



**ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK YÜKSELTEÇLERDE YAZILIM
TABANLI KAZANÇ KONTROLÜ**

Özcan AKÇEŞME

**YÜKSEK LİSANS
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2020

Özcan AKÇEŞME tarafından hazırlanan “ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK YÜKSELTEÇLERDE YAZILIM TABANLI KAZANÇ KONTROLÜ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat YÜCEL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 19/06/2020

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Özcan AKÇEŞME

19/06/2020

ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK YÜKSELTEÇLERDE YAZILIM TABANLI
KAZANÇ KONTROLÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Özcan AKÇEŞME

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2020

ÖZET

Bu çalışmada, C bant bölgesinde çalışan erbiyum katkılı fiber yükselteçlerin (EKFY) kazançlarının otomatik kontrolü sağlanmış olup minimum kazanç salınım değerleri elde edilmiştir. Bu amaçla, C bant bölgesinde çalışan bir EKFY tasarlanıp, bu EKFY'yi kontrol edecek olan elektronik kontrol devresi ve bilgisayar üzerinden kontrolünü sağlayacak yazılımlar gerçekleştirilmiştir. EKFY'lerin optik kazanç spektrumları C bant bölgesinde doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu nedenle optik yükselteç zinciri kullanıldığında yani art arda yükseltmeler yapıldığında dalga boylarında elde edilen toplam kazanç değerleri farklılık gösterecektir. Bunun sonucu olarak kimi dalga boyları alıcı tarafa ulaşmadan zayıflayacaktır. EKFY'lerde dinamik kazanç değeri pompa lazerin gücü kontrol edilerek sağlanır. Pompa lazerlerin kontrolü ise akım ve sıcaklıktan oluşan iki parametreye bağlı olarak gerçekleşir. Bu tezin üzerinde önemle durulan en yoğun çalışılan konulardan birisi de bu lazerlerin kontrol edilmesi olmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda ayarlanabilir lazer kaynağı, optik spektrum analizörü ve pompa lazer kontrol cihazlarından oluşan otomatik kazanç sistemini tümleşik halde kontrol edebilmek için bilgisayar yazılımları gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 90533
Anahtar Kelimeler : Erbiyum katkılı fiber optik yükselteç, otomatik kazanç, elektronik kontrol
Sayfa Adedi : 80
Danışman : Prof. Dr. Murat YÜCEL

SOFTWARE BASED GAIN CONTROL IN ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER

(M. Sc. Thesis)

Özcan AKÇEŞME

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2020

ABSTRACT

In this study, automatic control of the gains of the erbium doped fiber amplifiers (EDFA) operating in the C band region was achieved and minimum gain emission values were obtained. For this purpose, an EDFA operating in the C band region has been designed, and the electronic control circuit that will control this EDFA and software to control it over the computer have been realized. Optical gain spectra of EDFA have a nonlinear structure in the C band region. Therefore, the total gain values obtained in wavelengths will differ when using the optical amplifier chain, i.e. when successive amplification are made. As a result, some wavelengths will weaken before reaching the receiving side. In EDFAs, the dynamic gain value is achieved by controlling the power of the pump laser. The control of the pump lasers takes place depending on two parameters consisting of current and temperature. One of the most intensively studied topics that is emphasized in this thesis is the control of these lasers. In the experimental studies, computer software has been implemented to control the automatic gain system consisting of tunable laser source, optical spectrum analyzer and pump laser control devices integratedly.

Science Code : 90533

Key Words : Erbium-doped fiber amplifier, automatic gain, electronic control

Page Number : 80

Supervisor : Prof. 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. Ayrıca 7160787 nolu proje ile destek sağlayan TÜBİTAK'a 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.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLERDE KAZANÇ DÜZLEŞTİRME TEKNİKLERİ	9
2.1. Optik Kazanç Düzleştirme Teknikleri.....	10
2.1.1. Halka lazer yapısı ile tam optik kazanç kontrolü	10
2.1.2. Fiber bragg ızgara ile tam optik kazanç kontrolü.....	12
2.2. Elektronik Kazanç Düzleştirme Teknikleri.....	13
2.3. Literatür Çalışmaları.....	14
3. LAZER SÜRÜCÜ TASARIMI.....	19
3.1. Lazer Akım Sürücülerini	20
3.2. Lazer Sıcaklık Kontrol Çeşitleri.....	21
3.3. Tasarlanan Sürücü	23
3.3.1. İlk tasarım.....	23
3.3.2. İkinci Tasarım	33
4. TASARLANAN SÜRÜCÜNÜNÜN TEMEL ANALİZİ.....	39
4.1. Yönetim Kartının Tasarlanması Ve Gerçekleştirilmesi	39

Sayfa

4.2. Deneysel Yüksek Kazançlı EKFY'nin Oluşturulması.....	40
4.3. EKFY'nin Bilgisayar Kontrolünün Yapılması	40
4.4. Optik Spektrum Analizörü İle Kazanç Ve Gürültü Şekli Ölçümleri.....	41
4.5. Düz Kazanç İçin Boy Optimizasyonu ve Kazanç Ölçümleri	47
4.5.1. Simülasyon	47
4.5.2. Deney sonuçları.....	51
4.6. Gürültü Ölçümleri	55
5. OTOMATİK KAZANÇ KONTROL SİSTEMİ	57
5.1. Düz Kazanç İçin Pompa Gücü Optimizasyonu.....	57
5.2. Pompa Gücü Optimize Edilmiş Kazanç Ölçümleri.....	59
5.3. Yazılım Tabanlı Kazanç Kontrol Sistemi	61
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kullanılan EKF'nin parametreleri	48
Çizelge 5.1. -30 dBm giriş gücü için otomatik kazanç modunda alınan kazanç değerleri ..	60
Çizelge 5.2. Ana program sekmesinde kullanılan butonların görevleri.....	66
Çizelge 5.3. Yapılan yazılımla alınan ölçümler	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. EKFY'nin dalga boyuna bağlı olarak değişen kazanç spektrumu.....	9
Şekil 2.2. Geri beslemeli halka döngüsü ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu ...	11
Şekil 2.3. Farklı ortalama inversiyon seviyelerinde kazanç katsayı spektrumu	12
Şekil 2.4. FBI fiber lazer yapısı ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu.....	12
Şekil 2.5. Geri besleme döngü yapısı ile otomatik kazanç kontrolü için iki klasik konfigürasyon (a) Pompa kontrolü ile geri besleme, (b) Yardımcı sinyal kontrolü ile geri besleme	14
Şekil 3.1. Lazer diyot ışık yoğunluğu/akım(L/I) eğrisi.....	19
Şekil 3.2. Akım kontrol birimi kavramsal tasarımı.....	20
Şekil 3.3. TEC'in iç yapısı	21
Şekil 3.4. Kelebek tip lazer modülün içyapısı	22
Şekil 3.5. Sıcaklık kontrol birimi kavramsal tasarımı.....	23
Şekil 3.6. Lazer akım sürücü devresi	24
Şekil 3.7. Akım ölçme devresi.....	25
Şekil 3.8. Akım sınırlama devresi.....	26
Şekil 3.9. Optik güç izleme devresi	26
Şekil 3.10. Termoelektrik Soğutucu Blok Diyagramı	27
Şekil 3.11. Termistörün sıcaklıkla değişen direnç eğrisi	28
Şekil 3.12. TEC kontrol devresi şeması.....	28
Şekil 3.13. Oranlı metrik referans ile sıcaklık ölçümü	29
Şekil 3.14. TEC için tasarlanan D sınıfı güç devresi	30
Şekil 3.15. Lucent 263DN pompa lazerin teknik sayfasından alınan TEC bilgileri.....	32
Şekil 3.16. TEC sürücünün pin numaraları ve yerleşimleri.....	34
Şekil 3.17. TEC sürücünün blok diyagramı.....	34
Şekil 3.18. TEC kontrolör bağlantı şeması	35

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Lazer sürücünün pin numaraları ve yerleşimleri	36
Şekil 3.20. Lazer sürücünün fonksiyonel çalışma blok diyagramı	36
Şekil 3.21. Lazer diyot kontrolör bağlantı şeması	37
Şekil 3.22. Yüksek gerilim ile çalışan lazer diyotları sürme	37
Şekil 4.1. EKFY Yönetim kartı blok diyagramı	39
Şekil 4.2. EKF'nin soğurum ve yayılım kesit alanı grafiği	48
Şekil 4.3. Simülasyon düzeneği	48
Şekil 4.4. -20 dBm giriş sinyal gücü için çıkış kazanç spektrumu ve gürültü faktörü	49
Şekil 4.5. -30 dBm giriş sinyal gücü için çıkış kazanç spektrumu ve gürültü faktörü	49
Şekil 4.6. -10 dBm giriş sinyal gücü için çıkış kazanç spektrumu ve gürültü faktörü	50
Şekil 4.7. -40 dBm giriş gücü için kazanç grafiği.....	51
Şekil 4.8. -30 dBm giriş gücü için kazanç grafiği.....	52
Şekil 4.9. -20 dBm giriş gücü için kazanç grafiği.....	52
Şekil 4.10. -10 dBm giriş gücü için kazanç grafiği.....	53
Şekil 4.11. 0 dBm giriş gücü için kazanç grafiği.....	53
Şekil 4.12. Karşılaştırmalı kazanç grafiği.....	54
Şekil 4.13. -30 dBm giriş gücü için gürültü grafiği	55
Şekil 4.14. -20 dBm giriş gücü için gürültü grafiği	55
Şekil 5.1. Otomatik kazanç kontrolü yapabilen kompakt EKFY blok diyagramı	57
Şekil 5.2. Pompa gücü optimizasyonu blok diyagramı.....	58
Şekil 5.3. Pompa gücü kontrol akış diyagramı	59
Şekil 5.4. -30 dBm giriş gücü için otomatik kazanç modunda alınan kazanç değerleri	61
Şekil 5.5. Yazılım tabanlı kazanç kontrol sistemi blok diyagramı	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. İlk tasarımın dizilmiş baskı devresi	33
Resim 4.1 Yapılan Kompakt EKFY	40
Resim 4.2. EKFY'nın kontrol arayüzü.....	41
Resim 4.3. Bağlantı sekmesi (port seçme).....	42
Resim 4.4. Konfigürasyon sekmesi	43
Resim 4.5. Konfigürasyon kaydet/yükle bölümü	44
Resim 4.6. Ana program sekmesinin görünümü.....	45
Resim 4.7. MS9710B hata ayıklama sekmesi.....	46
Resim 4.8. Ölçümlerin alındığı sırada verileri grafik olarak izleme sekmesi.....	47
Resim 5.1. Yeni bağlantı sekmesi (port seçme ekranı).....	63
Resim 5.2. Yeni konfigürasyon sekmesi.....	64
Resim 5.3. Limitleri bulma sekmesi	65
Resim 5.4. Ana program döngüsü.....	65
Resim 5.5. EKFY kontrol sekmesi	66
Resim 5.6. MS9710B hata ayıklama sekmesi.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

μm	Mikrometre
dB	Desibel
Dy	Disprosiyum
Er	Erbium
Er ³⁺	Erbium
mW	Miliwatt
Nd	Neodimiyum
nm	Nanometre
Pr	Praseodimiyum
S	Kükürt
Se	Selenyum
Te	Tellür
Tm	Tulyum

Kısaltmalar

Açıklamalar

ALK	Ayarlanabilir lazer kaynağı
AOZ	Ayarlanabilir optik zayıflatıcı
BER	Bit hata oranı
CFBI	Cıvıltı fiber Bragg ızgara
DBÇ	Dalga boyu bölmeli çoğullama
dBm	1 mW'la ilgili desibel
EKF	Erbium katkılı fiber
EKFY	Erbium katkılı fiber yükselteç
FBI	Fiber Bragg ızgara

Kısaltmalar**Açıklamalar****FRY**

Fiber Raman yükselteç

KDF

Kazanç düzleştirici filtre

LD

Lazer diyot

NA

Nümerik açıklık

OSA

Optik spektrum analizörü

SMF

Tek modlu fiber

SNR

Sinyal gürültü oranı

SOA

Yarı iletken optik yükselteçler

TKFY

Tulum katkılı fiber yükselteç

URS

Uyarılmış Raman saçılması

ÜFBI

Üniform fiber Bragg Izgara

YDBÇ

Yoğun dalga boyu bölmeli çoğullama

YKY

Yükseltilmiş kendiliğinden yayılma

YOY

Yarı iletken optik yükselteçler

1. GİRİŞ

Bilişim sektöründe artan kapasite ve iletişim hızına cevap vermek için kullanılan fiber optik iletişim sistemlerinin payı hızla artmaktadır. Bunun en büyük sebebi fiberde iletilen sinyallerin ışık hızına yakın bir değerde olduğundan olması dolayısıyla da haberleşme hızı ve kalitesinin de oldukça iyileşmesidir. Fiber kablolar dünyada bir sinir ağı gibi yayılırken mesafeler de artmaya başlamış ve bu nedenle zayıflayan sinyalleri yükseltme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı, ortamdaki (fiber içinde) ışık sinyalini daha uzun iletişim mesafelerine ulaştırmak amacıyla elektriksel dönüşüme ihtiyaç duymadan yükseltmek için optik yükselteçler geliştirilmiştir. Böylece herhangi bir elektro-optik dönüşüme gerek kalmadan ışık yine kendi ortamında yükseltilerek yoluna devam etmiştir.

Fiber optik haberleşme sistemlerinde mesafelerin uzaması ve bu iletişim sistemlerinin yaygınlaşmasında temel adım fiber optik yükselteçlerdir. Fiber kablo içerisinde kayıpların minimum olduğu sinyal dalga boyu 1550 nm olup, fiber optik haberleşmede bu dalga boyunu içerisine alan geleneksel bant (C bant 1530-1565 nm) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dalga boyu aralığında en verimli çalışan optik yükselteçler ise EKFY'lerdir. EKFY'ler yüksek kazanç, düşük gürültü, yüksek verim özellikleri ile öne çıkmaktadır. Ancak EKFY'lerin optik kazanç spektrumları, C bant bölgesinde doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu nedenle optik yükselteç zinciri kullanıldığında, yani art arda yükseltmeler yapıldığında, her bir dalga boyunda elde edilen toplam kazanç değerleri farklılık gösterecektir. Bunun sonucu olarak kimi dalga boyları alıcı tarafa ulaşmadan zayıflayacak ve yok olabilecektir. Bu nedenle kazanç düzleştirme işlemi fiber optik yükselteç uygulamalarında çok önemlidir. Ayrıca fiber optik haberleşmede bant genişliğinin artmasını sağlayan yoğun dalga boyu bölmeli çoğullama (YDBC) gibi uygulamalarda EKFY'nin düz bir kazanç sahip olması büyük önem taşımaktadır [1]. EKFY'nin düz olmayan kazanç spektrumları sistem bant genişliğini sınırlamaktadır [2]. Aynı fiberden daha fazla kanal iletmek için düz kazanç ve daha geniş bant genişliği gerekmektedir [3]. Erbiyum katkısının yanında, tellürit [4], fosfor, alüminyum vb. katkı malzemeleri kullanılarak, EKFY'ler çeşitli konfigürasyonlarda çalıştırılarak [5], kazanç düzleştirici filtreler [6,7] ve fiber Bragg ızgaralar [8,9] kullanılarak çıkış kazanç spektrumu düzleştirilmeye çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında ise, klasik bir erbiyum katkılı fiberin (EKF) boyu optimize edildikten sonra pompa lazerin gücü kontrol edilerek yazılım tabanlı bir kontrol gerçekleştirilerek C bandı boyunca düz bir kazanç spektrumu oluşturulmuştur.

Literatür çalışmaları

Optik sinyalin yükseltilmesi için klasik yöntemle foton-elektron dönüşümü, elektriksel yükseltme, yeniden zamanlama, darbenin şekillendirilmesi ve elektron-foton dönüşümü yapılarak yeniden iletilmesi gerekmektedir [10]. Ancak ışığı optik ortamda yükseltme arayışları optik yükselteçlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Optik yükselteçler uyarılmış yayılım veya doğrusal olmayan etki temeli ile telekomünikasyonda önemli rol oynamaktadırlar. Çünkü optik yükselteçler elektriksel tekrarlayıcı ihtiyacını yok etmekte ve çok yüksek bant genişliği sağlamaktadırlar [11].

Optik fiber iletişiminin başarısı, uzun mesafelere erişim ve yüksek veri hızlarına çıkabilmesinden doğmaktadır. Uzun mesafelere erişim; günümüzde üretilen fiber optik kabloların çok düşük zayıflamaya (örneğin 0,3 dB/km) sahip olması ve zayıflama, sinyalin iletim hızından bağımsız olduğu için mümkündür. Sonuçta fiber boyunca bir işaret ilerliyor iken bozulma yalnızca lineer zayıflama şeklindedir ve zayıflamayı dengeleyecek bir optik yükselteç ihtiyacı vardır.

Optik yükseltmenin temeli olan uyarılmış yayılma 1916'da Albert Einstein'dan sonra uzun zaman fazla ilgi görmemiştir. Rus mühendis Valentin A. Fabrikant bir optik yükselteç yapmayı önermiş fakat bu önerisini gerçekleştirememiştir. En önemli gelişme 1954'de Charles Townes'in uyarılmış yayılım kullanarak mikrodalga osilasyonu ile maser ışınını üretmesi olmuştur.

Townes ve Arthur Schawlow (ve ayrı olarak Gordon Gould) lazeri önermişler, birkaç yıl sonra Theodore Maiman 1960'da ilk lazeri yapmıştır. Gould "Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation (Radyasyonun uyarılmış yayılımı ile ışık yükseltilmesi)" kelimelerinden lazer kelimesini türetmiş fakat osilasyon vurgusu eksik kalmıştır [12].

Fiber optik haberleşmenin hızla gelişmesi sonucu fiber zayıflaması karmaşık ve pahalı elektriksel dönüştürücüler ve tekrarlayıcılar yardımı ile giderilmiş, bu nedenle optik yükselteç arayışlarına girilmiştir.

Optik yükselteç tasarımı için ilk yaklaşım, yarı iletkenlerin yüksek kazançları olduğundan, ışık kaynağı gibi kullanılan yarı iletken lazerlerden bir yükselteç geliştirmek olmuştur. Aynı zamanda uyarılmış Raman saçılması (URS) incelenmiştir. Ancak yarı iletken optik yükselteçler (YOY) ve FRY'lerin her ikisinde de önemli teknik problemlerle karşılaşmıştır [12].

En iyi geliştirilen katı hal lazer katkısı neodmiyum ile başlamıştır. Kayıpların artması nedeniyle düşük katkılı nadir toprak elementleri kullanılmaya başlanmıştır. Koestner ve Snitzer, 1964'de neodmiyum nadir toprak iyonu ile katkılanmış fiber fikrini ortaya atmışlardır [13]. Gelecek adımda fiber lazerler geliştirilmiştir. İlk olarak Snitzer bir flaş lambası ile lazerini pompalamış ve Charles Burrus Bell laboratuvarlarında neodmiyum katkılı çok modlu fiber lazeri bir lazer diyotla pompalamayı başarmıştır [12]. Payne'nin grubu tek modlu fiber için daha yüksek pompalama gücü üretmiştir [11]. Gelişme devam ederek galyum-alüminyum arsenik lazerden 1 mW'dan az güç elde edilmiştir.

Payne'nin grubu önce neodmiyum, tulyum, iterbiyum ve sonra 1985'te erbiyum ile çalışmıştır [11]. Southampton grubu 1986'da üç metre erbiyum katkılı fiber (EKF) ile tepe kazancı 1536 nm'de 26 dB olan ilk yükselteçlerini yapmış ve pompalamayı 514,5 nm kilit modlu argon lazerle gerçekleştirmiştir [11,14-15].

British Telecom, erbiyum fiber lazeri ilk olarak 808 nm boya lazeri ile pompalamış fakat bu pompalama bantlarında uyarılmış seviye soğurumu oluşmuştur. Buna neden olmayan bir dalga boyu 980 nm'dir. Bu arada sürpriz olarak 1480 nm pompalama bandı bulunmuş, Bell laboratuvarında 1480 nm'de pompalama yapılarak 37 dB kazanç elde edilmiştir [12].

Japon araştırmacılar bir YOY geliştirmişler, bununla beraber 1989'da Masataka Nakazawa, NTT iletim sistemlerinde 1480 nm'de 40 mW gücünde pompa diyotu ile erbiyum katkılı fiberi pompalamış ve 46,5 dB kazanç elde etmiştir [16].

İlk nesil EKFY'ler geleneksel bant adı verilen C bandında tasarlanmıştır. %68 civarında ters birikme sağlayan bir EKF boyu ve alümino silikat katkısı kullanılarak geniş ve düz bir kazanç spektrumu elde edilirken, 1990'larda bu fikir yeniden düzenlenerek %35'lik bir ters birikme ile 1570 ve 1610 nm arasında, 40 nm bant genişliğinde kazanç elde edilmiştir [17]. Uzun dalga boyunda düşük gürültü ile 1570-1610 nm bandında çalışan L bant EKFY'ler

1992’de tanımlanmıştır [18]. 1997’de başlayan L bant EKFY uygulamaları ile DBÇ iletim sistemlerinde kapasiteyi arttırabilecek şekilde, hat yükselteci olarak C banda paralel L bant yükselteçler tasarlanmıştır [19-21]. C bant EKFY ile karşılaştırıldığında L bant EKFY düşük kazanç katsayısı ve güç dönüşüm verimliliği gösterir [22]. Bunun ana nedeni 1530- 1560 nm bandındaki yüksek kazanç ve fiber sonunda yüksek miktarda üretilen YKY’dır. L bant EKFY’de kazanç artırmanın iki metodu vardır. İlk metot ile YKY kaybını azaltmak için bir YKY kaynağı geri besleme reflektörü ile kullanılarak kazanç ve çıkış gücü arttırılabilir. Bu metotla 1588 nm için kazançta 6 dB yükselme elde edilmiştir [23]. YKY kaynağı girişten verildiğinde oldukça verimlidir. YKY geri beslemesi çıkışta ise daha düşük verime sahiptir. İkinci teknik ile 1550 nm bandındaki istenmeyen YKY gücü, iki aşamalı L bant yükseltecin pompa kullanılmayan EKF kısmına, ikinci bir pompa kaynağı olarak bağlanır. Prensip olarak iki kazanç arttırma konfigürasyonu temelli bu teknikte iki olası durum vardır: a) ilk aşama dış bir pompa kullanılmadan ikinci aşamada oluşan ve geri yönde yayılan YKY, ilk aşamanın ters birikmesini sağlamak için kullanılabilir, b) ikinci aşamada pompa kullanılmaz ve ilk aşamada oluşan ve ileri yönde yayılan YKY kazanç arttırmak için kullanılır [24]. Pompalanmamış EKF için YKY’nin pompa kaynağı olarak kullanılması 1 dB’den az gürültü faktörü ile güç dönüşüm verimliliğini %11,7’den %25,7’ye çıkararak önemli bir katkı yapmıştır. Ayrıca ikinci metot herhangi bir ek optik malzeme gerektirmez [24].

Bu çalışmaların yanı sıra EKFY, tek geçişli çalışmadan daha düşük pompa gücü ve daha kısa fiber boyu kullanılarak daha yüksek kazanç elde edilen çift geçişli ve üçlü geçişli konfigürasyonlar da çalıştırılmış [25-27].

Uzun mesafeli fiber optik iletişimin ana problemlerinden birisi olan çıkış kazancını düzleştirmek için kazanç düzleştirici konfigürasyonlar kullanılmış [28-29] ve ayrıca artan pompa gücüne karşılık kazanç stabilizasyonu için kazanç kenetleyiciler incelenmiştir [30-32].

Son yıllarda optik bant genişliğini arttırmak için S bandında ve U bandının ortalarında çalışabilen tulyum katkılı fiber yükselteçler (TKFY) çekici hale gelmiştir. Fakat yaygın olarak kullanıldığı bölge S bant bölgesi olan 1460–1530 nm bölgesidir [32-33]. TKFY’ler çeşitli pompa konfigürasyonlarında ve metotlarda çalıştırılabilir fakat pratik olmayan pompa kaynağı (1050 nm) ve düşük optik-optik dönüşüm verimliliği (%4) TKFY’nin çözümlenmesi gereken dezavantajlarıdır [34-35].

Hızla büyüyen internet kapasitesi ile EFKY tabanlı DBÇ iletim sistemlerinde C ve L bantlarının tamamı kullanılmaktadır. Hızla büyüyen haberleşme trafiği ve yüksek güçlü kompakt yarı iletken lazer diyot pompaların geliştirilmesi FRY araştırmalarını arttırmıştır. FRY'ler EKFY'lere göre esnek merkez dalga boyu ve geniş yükseltme bandı avantajlarına sahiptir [36-37]. EKFY'de olduğu gibi kazancı yükseltmek için çift geçişli sistemler [38], düz kazanç elde etmek için kazanç düzleştirici konfigürasyonlar kullanılmıştır [39].

Optik yükselteç kullanılan ilk transatlantik fiber optik iletişim hattı TAT-12/13 1996'da bir dalga boyunda 5 Gbit/s iletim hızında ve 1998'de dört veya sekiz dalga boyunda her biri 2,5 Gbit/s toplam 10-20 Gbit/s hızla çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

İnternetin çok hızlı gelişmesiyle 2001 yılında bilim adamları her biri 10 Gbit/s hızda 100 dalga boyunu toplam 1 Tbit/s hıza ulaştırmışlardır. Ocak 2003'de toplam transatlantik iletim kapasitesi 2700 Gbit/s ve toplam potansiyel kapasite 12300 Gbit/s'ye yükselmiştir [40]. 2006 yılında NTT firması 14 Tbit/s'lik çok büyük kapasiteli optik iletimi 160 km uzunluğunda optik fiberde başarıyla gerçekleştirmiştir [12]. Gasulla and J. Capmany 2008'de çok modlu fiber ile bir kanalda 20 Gbit/s iletim kapasitesine ulaşmışlardır [41].

Maeda ve arkadaşları kılıf pompalı, kompakt paketli ve çok damarlı bir EKFY tasarladılar. Bu EKFY'dan 33 W güç tüketimi ile 20 dBm'den yüksek bir çıkış gücünün elde edildiği doğrulanmıştır [42].

Stevens ve arkadaşları 1545 ve 1565 nm dalga boyuna sahip iki adet optik fiber yükselteçten oluşan çift kanallı, düşük gürültülü bir EKFY tasarladılar. Bağımsız çıkış veren bu iki yükseltece ait sinyalleri birleştirip ortak bir çıkış üreterek daha yüksek bir çıkış gücü elde edebildiklerini gözlemlediler [43].

Hamida ve arkadaşları Erbium Zirconia katkılı fiber (Zr-EDF) kullanarak yeni bir fiber yükselteç elde ettiler. C bant bölgesinde çalışan bu kompakt yükselteç ile çift geçişli konfigürasyon gözlemlediler [44].

Nakazawa'nın yaptığı çalışmada tek damar yerine çok damarlı bir EKFY geliştirildi. Bu yöntemle Alan Bölmeli Çoğullama (Space Division Multiplexing) kullanılarak transmisyon kapasitesinin arttırıldığı gözlemlenmiştir [45].

Cheng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada C-bant ve L-bant dalga boylarında çalışan iki kademeli çift geçişli bir EKFY geliştirildi. Böylece 1525-1620 nm aralığında geniş bir çalışma bandı elde edildi [46].

Rosolem ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada EKFY pompa lazerleri için düşük maliyetli Mini-DIL modülü tasarlanmıştır. Endüstriyel modüllerle karşılaştırıldığında daha düşük maliyet, daha düşük güç tüketimi gibi avantajları olduğu gözlemlenmiştir [47].

Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 980 nm pompa lazerli Mini-DIL modülü tasarlanmıştır. Üç boyutlu sonlu eleman analiz modeli ile termal ve stres performansı analiz edilmiştir. Modül gücü ve eşleşme verimliliği deneysel olarak incelenmiştir [48].

Thyagarajan ve Kakkan'ın yaptığı çalışmada tek kademeli S-bant erbiyum katkılı fiber yükselteç tasarlanmıştır. Simülasyon ile 1495-1525 nm bant aralığında 25 dB doymamış kazancın sağlanabileceği gözlemlenmiştir [49].

Pan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada düşük maliyetli, kompakt ve akıllı erbiyum katkılı fiber bir yükselteç geleneksel EKFY'ler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca erbiyum katkılı dalga kılavuzu yükselteç (EDWA- Erbium Doped Waveguide Amplifier) için ana özellikler incelenmiştir [50].

Gao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada entegre edilmiş modülatör ve yükselteç için sonlu eleman metoduna dayalı 3-D termal bir model geliştirilmiştir. Bu model ile lazer diziliminin termoelektrik güç tüketimi incelenmiştir [51].

Shen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, darbeli lazer soğutucu için minyatür termoelektrik modül (MTEM) incelenmiştir. Bu amaçla MTEM'nin arayüzel ile ilgili etkileri gözlemlenmiştir [52].

Labudovic ve Li'nin yaptığı çalışmada, termoelektrik soğutma üzerinde üç boyutlu sonlu eleman analizi incelenmiştir. Bu modelleme ile elde edilen veriler deneysel verilerle kıyaslanmış ve birbirine yakın değerler elde edilmiştir [53].

Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yüksek güçlü pompa lazerin termal karakteristikleri ile termal rezistans ve güç israfının önlenmesi incelenmiştir [54].

Dudzik elektronik ve lazer uygulamaları için, kararlı, düşük gürültülü iki aşamalı bir lazer akım kaynağı geliştirmiştir [55]. Sharma ve arkadaşları yüksek güçlü ve darbeli lazerler için akım sürücüsü tasarlamışlardır [56].

Giorgi ve arkadaşları, askeri telemetri uygulamaları için kompakt bir lazer diyot sürücüsü tasarlamıştır [57].

Shen ve arkadaşları, darbeli lazer için minyatür bir termoelektrik modülün soğutma performansını incelemişlerdir [52].

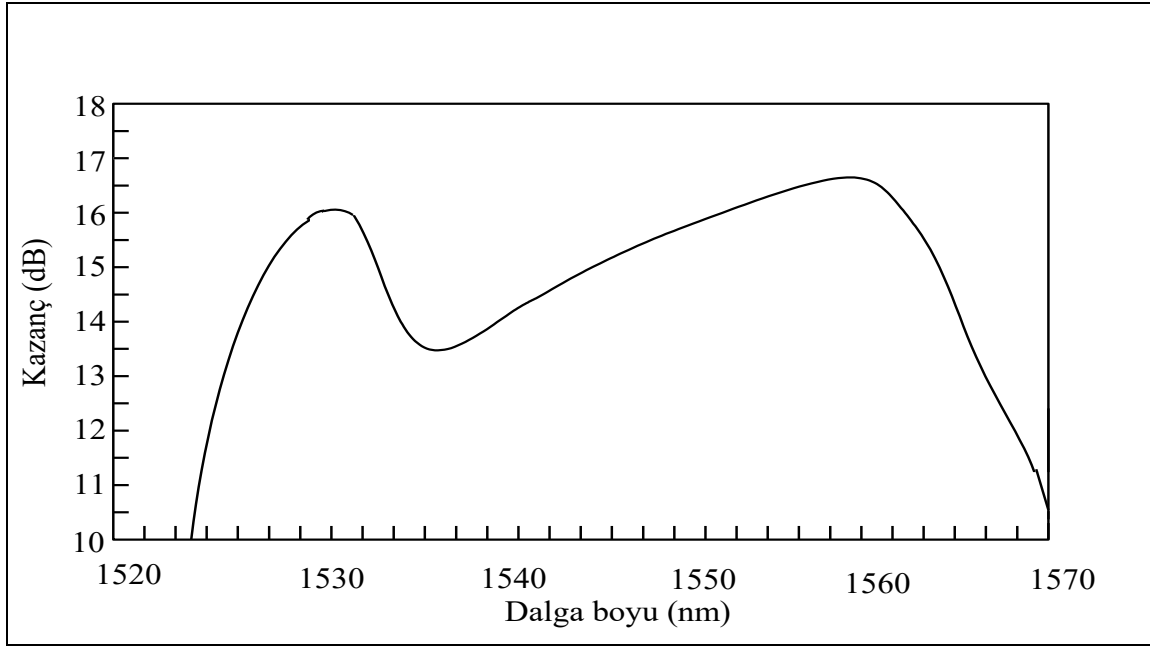
Bu temel gelişmelerin ardından optik yükselteçler günümüzde daha da gelişerek haberleşme sistemlerinin vazgeçilmezi olmuştur.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde, erbiyum katkılı fiber optik yükselteçlerde kazanç düzleştirme tekniklerinden ve literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ise elektronik kazanç düzleştirme için yapılan lazer sürücü hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra bu lazer sürücü için yapılan kontrol arayüzü incelenmiştir. Beşinci bölümde ise bu tezin ana konusunu oluşturan otomatik kazanç düzleştirmenin detayları verilmiştir.

2. ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLERDE KAZANÇ DÜZLEŞTİRME TEKNİKLERİ

EKFY'lerin kazanç spektrumları, enerji seviyelerinin dalga boyuna bağlı olarak farklılık göstermesi nedeni ile düz değildir. EKFY'nin düz olmayan kazanç spektrumundan dolayı, DBÇ sistemlerinin kapasitesi sınırlanmaktadır. Tek bir fiberden daha fazla kanal iletmek için düz kazanç spektrumunun oluşturulmasına ihtiyaç duyulmakta ve bunu sağlamak için de EKFY'den çıkan sinyalin kazanç spektrumunun düzleştirilmesi gerekmektedir [6].

Şekil 2.1'de EKFY'nin dalga boyuna bağlı kazanç spektrumu görülmektedir. Kazanç spektrumu incelendiğinde birbirinden farklı görünümde iki tepeciğin oluştuğu görülür.



Şekil 2.1. EKFY'nin dalga boyuna bağlı olarak değişen kazanç spektrumu [6]

Bu nedenle, EKFY tarafından yükseltilecek sinyallerin güçleri arasında farklılıklar oluşur. Bu farklılıklar sinyal gürültü oranını daha da düşürerek sinyalin bozulmasına neden olur ve iletim mesafesi kısalmaktadır. Bu nedenle EKFY'lerin kazanç spektrumlarının düzleştirilmesi gerekir.

Fiber optik haberleşmede S, C ve L bant yükseltmesi ve bu bantlarda kazanç düzleştirme işlemi için çeşitli yöntemler kullanılır. EKFY, tüm bantlar için kullanılabilir. Fakat S bandının tamamında yeterli yükseltmeyi sağlayamaz [32,34-35].

Kazanç bant genişliğini büyütmek ve düzleştirmek için çeşitli yaklaşımlar vardır. Yaklaşımlardan birisi erbiyum katkılı silika cam fibre Al_2O_3 ve P_2O_5 gibi yeni malzemeler eklemektir [58-60].

Başka bir yaklaşım ise Mach-Zender optik filtresi, akusto-optik filtre veya uzun periyotlu fiber-ızgara filtreleri gibi kazanç eşitleyici optik filtrelerin kullanılmasıdır [2,7,61].

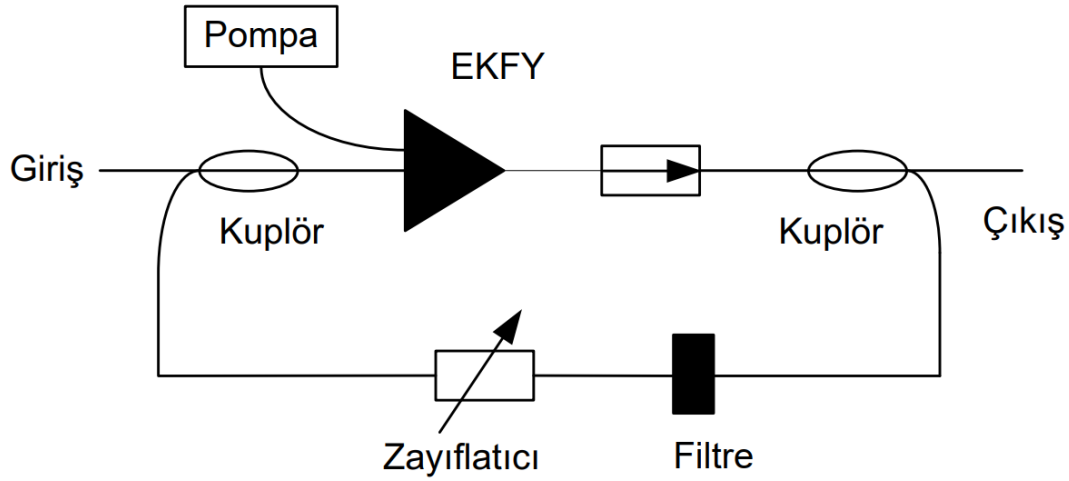
Bu metotta EKFY kazancının yüksek olduğu dalga boylarında, filtre ile kayıp oluşturularak toplam kazanç düzleştirilir. Optik kazanç düzleştirici filtre olarak adlandırılan bu filtreler, düşük maliyete ve yüksek kararlılığa sahiptir [62].

2.1. Optik Kazanç Düzleştirme Teknikleri

İlerleyen iki başlıkta 2 çeşit optik kazanç düzleştirme tekniğine yer verilmiştir.

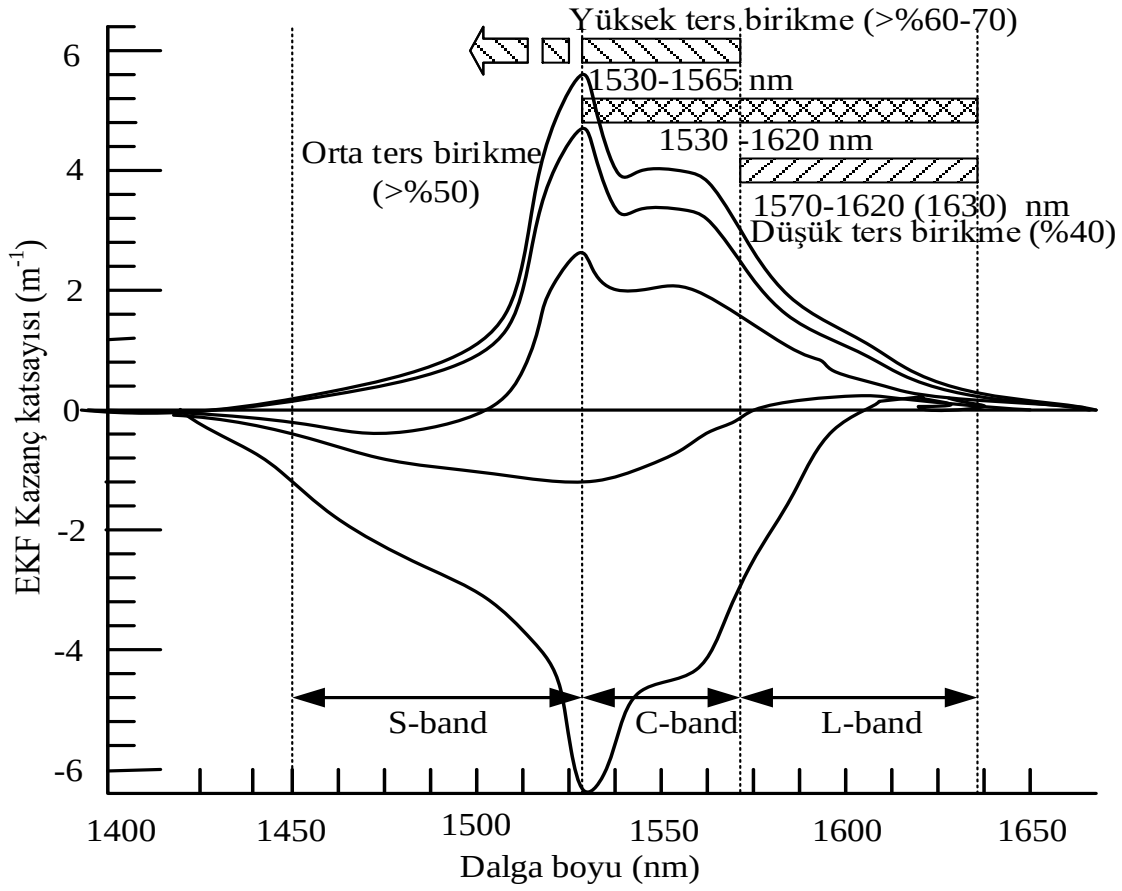
2.1.1. Halka lazer yapısı ile tam optik kazanç kontrolü

Kazanç kontrolü için geri besleme halka lazerinin kullanıldığı halka lazer konfigürasyonudur [30,63]. Tipik konfigürasyon Şekil 2.2’de görülmektedir. Burada geri besleme döngüsü sadece birkaç pasif, tam optik cihazlardan oluşur. Bu metotta kazanç kontrolü, herhangi bir optik-elektronik dönüşüm olmadan tamamen optik ortamda yapılır. Bu konfigürasyondaki kazanç kenetleme teorisi, sinyal kontrol metoduyla benzerdir. Ancak, yardımcı sinyal ayrı bir lazer diyot tarafından üretilmez, bunun yerine bir erbiyum katkılı fiber halka lazer yükselticiye dahil edilir. Bu lazer sinyali, veri sinyali ile birlikte yükselticiye girer. Burada dikkat edilmesi gereken husus, lazer sinyalinin, giriş sinyali ile ters ya da aynı yönde yayılabiliyor olmasıdır.



Şekil 2.2. Geri beslemeli halka döngüsü ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu [64]

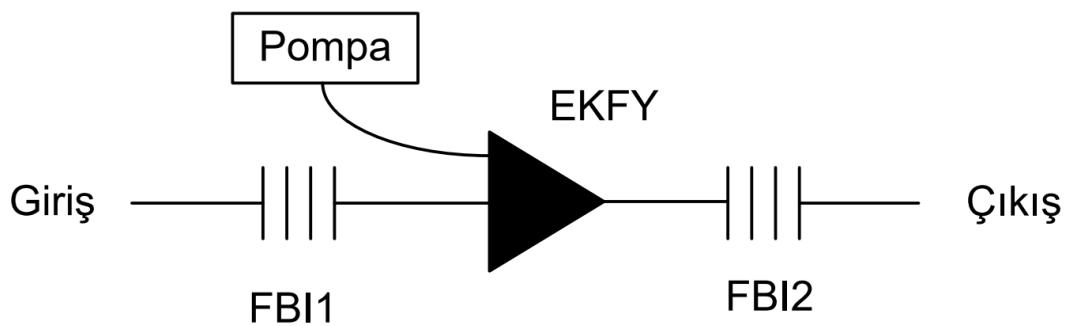
Lazer durumu nedeniyle (örneğin, kararlı durumda kazanç, toplam boşluk kaybına eşit olmalıdır) yükselteç içindeki bu lazer sinyalinin kazancı, EKFY'nin ortalama ters düzeyinde sabitleyen bir seviyeye kenetlenebilir. Şekil 2.3 ortalama ters seviyenin farklı değerleri için kazanç katsayı spektrumunu göstermektedir. Buradan, belirli bir ters seviyenin, her dalga boyu için bir kazanç seviyesine karşılık geldiği ve tam tersi görülebilir. Bu nedenle, lazer dalga boyunda sabitlenmiş bir kazanç seviyesi tüm kazanç spektrumunu düzenler.



Şekil 2.3. Farklı ortalama inversiyon seviyelerinde kazanç katsayı spektrumu [64]

2.1.2. Fiber bragg ızgara ile tam optik kazanç kontrolü

Kazanc kontrolü için halka lazer yapısının bulunmasından sonra, FBI konfigürasyonu olarak adlandırılan iyi bir kazanç kenetleme etkisine sahip basit bir tasarım bulunmuştur [65-66].



Şekil 2.4. FBI fiber lazer yapısı ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu [64]

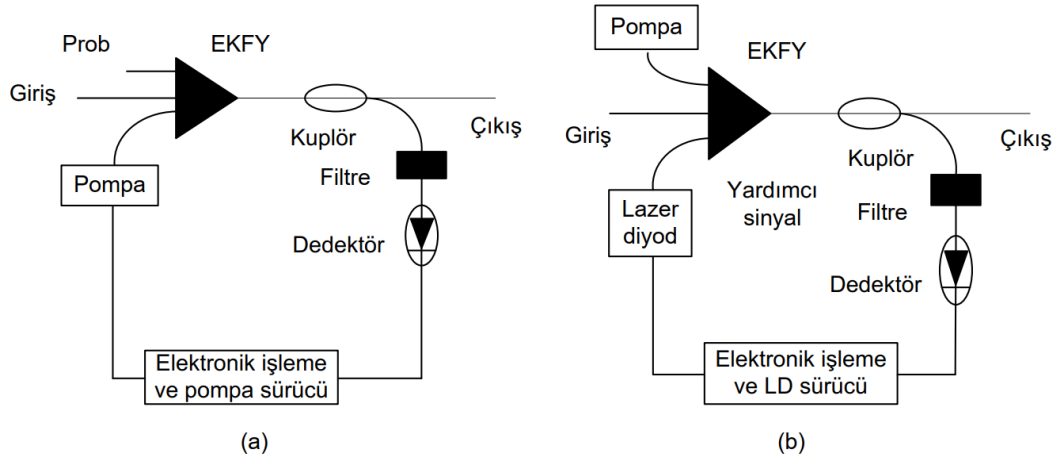
Şekil 2.4’de görüldüğü gibi bir çift FBI klasik bir yükseltecin önüne ve arkasına yerleştirilmiştir. FBI’nın temel çalışma şekli, Bragg dalga boyunda gelen optik sinyali yansıtma şeklindedir [67-68]. Bu nedenle, Şekil 2.4’de ki FBI1 ve FBI2, aynı Bragg dalga boyunda seçilirse, erbiyum katkılı fiber ızgara lazer oluşturulur. Bu konfigürasyondaki lazer sinyali, halka lazer konfigürasyonundaki ile tamamen aynı işlevlere sahiptir. Sinyal kazancını etkin olarak kenetleyebilir. Bu yapının avantajları, optik zayıflatıcı, optik filtre ve bağlantı ucu gibi birçok optik malzemeyi barındırması, fiber ızgaranın direkt olarak EKF’den yapılabilmesi ve bunun, fiber ekleme ile ilgili ek kayıplarını önlemesi ile yüksek yansıtıcılıkla FBI kullanarak çok düşük boşluk kaybının gerçekleştirilebilmesidir. Halka lazer konfigürasyonunda çıkıştaki bir bağlantı ucu, optik gücün küçük bir kısmını geri besleme döngüsüne döndürmek için kullanılır. Bu kısım, sinyal gücünün kaybını en aza indirmek için çok küçük olmalıdır. Bu nedenle, toplam boşluk kaybı genelde oldukça büyüktür. FBI konfigürasyonu için boşluk kaybı, uygun yansıtıcılıklara sahip FBI seçilmesiyle, 1 dB ile 20 dB arasında değiştirilebilir. Bu durum, EKFY tasarımına daha fazla esneklik kazandırır. Ayrıca, FBI’lar çok dar bant olabilir ve geri besleme seviyesi, sinyal dalga boyu için kayıp yaratmadan, oldukça yüksek seçilebilir.

2.2. Elektronik Kazanç Düzleştirme Teknikleri

Kazanç kontrolü yapmak için pompa kontrolü ve sinyal kontrolü olmak üzere iki klasik yaklaşım vardır. Şekil 2.5’de halka geri besleme yapısına dayalı bu iki metodun tipik konfigürasyonları görülmektedir. Pompa kontrolü metodunda çıkış gücünün küçük bir kısmı kullanılır, prob sinyali filtre edilir, algılanır ve pompa sürücüsüne bir elektrik sinyali tanımlamak için kullanılır. Giriş sinyal güçleri değiştiği zaman, prob sinyalinin gücündeki değişimler ilk olarak geri besleme döngüsünde algılanır. Ardından; pompa sürücü devresi, sürekli olarak prob sinyalinin önceden belirlenmiş değeri elde edilene kadar, EKFY’ye enjekte edilen pompa gücünü ayarlar. Bununla birlikte, doğrudan giriş sinyal gücü değişimlerini izlemek için giriş ucu kullanan uygulamalar da vardır. Bu pompa kontrol metodlarının amacı, giriş sinyal gücü değişimlerine karşı arttırılan ya da azaltılan pompa gücü ile kazanç doygunluğunu bastırmaktır [64].

Şekil 2.5 (b)’de gösterilen sinyal kontrol metodu, çıkıştaki sinyal gücü değişimlerini izlemek için benzer bir geri besleme döngüsü kullanır. Pompa gücü değiştirme yerine, ilave bir lazer sinyali (yardımcı sinyal) girişe eklenir ve yükseltece enjekte edilen güç

seviyesi çıkış gücüne bağlı olarak ayarlanabilir. Bu ilave sinyalin fonksiyonu, EKFY sabitine toplam giriş gücünü uydurarak, giriş sinyal gücünün değişimlerini dengelemektir. Bu nedenle, bu yükseltecin kazanç doyumu, tüm giriş sinyalleri için kenetlenmiş bir kazançta yol açan bir seviyeye sabitlenir.



Şekil 2.5. Geri besleme döngü yapısı ile otomatik kazanç kontrolü için iki klasik konfigürasyon (a) Pompa kontrolü ile geri besleme, (b) Yardımcı sinyal kontrolü ile geri besleme [64]

Her iki yöntem de sinyal kazancını kenetlemede çok etkili olmasına rağmen, aynı zamanda birçok sakıncayı da bünyelerinde barındırmaktadırlar. İlk olarak; her iki yöntem de optik prob sinyali elde etmek için detektör, filtre ve bağlantı ucu gibi optik ve optoelektronik ilave araçlar ile kazanç kontrolü için geri besleme döngüsü içinde elektronik bir kontrol sinyali üretilmesine ve işlenmesine ihtiyaç duyarlar. Böylece maliyet büyük ölçüde artar. İkinci olarak; kazanç kenetleme, yükselteç ile öz düzenlemeli değildir. Örneğin, geri besleme döngüsü içinde lazer diyod (LD) sürücü devresi ya da bir pompa sürücü devresine ek olarak işleme elektroniği ile kontrol edilir. Bu nedenle, pompa gücü ya da LD çıkış gücü, kazanç değişimlerini dengelemek için büyük bir aralıkta değiştirilebiliyor olmalıdır. Bu daha iyi bir kenetleme performansı elde etmek için çok karmaşık bir pompa/LD sürücü devresi gerektirmektedir.

2.3. Literatür Çalışmaları

EKFY kazancının düzleştirilmesi için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [2,64,69]. Yapılan çalışmalar tek geçişli EKFY, iki aşamalı EKFY, çift geçişli EKFY veya çok geçişli

EKFY [70] üzerine yoğunlaşmışken; ayarlanabilir optik zayıflatıcı (AOZ) ile toplam kazanç ayarlanıp düzleştirilmiş [71], uzun periyotlu fiber ızgaralar kullanılarak EKFY'nin kazancının düzleştirilmesi önerilmiş [72], EKFY pompa gücünü ayarlamak için negatif geri besleme döngüsüne dayalı YOY kullanılması önerilmiş [73], fiber döngü aynası ile tam optik kazanç kenetlemeli EKFY incelenmiş [74], kaskat bağlı EKFY'lerde kanal ekleme/çıkarmayla geçişlerin kontrolü sağlanmış [75], kanalın ya da bağlantının gücünün geçici davranışı ayarlanıp korunarak (güç şekillendirme) EKFY güç geçişlerinin süre ve genliğinin azaltılması sağlanmış [76], uzun periyotlu ızgaranın bükülmesiyle her bir dalga boyu için gidiş dönüş kaybının ayarlanmasıyla tam optik kazanç kontrollü EKFY'nin kazancı kontrol edilmiş [77], halka rezonatör ve iki aşamalı sistem kullanılarak çift geçişli L-bant EKFY'nin kazanç kontrolü sağlanmış [78], dinamik kazanç dalgalanmalarını azaltmak için optik gecikme hattı kullanılarak, yüksek hızlı otomatik kazanç kontrollü EKFY geliştirilmiş [79], iki aşamalı bir EKFY'de, hızlı link kontrol kanalı ile her bir aşamanın orta evre zayıflama ve pompa gücü kontrol edilerek, akış kayıpları ve kanal sayısının ani değişimlerinden bağımsız, düz kazanç ve sabit bir çıkış gücü elde edilmiştir [80].

Literatürde yer alan çalışmaların bazıları özetlenecek olursa;

L bant için FBI ile çift geçiş EKFY birleştirerek yeni bir EKFY önerilmiştir. Klasik L bant ile önerilen bu konfigürasyon karşılaştırıldığında, -30 dBm güçte 1580 nm dalga boyunda ki giriş sinyali için kazancın yaklaşık 6 dB iyileştirildiği, gürültü faktörünün ise büyük ölçüde azaldığı görülmüştür [26].

Tek aşamalı çift geçiş ve iki aşamalı çift geçiş Tip A, iki aşamalı çift geçiş Tip B, iki aşamalı çift geçiş Tip C ve iki aşamalı çift geçiş Tip D olmak üzere beş farklı EKFY konfigürasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada her bir konfigürasyon için 1480 nm dalga boyu pompa lazeri, sirkülatör ve sinyali yansıtmak için fiber ayna kullanılarak, FBI ve çift geçiş yöntemiyle yüksek kazanç ve düşük gürültüye sahip L bant EKFY gerçekleştirilmiştir. Tip A konfigürasyonunun ortalama kazancı, tek geçişli konfigürasyondan 6,6 dB daha yüksek bulunmuştur. EKF ve fiber ayna arasına FBI yerleştirilmesiyle 2,9 dB'lik bir kazanç değişimi ve 4,8 dB daha düşük bir gürültü faktörü elde edilmesi sağlanmıştır [81].

1480 nm’de ileri yönde pompalanmış tek geçiş, çift geçiş ve filtreli çift geçiş EKFY sistemleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, 1550 nm dalga boyu 40 mW pompa gücünde, -34 dBm ve 0 dBm arasında 2 dB aralıklarla sinyal gücü uygulanmıştır. Çift geçişli EKFY’nin kazancı, küçük sinyal güçleri için tek geçişli EKFY’den daha yüksek çıkmıştır. Yükselteç doyumunda değilken, çift geçişli EKFY’nin kazancı tek geçişli EKFY den 3 dB daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, dar bant filtrenin kullanıldığı çift geçişli EKFY yapısında kazancın 8 dB arttığı görülmüştür [82]. Yükseltecin kendi doyum etkisini azaltan bir filtre görevi gören cıvıltı fiber Bragg ızgara (CFBI) ile tasarlanan yeni bir EKFY konfigürasyonu sunulmuştur. Bu çalışmada, -40 dBm giriş sinyal gücü ve 100 mW pompa gücüne karşılık, 53,4 dB kazanç ve 5,36 dB gürültü faktörü elde edilmiştir. Gürültü faktöründe 1,5 dB’lik kazançta ise 17,1 dB’lik bir iyileşme elde edilmiştir [83].

Tam çift geçişli bir sistem ile iki aşamalı kısmi çift geçişli L Bant EKFY karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, çift geçişli sisteme göre kısmi çift geçişli sistemin, küçük giriş sinyal gücüne karşılık daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, 31,2 dB kazanç ve 6,2 dB gürültü faktörü değeri elde edilmiştir. Ancak elde edilen veriler ışığında yüksek giriş sinyal güçleri için tek geçişli düzeneğin daha iyi gürültü faktörü performansına sahip olduğu görülmüştür [84]. Yücel ve Aslan deneysel olarak tek ve çift geçişli EKFY’yi incelemişlerdir. Öncelikle, 1554 nm dalga boyundaki giriş sinyal gücü -40 dBm ile +5 dBm arasında değiştirilerek tek ve çift geçişli EKFY’lerin kazanç ve gürültü faktörü değerleri ölçülmüş, daha sonra -30 dBm gücündeki giriş sinyalinin dalga boyu değerleri 1526 nm ile 1570 nm aralığında değiştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda çift geçişli EKFY kazancının yaklaşık 3-9 dB iyileştiği görülürken, YKY’nin fiber boyunca hem ileri hem de geri yönlü yayılması nedeniyle, gürültü faktörünün yaklaşık 2-5 dB yükseldiği gözlemlenmiştir [85].

Yücel ve Göktaş’ın yaptığı çalışmada ise, tek aşamalı, iki aşamalı, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli ve çift geçişli L bant EKFY konfigürasyonlarının çıkış sinyal kazanç spektrumları ile gürültü şekilleri incelenmiştir. Bu dört konfigürasyona, 1565–1610 nm dalga boyu arasında -20 dBm güçteki L bant sinyaller uygulanmıştır. Sonuç olarak, en yüksek kazanç, çift geçişli konfigürasyonda, en düşük gürültü şekli, iki aşamalı ve iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli konfigürasyonlarda ve en düşük kazanç dalgalanması, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli konfigürasyonda elde edilmiştir [86].

Wang ve arkadaşları, çift geçişli konfigürasyonda yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü elde etmek için, etkin bir pompalama şeması sunmuşlardır. Bu çalışma sonucunda FBI'nın olduğu sistemin daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü faktörü sağladığı görülmüştür [87].

Tek aşamalı, önerilen iki aşamalı, tek aşamalı tek yönlü ve iki aşamalı tek yönlü yansıtıcı tip EKFY düzenekleri sunularak, tek aşamalı yansıtıcı yükselteç ve önerilen iki aşamalı yansıtıcı sistem ile gürültü faktöründe 2 dB daha iyileşme ve nispeten daha düz bir sinyal kazancı karakteristiği elde edilmiştir [88].

Yücel ve Göktaş, 0°C ile 60°C arasındaki sıcaklıkta, tek geçişli ve çift geçişli L bant EKFY'nin sıcaklığa bağımlı kazanç değişimini, -20 dBm güçteki giriş sinyalleri ve 980 nm pompa lazerleri ile iki yönlü pompalayarak deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçta, çift geçişli L bant EKFY kazancının tek geçişli L bant EKFY kazancından daha yüksek olduğu görülmüştür [89].

Harun ve arkadaşları, reflektör ile C bant yükseltmede kendiliğinden yayılan YKY'yi etkili bir şekilde bastıran ve sömüren bir çift geçiş L bant EKFY sunmuşlardır. FBI ile çift geçişli sistemde, EKFY de ki sinyal ve YKY yansıtılmıştır. Klasik tek geçişli EKFY'ye göre çift geçişli EKFY'nin kazancının yaklaşık 10 dB ve gürültü faktörünün ise 3 dB geliştirilebileceği gösterilmiştir [90].

Zayıf güç dönüşüm verimliliğini artırmak için, 1. ve 2. kısmı geçerek 3. kısma gelen pompa sinyali ve üçüncü EKF'de harcanan YKY kullanılarak, 3 aşamalı bir L bant EKFY konfigürasyonu tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 1570 nm'den 1610 nm'ye kadar yüksek kazanç ve geniş kararlılık sağlanabilmektedir [91].

Akhter ve arkadaşları, TP1, TP2 ve TP3 olmak üzere iki aşamalı ve üç aşamalı üç geçişli sistemler modellemiş ve karakterize etmişlerdir. Sinyal gücü ve pompa gücü oranı tüm konfigürasyonlarda analiz edilmiştir. 10:50 mW pompa gücü oranına karşılık yapılan ölçümlere göre TP1 konfigürasyonu 3,24 dB'lik bir gürültü faktörüne ve TP2 konfigürasyonu 3,37 dB'lik bir gürültü faktörüne, TP3 konfigürasyonunun ise 10:50:100 mW pompa gücü oranında 3,81 dB'lik bir gürültü faktörüne sahip olduğu görülmüştür.

TP1, TP2 ve TP3 konfigürasyonları için, -5 dBm sinyal gücüne karşılık sırasıyla 35,148 dB, 21,639 dB ve 26,624 dB'lik kazanç değerleri elde edilmiştir [92].

Yücel ve arkadaşları, maksimum kazanç, minimum gürültü faktörü ve minimum kazanç dalgalanması elde etmek için, 3 aşamalı L bant EKFY'nin her bir aşama için fiber uzunluklarını ve pompa lazer güçlerini optimize etmişlerdir. Sisteme, -30 dBm güçte, 1570 nm ile 1610 nm dalga boyları arasında, 2,5 nm aralıklarla, 17 sinyal uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda, 980-1480 nm pompa dalga boyları için ortalama 34,7 - 37,1 dB kazanç, 6,28 - 6,0 dB gürültü faktörü ve 2,13 -2,28 dB kazanç dalgalanması elde edilmiştir [93].

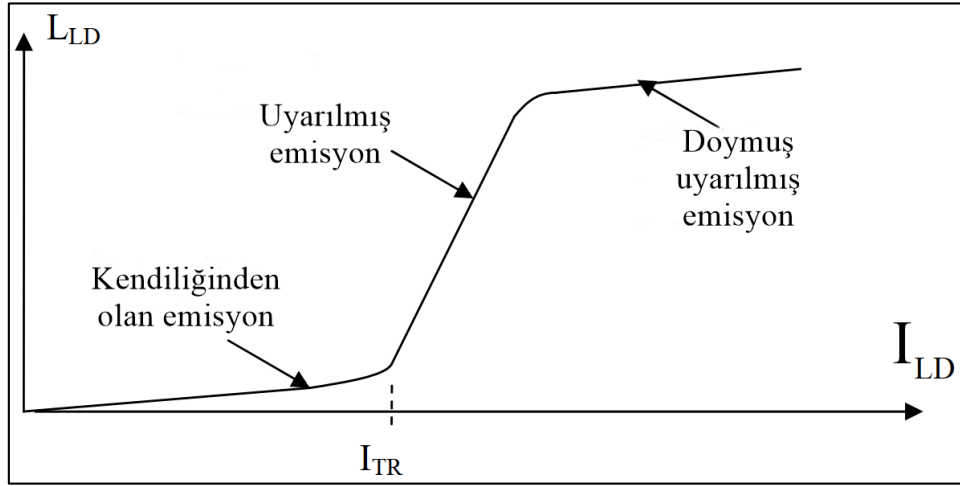
Yücel ve Yenilmez, düz bir kazanç spektrumu sağlamak için, simülasyon programı aracılığıyla C bant boyunca iki fiber arasına KDF ve ikinci fiber sonuna üniform fiber Bragg ızgara (ÜFBI) yerleştirilerek tüm sistemin kazanç spektrumunu optimize etmişlerdir. Önerilen sistemle kazancın düzleştirilmesinin yanı sıra, 1530-1565 nm aralığında her bir dalga boyu için YKY'nin daha iyi olması ve azda olsa bastırılması nedeniyle gürültü faktörünün de azaldığı ayrıca gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada C bant için iki aşamalı sistemde KDF ve ÜFBI kullanılarak toplamda yaklaşık 26,04 dB kazanç ve yaklaşık 0,68 dB dalgalanma faktörü elde edilmiştir. Tüm sistemin kazanç spektrumu elektronik bir kontrol olmadan tamamen optik olarak kontrol edilmiştir [94].

İncelenen bu yöntemler neticesinde bu tez çalışmasında zor olmasına karşın daha etkili kontrol yapılabilmesinden dolayı elektronik kazanç kontrolü seçilmiştir. Bu yöntemin de kilit noktası olan karmaşık pompa lazer sürücü devrelerinin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi olmuştur.

3. LAZER SÜRÜCÜ TASARIMI

Bu bölümde, karmaşık pompa lazer sürücü devresinin tasarımına yer verilmiştir.

Lazer diyotların temel özelliği diyottan geçen akım ile diyottun yaydığı ışık yoğunluğunun arasındaki bağımlılıktır [95].

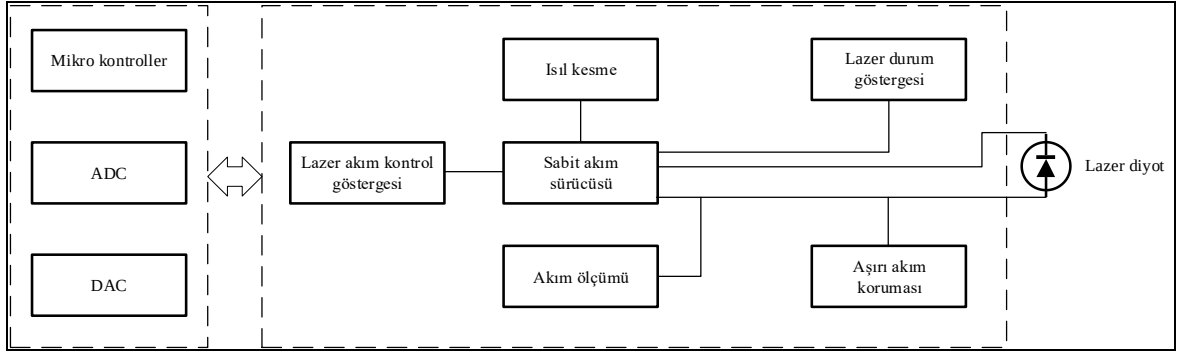


Şekil 3.1. Lazer diyot ışık yoğunluğu/akım(L/I) eğrisi

Şekil 3.1'den de görüldüğü gibi L/I eğrisinde 3 kısım mevcuttur. Normal çalışma koşullarında ikinci kısım olan uyarılmış emisyon (stimulated emission) kullanılır. Bu bölge oldukça doğrusaldır ve birçok uygulama gereksinimini karşılayabilir [95].

Lazer diyotların çok küçük dinamik dirençeleri vardır (birkaç $m\Omega$). Bundan dolayı uygulanan gerilimde yaşanan küçük değişiklikler lazerden akan akımda çok büyük değişikliğe sebep olmaktadır. Bu sebeple lazere uygulanan elektrik gücü diyot gerilimi çoğu zaman sabit olduğundan esas olarak lazerden geçen akıma bağlı olmaktadır [95].

Lazer diyotların düzgün çalışabilmesi için 2 temel parametresinin kontrol edilmesi gerekir. Bunlar gövde sıcaklığı ve akım kontrolüdür. Akım kontrolünde; lazerin optik çıkış gücünü kontrol etmek için lazer diyotun akımı hızlı bir şekilde kontrol edilmelidir. Lazerden geçen akım lazere seri bağlanan direncin üzerinde düşen gerilimin ölçülmesi ile bulunur. Geri besleme olarak alınan akım değeri tekrardan döngüye sokularak lazer akımı istenilen düzeyde sabit tutulur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Akım kontrol birimi kavramsal tasarımı

Sıcaklık kontrolünde ise; lazerin sabit dalga boyunda optik çıkış vermesi için sıcaklığının belli bir değerde sabit tutulması gerekmektedir. Lazer diyot modüllerinin içinde bulunan Termo-elektrik soğutucu (TEC) ve termistör gibi sıcaklık sensörleri kullanılarak lazer istenilen sıcaklığa gerekirse ısıtılarak gerektiğinde de soğutularak sabit sıcaklıkta kalması sağlanır.

Son olarak pompa lazer için tasarlanan akım ve sıcaklık modülleri kart üzerine tasarlanacak grafik arayüz ile kontrol edilebilecektir.

3.1. Lazer Akım Sürücüleri

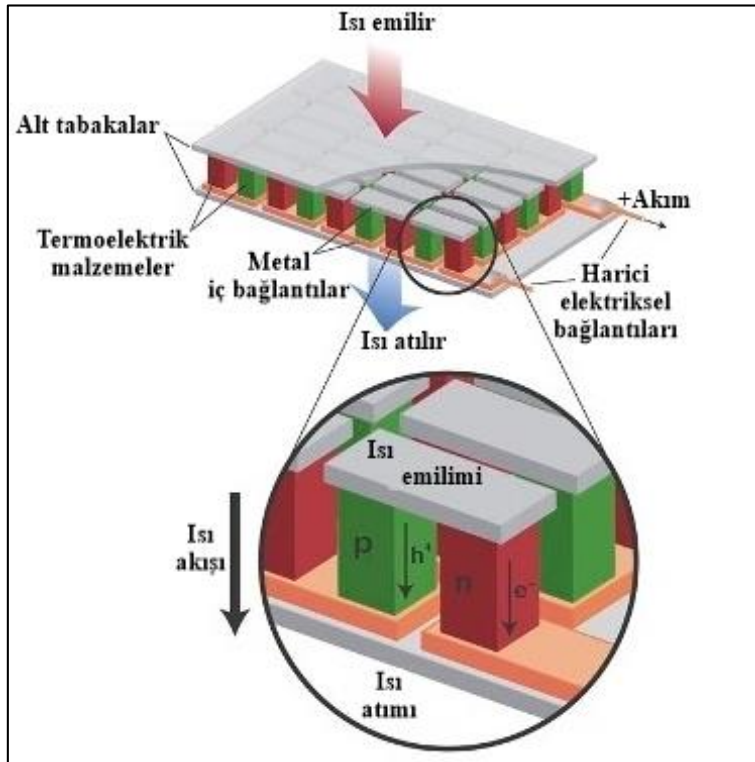
Lazer diyotları sürmek için kullanılan akım sürücüleri temelde doğrusal güç yükselteçleri ve anahtarlamalı güç kaynakları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğrusal yükselteçler 1A'ye kadar kullanılabilirken 1A'den sonra verimleri çok büyük düşüş gösterdiği için anahtarlamalı akım sürücüleri tercih edilirler. Anahtarlamalı akım sürücüleri yüksek verimlilikleri ve çıkabildiği yüksek akım sürme kapasiteleri nedeniyle 1A'den sonraki uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir.

Yeterince iyi tasarlanmamış anahtarlamalı akım kaynaklarında oluşan ripple ve istenmeyen frekans bileşenleri lazerin oluşturduğu optik güçte stabilizasyon sorunu yaratmaktadır.

Bu tezde iki akım sürücü tipi ile de çalışma yapılmıştır. İlerleyen kısımlarda detaylı bir şekilde incelenecektir.

3.2. Lazer Sıcaklık Kontrol Çeşitleri

TEC malzemeleri sıcaklığın kontrol altında tutulması gereken uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. TEC'ler peltier efekt ile çalışan yarı iletken malzemelerdir. Peltier efekt DC bir gerilim uygulanması sonucunda iki farklı malzeme arasında bir sıcaklık farkı oluşturulduğunda ortaya çıkar. Katkılı yarı iletken malzemeler (p-malzeme ve n-malzeme) kullanılır ve ayrı ayrı p-n çiftleri olarak seri olarak bağlanır.

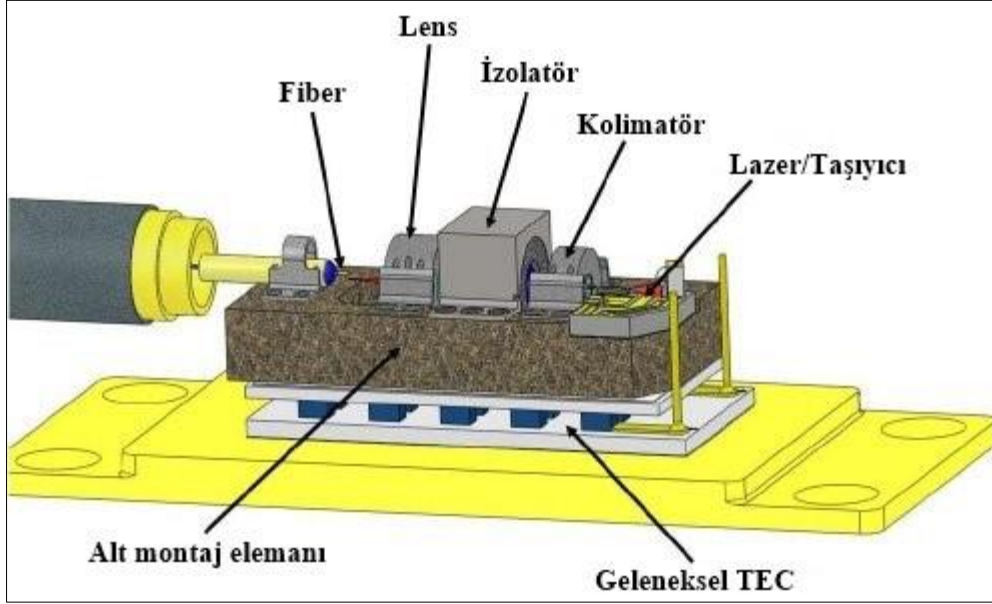


Şekil 3.3. TEC'in iç yapısı [96]

DC akım uygulandığında, elektronlar termal enerjiyi emen veya serbest bırakan enerji durumlarını değiştirir. Termoelektrik modülün bir tarafı ısınırken diğer tarafı soğur. DC akımının değiştirilmesi bu etkiyi tersine çevirir. Peltier sıcaklık kontrolü basit ve çok etkilidir.

Bu çalışmada kullanılan kelebek tip (Butterfly Type) lazer modülün içi Şekil 3.4'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere lazere yerleştirilmiş TEC sayesinde lazerin istenilen sıcaklıkta sabit tutulması sağlanır.

Optik uygulamalarda hedeflenen sıcaklık $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 'den $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar değişiklik gösterebilmektedir. EKFY larda ise hedeflenen sıcaklık genellikle $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 'den $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 'ye kadardır.

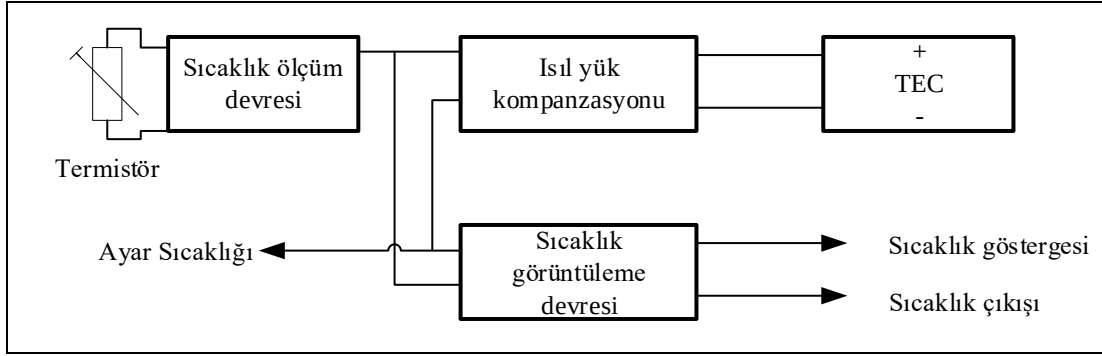


Şekil 3.4. Kelebek tip lazer modülün içyapısı [97]

TEC kontrolü

Şekil 3.5 temel olarak bir TEC'in nasıl kontrol edildiğini gösteren bir blok diyagramdır. Burada ilk komponent termistördür ve sıcaklık sensörü olarak kullanılmaktadır. Bu sensör Şekil 3.4'de görülen kelebek tip lazerin içine gömülü bir şekilde gelir ve lazerin sıcaklığını ölçmek için kullanılır.

Sıcaklık ölçüm devresinden gelen bilgiye göre ayarlanan hedef sıcaklığı karşılaştırılarak "Isıl yük kompanzasyon" bloğuna iletilerek TEC'in ısıtılması ya da soğutulması gerçekleştirilerek sıcaklığın hedeflenen düzeyde kalması sağlanır.



Şekil 3.5. Sıcaklık kontrol birimi kavramsal tasarımı

TEC kontrolörler çıkış aşamasına moduna göre lineer ve anahtarlama modu olmak üzere iki şekilde kategori edilebilirler. Lineer mod TEC kontrolörler tasarımı ve üretimi basit olmasına karşın enerji verimlilikleri %20'den %40'a kadardır. Anahtarlama TEC kontrolörler ise verimlilikleri %90'a kadar çıkabilmektedir. Fakat çıkıştaki dalgalanmayı filtrelemek için iki yüksek güçlü bobin ve düşük ESR değerli kapasitörlere ihtiyaç duymaktadır [98].

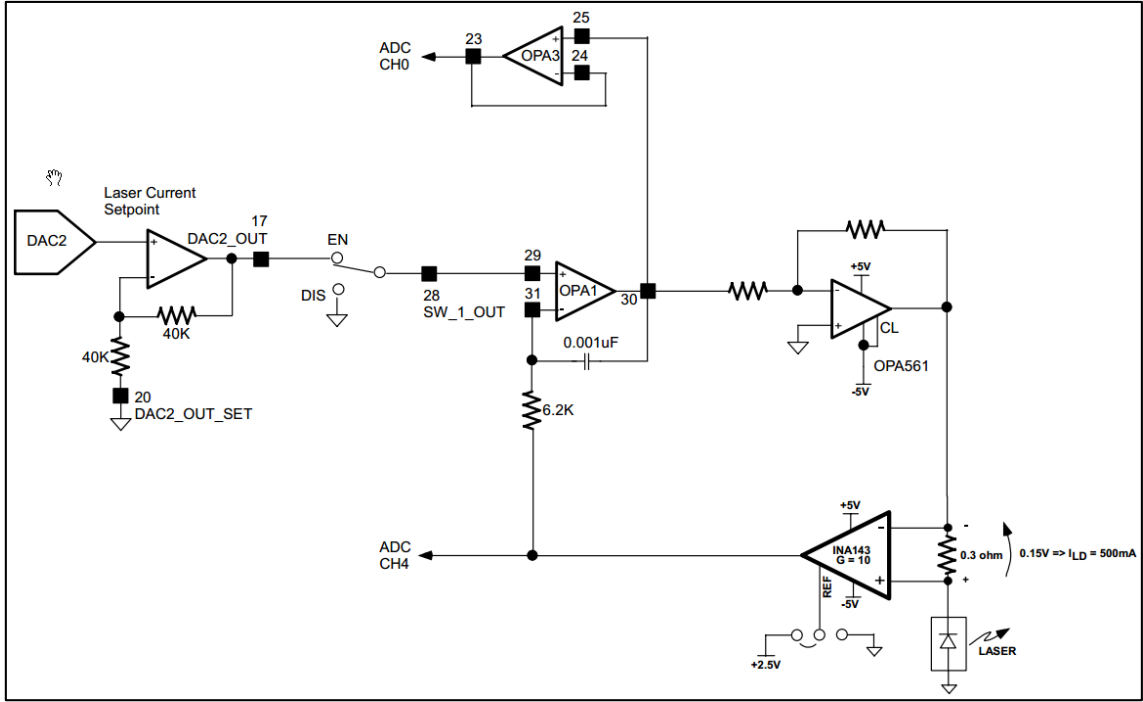
3.3. Tasarlanan Sürücü

Bu bölümde tasarımı ve gerçeklemesi yapılan iki farklı sürücünün detayları anlatılacaktır. İlk tasarım başlığı adı altında verilen kısımda ilk denemesi yapılan tasarım incelenmiştir. Bu devrenin bu tez çalışmasında kurulan EKFY'nin yeteri kadar iyi olamamasından dolayı ikinci tasarım başlığı adı altında verilen başka bir tasarım daha yapıp incelenmiştir.

3.3.1. İlk tasarım

Akım sürücüsü

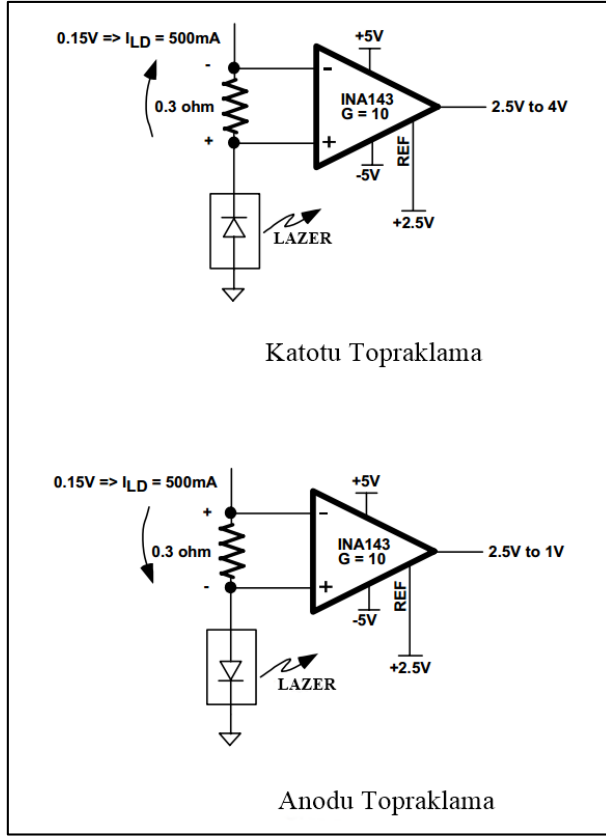
İlk yapılan tasarımda akım kontrolü AMC7820 (Analog Monitoring & Controlling) entegresi ile dijital kontrolü sağlanmış olup OPA561 (Power Amplifier) güç yükselteci ile de güç katı gerçekleştirilmiştir. Lazerden geçen akım direnç ile gerilime dönüştürülüp kazancı 10 olan enstrümantasyon yükselteci ile yükseltip AMC7820'nin 12'bitlik 4 numaralı ADC girişine verilmiştir. Okunan akım sinyali integral alıcı devrenin geri besleme sinyali olarak kullanılıp istenilen akım değeri ile okunan değer arasındaki değeri karşılaştırıldıktan sonra çıkışına bağlı olan OPA561 lineer güç yükseltecinin besleme sinyalini oluşturmaktadır [99].



Şekil 3.6. Lazer akım sürücü devresi

Akım ölçme devresi Şekil 3.7’de görülmektedir. Kullanılacak olan pompa lazerde akım sadece tek bir yönde akabilir. Fakat tasarlanacak olan devre çift yönlü bir şekilde akım ölçebilmelidir. Bundan dolayı akım bilgisini yükselten enstrümantasyon yükselteci ve güç yükselteci bipolar olacak şekilde tasarlanmıştır.

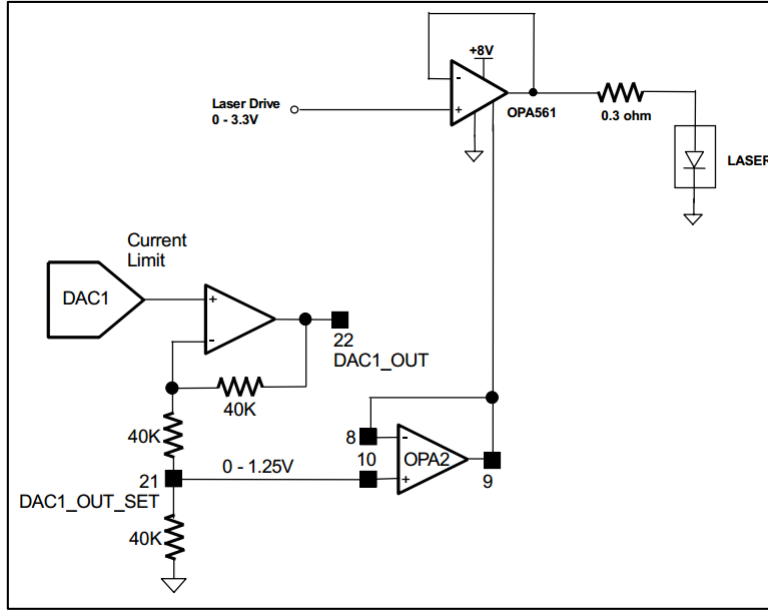
Böylece anodu topraklanan lazer diyotta akım Şekil 3.7’ de görüldüğü gibi geçmektedir. Enstrümantasyon yükselteci hiç akım geçmez iken çıkışında referans gerilimi olan 2.5V görülmektedir. 500 mA akım geçtiğinde ise 4V okunacaktır. Aynı şekilde katodu topraklanan lazer diyotta ise akım tersi yönde akacak olup 500mA akım geçtiğinde ise çıkış gerilimi 1V’a düşecektir. Böylelikle iki durumda da AMC7820’nin ADC kanalından çift yönlü olarak akım bilgisi okunabilecektir.



Şekil 3.7. Akım ölçme devresi

Lazer diyotun akım kaynağı olan OPA561 lineer güç yükseltecidir. Lazerin akım sürücüsünde anahtarlama yükselteç kullanılması durumunda oluşabilecek gürültü sinyalleri sinyal hatlarına karışıp sürücüde kritik hatalar oluşmasına neden olabileceği anahtarlama yükselteçler düşük güçlü lazer sürücülerde yaygın olarak kullanılmaz.

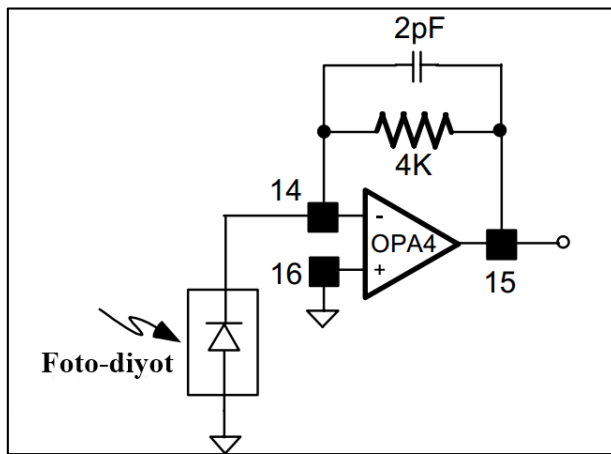
Lazerin fazla akım çekme ihtimaline karşı bir önlem olarak akım sınırlayıcı bir devre uygun olacaktır. OPA561'in I_{LIM} pini ile akım sınırlamak mümkündür. Ayrıca bu akım sınırlamasını dijital olarak DAC'ın çıkışından alınan gerilim ile yapmak mümkün hale getirildi.



Şekil 3.8. Akım sınırlama devresi

Optik güç izleme

Lazer diyotun optik gücünü takip etmek için modülün içindeki PIN diyot kullanılmıştır. PIN diyot fotovoltajik modda kullanılmıştır. Fotovoltajik modda bias gerilimi uygulanmaz. Bundan dolayı diyottan geçen akımı kullanılabılır gerilime dönüştürülmesi gerekir. Bu işlem ise Şekil 3.9’da görülen şemadaki gibi transempedans yükseltici kullanılarak yapılmıştır. Geribesleme kapasitörü kazancın tepe değerini minimize edilecek şekilde seçilmiştir.



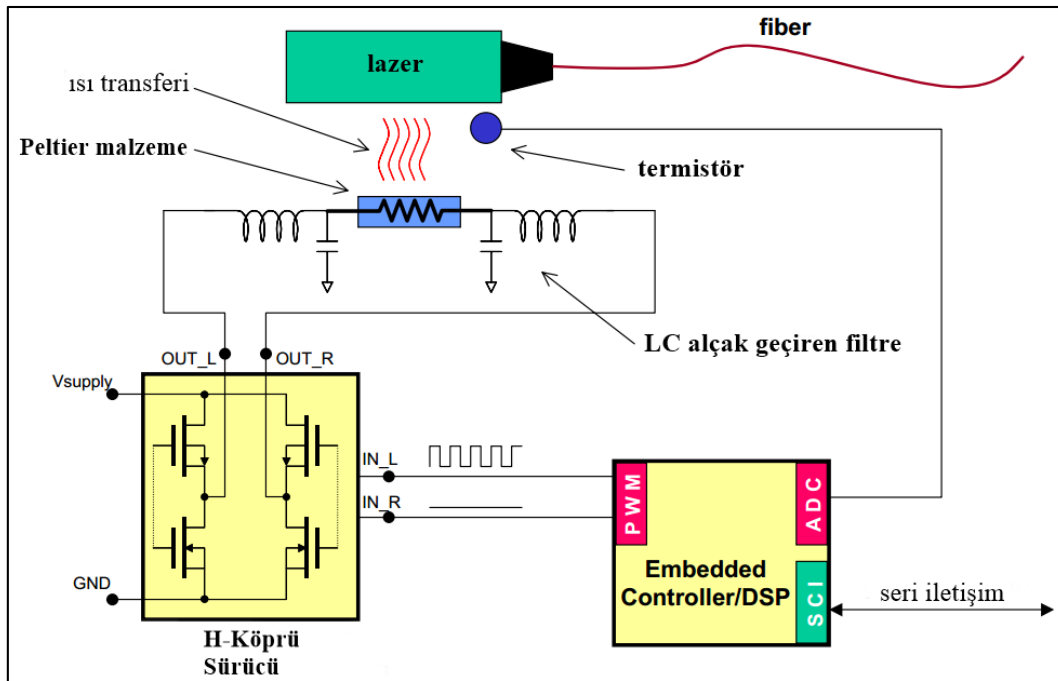
Şekil 3.9. Optik güç izleme devresi

OPA4'ün çıkışından alınan gerilim ADC kanallarından biri ile okunup optik güce dönüştürülmüştür.

TEC kontrol devresi

Bütün lazer modüllerin çıkış dalga boylarının sıcaklık bağımlılığı vardır. Bu tezdeki tasarlanan EKFY'de de kullanılan modern lazerlerde dalga boyu yaklaşık olarak $\pm 0.02\text{nm}/^\circ\text{C}$ sıcaklığa göre değişiklik göstermektedir.

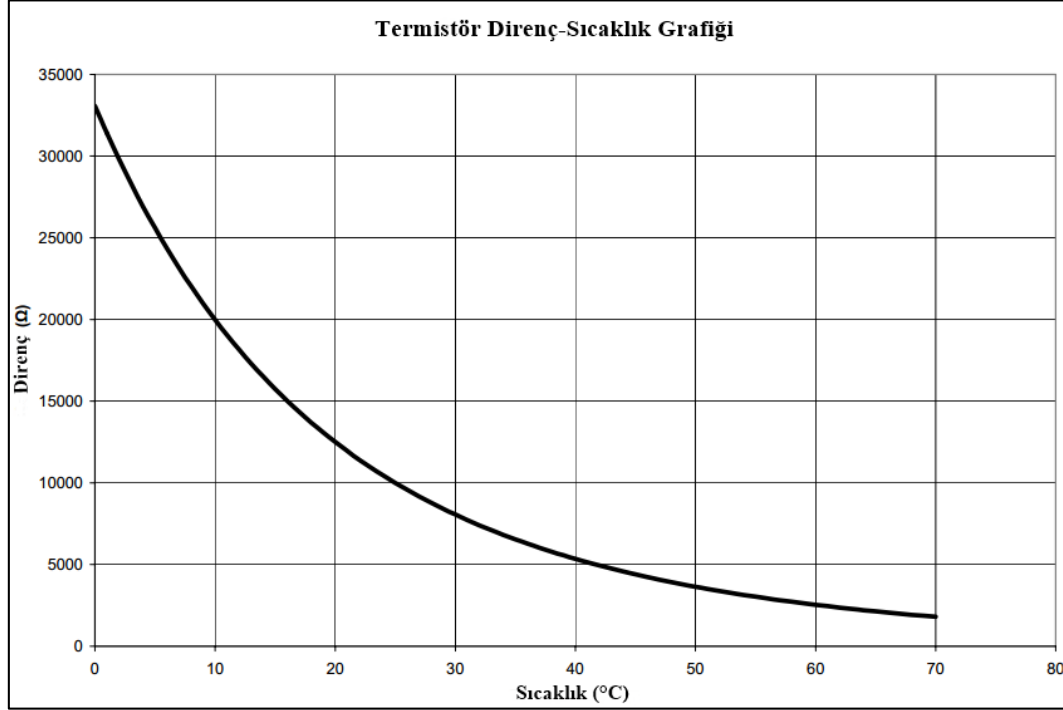
Termoelektrik soğutucu peltier malzeme içeren ve lazer diyota yakın konumlandırılmış bir malzemedir. Bu malzemeden akım geçtiğinde, bir tarafı ısınırken diğer tarafı soğur. Lazer modülün sabit sıcaklıkta kalması da peltier malzemenin h-köprüsü ile kontrol edilerek gerektiğinde soğutma, gerektiğinde ise diyeti ısıtması ile sağlanacaktır.



Şekil 3.10. Termoelektrik Soğutucu Blok Diyagramı [99]

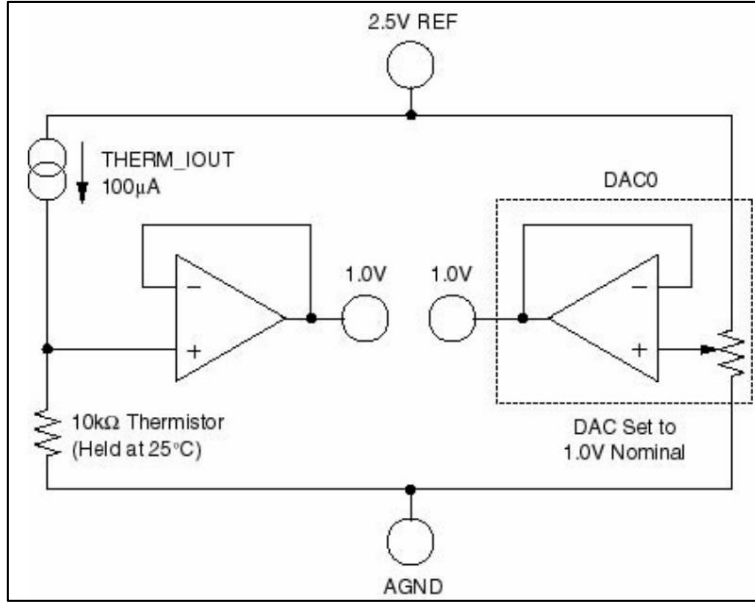
Pompa lazerin stabilizasyonu için $\pm 0.1^\circ\text{C}$ sıcaklık istikrarı sonuç olarak lazerin 975nm merkez dalga boyunda sadece 0.002nm kaymaya neden olacaktır. Bu değişim ise $\pm 2\text{ppm}$ 'e denk gelmektedir. Modern sistemler için yaklaşık $\pm 4\text{ppm}$ değişim yeterli olmaktadır. Lazer diyetun sıcaklığını modülün içindeki termistör yardımı ile ölçülecektir. Termistörün 25°C 'deki normal direnç değeri $10\text{K} \pm 500\Omega$ 'dur. Diğer termistörler gibi sıcaklığa göre

doğrusal olmayan geniş bir sıcaklık değişim cevabı vardır. Tasarlanan sistemde bu eğri lineerleştirilerek sıcaklık kontrolü yapılmıştır.



Şekil 3.11. Termistörün sıcaklıkla değişen direnç eğrisi

Sistemde kontrolüne yoğunlaşılacak kısım sıcaklığın gerçek değeri olmayıp lazer diyotun sıcaklığının sabit kalması kısmına yoğunlaşmıştır. Sıcaklığın $\pm 0.1^\circ\text{C}$ aralığında salınması bu sistem için yeterli olacağı öngörülmüştür. Sıcaklık kontrol devresi Şekil 3.12’de verilmiştir.

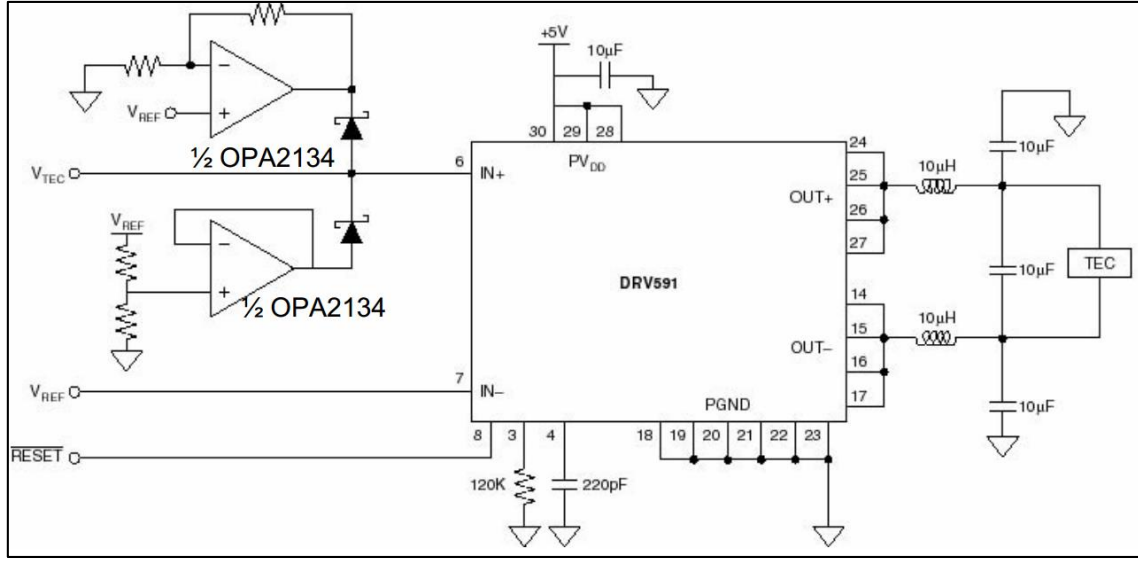


Şekil 3.13. Oranlı metrik referans ile sıcaklık ölçümü

Şekil 3.13'teki gibi ratiometric moddaki bu referans gerilimi kullanmak, referans gerilimin gerçek değerinin hiçbir zaman fark yaratmamasıdır. Referansta yaşanabilecek kaymalar veya sıcaklık değişimi hiçbir zaman sıcaklık kontrol döngüsünü etkilemeyecektir.

TEC sürücü

Bu tasarımda TEC'i sürmek için anahtarlama PWM sürücü kullanılmıştır. PWM sürücüler yüksek verimli ve sürücü kılıfı üzerinde daha az ısı açığa çıkmasını sağlar. Böylelikle geniş soğutuculara ihtiyaç kalmaz. Özellikle fiziksel olarak bu tasarımda olduğu gibi küçük boyutta bir kart çizilecek ise tercih sebebi olur. PWM sürücülerin bu avantajlarının yanında küçük de olsa bir dezavantajı bulunmaktadır. Bu dezavantaj ise anahtarlama kaynağından kaynaklı oluşan gürültünün devre elemanlarına etki etmesidir. Fakat TEC için istenilen akım dalgalanmasını sağlayacak özellikteki tasarlanan filtre ile bu genellikle problem olmamaktadır. Şekil 3.14'te TEC için oluşturulmuş D sınıfı bir güç devresi görülmektedir.



Şekil 3.14. TEC için tasarlanan D sınıfı güç devresi

DRV591 TEC'e $\pm 3A$ 'e kadar akım sağlayabilmektedir. DRV591 2.34 sabit kazançla sahiptir. Bunun neticesinde transfer fonksiyonu Eş 3.1 deki gibi olacaktır.

$$V_O = V_{O+} - V_{O-} = 2.34(V_{IN+} - V_{IN-}) \quad (3.1)$$

Genel olarak kullanılan lazer modüllerin maksimum TEC gerilimleri 3.4V civarındadır. Bu tasarımda da bu göz önüne alınarak V_{IN-} 2.5V'luk referans gerilimine bağlanarak çıkış gerilimini 3.66V ile ve OPA2342 ile oluşturulan devre ile de minimum 1.34V gerilim ile sınırlanmıştır.

Termistörden sıcaklık ölçümü

Daha önceden de bahsedildiği gibi termistörün sıcaklık-direnç eğrisi lineerleştirilerek kullanılmıştır. Bu lineerleştirmeyi termistörler için yaygın olarak kullanılan Steinhart-Hart eşitliği kullanılarak yapılmıştır.

Steinhart-Hart eşitliği NTC termistörlerde R/T eğri karakteristiği için kullanılan Beta eşitliği olarak bilinen ve çok kullanışlı olan interpolasyon yönteminin yerini almıştır. Steinhart-Hart denklemi belirli sıcaklık değerleri arasında 3.dereceden polinomlar ile mükemmel eğri uydurma karakteristiği sergilemektedir. Eş 3.2'de Steinhart-Hart denklemi verilmiştir.

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (3.2)$$

T: Sıcaklık Kelvin cinsinden,

R: Termistörün direnç değeri

A,B,C: Termistör sabitleri

A,B,C katsayıları termistörün 3 farklı sıcaklık değerine karşılık gelen direnç değerleri ile hesaplanabileceği gibi Şekil 3.15'te sunulan lazer modülün teknik sayfasında da direkt olarak termistör katsayıları verilmektedir.

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
TEC Capacity ^{4, 5}	ΔT	45	—	—	°C
TEC Current @ $\Delta T = 45^\circ\text{C}$, I _F , O _P	I _{TEC}	—	0.9	1.2	A
TEC Voltage @ $\Delta T = 45^\circ\text{C}$, I _F , O _P	V _{TEC}	—	2.0	2.5	V
Thermistor Resistance @ 25 °C	R _{th}	9.5	—	10.5	kΩ
Thermistor Constants ⁶	A	—	1.130	—	10 ⁻³
	B	—	2.341	—	10 ⁻⁴
	C	—	0.876	—	10 ⁻⁷
Spectrum Stability (over one minute)	$\Delta\lambda_{PT}$	—	—	0.5	nm
Output Power Stability (over one minute)	ΔP_{OT}	—	—	0.5	% of P _O

Şekil 3.15. Lucent 263DN pompa lazerin teknik sayfasından alınan TEC bilgileri

Baskı devrenin hazırlanması

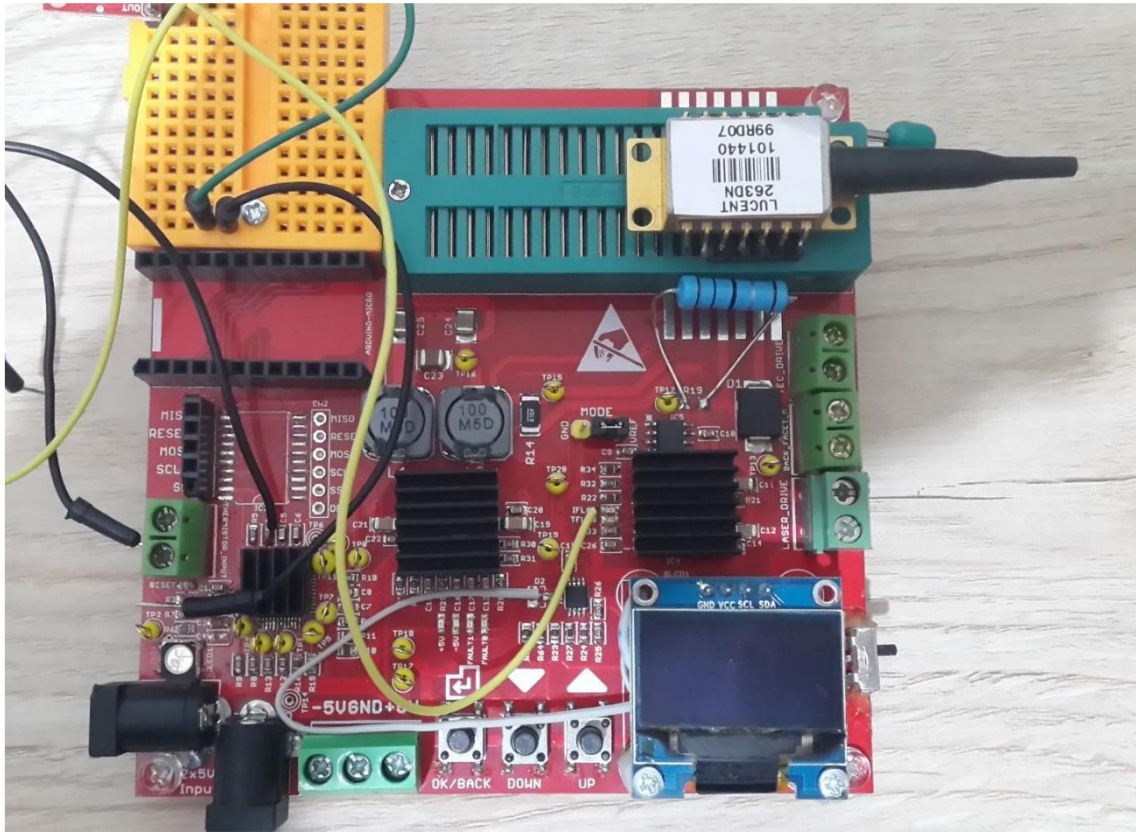
Baskı devrelerin çizimi yapılırken kullanılan AMC7820, DRV591, OPA561 OPA2342 gibi bütün önemli entegrelerin önerilen “PCB layout “ tavsiyelerine uyulmuş olup bunlara göre çizimleri yapılmıştır. Çizimler 2 katmanlı yapılmış olup FR-4 malzemesine basımı yaptırılmıştır.

İlk tasarım deney sonuçları:

Yapılan ilk tasarımın baskı devre kartı Resim 3.1'de görülmektedir. Yapılan denemeler sonucunda teorideki tasarımların eksikleri olduğu ortaya çıkmıştır. Termistörden okunan geriliminin yeterince stabil olmamasından dolayı oluşan sıcaklık dalgalanmaları dalga boyunda kaymaya neden oldu. Termistörden okunan gerilim 12 bitlik ADC ile dijital değere

dönüştürülmüştü. Deney sonucunda 12 bitlik ADC'lerin böyle hassas kontrol yapması gereken bir devre için yetersiz olduğu kanısına varılmıştır. Bundan dolayı ikinci tasarımda en az 16 bitlik ADC kullanılmasına karar verildi.

Akım sürücüsünün testi oldukça başarılı geçmiştir. Teoride tasarlandığı gibi çalışan akım sürücüsü donanımsal anlamda herhangi bir problemi olmamasına rağmen gömülü sistem yazılımı ile yapılan PID kontrolörün yeterince hızlı olamaması ve dijital hesap hatalarının meydana gelmesinden dolayı hedef değere yavaş ulaşması ve salınım değerinin fazla olması mükemmel bir sonuç alınmadığını gösterdi. PID kontrolörün aynı şekilde TEC sürücüsünde de salınımlara sebep olduğu gözlemlenmiştir.



Resim 3.1. İlk tasarımın dizilmiş baskı devresi

3.3.2. İkinci Tasarım

Birinci tasarımın deneyinden elde edilenler sonucunda daha stabil ve hızlı çalışabilecek TEC ve akım sürücüleri araştırıldı. Bu araştırmaların sonucunda lazer TEC ve akım sürücüleri

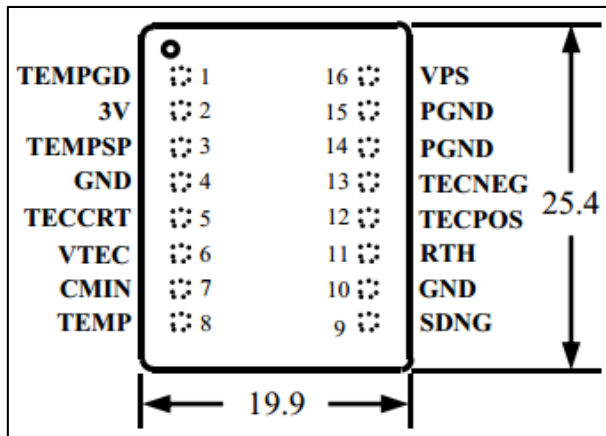
bulundu. Tasarımın deneyi sonucunda bulunan sürücüler oldukça basit ve kullanışlı olduğu gibi yeterince kararlı da çalışmaktadır.

TEC sürücüsü

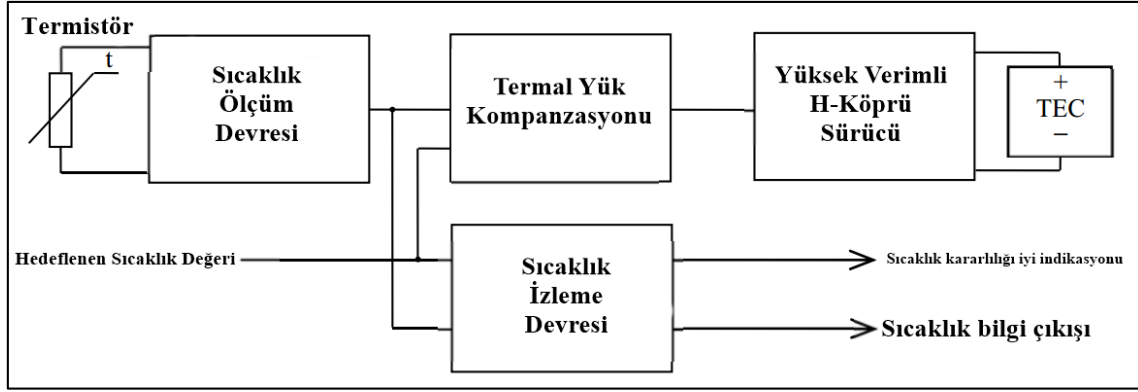
TEC sürücünün özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Yüksek verimlilik: $\geq 90\%$
- Maksimum çıkış akımı: 4A
- Maksimum çıkış gerilimi: $V_{VPS} - 0.2V$
- Gerçek sıcaklık izleme
- Yüksek stabilizasyon: $0.01^{\circ}C$
- Yüksek hassasiyet
- Yüksek Güvenilirlik
- Sıfır EMI
- Kompakt Boyut

Modülün sunduğu fonksiyonlar: Termistör T-R eğri lineerleştirmesi, sıcaklık ölçümü ve takibi, sıcaklık kontrol döngüsü durum bildirimi, TEC gerilim takibi, gecikmeli açılış ve kapanış.



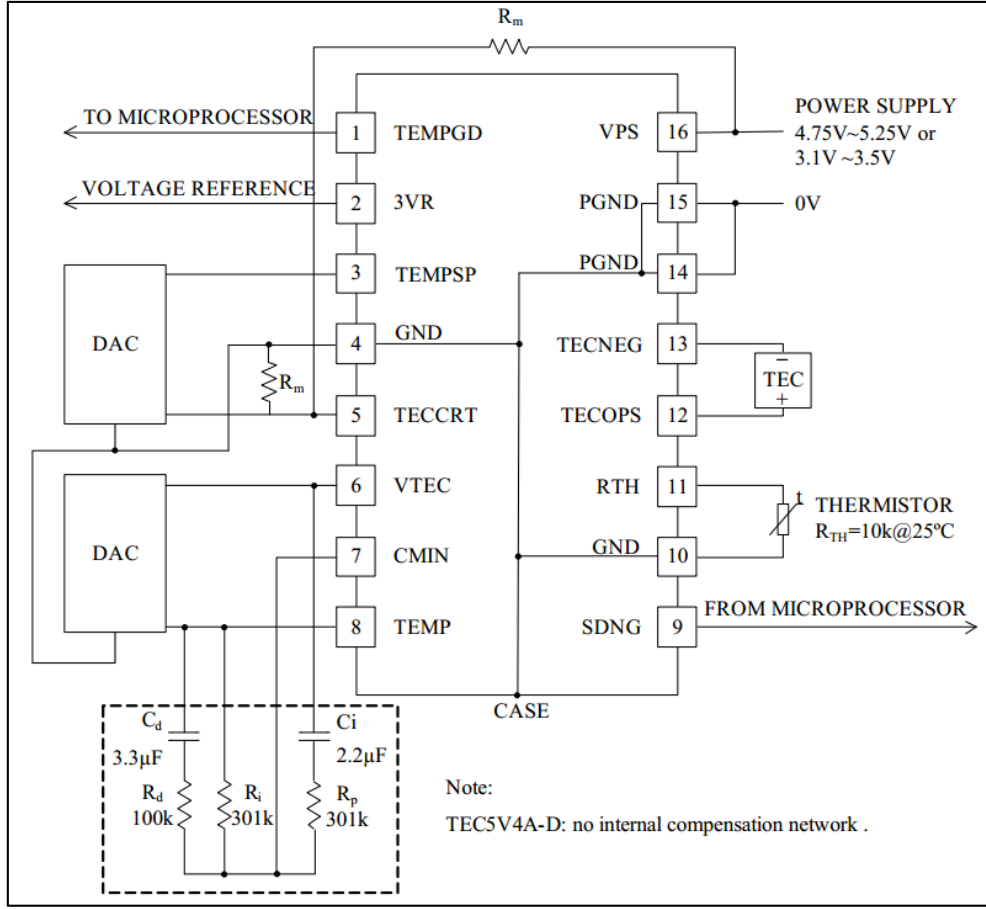
Şekil 3.16. TEC sürücünün pin numaraları ve yerleşimleri



Şekil 3.17. TEC sürücünün blok diyagramı

Şekil 3.17'deki blok diyagramında görüldüğü gibi TEC modülü temel olarak sıcaklık bilgisini okuyup hedef sıcaklık değeri ile karşılaştırıp çıkışta H-köprü devresinin kontrolünü yaparak sıcaklığı sabit bir noktada tutmaktadır. Modülle gelen “sıcaklık kararlılığı iyi” indikasyonu ile mikrodenetleyiciye döngü-iyi bilgisi gönderilebilmektedir. Aynı zamanda da “sıcaklık bilgi çıkışı” ile de gerçek zamanlı anlık sıcaklık bilgisini okuyabilmemize olanak sağlamaktadır.

Modülün kontrolü için tasarlanan devre şeması Şekil 3.18’de verilmiştir.



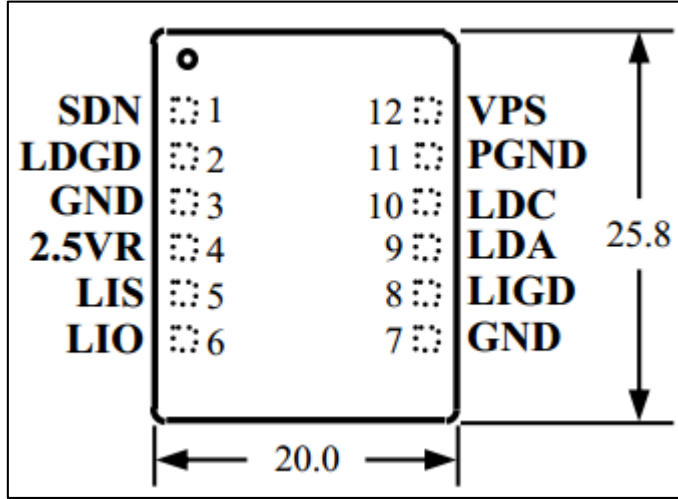
Şekil 3.18. TEC kontrolör bağlantı şeması

Akım sürücüsü

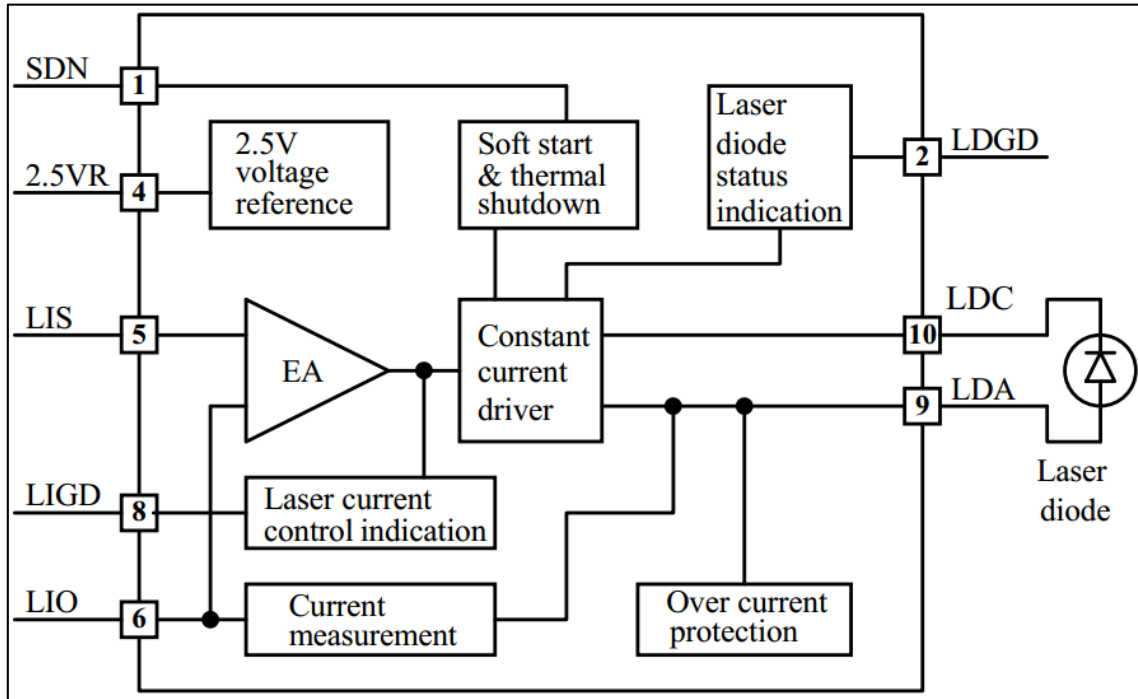
Seçilen lazer akım sürücünün özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Yüksek verimlilik: $\geq 90\%$
- Maksimum çıkış akımı: 1A
- Akım çıkış gürültüsü: 0.05%
- Maksimum çıkış gerilimi: $V_{VPS} - 0.2V$
- Yüksek stabilizasyon: $100\text{ppm}/^\circ C$
- Döngü Kontrol İndikasyonu
- Sıfır EMI
- Kompakt Boyut

Modülün sunduğu fonksiyonlara şu şekilde sayabiliriz: Lazer sabit akım kontrolü, akım takibi, aşırı akım ve termal koruma, akım kontrol indikasyonu, lazer diyot durum indikasyonu, gecikmeli başlatma ve kapatma.



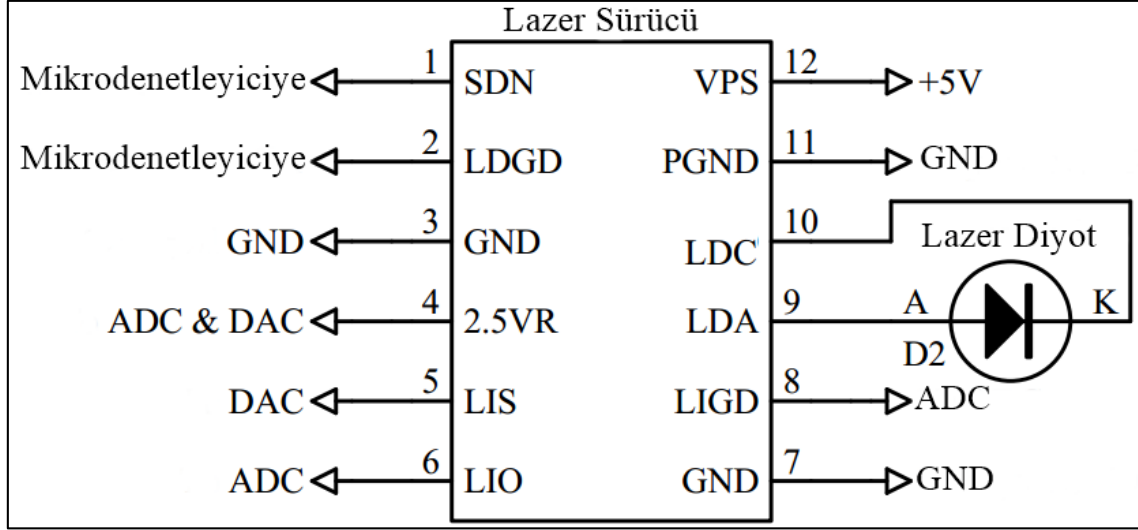
Şekil 3.19. Lazer sürücünün pin numaraları ve yerleşimleri



Şekil 3.20. Lazer sürücünün fonksiyonel çalışma blok diyagramı

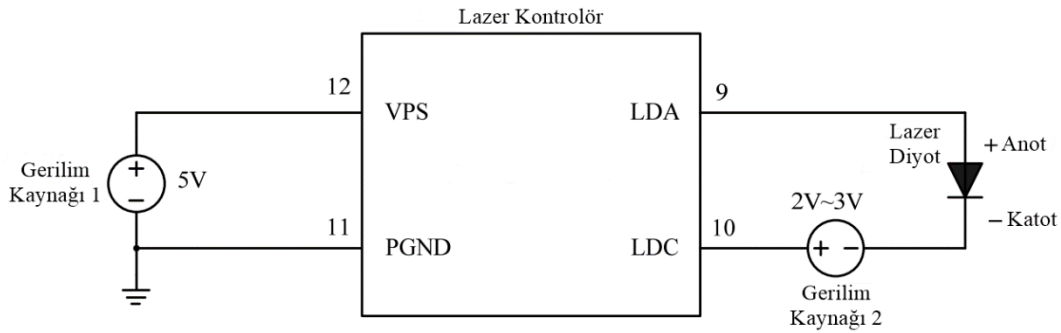
Şekil 3.20'deki blok diyagramına bakılacak olursa modülün ekstra fonksiyonları sabit akım sürücü kontrolünden geçirilip çıkışa verilmektedir. Buradaki özelliklerden modülün kendi referans gerilim çıkış olması, DAC ya da trimpot kullanılarak kontrol edilecek olan lazerin

olabilecek en düşük gürültü seviyelerinde kontrolünün sağlanmasıdır. Ayrıca “soft start” devresi ile lazer diyotun başlangıç tepe gerilimlerinden korunması ve “thermal shutdown” özelliği ile anormal ısınma durumlarında devreye girerek sürücü kapatması diğer özelliklerindendir.



Şekil 3.21. Lazer diyot kontrolör bağlantı şeması

Şekil 3.21’de verilen kontrolör bağlantı şeması ile oluşturulan devrede mikrodenetleyici dışında kullanılan ADC ve DAC birimleri ile tamamlanmıştır. 5V ile beslenen lazer modül ile 4V’tan daha yüksek gerilimle çalışabilecek lazer diyotlar sürülememektedir. Bu projede her ne kadar buna ihtiyaç olmasa da Şekil 3.22’de de görüldüğü gibi lazer diyot çıkışına bağlanacak harici gerilim kaynağı ile bu sorunda çözülebilmektedir.



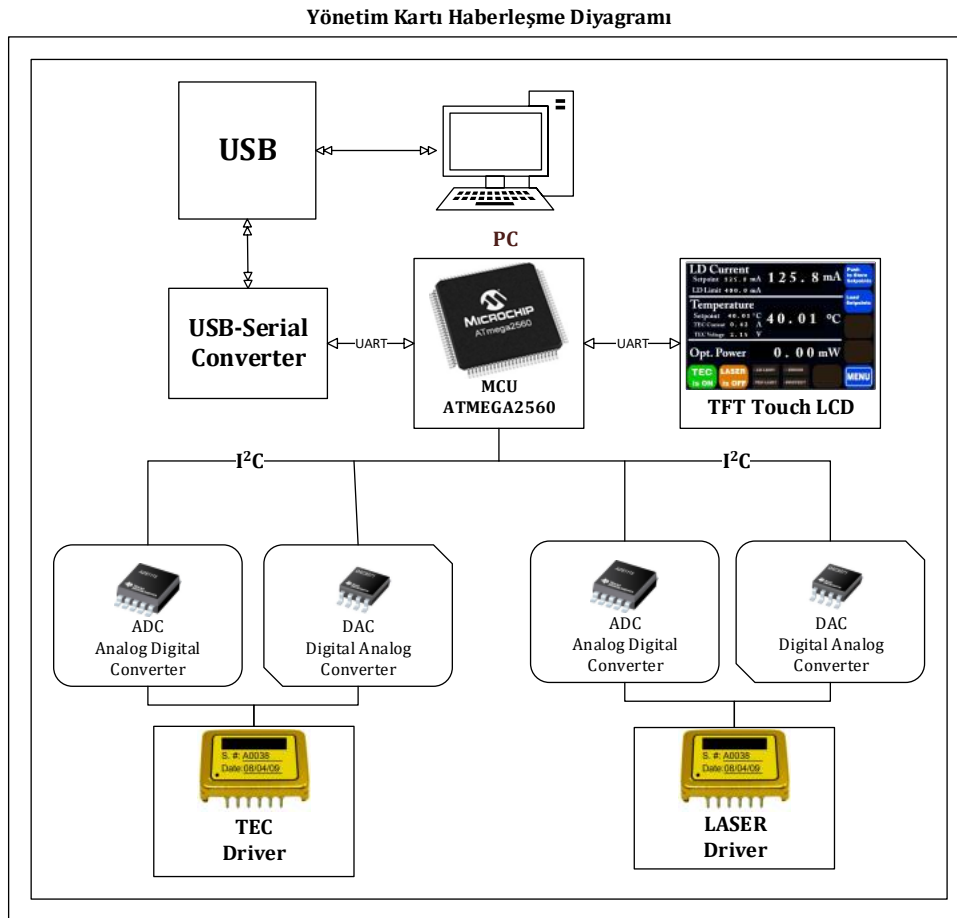
Şekil 3.22. Yüksek gerilim ile çalışan lazer diyotları sürme

4. TASARLANAN SÜRÜCÜNÜN TEMEL ANALİZİ

4.1. Yönetim Kartının Tasarlanması Ve Gerçekleştirilmesi

Yönetim kartı ATMEGA2560 mikrodenetleyicisi ile yapılmış olup Şekil 4.1'deki blok diyagramda da görüldüğü gibi tüm sistemin yöneticisi olarak görev yapmaktadır.

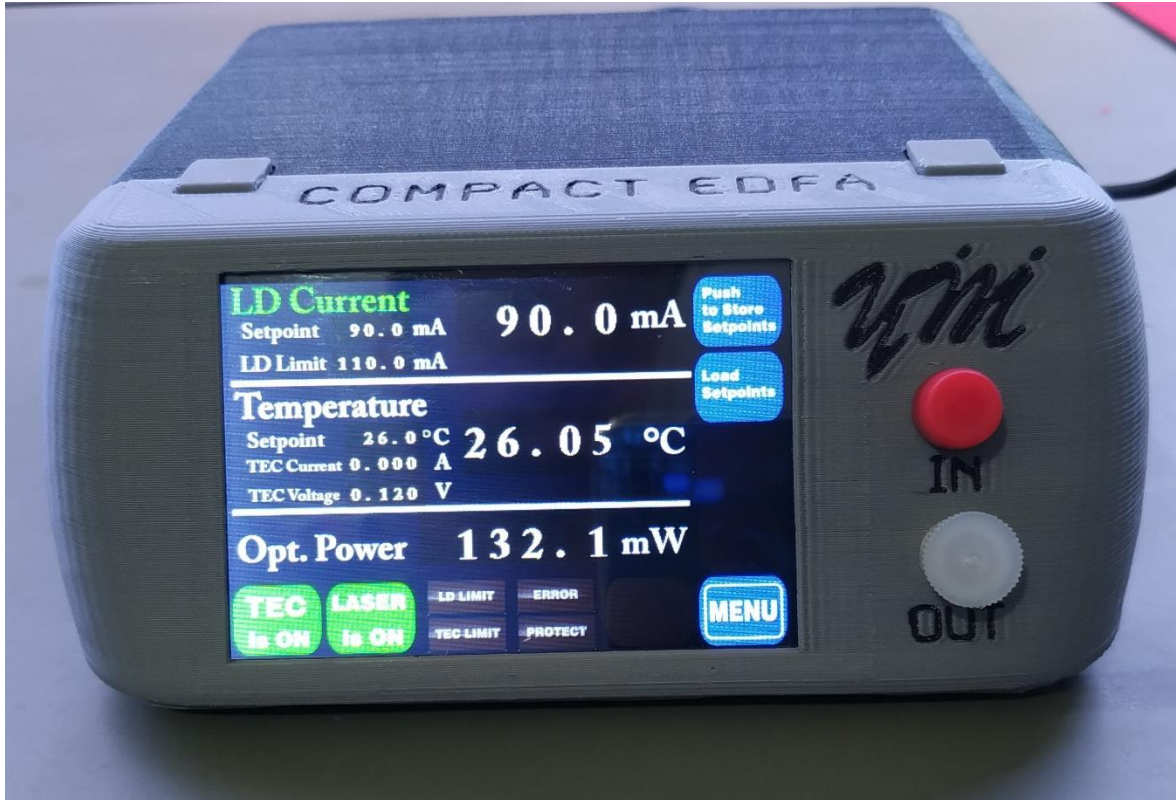
Bilgisayardan gelen komutlara USB-Seri arayüz yani UART haberleşme protokolü kullanarak cevap veren ve aynı şekilde TFT dokunmatik LCD ekran ile UART ile haberleşmektedir. Sistemde bulunan 2 ADC ve 2 DAC biriminin haberleşmesi ise I²C ile sağlanmaktadır. Yönetim kartının bilgisayar ile haberleşmesinde kullanılacak olan protokoller kendi tarafımızdan belirlenen bir standart ile oluşturulmuştur. Kompakt EKFY, diğer laboratuvar cihazlarında olduğu gibi uzaktan kontrol ve yönetme işlemleri için seri haberleşme komutları kullanılarak farklı programlarda geliştirilen arayüzler ile de kontrol edilebilmektedir.



Şekil 4.1. EKFY Yönetim kartı blok diyagramı

4.2. Deneysel Yüksek Kazançlı EKFY'nin Oluşturulması

C bant sinyallerinin yükseltilmesi için ayarlanabilir lazer kaynağından uygulanan sinyaller fiber optik izolatörden geçirildikten sonra 975.09 nm pompa lazeri ile DBÇ kuplörde birleştirilip, erbiyum katkılı fiber uygulanmış ve kazanç ortamı oluşturulmuştur.

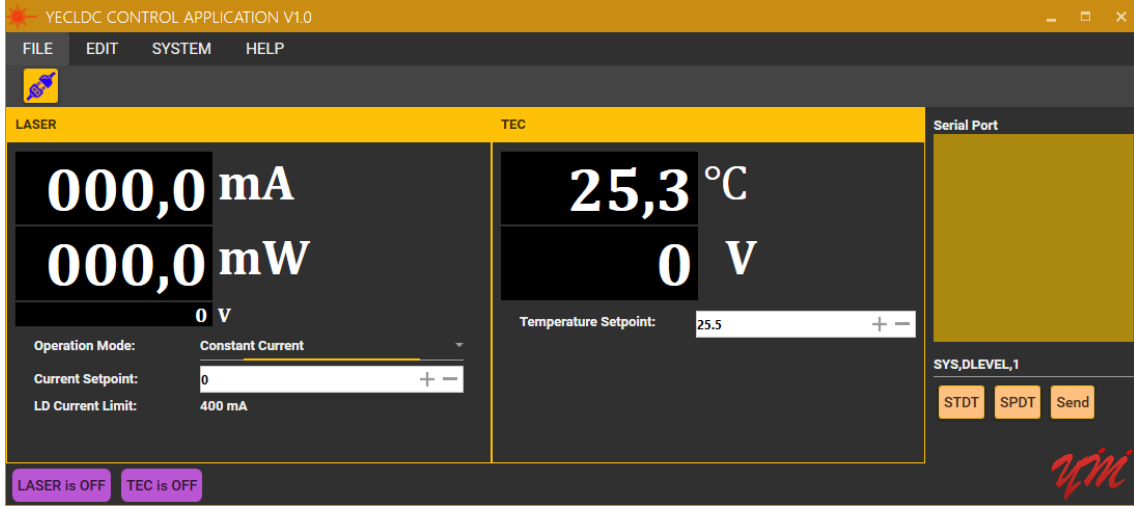


Resim 4.1 Tasarlanan Kompakt EKFY

EKFY pratik olarak kurularak, tüm fiber optik komponentlerin ekleri fusion-splice ile yapılmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir. EKFY çalıştırılarak alınan kazanç eğrileri “Optik spektrum analizörü ile kazanç ve gürültü şekli ölçümleri” başlığı altında verilmiştir.

4.3. EKFY'nin Bilgisayar Kontrolünün Yapılması

EKFY'nin bilgisayardan kontrolü için gerçekleştirilen arayüz Resim 4.1'de görülmektedir.



Resim 4.2. EKFY'nin kontrol arayüzü

EKFY için yapılan bu arayüz ile EKFY'nin kontrol edilebilen parametreleri bilgisayar üzerinden seri port kanalından kontrol edilebilmektedir. Yapılan bu arayüz sayesinde gömülü sisteme eklenen basit komutlar ile EKFY herhangi bir başka 3. parti yazılım tarafından sisteme dahil edilip kontrol edilebilmesini mümkün kılmıştır. Bu sayede Ar-Ge laboratuvarlarında kullanılması tercih sebebi olacaktır.

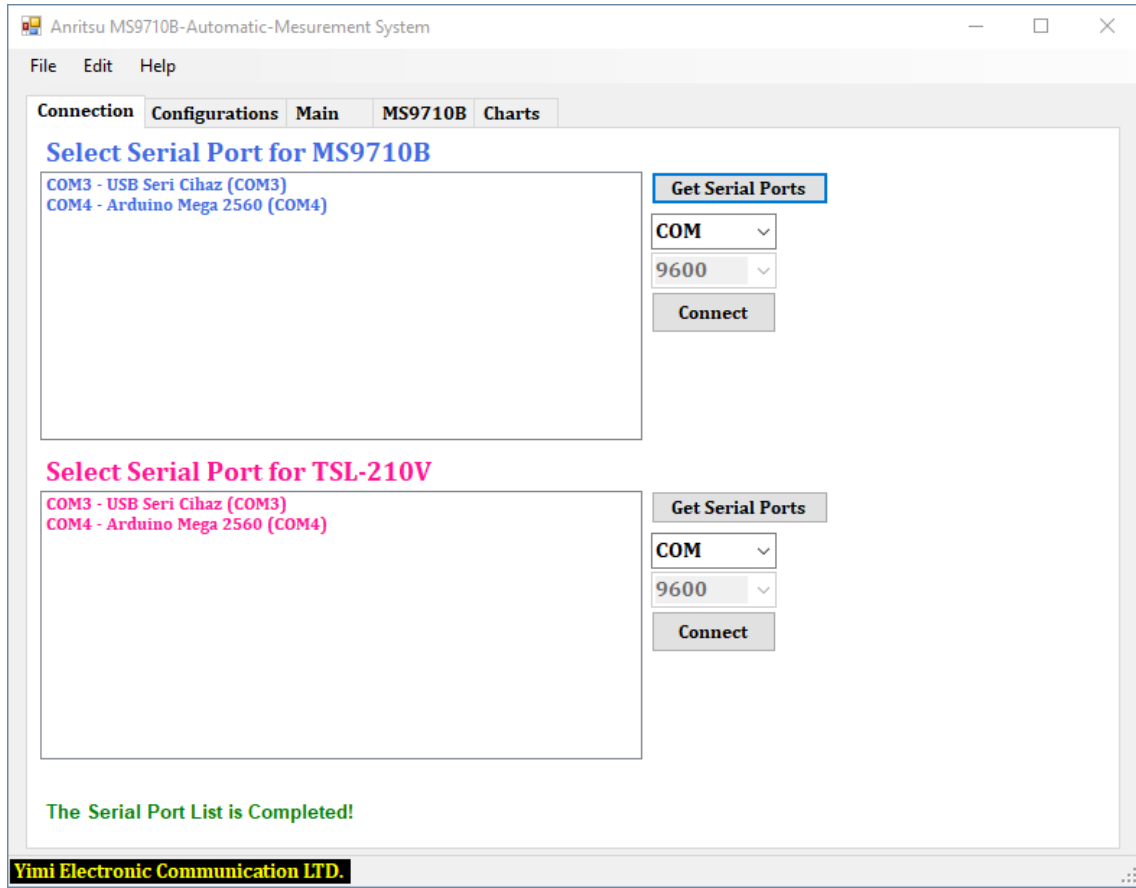
4.4. Optik Spektrum Analizörü İle Kazanç Ve Gürültü Şekli Ölçümleri

Oluşturulan yüksek kazançlı EKFY'nin optik spektrum analizörü ile kazanç ve gürültü ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler 1525-1569 nm dalga boyları arasında -40 dBm, -30 dBm, -20 dBm, -10 dBm ve 0 dBm güç girişleri için ayrı ayrı EKFY çıkış gücü ölçülerek kazançlar hesaplanmıştır.

Ölçümler Anritsu firmasının MS9710B modeli ile yapılmıştır. Yapılan bu kazanç ölçümlerinde 92 adet çıkış gücü verisi alınıp kazançlar hesaplanmıştır. Fakat MS97010B'nin okuduğu çıkış gücündeki sürekli oluşan dalgalanmalardan dolayı normal olarak monitöründen bakılıp veri alınmasının çok sağlıklı bir ölçüm olmayacağı anlaşılmıştır. Aynı şekilde farklı güç girişlerindeki farklı dalga boylarının ölçülmesi için ayarlanabilir lazer kaynağı da sıradaki dalga boyuna göre ayarlanmalıdır. Ayrıca bu kadar çok verinin alınıp bilgisayara girilmesi de büyük zaman alacaktır. Bu sebeplerden dolayı MS9710B ve TSL-210V'nin seri port haberleşme altyapıları kullanılarak .NET ortamında bir arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen arayüz ile başlangıç ve bitiş dalga boyları ve başlangıç-bitiş

güçleri girildikten sonra ölçüm alma işlemi başlatılıp sonuçlar tek seferde alınabilmektedir.

Gerçekleştirilen EKFY için alınacak ölçümler, Resim 4.3'te görülen .NET ortamında geliştirilen arayüze ait ekran alıntılarıdır. EKFY'nin otomatik çıkış gücü kontrolü modunda iken pompa lazer akımının değişimini ve EKFY'nin çıkış gücünün salınımlarını izleyip kayıt altına alınabilmesi için bu arayüz geliştirilmiştir. Resim 4.3'de görülen arayüzün ilk sekmesi bağlantı sekmesi olup cihazların port seçimlerinin yapıldığı yerdir. Bu sekmede seri portlar listelenip OSA ve TLS için ayrı ayrı port seçimi yapıp bağlantı başlatılmaktadır.

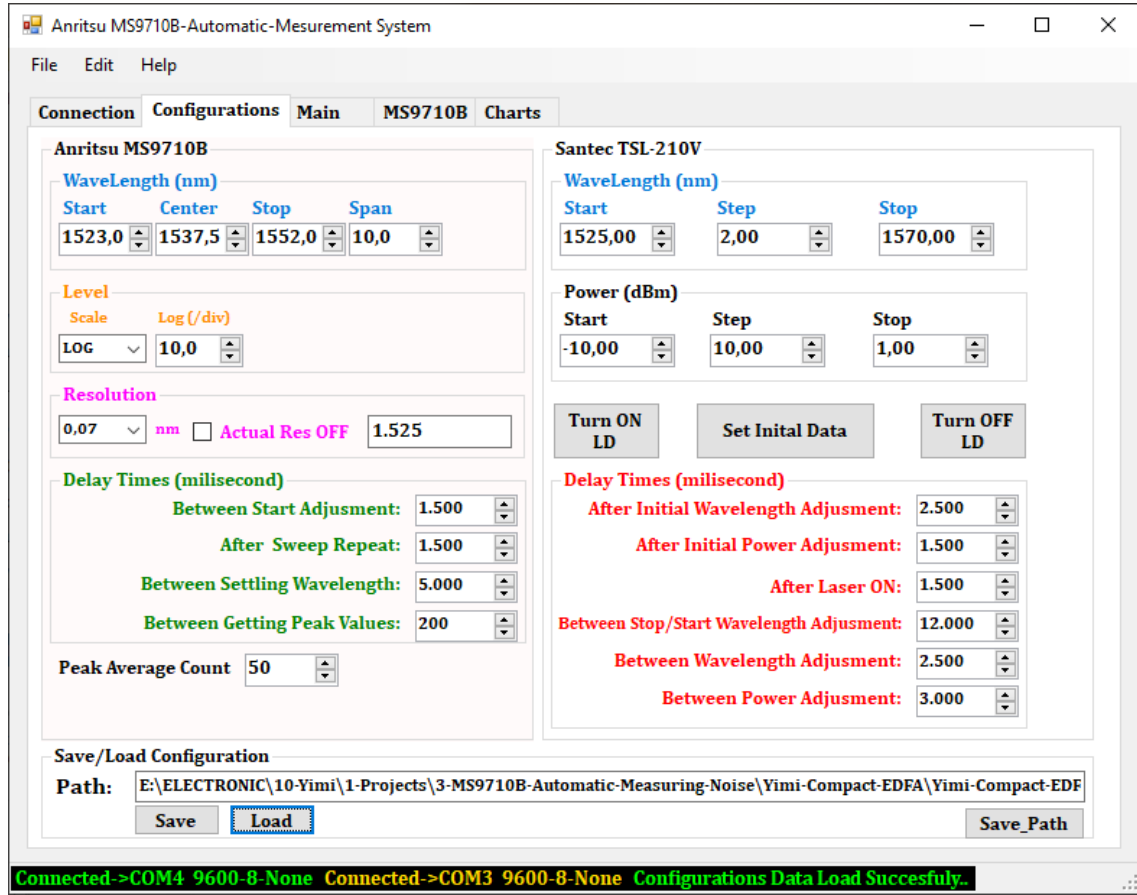


Resim 4.3. Bağlantı sekmesi (port seçme)

Resim 4.4'teki konfigürasyon sekmesi 2'ye bölünmüş olup OSA ve TLS için ayrı parametreler mevcuttur. Ölçüm işleminin bütün ayarları bu sekmeden yapılabilmektedir.

Anritsu MS9710B'nin ayarlarında başlangıç, merkez, bitiş ve span ayarları mevcuttur. Buradaki kritik parametreler bekleme zamanları ve ortalama alınacak tepe noktası sayısıdır.

Tasarlanan arayüz sayesinde dalgalanan tepe gücü ölçümünde “Peak Average Count” kısmına istenilen sayı girilerek ortalamaya dahil edilecek tepe gücü sayısı belirlenebilmektedir.



Resim 4.4. Konfigürasyon sekmesi

Santec TSL-210V kısmında başlangıç dalga boyu, bitiş dalga boyu ve adım aralığı belirlenmektedir. Bir alt kısmında güç değerlerinin başlangıç, bitiş ve kaçır adımlarla artırılacağı belirlenmektedir. Burada da yine kritik olan ayarlar bekleme zamanları olmaktadır.

Bekleme zamanlarının bu kadar kritik olmasının nedeni iki cihazın da herhangi bir parametresinin değişiminde belirli bir oturma zamanının olmasıdır. Bu oturma zamanları ölçümlerin doğru olabilmesi için beklenen sürelerdir. En önemli bekleme süresi ise bitiş dalga boyundan sonra yeni başlangıç dalga boyuna geçişteki süredir. Ayarlanabilir lazerin dalga boyunun değişiminin oturması için yaklaşık 12 saniyelik bir zaman geçmesi gerekmektedir.

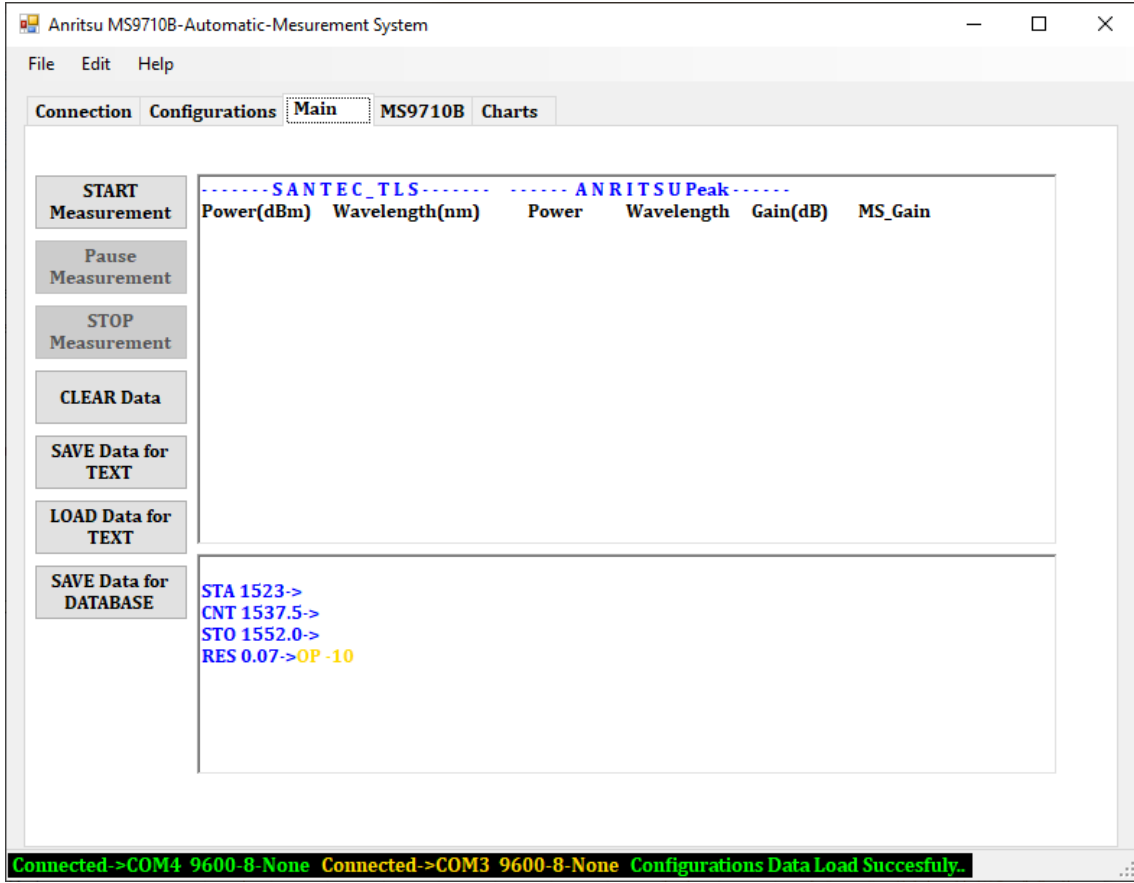
OSA için de en kritik bekleme zamanı, ayarlanabilir lazerin dalga boyu değişiminden sonra OSA'nın tarama yapacağı başlangıç ve bitiş dalga boyu parametrelerinin ayarlanıp tepe yaptığı noktayı bulması için geçen süredir.

Yapılan ölçümler sırasında fark edilen en önemli nokta bu iki kritik zaman gecikmesi olmuştur. Ayrıca verilerin normal EKFY kazanç grafiklerindeki gibi çıkması için OSA'nın span değerinin ikinci önemli kriter olduğu anlaşılmıştır. Alınan ölçümler ayarlanan lazer dalga boyunun 2 nm üstü ve 2 nm altı olacak şekilde her dalga boyu için program tarafından otomatik olarak ayarlanarak aynı span aralığında alınmıştır.



Resim 4.5. Konfigürasyon kaydet/yükle bölümü

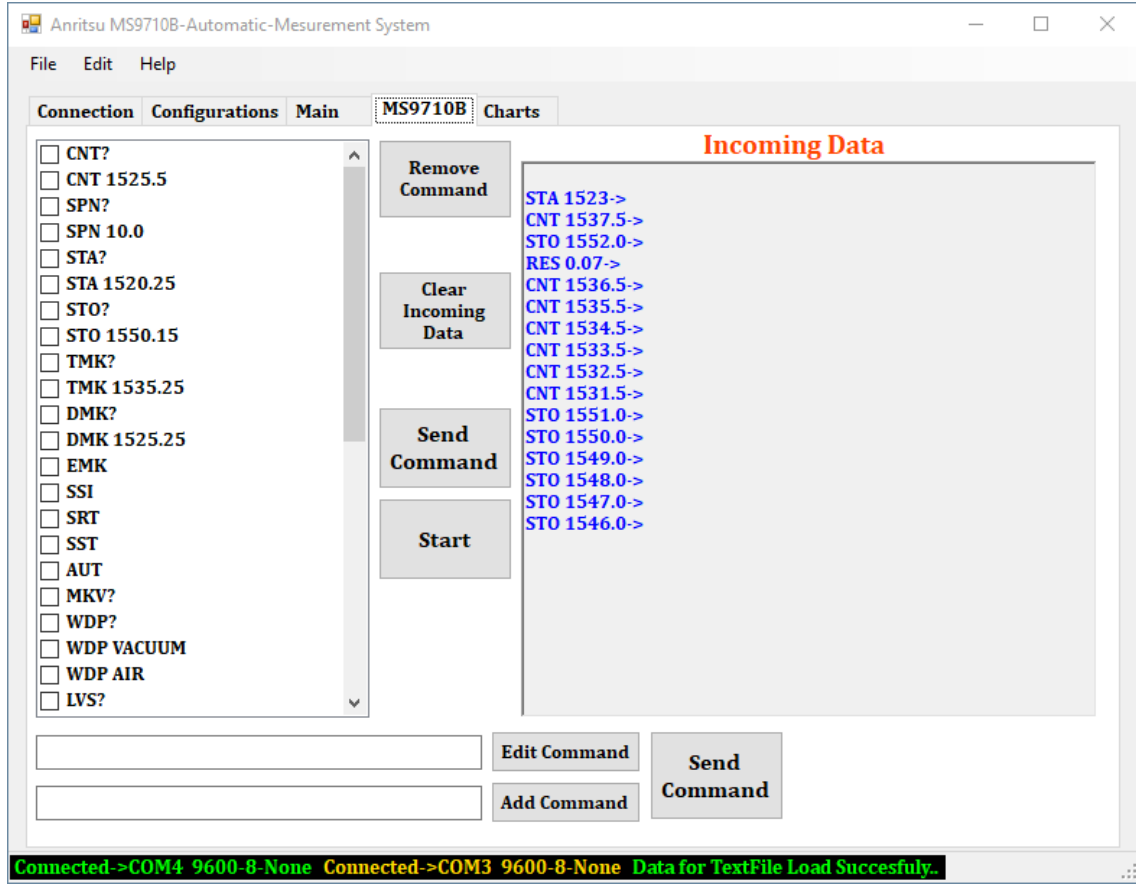
Konfigürasyon sekmesinde ek olarak farklı deneyler için farklı ayarlar yapılabileceğinden konfigürasyon ayarlarını kaydedebilmek için sekmenin aşağı kısmına kaydet-yükle özelliği daha sonraki deneylerde aynı ayarlar kullanılmak üzere saklanabilmektedir.(Resim 4.5)



Resim 4.6. Ana program sekmesinin görünümü

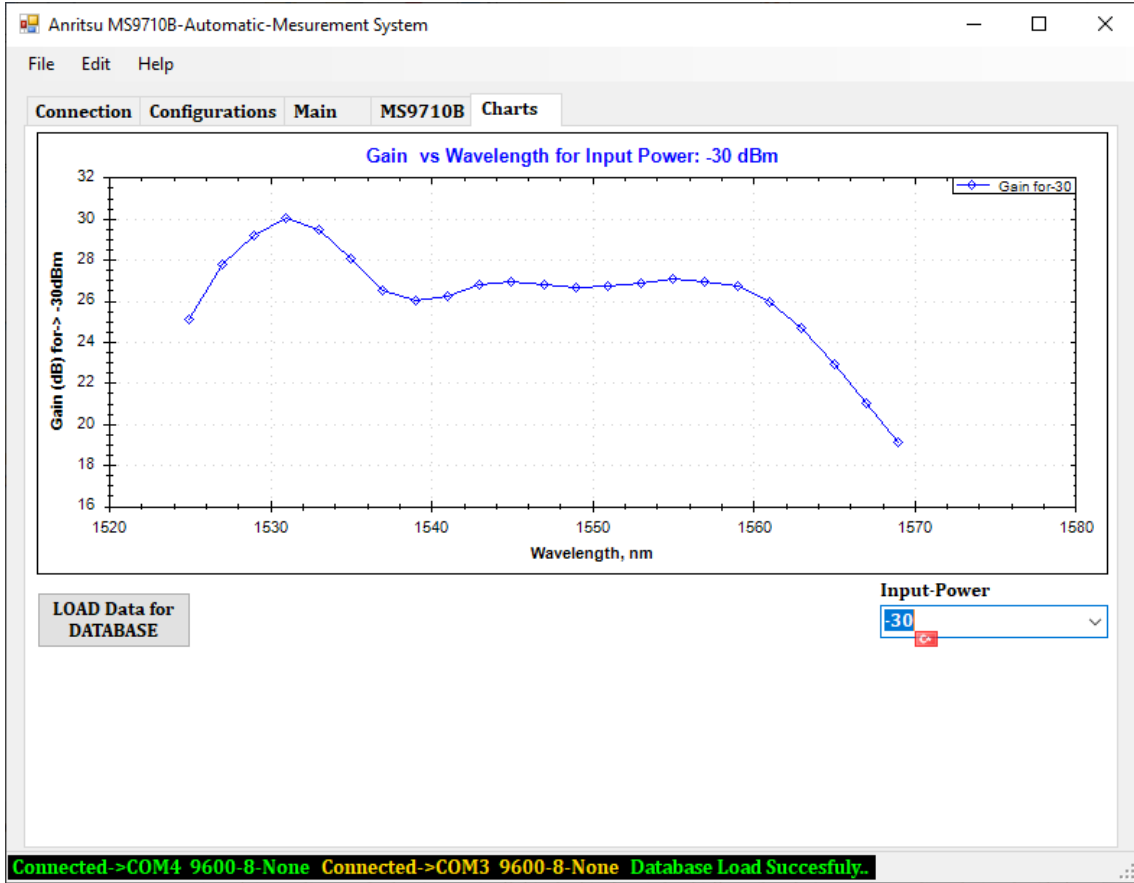
Resim 4.4'teki sekmede ayarlanan parametrelere göre ölçüm alma işlemleri başlatılıp, duraklatılabilir ya da durdurulabilir. Ayrıca bu sekmede alınan veriler metin olarak kaydedilebilir ya da "Charts" sekmesinde bulunan grafik arayüzünde verilerin daha sonradan incelenebilmesi için saklanabilir.

Resim 4.7'deki sekme OSA için hata ayıklama veya diğer özelliklerini kullanabilmek için bulunan komutları barındıran ve aradaki iletişimin izlenebileceği sekmedir.



Resim 4.7. MS9710B hata ayıklama sekmesi

Resim 4.8'deki sekme alınan verilerin anlık grafik şeklinde ön izlenebilmesi için eklenmiştir.



Resim 4.8. Ölçümlerin alındığı sırada verileri grafik olarak izleme sekmesi

4.5. Düz Kazanç İçin Boy Optimizasyonu ve Kazanç Ölçümleri

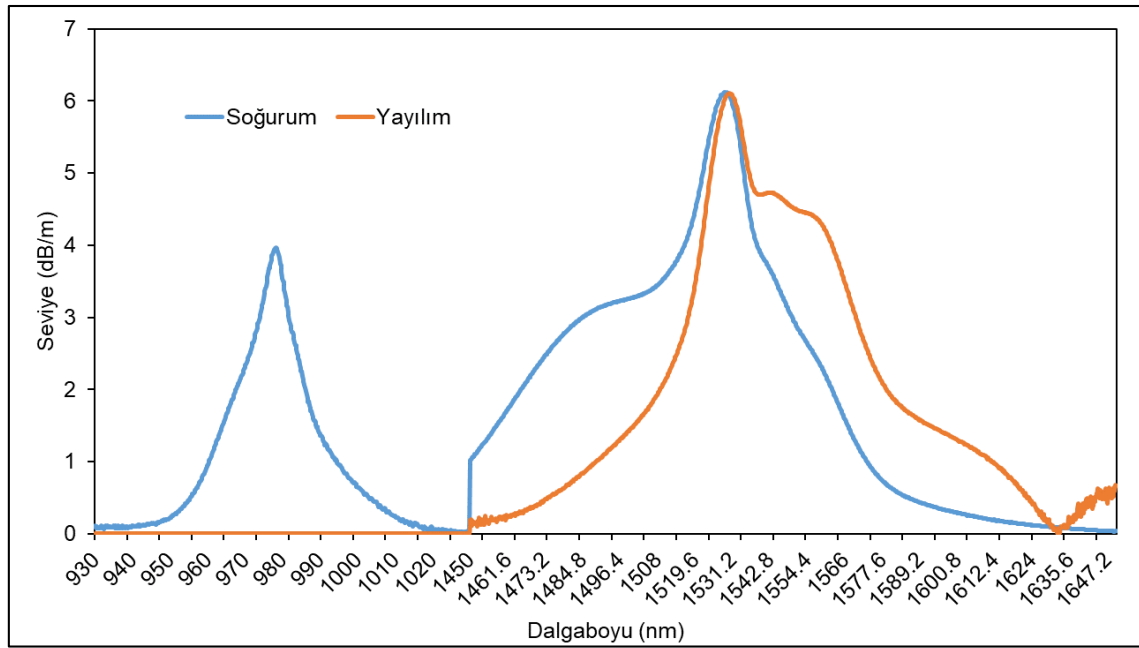
Kompakt EKFY yapılırken içinde kullanılan EKF'nin boyu OptiAmplifier 4.0 yazılımı kullanılarak en düşük kazanç salınımı elde edilebilecek şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede EKFY pasif olarak ta kazanç düzeltirmesi yapabilmektedir.

4.5.1. Simülasyon

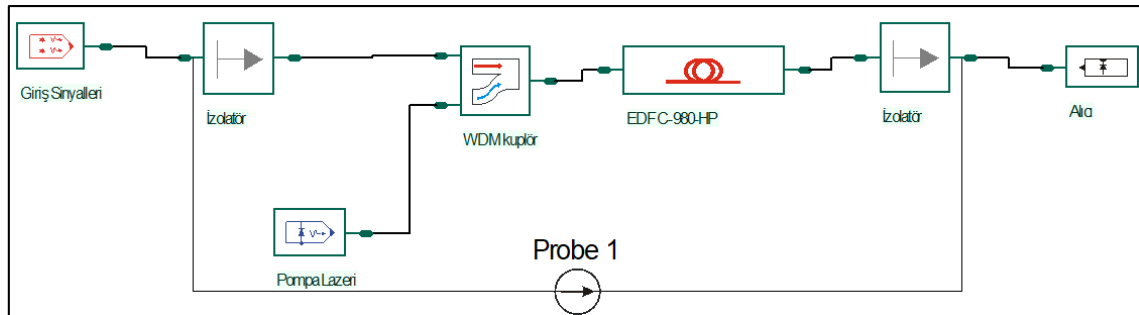
Simülasyon yazılımına, EDFC-980-HP erbiyum katkılı fiberin cross-section verileri “.dat” dosyası olarak tanıtılmış ve fiberin kritik parametreleri girilmiştir. Yazılımda kullanılan parametreler Çizelge 4.1’de görülmektedir. Kullanılan fiberin soğurum ve yayılım cross-section grafiği Şekil 4.2’de görülmektedir. Simülasyon devresi ise Şekil 4.3’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Kullanılan EKF'nin parametreleri

Parametreler	EDFC-980-HP
Nümerik açıklık	0,23
İyon ömrü (ms)	10
Soğurma (980 nm)(dB/m)	9
Öz yarıçapı (μm)	1,55
Erbiyum yarıçapı (μm)	1,45
İyon yoğunluğu	$5\text{e}+024 \text{ m}^{-3}$



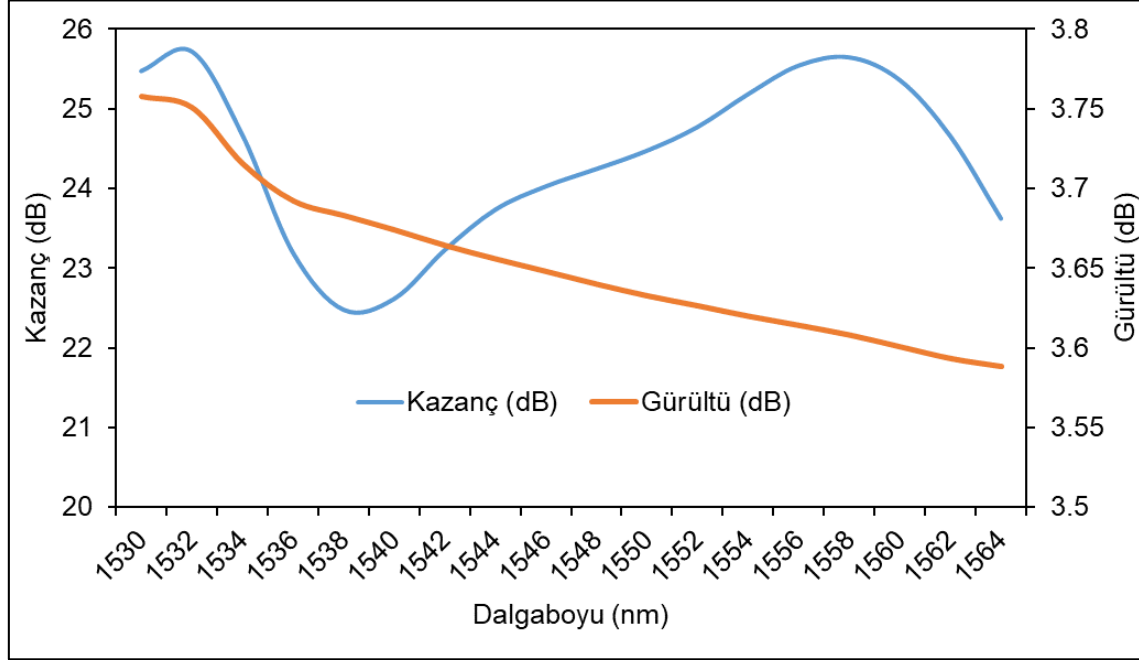
Şekil 4.2. EKF'nin soğurma ve yayılım kesit alanı grafiği



Şekil 4.3. Simülasyon düzeneği

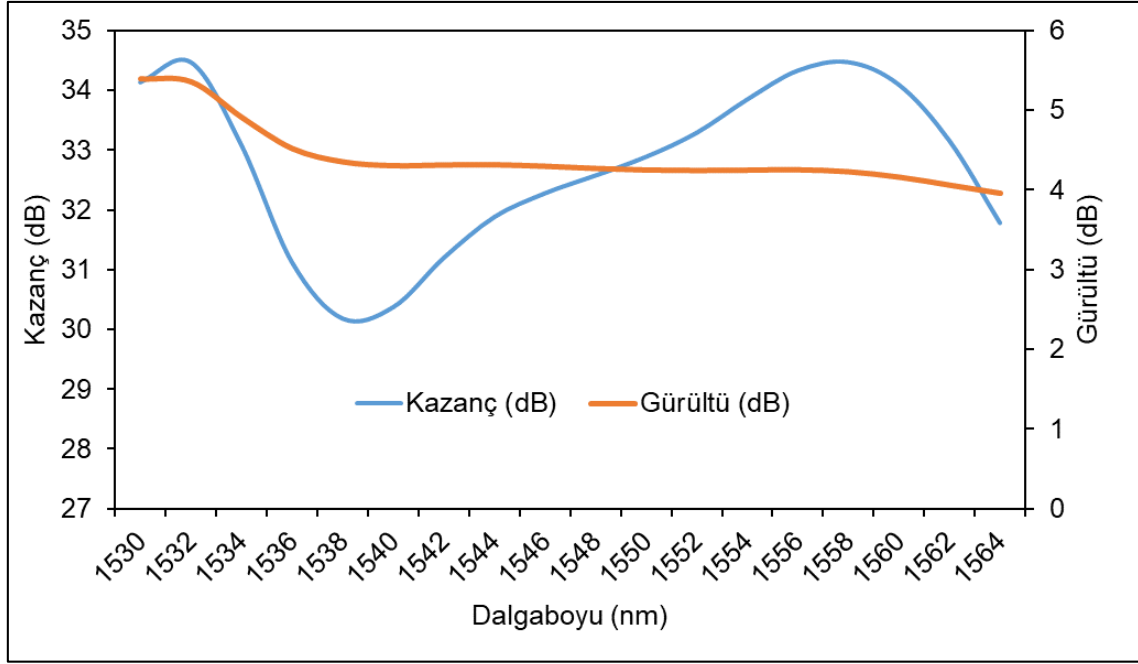
Simülasyon düzeneğinde C bant (1530-1564 nm) sinyaller kullanılmıştır. Pompa lazeri olarak, daha düşük gürültü faktörü elde etmek için, 980 nm dalga boyu ve 100 mW güce sahip lazer seçilmiştir. Fiber boyu ilk olarak; -20 dBm güce sahip giriş sinyalleri ve 100 mW'lık pompa lazeri için en düz çıkış kazanç spektrumunu verecek şekilde optimize edilmiş

ve 12.5 m olarak bulunmuştur. Bu değerler için elde edilen çıkış kazanç spektrumu ve gürültü faktörü grafiği Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4. -20 dBm giriş sinyal gücü için çıkış kazanç spektrumu ve gürültü faktörü

Şekil 4.4 incelendiğinde ortalama kazanç yaklaşık olarak 25 dB olup, kazanç dalgalanması 3.24 dB’dir. Gürültü ise ortalama olarak 3.75 dB’dir.

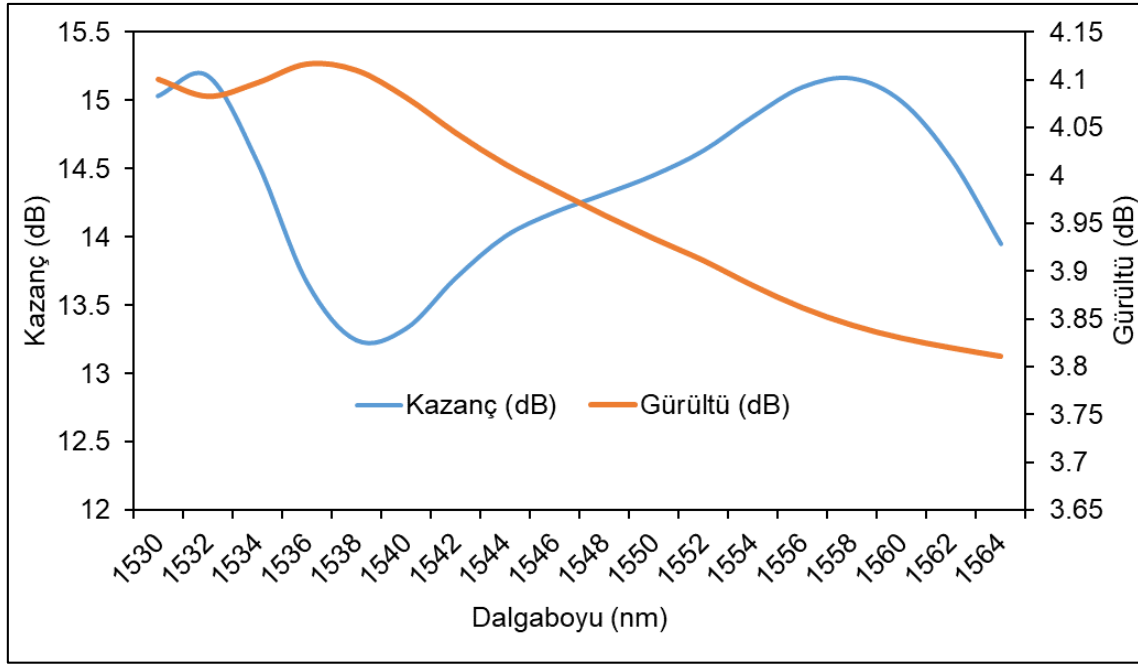


Şekil 4.5. -30 dBm giriş sinyal gücü için çıkış kazanç spektrumu ve gürültü faktörü

Aynı düzeneğe giriş sinyal gücü -30 dBm'e düşürüldüğünde Şekil 4.5'teki sonuçlar alınmıştır.

Fiber boyu 16.8 m olarak optimize edilmiştir. Ortalama güç 34.5 dB ve gürültü 5.38 dB'dir. Kazanç dalgalanması ise 4.29 dB olarak optimize edilmiştir.

Şekil 4.6'da -10 dBm'lik giriş sinyal gücü için yapılan simülasyon sonuçlarında ise fiber boyu 7.5 m olarak bulunmuştur. Ortalama güç 15 dB ve gürültü 4.1 dB'dir. Kazanç dalgalanması ise 1.93 dB olarak optimize edilmiştir.

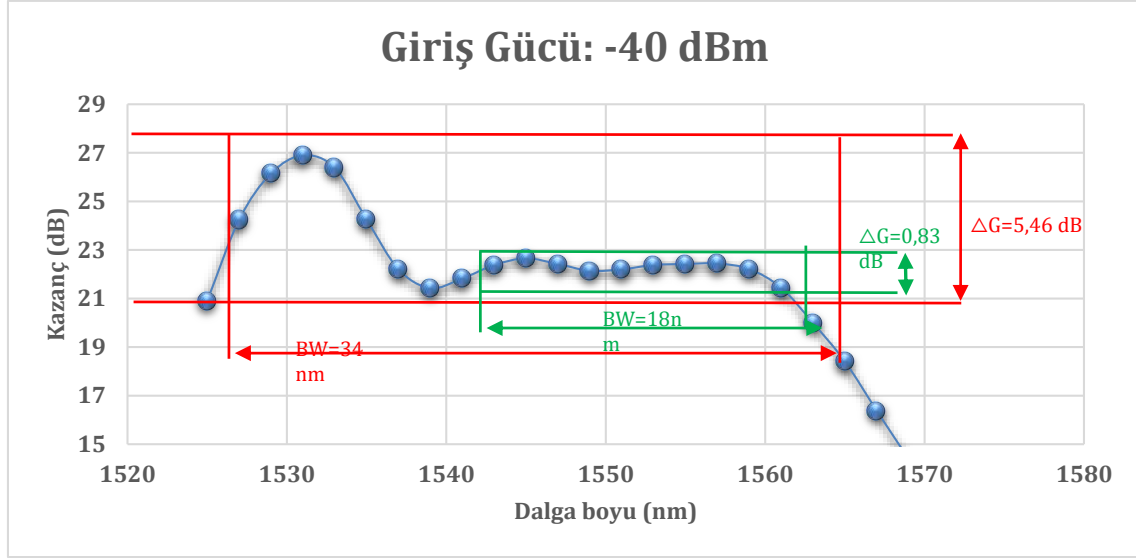


Şekil 4.6. -10 dBm giriş sinyal gücü için çıkış kazanç spektrumu ve gürültü faktörü

Yapılan simülasyonlar, giriş sinyal gücü düştükçe fiber boyunun yükseldiğini göstermiştir. Ancak pratikte EKFY'lerin girişine uygulanan güç değerleri değişiklik göstereceği için EKF boyunun değiştirilmesi mümkün olmayacaktır. Bu nedenle deneysel kurulumda en yaygın giriş sinyal gücü olarak kullanılan -20 dBm için deneysel kurulum gerçekleştirilmiştir.

4.5.2. Deney sonuçları

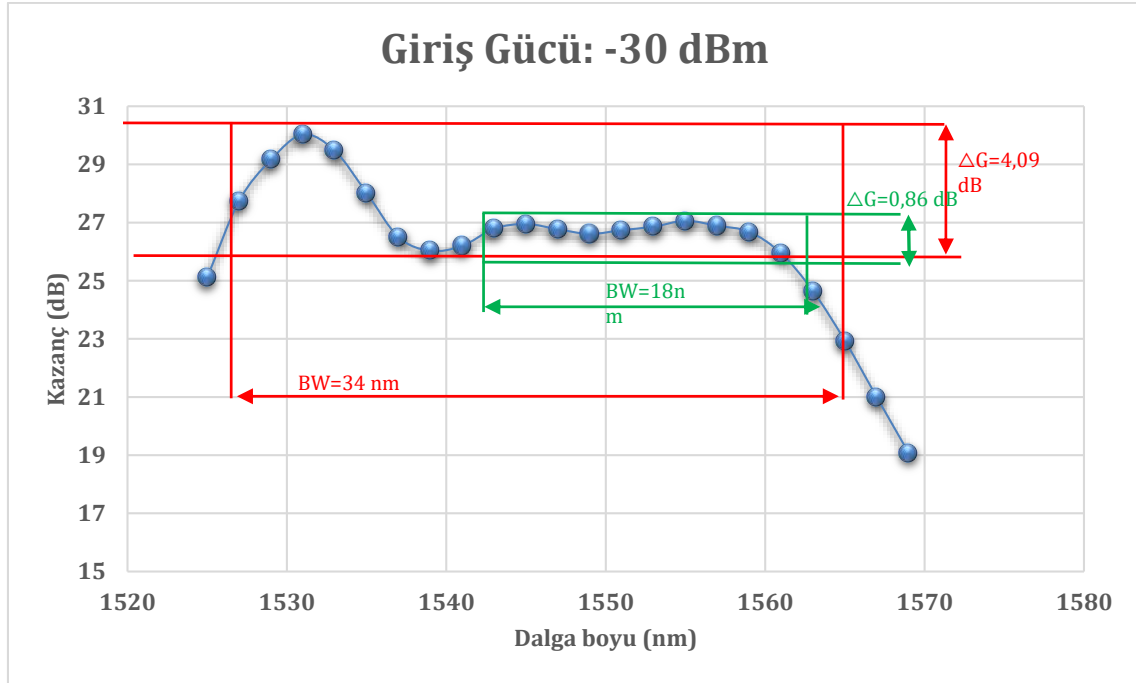
Şekil 4.3'te görülen düzenek deneysel olarak kurulmuştur. Giriş sinyalleri Santec TSL-210V ayarlanabilir lazer kaynağı ile uygulanmıştır. EKF uzunluğu 12,5 m seçilmiştir. 977 nm pompa lazeri pompa akımı 150 mA (100 mW) sabit akım modunda iken kullanılmıştır. Tüm ekler füzyon ek olarak yapılmıştır. Alıcı olarak Anritsu 9710B optik spektrum analizörü kullanılmıştır. Şekil 4.7- Şekil 4.11'de sırasıyla -40 dBm den 0 dBm'e kadar giriş sinyal güçleri için çıkış kazanç spektrumları görülmektedir. Şekiller üzerinde maksimum kazanç dalgalanması ve yaklaşık 1 dB dalgalanma için düz kazanç bölgeleri belirlenmiştir. Şekil 4.7 için 18 nm'lik bir bölgede 0.83 dB'lik bir dalgalanma elde edilmiştir.



Şekil 4.7. -40 dBm giriş gücü için kazanç grafiği

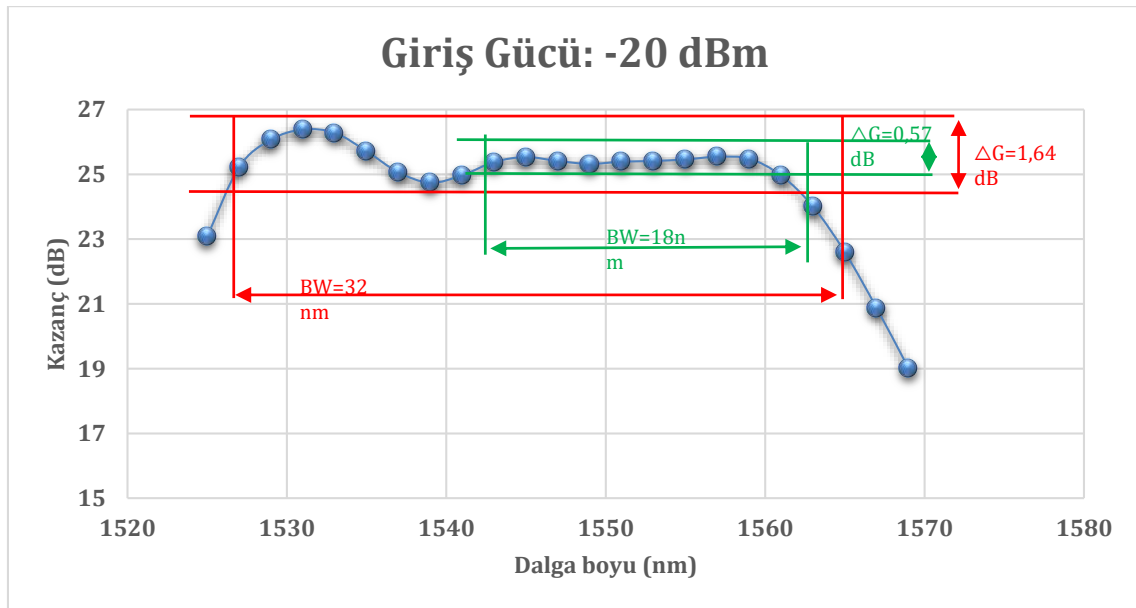
Şekil 4.8 için benzer şekilde 18 nm'lik bir bölgede 0.83 dB'lik bir dalgalanma elde edilmiştir. Ancak iki şekil karşılaştırıldığında maksimum dalgalanmanın 5.46 dB'den 4.09 dB'ye düştüğü görülmektedir.

Şekil 4.9'da -20 dBm'lik giriş sinyalleri için elde edilen çıkış kazanç spektrumu görülmektedir. Bu spektrumdan görüleceği üzere 32 nm'lik bir bant genişliği için 1.64 dB kazanç dalgalanması elde edilirken, 18 nm'lik bant genişliği için bu değer 0.57 dB'ye düşmüştür.

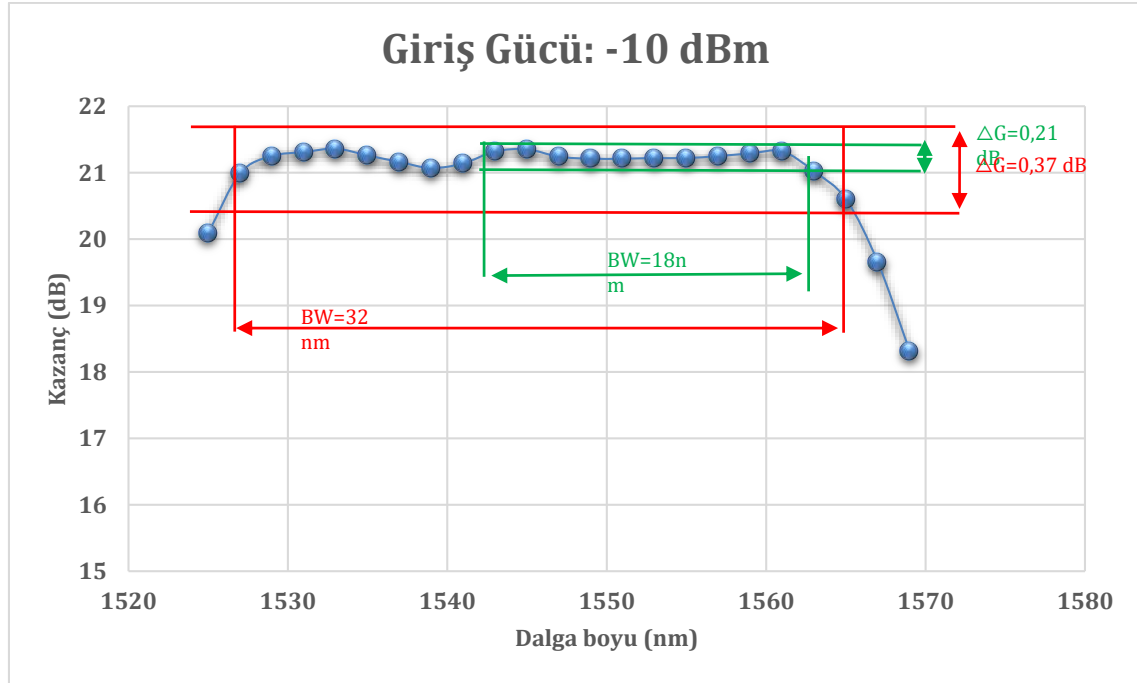


Şekil 4.8. -30 dBm giriş gücü için kazanç grafiği

Şekil 4.10'da ise -10 dBm'lik giriş sinyalleri için elde edilen çıkış kazanç spektrumu görülmektedir. Spektrum incelendiğinde 32 nm'lik bir bant genişliği için 0.37 dB kazanç dalgalanması elde edilirken, 18 nm'lik bant genişliği için bu değer 0.21 dB'ye düşmüştür.

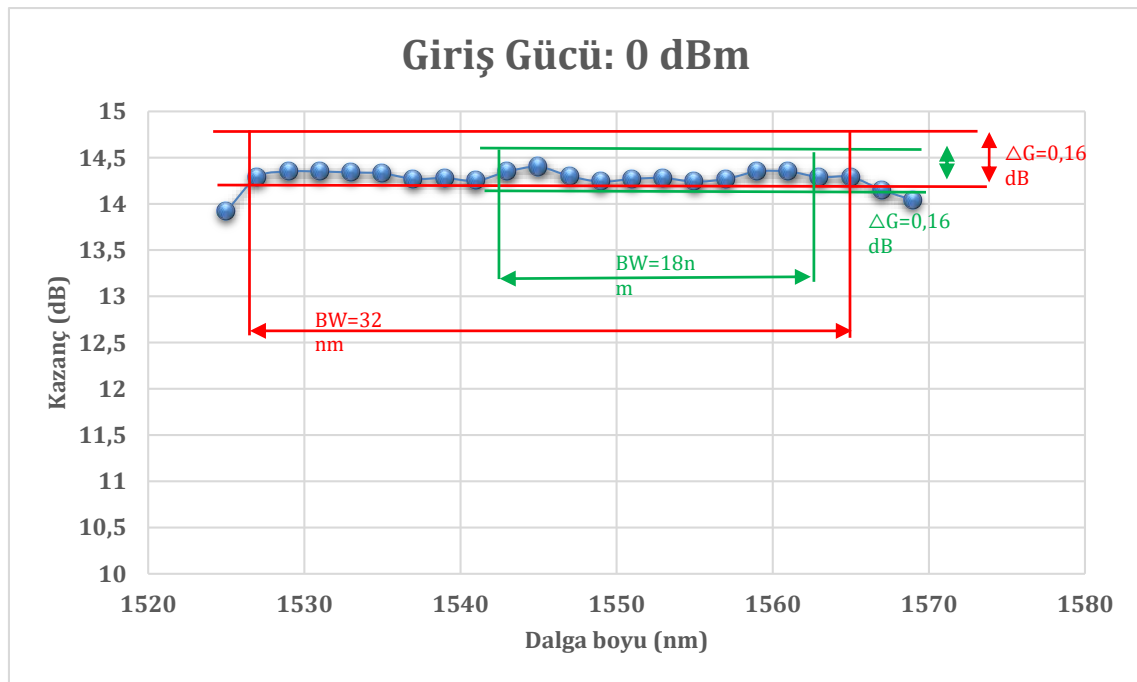


Şekil 4.9. -20 dBm giriş gücü için kazanç grafiği

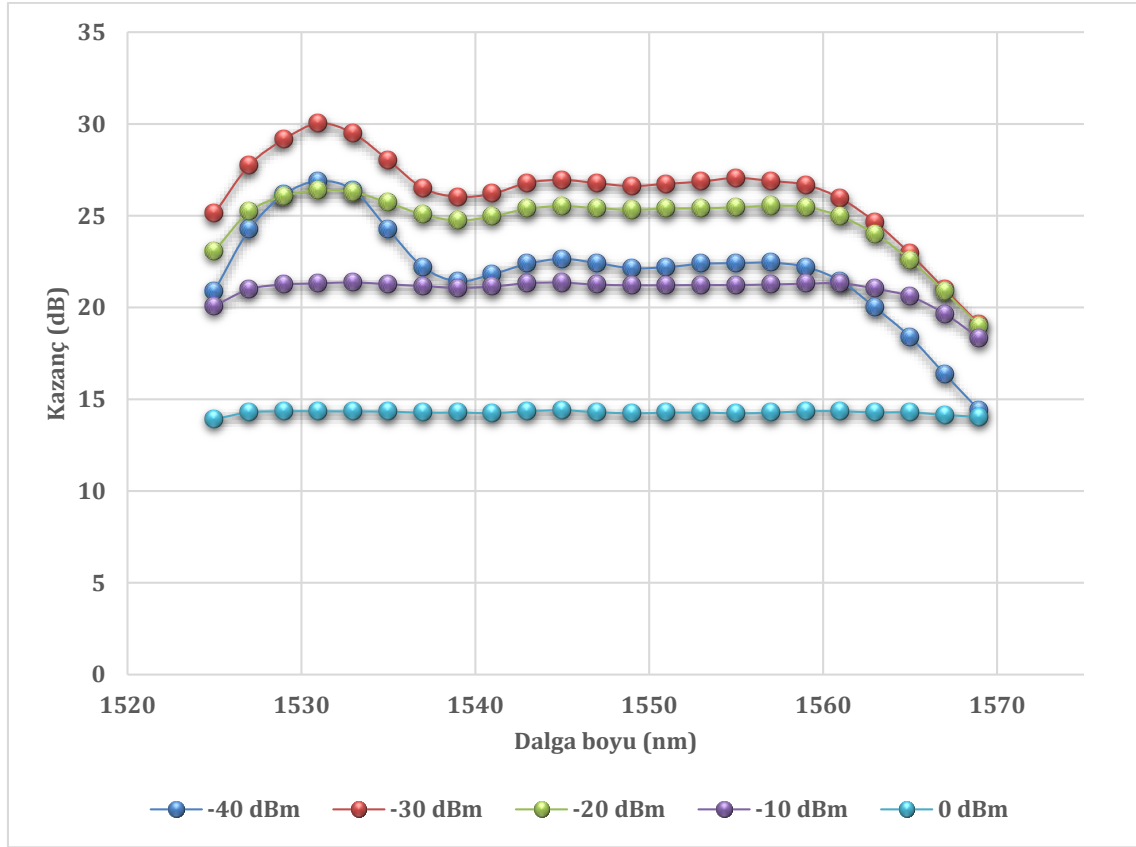


Şekil 4.10. -10 dBm giriş gücü için kazanç grafiği

Şekil 4.11’de ise 0 dBm’lik giriş sinyalleri için elde edilen çıkış kazanç spektrumu görülmektedir. Kazanç spektrumu analiz edildiğinde 32 nm’lik bir bant genişliği için 0.16 dB kazanç dalgalanması elde edilirken, 18 nm’lik bant genişliği için bu değer yine 0.16 dB olup tüm bantta düz bir kazanç elde edilmiştir.,



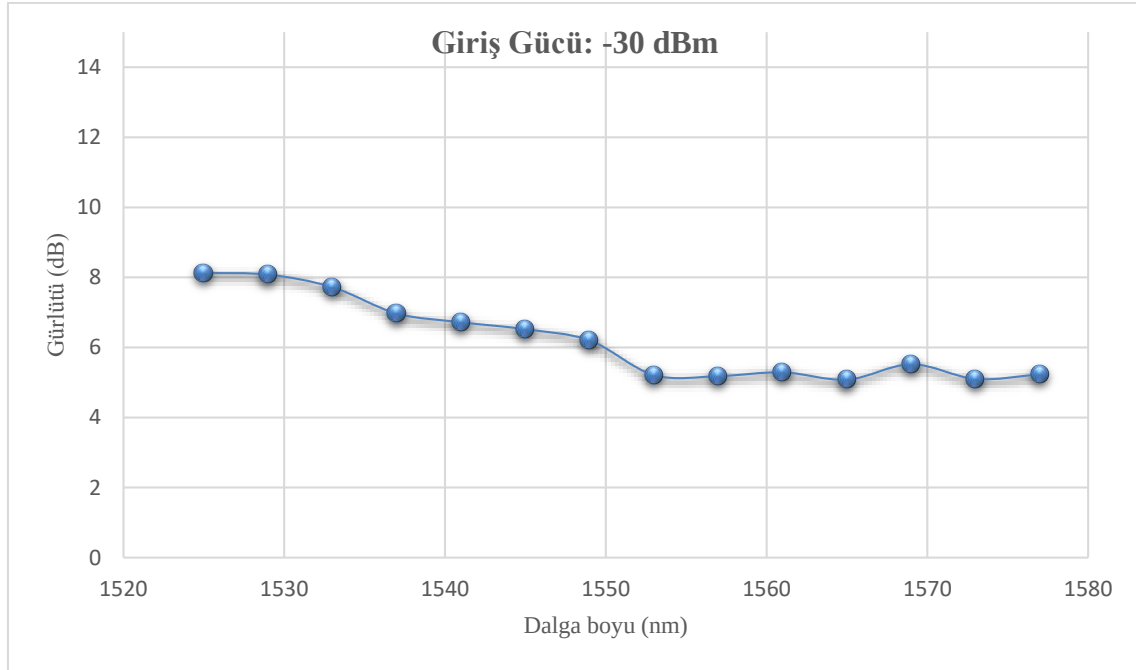
Şekil 4.11. 0 dBm giriş gücü için kazanç grafiği



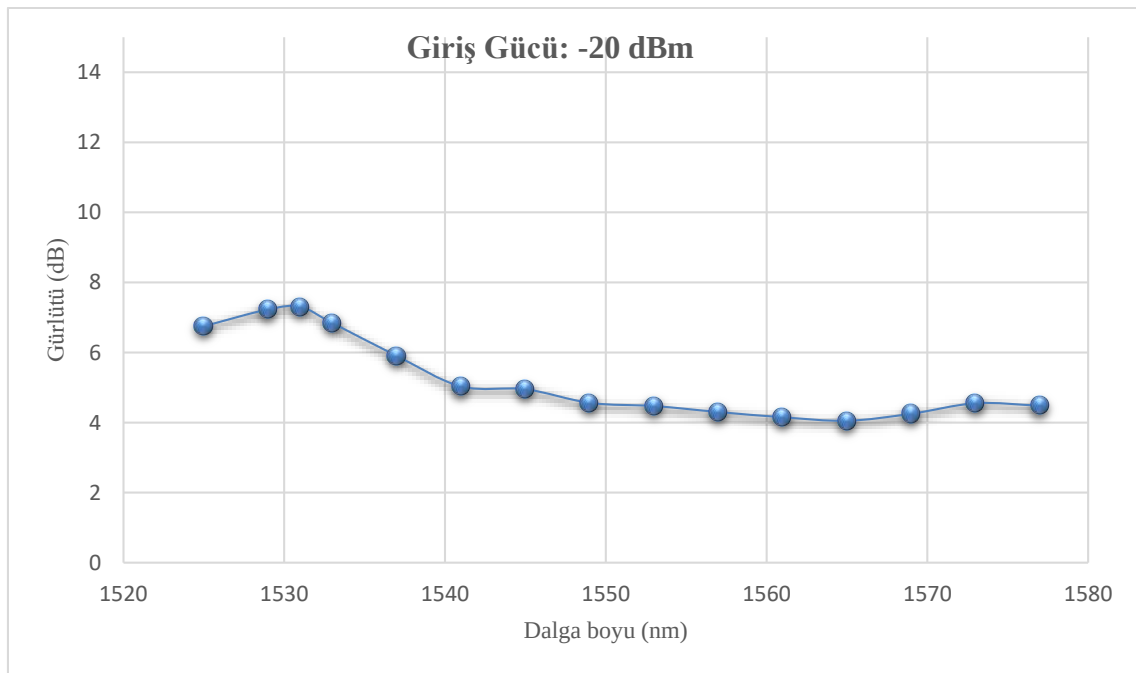
Şekil 4.12. Karşılaştırmalı kazanç grafiği

4.6. Gürültü Ölçümleri

Anritsu MS9710B OSA modeli ile yapılan gürültü ölçümleri aşağıda verilmiştir. Şekil 4.13'te -30 dBm giriş gücü için verilen gürültü ortalamasının Şekil 4.14'te verilen -20 dBm giriş gücü için ölçümlenen gürültü ortalamasından daha fazla olduğu gözükmemektedir.



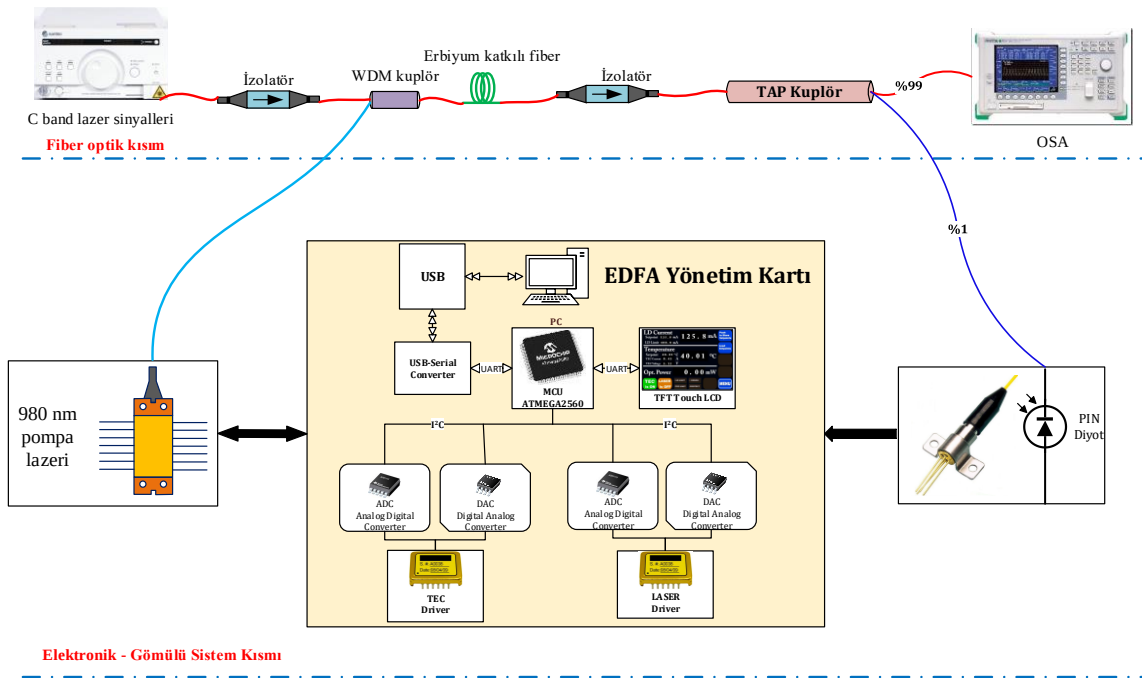
Şekil 4.13. -30 dBm giriş gücü için gürültü grafiği



Şekil 4.14. -20 dBm giriş gücü için gürültü grafiği

5. OTOMATİK KAZANÇ KONTROL SİSTEMİ

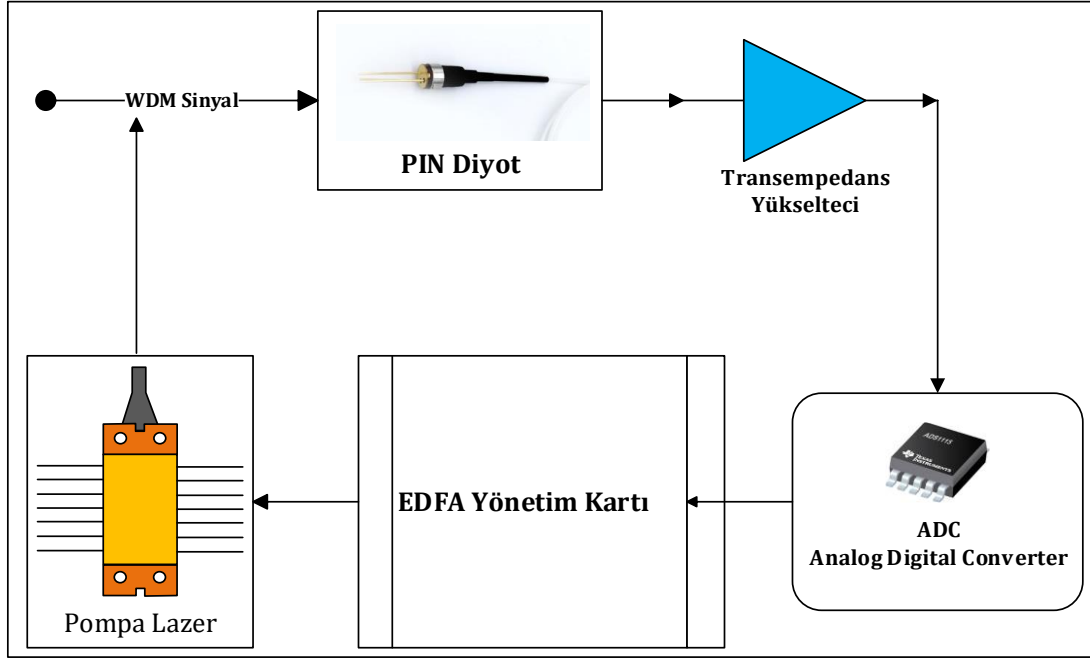
Şekil 5.1’de gerçekleştirilen otomatik kazanç kontrolü yapabilen kompakt EKFY sistemi görülmektedir. Bu sistemde kullanılan TAP kuplör sayesinde sinyalin %1’lik kısmı ile çıkış gücü bilgisi alınarak, sistemin sabit çıkış gücü hedefi ile kazancı değiştirmek için lazer akımı kontrol edilmektedir. Bölüm “4.5. Düz kazanç için pompa gücü optimizasyonu” başlığında anlatılan kontrol yöntemleri ile EKFY, düz kazanç yani sabit kazanç modunda çalıştırılabilmektedir. Çıkış gücü gibi diğer parametrelerinde kontrol edilebildiği ayarlar dokunmatik LCD ekrandan ya da aynı şekilde bilgisayardan kontrol için geliştirilmiş olan arayüzden de kontrol edilerek çıkış gücü optimize edilebilmektedir.



Şekil 5.1. Otomatik kazanç kontrolü yapabilen kompakt EKFY blok diyagramı

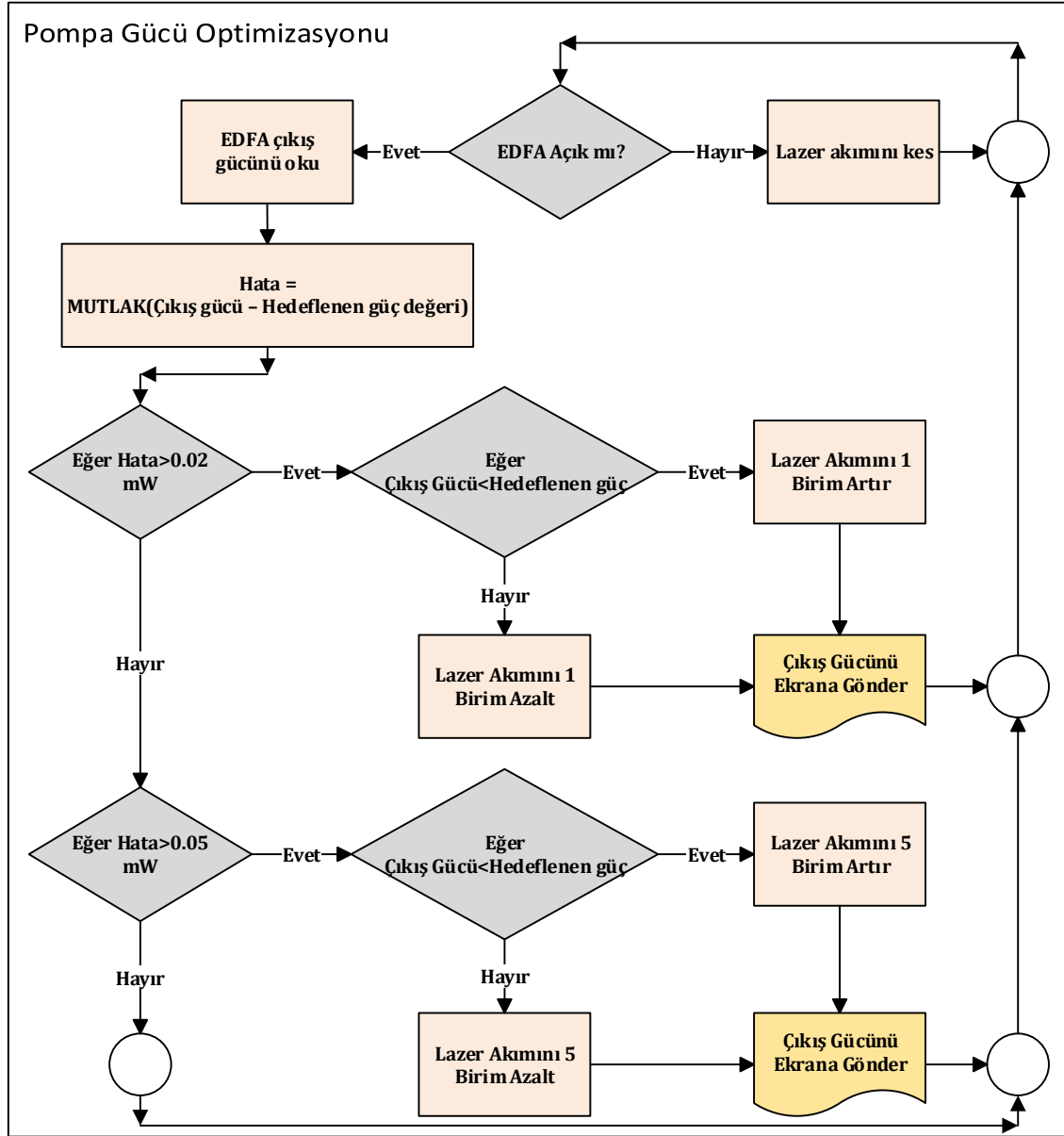
5.1. Düz Kazanç İçin Pompa Gücü Optimizasyonu

Kurulan EKFY’nin çıkışına yine fusion-splice ile eklenen tap kuplör ile çıkış sinyali %99 - %1 oran ile ayrılmış olup %1’lik sinyal InGaAs PIN diyotun girişine uygulanmıştır. PIN diyota giren optik gücü, transempedans yükseltici kullanarak gerilime dönüştürülen optik sinyal 16 bitlik yüksek çözünürlüklü ADC’ye uygulanmıştır. Yönetim kartına aktarılan optik çıkış gücü bilgisi gömülü sistem içerisinde kontrol algoritmasına girdi olarak verilip kapalı çevrim bir döngü ile pompa lazerin akımının kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 5.2. Pompa gücü optimizasyonu blok diyagramı

Pompa gücünü yani pompa lazer akımını, EKFY'nin çıkış gücüne göre kontrol eden algoritma Şekil 5.3'de akış diyagramı olarak verilmiştir. Akış diyagramından da görülebileceği gibi yönetim kartı, PIN diyot yardımı ile gerilime dönüşen EKFY çıkış gücünü okuduktan sonra sisteme girilen hedef değeri ile karşılaştırarak lazer akımını artırmak ya da azaltmak suretiyle çıkış gücünün istenen seviyeye gelmesini sağlamaktadır. Burada normal lineer kontrol yönteminden farklı olarak adaptif bir lineer kontrol göze çarpmaktadır. Adaptif lineer kontrol ile hatanın büyüklüğüne göre lazer akımını artırma ya da azaltma miktarını değiştirerek hedefe daha çabuk gitmesi sağlanmaktadır. Bu sayede anlık yüksek sapmalarda hedeflenen çıkış gücüne daha çabuk gidilerek çıkış gücü stabilizasyonu sağlanmıştır.



Şekil 5.3. Pompa gücü kontrol akış diyagramı

5.2. Pompa Gücü Optimize Edilmiş Kazanç Ölçümleri

Otomatik kazanç kontrolü modunda iken optik güç metre kullanılarak -30 dBm giriş gücü için alınan kazanç değerleri Çizelge 5.1’de ve Şekil 5.2’de verilmiştir.

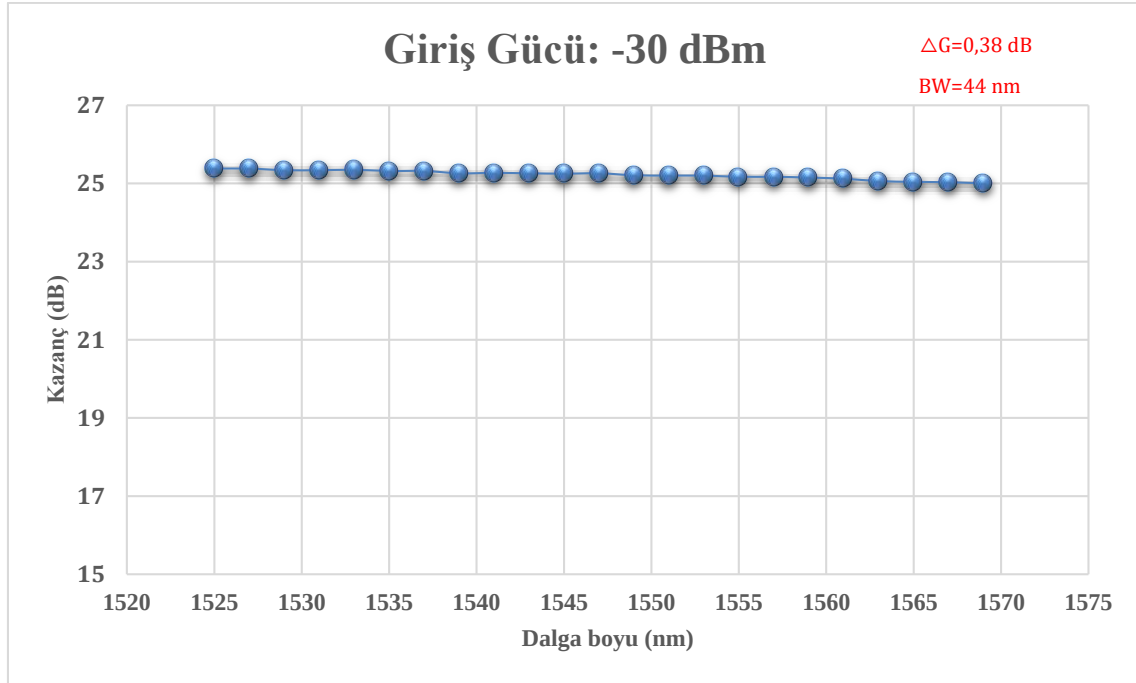
Çizelge 5.1. -30 dBm giriş gücü için otomatik kazanç modunda alınan kazanç değerleri

Giriş Gücü : -30 dBm		
Dalga boyu (nm)	Çıkış Gücü (dBm)	Gain(dB)
1525	-4,62	25,38
1527	-4,62	25,38
1529	-4,66	25,34
1531	-4,66	25,34
1533	-4,65	25,35
1535	-4,68	25,32
1537	-4,68	25,32
1539	-4,74	25,26
1541	-4,73	25,27
1543	-4,74	25,26
1545	-4,75	25,25
1547	-4,74	25,26
1549	-4,79	25,21
1551	-4,8	25,2
1553	-4,8	25,2
1555	-4,83	25,17
1557	-4,83	25,17
1559	-4,85	25,15
1561	-4,88	25,12
1563	-4,94	25,06
1565	-4,96	25,04
1567	-4,97	25,03
1569	-5,00	25,00

Alınan veriler incelendiğinde kazanç dalgalanması 0,38 dB'ye kadar düşüş göstermiştir. Fakat buradaki ölçülen çıkış gücü optik güç metre kullanılarak yapılmıştır. Bu verilere OSA ile bakılacak olursa elde edilen kazanç değeri 0,38 dB'den çok farklı olacaktır.

Bu yöntemde kullanılan PIN diyot tepe gücünü değil toplam gücü ölçtüğü için OSA dan alınan güç değerleri ile optik güç metreden okunan değerler farklılık göstermektedir. Gerçekte OSA'dan alınan verilere bakılması gerektiği için bu adım kazanç dalgalanmasını gerçek anlamda azaltmada yeterli olmamıştır.

Bu aşamada yapılan çıkarım şöyle özetlenebilir. Eğer gerçekten tepe gücüne göre ölçülen kazanç değerlerinin düz olması isteniyorsa EKFY'ye giren çıkış gücü bilgisi ya OSA'dan alınmalıdır ya da tepe gücü ölçebilecek başka bir komponent ya da cihaz gerekmektedir.



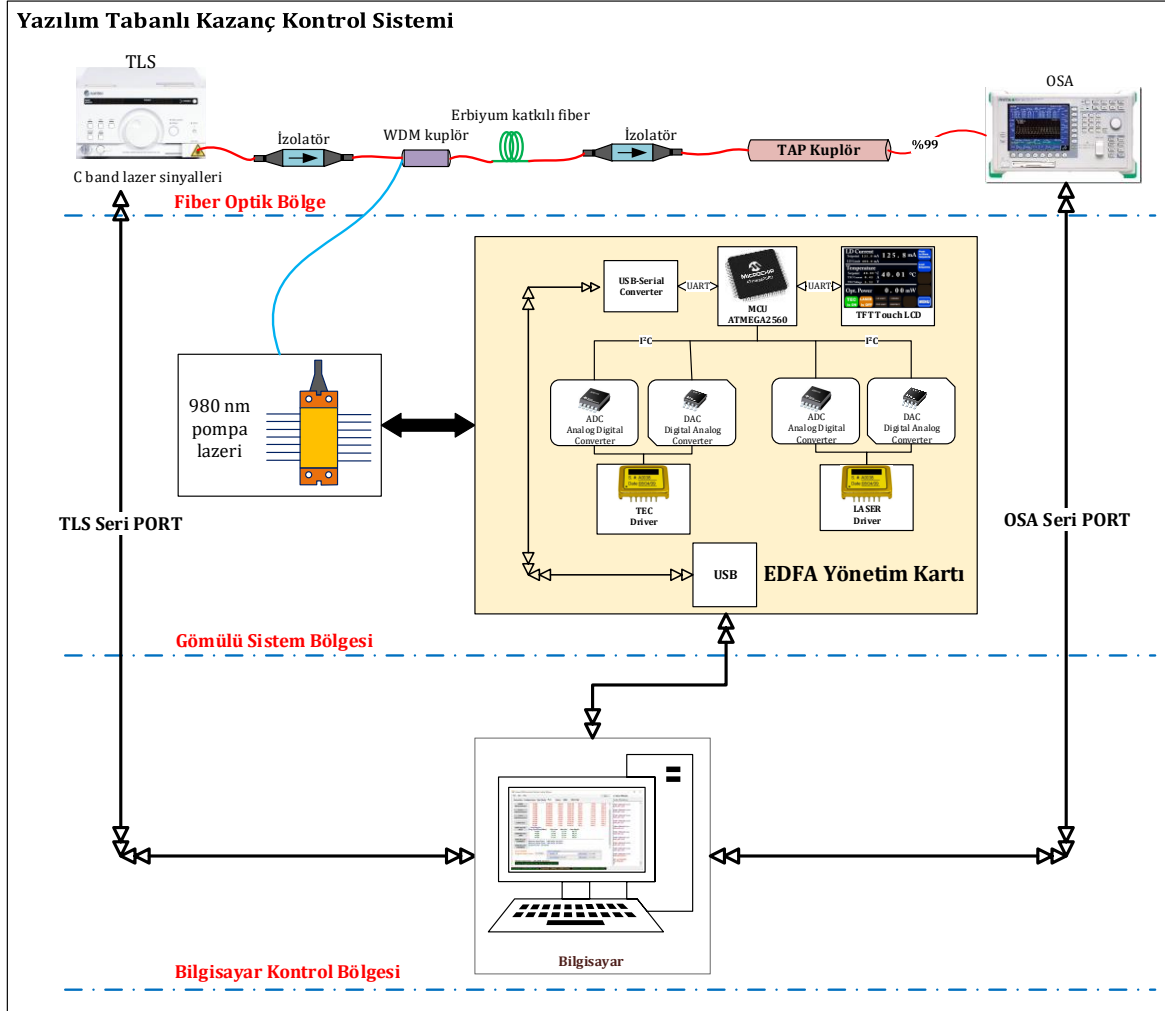
Şekil 5.4: -30 dBm giriş gücü için otomatik kazanç modunda alınan kazanç değerleri

5.3. Yazılım Tabanlı Kazanç Kontrol Sistemi

Tasarlanan kompakt EKFY yalnızca PIN diyot ile güç okuyabilmekte idi ve EKFY PIN diyottan aldığı girdiye göre pompa gücünü optimize etmekte idi. Kazancı gerçekten düzleştirebilmek için EKFY'nin pompa gücü optimizasyonu için OSA'dan alınan tepe gücü bilgisi kullanılmaya karar verilmiştir. Bunun sonucunda Şekil 5.2'de görüldüğü gibi önceki tasarlanan ve yapılan sisteme ek olarak EKFY, tasarlanan otomatik ölçüm alma için yapılan arayüze dahil edilip, OSA, TLS ve EKFY olmak üzere üç cihazın aynı anda kontrolünü gerçekleştirmek için önceki tasarlanan arayüze yeni eklemeler yapılarak ikinci yeni bir arayüz oluşturulup çalıştırılarak yeni ölçümler alınmıştır.

PIN diyot yardımı ile yapılan kazanç kontrol sisteminde minimum 0,38 dB lik kazanç dalgalanmasına inilebilmişti. Yeni yapılan bu arayüz sayesinde sistemin 0,30 dB den daha küçük salınımlar elde edilebilecek şekilde ayarlanmıştır. 0,30 dB olmasının sebebi temelde sadece OSA'dan alınan tepe güç değerinin doğruluğu ile alakalıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan optik spektrum analizör Anritsu firmasının MS9710B modeli idi. Normalde ekrandan okuma yapılmaya çalışıldığında çıkış gücü sürekli ve neredeyse 1 dBm kadar değişik güç bilgisi gösterebilmektedir. Yapılan izlenimler sonrasında OSA'nın gösterdiği gücün en iyi 0,30 dBm kararlılıkta salınım yaptığı gözlenmiştir. Bu sebeple kompakt

EKFY'nin okunan tepe gücü değerini hedeflenen çıkışın $\pm 0,30$ dBm aralığında tutacak şekilde programlanması uygun görülmüştür. Bundan dolayı alınan ölçümlerde başarı kriteri olarak kazanç salınımlarının 0,30 dB altında olmasına bakılarak değerlendirme yapılacaktır.

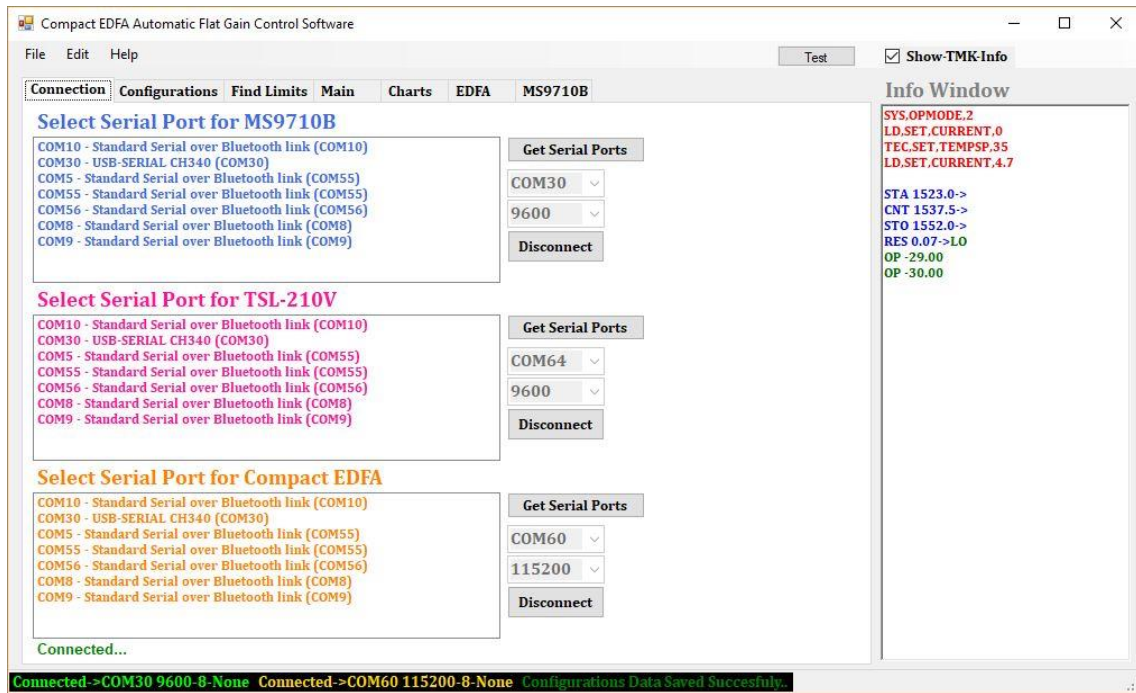


Şekil 5.5. Yazılım tabanlı kazanç kontrol sistemi blok diyagramı

Resim 5.1'deki bağlantı sekmesine OSA ve TLS için olan ayar dışında EKFY ile bağlantı yapılacak olan portun seçimi için de gerekli nesneler eklenmiştir.

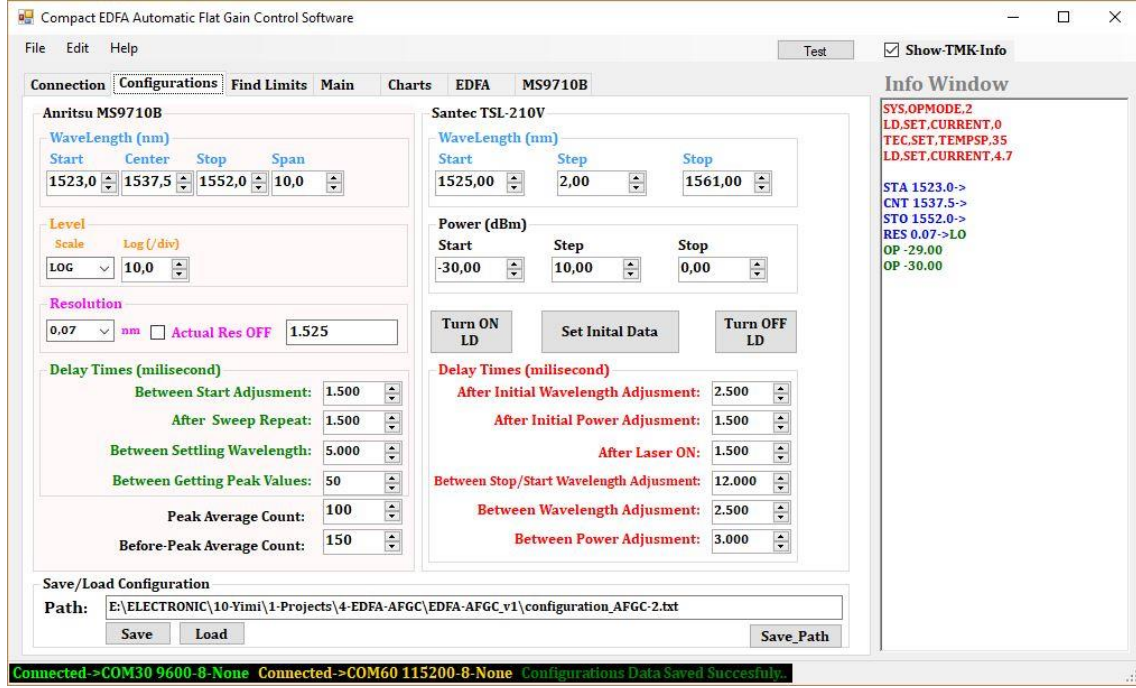
Resim 5.2'deki konfigürasyon sekmesine ek olarak "Before-Peak Average Count" adı verilen bir ayar daha eklenmiştir. Bu ayar OSA'dan alınan verilerin ortalamaya dahil edilmeden önceki EKFY'nin çıkış gücünü istenen düzeye getirmesi için alınan tepe gücü değeri sayıdır.

Resim 5.3’de TLS’in ayarlanan dalga boyu ve optik giriş güçleri için EKFY’nin seçilen maksimum ve minumum lazer akımlarına göre EKFY’nin çıkışından alınabilecek optik güçleri otomatik olarak ölçülerek program içindeki bir diziye kaydedilmektedir. Bu sekmenin ana program döngüsünde alınan ölçümlerde kazancın düz çıkabilmesini garanti altına almak adına EKFY’nin verebileceği maksimum çıkış gücünü geçmemesine ya da inebileceği minumum çıkış gücünü aşmayarak EKFY’nin çıkış gücünü istenen aralıkta kontrol edilebilmesini ve böylece hedeflenen düşük kazanç dalganlamasını yakalayabilmesini sağlamaktır.



Resim 5.1. Yeni bağlantı sekmesi (port seçme ekranı)

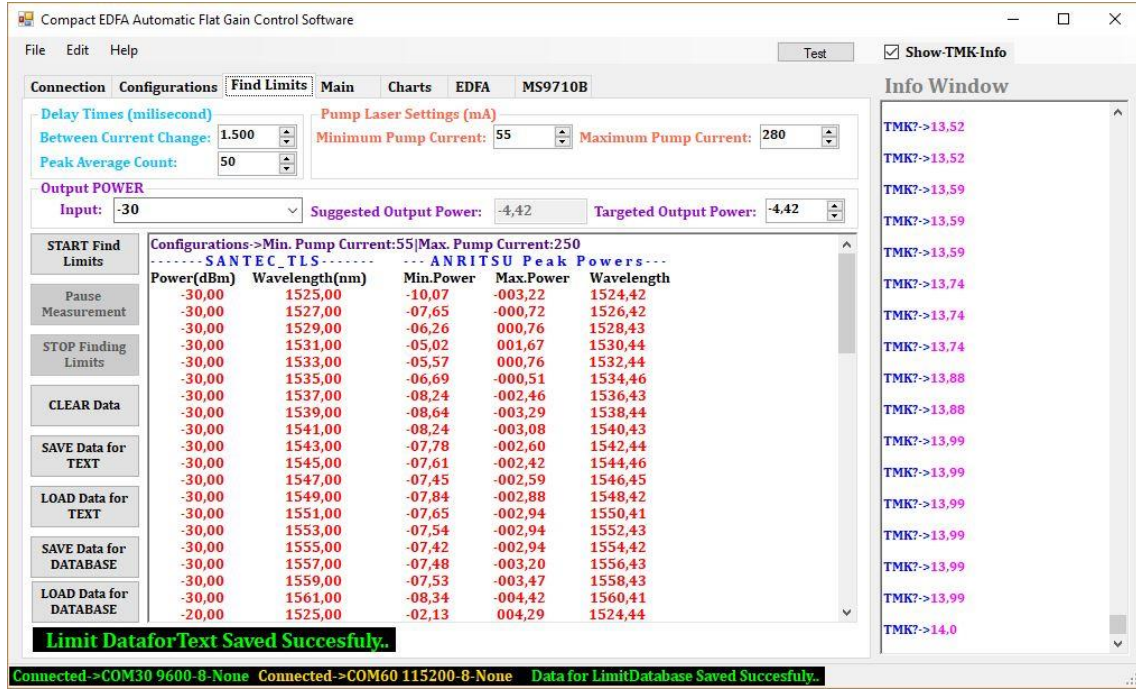
“Output POWER” başlığı altında toplanan 3 ayar bulunmaktadır. Buradaki giriş gücü açılır listesi konfigürasyon sekmesinden alınıp ölçümler devam ettikçe kendisini eklemektedir. Bu başlık altında bulunan “Suggested Output Power” adıyla verilen bilgi ekranı alınan ölçümlerin sonucunda seçilen çıkış gücünde taranan dalgaboylarında erişilebilmesi mümkün olan çıkış güçlerini hesaplayıp ekrana yansıtmaktadır.



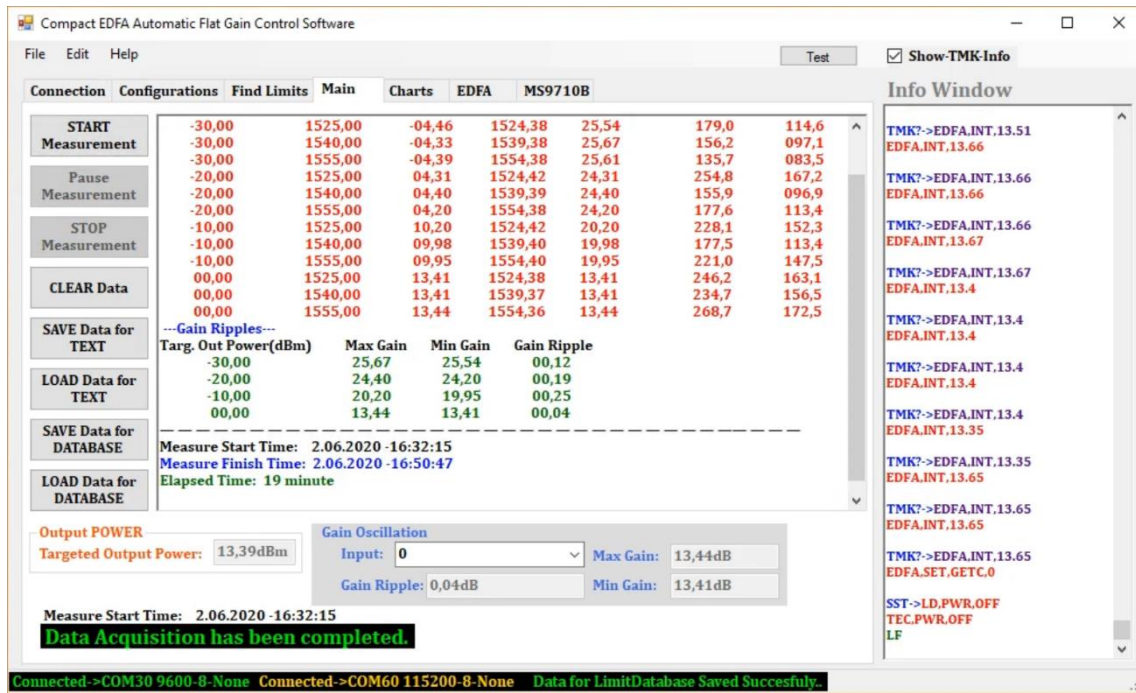
Resim 5.2. Yeni konfigürasyon sekmesi

Bu hesabı alınan minimum güçlerin maksimum değeri ile maksimum alınabilecek çıkış güçlerinin minimum değerinin ortalamasını alarak yapmaktadır. “Targeted Output Power” kısmında ayarlanabilen bir giriş bırakılmıştır. Burada programı kullanan kişi önerilen çıkış gücünün dışında bir değeri hedef değer olarak seçmek isterse bu kısımdan istediği değere getirerek yapabilmektedir. Hedeflenen çıkış gücünü kullanıcı sadece belirlenen değerler arasında seçebilmektedir. Örneğin Resim 5.3’te -30 dBm giriş gücünde minimum inilebilecek güç değeri -5,02 dBm dir. Kullanıcıya bu değerin altında bir değer girilmesine izin verilmemiştir. Böylelikle EKFY’nin kontrol edebileceği çıkış gücü aralığında kalması sağlanması amaçlanmıştır.

Resim 5.4’de ana program döngüsü ekranı gözükmemektedir. Yukarıda anlatılan şartlara göre bulunan limitlerden sonra en son ayarı yapılmış olan hedeflenen çıkış güçleri ayarlandıktan sonra “Main” sekmesinde “Start Measurement” butonuna tıklanılarak yeni bir iş parçacığı oluşturulup kazanç ölçümlerinin alımına başlanmaktadır. Konfigürasyon sekmesinde belirlenen ve limit bulma sekmesinden de gelen verilere göre bu iş parçacığı ölçüm almayı bitirdikten sonra seçilen farklı giriş güçleri için maksimum ve minimum kazanç değerleri ile birlikte kazanç dalgalanması da ekrana yazdırılmaktadır. Bu verilere ek olarak ölçüme başlandığı zamanı ve bitiş zamanıyla birlikte geçen süreyi de ekrana basmaktadır.



Resim 5.3. Limitleri bulma sekmesi



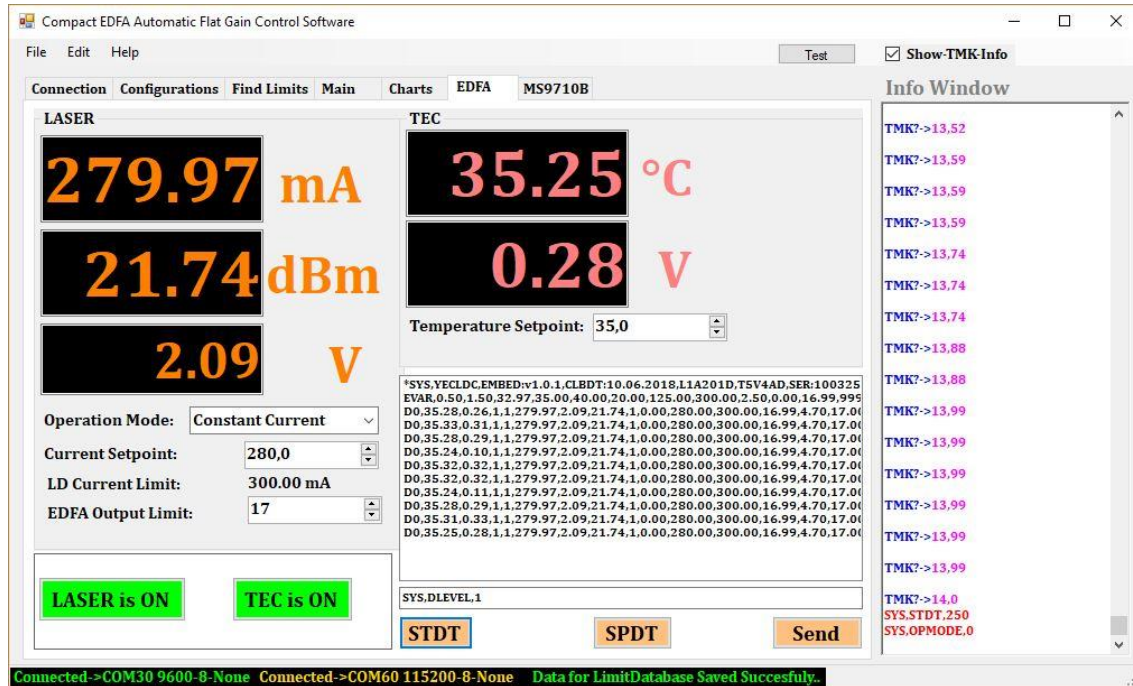
Resim 5.4. Ana program döngüsü

Resim 5.4'te sol tarafta bulunan görev butonlarının görevleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Ana program sekmesinde kullanılan butonların görevleri

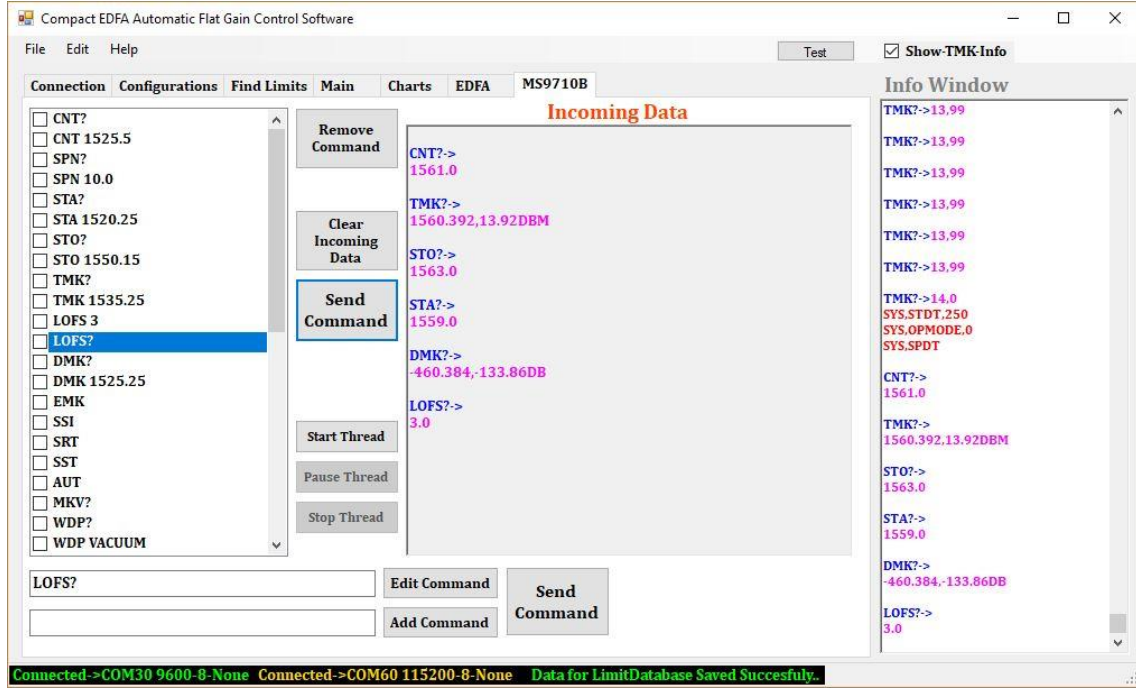
Buton Adı	Görevi
Start Measurement	Bu buton ölçüm almayı başlatmak için kullanılmaktadır.
Pause Measurement	Ölçüm almaya başlandıktan sonra programın arkasında çalışan for döngüsünü geçici süre durdurmak için kullanılmaktadır.
Stop Measurement	Ölçüm almayı doğrudan durdurmak için kullanılmakta olup bu butona basılana kadar alınan ölçümlerinde sonuçlarını ekrana yazdırmaktadır.
CLEAR Data	Ekrana yazdırılan verilen temizlenmesi için kullanılmaktadır.
SAVE Data for TEXT	Ekrana yazdırılan verilerin metin dosyası olarak kaydedilmesi amacıyla kullanılmaktadır.
LOAD Data for TEXT	Metin dosyası olarak kaydedilen verilen ana ekrandaki pencere yüklenip düzenlemesi için kullanılmaktadır.
SAVE Data for DATABASE	Alınan ölçümlerin programda oluşturulan geçici dizilerin veritabanı mantığıyla kaydedilmesini ve daha sonradan programda tekrar kullanılmasını sağlamak amacı ile kullanılmaktadır.
LOAD Data for DATABASE	Alınan ölçümlerin programda daha sonradan tekrar kullanılabilmesi amacı ile veritabanı şeklinde yükleme yapılarak programdaki özellikleri kullanabilmek için kullanılmaktadır.

Resim 5.5'te EKFY kontrol sekmesi gözükmemektedir. Bu sekme EKFY'yı ölçüm almadan önce genel ayarlarını yapmak için kullanılmaktadır. Ayrıca ölçüm sırasında da anlık olarak kontrol ve izlemek amacı ile kullanılabilir. Örneğin deney sırasında EKFY'nin pompa lazer sıcaklığını değiştirmek gibi.



Resim 5.5. EKFY kontrol sekmesi

Resim 5.6’da OSA’nın komutlarının bulunduğu sekme Anritsu ile iletişime geçmek için kullanılabilir. Bu sekme programın genelinde kullanılmayıp sadece hata ayıklama işleri için kullanılmaktadır.



Resim 5.6. MS9710B hata ayıklama sekmesi

Çizelge 5.3. Yapılan yazılımla alınan ölçümler

Kazanç Salınımları					Parametreler			Zaman
Ölçüm Sayısı	Giriş Gücü (dBm)	Mak. Gain (dB)	Min. Gain (dB)	Kazanç Salınımı (dB)	Tepe Değerler Arasındaki Bekleme Zamanı (ms)	Ortalamaya Katılan Ölçüm Sayısı	Ortalama Almaya Başlamadan Önceki Girdi Sayısı	Geçen Zaman (Dakika)
1	-30	26,7	26,5	0,21	100	100	150	75
	-20	24,9	24,6	0,27				
	-10	20,8	20,5	0,25				
	0	13,7	13,5	0,15				
2	-30	26,7	26,5	0,19	50	100	150	85
	-20	24,8	24,6	0,17				
	-10	20,7	20,5	0,2				
	0	13,7	13,5	0,2				
3	-30	26,7	26,5	0,2	50	50	150	61
	-20	24,9	24,7	0,29				
	-10	20,7	20,5	0,23				
	0	13,7	13,5	0,21				

Çizelge 5.3'teki veriler incelendiğinde yukarıda da anlatıldığı gibi sistem her güç girişi için kazanç salınımlarını 0,30 dB 'nin altında tutabilmeyi başarmıştır. Tasarlanan sisteme uygun bir şekilde sonuç elde edilmiştir.

Çizelge 5.3'te parametreler başlığı adı altında verilen değerlerin farklı durumlarındaki kazanç salınımlarına bakılacak olunursa en iyi sonucu veren ölçümün 2 numaralı ölçüm olduğu söylenebilir. En kötüsü diyebileceğimiz 3 numaralı ölçümün ise diğerlerinden en büyük farkı ortalamaya katılan ölçüm sayısının az olmasından kaynaklı olduğu gözükmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

EKFY'ler günümüz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılırken, üretilmiş oldukları çalışma bandına ve EKFY girişine gelen sinyalin güç seviyesine göre çıkışlarında belli bir kazanç oluşturmaktadırlar. Fakat bu kazanç her dalga boyu için farklı bir değerde olmaktadır. Bu kazanç farklılıkları da DBÇ sistemlerde istenmeyen bir etmen olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında öncelikle bu zamana kadar yapılan kazanç düzleştirme teknikleri incelenmiş olup aralarından elektronik kazanç kontrolü seçilip bu yöntem ile kazanç düzleştirme tekniği uygulanmıştır.

Elektronik kazanç kontrolünün en büyük temeli pompa lazerin akımını ve sıcaklığını kontrol etmekten geçer. Bu tez çalışmasında iki farklı lazer akım sürme ve TEC kontrol devresi tasarlanmış olup ilk tasarımıda sıcaklık kontrol kısmında yetersizlikler olduğu görülmüştür. Bu sonucun ışığında yeni bir pompa lazer kontrol devresi tasarlanmış olup bu devreyi de bilgisayardan kontrol etme gibi yazılımsal özellikler ile donatılıp sistemin en önemli parçalarından biri haline gelmiştir.

Yapılan simülasyon çalışması ile geleneksel bir EKFY'nin kullanılan fiber özellikleri, fiber boyu gibi parametrelerin optimize edilmesi sonucunda düz bir kazanç spektrumuna sahip bölgelerinin olabileceği gösterilmiştir. Daha sonra simülasyondan edinilen kazanımlar ışığında yeni bir EKFY tasarlanmıştır.

EKFY'nin sabit kazanç modunda çalıştırılması sağlanıp, öncelikle PIN diyot yardımı ile yapılan kontrol sayesinde 0,38 dB salınım elde edilmiştir. Fakat bu kazanç salınım değeri ise optik güç metreten okunan güç değeri ile elde edildi. Deney sırasında PIN diyot ile yapılan kazanç kontrolünün OSA'da 2 dB hatta nadir olarak ta 4 dB salınım seviyelerine kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı PIN diyot yardımı ile yapılan kontrolün daha sonra yapılan yazılım tabanlı kazanç kontrol sistemiyle kıyaslanması mümkün değildir.

Tasarlanan kompakt EKFY'nin otomatik ölçüm alma yazılımına dahil edilmesi ile birlikte sadece ölçüm almaktan çıkıp aynı zamanda EKFY'yi aktif bir şekilde kontrol eden bir sistem haline dönüşmüştür. Çalışmanın sonunda yapılan yazılım tabanlı kazanç kontrol sistemi ile

alınan ölçümler sonucunda maksimum 0,30 dB’lik kazanç salınımı elde edilmiştir. Bu değer daha stabil çalışan bir OSA ile ya da dalga boyunun tepe gücünü daha düzgün ve daha hızlı ölçebilen bir cihaz ya da komponent yardımı ile kazanç salınım değeri 0,01 dB’lere kadar düşürülebilmesi mümkündür. Yapılan sistem sayesinde bu değere göre kalibrasyon çok kısa bir zaman içinde yapılabilinecek olup daha düşük salınım değerlerine inebilmek de mümkündür.

Yazılım tabanlı kazanç kontrol sisteminin en büyük avantajlarından biri her ayarın ve senaryonun gerçekleştirebilinmesinin esnekliğidir. Bu çalışmada yapılan böyle bir yazılım ile otomatik ölçüm alma, kazanç sabitleme gibi birçok özelliği ile literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca elde edilen kazanç salınım değerleri literatür için yeni bir eşik olabilecek değerlere sahip olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca bu tez çalışmasının yapıldığı 2019-2020 döneminde meydana gelen korona virüs pandemisinde ar-ge laboratuvarlarında çalışan insanların uzaktan veriler alarak deneylerini yapıp aynı ortamda uzun süre beklemelerinin önüne de geçilebilir.

KAYNAKLAR

1. Harun, S., Rahman, E., Dimyati, K. and Ahmad, H. (2006). An efficient gain-flattened c-band erbium-doped fiber amplifier. *Laser Physics Letters*, 3(11), 536-538.
2. Dung, J.-C., Chi, S. and Wen, S. (1998). Gain flattening of erbium- doped fiber amplifier using fibre bragg gratings. *Electronics Letters*, 34(6), 555-556.
3. Yücel, M. and Göktaş, H. H. (2008). *C band erbium doped fiber amplifier as a flat gain optical amplifier*. IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference, 1-3.
4. Yamada, M., Mori, A., Kobayashi, K., Ono, H., Kanamori, T., Oikawa, K., Nishida, Y. and Ohishi, Y. (1998). Gain-flattened telluride-based edfa with a flat amplification bandwidth of 76 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(9), 1244 - 1246.
5. Lu, Y. B., Chu, P., Alphones, A. and 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.
6. Göktaş, H. ve Yücel, M. (2006). İki aşamalı c band erbiyum katkılı fiber yükselteçlerde (EKFY) kazanç düzleştirici filtre optimizasyonu. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 10-13.
7. Vallon, S., Chevallier, P., Guiziou, L., Alibert, G., How, L. S. and Boos, N. (2003). 40-band integrated static gain-flattening filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(6), 554-556.
8. Ni, N., Chan, C., Tan, K., Tjin, S. and Dong, X. Y. (2007). Broad-band EDFA gain flattening by using an embedded long-period fiber grating filter. *Optics Communications*, 271(2), 377-381.
9. Singh, R., Sunanda and Sharma, E. K. (2004). Gain flattening by long period gratings in erbium doped fibers. *Optics Communications*, 240(1-3), 123-132.
10. Connelly, M. J. (2002). *Semiconductor Optical Amplifiers*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 4-9.
11. Mears, R. J., Reekie, L., Jauncey, I. and Payne, D. (1987). Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm . *Electronics Letters*, 23(19), 1026-1028.
12. Hecht, J. (2002). The evolution of optical amplifiers. *Optics and Photonics News*, 13(8), 36-39.
13. Koester, C. and Snitzer, E. (1964). Amplification in a fiber laser. *Applied Optics*, 3(10), 1182-1187.
14. Mears, R. J., Reekie, L., Jauncey, I. M. and Payne, D. N. (1987). High-gain rare-earth doped fiber amplifier at 1,54 μm . *Optical Fiber Communication*, W12.
15. Desurvire, E., Simpson, J. R. and Becker, P. (1987). High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. *Optics Letters*, 12(11), 888-890.

16. Nakazawa, M., Kimura, Y. and Suzuki, K. (1989). Soliton amplification and transmission with Er^{3+} -doped fibre repeater pumped by GAINASP laser diode. *Electronics Letters*, 25(3), 199-200.
17. Massicott, J., Armitage, J., Wyatt, R., Ainslie, B. J. and Craig-Ryan, S. (1990). High gain, broadband, 1,6 μm Er^{3+} doped silica fibre amplifier. *Electronics Letters*, 25(3), 1645-1646.
18. Massicott, J., Wyatt, R. and Ainslie, B. J. (1992). Low noise operation of Er^{3+} doped silica fibre amplifier around 1,6 μm . *Electronics Letters*, 28(20), 1924-1925.
19. Yamada, M., Ono, H., Kanamori, T., Sudo, S. and Ohishi, T. (1997). Broadband and gain-flattened amplifier composed of a 1,55 μm -band and a 1,58 μm -band Er^{3+} -doped fibre amplifier in a parallel configuration. *Electronics Letters*, 33(8), 710-711.
20. Jinno, M., Sakamoto, T., Kani, J., Aisawa, S., Oda, K., Fukui, M., Ono H. and Oguchi, K. (1997). First demonstration of 1580 nm wavelength band wdm transmission for doubling usable bandwidth and suppressing fwm in dsf. *Electronics Letters*, 33(10), 882-883.
21. Sakamoto, T., Kani, J., Jinno, M., Aisawa, S., Fukui, M., Yamada, M. and Oguchi, K. (1998). Wide wavelength band (1535-1560 nm and 1574-1600 nm), 28x10 gbit/s wdm transmission over 320km dispersion-shifted fiber. *Electronics Letters*, 34(4), 392-393.
22. Ono, H., Yamada, M., Shimizu, M. and Ohishi, Y. (1998). Comparison of amplification characteristics of 1,58 μm and 1,55 μm band EDFAs. *Electronics Letters*, 34(15), 1509-1510.
23. Nilson, J., Yun, S., Hwang, S., Kim, J. and Kim, S. (1998). Long-wavelength erbium-doped fiber amplifiers gain enhanced by ASE end-reflectors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(11), 1551-1553.
24. Lee, J., Ryu, U., Ahn, S. J. and Park, N. (1999). Enhancement of power conversion efficiency for an l-band edfa with a secondary pumping effect in the unpumped edf section. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(1), 42-44.
25. Bouzid, B., Abdullah, M. and Mahdi, M. (2008). High-gain erbium-doped fiber amplifier incorporating a double-pass amplification technique as a preamplifier. *Laser Physics*, 18(4), 460-463.
26. Yi, L., Zhan, L., Ji, J., Ye, Q. and Xia, Y. (2004). Improvement of gain and noise figure in double-pass L-band EDFA by incorporating a fiber bragg grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(4), 1005-1007.
27. Harun, S., Poopalan, P. and Ahmad, H. (2002). Gain enhancement in L-band EDFA through a double-pass technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(3), 296-297.
28. Liang, T., Cheng, N. and Hung, S. (2003). Gain enhancement in L-Band Gain-Flattened EDFA Using a Reflective-Type Structure. *Microwave and Optical Technology Letters*, 37(5), 393-395.

29. Zhang, A., Chen, X., Guan, Z., He, S., Tam, H. and Chung, W. (2005). Optimization of step-changed long-period gratings for gain-flattening of EDFAs. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(1), 121-123.
30. Zirngibl, M. (1991). Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by an all optical feed back loop. *Electronics Letters*, 27(7), 560-561.
31. Takushima, Y. and Kikuchi, K. (1999). Gain spectrum equalization of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(2), 176-178.
32. Peterka, P., Faure, B., Blanc, W., Karasek, M. and Dussardier, B. (2004). Theoretical modelling of s-band thulium-doped silica fibre amplifiers. *Optical and Quantum Electronics*, 36(3), 201-212.
33. Jackson, S. D. and King, T. A. (1999). Theoretical modeling of tm-doped silica fiber lasers. *Journal of Lightwave Technology*, 17(5), 948-956.
34. Kasamatsu, T., Yano, Y. and Ono, T. (2001). Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for wdm signals in the 1,48-1,51 μm wavelength region. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(1), 31-33.
35. Kasamatsu, T., Yano, Y. and Ono, T. (2001). Laser-diode-pumped highly efficient gain shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510 nm band. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(5), 433-435.
36. Masuda, H., Kawai, S., Suzuki, K. and Aida, K. (1997). 75-nm 3-db gain-band optical amplification with erbium-doped fluoride fiber amplifiers and distributed raman amplifiers in 9/spl times/2.5-gb/s wdm transmission experiment. Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications, 73-76.
37. Namiki, S. and Emori, Y. (2001). Ultrabroad-band raman amplifiers pumped and gain equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 7(1), 3-16.
38. Mahdi, M., Ali, M. and Ahmad, A. (2008). Influence of the pumping scheme in double-pass discrete raman-fiber amplifiers. *Laser Physics*, 18(6), 807-809.
39. Emori, Y., Tanaka, K. and Namiki, S. (1999). 100 nm bandwidth flat-gain raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel wdm laser diode unit. *Electronics Letters*, 35(16), 1355-1356.
40. Hecht, J. (1999). *City of Light: The Story of Fiber Optics*. New York: Oxford University Press, 247.
41. Gasulla, I. and Capmany, J. (2008). 1 tb/s•km multimode fiber link combining wdm transmission and low-linewidth lasers. *Optics Express*, 16(11), 8033-8038.
42. Maeda, K., Tsuchida, Y. and Takasaka, S. (2015). *Cladding pumped multicore EDFA with output power over 20 dBm using a fiber based pump combiner*. 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), 1-3.

43. Stevens, G., Henwood-Moroney, L., Hosking, P., Kehayas, E., Leontios, S. and Robertson, A. (2015). *Compact dual channel optical fiber amplifier for space communication applications*. Conference on Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation, 224-230.
44. Hamida, B. A., Azooz, S. M., Jasim, A. A., Eltaif, T., Ahmad, H., Khan, S. and Harun, S. W. (2015). Flat-gain wide-band erbium doped fiber amplifier by combining two difference doped fibers. *Journal of The European Optical Society-Rapid Publications*, 10, 1-5.
45. Nakazawa, M. (2014). Evolution of EDFA from single-core to multi-core and related recent progress in optical communication. *Optical Review*, 21, 862-874.
46. Cheng, X. S., Hamida, B. A., Naji, A. W., Arof, H., Ahmad, H. and Harun, S. (2012). Compact and wide-band bismuth-based erbium-doped fibre amplifier based on two-stage and double-pass approaches. *IET Optoelectronics*, 6(3), 127-130.
47. Rosolem, J., Juriollo, A. and Romero, M. (2007). S-band EDFA using standard erbium-doped fiber. *Electronics Letters*, 43(22), 1186-1188.
48. Li, J., Brattain, M., Rice, A., Labudovic, M., Young, J., Cook, M., Ye, F., Davis, M.K. and Burka, M. (2006). Uncooled mini-DIL module for 980-nm pump lasers. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 29(1), 171-177.
49. Thyagarajan, K. and Kakkar, C. (2004). S-band single-stage EDFA with 25-dB gain using distributed ASE suppression. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(11), 2448-2450.
50. Pan, J., Guan, K. and Qiu, X. (2003). Advantages of low-cost, miniature, intelligent EDFAs for next-generation dynamic metro/access networks. *Optical Fiber Technology*, 9(2), 80-94.
51. Gao, J., Han, X. and Lei, X. (2017). TEC power consumption in laser array packaging. *Optical and Quantum Electronics*, 49(4), 139.
52. Shen, L., Chen, H. and Xiao, F. (2014). The step-change cooling performance of miniature thermoelectric module for pulse laser. *Energy Conversion and Management*, 80, 39-45.
53. Labudovic, M. and Li, J. (2004). Modeling of TE cooling of pump lasers. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 27, 724-730.
54. Liu, X., Hu, M. and Caneau, C. (2004). *Thermal management strategies for high power semiconductor pump lasers*. 9th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems.
55. Dudzik, G. (2017). Ultra-stable, low-noise two-stage current source concept for electronics and laser applications. *IET Circuits Devices ve Systems*, 11(6), 613-617.
56. Sharma, A., Panwar, C. B. and Arya, R. (2016). *High Power Pulsed Current Laser Diode Driver*. IEEE International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), 120-126.

57. Giorgi, D. and Philippbar, J. (2010). *Compact Laser Diode Drivers for Military Rangefinder Applications*. Proc. SPIE 7686, Laser Technology for Defense and Security VI. 7686, 277-283.
58. Yoshida, S., Kuwano, S. and Iwashita, K. (1995). Gain-flattened EDFA with high al concentration for multistage repeatered WDM transmission systems. *Electronics Letters*, 31(20), 1765-1767.
59. Guan, B., Tam, H.-Y., Liu, S.-Y., Wai, P. and Sugimoto, N. (2003). Ultrawide-Band La-Codoped Bi₂O₃-Based EDFA for L-Band DWDM systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(11), 1525-1527.
60. Bayart, D., Clesca, B., Hamon, L. and Beylat, J. (1994). Experimental Investigation of The Gain Flatness Characteristics for 1.55 μ m Erbium-Doped Fluoride Fiber Amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6(5), 613-615.
61. Mizuno, K., Nishi, Y., Mimura, Y., Lida, Y., Matsuura, H., Yoon, D., Aso, O., Yamamoto, T., Toratani, T., Ono, Y. and Yo, A. (2000). Development of etalon-type gain-flattening filter. *Furukawa Review*, 19, 53-58.
62. Naji, A., Abidin, M., Kassir, A., Al-Mansoori, M., Abdullah, M. and Mahdi, M. (2004). Trade-off between single and double pass amplification schemes of 1480-nm pumped EDFA. *Microwave and Optical Technology Letters*, 43(1), 38-40.
63. Yu, A. and O'Mahony, M. (1995). Properties of gain controlled erbium doped fiber amplifiers by lasing. *Electronics Letters*, 31(16), 1348-1349.
64. Xia, B. (2002). *Theoretical And Experimental Analyses All Optical Gain Clamped L Band EDFAs*. M.Sc. Thesis, McGill University Faculty of Graduate Studies and Research, Montreal.
65. Delevaque, E., Georges, T., Bayon, J., Monerie, M., Niay, P. and Bemage, P. (1993). Gain control in erbium-doped fiber amplifiers by lasing at 1480 nm with photoinduced bragg gratings written on fiber ends. *Electronics Letters*, 29(12), 1112-1114.
66. Zhao, Y., Bryce, J. and Minasian, R. (1997). Gain clamped erbium-doped fiber amplifiers-modeling and experiment. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 3(4), 1008-1012.
67. Hill, K. O. and Meltz, G. (1997). Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1263-1276.
68. Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. and R.S., K. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 32, 647-649.
69. Yücel, M., Aslan, Z. ve Göktaş, H. (2013). *Çeşitli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Konfigürasyonları için Kazanç ve Gürültü Faktörünün İncelenmesi*. V. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu.
70. Yenilmez, G. (2014). *Erbiyum katkılı fiber yükselteçlerde optik kazanç kontrolü*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 18-26.

71. Feng, X., Jin, T. and Wang, Y. (2002). A simple control algorithm for wide-band channel-power clamped EDFA. *Optics Communications*, 213(4-6), 285-292.
72. Rao, Y., Hu, A. and Niu, Y. (2005). A novel dynamic LPFG gain equalizer written in a bend-insensitive fiber. *Optics Communications*, 244(1-6), 137-140.
73. Ben-Ezra, Y., Haridim, M. and Lembrikov, B. I. (2006). All-optical AGC of EDFA based on SOA. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 42(11-12), 1209-1214.
74. Zhang, H., Dou, Q. and Jin, Y. (2006). L-band all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier via ase reflection technique. *Microwave and Optical Technology Letters*, 48(5), 852-854.
75. Kaler, R. S. (2011). Effect of channel adding/dropping on EDFA transients. *Optik*, 122(5), 444-450.
76. Lin, W., S., R. and Murney, B. (2008). Decreasing EDFA transients by power shaping. *Optical Switching and Networking*, 5(4), 188-195.
77. Zhao, C., Tam, H. and Guan, B. (2003). Optical automatic gain control of EDFA using two oscillating lasers in a single feedback loop. *Optics Communications*, 225(1-3), 157-162.
78. Harun, S., Samsuri, N. and Poopalan, R. (2004). Gain control in double-pass L-band EDFA using ring resonator and two stage configuration. *Optik*, 115(11-12), 525-527.
79. Nakaji, H., Nakai, Y. and Shigematsu, M. (2003). Superiour high-speed automatic gain controlled erbium doped fiber amplifiers. *Optical Fiber Technology*, 9(1), 25-35.
80. Park, S., Kim, H. and Kang, S. (1998). A gain-flattened two-stage EDFA for WDM optical networks with a fast link control channel. *Optics Communications*, 153(1-3), 23-26.
81. Liang, T. and Hsu, S. (2008). The L-band EDFA of high clamped gain and low noise figure implemented using fiber bragg grating and double-pass method. *Optics Communications*, 281(5), 1134-1139.
82. Naji, A., Abidin, M., Al-Mansoori, M., Faidz, A. and Mahdi, M. (2007). Experimental investigation of noise in double-pass erbium-doped fiber amplifiers. *Laser Physics Letters*, 4(2), 145-148.
83. Jamaludin, M., Abdullah, M., Abdullah, F., Abas, A., Mahdi, M. and Rahman, F. (2008). A hybrid high-gain double-pass erbium-doped fiber amplifier with dispersion compensation feedback loop. *Optics and Laser Technology*, 40(2), 270-272.
84. Samsuri, N., Harun, S. and Ahmad, H. (2004). Comparison of performances between partial doublepass and full double-pass systems in two-stage L-Band EDFA. *Laser Physics Letters*, 1(12), 610-612.
85. Aslan, Z. ve Yücel, M. (2012). Tek ve çift geçişli erbiyum katkılı fiber yükselteçlerin c bandında deneysel olarak karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 15(3), 135-138.

86. Yücel, M. and Göktas, H. H. (2007). *Gain Flattening Configurations at the L Band Erbium Doped Fiber Amplifiers*. 2007 IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications, 1-4.
87. Chang, C., Wang, L. and Chiang, Y. (2006). A dual pumped double-pass l-band edfa with high gain and low noise. *Optics Communications*, 267(1), 108-112.
88. Ahn, J., Jeon, M. and Kim, H. (2011). Two stage reflective-type erbiyum-doped fiber amplifier with enhanced noise figure characteristics. *Optics Communications*, 197, 121-125.
89. Yücel, M. and Göktas, H. (2012). Examination of temperature dependence of double pass L band erbium doped fiber amplifier. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2), 237-243.
90. Harun, S., Poopalan, P. and Ahmad, H. (2003). Double pass L-band erbium-doped fiber amplifier with enhanced gain characteristics. *Indian Journal of Physics*, 77B(4), 435-437.
91. Qin, S., He, J., Zou, Y. and Qiang, Z. (2010). *An Improved 3-Stage L-Band Erbium Doped Fiber Amplifier*. Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 15-16.
92. Akhter, F., Ibrahimy, M., Naji, A. and Siddiquei, H. (2012). Modeling and characterization of all possible triple pass EDFA configurations. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(18), 2656-2663.
93. Yücel, M., Göktas, H. and Akkaya, G. (2012). *Optimization of the Three Stages L Band EDFA*. 2012 20th Signal Processing and Communications Applications (SIU), 1-4.
94. Yenilmez, G. ve Yücel, M. (2014). *Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Optik Kazanç Kontrolü*. IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 457-460.
95. Todorov, D. G. and Grigorov, A. (2006). *High Power Laser Diode Driving Techniques*. ELECTRONICS, 57-62.
96. İnternet: Laser Diode Control merketplace for Scientists & Engineers. URL: <https://www.laserdiodecontrol.com/tec-controller-basics>, Son Erişim Tarihi: 15.04.2020.
97. Rosiewicz, A. and Coleman, S. (2009). Development of a low SWaP laser transmitter. *Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments III*, 7467(746703).
98. Zhang, Y. and Ashe, J. (2002). Designing a high-performance TEC controller. *Proceedings Volume 4913, Semiconductor Lasers and Applications*, 4913, 177-183.
99. İnternet: Texas Instruments - An optical amplifier pump laser reference design based on the AMC7820. URL: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa072a/sbaa072a.pdf>, Son Erişim Tarihi: 02.05.2019.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKÇEŞME, Özcan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 25.10.1994, Afyonkarahisar
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0543 311 87 54
 E-mail : ozcanakcesme@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2016
Lise	Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-2017	CYMSOFT Ltd. Şti.	Elektronik Tasarım Mühendisi
2016-2020	Yimi Elektronik Ltd. Şti.	Elektronik Tasarım Mühendisi
2018-2020	USSAK Teknoloji	Elektronik Tasarım Mühendisi
2020-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Akçeşme, Ö. ve Yücel, M. (2019). *Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Düz Kazanç Spektrumu İçin Erbiyum Katkılı Fiber Boyunun Optimizasyonu*. Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Bahar), 2, 1732-1737.
2. Akçeşme, Ö. ve Yücel, M. (2019). *Lazer Diyotlar İçin Düşük Maliyetli Akım Kontrol Devresi Ve Termoelektrik Soğutucu Kontrol Devresi Tasarımı*. Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Bahar), 2, 1718-1724.

Hobiler

Meteorolojik gözlemler ve ölçümlerin değerlendirilmesi, amatör gökbilimcilik, uçaklar, sanal havacılık ve jeoloji.



GAZİ GELECEKTİR..