



FBG ile LAZER KAVİTE KONTROLÜ YAPILARAK KAZANÇ KENETLEMELİ ve
KAZANÇ SPEKTRUMU DÜZLEŞTİRİLMİŞ L-BAND EDFA TASARIMI

Fırat Ertaç DURAK

Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim – 2017

FBG ile LAZER KAVİTE KONTROLÜ YAPILARAK KAZANÇ KENETLEMELİ ve
KAZANÇ SPEKTRUMU DÜZLEŞTİRİLMİŞ L-BAND EDFA TASARIMI

Fırat Ertaç DURAK

Dumlupınar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

Ekim – 2017

KABUL VE ONAY YAZISI

Fırat Ertay DURAK'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı FBG ile LAZER KAVİTE KONTROLÜ YAPILARAK KAZANÇ KENETLEMELİ ve KAZANÇ SPEKTRUMU DÜZLEŞTİRİLMİŞ L-BAND EDFA TASARIMI başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

13/10/2017

Üye Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU (Danışman)

Üye Prof. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU

Üye Doç. Dr. Murat YÜCEL

Üye Doç. Dr. İsa NAVRUZ

Üye Yrd. Doç. Dr. Bahadır HİÇDURMAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %1 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

Fırat Ertaç DURAK

FBG ile LAZER KAVİTE KONTROLÜ YAPILARAK KAZANÇ KENETLEMELİ ve KAZANÇ SPEKTRUMU DÜZLEŞTİRİLMİŞ L-BAND EDFA TASARIMI

Fırat Ertaç DURAK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Doktora Tezi, 2017

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

ÖZET

Erbiyum katkılı fiber yükselteçler (EDFA), optik haberleşme sistemlerinde önemli rol oynamaktadır. Ancak, yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM) sistemlerinde, yüksek kapasiteli bilgi iletim ihtiyacını karşılamak için EDFA'ların çalışma bandgenişliklerinin klasik-banttan (C-Band), uzun-dalgaboyu bandına (L-Band) genişletilmesine ihtiyaç vardır. DWDM sistemlerinde, optik kanalın eklenmesi ya da çıkarılması durumunda, EDFA kazancı dolayısıyla optik kanalların çıkış gücü değişebilmektedir. Eğer EDFA'da herhangi bir kazanç kontrol mekanizması kullanılmazsa, bu durum haberleşme sisteminin genel performansında dalgalanmalara yol açmaktadır. Bu sebeple, giriş kanallarının gücü, dalgaboyu veya sayısının değişimlerine dirençli kazanç kenetlemeli ve kazanç spektrumu düzleştirilmiş genişband EDFA tasarımları gerekmektedir.

Bu çalışmada, C-bandında simetrik FBG çifti kullanılarak gerçekleştirilen lazer kavite kontrollü L-band EDFA'nın kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme performansı teorik ve deneysel olarak analiz edilmiş ve tek katlı çift yönlü pompalamalı klasik L-Band EDFA tasarımı ile kıyaslanmıştır. Kazanç kenetlemeli ve kazanç spektrumu düzleştirilmiş L-Band EDFA tasarımında kullanılan FBG çiftinin Bragg yansıtma dalgaboyu optimize edilerek, geniş bir kazanç kenetlemeli dinamik aralık (~33 dB) ve düzleştirilmiş kazanç spektrumu (~35nm) 19.70 dB'lik ortalama kazanç değeri ile elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar, teorik analiz sonuçları ile oldukça uyumludur. Sonuç olarak, genişband çok kanallı fiber optik haberleşme sistemlerinde ihtiyaç duyulan kazanç kenetlemeli ve düzgün kazanç spektrumlu L-Band kazancın önerilen L-Band EDFA tasarımıyla yüksek performanta gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Erbiyum katkılı fiber yükselteçler, fiber Bragg ızgara (FBG), kazanç kenetleme, kazanç spektrumu düzleştirme, L-Band EDFA.

GAIN CLAMPED and GAIN FLATTENED L-BAND EDFA DESIGN BASED ON LASING CAVITY CONTROLLED STRUCTURE USING FBGs

Firat Ertaç DURAK

Electrical-Electronics Engineering, Ph.D. Thesis, 2017

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

SUMMARY

Erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) plays an important role in the optical communication systems. However, the operating bandwidth of EDFAs needs to be extended from conventional-band (C-Band) to the long-wavelength band (L-Band) to satisfy the requirements for high-capacity information transmission in DWDM (dense wavelength division multiplexing) systems. In the DWDM systems, the power of the output channels may change when the optical channels are added or dropped. If any control mechanism is not used in EDFA, this will degrade the overall performance of the transmission system. For this reason, wideband EDFAs exhibiting gain clamping and gain flattening features should be used in DWDM systems to overcome with the instability problems for varying input channel power/wavelength or the number of channels to be amplified.

In this study, gain clamping and gain spectrum flattening performance in L-band EDFAs based on a lasing cavity controlled structure using a symmetrical FBG couple at C-band is theoretically and experimentally analyzed and compared with a single-stage bidirectionally pumped conventional L-band EDFA design. By optimizing the Bragg reflection wavelength of the FBG which is used for gain clamped and flattened operation in L-Band EDFA, a wide gain-clamped dynamic range (~33 dB) and a wide flattened gain spectrum (~35 nm) was obtained with an average gain of 19.70 dB. The experimental results obtained in this study are highly matched with the theoretical analysis results. It has been understood that gain clamped and gain flattened L-Band amplification with high dynamic range and bandwidth performance which required in wideband multichannel fiber optical communication systems, can be realized using the proposed L-band EDFA design.

Keywords: FBG, gain clamping and gain flattening, L-band EDFA.

TEŞEKKÜR

Başta akademik ve eğitim hayatım olmak üzere birlikte çalışmaya başladığımız andan itibaren her alanda tecrübeleri ile bana ışık olan, bilgi ve birikimlerini cömertçe benimle paylaşmış olduğum tüm çalışmalarda elimden tutan, ihtiyaç duyduğum her anda tereddütsüz olarak yardımcı olup tezimin her satırında emeği geçen danışman hocam Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU'ya,

Tezimle ilgili yapmış olduğum ölçüm ve değerlendirmelerde değerli görüş ve önerilerini benden esirgemeyerek sabırla yardımcı olan çok değerli hocalarım Doç. Dr. İsa NAVRUZ ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa NAMDAR'a,

Tez çalışmasında kullanmış olduğum pasif optik elemanların alınmasında hem maddi hem de manevi destekte bulunan Fiberlast (Ankara) firması yönetim kurulu başkanı Dr. Koray EKEN'e,

İş hayatımda her daim yardımına koşup tezimde emekleri geçen, Fotonik Araştırma Grubu çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Arif BAŞGÜMÜŞ'e, Arş. Gör. Fırat AYDEMİR ve Arş. Gör. Şerif Ali SADIK'a,

Başta tüm eğitim-öğretim hayatım olmak üzere, bugüne kadar yapmış olduğum hayata dair herşeyde maddi ve manevi her türlü desteklerini benden esirgemeyen, göstermiş oldukları anlayış, şevkat ve sabır nedeniyle annem Ayfer DURAK'a, babam Çetin DURAK'a ve sevgili ablam Ayçe BARAN'a,

Üniversite hayatımda maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen ve doktora yapmamda teşvikte bulunan, tezimin teslim zamanı Hakkın rahmetine kavuşan, değerli insan, sevgili amcam, Prof. Dr. Raif DURAK'a,

Bana sağladıkları huzur ve mutluluğu tarif bile edemeyeceğim, hayatımdaki en değerli varlıklarım olan sevgili eşim Arş. Gör. Sariye Duygu DURAK ve biricik oğlum Demir'e,

En içten kalbi duygularıyla teşekkür eder, şükran ve minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Fiber Optik Haberleşme Sistemlerindeki Gelişmeler.....	1
1.2. EDFA’larda Kazanç Kontrolü.....	2
1.2.1. Elektronik tabanlı kazanç kontrol yöntemi.....	2
1.2.2. Tümüyle optik tabanlı kazanç kontrol yöntemi.....	3
1.3. Araştırma Hedefi ve Tezin Yapısı.....	8
2. EDFA TEORİSİ.....	11
2.1. Optik Yükselteçler.....	11
2.2. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (EDFA).....	14
2.3. EDFA’nın Teorik Modellenmesi.....	16
2.4. EDFA’da Performans Karakterizasyonu.....	20
2.4.1. Kazanç.....	20
2.4.2. Gürültü faktörü.....	22
2.4.3. Yükseltirilmiş spontane ışınım (ASE) gürültüsünün ölçülmesi.....	23
2.4.3.1. İnterpolasyon (Curve-fitting) yöntemi.....	23
2.4.3.2. Polarizasyon sıfırlama yöntemi.....	24
2.4.3.3. Darbe çıkarım yöntemi (WDM yöntem).....	25
3. FİBER BRAGG IZGARA (FBG)’NİN TEORİSİ VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU.....	26
3.1. FBG Teorisi.....	26
3.2. Kullanılan FBG’lerin Teknik Özellikleri.....	27
3.2.1. FBG’nin iletim spektrumu.....	28
3.3. Kullanılan FBG’lerin Çevresel Şartların Değişimine Karşı Tepkisi.....	29
3.3.1. FBG’nin sıcaklık değişimine tepkisi.....	29
3.3.2. FBG’nin bağıl nem değişimine tepkisi.....	30

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.3.3. FBG'nin X yönündeki gerilmeye karşı tepkisi.....	31
4. LAZER KAVİTE KONTROLLÜ L-EDFA TASARIMI, TEORİK ANALİZİ VE SİMÜLASYONU.....	32
4.1. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA Tasarımı.....	32
4.2. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA Teorisi.....	33
4.2.1. Lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın teorik karakteristikleri.....	35
4.2.2. Lazer kavite kontrollü L-EDFA teorik karakteristik sonuçları.....	38
4.3. Soğurum ve Işıma Kesiti.....	38
4.4. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA'nın Simülasyonu.....	39
4.4.1. Popülasyon ters birikimi simülasyonu.....	40
4.4.2. L-EDFA kazanç ve gürültü faktörünün sinyal giriş gücü ile değişim simülasyonu.....	41
4.4.3. Farklı giriş sinyal dalga boyları için kazanç ve NF spektrumu.....	43
5. LAZER KAVİTE KONTROLLÜ L-BAND EDFA'NIN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU.....	45
5.1. İleri Yönlü C-Band EDFA'nın Deneysel Karakterizasyonu.....	45
5.1.1. İleri yönlü C-Band EDFA'da kazanç ve NF'nin pompa gücü ile değişimi.....	46
5.1.2. İleri yönlü C-Band EDFA'da kazanç ve NF'nin sinyal giriş gücü ile değişimi.....	47
5.1.3. İleri yönlü C-Band EDFA'da kazanç ve NF'nin sinyal dalga boyu ile değişimi.....	48
5.2. Klasik Yapılı L-EDFA'nın Deneysel Karakterizasyonu.....	49
5.2.1. Klasik yapılı L-EDFA'da ileri yönlü ASE gürültü spektrumu.....	50
5.2.2. Klasik yapılı L-EDFA'da kazanç ve NF'in sinyal giriş gücü ile değişimi.....	51
5.2.3. Klasik Yapılı L-EDFA'da kazanç ve NF'in sinyal giriş dalga boyu ile değişimi.....	51
5.2.4. Sonuç.....	52
5.3. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA.....	53
5.3.1. FBG konumunun lazer kavite kontrollü L-EDFA performansına etkisi.....	53
5.3.2. FBG Bragg yansıma dalga boyunun lazer kavite kontrollü L-EDFA performansına etkisi.....	57
5.3.2.1. İleri yönlü ASE gürültü gücünün Bragg dalga boyu ile değişimi.....	57
5.3.2.2. Farklı Bragg dalga boyları için sinyal giriş gücüne bağlı kazanç ve NF değişimi.....	58
5.3.2.3. Farklı Bragg dalga boyları için sinyal dalga boyuna bağlı kazanç ve NF değişimi.....	63

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	70
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. EDFA’da elektronik kazanç kontrolü.....	2
1.2. C-bandında bir çekirdek sinyali enjekte edilerek L-EDFA’da kazanç kontrolünün yapılması.....	3
1.3. Lazer kontrollü kazanç kenetlemeli L-Band EDFA’larda (a) F-P lazer yapısı (b) ring lazer yapısı.....	5
1.4. Çift katlı EDFA genel yapısı.....	7
1.5. DWDM sistemlerde sinyal iletimi.....	9
1.6. L-Band için örnek bir giriş sinyali.....	9
2.1. Optik yükselteçlerin genel yapısı.....	11
2.2. Yarı iletkenli lazer yükselteç yapısı.....	12
2.3. Raman yükselteçlerinin yapısı.....	13
2.4. Üç seviyeli enerji sistemi ve ASE gürültüsünün oluşumu.....	15
2.5. Uyarılmış ışınım yolu ile zayıf sinyalin kuvvetlendirilmesi.....	15
2.6. İki seviyeli sistemde farklı pompalama dalga boylarına göre ışınım karakteristikleri (Hui ve O’Sullivan, 2009).....	16
2.7. İki seviyeli Er^{3+} iyonunun atomik geçişleri.....	17
2.8. Gaussian dalga yayılımı modeli.....	18
2.9. Spektrumdaki sinyal ve gürültü seviyeleri.....	21
2.10. EDFA kazancı hesaplanması için kullanılan spektral ölçüm.....	22
2.11. İnterpolasyon yöntemi ile ASE gürültü gücünün ölçülmesi.....	24
2.12. Polarizasyon sıfırlama yöntemi ile ASE gürültü seviyesinin hesaplanması.....	24
2.13. Darbe çıkarma yöntemi ile ASE ölçümü için örnek bir zaman çizelgesi.....	25
2.14. Darbe çıkarma yöntemi ile ASE seviyesinin belirlenmesi için örnek bir ölçüm düzeneği.....	25
3.1. Tekdüze (a) ve cıvıtlı (b) bir FBG'nin genel yapısı.....	26
3.2. FBG içerisinde meydana gelen yansıma.....	27
3.3. FBG'nin iletim spektrumu.....	28
3.4. Sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri için kurulan deneysel düzenek.....	29
3.5. FBG Bragg dalga boyunun sabit bağıl nem altında sıcaklık değişimine tepkisi.....	30
3.6. FBG Bragg dalga boyunun sabit sıcaklık altında bağıl nem değişimine tepkisi.....	30
3.7. X yönündeki gerilme karakterizasyonu için kurulan deneysel düzenek.....	31

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil	Sayfa
3.8. FBG Bragg dalgaboyunun X yönünde uygulanan germe/bırakma altındaki değişimi.....	31
4.1. Lazer kavite kontrollü L-EDFA tasarımı.....	32
4.2. Lazer kavite yapısı.....	34
4.3. Simetrik iki adet dar bantlı FBG kullanılan F-P lazer kontrollü L-EDFA’da ortalama popülasyon ters birikimi faktörünün kavite kaybı ile değişimi (FBG yansıtma oranları: (a) 1534 nm, (b) 1542 nm, (c) 1550 nm, (d) 1554 nm, (e) 1558 nm).....	36
4.4. Simetrik iki dar bantlı FBG kullanılan F-P lazer kontrollü L-EDFA’da kazanç spektrumunun Bragg dalgaboyu ile değişimi (FBG yansıtma oranları: (a) 1534 nm, (b) 1542 nm, (c) 1550 nm, (d) 1554 nm, (e) 1558 nm).....	37
4.5. Simetrik iki dar bantlı FBG kullanılan F-P lazer kontrollü L-EDFA’da kazanç spektrumunun FBG yansıtma oranıyla değişimi (Bragg dalgaboyu 1558 nm iken)....	38
4.6. Liekki firmasının Er30 erbiyum katkılı fiberinin (a) 980 nm ve (b) 1500 nm dalgaboyu bölgeleri için soğurum ve ışıma kesiti.....	39
4.7. Optiwave 4.0 yazılımı ile simüle edilen (a) klasik (b) lazer kavite kontrollü L-EDFA konfigürasyonu.....	40
4.8. Klasik ve lazer kavite kontrollü L-Band EDFA konfigürasyonları için popülasyon tersbirikim faktörünün EDF uzunluğu ile değişimi	41
4.9. Klasik ve lazer kavite kontrollü L-EDFA için 1585 nm dalgaboyunda kazanç (a) ve NF’in (b) sinyal giriş gücü ile değişimi.....	42
4.10. Lazer kavite kontrollü L-EDFA için FBG Bragg dalgaboyu 1558 nm iken farklı L-bandı sinyal dalga boyları için kazanç kenetleme performansı.....	43
4.11. Klasik ve lazer kavite kontrollü L-Band EDFA için -30 dBm giriş sinyal gücünde a) kazanç ve b) NF spektrumları.....	44
5.1. İki farklı pompa dalgaboyunda çalışan ileri yönlü C-Band EDFA düzeneği.....	46
5.2. 976 nm ve 974 nm dalgaboyunda çalışan iki farklı pompa lazer için EDFA kazanç ve gürültü faktörünün pompa gücü ile değişimi. (Giriş sinyal dalgaboyu 1550 nm, giriş sinyal gücü -30 dBm’dir.).....	47
5.3. 976 nm ve 974 nm dalgaboyunda çalışan iki farklı pompa lazer kaynağı için EDFA kazanç ve gürültü faktörünün giriş sinyal gücü ile değişimi (Sinyal dalgaboyu 1550 nm, pompa gücü 90 mW’tır.).....	48
5.4. 976 nm ve 974 nm dalgaboyunda çalışan iki farklı pompa lazer kaynağı için EDFA kazanç ve gürültü faktörünün sinyal dalgaboyu ile değişimi. (Giriş sinyal gücü -30 dBm, pompa gücü 90 mW’tır.).....	49
5.5. Klasik yapıli çift yönlü pompalamalı L-EDFA deneysel düzeneği.....	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6. Klasik yapılı L-EDFA’da ileri ve geri yönlü pompa lazer dalgaboylarının değiştirilmesine bağlı ileri yönlü ASE gürültü spektrumlarının kıyaslanması.....	50
5.7. Klasik yapılı L-EDFA’da pompa lazerlerinin 974 nm ve 976 nm iki farklı konfigürasyonu için kazanç ve NF’in giriş sinyal gücü ile değişimi.....	51
5.8. Klasik yapılı L-EDFA’da 974 nm ve 976 nm’de çalışan pompa lazer konfigürasyonlarına bağlı, kazanç ve NF spektrumları.....	52
5.9. Lazer kavite kontrollü L-EDFA deneysel düzeneği.....	53
5.10. L-EDFA’da FBG konfigürasyonuna bağlı ileri yönlü ASE’nin klasik yapı ile karşılaştırılması.....	54
5.11. L-EDFA’da farklı FBG konfigürasyonları için giriş sinyal güç değişimine bağlı kazanç ve NF performansı.....	55
5.12. L-EDFA’da farklı FBG konfigürasyonları için giriş sinyal dalgaboyu değişimine bağlı kazanç ve NF performansı.....	56
5.13. Lazer kavite kontrollü L-EDFA’da ileri yönlü ASE gürültüsünün farklı Bragg dalgaboyları için karşılaştırılması.....	58
5.14. Farklı Bragg dalgaboyları için lazer kavite kontrollü L-EDFA’da (a) kazanç ve (b) NF’in giriş sinyal gücü ile değişimi (sinyal dalgaboyu 1585 nm).....	59
5.15. 1550 nm, 1554 nm ve 1558 nm Bragg dalgaboylarında tasarlanan L-EDFA’da kazancın farklı giriş sinyal dalgaboylarında (a) 1578 nm ve (b) 1570 nm değişimi.....	61
5.16. 1570 nm, 1578 nm ve 1585 nm sinyal dalgaboyları için L-EDFA kazanç ve NF’in giriş sinyal gücü ile değişimi. FBG1+FBG2 Bragg dalgaboyu $\lambda_B=1558$ nm.....	62
5.17. Sinyal giriş dalgaboyuna bağımlı farklı Bragg dalgaboyları için L-EDFA (a) kazanç ve (b) NF performansı.....	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bir kısım nadir toprak elementi katkı iyonları ve özellikleri.....	13
2.2. Optik yükselteç yapılarının çeşitli karakteristiklerinin karşılaştırılması.....	14
3.1. Lazer kavite kontrollü L-EDFA tasarımında kullanılan FBG’lerin teknik özellikleri....	28
4.1. Liekki Er30 erbiyum katkılı fiber parametreleri.....	35
6.1 Literatürdeki çalışmaların kazanç kenetleme performanslarının kıyaslanması.....	67
6.2 Literatürdeki çalışmaların kazanç spektrumu düzleştirme performansları.....	68



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
P_{out}	Çıkış gücü
P_{in}	Giriş gücü
R_{12}	Pompa fotonu soğurum oranı
R_{21}	Pompa fotonu ışıma oranı
W_{12}	Sinyal fotonu soğurum oranı
W_{21}	Sinyal fotonu ışıma oranı
N_1	Taban seviye iyon popülasyonu
N_2	Yarı kararlı seviye iyon popülasyonu
N_t	Toplam iyon popülasyonu
n_{sp}	Spontane ışıma faktörü
A_{21}	Spontane ışıma oranı
I	Işık şiddeti
h	Planck sabiti
ν	Optik frekansı
B_0	Optik band genişliği
P_{ase}	Yükseltilmiş spontane ışıma gücü
A_{eff}	Fiber etkin alanı
$a_{p,s}$	Pompa ve sinyal dalgaboyundaki arkaplan kaybı
$F_{sig,shot}$	Sinyal vurma gürültüsü
$F_{sp,shot}$	ASE vurma gürültüsü
F_{sig-sp}	Sinyal-ASE çarpışma gürültüsü
F_{sp-sp}	ASE-ASE çarpışma gürültüsü
F_{mpi}	Çok yollu girişim gürültüsü
F_{total}	Toplam gürültü
h	Planck sabiti
λ	Dalgaboyu
G	Kazanç
n_s	Yavaş polarizasyon eksenine için kırılma indisi
n_f	Hızlı polarizasyon eksenine için kırılma indisi
n_1	Fiber öz kırılma indisi
n_2	Fiber çekirdek kırılma indisi
Λ	Izgara saçak aralığı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Simge** n_{eff} λ_B $\bar{n}$ **Açıklama**

Etkin kırılma indisi

Bragg dalgaboyu

Ortalama popülasyon ters birikimi



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
EDFA	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
C-Band	Klasik dalgaboyu bandı
L-Band	Uzun dalgaboyu bandı
DWDM	Yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama
ASE	Yükseltilmiş spontane ışım
FBG	Fiber Bragg ızgara
nm	Nanometre
dB	Desibel
Gb	Gigabit
PID	Oransal/integral/türevsel
F-P	Fabry-Perot
SOA	Yarı iletken optik yükselteçleri
DFA	Katkılı fiber yükselteçler
EDF	Erbiyum katkılı fiber
OSA	Optik spektrum analizör
SNR	Sinyal/gürültü oranı
NIR	Yakın kızılaltı bölgesi
mW	Miliwatt
dBm	Desibel miliwatt
$\mu\epsilon$	Mikroepsilon
L	Uzunluk
L_C	Kavite kaybı
$r_{1,2}$	FBG yansıtma oranı
δ_c	İletim ve ek kaybı

1. GİRİŞ

1.1. Fiber Optik Haberleşme Sistemlerindeki Gelişmeler

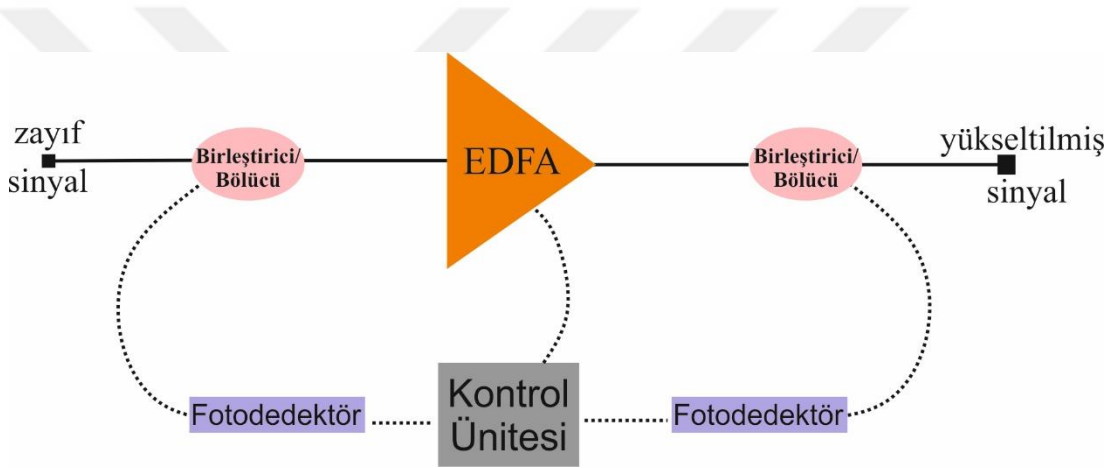
Işık dalgalarının yeryüzü atmosferinde işe yarar bir mesafede iletimi pratikte mümkün değildir. Çünkü su buharı, oksijen ve havadaki küçük parçacıklar ultra yüksek ışık frekanslarını soğurarak zayıflatır. Bu da uzun mesafelerde iletişimi imkânsız bir hale getirir. Bu sebepten dolayı ışık dalgalarının optik fiber gibi belirli bir yapıda kılavuzlanması gerekmektedir. Diğer taraftan, optik fiberde sinyal iletimi sırasında meydana gelen mesafeye bağımlı zayıflama kaybı (~ 0.2 dB/km), fiber ek kaybı (0.1-0.2 dB/ek) gibi çeşitli zayıflatıcı etkilerden dolayı alıcı kısımda iletilen sinyal istenilen düzeyde algılanamamaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için kullanılan optik kuvvetlendiriciler içerisinde erbiyum katkılı fiber yükselteçler (EDFA) günümüzde geniş band aralığı, yüksek kazanç, düşük gürültü faktörü, düşük polarizasyona bağımlı kayıp ve kazanç, basit yapı ve düşük maliyetli olması gibi sağladığı birçok avantaj nedeniyle diğer kuvvetlendiriciler içerisinde ön plana çıkmaktadır. 1987 yılı öncesinde, laboratuvar ortamında daha çok yarı iletkenli kuvvetlendiriciler ve Raman fiber kuvvetlendiricileri üzerinde çalışmalar yapılmıyordu. Daha sonrasında ise ortaya çıkan erbiyum katkılı fiber yükselteçler bu alandaki boşluğu doldurup, dalgaboyu çoğullamalı teknik aracılığı ile uzun mesafeli haberleşme sistemlerinde kapasitenin artmasına neden olmuşlardır.

David Payne ve ekibinin fiber lazer üzerine yaptıkları bir çalışmada katkılı optik fiber üretimine yönelmişlerdir. Bunun için doğada nadir bulunan toprak elementlerini üretim esnasında standart silika fiberin içerisine katılmışlardır. 1986 yılında yapılan bir çalışmada 3 metre uzunlukta erbiyum katkılı fibere 514.5 nm dalgaboyunda çalışan argon lazeri ile pompalama yapılmış ve sonucunda 1536 nm dalgaboyunda 26 dB'lik kazanç elde edilmiştir (Payne vd., 1986). Sonraki yıllarda British Telecom Laboratuvarında yapılan çalışmalarda ise, pompalama bandı için erbiyum iyonunun soğurum spektrumu incelenmiş ve 660 nm, 810 nm, 980 nm ve 1530 nm dalgaboylarında Er^{3+} iyonunun foton soğurmada diğer dalgaboylarına göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. (Desurvire ve Simpson, 1989). İlerleyen yıllarda erbiyum katkılı fiber için yapılan optimum pompalama dalgaboyu çalışmalarında ortaya çıkan sonuç göstermektedir ki 980 nm ve 1480 nm dalgaboylarında yapılan pompalama sonucunda önemli miktarda uyarılmış seviye (ESA) etkisi oluşmamaktadır (Laming vd., 1988). EDFA performanslarının soğurumu istenilen seviyeye gelmesi ile birlikte 1990'lı yıllarda denizaltı ve uzak mesafeli iletim için ilk yoğun dalgaboyu çoğullamalı (DWDM) sistemleri gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan araştırmacılar, kazanç veriminin nisbeten düşük ve dalgaboyuna bağımlı olduğu 1570-1610 nm aralığında (L-Bandında) optik yükselteçler geliştirilmesi üzerine çalışmaktadırlar (Hetch, 2002).

1.2. EDFA’larda Kazanç Kontrolü

1.2.1. Elektronik tabanlı kazanç kontrol yöntemleri

Erbiyum katkılı fiber yükselteçlerde kazancın kontrol edilmesi genel olarak iki farklı yöntemle yapılabilir. İlki olan elektronik kontrol yapısı (Song vd, 2012; Jacobson vd. 2002; Hosung vd., 2000, Bianciotto vd. 2003; Motoshima vd. 2001; Yücel vd. 2014; Jolley vd. 1997; Lelic vd. 2001; Lu vd. 2003) şekil 1.1’de görülmektedir. Bu kontrol yönteminde pompa sinyali, giriş sinyali ve/veya EDFA’ya dışarıdan uygulanan harici bir çekirdek sinyali ve çıkış sinyal gücünden alınan geri beslemelere bağlı elektronik olarak kontrol edilerek EDFA kazancının sabitlenmesine çalışılır.



Şekil 1.1. EDFA’da elektronik kazanç kontrolü

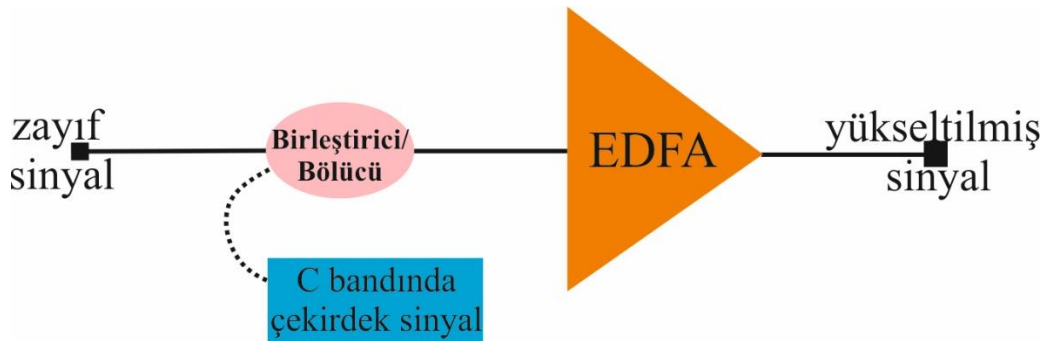
Bianciotto vd. 2003 yılında yaptıkları çalışmada optoelektronik elemanlar kullanarak lineer geri-besleme kontrol yapısı oluşturmuşlardır. Harici bir kompanze lazer kaynağı kullanmamasıyla ön plana çıkan bu sistemde EDFA’nın giriş ve çıkışındaki sinyali sürekli kontrol ederek pompa lazeri sürücü akımını ayarlanmaktadır. Böylelikle kazancın giriş gücüne göre değişimini minimize edilmiştir. Song vd. 2012 yılında yaptıkları çalışmada ise WDM sistemlerinde kullanılan EDFA’lardaki kazancı kontrol etmek için oransal/integral/türevsel (PID) içeren bir yapı geliştirmişlerdir. Dijital bir kontrol sistemine aktarılan pompa lazeri, EDFA giriş ve çıkışındaki güç değerleri geliştirilen algoritma tekniği ile kontrol edilmektedir. Bunun sonucunda kazanç-geçici süresi 30 μ s altına düşürülmektedir. Böylelikle kanal ekle/çıkar durumlarındaki gecikmeler minimize edilmiştir. Yücel vd. 2014 yılında yaptıkları diğer çalışmada C-Band EDFA’da kazanç kontrolü için fuzzy lojik yaklaşımı uygulamışlardır. Bu yöntemde sinyal giriş dalgaboyu ve gücüne göre pompa lazerinin sürücü akımı ayarlanmıştır. Böylelikle EDFA kazanç spektrumunda düzleşme gerçekleştirilmiştir. Yakın zamanda yapılan bir diğer

çalışmada, Ishii vd. (2016) dinamik optik anahtarlama koşulları altında kazançta oluşan değişimleri geliştirdikleri otomatik kazanç kontrol mekanizması ile kontrol altına almışlardır. Geliştirdikleri hızlı elektriksel ileri-beslemeli kontrol mekanizması ile kaskod yapıdaki EDFA'ların pompa lazeri sürücü akımlarını ayarlayarak kanal ekle/çıkar durumunda kazançtaki değişimi 0.3 dB'e kadar düşürmüşlerdir. Lu vd. (2003) geniş bir band aralığında gerilim kontrollü fiber kazaç eğimi denetleyici ve kazanç düzleştirici filtre yardımıyla C+L Bandında kazanç spektrumunda düzeltirme elde etmişlerdir. Önerilen bu yöntemde, sayısal sinyal işlemci kullanarak çıkış gücünü düzeltirmek için gerekli olan transfer fonksiyonu hesaplanarak pompa güçlerinde gerekli ayarlamalar yapılmaktadır.

Günümüzde kısmen de olsa bu tip kazanç kontrol yapıları üzerine araştırmalar devam etmektedir. Ayrıca bu yöntemde iletişim hızı, kullanılan elektronik ekipmanların hızına bağımlı olmakla beraber özellikle kanal ekle/çıkar durumunda yaşanan gecikmeler hala ciddi bir problem oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayı daha yüksek performanslı, tepki süresi düşük ve tümüyle optik elemanlardan oluşan optik tabanlı kontrol yapıları tercih edilmektedir.

1.2.2. Tümüyle optik tabanlı kazanç kontrol yöntemi

Tümüyle optik kazanç kontrollü EDFA yapılarında performans iyileştirmesi farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu yöntemlerden birisi de (şekil 1.2) bir C-Bandında çekirdek sinyali enjekte ederek (Altuncu, 2006; Altuncu ve Başgümüş, 2005; Lin ve Ho, 2012; Sulaiman vd., 2004; Lee vd., 2014) L-Bandındaki zayıf sinyaller için ikincil pompa kaynağı oluşturulmasına dayanmaktadır.



Şekil 1.2. C-bandında bir çekirdek sinyali enjekte edilerek L-EDFA'da kazanç kontrolünün yapılması.

Altuncu vd. 2005 yılında yapmış olduğu L-Band EDFA kazanç iyileştirme çalışmasında hem ileri hem de geri yönlü pompalanan L-EDFA'da ileri ve geri yönlü yükseltilmiş

kendiliğinden ışıma (ASE) sinyalleri %50-%50 özellikli optik birleştirici ile birleştirildiği döngü tipi tasarım gerçekleştirilmiştir. Girişte L-Band sinyal ile birlikte C-Bandında bir çekirdek sinyali enjekte edilerek ikincil pompa etkisi oluşturulmuştur. Böylelikle L-Band bölgesinde pompa dönüşüm veriminde artış gerçekleşmiş, buna bağlı giriş sinyali 1585 nm’de iken kazançta 9.5 dB’lik artış ve gürültü faktöründe ise 2.6 dB’lik azalma meydana gelmiştir.

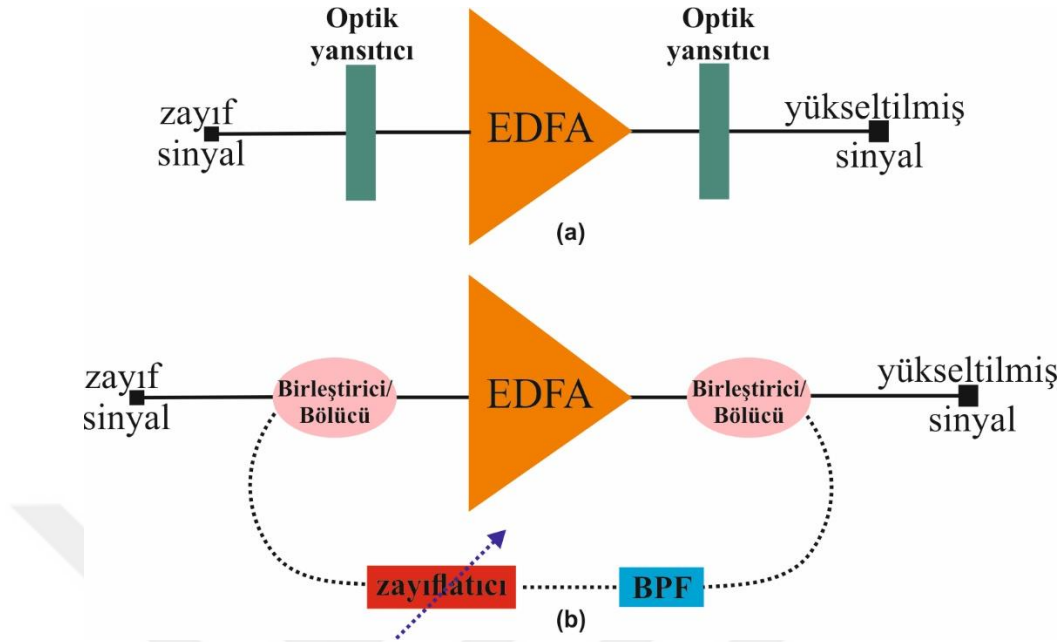
2012 yılında Lin ve Ho yaptıkları kazanç kenetleme çalışmasında klasik ileri yönlü C-EDFA’da giriş sinyali ile birlikte dışardan harici 1545 nm dalgaboyunda ton sinyali uygulanmıştır. Bunun sonucunda C-Bandi bölgesinde kazanç kenetlemesi ile birlikte 0.48 dB’lik salınım ile kazanç spektrumu düzleşme elde edilmiştir. Ancak, bu çalışmada gürültü faktörü ile ilgili herhangi bir bilgi verilmemiştir.

Lee vd. 2014 yılında yaptıkları çalışmada ileri yönlü klasik yapıdaki C-EDFA’ya harici uyguladıkları 1535 nm ton sinyali sayesinde yaklaşık 15 dB’lik bir kazanç ortalamasında 25 dB’lik bir dinamik aralıkta kazancı kenetlemeyi gerçekleştirmişlerdir.

Sulaiman vd. 2004 yılındaki yaptıkları bir çalışmada L-Band EDFA’ya optik sirkülatör yardımıyla C-Bandından çalışan FBG üzerinden ikincil pompa etkisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda 15.2 dB değerinde -40 dBm ile -10 dBm aralığında 0.3 dB salınım ile kazanç kenetlemesi meydana gelmiştir. İkincil pompanın gücünde zayıflatma yaptıklarında ise kazanç kenetlemenin dinamik aralığında azalma meydana gelip kazanç değerinde artış yaşanmıştır. Bunların dışında gürültü faktörü değerinde ise yaklaşık 2 dB bir artış meydana gelmiştir.

Ancak, bu yöntemde dışarıdan harici bir lazer kaynağına ihtiyaç duyulduğundan hem maliyet artışı olmakta hem de ilave optik elemanların entegrasyon zorluğu sistemin yönetimini zorlaştırmaktadır.

Literatürde EDFA’da kazanç iyileştirme ve/veya kontrol etmede çok sık kullanılan bir diğer yöntem ise klasik EDFA yapısı içerisinde belirli bir bölgede lazer kavitesi oluşturulmasıdır. Bu yöntem, şekil 1.3a’da görüldüğü gibi F-P lazer yapısı (Durak ve Altuncu, 2017; Yang vd., 2016; Bing vd., 2003; Anthony vd., 2014; Liqun vd., 2010) veya şekil 1.3b’de görüldüğü gibi ring lazer yapısı (Lin vd., 2011; Ahn vd., 2004; Al-Monsoori vd., 2014; Chang vd., 2013; Yi vd., 2005; Ji vd., 2005; Malik vd., 2012) oluşturularak gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemdeki genel prensip, kullanılmayan ileri ve geri yönlü ASE gürültüsünün bir kısmının yansıtıcı tipte darbant fiber Bragg ızgaralar (FBG) veya ring yapısında bant geçiren filtre yardımıyla EDFA’ya tekrar enjekte edilmesidir. Böylelikle EDF’da mevcut pompa kaynakları dışında C-Bandında ikincil bir pompa kaynağı oluşturulmuş olur.



Şekil 1.3. Lazer kontrollü kazanç kenetlemeli L-Bant EDFA’larda (a) F-P lazer yapısı (b) ring lazer yapısı.

Durak ve Altuncu’nun 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada klasik yapıdaki L-EDFA’daki ileri ve/veya geri yönlü ASE gürültüsünün bir kısmı 1533 nm FBG kullanılarak geri enjekte edilmiştir. Böylelikle oluşan ikincil pompa etkisiyle giriş sinyali 1585 nm iken kazançta 4.5 dB artış ve gürültü faktöründe ise 1 dB azalma olmuştur. Ayrıca yapılan bu çalışmada sisteme eklenen FBG konumunu da incelenmiş, en iyi performansın hem ileri hem de geri yönlü ASE gürültüsünün bir kısmının geri enjekte edildiği durum olduğu ortaya çıkmıştır.

Yang vd. 2016 yılında yaptıkları kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme çalışmasında C-Bandında elde ettikleri ASE gürültüsünün bir kısmı FBG çifti üzerinden L-Band EDFA geri enjekte etmişlerdir. Bragg dalgaboyunu optimize ederek kazanç kenetlemenin giriş sinyali dalgaboyuna bağımlı değişimini incelediklerinde, en iyi performansı 1553.4 nm ve 1554.7 nm’de 20.2 dB’lik kazanç ortalaması ve 0.44 dB’lik salınım ile bulmuşlardır.

Liqun vd. 2010 yılında yaptıkları simülasyon çalışmasında lazer kavite kontrollü L-EDFA’daki erbiyum katkılı fiberin uzunluğu optimize edilerek kalıcı-hal durumundaki kazanç performansı incelenmiştir. L-EDFA düzeneğinde yaptıkları optmizasyon ile 35 nm band genişliğinde 0.8 dB’lik salınımında kazanç spektrum düzleşme elde etmişlerdir. Diğer taraftan

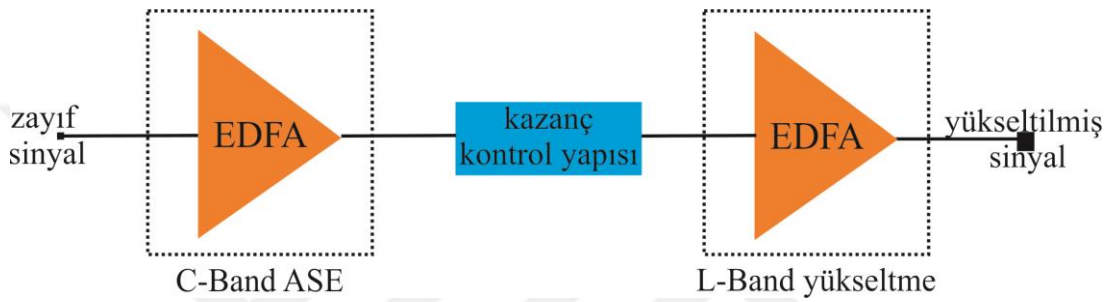
erbiyum iyonlarının katkılama yoğunluğu da arttırılarak kazanç spektrum düzleşme band genişliğinde artış meydana gelmiştir.

Diğer taraftan ring lazer yapısındaki çalışmalara bakıldığında 2011 yılında Lin vd. yaptıkları çalışmada optik sirkülatör yardımıyla C-Band FBG üzerinden EDFA'ya geri enjekte edilen ASE gücünün kazançtaki etkisi incelenmiştir. Geri enjekte edilen ASE gücü azaldıkça kazanç kenetleme performansında düşme yaşanmıştır. Bununla beraber kazanç spektrumunda düzleşme performansı incelenirken, dışarıdan harici bir C-Band ton sinyali uygulanmıştır. Sonuç olarak sadece ring lazer yapısının yeterli olduğu ortaya çıkmıştır.

Al-Mansoori vd. 2014 yılında yapmış oldukları bir çalışmada 980 nm'lik pompa lazeri C- ve L-Band EDFA'lara paylaştırılmıştır. C/L optik birleştirici/ayırıcı ve ayarlanabilir band geçiren filtre yardımıyla kazanç kontrolü sağlanmıştır. 0 dBm sinyal giriş gücünde 12.5 ± 1.3 dB kazanç düzleşmesi tüm L-Bandı boyunca elde edilmiştir. Ring lazer yapısında yapılan diğer bir çalışmada, C+L Band EDFA'da farklı sinyal giriş gücü ve dalgaboyuna sahip 14 optik taşıyıcı sinyal için yapılan ölçümlerde kazanç düzleştirme salınımı 0.11 dB'ye kadar düşürülmüştür. Diğer taraftan sinyal giriş gücündeki kenetleme performansı optik band geçiren filtrenin band genişliği daraldıkça artmış ve yaklaşık ~ 25 dB'lik bir dinamik aralık elde edilmiştir. Malik vd. yaptıkları bir deneysel çalışmada kazanç kenetlemeyi 20 dB'lik bir aralıkta 0.5 dB'lik bir salınım ile elde etmişlerdir. Bu yöntemde fiber birleştirici üzerinden ayarlanabilir optik zayıflatıcı ve dar bantlı filtre yardımıyla ASE sinyalinin geri enjekte edilmesine dayanmaktadır. Yüksek lasing seviyeleri için pompa gücünde tükenme meydana gelmekte ve böylelikle dalgaboyuna bağlı kazançta azalma oluşmaktadır. Bunun sonucunda kazanç salınımindaki değişimde azalma meydana gelmektedir. Literatürde yapılan başka bir çalışmada Li vd. (2005), C ve L Bandındaki girişim olayından etkilenmemek için yaptıkları paralel konfigürasyonda, ASE sinyal gücünün yarısı zamanda geciktirici ve filtre özellikli eleman yardımıyla EDFA'ya geri enjekte edilmiştir. Ayrıca L-Bandında ikincil pompalama için FBG kullanmışlardır. Sonuç olarak, geniş bir dinamik aralıkta kazancı kenetleyerek ~ 5.5 dB'lik gürültü faktörü elde etmişlerdir.

Lazer kavitesi kontrollü yapı sayesinde, tezin ilerleyen bölümlerinde de daha detaylı anlatılacağı gibi, kolaylıkla kazanç kontrolü sağlanabilmektedir. Dışarıdan ilave bir lazer sinyali uygulanmadan daha düşük maliyetle, geniş bir bant aralığında kolay ve kararlı bir biçimde kazanç geniş bir sinyal giriş gücü ve dalgaboyu aralığında sabit tutulabilmektedir.

Çift katlı EDFA yönteminde ise literatürde yapılan birçok çalışma ile (Jin vd., 2006; Yang vd., 2016; Yang vd., 2015; Zhu vd., 2014; Liang vd., 2008) kazanç kontrolü sağlanmaktadır. Bu yöntemde çift katlardan biri L-Bandında yükseltme işlemi yapılabilecek şekilde tasarlanır. Diğer kat ise C-Bandındaki çalışan EDFA şeklindedir. Yansıtıcı tipli dar bantlı FBG, band geçiren optik filtre vb. pasif optik elemanlar sayesinde C-Bandındaki ASE gürültüsünün bir kısmı, L-Bandında çalışan EDF'ye enjekte edilerek diğer yöntemlerdeki gibi ikincil pompa etkisi oluşturulur. Birden fazla pompa kaynağı ve EDF kullanıldığından dolayı bu yöntemde maliyet artmaktadır.



Şekil 1.4. Çift katlı EDFA genel yapısı.

Çift katlı EDFA yöntemi için yapılan çalışmalardan birinde (Jin vd., 2006) geri yönlü C-Band ASE sinyali optik sirkülatör yardımıyla optik zayıflatıcı üzerinden L-Band EDFA'ya enjekte edilmektedir. Yapılan pompa gücü ve erbiyum katkılı fiber uzunluğu optimizasyonu ile 1570 nm ile 1600 nm arasında 0.77 dB'lik salınım ile kazanç spektrumunda düzleşme meydana gelmektedir. Bir başka çalışmada Yang vd., (2016) çift katlı EDFA'nın L-Band kısmında C-Bandında çalışan FBG çifti kullanarak geniş bir dinamik aralıkta (1570 nm-1610 nm) 20.2 dB'lik ortalama kazanç değerinde düzleşme ile 30 dB'lik geniş bir dinamik aralıkta, kazançta kenetlemeyi elde etmişlerdir. Aynı araştırma grubunun 2015 yılında yaptıkları bir diğer çalışmada, tek katlı L-EDFA, çift katlı EDFA yapısı ve çift katlı FBG'li EDFA yapısı için kazanç kontrolü performansını incelediklerinde çift katlı EDFA yapısının daha üstün performansa sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca çift katlı EDFA 'da L-Bandı kısmına ekledikleri FBG ile 1570 nm ile 1610 nm aralığında düşük salınımlı (± 0.4 dB) ve yüksek kazanç ortalamalı (28.83 dB) düzleşmiş bir spektrum yapısı oluşturmuşlardır. Liang vd. 2008 yılında yaptıkları bir çalışmada ise DWDM sistemleri için spektrumu düzleştirilmiş kazancı yüksek gürültü faktörü düşük FBG ve çift-geçiş yöntemi kullanarak L-Bandında çalışan bir EDFA tasarlamışlardır. Yaptıkları farklı 5 konfigürasyon ile kazanç salınımı minize ederek 4 kanaldan 32 kanala ekleme yaptıklarında her bir kanal gücünün -23 dBm olduğu durumda kazanç salınımı 2.9 dB ve gürültü faktörünü 5 dB'nin altına düşürmeyi başarmışlardır.

Ayrıca literatürdeki bazı çalışmalarda EDFA ile beraber Raman yükselteci (Singh vd., 2013; Hasan vd., 2013; Singh vd., 2013) kullanılarak da DWDM sistemlerde yüksek performanslı genişband optik yükseltme gerçekleştirilmiştir. Bu tarzda bir hibrit model EDFA sayesinde kazanç kontrolü yapılırken Raman yükselteci yardımıyla da sistemin iletim performansları iyileştirilmektedir. Singh vd., 2013 yılında yaptıkları bir çalışmada, dağıtılmış raman yükselteci ve EDFA konfigürasyonlarına sahip çift katlı bir hibrit optik yükselteç yapısı kullanarak 25 GHz kanal boşluğuna sahip DWDM sistemi için kazanç performansı analizi yapılmıştır. Sabit giriş gücü altında kazanç salınımı <4.5 dB tutmuşlardır. Diğer taraftan maksimum giriş gücünü ise >8.9 dBm olabileceği sonucuna varmışlardır.

1.3. Araştırma Hedefi ve Tezin Yapısı

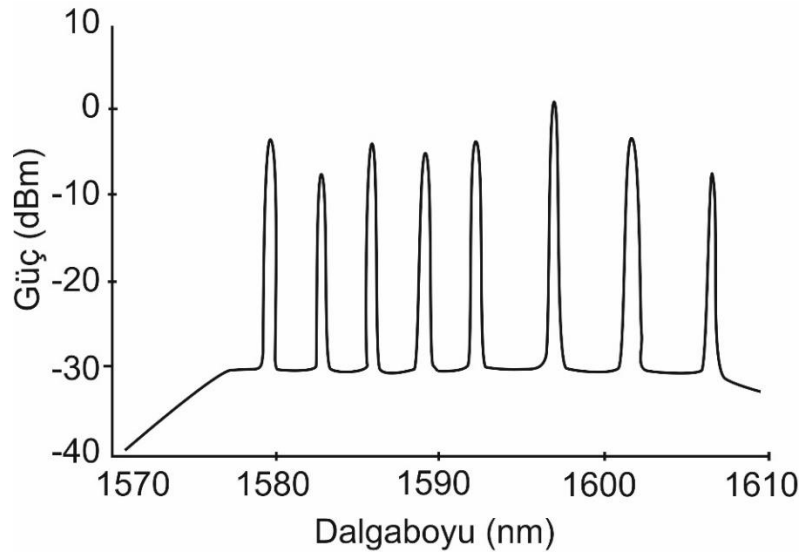
Günümüzde, toplumu oluşturan bireyler, ihtiyacı olan bilgiye bulunduğu konum ve herhangi bir zaman dilimi içerisinde hızlı ve kesintisiz şekilde ulaşmak istemektedirler. Bu sebeple mevcut haberleşme altyapılarında, iletişim kapasitesini arttıracak iyileştirme yöntemleri sıklıkla uygulanmaktadır. Mevcut erişim teknikleri içerisinde elektromanyetik bağışıklık, elektriksel izolasyon, düşük kayıp, yüksek bandgenişliği, kanal başına düşük maliyet, zorlu çevre şartlarına uyum, küçük çaplı ve hafif oluşu, güvenli bilgi iletimi ve sinyaller arası girişimin oluşmaması gibi üstünlükleri nedeniyle fiber optik tabanlı iletişim sistemleri ön plana çıkmaktadır (Keiser, 2011).

Silika tabanlı optik fiberler, yapısal olarak 1530-1610 nm penceresinde düşük zayıflama (~ 0.20 dB/km) göstermektedirler. Uzak mesafeli haberleşmede zayıflayan optik sinyallerin, düşük gürültülü ve kazanç verimi yüksek bir şekilde kuvvetlendirilmesine olanak sağlayan fiber optik yükselteçlerin kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yükselteç yapıları içerisinde sahada en çok kullanılan üstün yetenekleri nedeniyle erbiyum katkılı fiber optik yükselteçler (EDFA) önemli yer tutar. Diğer taraftan artan iletişim talebini karşılamak için tek bir fiber kablo üzerinden çok kanallı bilgi aktarımını sağlayan yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (DWDM) sistemlerde, dalgalı kanal giriş güçlerinden etkilenmeyen kazanç ve NF değerlerine sahip kanal ekle/çıkar yapısına uygun bir şekilde geniş bir dalgaboyu aralığında çalışabilen EDFA'lara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden son yıllarda DWDM iletişim sistemlerinde 1570 nm ile 1610 nm aralığındaki EDFA yapıları üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Altuncu, 2006).



Şekil 1.5. DWDM sistemlerde sinyal iletimi.

Uzun dalgaboyu bandında (long wavelength band, L-band) çalışan EDFA, C-Bandında çalışan EDFA ile kıyaslanabilir kuvvetlendirme işlemi yapabilmesi için yüksek oranda katkılanmış, daha fazla güç ile pompalanan ve daha uzun erbiyum katkılı fiberlere (EDF) gereksinim olduğunu göstermiştir (Altuncu, 2006). Diğer taraftan, DWDM sistemlerine uygun şekilde L-Bandında kazancın kontrol edilmesi günümüzde üzerinde çalışılan hala ciddi bir problemdir. Bu sebeple bu tez çalışmasında, sinyal giriş gücünden ve dalgaboyunda etkilenmeyen (şekil 1.5) L-Bandında çalışan bir EDFA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kazanç kontrolü için FBG tabanlı lazer kontrollü yöntem izlenmiştir. Böylelikle kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme yeteneklerine sahip gelişmiş bir EDFA tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Yapılan teorik, simülasyon ve deneysel çalışmalarla gerçekleştirilen L-Bandı EDFA'nın performansı karakterize edilmiştir.



Şekil 1.6. L-Band için örnek bir giriş sinyali.

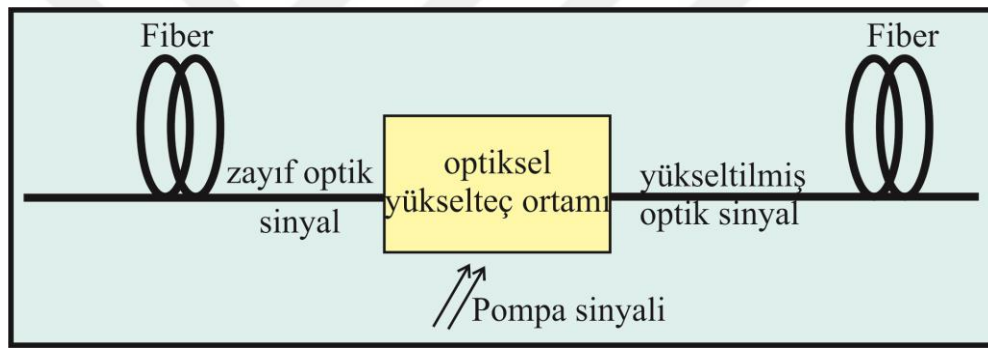
Yapılan bu tez çalışmasının 2. bölümünde, optik yükseltme, erbiyum katkılı fiber yükselteç teorisi, kazanç, gürültü faktörü hesaplanması ve ölçüm teknikleri hakkında detaylı bilgi verilmektedir. 3. bölümde ise lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın tasarımı, teorik analizi ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 4. bölümde klasik yapı ile lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın sinyal giriş gücü ve dalgaboyuna bağımlı olarak performanslarının analiz edilmesi ve karşılaştırılmasını içeren deneysel sonuçlar sunulmuştur. Tezin 5. bölümünde ise elde edilen tüm sonuçların değerlendirilmesi ve yeni önerilerde bulunulmuştur. Tez çalışması sırasında modelleme çözümleri için Matlab R2015a programı kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel ölçümlerden elde edilen tüm sonuçlar Grapher 12 programı yardımıyla görselleştirilmiştir.



2. EDFA TEORİSİ

2.1. Optik Yükselteçler

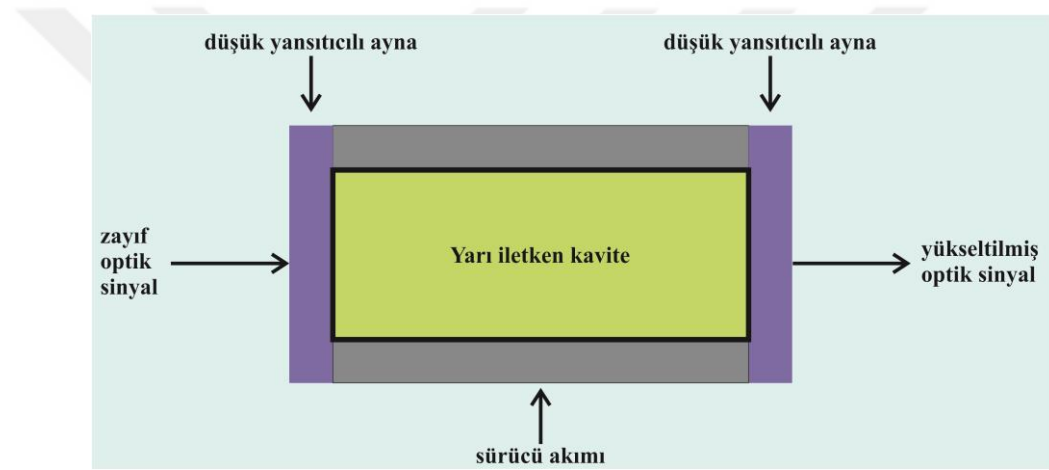
Veri iletişimde sıklıkla kullanılan fiber optik tabanlı haberleşme sistemlerinde mesafeye bağlı olarak iletilen sinyal zayıflamaktadır. Optik yükselteçler, zayıf sinyali elektriksel formata çevirmeden direkt olarak optik formatta yükseltme yapabilmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi optik yükseltece giren zayıf sinyal kuvvetlenmiş bir şekilde çıkmaktadır. Bu iki sinyal arasındaki enerji farkı, dışarıdan pompa ismi verilen bir kaynak yardımıyla elde edilir. Optik yükselteç ortamının fiziksel mekanizmalarına bağlı olarak kendi içlerinde; yarı-iletken optik yükselteçler (SOA), Raman saçılma tabanlı optik yükselteçler ve nadir toprak katkılı optik yükselteçler (DFA) şeklinde üç temel sınıfa ayrılmaktadırlar (Keiser, 2011).



Şekil 2.1. Optik yükselteçlerin genel yapısı.

Tüm optik yükselteçler uyarılmış ışımaya veya optik güç transferi işlemi sayesinde gelen sinyalin güç seviyesini artırırlar. SOA ve DFA’larda, popülasyon ters birikimi için gerekli olan mekanizma lazer diyotlarda meydana gelen uyarılmış ışımaya ile aynıdır. Ancak, optik geri besleme yapısına (düşük yansıtıcı yüzey kullanılır) ihtiyaç duyulmadığından optik yükselteçler, gelen zayıf sinyali sadece kuvvetlendirirler. Başka bir ifadeyle, bu işlem lazer diyotlar gibi koherant bir optik çıkış vermezler. Yükseltme işlemi için gerekli enerji pompa olarak adlandırılan harici bir kaynak kullanılır. Yarı-iletken yükselteçlerde, şekil 2.2’de görüldüğü gibi III ve V grup yarı iletken malzeme alaşımlarından (fosfor, galyum, indiyum, arsenik, vb.) oluşan bir aktif bölge bulunmaktadır. Yükseltilmek istenilen dalga boyu bölgesine göre aktif malzemedeki alaşım türü belirlenir. Pompa kaynağının sağladığı enerji ile aktif bölgedeki elektronlar uyarılır ve üst seviyedeki enerji bandlarına çıkmaları sağlanır. Ardından popülasyon ters birikimi meydana gelir. Gelen sinyaldeki fotonlar ise bu uyarılmış elektronları tetikleyerek, alt enerji seviyelerine düşürürler. Bu tetikleyici fotonların birden fazla elektronu uyarması sonucunda eşit miktarda

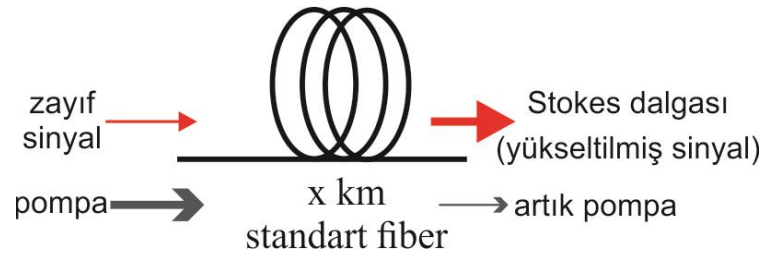
enerjiye sahip foton ışıması gerçekleşir ve böylelikle yükseltilmiş optik sinyal oluşur. Genel olarak SOA'lar, enerji tüketimi az, küçük boyutlu ve maliyeti düşük yapıya sahiptirler. Ayrıca, SOA'lar 1 ps ile 10 ps aralığı gibi düşük sürede kazanç cevabı verirler. Bu hızlı cevabın hem avantajı hem de dezavantajı mevcuttur. Avantajı, yüksek hızda anahtarlamalı ve sinyal işleme fonksiyonuna sahip optik ağlar için kullanıma uygun olmasıdır. Dezavantajı ise, belirli bir dalgaboyundaki kazancın birkaç Gb/s'e kadar olan hızlar için dalgalanmaya neden olmasıdır. Bu dalgalanma sonucunda diğer dalgaboylarındaki kazançlar da salınıma gireceği için genel kazanç etkilenir. Bunun sonucunda girişim (crosstalk) etkisi artar. Bu sebeple yükseltme işleminin geniş bir band aralığında yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.2. Yarı iletkenli lazer yükselteç yapısı.

Bir diğer optik yükselteç tipi olan Raman yükselteçlerde, SOA ve DFA'larda kullanılan kuvvetlendirme mekanizmasından farklı olarak pompa dalgaboyundaki yüksek güç (ör. 500 mW, 1480 nm'de) daha uzun dalgaboyundaki bilgi taşıyan (ör. -25 dBm, 1550 nm'de) sinyale transfer olur. Bu Raman yükseltme işlemi sırasında, popülasyon ters birikim sürecine ihtiyaç duyulmamaktadır. Optik fiberlerde yüksek güçlerde meydana gelen uyarılmış Raman saçılması (şekil 2.3) bu tip yükselteçlerin temelini oluşturmaktadır. Bu saçılmada atom ilk önce belirli bir miktarda enerjiye sahip fotonu (pompa) soğurur. Sonrasında soğurduğu fotondan daha düşük enerjili (daha uzun dalgaboylu, sinyal) bir foton bırakır. Böylelikle pompa dalgaboyundaki gücün büyük çoğunluğu gelen sinyale aktarılmış olur. Bu esnada soğurulan ve bırakılan foton arasındaki enerji farkı, madenin titreşimsel modu olan fonon'a (phonon) dönüşür. Daha uzun dalgaboyuna kayması Stokes kayması (shift) olarak adlandırılır. Örneğin, 1445 nm çalışan yüksek güçte bir pompa lazeri ile gerçekleşen uyarılmış Raman saçılması sonucunda 1535 nm'deki sinyal yükseltilebilmektedir. Yükselteç ortamı olarak standart iletişim fiberlerinin kendisi

kullanılmaktadır. Ayrıca, kazanç mekanizması ayrık ya da dağıtılmış yükseltme işlemi yapabilmektedir.



Şekil 2.3. Raman yükselteçlerinin yapısı.

Diğer bir optik yükselteç tipi olan katkılı fiber yükselteçlerde, silika tabanlı klasik optik fiberin öz kısmına, çizelge 2.1’de bir kısmı verilen doğada bulunan nadir toprak iyonları, özel üretim teknikleri ile katkılanmaktadır. Bu katkı iyonları, yakın kızılaltı (NIR) bölgesindeki pompa fotonlarını soğurup; kısa dalgaboyu bandı (S-Bant, 1450-1525 nm), geleneksel dalgaboyu bandı (C-Band, 1525 nm-1565 nm) ve uzun dalgaboyu band (L-Band, 1565 nm-1610 nm) bölgelerinde ışıma yapabilmektedirler. Günümüzde EDFA, silika fiber kaybının en düşük değerde olduğu 1550 nm penceresinde kuvvetlendirme işlemi yapabildiklerinden dolayı fiber optik haberleşme sistemlerinde ana yükselteç tipi olarak ön plana çıkmaktadırlar. Bununla beraber geniş bir band aralığında düşük gürültü ve yüksek kazanç performansına sahip EDFA’lar, yüksek pompa sinyal güç dönüşüm verimine sahiptirler (Becker vd., 1999).

Çizelge 2.1. Bir kısım nadir toprak elementi katkı iyonları ve özellikleri

Katkı iyonu	Ana fiber materyal	Işıma dalgaboyu aralığı
Neodimyum (Nd^{3+})	Silikat ve fosfat cam	0.9-0.95 μm , 1.03-1.1 μm , 1.32-1.35 μm
İterbiyum (Yb^{3+})	Silikat cam	1.0-1.1 μm
Erbium (Er^{3+})	Silikat, fosfat ve florür cam	1.5-1.6 μm , 2.7 μm
Tulyum (Tm^{3+})	Silikat, germanet ve florür cam	0.8 μm , 1.45-1.53 μm , 1.7-2.1 μm

Üç ayrı tipteki, optik yükselteçlerin genel özellikleri çizelge 2.2’deki karşılaştırılmalı biçimde listelenmiştir. EDFA’lar, SOA ve Raman yükselteçlere göre daha yüksek kazanç, daha düşük NF, daha yüksek bandgenişliği gibi önemli avantajlara sahiptirler.

Çizelge 2.2. Optik yükselteç karakteristiklerinin karşılaştırılması

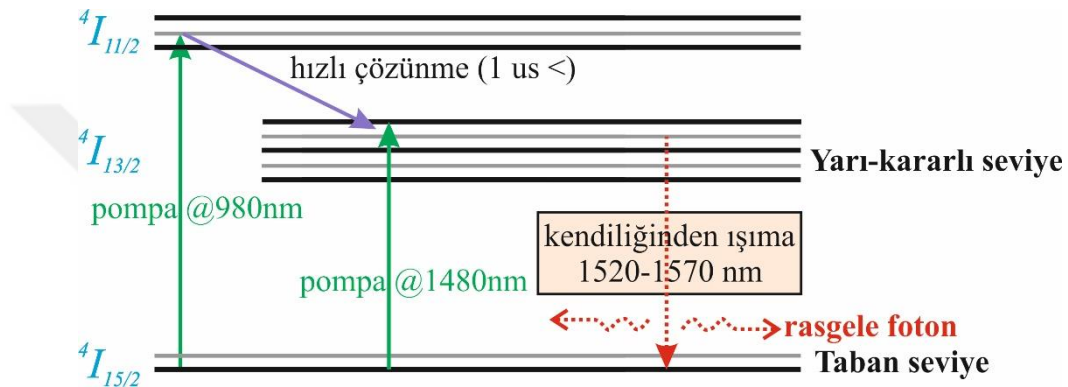
<u>Karakteristik</u>	<u>SOA</u>	<u>EDFA</u>	<u>Raman</u>
<u>Çalışma Dalgaboyu Aralığı</u>	Yarı iletken malzeme türüne bağlı	C,L Band	Pompa lazeri dalgaboyuna bağlı
<u>Kazanç (dB)</u>	> 20	> 30	> 15
<u>Gürültü Faktörü (dB)</u>	≤ 8	≤ 5	≤ 5
<u>Band genişliği</u>	~60 nm	~80 nm	~50 nm
<u>Polarizasyona Bağımlılık</u>	Evet	Hayır	Hayır
<u>Boyut</u>	< 2.5 cm ²	> 5 cm ²	> 5 cm ²
<u>Maliyet</u>	~1000 \$	~3000 \$	~9000 \$

2.2. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (EDFA)

Erbiyum katkılı fiberler, gereken pompalama şartları sağlandığı takdirde özellikle silika fiber kaybının en düşük olduğu 1550 nm bölgesinde ışıma yapabildikleri için fiber lazer ve yükselteç yapımında günümüzde sıkça tercih edilmektedir. Er^{3+} iyonunun enerji seviyeleri ve geçişleri incelendiğinde (Reisfeld vd., 1987; Weber, 1986; Haxing, 1986) taban seviye ($^4I_{15/2}$) ve yarı-kararlı seviye ($^4I_{13/2}$) arasındaki enerji boşluğunun büyüklüğü, iyonun yaşam ömrünün uzun sayılabilecek bir süre (~10 ms) olmasına neden olmaktadır. Böylelikle 980 nm veya 1480 nm dalgaboylarında pompalama yapıldığında belirtilen enerji seviyeleri arasında istenilen düzeyde popülasyon ters birikimi oluşabilecektir. Bu durum, yükseltme işleminin gerçekleşmesini sağlayacaktır (Agrawal, 2001; Keiser, 2011; Digonnet, 1993).

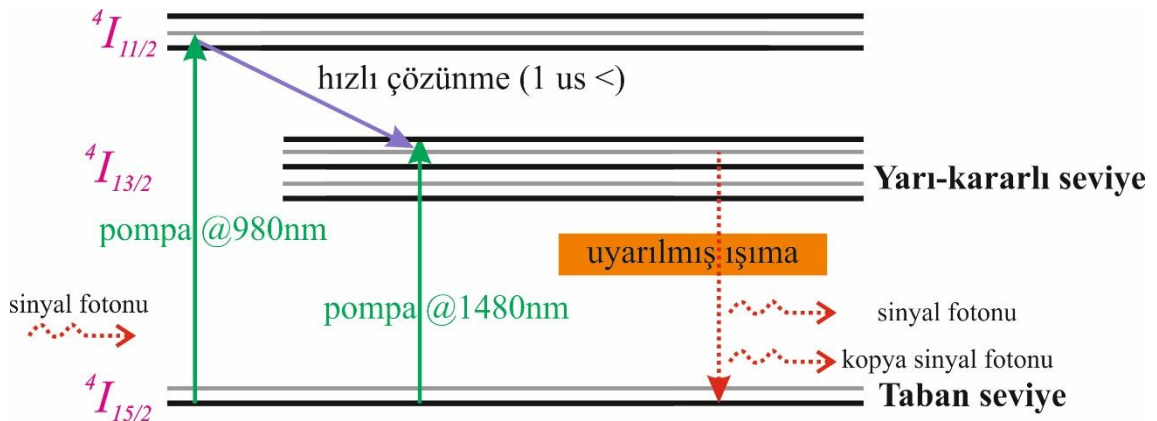
1987 yılında Emmanuel Desurvire yapmış olduğu çalışmasında, 3 seviyeli sistem modelinde (Şekil 2.4) 980 nm ve 1480 nm dalgaboyunda pompalanan Er^{3+} iyonlarının temel enerji seviyesi ile diğer enerji seviyeleri arasındaki geçişleri detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Eğer erbiyum katkılı fibere 980 nm’de pompalama yapılırsa, Er^{3+} iyonları taban enerji seviyesinden ($^4I_{15/2}$), $^4I_{11/2}$ enerji seviyesine geçiş yapmaktadır. Bu enerji seviyesinde kısa süre ($\leq 1 \mu\text{s}$) kalabilen iyonlar, ışımasız bir şekilde yarı-kararlı olan $^4I_{13/2}$ enerji seviyesine hızlı geçiş yapmaktadırlar. Diğer taraftan 1480 nm’de erbiyum katkılı fibere pompalama yapılırsa, Er^{3+} iyonları taban seviyesinden direkt $^4I_{13/2}$ enerji seviyesine uyarılmaktadırlar. Taban enerji seviyesinden yarı-

kararlı enerji seviyesine doğru oluşan popülasyon ters birikimi sonucunda, Er^{3+} iyonları rastgele ışıma ile $^4I_{15/2}$ seviyesine tekrar düşerler. Rastgele gerçekleşen bu ışıma erbium katkılı fiber içerisinde hem ileri hem de geri yönlü 1520-1570 nm aralığında istenmeyen bir gürültünün oluşumuna yol açar. Bununla beraber, bu ışıma sonucu oluşan fotonlar, erbium katkılı fiber boyunca yarı-kararlı seviyede bulunan iyonları uyararak, taban seviyeye düşüşlerine yol açmaktadırlar. Bu geçişlerle foton ışıması sonucu gürültü sinyali yükseltilmiş olur ve bu nedenle bu gürültü sinyaline ASE denilmektedir.



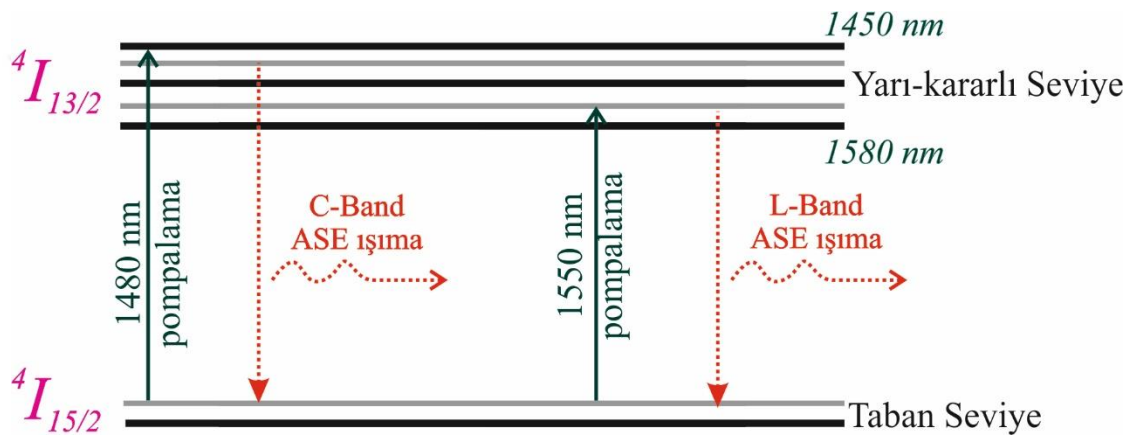
Şekil 2.4. Üç seviyeli enerji sistemi ve ASE gürültüsünün oluşumu.

Diğer taraftan, erbium katkılı fibere kuvvetlendirilmek istenen zayıf bir giriş sinyali enjekte edilirse, bu sinyal, yarı kararlı enerji seviyesinde biriken Er^{3+} iyonlarını uyararak taban seviyeye geçişlerine neden olur (Şekil 2.5). Bu geçişler sırasında, uyarılmış emisyonla eş fazlı, polarizasyonlu, frekanslı kopya fotonlar üretilir. EDF boyunca değişik oranda gerçekleşen uyarılmış emisyon prosesiyle zayıf sinyal kuvvetlendirilmiştir.



Şekil 2.5. Uyarılmış ışıma yolu ile zayıf sinyalin kuvvetlendirilmesi.

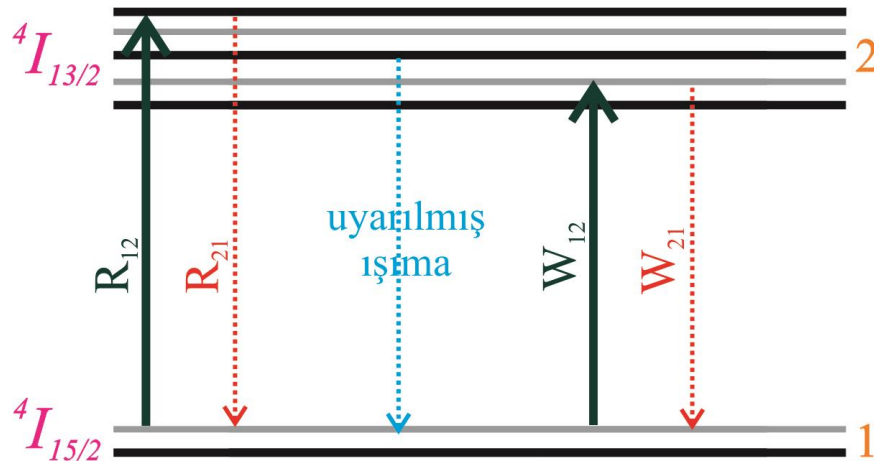
Ayrıca, 980 nm veya 1480 nm’de pompalamadan farklı olarak C-Bandında yapılan bir pompalama sonucunda Er^{3+} iyonları yarı-kararlı seviyenin alt bölgesinde toplanarak (Şekil 2.6) L-bandı bölgesinde de ışıma yapabilmektedirler. Bu özelliğinden dolayı L-Band EDFA’larda 980 nm veya 1480 nm’de pompalama dışında ASE gürültüsünden faydalanarak C-Bandında bir ikincil pompalama yapılmasıyla, EDFA boyunca popülasyon ters birikimi harici pompa kaynakları ile oluşan seviyenin bir miktar altında sabit tutulabilmekte ve böylelikle L-Bandı bölgesinde kazanç kontrolü kolaylıkla sağlanabilmektedir (Durak ve Altuncu, 2017). Bu tez çalışmasında sunulan teorik, simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlarla bu olay açıklanmıştır.



Şekil 2.6. İki seviyeli sistemde farklı pompalama dalgaboylarına göre ışıma karakteristikleri (Hui ve O’Sullivan, 2009).

2.3. EDFA’nın Teorik Modellenmesi

Önceki bölümde şekil 2.4’te görülen Er^{3+} iyonlarının enerji seviyeleri arasındaki geçişlerinin modellenmesi, EDFA performansının karakterize edilmesinde önem arz etmektedir. Bunun için ortaya koyulan oran denklemleri (Desurvire vd., 1987, 1989; Giles ve Desurvire, 1991) kullanılmaktadır. Tezin bu kısmında, oran denklemleri incelenmiştir.



Şekil 2.7. İki seviyeli Er^{3+} iyonunun atomik geçişleri.

Şekil 2.7’de görülen bu modelde; R_{12} pompa soğurum oranı, R_{21} pompa ışıma oranı, W_{12} sinyal fotonu soğurum oranı, W_{21} sinyal fotonu ışıma oranı ile gösterilmiştir. Toplam iyonik popülasyon $n_t = n_1 + n_2$ şeklindedir. Pompa ve sinyal fotonlarının soğurum ve ışıma oranlarına bağlı 2. seviye iyonik popülasyon yoğunluğunun zamana bağlı değişimi;

$$\frac{dn_2}{dt} = +(R_{12} + W_{12})n_1 - (R_{21} + W_{21} + A_{21})n_2 \quad (2.3.1)$$

olmaktadır. Bu eşitlikte, A_{21} ise rastgele ışıma oranını göstermektedir. Diğer taraftan 1.

seviye iyonik popülasyon yoğunluğunun, zamana bağlı değişimi ise $\frac{dn_1}{dt} = -\frac{dn_2}{dt}$ şeklindedir.

Kalıcı hal durumunda her iki seviyedeki popülasyon yoğunluğunun zamana bağlı değişimi

$$\left\{ \frac{dn_1}{dt} = \frac{dn_2}{dt} = 0 \right\} \text{ sifıra eşittir. Bu durumda, 1. seviye popülasyonunun toplam iyonik}$$

popülasyona (n_t) oranı,

$$\frac{n_1}{n_t} = \frac{(R_{21} + W_{21} + A_{21})}{(R_{21} + R_{12} + W_{12} + W_{21} + A_{21})} \quad (2.3.2)$$

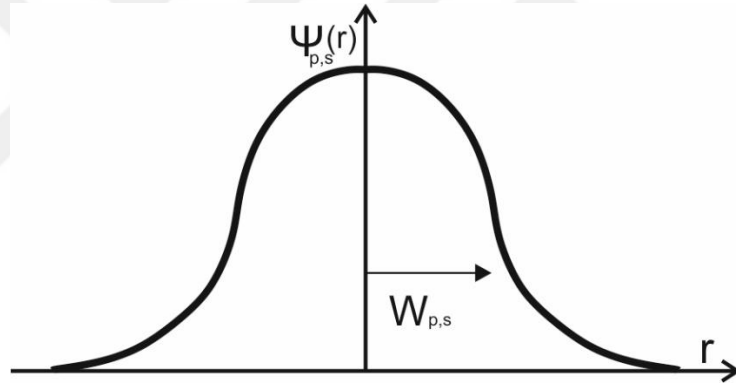
olmaktadır. Benzer şekilde 2. seviyedeki popülasyonun toplam iyonik popülasyona (n_t) oranı,

$$\frac{n_2}{n_t} = \frac{(R_{12} + W_{12})}{(R_{21} + R_{12} + W_{12} + W_{21} + A_{21})} \quad (2.3.3)$$

şeklindedir. Görüldüğü gibi n_1 ve n_2 , pompa ve sinyalin soğurum ve ışıma oranlarına $(R_{21}, R_{12}, W_{12}$ ve $W_{21})$ bağlıdır. Bu oranlar, ışık şiddetine bağlı olduğundan n_1 ve n_2 ifadeleri de aynı zamanda ışık şiddetine bağlı olmaktadır. Işık şiddeti $\{I\}$ ise silindirik koordinat sisteminde (r, θ, z) 'ın fonksiyonu olup, ortalama güç yoğunluğunu ifade etmektedir. A_{eff} , fiber etkin alanı olmak üzere genel olarak, ışık şiddeti

$$I = \frac{P}{A_{eff}} \quad (2.3.4)$$

şeklinde tanımlanabilir.



Şekil 2.8. Gaussian dalga yayılım modeli.

Bilindiği gibi ışık, optik fiber içerisinde Gaussian dalga modeline göre yayılım yapmaktadır. Bu sebeple, şekil 2.8'de görüldüğü gibi ışık şiddetinin yarıçap (r) ve mesafeye (z) bağlı ifadesi, (p:pompa, s:sinyal)

$$I_{p,s}(r, z) = P_{p,s}(z) \cdot \Psi_{p,s}(r) \quad (2.3.5)$$

şeklinde tanımlanabilir. Pompa ve sinyal fotonlarının, $i, j = 1, 2$ iken optik güce bağlı soğurum ve ışıma oranları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} R_{ij} &= P_p \sigma_{ij}^p \Psi_p(r) / h\nu_p, \text{ pompa} \\ W_{ij} &= P_s \sigma_{ij}^s \Psi_s(r) / h\nu_s, \text{ sinyal} \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

Burada, 12: soğurum, 21: ışıma oranlarını, $P_{p,s}(\text{watts})$ pompa veya sinyal gücünü, $\sigma_{ij}^{p,s}(\text{metre}^2)$ pompa veya sinyal dalgaboyundaki soğurum ve ışıma kesit alanını, $h\nu_{p,s}(\text{Joules})$ pompa veya sinyal foton enerjisini ve $\Psi_{p,s}(r,\theta),(\text{metre}^{-2})$ ise normalize çizgi şekli fonksiyonunu ifade etmektedir. Soğurum ve ışıma kesit alanı, iyonun fotonu soğurma veya ışıma yeteneğinin ölçüsü olup, katkı malzemesi ve dalgaboyuna bağlıdır. Eşitlik (2.3.6), güçten bağımsız iyonik popülasyon yoğunluklarını veren eşitlik 2.3.2 ve 2.3.3'te yerine yazılırsa, $n_1(r)/n_t$ oranı

$$\frac{n_1(r)}{n_t} = \frac{1 + \left(\frac{\sigma_{21}^p}{\sigma_{12}^p} \right) \frac{P_p \Psi_p(r)}{P_{qu}} + \frac{P_s \Psi_s(r)}{P_{sat}}}{1 + \left(1 + \left(\frac{\sigma_{21}^p}{\sigma_{12}^p} \right) \right) \frac{P_p \Psi_p(r)}{P_{qu}} + \left(1 + \left(\frac{\sigma_{12}^s}{\sigma_{21}^s} \right) \right) \frac{P_s \Psi_s(r)}{P_{sat}}} \quad (2.3.7)$$

ve 2. seviyedeki popülasyon yoğunluğu,

$$\frac{n_2(r)}{n_t} = \left(1 - \frac{n_1(r)}{n_t} \right) \quad (2.3.8)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir. Eşitlik 2.3.7'de verilen P_{qu} ve P_{sat} ise sırasıyla pompa ve sinyal için söndürme ve doyum güçleri olup,

$$\begin{aligned} P_{qu} &= h\nu_p \pi w_p^2 A_{21} / \sigma_{12}^p, \quad (\text{watts}) \\ P_{sat} &= h\nu_s \pi w_s^2 A_{21} / \sigma_{21}^p, \quad (\text{watts}) \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

ile tanımlanır.

Tek modlu optik fiberde ışığın kılavuzlanması tam yansıma prensibine dayanmaktadır. Dalga kılavuzu Maxwell denklemlerinin çözümü ile analiz edilebilir. Burada, uygun sınır koşullarında kılavuzlanan modun/modların, enine elektrik alan dağılımları elde edilebilir. Diğer taraftan pompa ve sinyal ışık şiddetinin fiber boyunca değişimi, yayılım denklemleri ile tanımlanmaktadır (Urquhart, 1995).

$$\begin{aligned} \frac{dI_p}{dz} &= [\sigma_{21}^p n_2 - \sigma_{12}^p n_1] I_p(z) - \alpha_p I_p(z) \\ \frac{dI_s}{dz} &= [\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1] I_s(z) - \alpha_s I_s(z) \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

Burada, $\alpha_{p,s}$ ile pompa ve sinyal dalgaboyundaki arkaplan kaybı (background loss) hesaba katılmalıdır. Işık şiddeti (r, θ, z) 'in fonksiyonu olup,

$$I(r, \theta, z) = P(z) \int_0^{2\pi} \int_0^a \Psi_p r dr d\theta \quad (2.3.10)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Eşitlik (2.3.10)'da görüldüğü gibi yayının denklemleri optik gücün bir fonksiyonudur. Gaussian mod dağılımı dikkate alındığında r yarıçapı ve z mesafeye bağlı pompa ve sinyal güçlerinin yayının denklemleri:

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= 2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^p n_2 - \sigma_{12}^p n_1] P_p \Psi_p(r) r dr - \alpha_p P_p \\ \frac{dP_s}{dz} &= 2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1] P_s \Psi_s(r) r dr - \alpha_s P_s \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

şeklinde elde edilebilir. Bu eşitlikte 2π , θ 'ya bağımlı integrasyondan elde edilmiştir.

2.4. EDFA'da Performans Karakterizasyonu

Bu kısımda, erbiyum katkılı fiberin karakterizasyonunda kullanılan parametrelerin ve onların ölçüm teknikleri tanımlanmaktadır. Bir EDFA'da hesaplanması ve/veya ölçülmesi gereken en önemli parametreler kazanç ve gürültü faktörüdür. Bu iki karakteristik parametrenin de öncelikli olarak genel tanımlaması yapıлып, sonrasında pratikteki ölçüm teknikleri incelenmiştir.

2.4.1. Kazanç

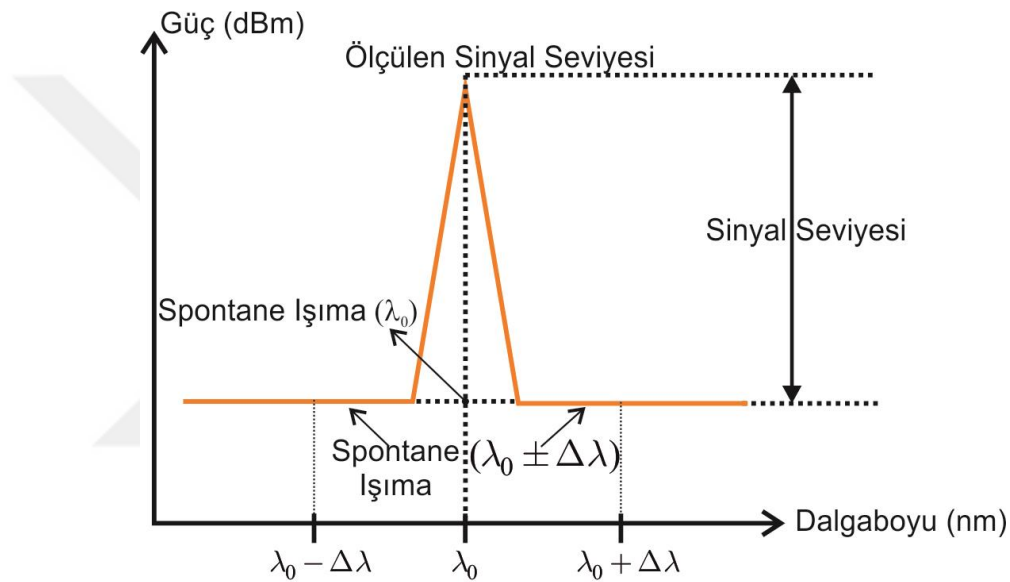
Optik fiber yükselteçlerde kazanç ifadesi, belirli bir dalgaboyunda optik sinyal çıkış gücünün, optik sinyal giriş gücüne oranı ile tanımlanır (Desurvire, 1994).

$$Kazanç (dB) = 10 \log_{10} \left[\frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} \right] \quad (2.4.1)$$

Kazanç düşük miktarda polarizasyona da bağımlılık göstermektedir. Ayrıca, bir optik spektrum analizör (OSA) veya optik güç ölçer yardımı ile ölçülen sinyal seviyesinde gürültü de olmaktadır. Bu gürültü optik yükseltecin girişindeki lazer kaynağının oluşturduğu rastgele ışıma (source SE) ve optik yükselteç çıkışındaki kendisinden kaynaklanan ASE'den oluşmaktadır. Bununla beraber, giriş sinyal seviyesi düştükçe gürültü kaynaklarının etkisi de o kadar önemlidir. Bu yüzden, eşitlik 2.4.2'de görüldüğü gibi sinyal seviyesinin doğru ölçümü önem arz etmektedir.

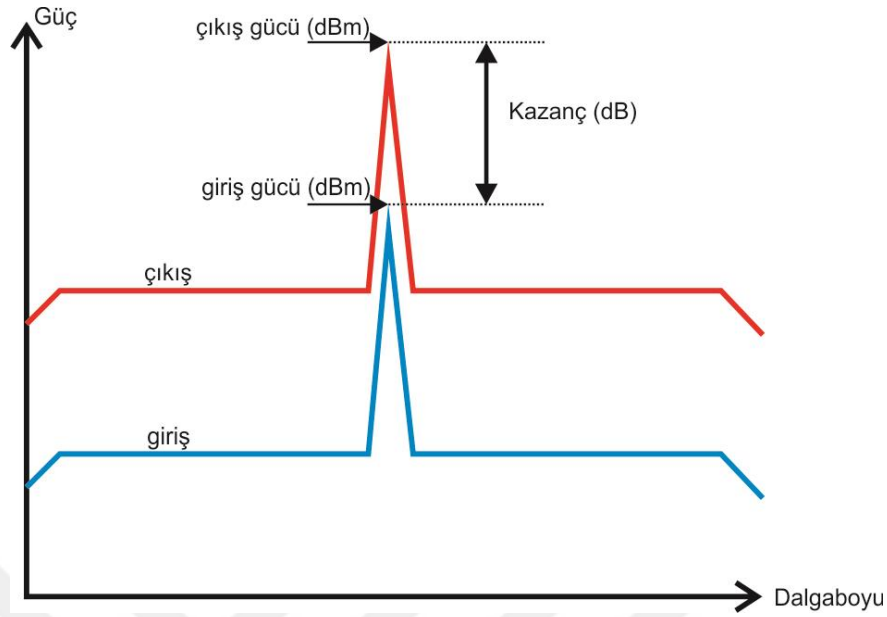
$$\text{Doğru Sinyal Seviyesi}(\lambda_0) = \text{Ölçülen Sinyal Seviyesi}(\lambda_0) - \text{Spontane Işıma}(\lambda_0) \quad (2.4.2)$$

Gürültü seviyesi direkt olarak ölçülemediği için, birtakım özel ölçüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sinyal dalgaboyundaki rastgele ışıma gücü şekil 2.9'da görüldüğü gibi, sinyal merkez dalgaboyuna eşit uzaklıktaki farklı iki dalgaboyunda güç değerlerini ölçüp, onlara bağlı interpolasyon yapılması ile hesaplanabilir. Birçok durumda, sinyal band genişliğindeki ASE değişimi basit bir yapıda olduğu için lineer interpolasyon rahatlıkla uygulanabilmektedir (Altuncu, 1997).



Şekil 2.9. Spektrumdaki sinyal ve gürültü seviyeleri.

İkinci bir kazanç ölçüm yöntemi ise (Şekil 2.10), OSA spektrumunda direkt olarak giriş ve çıkış sinyal seviyelerinin ölçülmesidir. Ancak bu ölçümde, yükseltilmiş giriş sinyali içerisindeki ASE gürültüsü ihmal edilir. Giriş sinyal seviyesinin düşük olduğu durumlarda bu ölçüm tekniği doğru sonuç vermemektedir (Stimple, 1997).



Şekil 2.10. EDFA kazancı hesaplanması için kullanılan spektral ölçüm.

2.4.2. Gürültü faktörü

EDFA’da gürültü faktörü (NF), giriş ve çıkıştaki sinyal/gürültü gücü oranlarının (SNR) oranı olarak tanımlanır. EDFA’nın girişinden çıkışına, EDFA’da üretilen gürültü nedeniyle oluşan SNR azalmasının bir ölçüsüdür. Bu sebeple NF parametresi, EDFA karakterizasyonunda önemli ve öncelikli durumdadır. Çünkü doyuma ulaşmış bir sinyaldeki ASE gürültü seviyesinin tam ve doğru ölçülmesi zordur.

$$NF = \frac{(SNR)_{giriş}}{(SNR)_{çıkış}} \quad (2.4.3)$$

Diğer taraftan, EDFA’daki gürültü faktörü rastgele ışıma faktörü n_{sp} ile ilişkilidir.

$$NF \frac{SNR_{giriş}}{SNR_{çıkış}} = \frac{1 + 2n_{sp}(G - 1)}{G} \quad (2.4.4)$$

Bu eşitlikteki rastgele ışıma faktörü n_{sp} , taban seviye popülasyonu (N_1) ve uyarılmış seviye popülasyonuna (N_2) bağlı olup,

$$n_{sp} = \frac{N_2}{(N_2 - N_1)} \quad (2.4.5)$$

şeklinde ifade edilir. EDFA, üç seviyeli pompalama üzerine çalıştığı için, N_1 sıfır olmadığı durumlarda $n_{sp} > 1$ olmaktadır. Bu yüzden, pratikte kullanılan EDFA'larda NF değerinin teorik olarak alabileceği minimum değer olan $2n_{sp} = 2$ (3dB) büyük olması beklenir. Diğer taraftan, hem N_1 hem de N_2 , yükselteç uzunluğu ve pompa gücüne bağımlılığı olduğunda fiber boyunca değişiklik göstermektedir. Buna bağlı olarak da yükselteç kazancı gibi gürültü faktörü değerinin de hem yükselteç uzunluğuna hem de pompa gücüne bağımlı olması beklenir.

Ayrıca, EDFA'lardaki gürültü faktörü değeri direkt olarak ölçülebilen parametreler ile ifade edilecek olursa,

$$NF = \frac{SNR_{giris}}{SNR_{cikis}} = \left\{ \frac{1}{G} + \frac{P_{ase}}{h\nu GB_0} \right\} \quad (2.4.6)$$

ile bulunur. Bu eşitlikte $h\nu$ foton enerjisini, B_0 optik band genişliğini, G net yükselteç kazancını ve P_{ase} ise yükseltilmiş spontane ışınım (ASE) gücünü ifade etmektedir.

Gürültü faktörünü oluşturan beş adet bileşen bulunmaktadır. Bunlar sinyal ve ASE vurma gürültüleri ($F_{sig,shot}$, $F_{sp,shot}$), ASE'nin sinyal ve kendisiyle karıştırılması sonucu oluşan sinyal-ASE ve ASE-ASE çarpışma gürültüleri (F_{sig-sp} , F_{sp-sp}) ve EDFA'daki optik komponentler arasında oluşan dahili yansımalar nedeniyle gerçekleşen, çoklu girişim (F_{mpi}) gürültüsüdür. Böylelikle, toplam gürültü;

$$F_{total} = F_{sig,shot} + F_{sp,shot} + F_{sig-sp} + F_{sp-sp} + F_{mpi} \quad (2.4.7)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. ASE vurma gürültüsü ve çoklu girişim gürültüsü küçük değerli olduklarından dolayı genellikle ihmal edilirler. Ayrıca, optik band genişliği sıfıra doğru gittikçe ASE-ASE çarpışma gürültüsü de azaldığından dolayı gürültü faktörü hesaplanırken sinyal vurma gürültüsü ve sinyal-ASE çarpışma gürültüsü baskın hale gelmektedir.

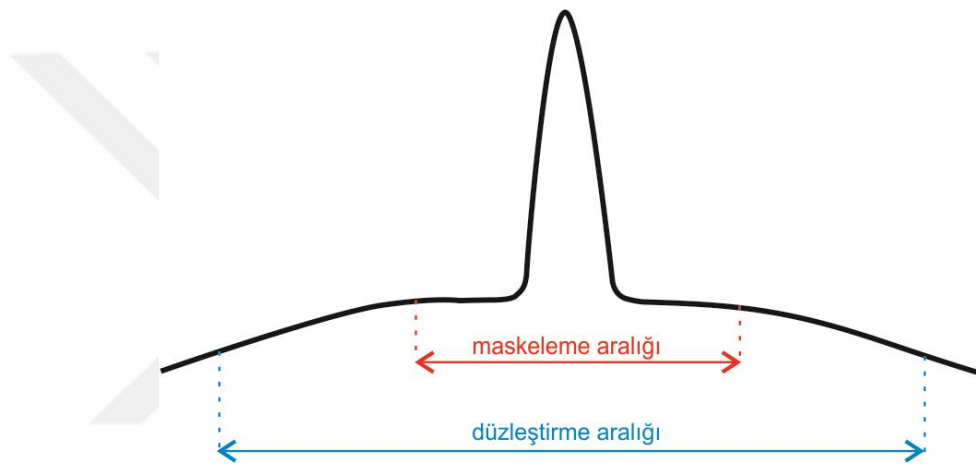
2.4.3. Yükseltilmiş spontane ışınım (ASE) gürültüsünün ölçülmesi

EDFA'nın çıkış sinyalinde yükseltilmiş sinyal ile birlikte EDFA içerisinde üretilen ASE gürültüsü de mevcut olduğundan, doğrudan ASE sinyalini ölçmek mümkündür. Bu amaçla optik spektrum analizör (OSA) ile 3 farklı ASE seviyesi ölçüm yöntemi önerilmektedir.

2.4.3.1. İnterpolasyon (Curve-fitting) yöntemi

Çıkış sinyali etrafındaki ASE seviyesinin ölçülüp interpolasyonu alınmasıyla (aritmetik ortalama) yapılan bu yöntem oldukça basit olup, tekrarlanabilirliği yüksektir. Bu yöntemde, sinyal

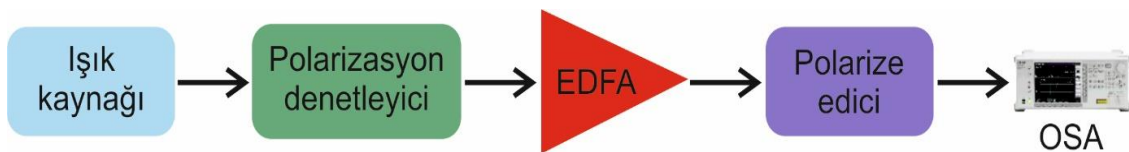
merkez dalgaboyundan yeterince uzak alt ve üst dalgaboyundaki ASE seviyesi ölçülerek arada kalan kısma eğri uydurulmasıyla sinyal dalgaboyundaki ASE gücü hesaplanır. Şekil 2.11’de görüldüğü gibi OSA yardımıyla ASE seviye değişiminin lineer olduğu yeterince uzunluğa sahip bir maskeleme aralığı belirlenir. Daha sonrasında maskeleme aralığı içerisinde kalan lineer değişimin bozulduğu ve interpolasyonda hesaba katılmayacak maskeleme aralığı belirlenir. Son olarak, maskeleme aralığının başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki kalan bölgeye, düzleştirme aralığı olarak, düzleştirme aralığındaki lineer değişime uygun olarak bir eğri uydurulur ve sinyalin merkez dalgaboyundaki noktaya karşılık gelen değer ASE seviyesi olarak ölçülür.



Şekil 2.11. Interpolasyon yöntemi ile ASE gürültü gücünün ölçülmesi.

2.4.3.2. Polarizasyon sıfırlama yöntemi

Bu yöntemde sinyalin ve gürültünün polarizasyon tekniğini kullanarak, gürültü faktörü ölçülür. EDFA’ya uygulanan giriş sinyali tek yönde polarize iken kendi içerisinde oluşan ASE gürültüsü rastgele polarize yapıdadır. Giriş sinyali yükseltme işlemi sonrasında da polarize durumu koruduğu için polarize edici bir eleman yardımıyla, ASE sinyali ve giriş sinyali ayırt edilebilmektedir. Zor bir ölçüm tekniği olsa da interpolasyon yöntemi ile ASE seviyesi ölçümünün zorlaştığı durumlarda etkin bir yöntemdir.

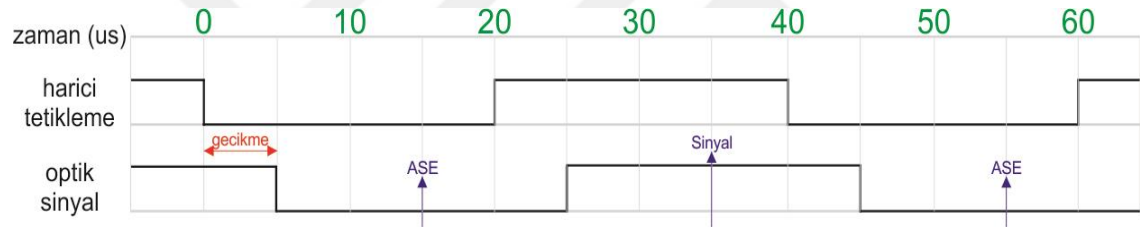


Şekil 2.12. Polarizasyon sıfırlama yöntemi ile ASE gürültü seviyesinin hesaplanması.

Bu ölçüm tekniğinde optik spektrum analizörün önüne polarizör elemanı ve giriş sinyali için kullanılacak olan ışık kaynağının çıkışına da polarizasyon denetleyicisi (Şekil 2.11) yerleştirilir. Polarizasyon denetleyicisi yardımıyla, lineer şekilde ilerleyen giriş sinyalinin sadece ortagonal bileşeni geçişine izin verilir. Böylelikle giriş sinyali sıfırlanmış olur. Diğer taraftan, ASE gürültüsü rastgele polarizasyonlu olduğu için polarize edici elemandan sadece yarısı geçebilmektedir. Böylelikle ASE seviyesi OSA’da gözlemlenir ve toplam ASE gürültüsünün yarısına eşit olmaktadır.

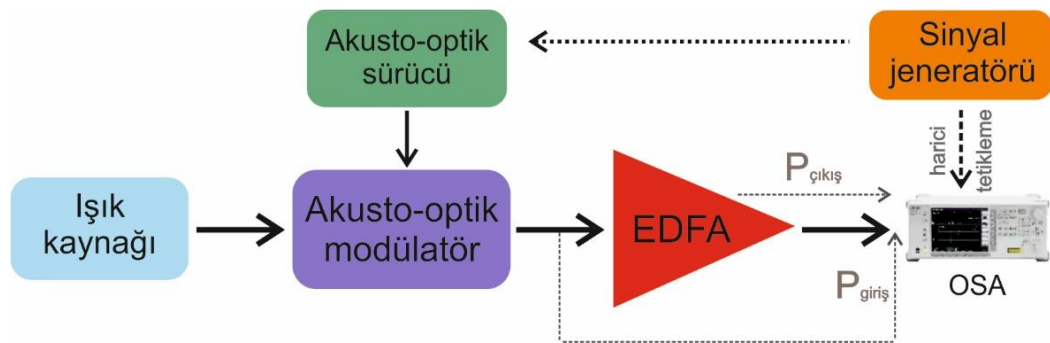
2.4.3.3. Darbe çıkarım yöntemi (WDM yöntem)

EDFA’larda yarı-kararlı enerji seviyesindeki iyonların, taban enerji seviyesine geçişleri uzun sayılabilecek bir zaman süresinde (~ 10 ms) olmaktadır. Eğer, EDFA girişine uygulanan optik sinyali bu zaman süresinden daha kısa sürede kapalı/açık anahtarlanırsa (şekil 2.12), EDFA çıkışındaki ASE seviyesi anahtar kapalı konumunda iken doğrudan ölçülebilmektedir.



Şekil 2.13. Darbe çıkarım yöntemi ile ASE ölçümü için örnek bir zaman çizelgesi.

Bu yöntemde birden fazla ekipmana ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, şekil 2.13’te görüldüğü gibi, bu sistemde OSA ile optik darbe üreticinin senkronizasyonu için eş zamanlı tetikleme uygulanması gerekmektedir. Bununla beraber, bu ölçüm tekniği ile WDM sistemlerinde de ASE gürültü seviyesi ölçülebilmektedir.



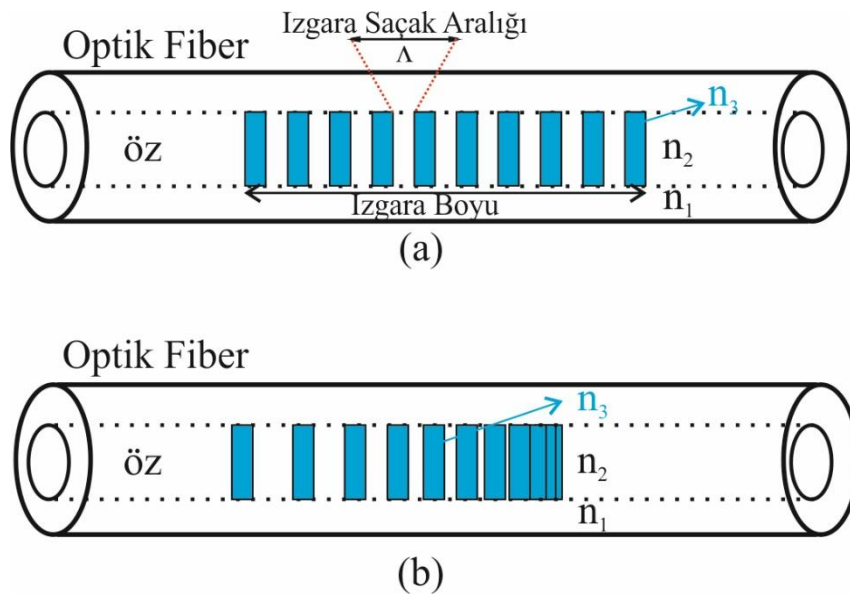
Şekil 2.14. Darbe çıkarım yöntemi ile ASE seviyesinin belirlenmesi için örnek bir ölçüm düzeneği.

3. FİBER BRAGG IZGARA (FBG)'NİN TEORİSİ VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

Tezin bu bölümünde, fiber optik haberleşme sistemleri ve sensör uygulamalarında kullanılan FBG'ler hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, tasarımı yapılan lazer kavite kontrollü L-EDFA yapısı içerisinde kullanılan FBG çiftlerinin teknik özellikleri ile sıcaklık ve gerilme değişimlerine tepkisi detaylı olarak incelenmiştir.

3.1. FBG Teorisi

FBG'ler optik fiber tabanlı haberleşme ve sensör uygulamalarında sıklıkla kullanılan pasif fiber optik elemanlardır. Genel olarak n_2 kırılma indisine sahip olan dielektrik silindirik yapıya sahip fiber özü, bilindiği gibi daha yoğun kırılma indise (n_1) sahip kılıf isimli başka bir dielektrik silindirik ile kaplanmıştır. Optik fibere ultraviyole dalgaboyu bölgesinde yüksek enerjili darbe sinyali uygulandığında n_2 öz kırılma indisinde değişim meydana gelmektedir (Şekil 3.1). Eğer bu kırılma değişimi belirli bir periyotla $<1\mu\text{m}$ gerçekleştirilirse Fiber Bragg ızgara (FBG) yapısı elde edilmiş olur. Tez çalışmasında kullanılan tüm FBG'lerin ızgara yapısı tekdüzedir, diğer bir ifadeyle düzenli kırılma indisi değişim profiline sahiptir. Bu tür FBG'lerde, ızgara saçak aralığı olarak adlandırılan kırılma indisi değişim adım aralıkları sabit değerdedir. Diğer taraftan, öz indis profili periyodik olmayan biçimde değişime maruz bırakıldığında cıvıtlı FBG yapısı oluşmaktadır. Yani, cıvıtlı bir FBG'de, ızgara saçak aralıklarının fiber eksenine boyunca değişimi sabit değildir (Navruz, 2006).

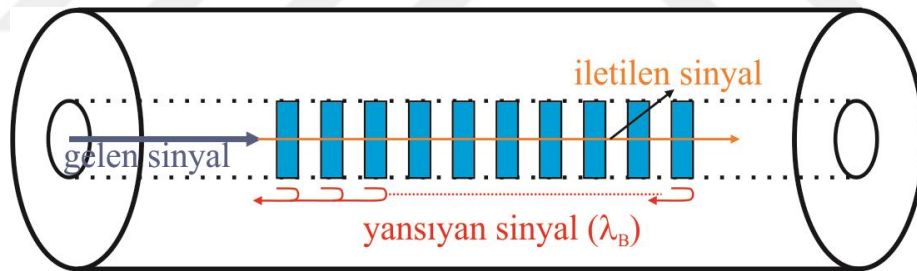


Şekil 3.1. Tekdüze (a) ve cıvıtlı (b) bir FBG'nin genel yapısı.

FBG ızgara kırılma indis değışimi, FBG'nin karakteristik özelliğini belirlemede önemli bir parametredir. Fiber özünde ilerleyen ışığın bir kısmı, ızgarayı oluşturan saçaklara geldikçe geri yansıyacaktır (Şekil 3.2). Izgara boyunca tekrarlanan bu olay neticesinde, geri yansıyan ışığın miktarında artış meydana gelecektir. Bu yansıyan ışık Bragg dalgaboyunda (λ_B) en yüksek değere ulaşır. Bragg dalgaboyu, efektif kırılma indisi (n_{eff}) ve ızgara saçak aralığı (Λ) yardımıyla hesaplanır (Denklem 3.1.1). Efektif kırılma indis değeri, ızgara saçaklarının kırılma indislerinin ortalaması anlamına gelmektedir. Saçak aralığı arttıkça Bragg dalgaboyunda artış olur (Hill vd., 1997; Kashyap, 1999).

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (3.1.1)$$

Bu sebeple FBG, optik band yansıtan filtre (OBRF) gibi davranır. Düşük maliyetli FBG'lerin tepkileri giriş polarizasyonundan bağımsız olur. Ayrıca, düşük ek kaybı nedeniyle fiber optik haberleşme linklerinde kolayca entegre olabilirler. EDFA'larda kazanç kontrolü için içerisinde pasif fiber optik yansıtıcı olarak kullanılabilirler. Bununla beraber, ızgara çevresine sıcaklık, nem, uçucu organik bileşen gibi çevresel etkenlere karşı duyarlı malzemeler ile kaplanması durumunda verimi yüksek fiber optik sensörler olarak da kullanılabilirler.



Şekil 3.2. FBG içerisinde meydana gelen yansıma.

3.2. Kullanılan FBG'lerin Teknik Özellikleri

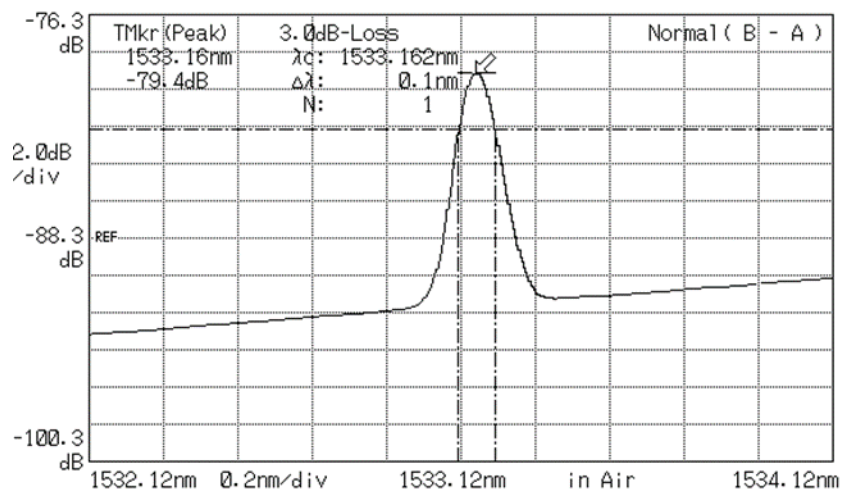
Lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın deneysel karakterizasyonu için C-Bandını kapsayan birbirinden farklı Bragg dalgaboyuna sahip 5 adet FBG kullanılmıştır ve bu FBG'lerin teknik özellikleri çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Genel olarak teknik özellikleri incelediğinde, kullanılan tüm FBG'lerin yansıtma oranının %95 ve üzerinde, band genişliğinin 0.2 nm ve altında olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan standart tek modlu fiber (SMF-28) üzerine yazılan tüm FBG'lerin ızgara uzunluğu 10 mm'dir. Izgara yazılan fiber üzerinde herhangi bir kaplama malzemesi kullanılmamıştır.

Çizelge 3.1. Lazer kavite kontrollü L-EDFA tasarımında kullanılan FBG’lerin teknik özellikleri.

Özellik	FBG ₁	FBG ₂	FBG ₃	FBG ₄	FBG ₅
<i>Fiber Türü</i>	SMF-28	SMF-28	SMF-28	SMF-28	SMF-28
<i>Izgara Uzunluğu</i>	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
<i>Bragg Dalgaboyu</i>	1534.25 nm	1542.16 nm	1550.01 nm	1554.06 nm	1558.24 nm
<i>SLSR (dB)</i>	15.44	17.75	16.38	18.88	20.5
<i>Yansıtma Oranı (%)</i>	95.06	96.65	95.9	96.45	96.45
<i>Band Genişliği</i>	0.22 nm	0.182 nm	0.193 nm	0.189 nm	0.2 nm
<i>Kaplama</i>	yok	yok	yok	yok	yok

3.2.1. FBG’nin iletim spektrumu

Tez çalışmasında kullanılan FBG’lerin çizelge 3.1’de görülen özelliklerini teyit etmek adına Bragg dalgaboyu 1534.25 nm olan FBG’nin iletim spektrumu incelenmiştir. Bu amaçla ileri yönlü pompalanan C-EDFA çıkışında üretilen genişband ileri yönlü ASE gürültü sinyali, FBG’ye uygulanmıştır. FBG’nin ASE sinyali yansıtma spektrumu ise optik spektrum analizör yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 3.3’te FBG’nin yansıma spektrumu görülmektedir. Normalde FBG’nin yansıma merkez dalgaboyu için üretici firma katalog değeri 1534.25 nm iken, optik spektrum analizörde ölçüm sonucunda FBG yansıma dalgaboyu 1533.162 nm elde edilmiştir. Bu farkın, üretici firmaya ve bize ait optik spektrum analizörün kalibrasyon farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, 3-dB band genişliği de 0.1 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.3. FBG'nin yansıtma spektrumu.

3.3. Kullanılan FBG'lerin Çevresel Şartların Değişimine Karşı Tepkisi

Bilindiği üzere FBG'ler, fiber optik sensör uygulamalarında sıklıkla kullanılan pasif fiber optik elemanlardır. Özellikle sıcaklık, nem ve gerilme gibi çevresel şartların değişimi altında verdikleri tepkiler dikkat laser kontrollü L-EDFA performans kararlılığı açısından da oldukça önemlidir. Bu sebeple, laser kavite kontrollü L-EDFA'da deneysel karakterizasyonunda kullanılan FBG'lerin farklı çevresel şartlar altındaki tepkileri tezin bu kısmında detaylı olarak incelenmiştir.

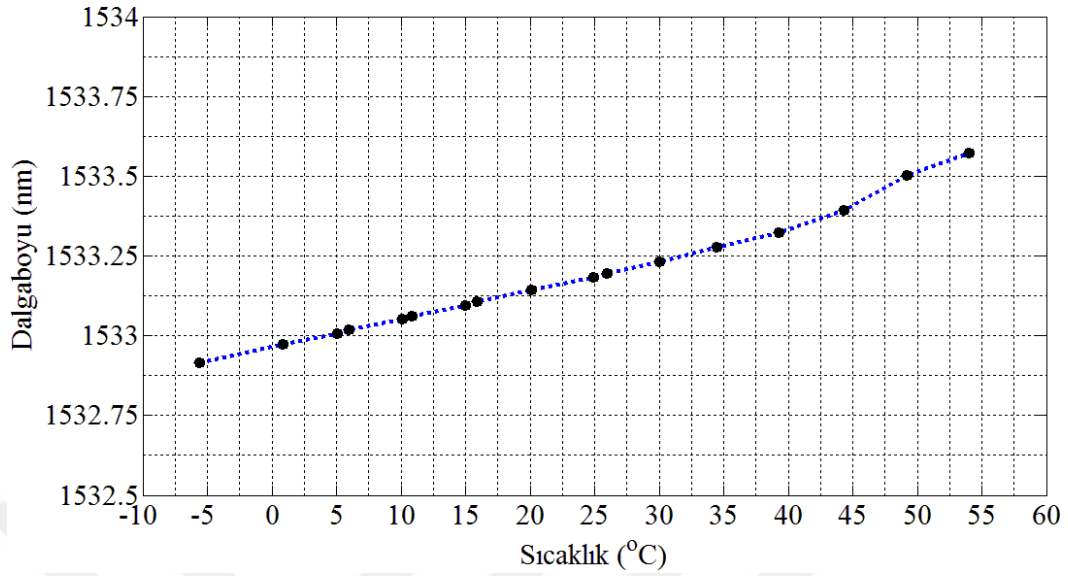
3.3.1. FBG'nin sıcaklık değişimine tepkisi

Sıcaklık ve nem değişimlerinin FBG üzerindeki etkisini tespit etmek için Fotonik Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (FOTAM) laboratuvarında bulunan sıcaklık ve nem kontrollü iklimlendirme kabini (NÜVE marka, TK120 model) kullanılmıştır. Bu amaçla bir C-Band EDFA çıkışındaki ileri yönlü genişband gürültü sinyali ASE, kabin içerisinde bulunan test FBG'sine uygulanarak FBG çıkışındaki iletim spektrumu OSA'da bu işaret terslenerek yansıma spektrumu ölçülmüştür.



Şekil 3.4. Sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri için kurulan deneysel düzenek.

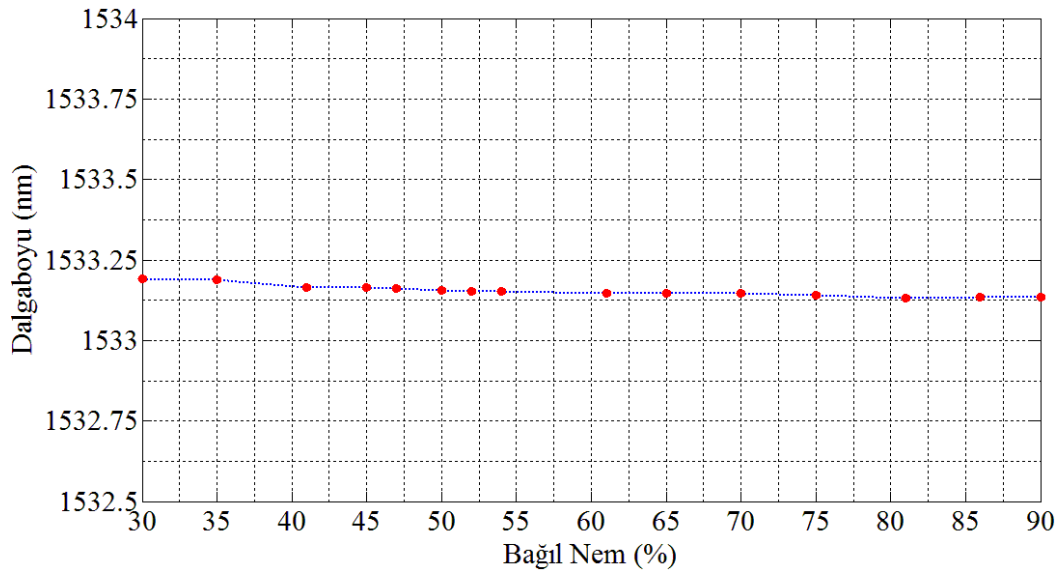
Bu deneyde sabit bağıl nem altında, -5°C ile $+55^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında FBG Bragg yansıma dalgaboyunun değişimi incelenmiştir (Şekil 3.5). Artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak FBG Bragg yansıma dalgaboyunda lineer bir değişim gözlemlenmiştir. Elde edilen $11 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ oranındaki değişimin (FBG sıcaklık duyarlılığının) Liu vd. (2013) yaptığı çalışma ile uyduğu görülmüştür. Ayrıca sabit sıcaklık altında 10 dk aralıklarla alınan 11 ölçümde FBG'nin uzun zaman kararlılığı incelenmiş ve standart sapması 8.647×10^{-3} olarak elde edilmiştir. Yani, oda sıcaklığının $\pm 5^{\circ}\text{C}$ değişiminde, FBG'nin Bragg yansıma dalgaboyunda maksimum 55 pm'lik bir kayma olabileceği anlaşılmıştır. Bu değişimin laser kavite kontrollü L-EDFA'nın kazanç ve gürültü faktörü performansı üzerine ciddi bir etkiye yol açmayacağı anlaşılmıştır.



Şekil 3.5. FBG Bragg dalgaboyunun sabit bağıl nem altında sıcaklık değişimine tepkisi.

3.3.2. FBG'nin bağıl nem değişimine tepkisi

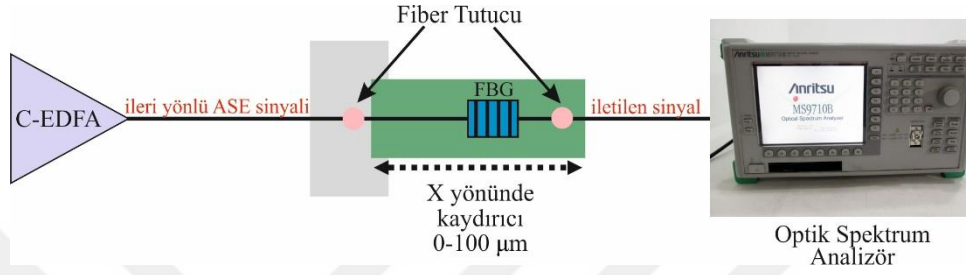
FBG'nin çevresel şartların değişimine karşı yapılan karakterizasyonun ikinci adımında ise sabit sıcaklık altında, %30 - %90 aralığındaki bağıl nem koşullarında FBG'nin Bragg dalgaboyunun değişimi (Şekil 3.6) gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre FBG'nin bağıl nem duyarlılığının çok düşük olduğu, Bragg dalgaboyunun artan bağıl nem oranıyla neredeyse sabit kaldığı görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, kapalı ortamlardaki nem değişiminden etkilenmediği tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. FBG Bragg dalgaboyunun sabit sıcaklık altında bağıl nem değişimine tepkisi.

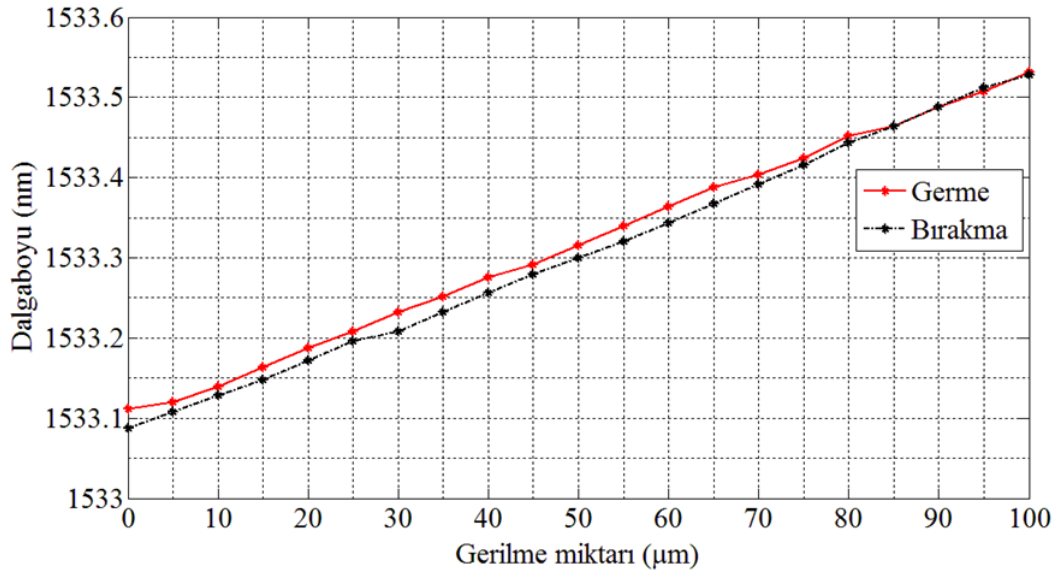
3.3.3. FBG'nin X yönündeki gerilmeye karşı tepkisi

Bu deneyde, lazer kavite kontrollü L-EDFA'da kullanılan FBG'nin X yönündeki gerilmelere karşı tepkisi ölçülmüştür. Bu ölçümü gerçekleştirebilmek için FBG üzerine tek ekseninde hareket eden bilgisayar kontrollü ve 1 μm hassasiyetli kaydırıcı yardımıyla (translation stage) artan gerilimler uygulanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. X yönündeki gerilme karakterizasyonu için kurulan deneysel düzenek.

Bu çalışmada, 0-100 μm aralıkta (0-1400 $\mu\text{ε}$) gerilme ve bırakmaya karşılık FBG Bragg dalgaboyundaki değişimi ölçülmüştür (Şekil 3.8). Elde edilen sonuçlar, FBG'nin gerilme değişimlerine 0.217 $\text{pm}/\mu\text{ε}$ hassasiyetle lineer bir tepki verdiği anlaşılmıştır. Yani, FBG deneysel ölçümler sırasında farkında olunmadan 100 μm bir gerilmeye maruz kaldığında Bragg dalgaboyunun en fazla 0.5 nm kaydığı ortaya çıkmıştır. Bu değer, lazer kavite kontrollü L-EDFA performansında önemli bir etkiye yol açmadığı anlaşılmıştır.



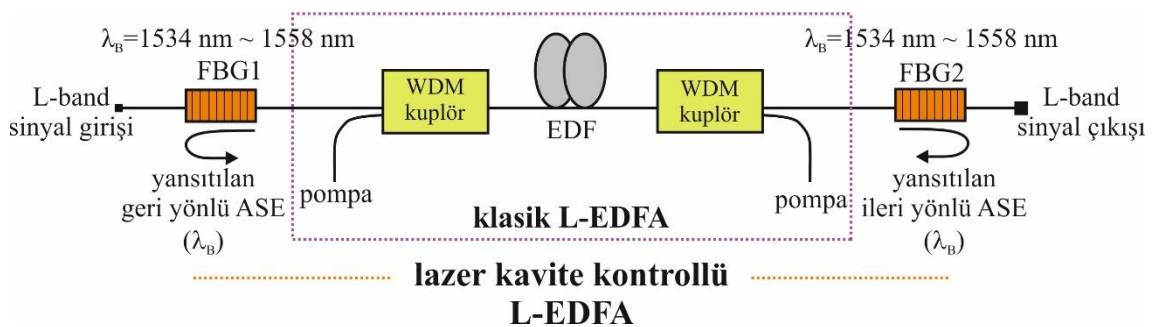
Şekil 3.8. FBG Bragg dalgaboyunun X yönünde uygulanan germe/bırakma altındaki değişimi.

4. LAZER KAVİTE KONTROLLÜ L-EDFA TASARIMI, TEORİK ANALİZİ VE SİMÜLASYONU

Tezin bu bölümünde, FBG tabanlı lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın öncelikli olarak tasarımı hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında ise teorik altyapısı incelenerek OptiAmplifier v4.0 programı yardımıyla gerçekleştirilen simülasyon sonuçları sunulmuştur. Gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde tasarlanan lazer kavite kontrollü L-EDFA'da FBG Bragg dalgaboyu ve yansıtma katsayısı optimize edilmiş konfigürasyonun kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme performansı incelenmiştir.

4.1. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA Tasarımı

Bu çalışmanın ana hedefi, L-EDFA'da kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme amaçlı FBG tabanlı lazer kavite kontrolü gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde de bahsedildiği üzere, literatürde bu problemin çözümüne yönelik çok sayıda yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada, EDFA'da ileri ve geri yönde üretilen ASE gürültüsünün C-band içinde yer alan bir kısmının FBG çifti yardımıyla EDF'ye geri enjekte edilmesiyle, L-Band bölgesinde FBG Bragg yansıtma dalgaboyunda lazer kavite kontrollü kazanç kenetleme sağlanması planlanmıştır. Bu sebeple klasik yapıdaki L-EDFA'nın giriş ve çıkışına simetrik iki tane yansıtıcı tipli dar bandlı FBG eklenmiş ve Bragg dalgaboyunda F-P lazer yapısı oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi tasarımı gerçekleştirilen bu düzenekte FBG çifti ile oluşturulan F-P lazer sayesinde EDFA'da harici pompalama dışında, C-bandında ikincil bir pompa kaynağı oluşturulmaktadır. Bu sayede EDFA boyunca popülasyon ters birikimi faktörü, belirli bir değerde sabit kalmaktadır. Ayrıca, ikincil pompalama sayesinde L-bandındaki güç dönüşüm verimi artmakta, dolayısıyla daha yüksek değerlerde ve kararlı kazanç elde edilebilmektedir.



Şekil 4.1. Lazer kavite kontrollü L-EDFA tasarımı.

4.2. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA Teorisi

Erbiyum katkılı fiber yükselteçlerde, sinyal giriş güç ve dalga boyuna göre kazanç ve NF karakteristikleri değişmektedir. Özellikle WDM tekniği ile iletim yapılan çok kanallı linklerde sistemin toplam gücü ile kanal sayısındaki değişimlerden etkilenmeden, EDFA kazancının her zaman sabit kalması istenmektedir. Geniş bir sinyal seviyesi aralığında, sinyal seviyesinden bağımsız sabit bir kazançla sahip duruma, kazanç kenetleme denilmektedir. Tezin giriş bölümünde de bahsedildiği gibi, EDFA'larda kazanç kenetleme ve kazanç spektrumunu düzleştirme için çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu kısımda, EDFA'nın kazanç kenetlemeli çalışmasını sağlayan FBG tabanlı lazer kavite kontrollü L-EDFA mimarisinin teorisi ve karakteristikleri sunulacaktır.

EDFA'larda optik sinyal ve ASE gürültü gücünün yükselteç boyunca değişimi, önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi yayılım ve oran denklemlerinin uygun sınır koşullarında beraber çözülmesiyle analiz edilmektedir (Giles ve Desurvire, 1991). Genellikle, yükselteç kazancı ve gürültü faktörünü hesaplamak için, analitik çözümlerin mümkün olmaması nedeniyle nümerik çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Buna ilaveten, lazer kavite kontrollü EDFA'larda, FBG yardımıyla EDF'ye geri enjekte edilen ikincil pompanın da sınır koşulları içine eklenmesi gerektiği düşünülürse çözüm çok karışık olmaktadır.

EDF içinde oda sıcaklığında katkı iyonlarının homojen şekilde dağıldığı varsayılırsa, bu durumda optik sinyalin yayılım denklemi;

$$\frac{dP}{dz} = \left\{ \left[\alpha(\lambda) + g^*(\lambda) \right] n(z) - \left[\alpha(\lambda) + l(\lambda) \right] \right\} P \quad (4.1.1)$$

şeklinde verilebilir (Giles ve Desurvire, 1991). Burada sırasıyla, α , g^* ve l belirli bir dalga boyundaki EDF için soğurum, ışıma ve arkaplan kaybıdır. Eşitlik (4.1.1)'de $n(z)$ ise yarı-kararlı seviyedeki popülasyon yoğunluğunu ifade etmektedir. Eşitlik (4.1.1)'den, yükseltecin kazancı analitik yolla;

$$G(\lambda) = e^{\left\{ \left[\alpha(\lambda) + g^*(\lambda) \right] \bar{n} - \left[\alpha(\lambda) + l(\lambda) \right] \right\} L} \quad (4.1.2)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemdeki $\bar{n}$ ifadesi, yükselteç L uzunluğu boyunca ortalama popülasyon yoğunluğunu $\left(\bar{n} = (1/L) \int_0^L n(z) dz \right)$ göstermektedir. Klasik EDFA'da eşitlik

4.1.2'nin çözümü için popülasyonun yoğunluğunun $n(z)$ fiber boyunca sinyal, pompa ve ASE

güç değişimlerine bağlı enerji seviyeleri arasındaki geçişleri tanımlayan oran denklemlerinin çözümü gerekmektedir. Bu durumda, tam doğru sonuca ulaşmakta birtakım diferansiyel denklemlerin nümerik analiz yöntemiyle hesaplanması gerekir.



Şekil 4.2. Lazer kavite yapısı.

Diğer taraftan, FBG ile oluşturulan lazer kavite kontrollü EDFA'larda, ortalama popülasyon yoğunluğu fiber boyunca oluşan optik güç dağılımı kullanılmadan yani lasing etkisinden bağımsız bir şekilde doğrudan analitik yolla hesaplanabilmektedir (Massicott vd., 1994; Bayart vd., 1994; Yu ve Mahony, 1995,1997). Bu modelde şekil 4.2'teki gibi lazer kavite ile kazanç kontrol mekanizması oluşturulduğundan ışınım dalgaboyunda (λ_l) optik dalgaının gidiş-dönüş net kazancı bire eşit olmaktadır.

$$l_c e^{\gamma \{ [\alpha(\lambda_l) + g^*(\lambda_l)] \bar{n} - [\alpha(\lambda_l) + l(\lambda_l)] \} L} = 1 \quad (4.1.3)$$

Bu denklemden l_c , ışınım dalgaboyunda (λ_l) etkin kavite kaybını gösterir ve γ ise bir sabit olup ring konfigürasyonu için 1 ve Fabry-Perot (F-P) konfigürasyonu için 2'ye eşittir. Bu çalışmada kullanılan F-P lazer kavite kontrollü EDFA konfigürasyonu için, efektif kavite kaybı $l_c = -10 \log \sqrt{r_1 r_2} + \delta_c$ olup, r_1 ve r_2 fiber Bragg ızgaralarının yansıtma katsayıları, δ_c ise iletim ve ek kaybı gibi kayıpların toplamını ifade etmektedir. Birim uzunluk başına dB cinsinden kavite kaybı $L_c = -10 \log(l_c)/L$ şeklinde ifade edilebilir. Denklem 4.1.3 yeniden düzenlenirse, lazer kavite kontrollü ortalama popülasyon yoğunluğu,

$$\bar{n} = \frac{\alpha(\lambda_l) + l(\lambda_l)}{\alpha(\lambda_l) + g^*(\lambda_l)} + \frac{L_c}{4.34\gamma [\alpha(\lambda_l) + g^*(\lambda_l)]} \quad (4.1.4)$$

şeklindedir. Görüldüğü gibi daima pozitif ve 1'den küçük değere sahip olan ortalama popülasyon yoğunluğu, ışınım dalgaboyu (λ_l) ve normalize kavite kaybının L_c fonksiyonu olup, pompa ve sinyal dalgaboyundan bağımsızdır. Ayrıca, denklem 4.1.4 de verilen ortalama

popülasyon yoğunluğu ve denklem 4.1.2 kullanılarak herhangi bir dalgaboyundaki sinyal kazancı hesaplanabilir.

4.2.1. Lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın teorik karakteristikleri

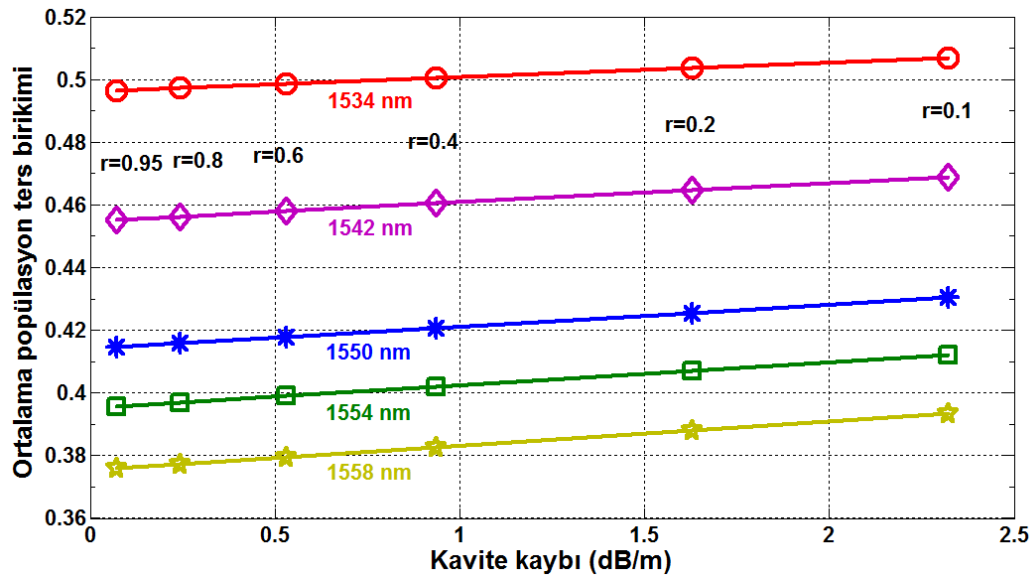
Tezin bu kısmında deneysel çalışmalarda kullanılan Liekki firmasına ait Er30 model erbiyum katkılı fiberi için önceki bölümde verilen teorik altyapı yardımıyla kazanç ve ortalama popülasyon yoğunluğu karakteristikleri analiz edilmektedir. İlgili denklemlerin çözümü için gerekli olan (Ek-1'te sunulmuştur) soğurma ve ışıma kesit alanı spektrumları ile çizelge 4.1'de verilen tüm parametreler üretici firmadan alınmıştır. Ayrıca, ilgili denklemlerin çözümleri ve simülasyon sonuçları lisansı Dumlupınar Üniversitesine ait olan Matlab programı R2015 versiyonunda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. Liekki Er30 erbiyum katkılı fiber parametreleri.

Parametre	Değeri
Öz çapı	3.67 μm
Mod alan çapı (@1550 nm)	6.5 $\pm$ 0.5 μm
Er ³⁺ tepe soğurumu (@1530 nm)	30 $\pm$ 3 dB/m
Arkaplan kaybı (@1200 nm)	23 dB/km
Nümerik açıklık	0.2
Kesim dalgaboyu	800-900 nm
Erbiyum iyon yoğunluğu	1.9e25 (iyon/m ³)

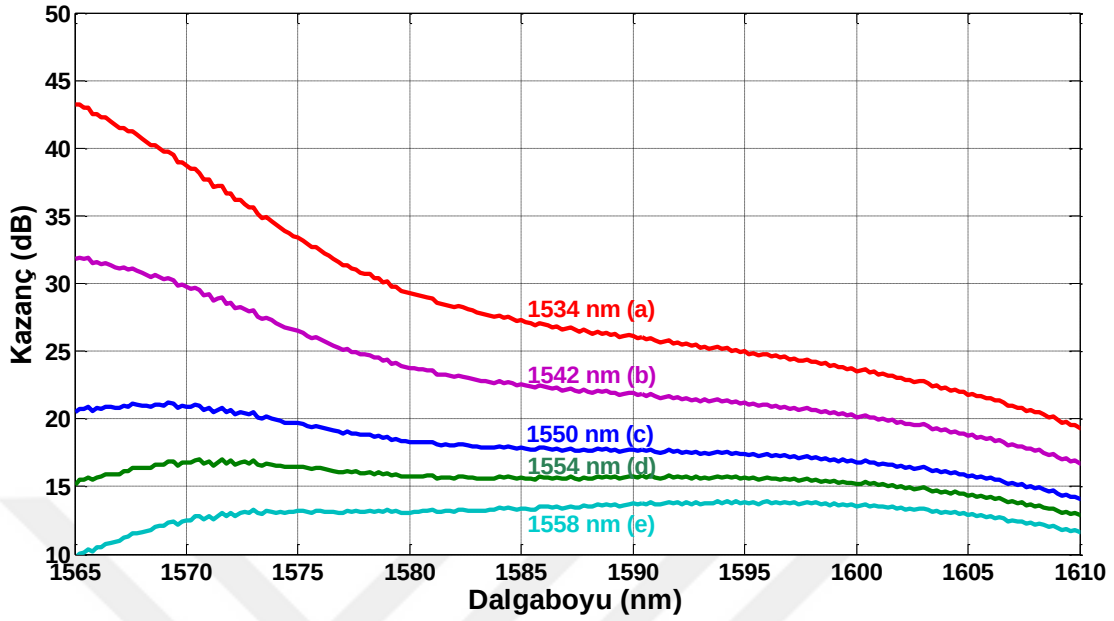
Tezin deneysel çalışmalarında, simektrik iki adet dar bantlı FBG kullanılarak (Bragg dalgaboyları sırası ile 1534 nm, 1542 nm, 1550 nm, 1554nm, 1558 nm) elde edilen F-P lazer kavite kontrollü L-EDFA için denklem 4.1.4'deki kavite kaybına bağımlı ortalama popülasyon yoğunluğu hesaplanmış ve şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu hesaplamada FBG'lerin yansıtma oranları sırasıyla, 0.95, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 ve 0.1 şeklinde değiştirilmiştir. Şekil 4.3'ten genel olarak, artan kavite kaybı ile ortalama popülasyon yoğunluğu arttığı ve sabit bir kavite kaybı için Bragg dalgaboyu arttıkça ortalama popülasyon yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, sabit bir Bragg dalgaboyu için FBG'lerin yansıtıcılık oranı azaldıkça yani kavite kaybı arttıkça ortalama popülasyon yoğunluğunun da arttığı anlaşılmıştır. Literatürde verilen önceki çalışmalarda (Bayart vd., 1994; Yanhong vd., 1999; Sun vd., 1997; Saaïd vd., 1997) L-EDFA'da etkin bir kazanç kontrolü sağlanması için ortalama popülasyon yoğunluğunun, klasik L-EDFA ile

elde edilebilecek maksimum orandan daha düşük oranda olması arzu edilir. Çünkü ortalama popülasyon yoğunluğu düşük oranda kaldığı popülasyonun kontrolü daha kolay olmaktadır. Bu sebeple şekil 4.3'ten de anlaşılacağı üzere FBG için yüksek yansıtıcılı ve daha uzun Bragg dalgaboylu bir F-P lazer kavite kontrollü L-EDFA konfigürasyonunda, kazancın geniş bir sinyal giriş gücü ve dalgaboyu aralığında kararlılıkla kontrol edilerek sabit bir değere kenetlenilebileceği öngörülmektedir.



Şekil 4.3. Simetrik iki adet dar bandlı FBG kullanılan F-P lazer kontrollü L-EDFA’da ortalama popülasyon ters birikimi faktörünün kavite kaybı ile değişimi (FBG yansıtma oranları: (a) 1534 nm, (b) 1542 nm, (c) 1550 nm, (d) 1554 nm, (e) 1558 nm).

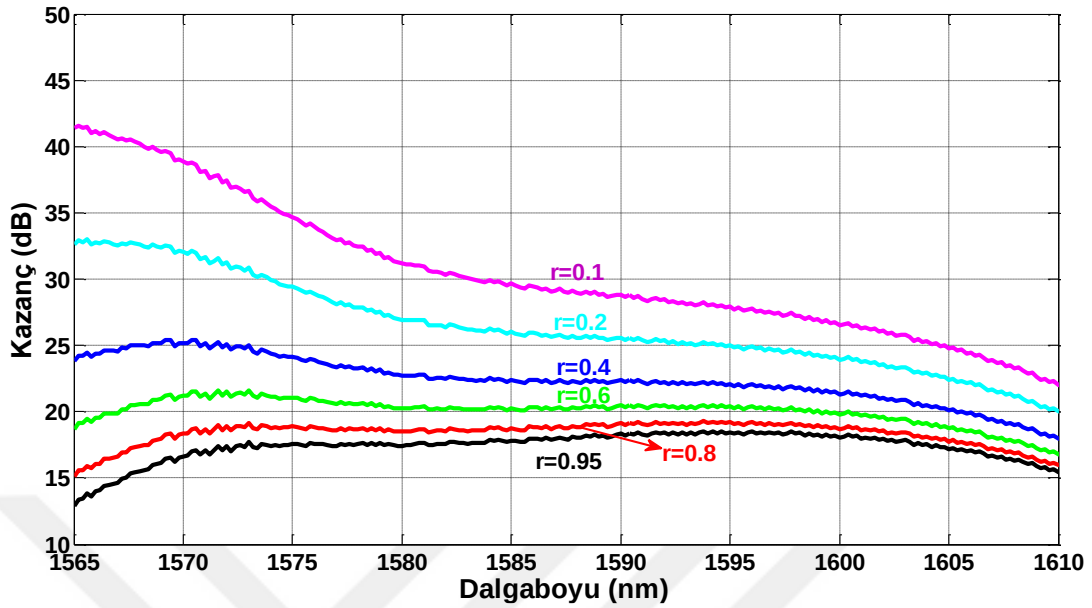
Yapılan diğer bir hesaplamada, denklem 4.1.2 kullanılarak farklı Bragg dalgaboylarındaki FBG’ler için kazancın sinyal dalgaboyu ile değişimi incelenmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde, L-Bandının giriş kısmında kazanç yüksek değerlerde iken dalgaboyu arttıkça kazançta genel olarak azalma meydana gelmektedir. Bu değişim, EDFA’nın L-Bandında düşük pompa/sinyal dönüşüm verimine sahip olması şeklinde kolayca açıklanabilir. Diğer taraftan kazanç spektrumunun değişiminde, FBG yansıtma dalgaboyu arttıkça L-Bandı giriş bölgesinde daha düşük değerlere dönüşmekte ve tüm L-Bandı boyunca kazanç spektrumu düzleşmektedir. Bu noktada, belirli bir sinyal dalgaboyunda, artan Bragg dalgaboyu ile kazanç spektrumunun ortalamasında ciddi azalmalar meydana gelmektedir. Böylelikle, daha uzun dalgaboylu FBG’lerde etkin kazanç kontrolü sağlanabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4. Simetrik iki dar bantlı FBG kullanılan F-P lazer kontrollü L-EDFA’da kazanç spektrumunun Bragg dalgaboyu ile değişimi (FBG yansıtma oranları: (a) 1534 nm, (b) 1542 nm, (c) 1550 nm, (d) 1554 nm, (e) 1558 nm).

Bu bölümde son olarak, Bragg dalgaboyu 1558 nm için FBG’lerin yansıtma oranının kazanç kontrolüne etkisi incelenmiştir. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi FBG yansıtma oranı azaldıkça kazanç artarken, kazanç spektrumundaki düzleşme azalmaktadır. Çünkü ortalama popülasyon ters birikim faktörü kavite kaybına bağlı değişiminden (Şekil 4.3) anlaşılacağı üzere yansıtma oranı azaldıkça, ortalama popülasyon ters birikim faktöründe artış olmakta ve bu durumda kazancın kontrol edilmesi zorlaşmaktadır.

Elde edilen teorik analizler sonucunda, tasarlanan lazer kavite kontrollü L-EDFA’da ortalama popülasyon ters birikim oranı düştükçe, kazanç daha erken doyuma ulaşacağı ve bunun sonucunda L-EDFA’nın sürekli doyumda çalıştığından dolayı, düşük seviyede rahatlıkla kazancın kontrol edilebileceği anlaşılmıştır.



Şekil 4.5. Simetrik iki darbandlı FBG kullanılan F-P lazer kontrollü L-EDFA’da kazanç spektrumunun FBG yansıtma oranıyla değişimi (Bragg dalgaboyu 1558 nm iken).

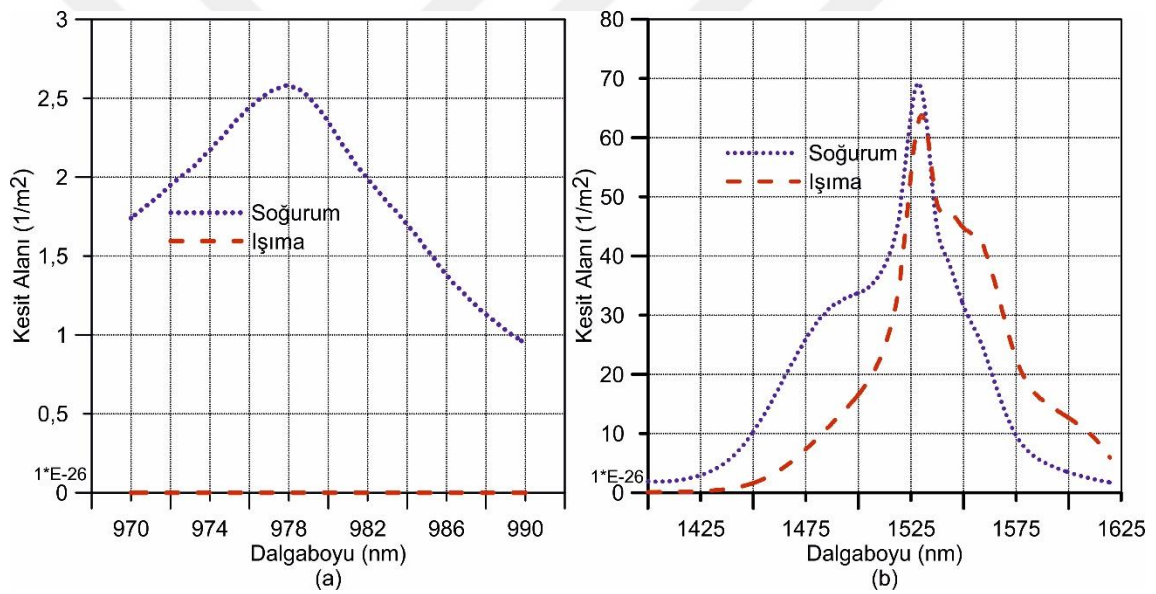
4.2.2. Lazer kavite kontrollü L-EDFA teorik karakteristik sonuçları

Bu bölümde simetrik iki adet FBG kullanılarak oluşturulan lazer kavite kontrollü L-EDFA’da, FBG Bragg dalgaboyu ve yansıtma oranının ortalama popülasyon ters birikim faktörü ve L-EDFA kazancına etkisi incelenmiştir. Elde edilen teorik sonuçlara göre, L-EDFA kazancının kontrol edilebilmesi yani sinyal giriş gücü ile dalgaboyundan bağımsız olarak sabit bir değere kenetlenmesi için yansıtma oranı yüksek (~ 0.95) ve Bragg dalgaboyu C bandının sonunda (1550 nm ve üzeri) olan simetrik FBG çiftinin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Buna ilaveten kazanç spektrumunda düzleşmenin özellikle 1575 nm - 1605 nm sinyal dalgaboyu aralığında sağlanabileceği görülmüştür. Bu bölümde gerçekleştirilen teorik analizler, tezin sonraki bölümlerinde sunulan deneysel sonuçların elde edilmesinde ve kullanılan deneysel düzenek elemanlarının parametre seçiminde belirleyici olmuştur.

4.3. Soğurum ve Işıma Kesiti

Erbiyum katkılı fiberler (EDF), standart $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ tabanlı optik fiberlerden farklı olarak, üretim esnasında öz içerisine çok düşük oranda (ppm) Er^{3+} iyonlarının katkılanması sonucu elde edilirler. Literatürde yapılan çalışmalarda (Becker, 1999) Er^{3+} iyonunun, $980 \pm 10\text{nm}$ ve $1480 \pm 30\text{nm}$ dalgaboyları arasındaki foton enerjisinin soğurum yeteneğinin yüksek olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.6 (a) ve (b)’de sırasıyla, 1.9×10^{25} iyon/ m^3 oranında erbiyum katkılı Liekki

firması, Er30 model fiberinin 980 nm ve 1500 nm dalgaboyu civarındaki soğurum ve ışıma kesiti spektrumları gösterilmektedir. Soğurum ve ışıma kesiti, erbiyum katkı iyonlarının pompa spatial soğurum ve ışıma yeteneklerini gösterir. 980 nm bandına ait spektrum incelendiğinde, Er^{3+} iyonlarının yüksek oranda foton soğurabildiği fakat ışıma yapamadığı görülmektedir. Bu nedenle, 980 nm bölgesinde çalışan pompa lazerleri kullanıldığında pompa/sinyal güç dönüşüm veriminin yüksek olacağı anlaşılmaktadır. Şekil 4.6b incelendiğinde ise 1480 nm bölgesindeki Er^{3+} iyonlarının soğurum yeteneğinin, ışıma yeteneğinden yüksek olduğu, böylelikle bu dalgaboyunda pompa lazeri için kullanıma uygun olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, 1520-1535 nm aralığında soğurum ile ışıma kesitleri birbirine yakın iken, 1535 nm’den sonra ışıma kesiti, soğurum kesitinden çok daha yüksek olmaktadır.

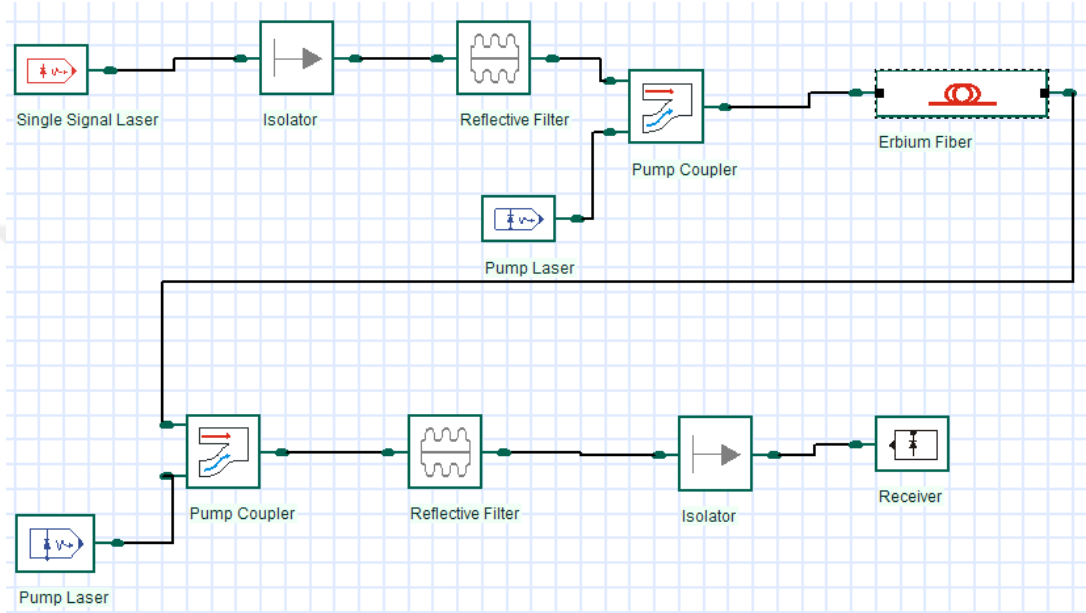


Şekil 4.6. Liekki firmasının Er30 erbiyum katkılı fiberinin (a) 980 nm ve (b) 1500 nm dalgaboyu bölgeleri için soğurum ve ışıma kesiti.

4.4. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA'nın Simülasyonu

Tasarımı gerçekleştirilen lazer kavite kontrollü L-EDFA için lisansı Dumlupınar Üniversitesi, Fotonik Teknolojiler Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne ait OptiAmplifier v4.0 programı ile simüle çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kazanç kenetleme ve spektral düzeltirme performanslarını analiz etmek için şekil 4.7'de görüldüğü gibi klasik ve lazer kavite kontrollü yapıda L-EDFA düzenekleri kurulmuştur. Hem ileri hem de geri yönlü pompalanan klasik yapıdaki L-EDFA'ya, F-P lazer kontrollü L-EDFA yapısını oluşturmak için hem giriş hem de çıkışına yansıtıcı tipte FBG eklenmiştir. Böylelikle önceki bölümde de teorik olarak analizi

yapılan lazer kavite kontrollü L-EDFA yapısı gerçekleştirilmiştir. Yansıtıcı tipli filtrenin modeli Gaus, iletim kaybı 0.5 dB ve bant genişliği 0.2 nm seçilmiştir. Ayrıca, EDFA'nın teorik analizi için Giles modeli kullanılmış, fiberde LP01 modunun kılavuzlandığı varsayılmıştır. Pompa lazerleri, ileri yönde 974 nm ve geri yönde 976 nm dalgaboyuna sahip olup, çıkış güçleri 120 mW ayarlanmıştır.

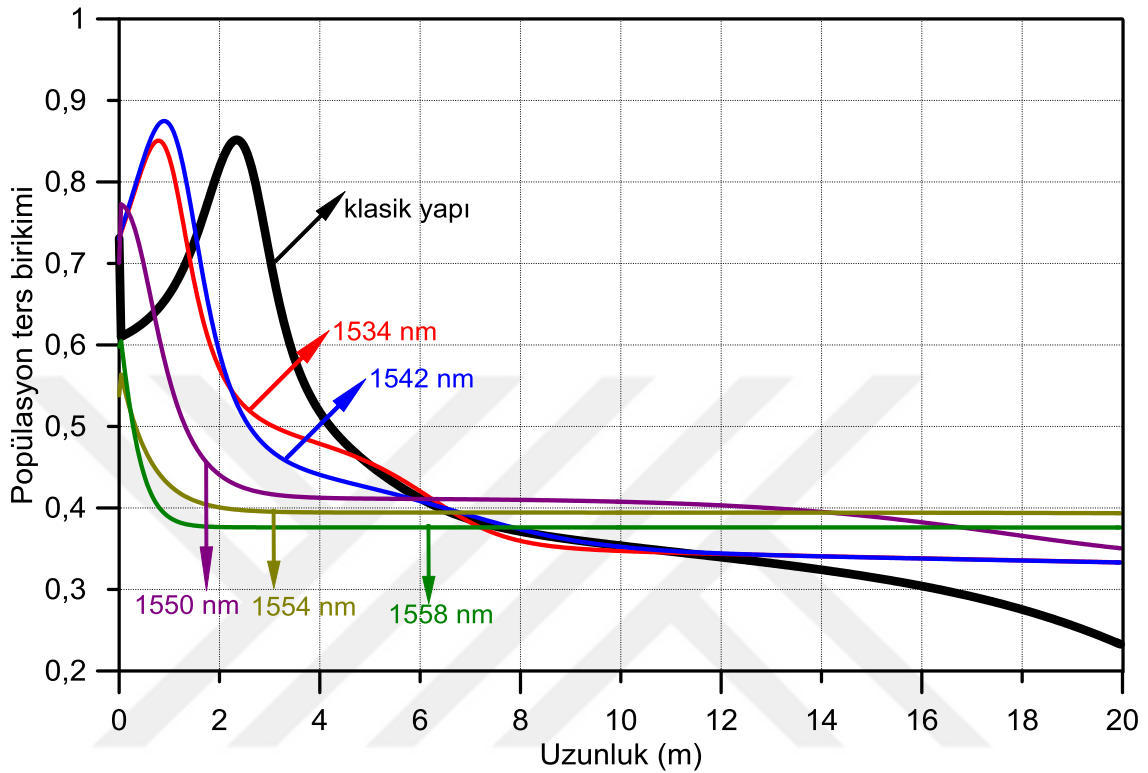


Şekil 4.7. Optiwave 4.0 yazılımı ile simüle edilen (a) klasik (b) lazer kavite kontrollü L-EDFA konfigürasyonu.

4.4.1. Popülasyon ters birikimi simülasyonu

Yapılan ilk simülasyon çalışmasında, klasik L-EDFA ile lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın erbiyum katkılı fiber boyunca, popülasyon ters birikimi faktörü incelenmiştir. Lazer kavite kontrollü L-EDFA konfigürasyonunda FBG yansıtıcı filtre merkez dalgaboyu 1534 nm, 1542 nm, 1550 nm, 1554 nm ve 1558 nm olarak seçilmiştir. Bu simülasyonlarda, sinyal giriş gücü -30 dBm ve sinyal dalgaboyu 1585 nm olarak ayarlanmıştır. Klasik ve lazer kavite kontrollü L-EDFA konfigürasyonları için popülasyon ters birikim faktörünün EDF uzunluğuyla değişimi şekil 4.8'te görülmektedir. Şekil 4.8'ten, klasik L-bant EDFA'da popülasyon ters birikim faktörünün, EDF'nin ilk metrelerinde hızlı bir şekilde artarak, 2-3 m mesafede maksimuma ulaştığı, daha uzun mesafelerde ise hızla azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, lazer kavite kontrollü L-EDFA'da FBG Bragg dalgaboyu, 1534 nm'den 1558 nm doğru arttıkça popülasyon ters birikim faktörü değişimi azalarak daha düzgün hale gelmektedir. FBG merkez dalgaboyu 1554 nm ile 1558 nm'de iken popülasyon ters birikim faktörü neredeyse tüm EDF boyunca sabit kalmaktadır. Bu bilgiler

ışığında, özellikle 1550 nm'nin üzerindeki bir dalga boyunda sağlanan lazer kavite etkisi ile L-EDFA'da kazanç kontrolünün yapılabileceği anlaşılmaktadır.

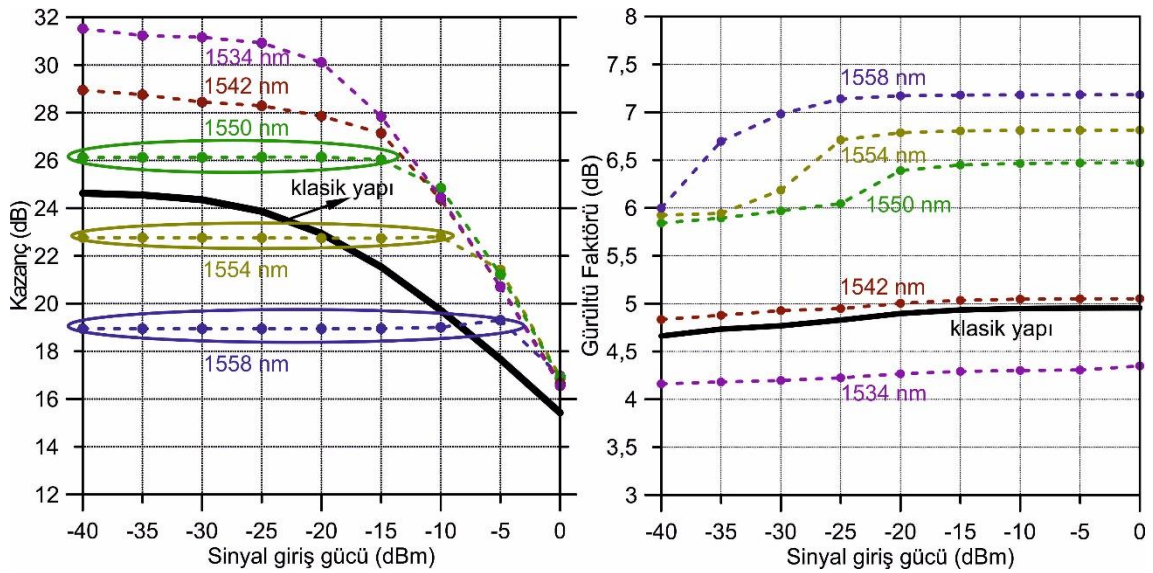


Şekil 4.8. Klasik ve lazer kavite kontrollü L-bant EDFA konfigürasyonları için popülasyon tersbirikim faktörünün EDF uzunluğu ile değişimi.

4.4.2. L-EDFA kazanç ve gürültü faktörünün sinyal giriş gücü ile değişim simülasyonu

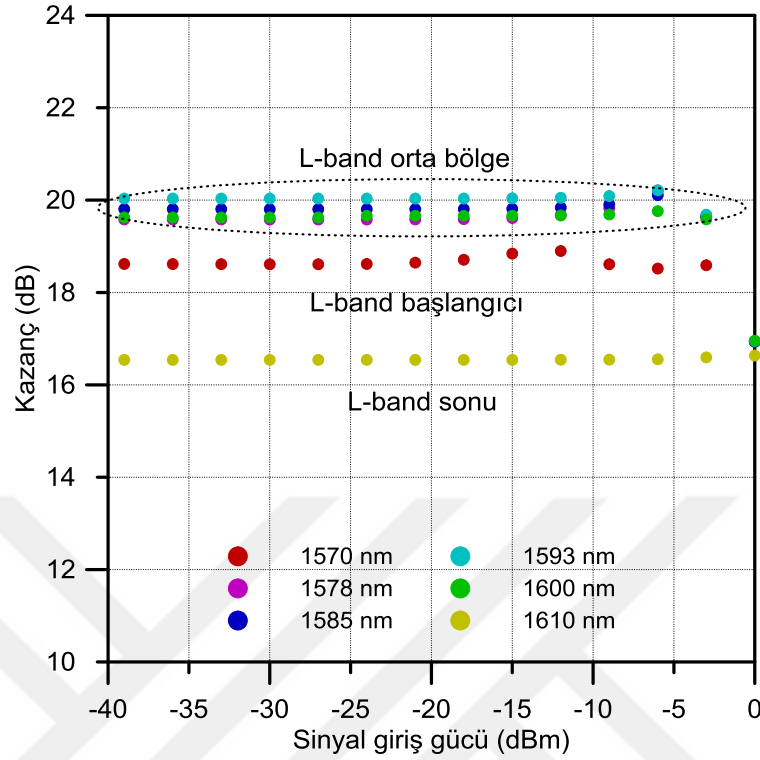
Bu simülasyonda, klasik ve lazer kavite kontrollü L-EDFA'da 1585 nm dalgaboyundaki sinyal giriş gücünü -40 ile 0 dBm arasında değiştirerek, kazanç ve gürültü faktörü performansı incelenmiştir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi klasik L-EDFA'da kazanç -25 dBm'den daha büyük sinyal giriş güçlerinde kazanç, doyuma girdiği için giderek azalmaktadır. Bu konfigürasyonda kazancın sürekli azalması kazanç kenetlemenin olmadığını göstermektedir. Lazer kavite kontrollü L-EDFA'da ise FBG Bragg dalgaboyu 1534 nm, 1542 nm ve 1550 nm iken, klasik yapıya göre küçük sinyal kazancında önemli ölçüde iyileşme olmaktadır. Diğer taraftan, FBG dalgaboyu 1550 nm, 1554 nm ve 1558 nm için geniş bir sinyal giriş gücü aralığında kazanç kenetleme elde edilmiştir. Ayrıca, FBG Bragg dalgaboyu arttıkça kenetleme aralığında da artış olmaktadır. Buna ilaveten kazanç kenetleme aralığındaki salınım düşük olmaktadır. Gürültü faktörü değişimi (Şekil 4.9b) incelendiğinde ise, klasik yapı L-EDFA'da sinyal giriş gücündeki artışa bağlı az da olsa NF değerinde artma olmaktadır. Bununla beraber NF değerinin 5 dB ve altında olması, klasik

yapılı L-EDFA tasarımı için önemli bir avantajdır. Diğer taraftan lazer kavite kontrollü L-EDFA düzeneğinde NF değişimi FBG dalgaboyu 1534 nm iken, klasik yapıya göre daha düşük seviyede gerçekleşmektedir. Ancak FBG merkez dalgaboyu arttıkça NF değerinde artış olmakla beraber özellikle kazanç kenetlenmenin olduğu 1550 nm ve üzerinde, klasik yapıya göre NF açısından bir bozulma söz konusudur. Tüm bu sonuçlar ışığında, FBG Bragg dalgaboyu L-bandına yaklaştıkça kazanç kenetleme aralığı artarken NF değeri de artmaktadır.



Şekil 4.9. Klasik ve lazer kavite kontrollü L-EDFA için 1585 nm dalgaboyunda kazanç (a) ve NF'nin (b) sinyal giriş gücü ile değişimi.

Bu kısımdaki diğer bir simülasyon çalışmasında, lazer kavite kontrollü L-EDFA için FBG dalgaboyu 1558 nm için 1570 nm -1610 nm arasındaki 6 farklı sinyal giriş dalgaboyu için kazanç kenetleme performansı incelenmiştir. Şekil 4.10'dan açıkça görüldüğü üzere tüm farklı L-band sinyal dalgaboyları için kazanç kenetlemesi elde edilmektedir. Ancak, L-Bandının başlangıç ve sonundaki sinyal dalgaboylarında kenetlenen ortalama kazanç değerinde diğer ara dalgaboylarına göre düşüş yaşanmıştır. Diğer taraftan, L-Bant sinyal giriş için dalgaboyu 1578 nm ile 1600 nm aralığında iken kenetlenen kazanç değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan lazer kavite kontrollü L-EDFA konfigürasyonunda kazanç kenetleme ile birlikte L-Bandi boyunca kazanç düzleştirme yeteneğine de sahip olduğunu göstermektedir.

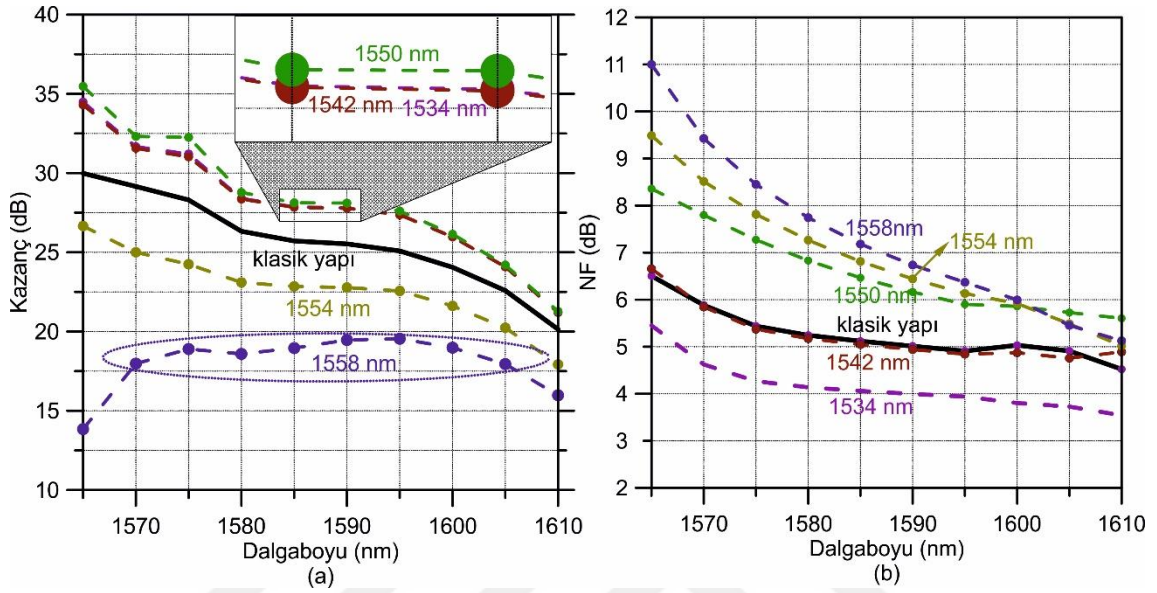


Şekil 4.10. Lazer kavite kontrollü L-EDFA için FBG Bragg dalgaboyu 1558 nm iken farklı L-bandı sinyal dalgaboyları için kazanç kenetleme performansı.

4.4.3. Farklı giriş sinyal dalgaboyları için kazanç ve NF spektrumu

Bu simülasyonda, klasik ve lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın kazanç ve NF performansı sinyal giriş dalgaboyuna bağlı olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, sinyal giriş gücü -30 dBm olarak seçilmiştir. Şekil 4.11a'da görülen kazanç spektrumu incelendiğinde, klasik L-EDFA'da L-Bandının başlarında, kazancın yüksek olduğu daha yüksek dalgaboylarında giderek azaldığı görülmektedir. Lazer kavite kontrollü L-band EDFA'da ise FBG merkez dalgaboyu 1534 nm, 1542 nm, 1550 nm ve 1554 nm iken, kazanç spektrumunun klasik yapıya benzer olduğu fakat kazancın 5 dB'ye kadar daha yüksek olduğu (1554 nm hariç) bulunmuştur. Diğer taraftan, FBG dalgaboyu 1558 nm olduğunda, L-EDFA kazanç spektrumunda 0.8 dB salınım ile ~ 35 nm bir band genişliğinde 18.79 dB ortalama değerli bir düzleştirilmiş kazanç performansı elde edilmiştir. Şekil 4.11b'deki NF spektrumu incelendiğinde ise, spektrumdaki değişimin kazanç spektrumuna benzer şekilde olduğu gözükmemektedir. FBG dalgaboyu 1534 nm iken NF performansının, klasik yapıya göre daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, FBG dalgaboyu 1542 nm ile klasik yapıdaki NF değişiminin birbirine benzer olduğu görülmüştür. Ancak, FBG dalgaboyu 1550 nm ve üzerine çıktığı durumlarda NF değerinde spektrum boyunca ciddi bir artış olmuştur. Tüm bu sonuçlar

ışığında, tasarımı yapılan lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın gürültü faktörü klasik yapıya göre daha yüksek olmasına rağmen, önemli bir kazanç düzleştirme performansı sergilediği görülmüştür.



Şekil 4.11. Klasik ve lazer kavite kontrollü L-band EDFA için -30 dBm sinyal giriş gücünde a) kazanç ve b) NF spektrumları.

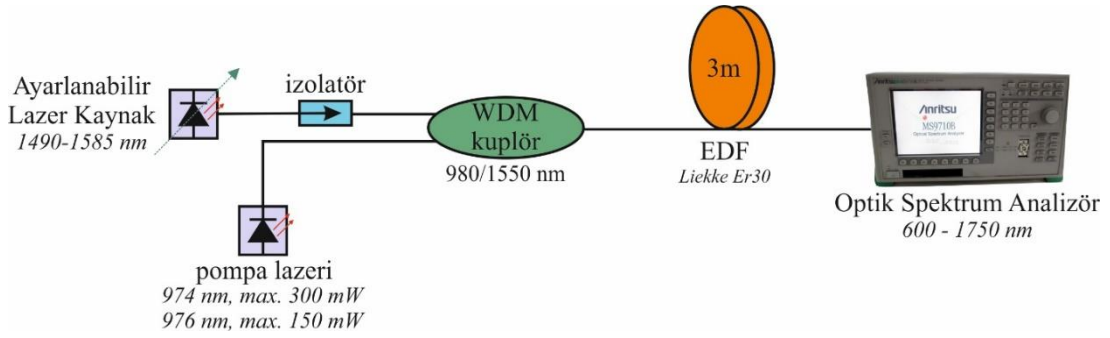
5. LAZER KAVİTE KONTROLLÜ L-BAND EDFA'NIN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

Tezin bu bölümünde, öncelikli olarak mevcut EDF'nin C-Bandı bölgesinde farklı pompalama dalga boyları altındaki karakteristiği çıkarılıp, L-Band EDFA karakteristiği ile kıyaslamak adına ileri yönlü pompalamalı C-Band EDF deneysel karakterizasyon çalışmaları yapılmış ve pompa lazeri dalga boyunun etkileri incelenmiştir. Daha sonra ise çift yönlü pompalanan tek katlı L-Bant EDFA'nın (klasik yapıdaki) kazanç ve gürültü faktörü karakteristikleri çıkartılıp, en yüksek performanslı konfigürasyon belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda son olarak, lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme performansı incelenmiştir.

5.1. İleri Yönlü C-Band EDFA'nın Deneysel Karakterizasyonu

Bu kısımda, ileri yönlü pompalamalı C-Bandında çalışan EDFA tasarımı gerçekleştirilmesi anlatılmaktadır. C-Band EDFA'yı gerçekleştirmek için şekil 5.1'de görülen deneysel düzenek kurulmuştur. Dalga boyu ayarlanabilir lazer kaynak (Santec, TLS-200) çıkışına bağlanan, ayarlı optik zayıflatıcı yardımıyla istenilen güçte üretilen ve yükseltilmesi istenen optik giriş sinyali, pompa lazer ışını ile birlikte WDM kuplör (980/1550 nm) yardımıyla birleştirilerek EDF'ye enjekte edilir. Pompa sinyali ve giriş sinyali aynı yönde ilerlediği için bu konfigürasyon ileri yönlü pompalamalı (forward pumped) EDFA olarak adlandırılmaktadır. 3 metre EDF boyunca optik giriş sinyali, pompa enerjisinin büyük çoğunluğunu alarak kuvvetlendirilir. Düzenekte EDFA girişine, optik geri yansımalar nedeniyle oluşan istenmeyen osilosyonları engellemek için, yalnızca tek yönlü sinyal iletimini sağlayan bir optik izolatör eklenmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan optik izolatör ve WDM kuplör, C bandını kapsayan çalışma dalga boyu aralığına sahiptir. Ayrıca, deneysel düzenekte kullanılan pompa lazerleri sırasıyla 974 nm ve 976 nm çalışma dalga boylarında olup sırası ile 300 mW ve 150 mW maksimum çıkış güç değerlerine sahiptirler. Tasarlanan EDFA'nın deneysel karakteristiklerini elde etmek için gerekli olan optik giriş sinyali, 1495-1585 nm arasında ayarlanabilir bir lazer kaynaktan (Santec TSL-200) elde edilmiştir.

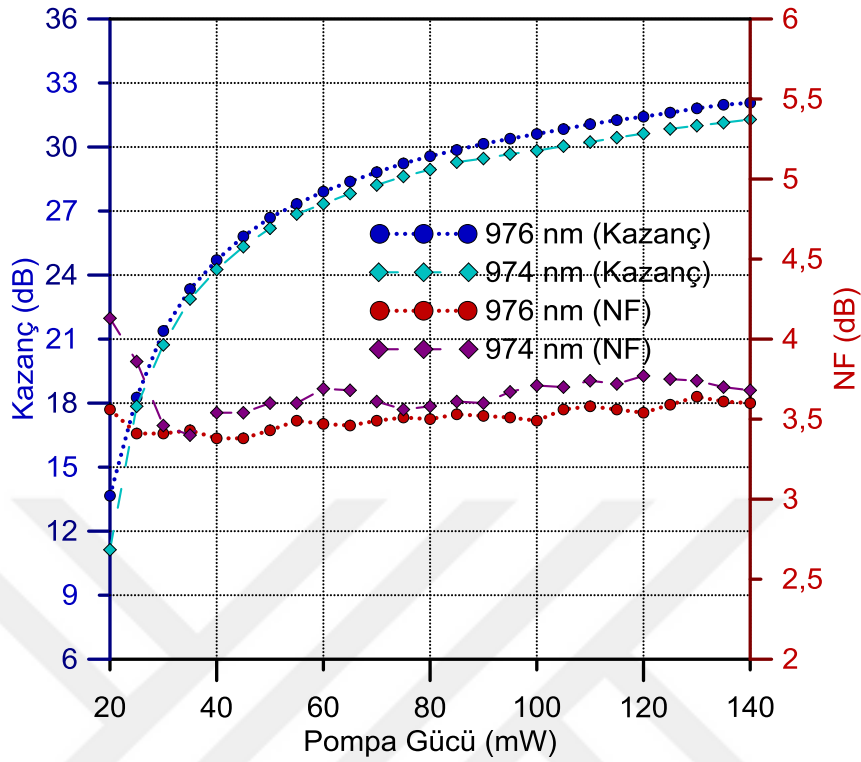
Karakterizasyon çalışmasında kazanç ve NF ölçümleri, optik spektrum analizör yardımıyla (Anritsu MS9710) gerçekleştirilmiştir. EDF ile standart fiberi ek yaparken oluşan kayıpları minimize etmek için üretici firmadan temin edilen fiber parametreleri, fiber ek cihazına (Fitel S176CF) veri olarak girilmiştir.



Şekil 5.1. İki farklı pompa dalgaboyunda çalışan ileri yönlü C-band EDFA düzeneği.

5.1.1. İleri yönlü C-band EDFA’da kazanç ve NF’in pompa gücü ile değişimi

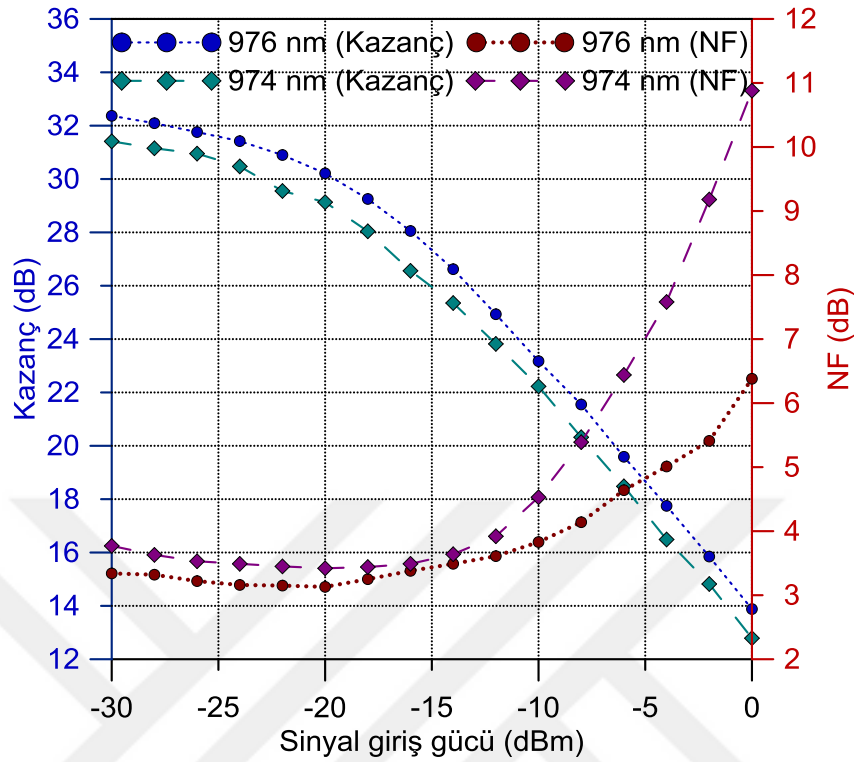
Bu kısımda yapılan tüm ölçümlerde, giriş sinyal dalgaboyu 1550 nm ve giriş sinyal gücü -30 dBm olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, EDFA’nın kazanç ve gürültü faktörünün pompa gücü ile değişimi şekil 5.2’de gösterilmiştir. Kazanç değişimi incelendiğinde, 50 mW pompa gücüne kadar hızlı bir artış gösterdiği, daha yüksek pompa güçlerinde ise bu artış hızının azaldığı ve EDFA kazancının doyuma ulaştığı görülmektedir. 974 nm dalgaboyunda çalışan pompa lazeri ile pompalama yapıldığında 140 mW pompa gücünde kazanç 31.29 dB ile maksimum değeri alırken, NF değeri 3.7 dB olmaktadır. 976 nm dalgaboyunda çalışan pompa lazeri için ise 140 mW güçte kazanç 32.07 dB ve NF değeri 3.6 dB olmaktadır. Genel olarak, her iki pompa lazerine göre kazanç ve NF değişimi incelendiğinde, 976 nm lazer diyot ile pompalama yapılan EDFA performansının 974 nm’de pompalanan EDFA’ya göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, şekil 4.6’dan da anlaşılabileceği gibi EDF’nin 976 nm’deki pompa foton soğurum yeteneğinin, 974 nm’ye göre nispeten daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Er^{3+} iyonlarının daha fazla foton soğurması, pompa/sinyal güç dönüşüm verimini artırmakta ve böylelikle aynı güçteki ancak farklı dalgaboyundaki pompa sinyali için daha yüksek kazanç elde edilebilmektedir. Diğer taraftan NF değeri, pompa gücü 35-50 mW iken, her iki pompa kaynağı için en düşük değerlerdedir. Ancak, 50 mW üzeri pompa güçlerinde artan doyum etkileri nedeniyle NF değeri kısmi artış göstermiştir. Genel olarak, her iki pompa kaynağı için NF değerinin 4 dB’nin altında olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. 976 nm ve 974 nm dalgaboyunda çalışan iki farklı pompa lazer için EDFA kazanç ve gürültü faktörünün pompa gücü ile değişimi. (Sinyal giriş dalgaboyu 1550 nm ve gücü -30 dBm'dir.).

5.1.2. İleri yönlü C-band EDFA'da kazanç ve NF'in sinyal giriş gücü ile değişimi

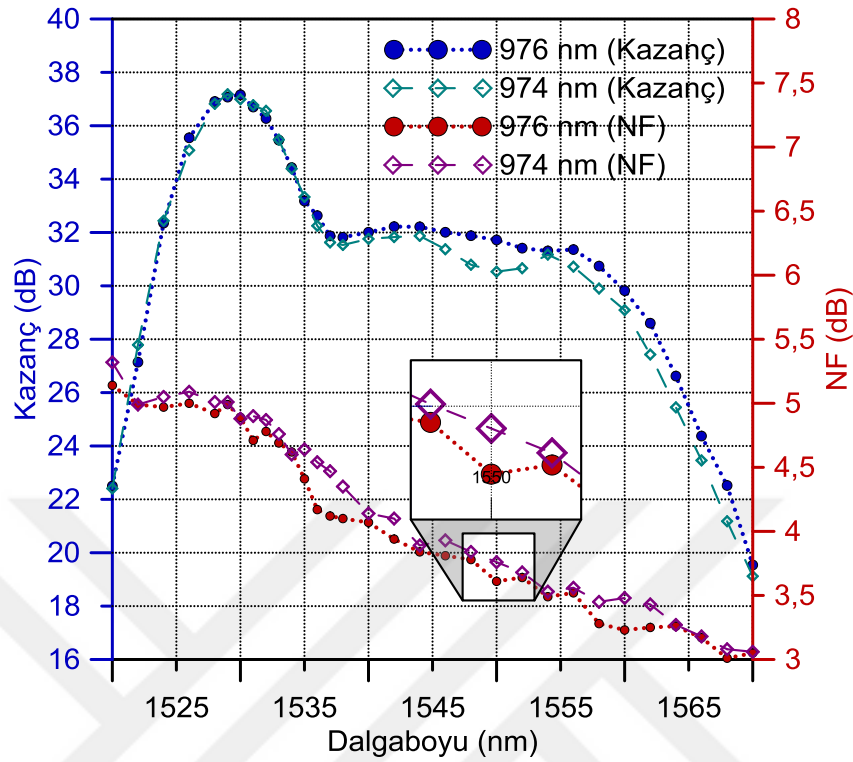
Bu kısımda, 1550 nm'de çalışan lazer kaynağına bağlı ayarlanabilir optik zayıflatıcı yardımıyla sinyal giriş gücü değiştirilerek, EDFA'nın sinyal giriş gücüne bağlı kazanç ve NF karakteristikleri elde edilmiştir. Bu ölçümler sırasında, uygulanan pompa gücü her iki pompa kaynağı için 90 mW olarak sabitlenmiştir. Sinyal giriş gücü -30 dBm ile 0 dBm arasında (3 dB aralıklarla) değiştirilerek elde edilen sonuçlar şekil 5.3'te verilmiştir. Sinyal Giriş gücü -20 dBm'in üzerine çıktığında, her iki pompa dalgaboyu için kazanç 30 dB'in altına düşmektedir. Kazancın azalmasıyla birlikte gürültü faktörü değeri de artmakta ve yaklaşık -10 dBm sinyal giriş gücünden itibaren 4 dB'in üzerine çıkmaktadır. Genel olarak, her iki pompa dalgaboyu için EDFA performansı kıyaslandığında, beklenildiği gibi pompa/sinyal güç dönüşüm veriminin daha yüksek olması nedeniyle 976 nm pompa dalgaboyunda, EDFA kazanç ve NF performansının 974 nm pompa dalgaboyundaki EDFA'ya göre daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3. 976 nm ve 974 nm dalgaboyunda çalışan iki farklı pompa lazer kaynağı için EDFA kazanç ve gürültü faktörünün sinyal giriş gücü ile değişimi (Sinyal dalgaboyu 1550 nm, pompa gücü 90 mW'tır.).

5.1.3. İleri yönlü C-band EDFA'da kazanç ve NF'in sinyal dalgaboyu ile değişimi

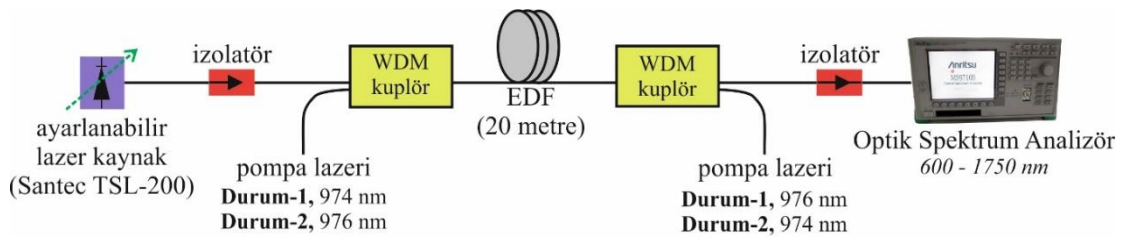
EDFA'nın iki farklı dalgaboyundaki pompa kaynağı için kazanç ve NF spektrumları şekil 5.4'te görülmektedir. Bu çalışmada, sinyal dalgaboyu C bandını kapsayacak şekilde 1520-1570 nm arasında 2 nm aralıklarla artırılmış, sinyal giriş gücü -30 dBm'de sabit tutulmuştur. Pompa gücü her iki kaynak için 90 mW olarak ayarlanmıştır. Şekil 5.4'te verilen EDFA kazanç spektrumu, şekil 4.6b'de verilen Er^{3+} iyonlarının C bandındaki ışıma kesiti spektrumu ile örtüşmektedir. Her iki pompa dalgaboyu için 1530 nm bölgesinde kazanç en yüksek değerine ulaşmakta, ancak bununla beraber NF değeri de 4 dB'nin üzerine çıkmaktadır. EDFA'nın C bandı boyunca kazancı her iki pompa dalgaboyu için 30 dB'nin üzerinde ve ortalama NF değeri 4 dB'in altındadır. 1565 nm ve ötesini kapsayan L-bandında ise Er^{3+} iyonlarının azalan ışıma kesitine bağlı olarak kazanç da önemli ölçüde azalmaktadır. 974 nm ve 976 nm pompa lazer dalgaboyları için EDFA performansı kıyaslandığında, 976 nm dalgaboyunda pompalanan EDFA'nın kazanç ve NF değerlerinin nispeten daha yüksek olduğu, kazanç spektrumunun 976 nm dalgaboyunda pompalama için L-bandına doğru genişlediği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.4. 976 nm ve 974 nm dalgaboyunda çalışan iki farklı pompa lazer kaynağı için EDFA kazanç ve gürültü faktörünün sinyal dalgaboyu ile değişimi. (Sinyal giriş gücü -30 dBm, pompa gücü 90 mW'tır.).

5.2. Klasik Yapılı L-EDFA'nın Deneysel Karakterizasyonu

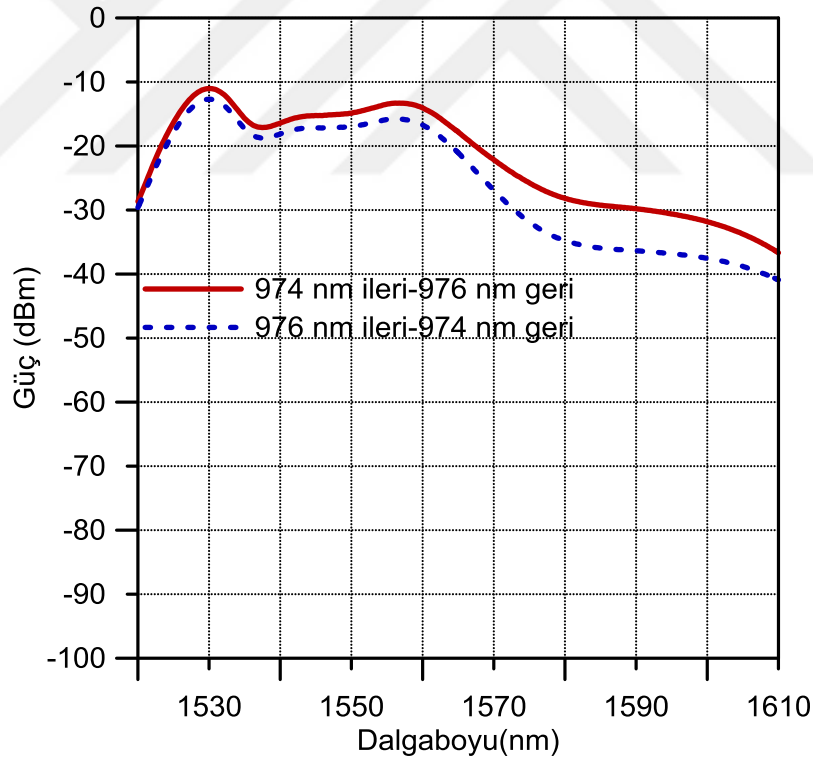
Klasik yapılı L-EDFA'da, C-Bant EDFA'dan farklı olarak daha uzun erbiyum katkılı fiber kullanılmış, hem ileri hem de geri yönlü pompalanmıştır (Şekil 5.5). Ayrıca üretici firmadan elde edilen erbiyum katkılı fiber parametreleri veriler ve optiamplifier 4.0 yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda L-bandı bölgesinde yeterli düzeyde kazanç elde edilmesi için EDF uzunluğu 20 metre olarak seçilmiştir. Deneysel düzende, C-Bandı EDFA'da kullanılan pompa lazerleri, optik izolatör ve WDM kuplör elemanları kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Klasik yapılı çift yönlü pompalamalı L-EDFA deneysel düzeneği.

5.2.1. Klasik yapılı L-EDFA’da ileri yönlü ASE gürültü spektrumu

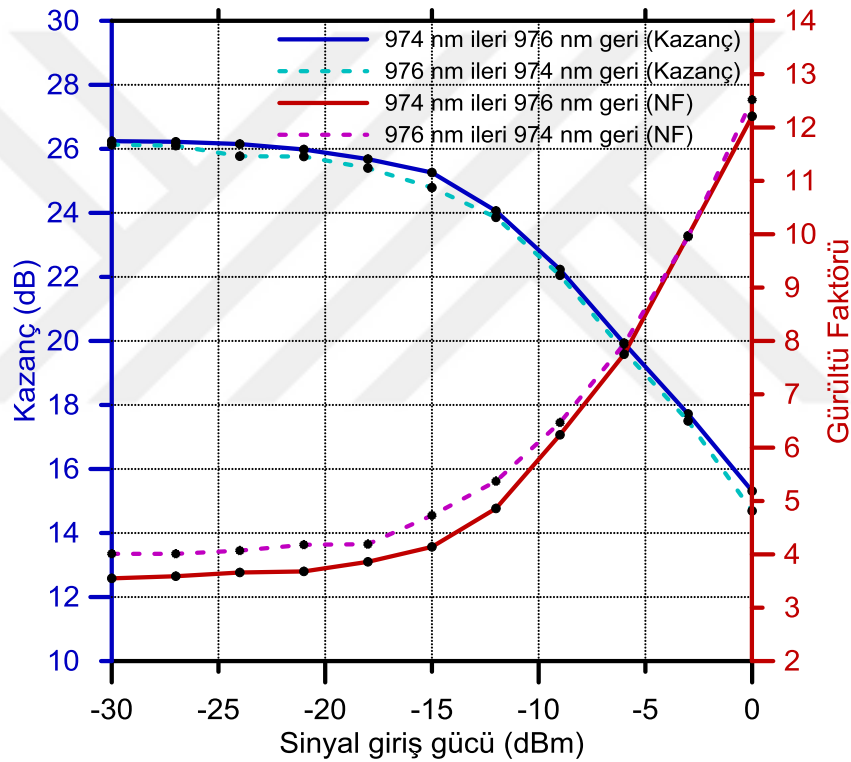
Bu kısımda yapılan ölçümler, 974 nm ile 976 nm dalgaboylu pompa lazer kaynaklarının ileri ve geri pompalamadaki yerleri değiştirilerek, klasik yapılı L-EDFA için performansı üzerindeki etkisini içermektedir. Öncelikli olarak her iki durum için, ileri yönlü ASE gürültüsünün spektrumları ölçülmüştür. Bu ölçüm sırasında her iki pompa lazer kaynağı 120 mW güce ayarlanıp, EDFA’ya herhangi bir giriş sinyali uygulanmamıştır. Şekil 5.6’da açıkça görüldüğü gibi 974 nm ileri yönlü pompalamalı ve 976 nm geri yönlü pompalamalı olan konfigürasyonda, ileri yönlü ASE gürültüsü diğer konfigürasyona göre daha yüksek çıkmaktadır. Ayrıca, her iki konfigürasyon için Er^{3+} iyonlarının ışıma yeteneğine bağlı olarak C-bandındaki ASE güç seviyesi, L-bandındaki ASE güç seviyesine göre daha yüksek çıkmıştır. Diğer taraftan, L-bandı bölgesinde kazanç spektrumunda iyileşme ve/veya düzleşme olması için klasik yapılı L-EDFA’da bir takım değişiklikler yapma zorunluluğu da bu grafikten net bir şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 5.6. Klasik yapılı L-EDFA’da ileri ve geri yönlü pompa lazer dalgaboylarının değiştirilmesine bağlı ileri yönlü ASE gürültü spektrumlarının kıyaslanması.

5.2.2. Klasik yapılı L-EDFA'da kazanç ve NF'in sinyal giriş gücü ile değişimi

Bu kısımda klasik yapılı L-EDFA kazanç ve NF performans sinyal giriş gücü ile değişimi incelenmiştir. Bu ölçüm sırasında giriş sinyali dalgaboyu 1585 nm ve her iki pompa lazer kaynağı için çıkış gücü 120 mW olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 5.7'deki grafikten anlaşılabacağı üzere önceki ölçümlere benzer şekilde, 974 nm pompa lazeri ileri yönlü, 976 nm pompa lazeri geri yönlü olan durumda daha iyi bir EDFA performansı elde edilmiştir. Ayrıca, sinyal giriş gücündeki artışa bağlı olarak, L-EDFA kazancında azalma ve NF değerinde bir artış görülmüştür. Diğer taraftan, kazançta herhangi bir kenetlenme ortaya çıkmamıştır.

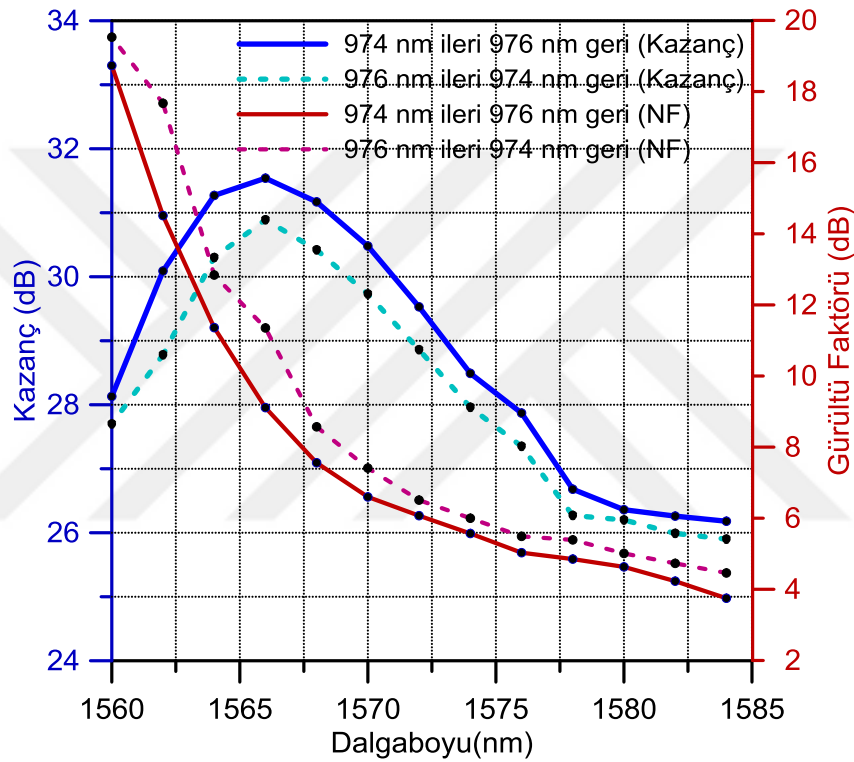


Şekil 5.7. Klasik yapılı L-EDFA'da pompa lazerlerinin 974 nm ve 976 nm iki farklı konfigürasyonu için kazanç ve NF'in sinyal giriş gücü ile değişimi.

5.2.3. Klasik yapılı L-EDFA'da kazanç ve NF'in sinyal giriş dalgaboyu ile değişimi

Şekil 5.8'de pompa lazerlerinin konumuna bağlı klasik yapılı L-EDFA'da elde edilen kazanç ve NF spektrumları görülmektedir. Bu deneyde her iki pompa lazeri 120 mW gücünde olup, sinyal giriş gücü -30 dBm'e ayarlanmıştır. Elde edilen kazanç ve NF performansı birlikte incelendiğinde, 974 nm ileri yönlü ve 976 nm geri yönlü pompa konfigürasyonu için L-EDFA performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki konfigürasyon için L-EDFA gürültü

faktörü 1560 nm civarında en yüksek iken, diğer dalgaboylarında hızla azalan bir değişim göstermiştir. Diğer taraftan 1566 nm’de kazanç en yüksek değerinde iken L-bandının orta bölgesine doğru artan dalgaboyu ile azalma göstermektedir. Yani, her iki konfigürasyon için kazanç spektrumunda düzleşme oluşmamıştır. Tez çalışmasında dalgaboyuna bağımlı yapılan tüm ölçümlerde kullanılan ayarlanabilir lazer kaynağının maksimum dalgaboyu sınırlamasından dolayı en fazla 1585 nm dalgaboyunda ölçüm yapılabilmektedir.



Şekil 5.8. Klasik yapılı L-EDFA’da 974 nm ve 976 nm’de çalışan pompa lazer konfigürasyonlarına bağlı, kazanç ve NF spektrumları.

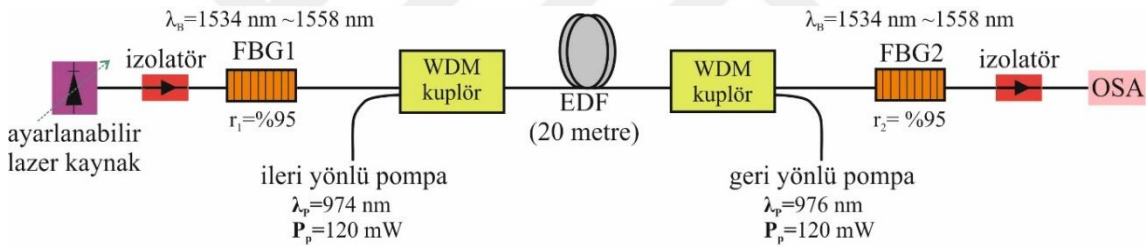
5.2.4. Sonuç

Bu bölümde yapılan klasik yapılı L-EDFA karakterizasyon tüm ölçümleri sonucunda, 974 nm pompa lazeri ileri yönlü ve 976 nm pompa lazeri geri yönlü konfigürasyonun diğer konfigürasyona göre daha üstün performanslı olduğu tespit edilmiştir. Literatürde daha önceki yıllarda yapılan çalışmalar da (Desurvire 1992; Tan 2000) göstermiştir ki 980 nm dalgaboyu bölgesinde geri yönlü pompalama, ileri yönlü pompalamaya göre daha yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü elde edilmektedir. Bu kısımda yapılan ölçüm sonuçları da önceki çalışmalarla tutarlıdır. Ayrıca, her iki konfigürasyon için kazanç kenetlenme ve/veya kazanç spektrumu

düzleştirme yeteneğinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden, 974 nm pompa lazeri ileri yönlü ve 976 nm pompa lazeri geri yönlü konfigürasyonlu olan klasik yapı üzerinde birtakım değişiklikler yapılarak kazanç kenetlenme ve kazanç spektrumu düzleştirme yeteneklerinin L-EDFA düzeneğine eklenmesinin uygun olacağı anlaşılmıştır.

5.3. Lazer Kavite Kontrollü L-EDFA

Bu kısımda önceki bölümde teorik olarak analiz edilen ve şekil 5.9’da detaylı şeması verilen lazer kavite kontrollü L-EDFA’nın sinyal giriş dalgaboyu ve güç değişimine bağlı kazanç ve gürültü faktörü incelenmiştir. Bu kısımda öncelikli olarak, lazer kavite kontrollü L-EDFA tasarımında FBG konumunun etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Sonrasında ise, eş özellikli kullanılan FBG’lerin sadece Bragg dalgaboyları C-Bandı içerisinde adım adım değiştirilerek kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme performansları kapsamlı olarak elde edilmiştir.

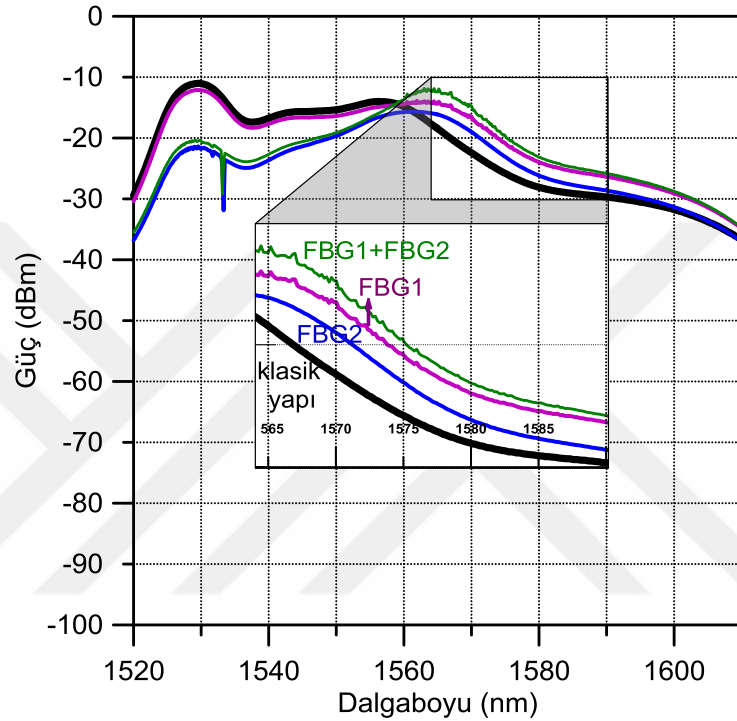


Şekil 5.9. Lazer kavite kontrollü L-EDFA deneysel düzeneği.

5.3.1. FBG konumunun lazer kavite kontrollü L-EDFA performansına etkisi

Lazer kavite kontrollü L-EDFA tasarımında öncelikli olarak 1534 nm Bragg dalgaboyu için FBG konumunun (Şekil 5.9) kazanç ve NF üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada klasik yapıdaki L-EDFA kazanç ve NF performansı, a) FBG1 b) FBG2 c) FBG1+FBG2 olmak üzere 3 ayrı konfigürasyonla kıyaslanmıştır. Öncelikli olarak, deneysel düzeneğe giriş işareti uygulanmadan her iki pompa kaynağının gücü 120 mW iken, ileri yönlü ASE spektrumları ölçülmüştür. Şekil 5.10’da görülen ileri yönlü ASE spektrumları incelendiğinde klasik yapıya göre FBG’li konfigürasyonlardaki ileri yönlü ASE gürültüsü C bandında azalırken L bandında daha yüksek güçte çıkmıştır. Diğer taraftan FBG1 ve FBG2’li lazer kavite kontrollü L-EDFA’daki ileri yönlü ASE gürültü gücünün en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. ASE spektrumlarındaki güç değişimi dikkatli incelendiğinde, FBG ile EDF’a geri yansıtılan C bandındaki ASE ile ikincil pompa etkisinin C-bandındaki gücün, L-bandına aktarıldığı ortaya çıkmıştır. Şekil 5.10’dan açıkça görüldüğü gibi 1570 nm’de ileri yönlü ASE güç spektral

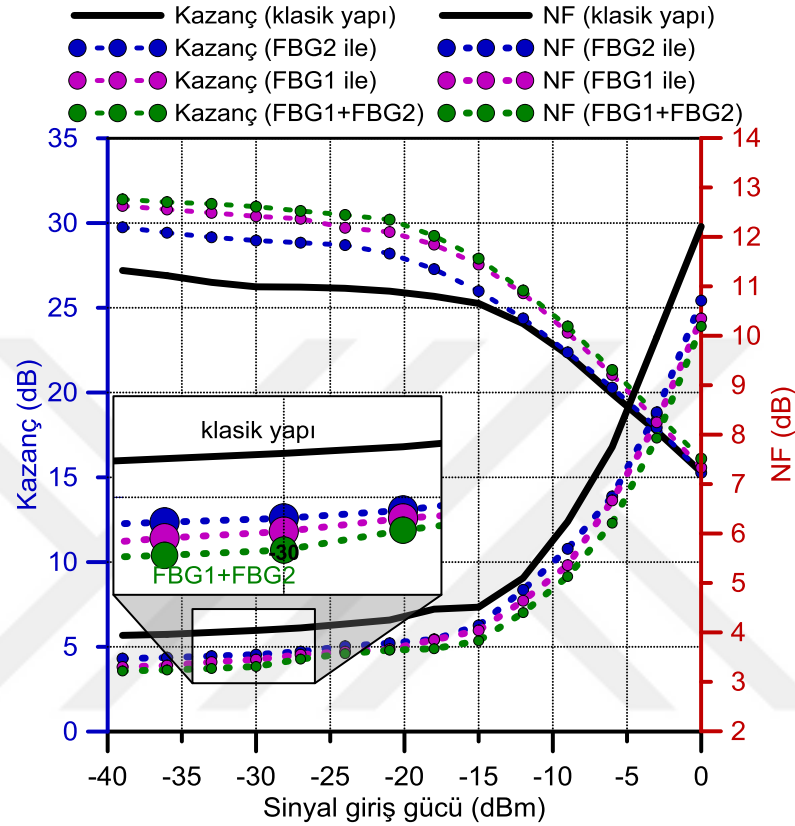
yoğunluğu, FBG1+FBG2'li konfigürasyonda yaklaşık 8 dB'lik bir artış göstermiştir. Bunun sebebi tezin ikinci bölümünde de anlatıldığı gibi (şekil 2.6), EDF'ye FBG yardımıyla geri enjekte edilen C bandındaki ASE fotonlarının soğurulup, Er^{3+} iyonlarının $I_{13/2}$ alt enerji seviyelerinde popülasyon ters birikimi oluşturmaları ve sonucunda L-bandında ikincil ASE ışımalarının gerçekleşmesi şeklinde açıklanabilir.



Şekil 5.10. L-EDFA'da FBG konfigürasyonuna bağlı ileri yönlü ASE'nin klasik yapı ile karşılaştırılması.

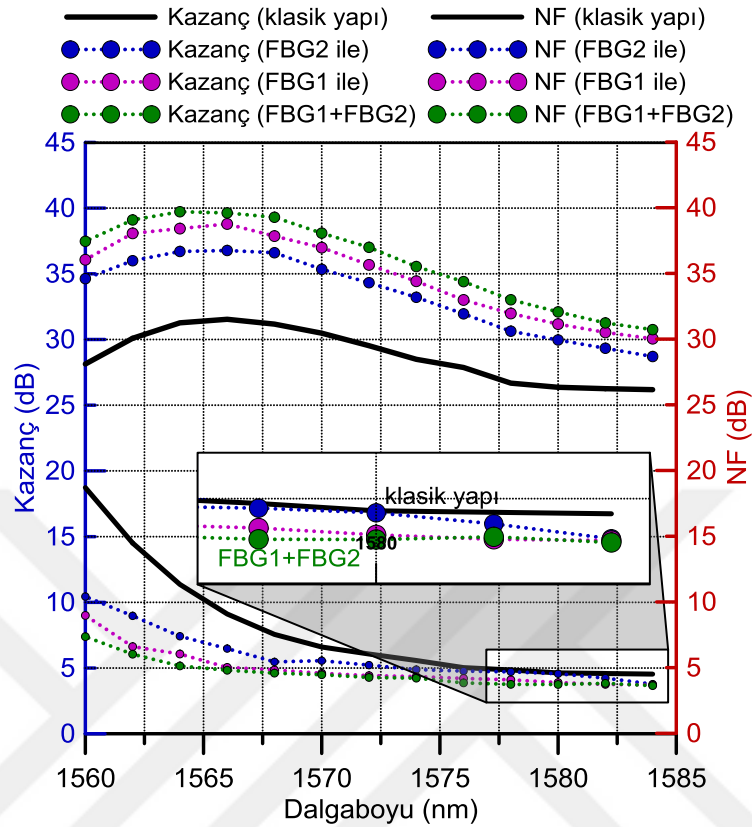
Diğer bir karakterizasyonda ise, lazer kontrollü L-EDFA'da yine klasik konfigürasyon ve FBG'nin farklı konumlandığı konfigürasyonları için sinyal giriş gücüne bağlı kazanç ve NF değişimleri incelenmiştir. Bu ölçüm sırasında sinyal giriş gücü -40 dBm ile 0 dBm arasında 3 dB aralıklarla değiştirilmiştir. Şekil 5.11'de görüleceği gibi, L-EDFA'da kazanç ve NF performansında FBG1 ve/veya FBG2'in sayesinde klasik yapıya göre iyileşme elde edilmiştir. Kazançtaki artış sinyal giriş gücü -30 dBm iken, sırasıyla FBG2, FBG1 ve FBG1+FBG2'li durumlarda 2.7 dB, 4.16 dB ve 4.73 dB olmuştur. Diğer taraftan, tüm konfigürasyonlar için NF değeri oluşan güçlü saturasyon nedeniyle sinyal giriş gücü -15 dBm'den yüksek değerleri için hızlı bir artış göstermiştir. Ayrıca, sinyal giriş gücü -15 dBm'den küçük durumlarda, NF değeri 5 dB'nin altında kalmıştır. Genel olarak şekil 5.11 incelendiğinde kazanç ve NF performans bakımından en iyi sonuç FBG1+FBG2'li konfigürasyonda elde edilmiştir. Bununla beraber

FBG1'li konfigürasyonda, FBG2'li konfigürasyona göre daha yüksek performans iyileşmesi elde edilmiştir.



Şekil 5.11. L-EDFA'da farklı FBG konfigürasyonları için sinyal giriş gücüne bağlı kazanç ve NF performansı.

Bu kısımda yapılan son karakterizasyon çalışmasında farklı FBG'li konfigürasyonlar ve klasik yapı L-EDFA için sinyal giriş dalgaboyuna bağımlı kazanç ve NF performansları karşılaştırılmıştır. Yapılan ölçümlerde sinyal giriş gücü -30 dBm'de sabit tutulmuş ve her iki pompa kaynağı için güç değerleri 120 mW'a ayarlanmıştır. Şekil 5.12'de görüldüğü gibi 1560 nm ve 1585 nm dalgaboyları arasında FBG1 ve/veya FBG2'li yapılarda klasik yapıya göre kazançta artış ve NF'da düşüş yaşanmıştır. Kazançtaki bu artış, sinyal giriş dalgaboyu 1570 nm iken FBG1+FBG2'li konfigürasyonda maksimum 9.01 dB'ye ulaşmıştır. Ölçülen ileri yönlü ASE spektrumundan da anlaşılabileceği üzere FBG1+FBG2'li L-EDFA, yaklaşık olarak 1570-1610 nm arasındaki 40 nm'lik bir bant genişliğinde ≤ -15 dBm sinyal seviyesine kadar L-Bandı bölgesinde iyileştirilmiş kazanç sağlayabilmektedir. Diğer taraftan 1565 nm ile 1585 nm arasında sadece FBG1+FBG2'li yapıda NF değeri 5 dB'nin altında kalmıştır.



Şekil 5.12. L-EDFA’da farklı FBG konfigürasyonları için sinyal giriş dalgaboyu değişimine bağlı kazanç ve NF performansı.

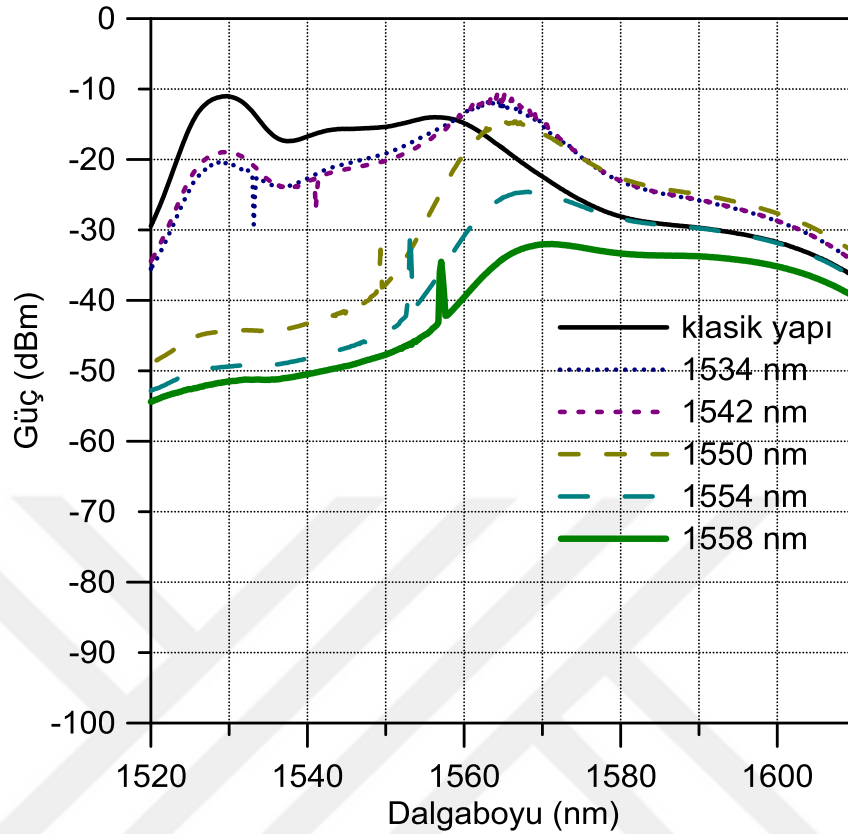
Bu kısımda yapılan ölçümler sonucunda, FBG1+FBG2 konfigürasyonundaki lazer kavite kontrollü L-EDFA yapısı kazanç ve NF performansı bakımından diğer konfigürasyonlara göre daha üstün performanslı çıkmıştır. EDFA giriş ve çıkışına yerleştirilen eş özellikli FBG1 ve FBG2 sayesinde L-EDFA’da yükselteç yapısının dışında tam bir F-P lazer kavite yapısı oluşturulmuş, bu sayede ikincil pompa etkisiyle L-bandındaki kazanç ve NF değerlerinde iyileşme elde edilmiştir. Diğer taraftan lazer kavite kontrollü kazanç kenetleme ve L bandında spektral kazanç düzleştirme yetenekleri kazandırılmıştır. Bu yeteneklerin teknik özellikleri bir sonraki kısımda açıklanacaktır. Ayrıca, bu sonuçlarla DWDM haberleşme sistemlerinde hat yükselteci olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır.

5.3.2. FBG Bragg yansıtma dalga boyunun lazer kavite kontrollü L-EDFA performansına etkisi

Tezin bu kısımda FBG tabanlı lazer kavite kontrollü L-EDFA’larda Bragg dalga boyunun kazanç ve NF performansına etkisi incelenmiştir. Bunu gerçekleştirmek için Bragg dalga boyu sırasıyla 1534 nm, 1542 nm, 1550 nm, 1554 nm ve 1558 nm seçilmiştir. Tüm farklı Bragg dalga boyulu FBG’ler için ileri yönlü ASE kıyaslaması ile birlikte, sinyal giriş gücü ve dalga boyuna bağımlı kazanç ve NF değişimleri gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, bu kısımda asıl olarak L-EDFA’da kazanç kenetleme ve spektral kazanç düzleştirme yeteneğine sahip en uygun FBG Bragg yansıtma dalga boyunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

5.3.2.1. İleri yönlü ASE gürültü gücünün Bragg dalga boyu ile değişimi

Lazer kavite kontrollü L-EDFA’nın detaylı performans analizi için öncelikli olarak FBG1+FBG2 konfigürasyonu için farklı Bragg dalga boylarında C ve L-bandındaki ileri yönlü ASE gürültü güç spektrumunun değişimi, optik spektrum analizör yardımıyla ölçülmüştür. Her iki ileri ve geri yönde pompa gücü 120 mW iken ve L-EDFA’ya herhangi bir giriş sinyali uygulanmadığında elde edilen ASE spektrumları şekil 5.13’de görülmektedir. Şekil 5.13’de verilen spektrumlara göre, Bragg dalga boyu 1534 nm, 1542 nm ve 1550 nm iken L-bandı bölgesindeki ileri yönlü ASE gürültüsü klasik yapıya göre daha yüksek değerde çıkmaktadır. L-bandı bölgesi için genel olarak lazer kontrollü L-EDFA’nın ileri yönlü ASE gürültü gücünün klasik yapıya göre daha yüksek çıktığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, artan λ_B ile beraber ileri yönlü ASE gürültü gücünde azalma meydana gelmekte ve $\lambda_B=1558$ nm’de klasik yapıya göre çok düşük seviyede bir L-bandı ASE spektrumu elde edilmektedir. Bunun nedeni, 1558 nm’de gerçekleşen güçlü lazer amplifikasyon ile açıklanabilir. Diğer taraftan, C- bandı bölgesinde ileri yönlü ASE gürültü gücünde FBG’lerin etkisiyle, klasik yapıya göre ciddi bir azalma meydana gelmekte ve C bandındaki ASE sinyali ikincil pompalama etkisi ile L bandındaki ASE sinyaline transfer olmaktadır.

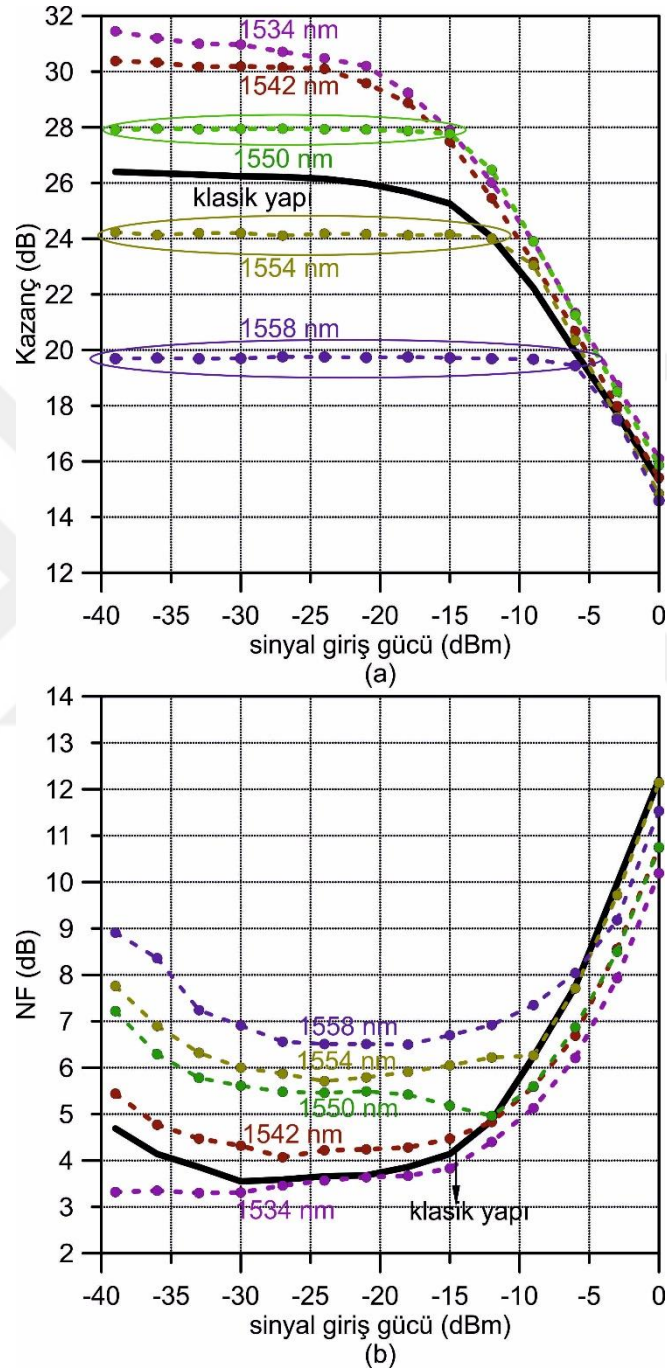


Şekil 5.13. Lazer kavite kontrollü L-EDFA’da ileri yönlü ASE gürültüsünün farklı Bragg dalgaboyları için karşılaştırılması.

5.3.2.2. Farklı Bragg dalgaboyları için sinyal giriş gücüne bağlı kazanç ve NF değişimi

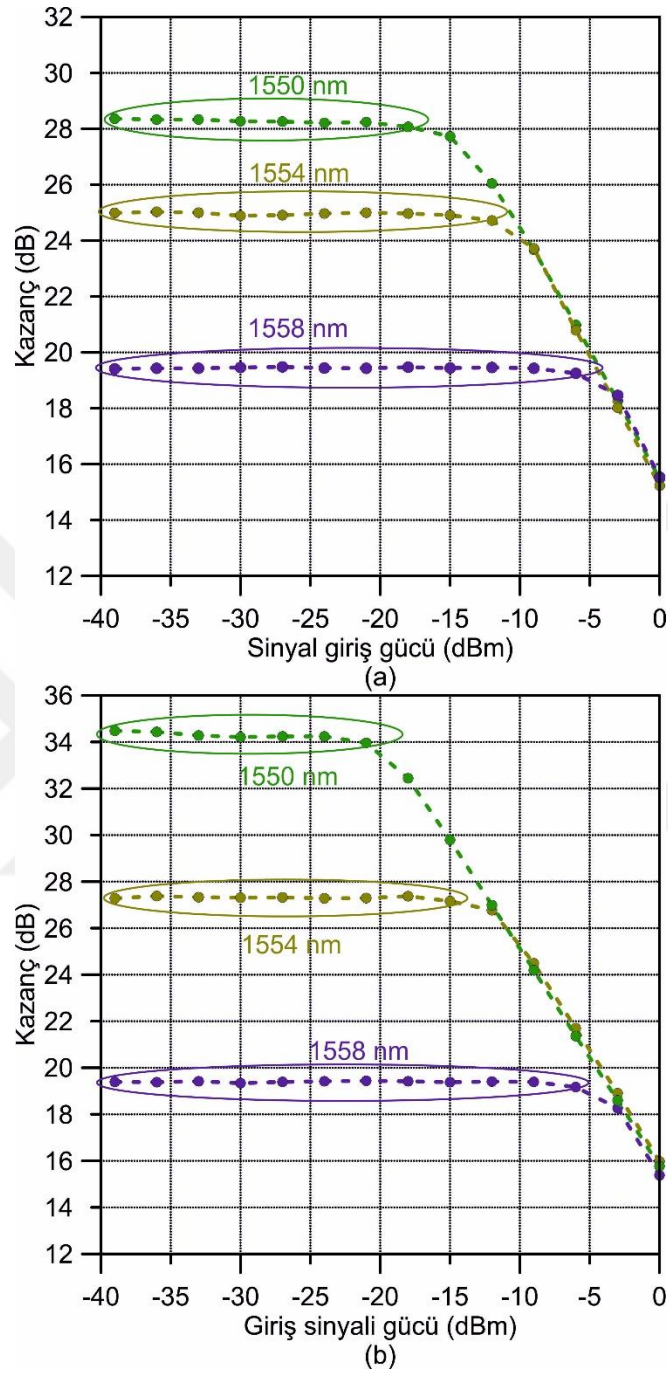
Bu bölümde, FBG1+FBG2 konfigürasyonu için sinyal giriş gücü -40 dBm ile 0 dBm arasında 3 dB aralıklarla değiştirilerek lazer kontrollü L-EDFA’nın, 1585 nm sinyal dalgaboyundaki kazanç ve NF performansı ölçülmüştür. Bu ölçümlerde her iki pompa kaynağının çıkış güçleri 120 mW olarak ayarlanmıştır. Şekil 5.14a’da görüldüğü gibi saturasyon seviyesine kadar (≤ -15 dBm), Bragg dalgaboyu arttıkça L-EDFA kazancı azalmakta ve kazanç kenetlenme dinamik aralığı artmaktadır. λ_B değeri 1534 nm, 1542 nm ve 1550 nm iken, küçük sinyal kazancı klasik L-EDFA yapısına göre daha yüksektir. Diğer taraftan $\lambda_B=1550$ nm ve üzerinde iken oluşan lazer osilasyonu sayesinde geniş bir dinamik güç aralığında kazancın sabit tutulduğu görülmüştür. Ayrıca şekil 5.14a’dan net bir şekilde görüldüğü gibi kazanç kenetleme aralığı artan Bragg dalgaboyu ile de artış göstermektedir. En iyi kazanç kenetleme performansı Bragg dalgaboyu 1558 nm iken 0.16 dB salınımla ~ 33 dB bir dinamik aralıkta gerçekleşmiştir. Şekil 5.14b’deki NF değişimi incelendiğinde ise, Bragg dalgaboyu 1534 nm iken klasik yapıya göre daha düşük NF değerleri elde edildiği görülmüştür. Bunun dışındaki diğer tüm FBG Bragg dalgaboylarında

ise NF değerleri artan lazer osilasyon etkisi ile artmakta, kazanç kenetleme yeteneğinin aksine bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.14. Farklı Bragg dalgaboyları için lazer kavite kontrollü L-EDFA’da (a) kazanç ve (b) NF’in sinyal giriş gücü ile değişimi (sinyal dalgaboyu 1585 nm).

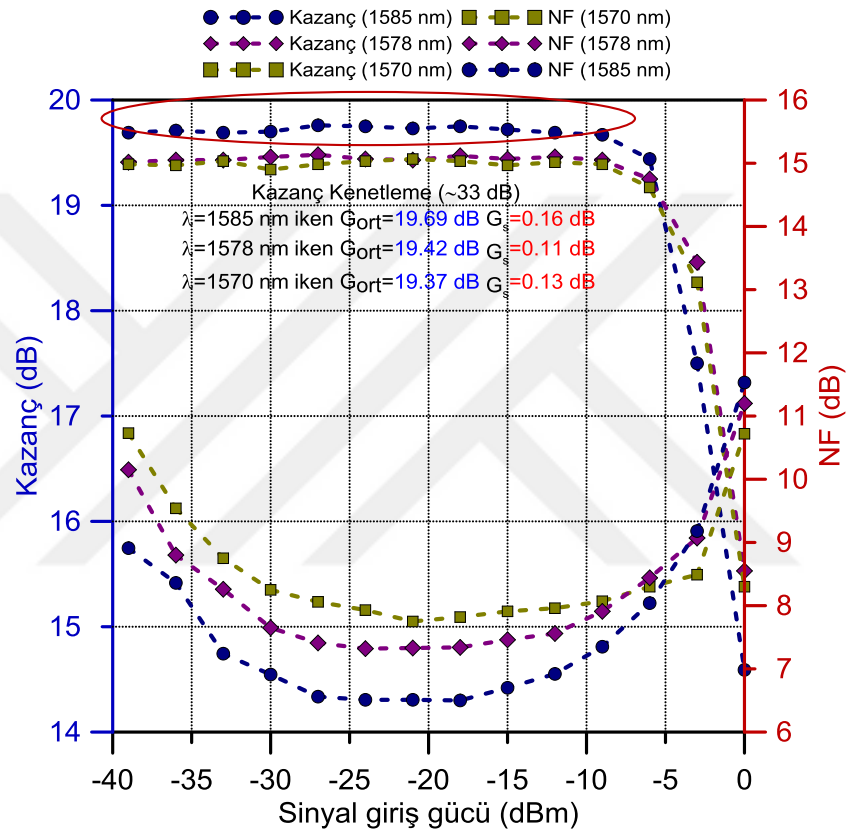
Yapılan diğ er bir ölçümde ise lazer kavite kontrollü L-EDFA'da iki farklı sinyal dalgaboyu için (1578 nm ve 1570 nm) sinyal giriş gücüne bağımlı kazanç değışimi elde edilmiştir.  nceki  l  mde elde edilen bilgiler ışığında Bragg dalgaboyları olarak L-bandında kazanç kenetleme yeteneğı olan 1550 nm, 1554 nm ve 1558 nm seçilmiştir. Sinyal dalgaboyu 1578 nm ve 1570 nm iken, şekil 5.15'de g r ld ğı gibi Bragg dalgaboyuna bağı olarak değışen dinamik aralıklarda kazanç kenetleme yeteneğı  l  lm řtir. Sinyal dalgaboyu L-bandının başlangıcında (1570 nm iken) kenetlenen ortalama kazanç değıeri, 1578 nm'ye göre daha yüksek  l  lm řtir. Bununla beraber Bragg dalgaboyu 1550 nm iken, kazanç kenetleme dinamik aralığında azalma (≈ 18 dB) meydana gelmiştir. Diğ er taraftan, Bragg dalgaboyu 1554 nm ve 1558 nm iken, her iki 1570 nm ve 1578 nm sinyal dalgaboyunda eşit dinamik aralıkta kazanç kenetleme performansını elde edilmiştir. ($\lambda_B=1554$ nm'de 27 dB, $\lambda_B=1558$ nm'de 33 dB, kazanç salınım ≈ 0.1 -0.2 dB.)



Şekil 5.15. 1550 nm, 1554 nm ve 1558 nm Bragg dalgaboylarında tasarlanan L-EDFA'da kazancın farklı sinyal giriş dalgaboylarında (a) 1578 nm ve (b) 1570 nm değişimi.

Kazanç kenetleme performansının en iyi olduğu $\lambda_B = 1558 \text{ nm}$ için L-bandı bölgesindeki farklı dalgaboylu giriş sinyallerine göre elde edilen kazanç ve NF karşılaştırılması şekil 5.16'da gösterilmiştir. L-band sinyal dalgaboyu arttıkça, kenetlenmiş ortalama kazanç değerleri birbirine

yakın çıkmıştır. Ayrıca, geniş bir dinamik aralıkta kenetlenmiş kazancın sinyal giriş gücüne bağlı salınımı ise hemen hemen aynı kalmaktadır. Diğer taraftan NF değerleri de artan sinyal dalgaboyuna bağlı olarak azalmaktadır. Sinyal Giriş gücü -30 dBm'in altında olduğu durumlarda NF değerinde artış gözlemlenmektedir. Ancak, -30 dBm ile -10 dBm aralığında daha sabit ve düşük bir NF değişimi elde edilmiştir.

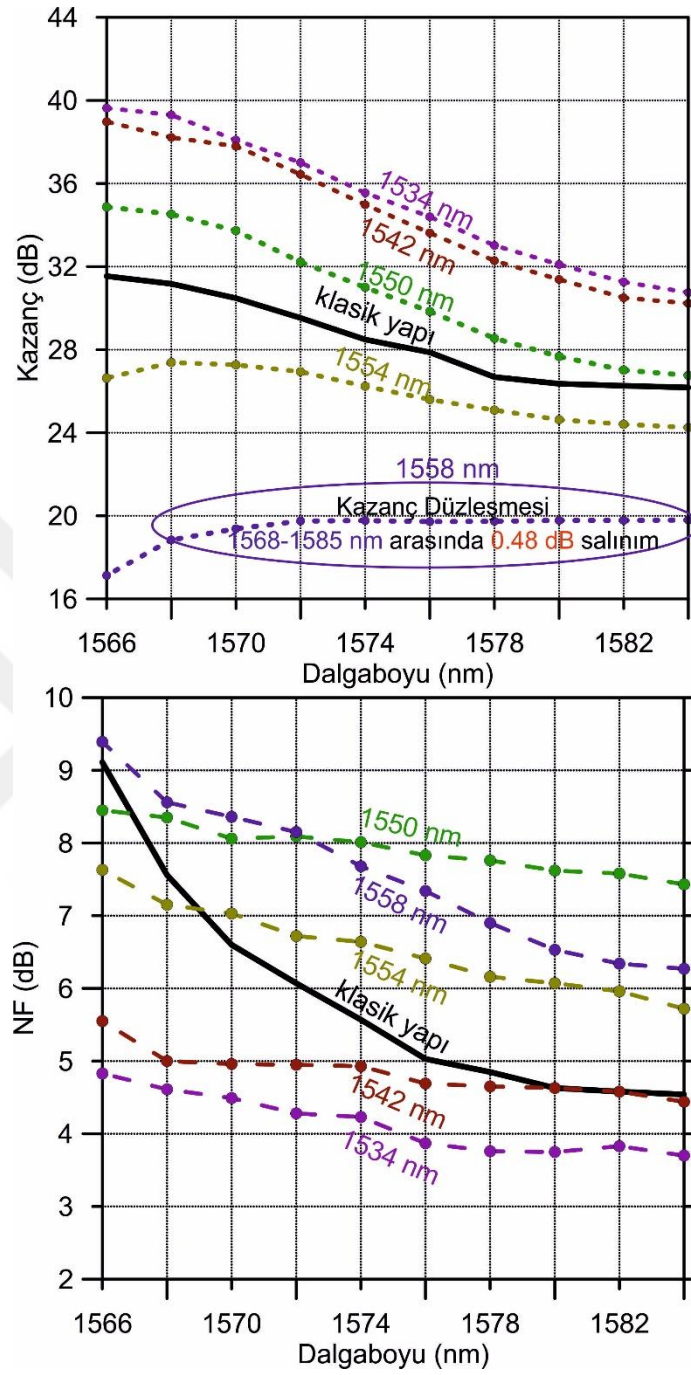


Şekil 5.16. 1570 nm, 1578 nm ve 1585 nm sinyal dalgaboyları için L-EDFA kazanç ve NF'ini sinyal giriş gücü ile değişimi. FBG1+FBG2 Bragg dalgaboyu $\lambda_B=1558$ nm.

Bu kısımda verilen bilgiler ışığında, tez çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen lazer kontrollü L-EDFA için yüksek dinamik aralıkta ve düşük salınlı, yüksek ortalama kazançla sahip kazanç kenetleme performansı başarı ile elde edilmiştir. Özellikle Bragg dalgaboyu 1558 nm iken kazanç kenetleme performansı sinyal dalgaboyu ile neredeyse hiç değişim göstermemektedir. FBG1+FBG2 Bragg yansıtma dalgaboyu $\lambda_B=1558$ nm ve sinyal dalgaboyu 1585 nm iken yaklaşık 33 dB (-40 dBm ile -6 dBm arasında) dinamik güç aralığında, 19.69 dB ortalama kazanç ve 0.16 dB kazanç salınlımı elde edilmiştir.

5.3.2.3. Farklı Bragg dalgaboyları için sinyal dalgaboyuna bağlı kazanç ve NF değişimi

Tezin bu kısmında, lazer kontrollü L-EDFA'nın farklı Bragg dalgaboylarındaki kazanç spektrumu düzleştirme yeteneği ölçülmüştür. Gerçekleştirilen kazanç ve NF spektrumu ölçümlerinde her iki pompa gücü 120 mW, sinyal giriş gücü -30 dBm'de sabit tutulmuş ve sinyal dalgaboyu 1566 nm ile 1585 nm arasında değiştirilmiştir (kullanılan ayarlanabilir lazer kaynak dalgaboyu 1585 nm ile sınırlı olduğundan, L-Bandının sadece ilk yarısında ölçüm yapılabilmektedir). Şekil 5.17a'da görüldüğü gibi Bragg dalgaboyu 1550 nm ve altında iken, klasik yapıya göre değerleri daha yüksek olmasına rağmen, kazanç spektrumu düz yapıda değildir. Bragg dalgaboyu 1554 nm ve 1558 nm iken, kazanç spektrumunda önemli bir düzleşme görülmektedir. Ayrıca, artan Bragg dalgaboyu ile beraber kazanç spektrumundaki dalgaboyuna bağlı kazanç salınımı azalmaktadır. $\lambda_B=1558$ nm iken, 1568-1585 nm arasında 19.61 dB ortalama kazanç ve 0.48 dB kazanç salınım ile önemli bir spektral kazanç düzleşmesi elde edilmiştir. Şekil 5.17b'deki NF değişimi incelendiğinde ise lazer kontrollü L-EDFA'da Bragg dalgaboyu 1534 nm ve 1542 nm iken, klasik yapıya göre düşük değerde ve spektral açıdan düzgün değişen NF spektrumu elde edilmiştir. Bu Bragg dalgaboyları için NF, yaklaşık olarak 5 dB'in altındadır. Diğer taraftan, kazanç kenetleme performansının yüksek olduğu $\lambda_B=1550$ nm, 1554 nm ve 1558 nm Bragg dalgaboyları için L-EDFA NF değerleri genel olarak 6-8 dB aralığında değişmekte olup, bu performans göstergesi sonraki çalışmalarda üzerinde durulması gereken bir problem olarak görülmektedir.



Şekil 5.17. Sinyali giriş dalgaboyuna bağımlı farklı Bragg dalgaboyları için L-EDFA kazanç (a) ve NF (b) performansı.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Erbiyum katkılı fiber yükselteçler (EDFA), optik haberleşme sistemlerinde önemli rol oynamaktadır. Ancak, yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama (DWDM) sistemlerinde, yüksek kapasiteli bilgi iletim ihtiyacını karşılamak için EDFA'ların çalışma bandgenişliklerinin klasik-banttın (C-Band), uzun-dalgaboyu bandına (L-Band) genişletilmesine ihtiyaç vardır. DWDM sistemlerinde, optik kanalın eklenmesi ya da çıkarılması durumunda, EDFA kazancı dolayısıyla optik kanalların çıkış gücü değişebilmektedir. Eğer EDFA'da herhangi bir kazanç kontrol mekanizması kullanılmazsa, bu durum haberleşme sisteminin genel performansında dalgalanmalara yol açmaktadır. Bu sebeple, giriş kanallarının gücü, dalgaboyu veya sayısının değişimlerine dirençli kazanç kenetlemeli ve kazanç spektrumu düzleştirilmiş genişband EDFA tasarımları gerekmektedir.

L-EDFA'nın sinyal giriş gücüne ve dalgaboyuna göre kazanç değerinin sabit kalması tez çalışmasının ana hedefi olarak seçilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda, erbiyum katkılı fiber boyunca ortalama popülasyon ters birikiminin düşük bir değerde sabit tutulması, EDFA'yı doyuma götürdüğünden, kazancın bu şekilde kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır. Bunu gerçekleştirmek için popülasyon ters birikimini EDF boyunca sabit tutmak için ileri ve geri yönlü C bandındaki ASE gürültüsünün belirli bir dalgaboyundaki bir kısmının EDFA'ya geri enjekte edilmesiyle sağlanmıştır. Bu amaçla tez çalışmasında ilk olarak, klasik L-EDFA yapısının giriş ve çıkışına eş özellikli bir FBG çifti yerleştirilerek lazer kavite kontrollü L-Band EDFA tasarımı elde edilmiştir.

Öncelikle, simetrik iki adet FBG kullanılarak oluşturulan F-P lazer kontrollü L-EDFA'da, FBG Bragg yansıma dalgaboyu ve oranının ortalama popülasyon ters birikim faktörü ve L-EDFA kazancına etkisi teorik olarak incelenmiştir. Elde edilen teorik sonuçlara göre, L-EDFA kazancının kontrol edilebilmesi ve sinyal giriş gücü ile dalgaboyundan bağımsız olarak sabit bir değere kenetlenmesi için yansıtma oranı yüksek (~ 0.95) ve Bragg dalgaboyu C bandının sonuna yakın (1550 nm ve üzeri) olan simetrik FBG çiftinin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Buna ilaveten kazanç spektrumunda düzleşmenin özellikle 1575 nm - 1605 nm sinyal dalgaboyu aralığında sağlanabileceği de görülmüştür. Elde edilen teorik analizler, simülasyonu ve deneysel çalışması gerçekleştirilecek bu tasarımdaki elemanların parametre seçiminde belirleyici olmuştur.

İkinci aşamada ise, tasarımı gerçekleştirilen lazer kavite kontrollü L-EDFA için lisansı Dumlupınar Üniversitesi, Fotonik Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (FOTAM) ait OptiAmplifier v4.0 programı ile simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, FBG Bragg dalgaboyu 1534 nm'den 1558 nm'ye doğru arttırıldığında

popülasyon ters birikim faktörü değişiminin azalarak daha kararlı hale geldiği görülmüştür. FBG merkez dalgaboyu 1554 nm ve 1558 nm iken, popülasyon ters birikim faktörü neredeyse tüm EDF boyunca sabit kalmaktadır. Bu bilgiler ışığında, özellikle 1550 nm'nin üzerinde seçilen bir Bragg dalgaboyunda sağlanan lazer osilasyonları ile L-EDFA'da yeterli kazanç kontrolünün yapılabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca, giriş sinyal gücü ve dalgaboyuna bağımlı kazanç ve gürültü faktörü değişimlerinde simülasyon çalışmaları ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, FBG Bragg dalgaboyu 1550 nm ve üzerinde iken tasarlanan lazer kavite kontrollü L-EDFA konfigürasyonunun kazanç kenetleme ile birlikte L-bandı boyunca kazanç düzleştirme yeteneğine de sahip olduğunu göstermiştir.

Tez çalışmasında son olarak, tasarımı yapılan lazer kavite kontrollü L-EDFA için deneysel karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Öncelikle kullanılan EDFA'nın C-Bandındaki kazanç ve NF performansı elde edilmiştir. Bu kapsamda, deneysel çalışmalara ileri yönlü pompalamalı C-band EDFA'da pompa lazeri dalgaboyunun kazanç ve NF'e etkilerini inceleyen karakterizasyon çalışmaları ile başlanılmıştır. Ölçüm sonuçları neticesinde, Er^{3+} iyonlarının 980 nm bölgesindeki pompa fotonu soğurum kesiti spektrumuna bağlı olarak 976 nm'deki pompa/sinyal güç dönüşüm veriminin, 974 nm dalgaboyundaki verime göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, pompalama dalgaboyundaki 2 nm farkın, EDFA kazancında yaklaşık olarak 1~2 dB ve gürültü faktöründe ise ~1dB farka yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, aynı değerlerde kazanç elde etmek için 974 nm dalgaboylu pompa lazeri ile daha fazla pompa gücüne ihtiyaç olduğundan, 976 nm pompa lazer diyotlarının, daha düşük güç tüketimi nedeniyle EDFA tasarımında kullanılmasının uygun olacağı anlaşılmıştır.

Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında, klasik yapılı L-EDFA'nın deneysel kazanç ve NF karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen L-EDFA karakteristikleri, 974 nm pompa lazeri ileri yönlü ve 976 nm pompa lazeri geri yönlü konfigürasyonun, 976 nm- 974 nm konfigürasyona göre, daha yüksek performanslı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, her iki konfigürasyon için kazanç kenetleme ve/veya kazanç spektrumu düzleştirme yeteneğinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden, 974 nm pompa lazeri ileri yönlü ve 976 nm pompa lazeri geri yönlü konfigürasyonlu olan klasik yapı üzerinde birtakım değişiklikler yapılarak, kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme yeteneklerinin L-EDFA düzeneğine eklenmesinin uygun olacağı anlaşılmıştır.

Deneysel çalışmaların son aşamasında, teorik hesaplamalar ve simülasyon çalışmaları ile analiz edilen ve şekil 4.9'da detaylı şeması verilen lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın kazanç ve gürültü faktörünün sinyal giriş dalgaboyu ile sinyal giriş gücüne bağlı tepkisi ölçülmüştür. Bunun

için ilk olarak, FBG konumunun lazer kavite kontrollü L-EDFA performansına etkisi incelenmiş, FBG1+FBG2 konfigürasyonunun kazanç ve NF performansı bakımından sadece FBG1’li veya sadece FBG2’li konfigürasyonlara göre daha yüksek performanslı olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi, EDFA giriş ve çıkışına yerleştirilen eş özellikli FBG1 ve FBG2 sayesinde L-EDFA’da yükselteç yapısının dışında tam bir F-P lazer kavite yapısı oluşturulmasıdır. Bragg dalgaboyu 1534 nm iken, L-EDFA’nın performansında 1585 nm dalgaboyunda, kazançta 4.73 dB’lik bir artış ve gürültü faktöründe 0.77 dB’lik bir azalma elde edilmiştir. Yani, tasarlanan çift FBG tabanlı lazer kavite kontrollü L-EDFA yapısının daha yüksek performansla rahatlıkla kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

Diğer taraftan FBG çiftlerinin Bragg yansıma dalgaboyu değiştirilerek lazer kavite kontrollü L-EDFA performansına etkisi incelendiğinde, L-bandı bölgesinde lazer kavite kontrollü L-EDFA’da ölçülen ileri yönlü ASE gürültü gücünün klasik yapıli L-EDFA’ya göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla beraber, sinyal giriş gücüne bağlı kazanç ve NF değişimi incelendiğinde, Bragg dalgaboyu 1550 nm ve üzerinde iken kazanç kenetleme yeteneğinin kazanıldığı anlaşılmıştır. $\lambda_B=1558$ nm’de 0.16 dB kazanç salınımı, 33 dB dinamik aralıkta 19.70 dB ortalama kazanç değeri ile tasarlanan lazer kavite kontrollü L-EDFA, en iyi kazanç kenetleme performansına ulaşılmıştır. Ancak, NF değerinde klasik L-EDFA’ya göre yaklaşık 4 dB’lik bir artış yaşanmıştır. Literatürde farklı ya da benzer yöntemlerde yapılan kazanç kontrollü L-EDFA çalışmalarında elde edilen kazanç kontrolü performansları çizelge 6.1’de sunulmuştur. Tasarlanan FBG tabanlı lazer kontrollü L-EDFA’nın kazanç kenetleme performansının literatürdeki birçok çalışmaya göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle, daha geniş bir dinamik aralığa sahip olması nedeniyle tüm çalışmalar içerisinde ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan, kazanç salınımı ve ortalama kazanç değeri bakımından birkaç çalışma dışında daha iyi değerlere sahiptir.

Çizelge 6.1 Literatürdeki çalışmaların kazanç kenetleme performanslarının kıyaslanması.

Referans	Ortalama Kazanç	Kazanç Değişimi	Dinamik Aralık
F. E. Durak (2017)	19. 70 dB	0.16 dB	~33 dB
J. Yang vd., (2016)	~17 dB	0.1 dB	~30 dB
J. T. Ahn vd., (2004)	~21 dB		~27 dB
S. W. Harun vd., (2004)	~15.2 dB	0.3 dB	~30 dB
H. Zang vd., (2006)	18.84 dB	0.26 dB	~25 dB
J. H. Ji vd., (2006)	16.63 dB	0.2 dB	
L. L. Yiv d., (2005)	17.96 dB	0.2 dB	

Lazer kavite kontrollü L-EDFA'nın farklı Bragg dalga boyları için kazanç spektrumu düzleştirme yeteneği incelendiğinde, Bragg dalga boyu uzadıkça L-Bandı boyunca kazanç değişiminin azaldığı, hem teorik hem de deneysel çalışmalar ile tespit edilmiştir. $\lambda_B=1558$ nm iken 1568-1585 nm arasında 19.61 dB ortalama kazanç ve 0.48 dB kazanç salınım ile ölçüde düzleştirilmiş bir kazanç spektrumu elde edilmiştir. Kazanç kenetleme performansında olduğu gibi, literatürde yapılan benzer ve/veya farklı yöntemleri içeren kazanç spektrum düzleştirme performansları çizelge 6.2'de verilmiştir. Deneysel ölçümlerde kullanılan ayarlanabilir lazer kaynağın çalışma dalga boyu en fazla 1585 nm olduğu için düzleştirilmiş kazanç spektrum genişliği 1568-1585 nm aralığı ile sınırlanmıştır. Ancak, gerek teorik analizler gerekse simülasyon çalışmaları düzleştirilmiş kazanç spektrum genişliğinin, L-Bandının tümünü kapsadığı (1570-1610 nm) tespit edilmiştir. Bu sebeple, literatürdeki diğer çalışmalar gibi kazanç band genişliğinin 1570-1610 nm aralığında olduğu öngörülmektedir. L-EDFA tasarımı, kazanç salınımı ve ortalama kazanç değer bakımından da birçok çalışma ile benzer değerler elde edilmiştir.

Çizelge 6.2 Literatürdeki çalışmaların kazanç spekturumu düzleştirme performanslarının kıyaslanması.

Referans	Ortalama Kazanç	Kazanç Değişimi	Kazanç Band Genişliği
F. E. Durak (2017)	19.61 dB	0.48 dB	1568-1585 nm
Y. Jin vd., (2006)	~23 dB	0.77 dB	1570-1600 nm
J. Yang vd., (2016)	20.2 dB	0.44 dB	1570-1610 nm
J. Yang vd., (2015)	28.83 dB	0.4 dB	1570-1610 nm
T. C. Liang (2008)	25.2 dB	0.6 dB	1570-1600 nm

Tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm teorik analiz ve deneysel karakterizasyon çalışmaları, tasarlanan FBG tabanlı lazer kavite kontrollü L-EDFA'da kazanç kenetleme ve L bandında spektral kazanç düzleştirme yeteneklerinin kazandırıldığı gösterilmiştir. Ancak, NF değerleri bu durumda 6-8 dB aralığında kötüleşmekte olup, NF performans değerleri sonraki çalışmalarda üzerinde durulması gereken bir problem olarak görülmektedir. Diğer taraftan, literatürde çalışmaların deneysel performansları ile kıyaslandığında, tasarlanan L-EDFA'nın genel olarak daha iyi performans karakteristiklerine sahip olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında sinyal giriş gücü ve sinyal dalga boyundan etkilenmeyen geniş bir aralıkta kontrollü ve sabit kazançta sahip L-bandında çalışan EDFA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla L-EDFA'da kullanılabilecek kazanç kontrol yöntemleri

kapsamlı olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen tasarımda FBG tabanlı lazer kavite kontrol yöntemi kullanılmıştır. L-EDFA'ya çift FBG kullanarak ile dar bantlı ileri ve geri yönlü ASE sinyalinin kısmen geri yansıtılması sonucu oluşan kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, tez çalışmasında kullanılan EDFA'nın C-Bandında pompa lazer dalgaboyuna bağımlı kazanç ve NF performansı etkileri araştırılmış, böylelikle klasik yapılı L-EDFA tasarımı için gerekli altyapı oluşturulmuştur. Sonrasında ise FBG tabanlı lazer kavite kontrollü L-EDFA tasarımının kazanç kenetleme ve kazanç spektrumu düzleştirme performansı, teorik ve deneysel karakterizasyon çalışmaları ile analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımın teorik analiz ve deneysel karakterizasyon sonuçları birbiriyle uyum göstermiştir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen detaylı tasarım, teorik analiz, simülasyon ve deneysel karakterizasyon sonuçları sayesinde genişband DWDM sinyallerin (C+L bandlarında toplam 70 nm band genişliğinde)

- Yüksek kazançlı (küçük sinyal rejiminde $G > 25$ dB),
- Düşük gürültülü (küçük sinyal rejiminde $NF < 5$ dB),
- Kazanç kenetlemeli (giriş sinyal gücü -40 dBm ile -10 dBm arasında minimum 30 dB kazanç kenetlemeli dinamik çalışma aralığı),
- Kazanç spektrumu düzleştirilmiş (C+L Bandları boyunca ± 1 dB 'den daha düşük kazanç değişimi),
- Yüksek optik ve elektriksel enerji verimliliğine sahip biçimde güçlendirilmesini sağlayan

genişband EDFA prototipi geliştirilmesi konusunda proje çalışmaları yapılacaktır. Tezin yazım aşamasında, FiberLast firması ile beraber tasarlanan “1511-TÜBİTAK Öncelikli Alanlar Araştırma Teknoloji Geliştirme ve Yenilik” alanında proje başvurusu yapılmış olup, değerlendirme süreci devam etmektedir. Böylelikle tez kapsamında elde edilen teknolojik bilgi birikimi ve deneyim milli bir ürüne dönüştürülmüş oluncaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agrawal, G.P., (2001), Applications of Nonlinear Fiber Optics, Academic Press Inc., Second Edition.
- Ahn, J.T., Kim, K.H., (2004), All-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier with improved noise figure and freedom from relaxation oscillation, IEEE Photonics Tech. Lett., cilt. 16 no. 1, s. 84-86.
- Al-Monsoori M. H., Al-Qasmi, A. S., Al-Abri K. M., Al-Ghaithi W. S. Ve Younis M. A. A., (2014), Wideband EDFA utilizing short-length high concentration erbium-doped fiber, IEEE 5th international conference on photonics (ICP), s.201-204.
- Altuncu, A., (1997), Distributed erbium doped fibre amplifiers (DEDFA's) for use in long haul and high bit rate soliton transmission systems, Ph.D. Thesis, Department of Electronic Systems Engineering, University of Essex.
- Altuncu, A., Başgümüş, A., (2005), Gain Enhancement in L-Band Loop EDFA Through C-Band Signal Injection, IEEE Photonics Tech. Lett., cilt. 17, s.1402-1404.
- Altuncu, A., (2006), Band Selection in Broadband Loop ASE source using seed signal injection, IEEE Photonics Tech. Lett., cilt. 18, s.1043-1045.
- Anthony, R., Lahiri, R., Biswas S., (2014), Gain clamped L-band EDFA with forward-backward pumping scheme using fiber Bragg grating, cilt. 125, s. 2463-2465.
- Bayart, D., Clesca, B., Hamon, L., Beylat, J.L., (1994), Experimental investigation of the gain flatness characteristics for 1.55 μ m erbium-doped fluoride fiber amplifiers, IEEE Photonics Technology Letters, cilt. 6, no. 5.
- Becker, P.C., Olsson, N.A., Simpson, J.R., (1999), Erbium-Doped fiber amplifier: Fundamentals and Technology, Academic Press.
- Bianciotto, A., Carena, A., Ferrero, V., Gaudiono, R., (2013), EDFA Gain Transients: Experimental demonstration of a low cost electronic control, IEEE Photonics Technology Letters, cilt. 15, no. 10.
- Bing, X., Dominik, P., Lawrence, R.C., (2003), Comparison of the static and dynamic properties of single- and double-pass partially gain-clamped two-stage L-Band EDFAs, IEEE Photonics Tech. Lett., cilt. 15, no. 4, s 519-521.
- Chang, C., Amrullah, A., (2013), A steady-gain C-band EDFA for multi-wavelength fiber optical transport networks, International Journal of Optoelectronic Eng., cilt.3 , s. 6-11.
- Desurvire, E., (1992), Analysis of Gain Difference Between Forward- and Backward-Pumped Erbium-Doped Fiber Amplifiers in the Saturation Regime, IEEE Photonics Technology Letters, cilt. 4, no. 7.
- Desurvire, E., Simpson, J.R., Becker, P.C., (1987), High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier, Optical Letters, cilt. 12.
- Desurvire, E., Simpson, J.R., (1989), Amplification of spontaneous emission in erbium-doped fiber amplifiers. IEEE/OSA J. Lightwave Technol. cilt. 7, s. 835.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Digonnet, M.J.F., (1993), Rare-earth doped fibre lasers and amplifiers, Dekker Edition, New York.
- Durak, F.E., Altuncu, A., (2017), The effect of ASE reinjection configuration through FBGs on the gain and noise figure performance of L-Band EDFA, *Optics Comm.*, cilt. 386, s. 31-36.
- Giles, C.R., Desurvire, E., (1991), Modeling erbium-doped fiber amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, cilt. 9.
- Haixing, Z., Gan, F., (1985), Investigation of glasses doped with Er^{3+} ions used as laser materials, *Acta Optica Sinica*, cilt 9.
- Hasan, S.Z.M., Kalavally, V., Parthiban, R., Win, T., Premaratne, M., (2013), Economic and system impact of hybrid Raman-EDFA amplification in a 40x40 Gbps optical transmission network with DPSK modulation, *Optical Fiber Tech.*, cilt. 19, s. 10-15.
- Hecht, J., (2002), The Evolution of Optical Amplifiers, *Optic and Photonic News*, cilt. 13.
- Hill, K.O., Meltz, G., (1997), Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview, *Journal of Lightwave Technology*, cilt.15, no.8.
- Hosung, Y., Jaehyoung, P., Namkyoo, P., Seong, A., (2000), Link-control gain clamping for a cascaded EDFAs link using diffirentaial ASE monitor, *IEEE Phtnics Tech. Lett.*, cilt. 12, s. 1334-1336.
- Hui, R., O'Sullivan, M., (2009), Fiber optic measurement techniques, Elsevier Academic Press.
- Ishii, K., Kurumida, J., Namiki, S., (2016), Experimental investigation of gain offset behavior of feedforward-controlled WDM AGC EDFA under various dynamic wavelength allocations, *IEEE Photonics Journal*, cilt.8, no.1.
- Jacobsen, G., Sergeyev, S., Vanin, E., (2002), Gain-clamped dynamics in EDFA with combined electronic feed-forward-optical feedback control, *Optical fiber communication conference and exhibit* s. 518-519.
- Ji, J.H., Zhan, L., Yi, L.L., Tang, C.C., Ye, Q.H., Xia, Y.X., (2005), Low noise-figure gain-clamping L-Band double-pass erbium-doped fiber ring lasing amplifier with an interleaver, *Journal of Lightwave Technology*, cilt. 23, no. 3, s.1375-1379.
- Jin, Y., Dou, Q., Liu, Y., Liu, J., Xu, L., Yuam, S., Dong, X., (2006), Gain-clamped dual-stage L-band EDFA by using backward C-band ASE, *Optics Comm.*, cilt. 266, s. 390-392.
- Jolley, N.E., Davis, F., Mun, J., (1997), Out of band electronic gain clamping for a variable gain and outpu power EDFA with low dynamic gain tilt, *OFC'97*, s.134-135.
- Kashyap, R., (1999), Fiber Bragg Gratings, Academic Press, San Diego.
- Keiser, K., (2011), Optical Fiber Communications, McGraw Hill Education, New York. Inc.
- Laming, R.I., Poole, S.B., Tarbox, E.J., (1988), Pump excited-state absorption in erbium-doped fibers, *Optic Letters*, cilt. 13, no.12, s. 1084.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lee, H.H., Lee, H.J., Lee, S.S., (2014), All-optical gain-clamped EDFA using external saturation signal for burst-mode upstream in TWDM-PONs, *Optics Express*, cilt. 22, no. 15.
- Lelic, M., Bauco, A., Menon, N., Wundke, K., Zahnley, T., (2001), Smart EDFA with Embedded Control, *LEOS* 2001.
- Liang, T., 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 Comm.*, cilt. 281, s. 1134-1139.
- Lin, J., Ho, W., Li, C., (2011), Dynamic characterization of EDFA based on ASE selective-feedback and gain-clamping techniques, *Progress in Electromagnetics research symposium proceedings*, s. 922-925.
- Lin, J.M., Ho, W. J., (2012), Dynamic-performance characterization of C-band EDFA using Ase-power peak-selective feedback gain-clamping, *Laser Physics*, cilt.22, s765-769.
- Liqun, H., Guang, Y., Yazhen, L., Jun, G., Zhihua, L., (2010), L-Band EDFA with high saturation output power and low noise figure, *International conference on computer design and applications (ICCDA 2010)*, cilt. 4, s 537-539.
- Liu, R., Liang, D., Asundi, A., (2013), Small diameter fiber Bragg gratings and applications, *Measurement*, cilt. 46, no. 9, s. 3440-3448.
- Lu, Z.G., Lin, P., Grover, C.P., (2003), A dynamically gain flattened erbium-doped fiber amplifier, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt. 39 No. 1.
- Malik, R., Marhic, M.E., (2012), Experimental study of all-optical gain-clamped fiber optical parametric amplifier, *IEEE Photonics Tech. Lett.*, cilt. 24, no. 8, s. 664-666.
- Massicott, J.F., Willson, S.D., Wyatt, R., Armitage, J.R., Kashyap, R., Williams, D., Lobbett R. A., (1994), 1480 nm pumped erbium doped fibre amplifier with all optical automatic gain control, *Electronics Letters*, cilt. 30, no. 12, s. 962-964.
- Motoshima, K., Suzuki, N., Shimizu, K., Kasahara, K., Kitayama, T., Yasui, T., (2001), A channel-number insensitive erbium-doped fiber amplifier with automatic gain and power regulation function, *Journal of Ligthwave Technology*, cilt. 19, no. 11.
- Navruz, İ., (2006), Uzun mesafeli ve yüksek hızlı fiberoptik haberleşme sistemlerinde optik ızgara tabanlı dispersiyon kompanzasyonu, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Doktora Tezi*.
- Reisfeld, R., Jørgensen, C.K., (1987), Excited-state phenomena in vitreous materials. In: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare-Earths* (K. A. Gschneider, Jr., L. Eyring, eds.). Elsevier Amsterdam.
- Saaid, N.M., (2010), Nonlinear Optical Effects Suppression Methods in WDM Systems with EDFAs: A Review, *International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2010)*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Singh, S., Kaler, R.S., (2013), Flat-Gain L-Band raman-EDFA hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system, IEEE Photonics Tech. Lett., cilt. 25, no. 3, s. 250-252.
- Singh, S., Kaler, R.S., (2013), Investigation of hybrid optical amplifiers with different modulation formats for DWDM optical communication system, Optik, cilt. 124, s. 2131-2134.
- Song, S., Park, S., Lee, S., Kim, J., (2012), EDFA gain control using disturbance observer technique, IEEE Photonics Tech. Lett., cilt. 18, s. 1043-1045.
- Stimpel, J.R., (1997), Testing Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Hewlett-Packard Journal, Article 12.
- Sulaiman, W.H., Subramaniam, T., Tamchek, N., Harith, A., (2004), Gain and noise figure performance of L-band EDFA with an injection of C-band ASE, Jurnal Teknologi, cilt. 40, s. 9-16.
- Sun, Y., Zyskind, J.L., Srivastava, A.K., (1997), Average Inversion Level, Modeling, and Physics of Erbium-Doped Fiber Amplifiers, IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics, cilt. 3, No. 4.
- Tan, J.S., (2000), Noise Performance of Erbium-Doped Amplifiers with Forward and Revers Pumping, Massachusetts Institute of Technology Master Thesis.
- Urquhart, P., (1995), Theory of Erbium Doped Fibre Amplifiers, BT Laboratories, Ipswich.
- Valicourt, G.D., Adrover, M.A.M., Moroz, N.D., Pointurier, Y., (2015), Semiconductor optical amplifier for next generation of high data rate optical packet-switched networks, Some Advanced Functionalities of Optical Amplifier, Intech Publisher.
- Weber, M.J., (1986), Laser excited fluorescence spectroscopy in glass. In: Laser Spectroscopy of Solids, Top. Appl. Phys. cilt. 49. Springer-Verlag, New York, Chapter 6.
- Yang, J., Meng, X., Liu, C., (2016), Accurately control and flatten gain spectrum of L-band erbium doped fiber amplifier based on suitable gain-clamping, Optics&Laser Tech., cilt. 78, s. 74-78.
- Yang, J., Meng, X., Liu, C., (2016), Single-/dual-FBG-based gain controller of gain-clamped L-Band erbium-doped fiber amplifier with high gain and flatness, Microwave and Optical Tech. Lett., cilt. 58, no. 9, s. 2168-2170.
- Yang, J., Meng, X., Liu, C., Liu C., (2015), Gain-flattened two-stage L-band erbium-doped fiber amplifier by weak gain-clamped technique, Optical Engineering, cilt. 54, s. 036107.
- Yanhong, X., Liu, X., Cui, J., Li, Q., Liu, D., Peng, J., (1999), Partly gain-clamped EDFAs with high gain and high power, Asia-Pacific Conference on Communications APCC/OECC '99.
- Yi, L.L., Zhan, L., Taung, C.S., Luo, S.Y., Su, Y.K., Xia, Y.X., (2005), Low noise figure all-optical gain-clamped parallel C+L band erbium-doped fiber amplifier using an interleaver, Optics Express, cilt. 13, no. 12, s. 4519-4524.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yu, A., O'Mahony, M.J., (1995), Properties of gain controlled erbium doped fibre amplifiers by lasing, Electronics Letters, cilt. 31 no. 16, s. 1348-1349.

Yu, A., O'Mahony, M.J., (1997), Design and modeling of laser-controlled erbium-doped fiber amplifiers, IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, cilt. 3 no. 4, s. 1013-1018.

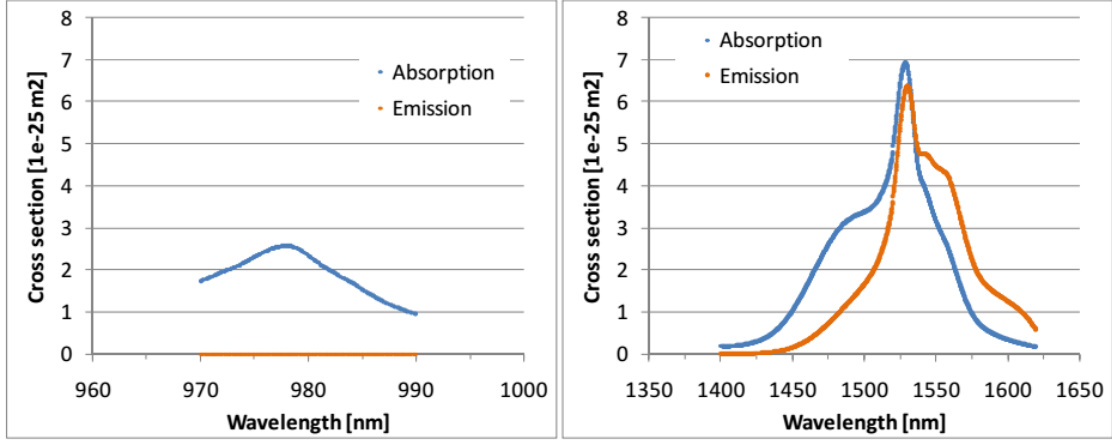
Yücel, M., Göktaş, H.H., Çelebi, F.V., (2014), Design and implementation of fuzzy logic based automatic gain controller for EDFAs, Optik 125, s. 540-5453.

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



EKLER

Ek.1 Liekki firması Er 30 model erbiyum katkılı fiberine ait soğurum ve ışıma kesiti spektrumları



Ek.2 Liekki firması Er-30 model erbiyum katkılı fiberinin farklı türdeki optik fiberler ile ek yapılması için gerekli olan parametreleri

Er30-4/125, Er40-4/125		Er30-4/125, Er40-4/125	
Fitel S176	SMF-28	Fitel S176	PureMode1060
Arc power	80	Arc power	90
Arc duration	1500	Arc duration	1000
Average splice loss	0.19 dB	Average splice loss	0.03 dB
Arc power compensation=0	0	Arc power compensation=0	0
Cleaning A-power offset=20	20	Cleaning A-power offset=20	20
Cleaning time=200	200	Cleaning time=200	200
Pre-fuse time=160	160	Pre-fuse time=160	160
Z pull start time=0	0	Z pull start time=0	0
Z push distance=15	15	Z push distance=15	15
Z pull distance=0	0	Z pull distance=0	0
Repeat arc times=0	0	Repeat arc times=0	0
Repeat arc duration=1000	1000	Repeat arc duration=1000	1000
Repeat arc interval=1000	1000	Repeat arc interval=1000	1000
Repeat arc power offset =0	0	Repeat arc power offset =0	0
Attenuation=0	0	Attenuation=0	0
Aligning type=CORE	CORE	Aligning type=CORE	CORE
Auto additional arc=0	0	Auto additional arc=0	0
Offset=0	0	Offset=0	0
Cleave angle=1	1	Cleave angle=1	1
Loss limit=15	15,00	Loss limit=15	15,00
Wavelength=1550	1550	Wavelength=1550	1550
Mode field radius L=2.45	2,45	Mode field radius L=2.45	2,45
Mode field radius R=5.37	5,37	Mode field radius R=5.37	5,37
Splice loss; pigtail->LF (dB)		Splice loss; pigtail->LF (dB)	
STDEV; pigtail->LF (dB)		STDEV; pigtail->LF (dB)	
Splice loss; LF->pigtail (dB)		Splice loss; LF->pigtail (dB)	
STDEV; LF->pigtail (dB)		STDEV; LF->pigtail (dB)	

ÖZGEÇMİŞ

1. **Adı Soyadı:** Fırat Ertay DURAK

2. **Doğum Tarihi:** 12.03.1986

3. **Ünvanı:** Arş.Gör.

4. **Öğrenim Durumu:**

Derece	Alan	Üniversite	Yılı
Lisans	Elektronik ve Hab. Müh.	Kocaeli Üniversitesi	2004-2008
Y.Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Dumlupınar Üniversitesi	2009-2012
Doktora	Elektrik-Elektronik Müh.	Dumlupınar Üniversitesi	2013-2017

5. **Dil Becerisi:**

Sınav	Yıl	Alınan Puan
İngilizce (YÖKDİL)	2017	66.25
İngilizce (KPDS)	2010	73.00
İngilizce (ÜDS)	2009	68.75

6. **Akademik Ünvanlar:**

Görev Ünvanı	Alan	Görev Yeri	Yılı
Arş.Gör.	Telekomünikasyon	Dumlupınar Üniversitesi	2008-....

7. **Bilimsel ve Mesleki Kuruluşlara Üyelikler:**

IEEE

8. Yayınlar

8.1 SCI-Expanded tarafından taranan dergilerde yayımlanan tam makaleler

8.1.1 Durak F.E. ve Altuncu A., “All-optical gain clamping and flattening in L-band EDFAs using lasing-controlled structure with FBG”, Journal of Lightwave Technology, 2017 (under review). (Doktora Tez Çalışmasından)

8.1.2 Durak F.E. ve Altuncu A., "The effect of ASE reinjection configuration through FBGs on the gain and noise figure performance of L-Band EDFA", Optics Communications, vol. 386, 2017. (Doktora Tez Çalışmasından)

8.1.3 Başgumus A., Durak F.E., Altuncu A., ve Yılmaz G., "A Universal and Stable All-Fiber Refractive Index Sensor System", Photonics Technology Letters, vol. 28, no.2,2016.

8.1.4 Durak F.E., Navruz.İ ve Altuncu A., “Elektrik Ark Tekniği ile Uzun Periyotlu Fiber Izgara Tasarımı ve Üretimi”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol 28, No 1, 27-32, 2013.

8.2 Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan tam makaleler

8.2.1 Durak F.E., Başgumus A., Sadık S.A. ve Altuncu A., “Precise Optical Fiber Length Measurement System Based on Fresnel Reflection“, Journal of Electrical Engineering ,vol.4 s.128-132. 2016.

8.3 Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve tam metin olarak yayımlanan bildiriler

8.3.1 Durak F.E. ve Altuncu A., “Gain Clamped L-Band EDFA based on a Lasing Structure using FBG”, Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO’17), 2017. (Doktora Tez Çalışmasından)

8.3.2 Durak F.E. ve Altuncu A., “980 nm bandında pompa lazeri dalgaboyunda EDFA performansına etkisi”, IEEE 25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU’2017), 2017. (Doktora Tez Çalışmasından)

8.3.3 Sadık, S.A., Başgumus, A., Durak, F.E., Karlık, S.E., ve Altuncu, A. “Comparative analysis of the effect of optical fiber spin profiles on polarization mode dispersion” 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO ’15). Bursa, 2015.

8.3.4 Durak F.E., Altuncu A. ve Ebeoğlu M.A., “Design of Reflection Type Optical Fiber Volatile Organic Compounds (VOC) Sensor”, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Elazığ, 2011.

8.4 Ulusal hakemli dergilerde yayımlanmış tam makaleler

8.4.1 Durak F.E., Başgümüş A., Altuncu A., Yılmaz G. ve Ebeoğlu M. A., “Fresnel Yansıma Tabanlı Fiber Optik Refraktometre”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı:32, 2013.

8.5 Ulusal bilimsel toplantılarda sözlü olarak sunulan ve tam metinli olarak yayımlanan bildiriler

8.5.1 Başgümüş A., **Durak F. E.**, Sadık Ş. E., Altuncu A., Yılmaz G. ve Ebeoğlu. M. A., “Sıvı Konsantrasyon Tespiti için Fresnel Yansıma Tabanlı Fiber Optik Kırılma İndis Sensörü”, IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU’2014), sayfa. 594-597, 2014.

8.5.2 **Durak F. E.**, Altuncu A., ve Ebeoğlu M. A., “PVP Tabanlı Yansıma Tipli Fiber Optik Uçucu Organik Bileşen Sensörü”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO’12), Bursa, 2012.

8.5.3 Altuncu A., Yuvka Ş., ve **Durak F.E.**, “Dumlupınar Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Fiber Optik Haberleşme Laboratuvarı Uygulamaları”, Elektrik Elektronik Bilgisayar Biyomedikal Mühendislikleri Eğitimi 4. Ulusal Sempozyumu, Eskişehir, 2009.

8.6 Ulusal bilimsel toplantılarda sözlü olarak sunulan ve özet metin olarak yayımlanan veya poster olarak sergilenen bildiri

8.6.1 Başgumus, A., **Durak F.E.** ve Altuncu, A., "A universal and Stable All-Fiber Refractive Index Sensor", 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay, Bilkent Üniversitesi, 2016.

8.6.2 Demiral, S., **Durak F.E.** ve Altuncu, A., "Kompakt bir C-Band EDFA tasarımı ve prototiplenmesi", 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay, Bilkent Üniversitesi, 2016.

8.6.3 **Durak F.E.** ve Altuncu, A., "L-Band EDFA'da ASE gürültüsünün kısmen geri enjekte edilmesinin kazanç ve gürültü faktörüne etkisi", 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay, Bilkent Üniversitesi, 2016.

8.6.4 Sadık, S.A., **Durak, F.E.**, ve Altuncu, A., "Fiber Bragg Izgaranın Sıcaklık, Gerilme ve Nem Sensörü Olarak Kullanımı ve Karakterizasyon", 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay, Bilkent Üniversitesi, 2016. (Doktora Tez Çalışmasından)

8.6.5 Sadık, S.A., Başgumus, A., **Durak, F.E.**, Karlık S.E., Altuncu, “A. Comparative analysis of the effect of optical fiber spin profiles on polarization mode dispersion” 17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay Ankara Üniversitesi, 2015.

8.6.6 Başgumus, A., **Durak F.E.**, Sadık, S.A., ve Altuncu, A. “Optical fiber length measurement system based on Fresnel reflection” 17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay Ankara Üniversitesi, 2015.

8.6.7 **Durak F.E.**, Navruz İ. ve Altuncu A. “Elektrik Ark Yöntemi ile Uzun Peryotlu Fiber Izgara (LPFG) Üretimi”, 13. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay, Bilkent Üniversitesi, 2011.

8.6.8 **Durak F.E.**, Altuncu A. ve Ebeoğlu M.A., “Yansıma Tipli Optik Fiber Uçucu Organik Bileşen Sensörü”, 13. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştay, Bilkent Üniversitesi, 2011.

9. Çalıştığı Projeler

9.1 “Kablo üretim hattına entegre yüksek hızda renk ve çap ölçüm sistemi”, TÜBİTAK-1505 (TEYDEB), 2017-(devam ediyor)

9.2 “El İle Tutulabilir Renk Tonu Ölçüm Cihazı”, 1512- Teknogirişim Sermayesi Desteği Programı (BİGG), TÜBİTAK, 2017-(devam ediyor)

9.3 “Genişband (C+L) dalgaboyu ayarlanabilir, kararlı ve kompakt bir fiber optic halka tipi lazer kaynağı tasarımı”, Dumlupınar Üniversitesi BAP Projesi, 2017-43, 2017-(devam ediyor.)

9.4 “Kompakt Bir C-Bandı EDFA Tasarımı ve Prototiplenmesi”, Dumlupınar Üniversitesi BAP Projesi, 2014-9, 2014-2016.

9.5 “Yansıma Tipli Fiber Optik Uçucu Organik Bileşen Dizisi Sensör Tasarımı”, Dumlupınar Üniversitesi BAP Projesi, 2014-4, 2014-2016.

9.6 “Elektrik Ark Yöntemi ile Uzun Peryiyotlu Fiber Izgara (LPFG) Tasarımı ve Üretimi”, Dumlupınar Üniversitesi BAP Projesi, 2009-3, 2009-2011.