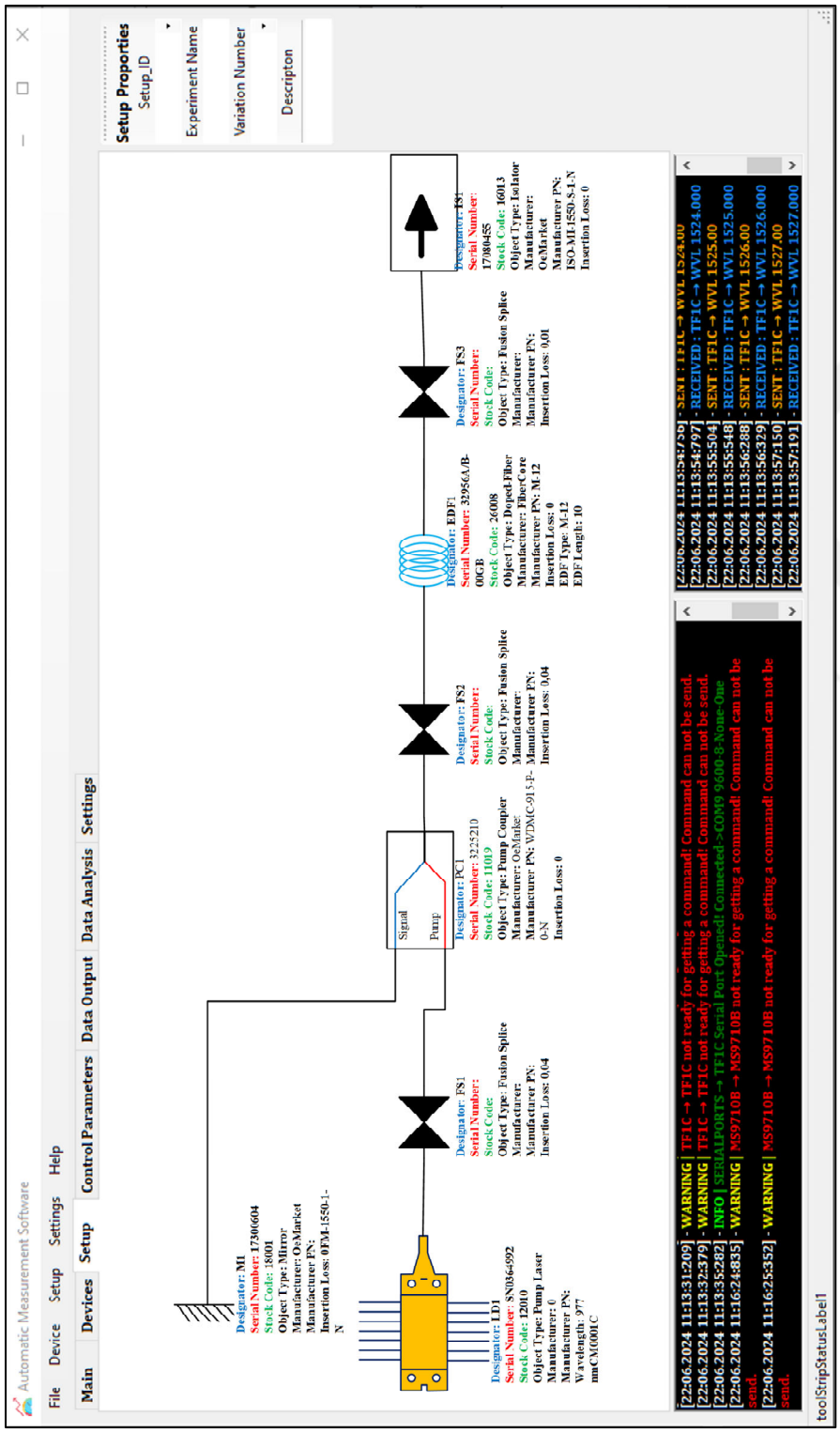
Resim 6.10. Cihaz ekleme-kaldırma menüsü



Resim 6.11. Deneyde kullanılacak parametrelerin seçim ekranı

Bu şekilde otomatik ölçüm alma işlemini esas yapan kısım bu sekme olmaktadır. Bu oynatma listesine eklenen komutlar sırasıyla gerek veri gönderilerek gerek ise veri alınmak suretiyle yapılarak arka planda da veri kayıt ekranına kaydedilerek saklanması sağlanacaktır.

Resim 6.12'de görünen “Setup” ekranında deneye ait düzenek görüntüsü verilmektedir. Bu düzenekte hangi komponentler bulunuyor, hangi parametreye sahip pasif komponentler kullanılıyor gibi veriler önizlenebilecektir.



Resim 6.12. Deney düzeneğine ait önizleme ekranı

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tezi çalışması, fotonik teknolojilerinin temel taşlarından biri olan Yükseltilmiş Kendiliğinden Yayılım (ASE) ışık kaynaklarının performans sınırlarını zorlayarak, C+L bant aralığında çalışan, yüksek çıkış gücüne, geniş bir spektral bant genişliğine ve üstün kazanç düzlüğüne sahip yeni nesil bir prototipin tasarlanması, gerçekleştirilmesi ve optimizasyonu amacıyla yürütülmüştür. Günümüzün yüksek kapasiteli optik iletişim ağları, hassas fiber optik sensör sistemleri, biyomedikal görüntüleme teknolojileri ve optik bileşen karakterizasyonu gibi kritik uygulama alanları, bu tür geniş bantlı ve kararlı ışık kaynaklarına giderek artan bir ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, tezin temel hedefi, mevcut literatürdeki en iyi uygulamaları temel alarak, yenilikçi optik konfigürasyonlar ve akıllı kontrol sistemleri aracılığıyla, yalnızca laboratuvar ortamında kalmayan, aynı zamanda son kullanıcıya yönelik pratik ve sağlam bir cihaza dönüştürülebilen yüksek performanslı bir ASE kaynağı geliştirmek olarak belirlenmiştir.

Bu hedefe ulaşmak için çok aşamalı ve sistematik bir araştırma metodolojisi izlenmiştir. Çalışmanın ilk adımı, ASE kaynakları üzerine yapılmış önceki akademik çalışmaları kapsayan derinlemesine bir literatür taraması olmuştur. Bu tarama sonucunda, özellikle çift geçişli ve çift yönlü pompalama gibi ileri düzey konfigürasyonların yüksek verimlilik ve spektral düzlük potansiyeli taşıdığı tespit edilmiştir. Ardından, OptiAmplifier gibi profesyonel simülasyon yazılımları kullanılarak, farklı erbiyum katkılı fiber (EKF) türleri, fiber uzunlukları ve pompa gücü kombinasyonları için kapsamlı teorik analizler ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen umut vadeden konfigürasyonlar temel alınarak ilk deneysel düzenekler kurulmuş, ancak bu ilk denemeler tezin yüksek performans hedeflerini tam olarak karşılamakta yetersiz kalmıştır. Bu durum, araştırma odağının, simülasyonların ötesinde, doğrudan deneysel optimizasyona ve daha üstün nitelikli optik bileşenlerin kullanımına kaydırılmasını sağlamıştır. Bu doğrultuda, çalışmanın en kritik aşaması olan nihai prototipin geliştirilmesine geçilmiştir.

Geliştirilen nihai prototip, tezin en önemli ve yenilikçi çıktısıdır. Bu sistemin kalbinde, geleneksel EKF'lere kıyasla çok daha homojen bir erbiyum iyonu dağılımı sunan ve dolayısıyla kümelenme gibi verimliliği düşüren etkileri minimize eden Doğrudan Nanopartikül Biriktirme teknolojisiyle üretilmiş Liekki Er30 (4/125) EKF bulunmaktadır. Bu özel fiber, 17 metrelik optimize edilmiş bir uzunlukta kullanılarak, C+L bandında geniş

bir kazanç elde edilirken doğrusal olmayan etkilerin de bastırılması sağlanmıştır. Sistemin optik mimarisi, fiberin her iki ucundan farklı dalga boylarıyla beslendiği, oldukça etkin bir çift yönlü pompalama şemasına dayanmaktadır. Fiberin girişinden 974,36 nm dalga boyu ile yapılan ileri yönlü pompalama C-bandında güçlü bir ASE üretimi sağlarken, çıkış ucundan 1479,9 nm dalga boyu ile yapılan geri yönlü pompalama ise L-bandındaki kazancı ve spektral düzlüğü artırmada kilit rol oynamıştır. Bu mimarinin bir diğer önemli unsuru ise çift geçişli yapıdır. Fiberin sonuna yerleştirilen ayna, ASE sinyalinin aktif ortamdan ikinci kez geçerek tekrar güçlendirilmesini sağlamış ve sistem verimliliğini belirgin şekilde artırmıştır. Ancak bu yüksek kazanç, spektrumda istenmeyen lazer gibi davranan tepelerin oluşmasına neden olmuştur. Bu soruna karşı geliştirilen pratik ve özgün çözüm, ayna ile fiber arasına kasıtlı olarak bir fiber adaptör yerleştirerek yaklaşık 0,5 dB'lik kontrollü bir kayıp oluşturmak olmuştur. Bu küçük ama kritik müdahale, lazer rezonans koşulunu ortadan kaldırarak spektrumu bozmadan "spike" oluşumunu tamamen engellemiş ve genel spektral düzlüğe de olumlu katkıda bulunmuştur.

Bu çalışmanın bilimsel ve teknolojik katkısı, yalnızca üstün özelliklere sahip bir optik düzenek kurmakla sınırlı kalmamıştır. Prototipi akıllı, otonom ve kullanıcı dostu bir cihaza dönüştüren özel bir gömülü kontrol sistemi ve optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Bir STM32 mikrodenetleyici tarafından yönetilen bu sistem, hassas lazer sürücü devrelerini, dokunmatik kullanıcı arayüzünü ve bir optik spektrum analizörü ile seri haberleşme altyapısını entegre etmektedir. Cihazın en yenilikçi yazılım özelliği, pompa lazer akımlarını sistematik olarak tarayarak, hedeflenen bant genişliği içindeki spektral dalgalanmayı (ripple) otonom olarak minimize eden optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, en düz spektrumu üreten ideal pompa akım çiftlerini bularak bu değerleri cihazın kalıcı hafızasındaki bir arama tablosuna kaydeder. Bu sayede son kullanıcı, karmaşık ayarlarla uğraşmaksızın, dokunmatik ekrandan istediği çalışma bandını (C, L veya C+L) ve çıkış gücünü seçerek, milisaniyeler içinde kararlı ve optimize edilmiş spektrumu elde edebilir. Bu donanım ve yazılım entegrasyonu, tezin en özgün yönlerinden birini oluşturmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen performans metrikleri, tezin hedeflerine başarıyla ulaşıldığını kanıtlamaktadır. Tüm çalışma modları için 30 mW (+14.80 dBm) gibi pratik bir optik çıkış gücü seviyesi hedeflenmiş ve bu hedefe ulaşılmıştır. Bu çalışmanın temel odak noktası dalgalanma değerlerini en aza indirmek olduğundan, optik çıkış gücü 30 mW ile sınırlanmıştır. Bununla birlikte, kuruluma dahil edilen elektronik kontrol ile, cihaz

içindeki belirlenen sınırlar dahilinde lazer akımları artırılarak 300 mW'a kadar daha yüksek çıkış güçleri elde edilebilir.

C-bandı modunda, 1524-1560 nm aralığında 36 nm'lik geniş bir bant genişliği elde edilmiş, spektrumun en düz olduğu 1535-1560 nm aralığında (25 nm genişlikte) dalgalanma değeri sadece 0,85 dB olarak ölçülmüştür. L-bandı modunda, 1560-1604 nm aralığında 44 nm gibi rekabetçi bir bant genişliğine ulaşılmış ve 1564-1595 nm aralığında (31 nm genişlikte) dalgalanma 1,01 dB gibi düşük bir değerde ölçülmüştür. C+L-bandı modunda, prototipin en etkileyici sonucu olarak, 1524 nm'den 1604 nm'ye uzanan toplam 80 nm'lik kesintisiz bir bant genişliği elde edilmiştir. Bu geniş bant içinde, 1532-1589 nm arasındaki 57 nm'lik geniş bir aralıkta kazanç dalgalanması 1,98 dB gibi üstün bir seviyede olmuştur. Ayrıca, C+L bandında 30 mW çıkış gücü için sistemin pompalama verimliliği %16,12 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, spektral düzlüğün birincil optimizasyon hedefi olduğu bu tür karmaşık sistemler için oldukça başarılı bir sonuçtur.

Çizelge 7.1’de literatürdeki diğer çalışmaların bu çalışma ile kıyaslanması verilmişitir. Çizelgedeki yüksek maliyetli olarak işaretlenen çalışmalar için verilen kararlar, düzeneklerde kullanılan bileşenlerin sayısı ve türüne ve kullanılan toplam EKF uzunluğuna dayanmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan lazer sayısı, pompa lazerleri açısından diğer çalışmalarla benzerdir. Ancak, kullanılan EKF uzunluğu göz önüne alındığında, diğer çalışmalara göre çok daha az EKF kullanılmıştır. Maliyet üzerinde önemli bir etkisi olan bu kısa EKF uzunluğu, düşük maliyetli kurulumlar için kritik öneme sahiptir. Özellikle C+L bandında elde edilen 80 nm bant genişliği ve yalnızca 3 dB civarında güç dalgalanması ile literatürdeki birçok çalışmadan daha yüksek düzeyde spektral düzlük ve geniş bir bant kapsamı sağlanmıştır. Ayrıca, 30 mW çıkış gücü, orta seviyede tutulan maliyet ve tam elektronik kontrol imkânı ile sistem hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar için daha esnek ve kullanıcı dostu bir yapı sunmaktadır. Klasik çalışmalarda yüksek çıkış gücü ve geniş bant elde edilirken spektral düzlük genellikle feda edilirken, bu tezde tüm parametreler dengeli şekilde optimize edilmiştir. Sonuç olarak, ortaya çıkan prototip, mevcut teknolojilerden daha kompakt, verimli ve kararlı bir alternatif oluşturmaktadır.

Çizelge 7.1. Yapılan tez çalışmasının literatürdeki benzerleri ile kıyaslanması

Çalışma	Band	Bant genişliği	Güç Dalgalanması	Güç	Pompa LD Sayısı	Pompalama Şeması	Toplam EKF Uzunluğu	Elektronik Kontrol	Bant Seçilebilirliği	Maliyet
[15]	C+L	80,0 nm	5 dB	39 mW	2	2-Aşamalı İleri Yönlü	35 m	Yok	Yok	Yüksek
[38]	C+L	81,0 nm	5 dB	177,8 mW	3	Çift Geçişli Çift Yönlü	19 m	Yok	Yok	Yüksek
[39]	L	40,8 nm	0,7 dB	72,2 mW	2	Çift Geçişli İleri Yönlü	93 m	Yok	Yok	Orta-Yüksek
[5]	C	~ 34 nm	~ 8 dB	27,6 mW	1	Tek Geçişli Çift Yönlü	19 m	Yok	Var C veya L	Orta-Yüksek
	L	40,0 nm	3 dB	11,8 mW		Çift Geçişli İleri Yönlü				
[29]	S+C+L	57,0 nm	7,5 dB	20,8 mW	2	2-Aşamalı Çift Geçişli	2 m (HB-EKF)	Yok	Yok	Orta
[23]	C	~ 20 nm	-	10,2 mW	2	2-Aşamalı Çift Yönlü	41,5 m	-	Yok	Orta-Yüksek
Bu Tez	C	36,0 nm	3 dB	30 mW	2	Çift Geçişli Çift Yönlü	17 m	Tam Kontrol	Tam Kontrol	Orta
	L	44,0 nm	3 dB	30 mW						
	C+L	80,0 nm	3 dB	30 mW						

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile yüksek güçlü, geniş bantlı ve düz kazanca sahip bir ASE ışık kaynağı başarıyla geliştirilmiş ve laboratuvar ortamındaki bir düzenekten öteye taşınarak, sağlam ve kompakt bir prototip cihaza dönüştürülmüştür. Geliştirilen optik mimari, üstün nitelikli fiber seçimi ve en önemlisi, donanım ile yazılımı birleştiren akıllı optimizasyon yaklaşımı, bu alandaki mevcut bilgi birikimine önemli katkılar sunmaktadır. Elde edilen bu prototipin, Türkiye'nin fotonik alanındaki teknolojik yeteneklerini güçlendirme ve yerel sanayinin ihtiyaç duyduğu ileri optik bileşenlerin geliştirilmesine destek olma potansiyeli yüksektir. Gelecekteki çalışmalar, bu sağlam temel üzerine inşa edilerek daha yüksek çıkış güçlerine ulaşılması, spektral bant genişliğinin daha da artırılması ve sistemin farklı fotonik uygulamalara entegrasyonu gibi konulara odaklanabilir.

KAYNAKLAR

1. Wang X, Huang W. (2006). Band-selective C- or L-band erbium-doped fiber amplified spontaneous emission source. *Optical Engineering*, 45(2), 020501.

2. Nafchi FM, Shahi S, Shaffaatifar MT, Kanani M, Noormohammadi H. (2016). Novelty design in gain flattening filter of ASE source based on fat ultra-long period fiber grating. *Photonic Sensors*, 6(3), 243–248.

3. Silva WF, Rodrigues NAS, Sakamoto JMS. (2024). Spectral Stability in Double Pass Erbium Doped Fiber ASE Source. In *2024 Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors (LAWOFS)*,1–2.

4. Schmidt O, Rekas M, Wirth C, Rothhardt J, Rhein S, Kliner A. (2011). High power narrow-band fiber-based ASE source. *Optics Express*, 19(5), 4421.

5. Wang X, Ming H, Huang W. (2005). Band selective ASE source for dual-band DWDM device characterization and metro networks. In *Passive Components and Fiber-based Devices II*, 60194C.

6. Huang W, Huang C, Wang X, Zheng B, Xu H, Cai Z. (2007). *A C+ L-band erbium-doped fiber ASE source using dual-forward pumping configuration.* In 2007 Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference, Shanghai, 391–393.

7. Tan S, Li Y, Wang X, Jin Z, Zhang H, Jin J. (2022). Parameters Optimization of ASE Source for the Improvement of Optical Power Stability in Space Radiation Environment. *Journal of Lightwave Technology*, 40(8), 2612–2618.

8. Rößner MR, Müller MS, Buck TC, Koch AW. (2012). Broadband light source for fiber-optic measurement system in spaceborne applications. *Acta Astronautica*, 70(1), 95–99.

9. Szu-Chi Tsai, Tseng-Chien Tsai, Pi-Cheng Law, Yung-Kuang Chen. (2003). High pumping-efficiency L-band erbium-doped fiber ASE source using double-pass bidirectional-pumping configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(2), 197–199.

10. Zhu L, He W, Zhang Y, Luo F, Dong M. (2014). A high flattening C + L band broadband source based on single pump and the same erbium-doped fiber. *Optik*, 125(17), 4659–4662.

11. Tsai S-C, Lee C-M, Hsu S, Chen Y-K. (2002). Characteristic comparison of single-pumped L-band erbium-doped fiber amplified spontaneous emission sources. *Optical and Quantum Electronics*, 34(11), 1111–1117.

12. Huang Y, Lin D, Lin X, Xu C, Zeng Z, Liao T. (2020). 2 μm Tm3+ doped silica microsphere laser using amplified spontaneous emission light for pumping. *Optics Communications*, 460, 125137.

13. Espindola RP, Ales G, Park J, Strasser TA. (2000). 80 nm spectrally flattened, high power erbium amplified spontaneous emission fibre source. *Electronics Letters*, 36(15), 1263–1265.

13. Espindola RP, Ales G, Park J, Strasser TA. (2000). 80 nm spectrally flattened, high power erbium amplified spontaneous emission fibre source. *Electronics Letters*, 36(15), 1263–1265.

14. Maeda Y, Yamada M, Endo T, Ohta K, Tanaka T, Ono M. (2014). 1700 nm ASE light source and its application to mid-infrared spectroscopy. In *2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, 410–411.

15. Wang X, Ming H, Huang W. (2005). A novel two-stage erbium amplified spontaneous emission fiber source with 80nm bandwidth. *Passive Components and Fiber-based Devices II*, 6019, 931-938.

16. Meng S-H, Hu S-B, Chui H-C, Chang C-H, Chu S-C. (2017). A Broadband ASE Light Source-based FTTX RoF-WDM Optical Network System. *Journal of Network Intelligence*, 2(1), 162–170.

17. Adikan FRM, Mahdi MA, Dimyati K, Ahmad H. (2002). A study of gain and noise figure performance of an L-band erbium doped fibre amplifier (EDFA) with 980 nm and amplified spontaneous emission (ASE) pumps. In *2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium (Cat. No.00CH37119)*, 417–420.

18. Chen Y, Zhou Y, Yang D, Yan W, Wang Y. (2018). A Temperature-Insensitive Amplified Spontaneous Emission Broadband Source Based on Er-Doped Fiber. *Chinese Physics Letters*, 35(4), 044206.

19. Yu X, Feng M, Zhang R, Feng Y, You H, Guo F. (2017). Amplified spontaneous emission from a single organic microfiber fabricated by melt electrospinning. *Organic Electronics*, 51, 442–445.

20. Wang Y, Bao H, Jiang X, Yang T, Li S, Sui Z. (2005). An 88-nm broadband ASE source with bismuth-based erbium-doped fiber. *Chinese Optics Letters*, 3(1), 4–5.

21. Harun SW, Rahman FA, Dimyati K, Ahmad H. (2006). An efficient multiwavelength light source based on ASE slicing. *Laser Physics Letters*, 3(10), 495–497.

22. Gurkaynak IA, Al-Mashhadani TF, Al-Mashhadani MKS, Ali MH, Gunduz AE, Yucel M. (2022) An efficient wide flatness gain bandwidth with parallel hybrid fiber amplifier. *Microwave and Optical Technology Letters*, 64(2), 251–258.

23. Wan S, Zhan T, Hu D, Yan H, Han D. (2023). An Erbium-Doped Fiber Source with Near-Gaussian-Shaped Spectrum Based on Double-Stage Energy Matching and LPFGs. *Photonics*, 10(5), 533.

24. Muniz-Cánovas P, Barmenkov YO, Kir'yanov A V., Cruz JL, Andrés M V. (2019). ASE narrow-band noise pulsing in erbium-doped fiber amplifier and its effect on self-phase modulation. *Optics Express*, 27(6), 8520.

25. Michie WC. (2007). Automatic power control with electronic amplified spontaneous emission compensation. *Optical Engineering*, 46(8), 080501.

26. Sinivasagam V, Dimyati K, Singh RD, Abushagur MAG. (2005). Band selection in an amplified spontaneous emission source using the backward-feedback technique. *Microwave and Optical Technology Letters*, 46(3), 218–220.

27. Wang X, Huang W. (2013). Band selective C- or L-band ASE source using unpumped erbium-doped fiber with an optical switch. *Optics & Laser Technology*, 48, 263–266.

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

29. Al-Azzawi AA, Almukhtar AA, Hmood JK, Das S, Dhar A, Paul MC. (2022). Broadband ASE source for S+ C+ L bands using hafnia-bismuth based erbium co-doped fibers. *Optik*, 255, 168723.

30. Zhang X, Max J-J, Kassi H. (2006). C+L band erbium-doped fiber ASE source enables high-speed FBG sensor interrogation. *Photonics North 2006*, 6343.

31. Kanwal B, Atieh A, Sajid M, Mirza J. (2023). Cascaded C+L-band tunable erbium-doped fiber lasers for simultaneous generation of continuous wave and mode-locked pulses. *Optical and Quantum Electronics*, 55(4), 331.

32. Xu H, Huang W, Cai Z, Ye C. (2005). Characteristics comparison of optimal L-band Er-doped ASE sources in different configurations. *Passive Components and Fiber-based Devices II*, 6019, 954-961.

33. Wang X-L, Huang W-C, Cai Z-P. (2012). Characteristics Improvement of L-Band Superfluorescent Fiber Source Using Unpumped Erbium-Doped Fiber. *Chinese Physics Letters*, 29(8), 084213.

34. Arabanian AS, Massudi R. (2015). Design and experimental realization of a highly efficient superfluorescent fiber source with flat C-band spectrum. *Optical Engineering*, 54(9), 096103.

35. Wang X, Huang C, Huang W, Xu H, Cai Z, Ye C. (2007). Design and optimization of a high-power L-band ASE fiber source. *27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 6279, 1703-1708.*

36. Wang T, Guo Y, Wang Y, Zhao M, Wang K, Liu S. (2006). Experimental investigation on the C+L-band super-fluorescence fiber source. *Advanced Laser Technologies 2005*, 6344, 134-141.

37. Tian JJ, Yao Y, Sun YX, Xu XC, Zhao XH, Chen DY. (2010). Flat broadband erbium-doped fiber ASE source based on symmetric nonlinear optical loop mirror. *Laser Physics*, 20(8), 1760–1766.

38. Lin H, Chang C-H. (2004). High power C+L-band Erbium ASE source using optical circulator with double-pass and bidirectional pumping configuration. *Optics Express*, 12(25), 6135.

39. Tsai S -C., Tsai T -C., Law P -C., Chen Y -K. (2003). High-power flat L-band erbium-doped fiber ASE source using dual forward-pumping scheme. *Optical and Quantum Electronics*, 35(2), 161–167.

40. Yücel M, Yiğit E. (2020). İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY Tasarımı ve EKFY Parametrelerinin Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(2), 335–344.

41. Huang WC, Wai PKA, Tam HY, Dong XY, Ming H, Xie JP. (2002). One-stage erbium ASE source with 80 nm bandwidth and low ripples. *Electronics Letters*, 38(17), 956–957.

42. Cadier B, Ferrand S, Bonnefois J-J, Pinsard E, Laurent A, Robin T. (2017). Radiation resistant erbium doped fiber for ASE source and fiber gyroscope application. *International Conference on Space Optics — ICSO,* 10564, 740-744.

43. Yue H, Ou Z, Dai Z, Liu Y. (2008). Study of spectrum flattening of ASE fiber source based on long period fiber grating. In *Proceedings of SPIE*, 68301G.

44. Durak FE, Altuncu A. (2017). The effect of ASE reinjection configuration through FBGs on the gain and noise figure performance of L-Band EDFA. *Optics Communications*, 386, 31–36.

45. Jazi MK, Shahi S, Hekmat MJ, Saghafifar H, Khuzani AT, Khalilian H. (2013). The evaluation of various designs for a C and L band superfluorescent source based erbium doped fiber. *Laser Physics*, 23(6), 65104.

46. Wang P, Clarkson WA. (2009). *Tunable Yb-doped Fibre Amplified Spontaneous Emission Source.* In Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference.

47. Wang X, Huang W, Xu H, Cai Z. (2010). Ultra-high-efficiency L-band erbium-doped superfluorescent fiber source with broadening linewidth. *Optical Engineering*, 49(8), 085003.

48. Chen H, Babin F, Leblanc M, He G, Schinn GW. (2003). Widely tunable S-band fiber-ring lasers and broadband amplified spontaneous emission sources with thulium-doped fluoride fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 21(7), 1629–1634.

49. Yigit E, Yucel M. (2021). Three-stage six-pass EDFA preamplifier design and EDFA parameters' optimization. *Optical and Quantum Electronics*, 54(1), 24.

50. Wang X, Huang W, Xu H, Cai Z. (2009). Band Selective C- or C+L-band ASE Source Using the Backward Feedback Technique. In *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2009*, TUP11_4.

51. Yücel M, Göktaş HH. (2003). Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde (EDFA) Pompalama Dalgaboyu ve Yönünün EDFA Kazancına Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 6(6), 627–635.

52. Al-Azzawi AA, Almukhtar AA, Dhar A, Paul MC, Ahmad H, Altuncu A. (2020). Gain-flattened hybrid EDFA operating in C + L band with parallel pumping distribution technique. *IET Optoelectronics*, 14(6), 447–451.

53. Nakamura A, Okamoto K, Koshikiya Y, Manabe T. (2016). Effective Mode Field Diameter for LP $_{11}$ Mode and Its Measurement Technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(22), 2553–2556.

54. Sadık ŞA, Durak FE, Altuncu A. (2021). Fiber Bragg Grating Sensor Interrogation Using Tunable Erbium-Doped Fiber Ring Laser Source. *Sakarya University Journal of Science*, 25(2), 349–356.

55. Ou Z, Fan X, Zhang L, Fan Y, Yuan C, You L. (2023). Effect of spectrum broadening on photon-counting fiber Bragg grating sensing. *Optics Express*, 31(5), 8152.

56. Jin A, Zhou H, Zhou X, Hou J, Jiang Z. (2015). High-Power Ultraflat Near-Infrared Supercontinuum Generation Pumped by a Continuous Amplified Spontaneous Emission Source. *IEEE Photonics Journal*, 7(2), 1–9.

57. Hui F, Tianjin ML, Ma L, Zuo W, Zhang S, Zhang XM. (2017). Investigation on near Gaussian-shaped spectrum erbium-doped fiber source which applied to the fiber optic gyroscope. In *2017 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 1–4.

58. Yucel M, Yucel M. (2021). The measurement of strain of a prototype pulley system using a Brillouin optical time domain analysis. *Microwave and Optical Technology Letters*, 64(1), 190–198.

59. Shakaty AA, Hmood JK, Mahdi BR, Mahdi RI, Al-Azzawi AA. (2022). Q-switched erbium-doped fiber laser based on nanodiamond saturable absorber. *Optics &amp Laser Technology*, 146, 107569.

60. Cheng X, Pan W, Zeng X, Dong J, Cui S, Feng Y. (2020). Relative intensity noise comparison of fiber laser and amplified spontaneous emission sources. *Optical Fiber Technology*, 54, 102119.

61. Bouchier A, Lucas-Leclin G, Balembois F, Georges P. (2004). Spectrally Narrowed Amplified Spontaneous Emission Source at 977 nm Based on a Single-Mode Ytterbium-Doped Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(9), 2021–2023.

62. Nakaji H, Nakai Y, Shigematsu M, Nishimura M. (2003). Superior high-speed automatic gain controlled erbium-doped fiber amplifiers. *Optical Fiber Technology*, 9(1), 25–35.

63. Liu H-Y, Li Y-F, Gao Q-G, Liu Z-D, Fu H-B. (2018). Tunable amplified spontaneous emissions by dimensional-controlled microcrystal synthesis. *Chinese Chemical Letters*, 29(1), 209–212.

64. Cheng J, Zhang L, Ma Z, Qiu J. (2014). Tunable and switchable dual-wavelength Er-doped fiber ring laser using ASEs. *Optics Communications*, 324, 202–204.

65. Ye Z-P, Zhang S, Guo Y, Zhang Q. (2024). Tunable gain clamping L-band erbium-doped fiber amplifier based on FBG and BBM. *Optical Fiber Technology*, 88, 103823.

66. Yücel M, Öztürk NF. (2021). FBG Algılama Sistemlerinde Gaussian Uyarlama Yöntemi ile Merkez Dalgaboyunun Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(1), 63–68.

67. Kipriksiz S, Yücel M. (2021). Düzgün Olmayan Yapılarda Fiber Bragg Izgara Sensör Tasarımı ve Uygulaması. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 843–851.

68. Yolcu V, Yücel M. (2024). Raman Yükselteç Modeli Üzerine Bir Çalışma. *Politeknik Dergisi*, 27(4), 1399–1407.

69. Yıldız E. (2023) GaSe Yarıiletken Kristallerine Bor Katkılamanın Optik Sınırlama ve İki Foton Soğurma Özellikleri Üzerine Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 26(1), 161–168.

70. Yucel M, Aslan Z, Celebi F V., Goktas HH. (2013). Gain and noise figure enhancements of both C and L bands double pass Erbium Doped Fiber Amplifier. In *2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 599–603.

71. Lao H, Ruan J, Lin M, Zhong L, Wang S, Xu P. (2023). Dual-Stage Double-Pass Extended L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier with Improved Gain Performance. *Photonics*, 10(11), 1266.

72. Talam DB, El-Badawy E-SA, Shalaby HMH, Aly MH. (2020). EDFA gain flattening using fiber Bragg gratings employing different host materials. *Optical and Quantum Electronics*, 52(3), 161.

73. İnternet: Dincer A, Yücel M. (Jun, 2023). Modelling and Optimizations of Triple-Pass TDFAs for Next-Generation Fiber Optical Communication Systems. URL: https://www.researchsquare.com/article/rs-3101449/v1 / Erişim Tarihi: 10.06.2025

74. Gulzar A, Qazi G. (2024). Numerical investigations of double pass, highly selective FBG based DFB-EDFA system for enhanced gain and ASE-mitigation. *Optical and Quantum Electronics*, 56(11), 1802.

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

76. Nakamura A, Okamoto K, Koshikiya Y, Manabe T. (2016). Effective Mode Field Diameter for LP 11 Mode and Its Measurement Technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(22), 2553–2556.

77. Mirza J, Ghafoor S, Salman A, Habib N, Karim Qureshi K. (2022). Design of L + U-band Erbium-doped fiber amplifier based on a single S-band forward pump source. *International Journal of Communication Systems*, 35(13), e5250.

78. Pokorný J, Moravec O, Aubrecht J. (2021). Broadband fiber-optic thulium-doped source of amplified spontaneous emission. *Micro-structured and Specialty Optical Fibres VII*, 211–216.

79. Harun SW, Abd Rahman F, Dimyati K, Ahmad H. (2006). An efficient gain-flattened C-band Erbium-doped fiber amplifier. *Laser Physics Letters*, 3(11), 536–538.

80. Loconsole AM, Falconi MC, Laneve D, Portosi V, Taccheo S, Prudenzano F. (2020). Tm: Er: Yb: Ho amplified spontaneous emission source operating from 1480 nm to 2100 nm. In *2020 Italian Conference on Optics and Photonics (ICOP)*, 1–4.

81. Singh R, Sharma EK, others. (2004). Gain flattening by long period gratings in erbium doped fibers. *Optics communications*, 240(1–3), 123–132.

82. Vallon S, Chevallier P, Guiziou L, Alibert G, Chun LSHK, Boos N. (2003). 40-band integrated static gain-flattening filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(4), 554–556.

83. Göktaş HH, Yücel M. (2006). Gain flattening filter optimization of the two stage C band erbium doped fiber amplifiers (EDFA). *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 10–13.

84. Lu Y Bin, Chu PL, Alphones A, Shum P. (2004). A 105-nm ultrawide-band gain-flattened amplifier combining C-and L-band dual-core EDFAs in a parallel configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(7), 1640–1642.

85. Yamada M, Mori A, Kobayashi K, Ono H, Kanamori T, Oikawa K. (1998). Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(9), 1244–1246.

86. Dung J-C, Chi S, Wen SF, others. (1998). Gain flattening of erbium-doped fibre amplifier using fibre Bragg gratings. *Electronics Letters*, 34(6), 555–556.

87. Yucel M, Goktas HH. (2008). C band erbium doped fiber amplifier as a flat gain optical amplifier. In *2008 IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference*, 1–3.

88. Honzatko P, Baravets Y, Kasik I, Podrazky O. (2014). Wideband thuliumholmium-doped fiber source with combined forward and backward amplified spontaneous emission at 1600-23000.nm spectral band. *Optics Letters*, 39(12), 3650.

89. Khamis MA, Ennser K. (2017). Enhancement on the generation of amplified spontaneous emission in thulium-doped silica fiber at 2 μm. *Optics Communications*, 403, 127–132.

90. Yan P, Yu W, Wang Z, Tian J, Liu Z, Li D. (2020). 1535–1620 nm widely tunable Watt-level single-mode Er: Yb codoped all-fiber MOPA. *IEEE Photonics Technology Letters*, 32(9), 518–521.

91. Akbaş EE, Yertutanol A, Andaç T, Özbay E, Azizian-Kalandaragh Y. (2023). Optimization of ASE Light Source Design for Enhancement of Wavelength Stability. In *2023 IEEE SENSORS*, 1–4.

92. Desurvire E. (1993). *Erbium-doped Fiber Amplifiers Principles and Applications.* New York: A Wiley-Interscience Publication, 8-20.

93. Hwang IK, Lee Y-J, Lee Y-H. (2003). Birefringence induced by irregular structure in photonic crystal fiber. *Optics express*, 11(22), 2799–2806.

94. Prince MdTM, Alam MS. (2023). Comprehensive Analysis of Dual Core Photonic Crystal Fibers for Optimizing Optical Properties Towards Highly Coherent Supercontinuum Generation. *Journal of Lightwave Technology*, 41(17), 5703–5713.

95. Yu H, Huang W, Xiao F, Song B, Chen S. (2024). Parameter Space Compression and Random Structure Automatic Generation for the Inverse Design of Photonic Crystal Fibers Based on Convolutional Adversarial Autoencoder. *Journal of Lightwave Technology*, 42(22), 7871–7881.

96. AbdelMalek F, Li H, Schulzgen A, Moloney J V., Peyghambarian N, Ademgil H. (2009). A Nonlinear Switch Based on Irregular Structures and Nonuniformity in Doped Photonic Crystal Fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 45(6), 684–693.

97. Yolcu V, Yücel M. (2025). Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Modelinin Nümerik Analizi. *Politeknik Dergisi*, Baskıda.

98. Tammela S, Söderlund M, Koponen J, Philippov V, Stenius P. (2006). The potential of direct nanoparticle deposition for the next generation of optical fibers. *Optical Components and Materials III,* 6116, 94-102.



Gazili olmak ayrıcalıktır