

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİBER BRAGG IZGARA SENSÖR ÜRETİMİNDE FARKLI
PARAMETRELERİN SENSÖR TEPKİLERİNE VE KARAKTERİSTİĞİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ümit BAYRAM

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

EYLÜL 2017

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİBER BRAGG IZGARA SENSÖR ÜRETİMİNDE FARKLI
PARAMETRELERİN SENSÖR TEPKİLERİNE VE KARAKTERİSTİĞİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ümit BAYRAM
(141080305)**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

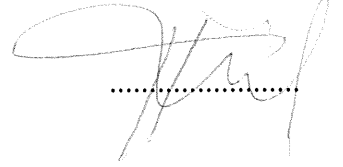
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İsrail KÜÇÜK

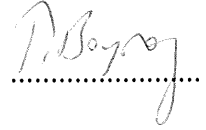
EYLÜL 2017

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 141080305 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ümit BAYRAM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "FİBER BRAGG IZGARA SENSÖR ÜRETİMİNDE FARKLI PARAMETRELERİN SENSÖR TEPKİLERİNE VE KARAKTERİSTİĞİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İsrail KÜÇÜK
Bursa Teknik Üniversitesi



Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Tahsin BOYRAZ
Cumhuriyet Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK
Bursa Teknik Üniversitesi



Savunma Tarihi : 14.09.2017

FBE Müdürü : Doç. Dr. Murat ERTAŞ
Bursa Teknik Üniversitesi

.....
...../...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı : Ümit BAYRAM

İmzası :





Sevgili eşime,

ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmam boyunca bana rehber olan ve yönlendirmeleriyle çalışmalarına değer katan tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. İsrail KÜÇÜK'e, bana her zaman her türlü imkanı, desteği ve motivasyonu sağlayan ERMAKSAN YÜKSEK TEKNOLOJİ AR-GE MERKEZİ müdürü sayın Nizam MUZAFFE-ROĞLU'na ve AR-GE müdürü sayın Mustafa IŞIK'a, çalışmalarım boyunca bana destek veren ekip arkadaşlarım sayın Cansu İDE'ye ve sayın Mücahit ARSLAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak hayata karşı en büyük motivasyonum olan ve desteğini benden hiç esirgemeyen sevgili eşim sayın Aysun BAYRAM'a sonsuz teşekkürler...

Eylül 2017

Ümit BAYRAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Fiber Optik Kablolar ve FBG Sensörler.....	1
1.1.1 FBG yapıları ve FBG sensörlerin kullanım alanları.....	2
1.1.2 FBG üretim yöntemleri.....	2
1.1.3 Faz maskesi yöntemi ve FBG üretimi.....	2
1.2 FBG Yapılarının Literatürdeki Yeri ve Önemi.....	6
2. TEORİK İNCELEME.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1 Materyal.....	12
3.1.1 Fiber optik kablo.....	12
3.1.1.a Basamak indisli (step-index) fiberler	14
3.1.1.a. 4.2/125 Fiber.....	16
3.1.1.a. 6.4/125 Fiber.....	17
3.1.1.a. 7.8/125 Fiber.....	18
3.1.1.b Dereceli indisli (graded-index) fiberler	19
3.1.2 Ucu açılı işlenmiş konnektörlü fiber optik kablo	19
3.1.3 Fiber optik izolatör.....	21
3.1.4 FC/APC konnektör adaptörü	22
3.2 Yöntem	23
3.2.1 Fiber soyma ve temizleme.....	23
3.2.2 Fiber kesme	24
3.2.3 Fiber kaynaklandırma	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
4.1 FBG Üretim ve Karakterizasyon Düzeneginin Kurulması	28
4.2 Değişken Parametrelerin İrdelenmesi.....	30
4.2.1 Fiber çaplarının ışığa duyarlılıklara etkisinin incelenmesi	32
4.2.1.1 [4.2/125] çaplarındaki fiber optik kablo ile ilk atış denemesi	32
4.2.1.2 [6.4/125] çaplarındaki fiber optik kablo ile ilk atış denemesi	34
4.2.1.3 [7.8/125] çaplarındaki fiber optik kablo ile ilk atış denemesi	36
4.2.2 Üç farklı çapta fiber optik kablodan üretilmiş FBG sensörlerin karakteris- tiklerinin incelenmesi	38
4.2.3 Farklı merkez dalga boylarına sahip FBG sensörlerin sabit gerinimler altın- daki tepkilerinin incelenmesi.....	42

4.2.4 Farklı yansıtma oranlarının sabit gerinim altında sensör karakteristiğine etkisinin incelenmesi.....	47
4.3 Fiber Çaplarına Bağlı Olarak Kaynatma Noktalarındaki Kayıpların Kıyaslanması.....	52
4.3.1 İç (intrinsic) kayıplar ve teorik hesaplama.....	55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	61



KISALTMALAR

APC	: Angled Physical Contact (Açılı Fiziksel Temas)
dB	: Decibel (Desibel)
FBG	: Fiber Bragg Grating (Fiber Bragg Izgara)
FC	: Fiber Connector (Fiber Konnektör)
FWHM	: Full Width Half Maximum (Tam Genişlik Yarı Yüksekliği)
Ge	: Germanium (Germanyum)
LC	: Lucent Connector (Lucent Konnektör)
MFD	: Mode Field Diameter (Mod Alan Çapı)
NA	: Numerical Aperture (Nümerik Açıklık)
PC	: Physical Contact (Fiziksek Temas)
PM	: Phase Mask (Faz Maskesi)
SC	: Square Connector (Kare Konnektör)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
Smf28	: 9/125 çekirdek/kılıf çaplarına sahip telekom standardı fiber kablo
ST	: Screw Thread (Vida Dışli)
UV	: Ultraviole (Ultraviyole)
WDM	: Wavelength Division Multiplexer (Dalga boyu Ayrımlı Çoğaltıcı)

SEMBOLLER

ΔT	: Sıcaklık değişimi
T	: Sıcaklık
λ_B	: Bragg dalga boyu – Merkez dalga boyu
α	: Silikanın termal genleşme sabiti
η	: Termo-optik katsayı
L	: FBG (Fiber Bragg Grating) yapısını oluşturan ızgara deseninin toplam uzunluğu
ε_z	: Uygulanan gerinim (strain)
n_o	: Ortamın kırıcılık indisi
V	: Normalize frekansı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1 : Farklı çekirdek çaplarına sahip fiberlerden üretilmiş FBG sensörlerin gerinim hassasiyetlerinin kıyaslanması.....	42
Çizelge 2 : Farklı dalga boylarına bağlı gerinim hassasiyetlerinin kıyaslanması.....	46
Çizelge 3 : Yansıtıcılık oranlarının gerinim sensör tepkisine etkisinin kıyaslanması	51
Çizelge 4 : Üç farklı fiber optik kablo ile smf28 fiber kablo kaynaklandırma noktası kayıp ölçüm değerleri.....	54
Çizelge 5 : Üç farklı fiber optik kablo ile smf28 fiber kablo kaynaklandırma kayıp hesaplama değerleri.....	56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Bragg yansıma kuralına göre x-ışını yansıma görünümü.....	3
Şekil 1.2: Fiber optik kablo görünümü ve FBG şematığı.....	4
Şekil 1.3: 2017 – 2012 yılları arası global FBG sensörlerin tüketim verisi.....	7
Şekil 2.1: Fiber modları.....	8
Şekil 2.2: Fiber optik kablo bileşenlerinin ve lazer ışınının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.3: FBG sensörü yazım mekanizmasının şematik gösterimi.....	10
Şekil 3.1: Fiber optik kablo içerisindeki toplam iç yansıma şematığı.....	13
Şekil 3.2: Basamak indisli fiber kırıcılık indis profil diagramı.....	14
Şekil 3.3: Basamak indisli bir fiberde LP modlarının mod fonksiyonları.....	14
Şekil 3.4: (a,b) [4.2 /125] fiber optik kablo SEM görüntüleri.....	16
Şekil 3.5: (a,b) [6.4 /125] fiber optik kablo SEM görüntüleri.....	17
Şekil 3.6: (a,b) [7.8 /125] fiber optik kablo SEM görüntüleri.....	18
Şekil 3.7: Dereceli indisli fiber optik kablo kırıcılık indis profili.....	19
Şekil 3.8: FC/APC konnektörü ve montaj yapılmış fiber optik kablo görseli.....	20
Şekil 3.9: FC/APC konnektörlü fiber optik kablo 8° açılı ferrül görseli.....	20
Şekil 3.10: Farklı tiplerdeki polisajları olan konnektörlerin geri yansıma kıyaslama görseli.....	21
Şekil 3.11: Fiber optik izolatör yakın çekim görseli.....	22
Şekil 3.12: Konnektörlü fiberlerin bağlandığı fiber konnektör adaptörü görseli.....	23
Şekil 3.13: Kılıfı sıyrılmış fiber optik kablo görseli; sırasıyla 10X (a) ve 20X (b) büyütme faktörü altındaki optik mikroskop görüntüsü.....	24
Şekil 3.14: Fiber optik kablonun uç kısmının kesiminin 10X (a) ve 20X (b) büyütme faktörü altındaki optik mikroskop görüntüsü.....	24
Şekil 3.15: Açılı kesilmiş bir fiber kablo (solda) ve ideal olarak düzgün kesilmiş bir fiber kablo (sağda).....	25
Şekil 3.16: Fiber kaynaklandırma uyumsuzlukları.....	25
Şekil 3.17: Kaynatma (splice) öncesi düzgün olarak, sıfır derece (0°) ile, kesilmiş ve hizalanmış fiber kablolar.....	26
Şekil 3.18: İdeal olmayan kusurlu kaynatma (splice) sonucu.....	26
Şekil 3.19: İdeal kaynatma (splice) sonucu.....	27
Şekil 4.1: FBG üretim ve karakterizasyon sistem şematığı.....	29
Şekil 4.2: Gerçek karakterizasyon düzeneği görseli.....	29
Şekil 4.3: Gerçek karakterizasyon düzeneği yakın görüntüsü.....	30
Şekil 4.4: (a) (4.2/125) um fiber ile yapılan denemede logaritmik skaladaki (dB) temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum.....	32
Şekil 4.5: (a) (4.2/125) um fiber ile yapılan denemede lineer (mW) skaladaki temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum.....	33

Şekil 4.6: (a) (6.4/125) um fiber ile yapılan denemede logaritmik skaladaki (dB) temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum	34
Şekil 4.7: (a) (6.4/125) um fiber ile yapılan denemede lineer (mW) skaladaki temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum	35
Şekil 4.8: (a) (7.8/125) um fiber ile yapılan denemede logaritmik skaladaki (dB) temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 500 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum	36
Şekil 4.9: (a) (7.8/125) um fiber ile yapılan denemede lineer (mW) skaladaki temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 500 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum	37
Şekil 4.10: Üç farklı Ge katkısına sahip fiberin ilk atış sonuçlarına bağlı olarak yansıtma değerleri.....	38
Şekil 4.11: Kırmızı (7.8/125) fiber optik kablo ile üretilmiş %91.5 yansıtıcılık oranına sahip FBG sensörün sabit gerinimler altındaki dalga boyu kayması.....	39
Şekil 4.12: Mavi (4.2/125) fiber optik kablo ile üretilmiş %84 yansıtıcılık oranına sahip FBG sensörün sabit gerinimler altındaki dalga boyu kayması.....	40
Şekil 4.13: Yeşil (6.4/125) fiber optik kablo ile üretilmiş %89 yansıtıcılık oranına sahip FBG sensörün sabit gerinimler altındaki dalga boyu kayması.....	40
Şekil 4.14: Farklı çaptaki 3 fiber optik kablunun belirli gerinim kuvvetleri altındaki davranışları. Gerinim – dalga boyu grafikleri eğim kıyaslaması.....	41
Şekil 4.15: 6.4/125 fiber kabloya yazılmış %54 yansıtıcılı FBG sensörün gerinim tepkisi.....	43
Şekil 4.16: 7.8/125 fiber kabloya yazılmış %49 yansıtıcılı FBG sensörün gerinim tepkisi.....	44
Şekil 4.17: 4.2/125 fiber kabloya yazılmış %48 yansıtıcılı FBG sensörün gerinim tepkisi.....	44
Şekil 4.18: Farklı gerinimlerde yazılmış farklı merkez dalga boylarına sahip FBG sensörlerin tepkilerini ifade eden eğimleri.....	45
Şekil 4.19: 6.4/125 fiber ile üretilmiş % 89'luk yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi.....	47
Şekil 4.20: 6.4/125 fiber ile üretilmiş %50'lik yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi.....	48
Şekil 4.21: 4.2/125 fiber ile üretilmiş %84'lük yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi.....	48
Şekil 4.22: 4.2/125 fiber ile üretilmiş %60'luk yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi.....	49
Şekil 4.23: 7.8/125 fiber ile üretilmiş %91.5'lik yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi.....	49
Şekil 4.24: 7.8/125 fiber ile üretilmiş %50'lik yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi.....	50
Şekil 4.25: Farklı yansıtıcılık değerine sahip FBG sensörlerin gerinim tepkisi.....	50
Şekil 4.26: Fiber kaynaklandırma (splice) kayıp değerleri ölçüm düzeneği şematığı..	53
Şekil 4.27: farklı çekirdek çaplarına sahip iki fiberin kaynaklandırma (splice) görseli	53

FİBER BRAGG IZGARA SENSÖR ÜRETİMİNDE FARKLI PARAMETRELERİN SENSÖR TEPKİLERİNE VE KARAKTERİSTİĞİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating- FBG) sensörler düşük ağırlık, küçük boyut, elektriksel yalıtkanlık, zorlu çevre koşullarına dayanıklılık ve elektromanyetik girişimlerden etkilenmediğinden bilgi güvenliği anlamında sağladığı hat güvenliği gibi benzersiz avantajlarından dolayı yağ-gaz endüstrisinden havacılığa ve akıllı köprü uygulamalarına kadar birçok farklı sektörde basınç, gerinim, sıcaklık, nem vb. birçok parametreyi ölçmek için kullanılan vazgeçilmez bir araç olmuştur. FBG sensörler fiber optik kablunun Germanyum (Ge) katkılı çekirdek (core) bölgesinin UV (ultraviyole) ışına maruz bırakılmasından meydana gelen kalıcı kırıcılık indis modülasyonlarından oluşur. FBG sensörler fiber optik kablo içerisinde hareket eden ışık sinyalinin dalga boyu, yoğunluk ve faz gibi optik özelliklerinin çevresel etkenlere bağlı olarak değişimlerini gözlemlemek için geliştirilmişlerdir.

Bu çalışma süresince farklı Ge katkı miktarlarından kaynaklı olarak farklı çaplardaki fiber optik kablolar kullanılarak FBG sensör üretimi için en ideal olan fiber optik kablo çeşidini belirleme adına ışığa duyarlılıklar incelenmiştir. Üretim ve karakterizasyon düzeneğinin kurulumundaki bağlantı noktalarında fiberlerin Ge katkı farklılıklarından kaynaklı kayıp değerleri ve dolayısıyla ölçüm hassasiyetleri gibi parametreler kıyaslanmıştır. Ayrıca FBG sensörlerin tepki ve karakteristiklerine etkilerini gözlemlemek adına, farklı yansıtma oranlarında, farklı merkez dalga boylarında FBG'ler üzerine çalışmalar yapılmış ve belirli çevresel etkenler altındaki tepkileri incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: FBG, Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating-FBG) Sensörler, Fiber Optik Kablolar, Fiber Optik Sensörler

INVESTIGATION OF EFFECTS OF DIFFERENT PARAMETERS ON THE RESPONSES AND CHARACTERISTICS OF FIBER BRAGG GRATING (FBG) SENSORS

SUMMARY

Due to excellent advantages of low weight, small size, electrically insulative, high resistance to harsh environmental conditions and good line security for telecom applications, Fiber Bragg Grating (FBG) sensors have become indispensable tools in diverse industries such as oil-gas storage and transportation, aviation, and smart bridge applications in order to measure various parameters such as force, pressure, strain, displacement, temperature, humidity, and radiation dose. FBG sensors consist of permanent refractive index modulations (fringe patterns) which is occurred along the Ge-doped optical fiber core using UV light exposure. FBG sensors have been developed to measure environmental variations by monitoring the changes of optical features (i.e. wavelength, intensity and phase) of a light signal moving inside the fiber.

The focus of this research was to explore optimum parameters (i.e. fiber core size with various Ge concentrations and reflectivity rates) which could be the best for manufacturing the ideal FBG sensors. The study also aimed to investigate effects of different parameters on FBG sensors' characteristics and responses in terms of photosensitivity, dB loss at splice points of fibers used and reflectivity. All interactions by experimental work were observed and discussed. Thus, the basis of the optimum FBG sensor manufacturing system used in the study was elucidated.

Keywords: FBG, Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors, Fiber Optical Cables, Fiber Optical Sensors

1. GİRİŞ

İlk endüstriyel fiber optik kablunun 1970 yılında Corning Glass şirketi tarafından üretilmesinden bu yana fiber optik ve fiber temelli teknolojiler çok ciddi mesafe kat etmiştir ve günümüzde haberleşmeden lazer uygulamalarına, birçok endüstriyel uygulamadan tıp alanına kadar çok geniş yelpazede kullanılmakta ve halen daha geliştirilmektedir. Fiber optik kabloların kullanıldığı bu uygulama alanlarından biri olan fiber optik sensör çeşitlerinin özel bir tipi olarak FBG sensörler ise birçok farklı tipte uygulama alanında sıklıkla kullanılmakta ve elektriksel sensörlerin yerlerini almaktadırlar.

Bu tez kapsamında FBG sensörlerin üretim adımı ve sonrasındaki karakteristiklerine etkilerini incelemek adına birçok farklı değişken parametre irdelenmiş ve sonuçlar kıyaslanarak FBG sensör üretiminde ideal fiber tipi, ideal parametreler vb. bileşenler belirlenmiş, böylece en temelde FBG sensör üretiminin temeline ışık tutulmuştur. Bu kapsamda tezin birinci bölümünde fiber optik kablolar ve FBG yapıları ile FBG sensörler hakkında temel bilgiler, ikinci bölümde FBG sensörlere dair teorik inceleme sonuçları, üçüncü bölümde kullanılan materyaller ve uygulama yöntemleri, dördüncü yani son bölümde ise tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve sonuç aktarılmıştır.

1.1. Fiber Optik Kablolar ve FBG Sensörler

Fiber optik kablolar iç yansımalar ile içerisine iletilen ışıġı/ışık sinyalini uzun mesafeler boyunca iletebilen cam veya plastik yapıda olabilen optik malzemelerdir. Fiber optik sensörler ise fiber optik kablo içerisinde ilerleyen ışık sinyalinin çevresel faktörlere baġlı olarak karakteristiğinde meydana gelen deġişimlerin analizi sistematikle dayananmaktadır [1]. Çevresel faktörlere baġlı olarak fiber optik kablo içerisinde ilerleyen ışınların irdelenebilecek özellikleri; yoğunluk (intensity), dalga boyu, polarizasyon ve faz olarak listelenebilir. FBG sensörler ise bu liste içerisinde fiber optik kablo içerisinde ilerleyen ışık sinyalinin çevresel etkenlere baġlı olarak

dalga boyunda meydana gelen değişimlerin incelenmesi mantığı ile çalışmaktadır ve fiber sensör uygulamalarında en çok paya sahip olan fiber sensör çeşididir.

1.1.1. FBG yapıları ve FBG sensörlerin kullanım alanları

FBG sensörler gerinim (strain), sıcaklık, basınç, titreşim vb. sensör uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sektör olarak bakıldığında ise; savunma sanayisinden yağ/gaz endüstrisine, inşaat sektöründen tıp uygulamalarına kadar çok geniş yelpazede talep görmektedir [2-6].

FBG yapıları yapı itibariyle temel olarak optik bir fiberin çekirdek (core) yapısında meydana getirilen kalıcı kırıcılık indis modülasyonudur. Oluşturulan indis değişimi ızgara yapısında olup her bir ızgara/çizik arasındaki mesafe FBG'nin periodu olarak adlandırılır ve FBG sistemlerinin performanslarını ve karakteristiğini belirleyen değişken olmakla birlikte bu parametrenin nanometre mertebesinde hassasiyetle kontrol edilmesi gerekmektedir. Böyle hassas bir ızgara/desen yapısı ancak çok yüksek performanslı litografi teknikleri ile mümkün olabilmektedir [7].

1.1.2. FBG üretim yöntemleri

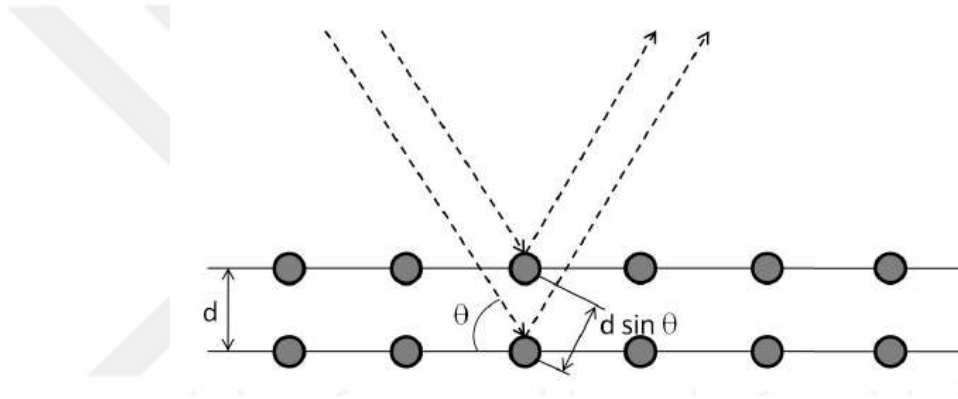
FBG üretimi için farklı teknikler mevcuttur. Bunlar holografi tekniği, nokta-nokta üretim tekniği, faz maskesi (phase mask) üretim tekniği ve çekme kulesi (draw tower) FBG üretim yöntemi olarak sıralanabilir. Bu üretim teknikleri arasından fiber optik kablo üzerinde girişim deseni oluşturmak amacıyla “faz maskesi (Phase Mask-PM)” olarak bilinen üretim tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır ve tez süresince uygulanacak olan üretim yöntemidir [7].

1.1.3. Faz maskesi yöntemi ve FBG üretimi

Faz maskesi belli bir kalınlıktaki cam malzeme üzerine “elektron hüzmeli litografisi” yöntemi ile basamak benzeri yarıkların oluşturulması ile elde edilmektedir. PM üretim tekniğinde, faz maskesi FBG yazılacak fiber optik kablo üzerine çok yakın mesafede yerleştirilir. Üzerinde belirli bir uzunlukta basamak benzeri işlenmiş yapılar bulunan faz maskesi üzerine düşürülen UV lazer demeti faz maskesinin üzerinden geçtiğinde fiber optik kablo üzerinde bir girişim deseni oluşturur. Faz maskesinin basamakları arasındaki mesafeye bağlı olarak fiber optik kablo üzerinde periyodu

faz maskesinin basamakları arasındaki periyodun (mesafenin) yarısına eşit olan ızgaralar (girişim deseni) oluşmaktadır [7]. Böylece ızgaraların bulundukları bölgelerde kırıcılık indis artışı meydana gelmektedir.

Sonuç olarak fiber optik kablonun bir ucundan gönderilen geniş spektrumlu elektromanyetik sinyalin FBG yapısındaki ızgara periyodunun tam katına eşit olan dalga boyu binlerce ızgaranın her birinden çok küçük miktarda geriye yansır. Geriye yansıyan her ışının birbiri ile yapıcı girişim oluşturması ile filtrelenmiş olur. Bu etkileşim “Bragg yansıma kuralı” olarak bilinmektedir ve Şekil 1.1’de verildiği üzere x-ışını kristalografisinde katmanlar arasındaki mesafenin tam katına sahip olan ışınların yapıcı girişim oluşturmalarına benzer.



Şekil 1.1: Bragg yansıma kuralına göre x-ışını yansıma görünümü [7]

$$2d\sin\theta=n\lambda \quad (1.1)$$

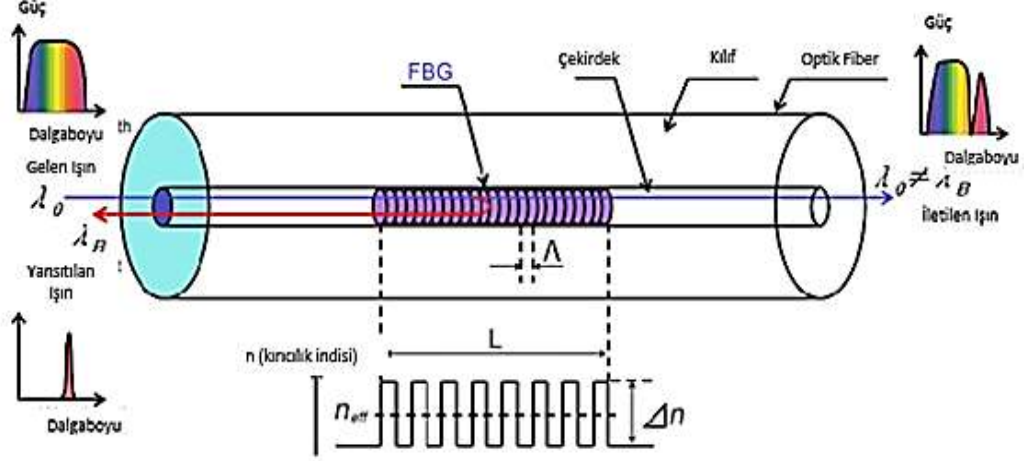
Denklem (1.1)’de θ geliş açısı, n kırıcılık indisi, d ızgara periyodu (ızgaralar arası mesafe) ve λ gelen ışının dalga boyunu temsil eder. Fiber optik kablo içerisindeki FBG yazımı yapılmış olan bölgedeki her bir ızgara yapısı x-ışını kristalografisindeki düzlemler olarak düşünülürse gelen elektromanyetik sinyalin açısı 90° olacağından, buradaki d mesafesi FBG yapılarının arasındaki ızgara periyoduna denk olduğundan Denklem (1.1);

$$2A=\lambda \quad (1.2)$$

olarak değişir. Denklem (1.1) vakum altında değerlendirilmektedir ve burada ışık sinyalinin ilerleyeceği yol silika yapıdaki fiber optik kablonun kırıcılık indisine bağlı olduğundan Denklem (1.2);

$$\lambda=2n_{eff}A \quad (1.3)$$

olarak değişir. Burada n_{eff} fiberin etkin kırıcılık indisi, Λ ızgaraların periyodu ve yine λ gelen ışının dalga boyudur. Denklem (1.3)'ten de görüldüğü üzere n_{eff} sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden ve Λ da gerinime bağlı değiştiğinden ve her ikisinin değişimide λ (Bragg dalga boyu)'nu değiştirdiği için FBG sensörler gerinim ve sıcaklık sensörü gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar [7-8].



Şekil 1.2: Fiber optik kablo görünümü ve FBG şematiği [8]

Şekil 1.2'de bir fiber optik kablonun çekirdek bölgesine yazılmış Bragg ızgaralarını ve bu ızgaraların periyoduna bağlı olarak geniş spektrumlu bir ışık sinyalinin içerisindeki Bragg yansıma şartına uyan dalga boyunun geriye yansıtılması, ayrıca iletilen spektrumun ve yansıtılan spektrumun durumları aktarılmaktadır.

Bragg dalga boyunun sıcaklık ve gerinime bağlı olarak hassasiyetini hesaplamak için ise Denklem (1.3)'ten devam edilir. Bragg dalga boyunun sıcaklığa bağlı değişimi ise Denklem (1.4)'te verildiği gibi Bragg dalga boyunun sıcaklığa bağlı kısmi türevi ile ifade edilir [7].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} + 2\Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} \quad (1.4)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \lambda_B \quad (1.5)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \Delta T + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \Delta T \quad (1.6)$$

Denklem (1.4) sırasıyla sıcaklığın ızgara periyoduna ($d\Lambda/dT$) ve etkin kırıcılık indisine (dn_{eff}/dT) etkisini temsil etmektedir ve burada $\Delta\lambda_B$ Bragg dalga boyu değişimini, ΔT de sıcaklık değişimini ifade etmektedir. Daha sonra $2n_{eff}$ yerine

Denklem (1.3)'ten $\frac{\lambda_B}{\Lambda}$ ve 2Λ yerine de $\frac{\lambda_B}{n_{eff}}$ çekildiğinde Denklem (1.5) elde edilir. Denklem (1.5)'te eşitliğin sağ tarafındaki λ_B 'ler eşitliğin diğer tarafındaki ΔT ile yer değiştirdiğinde Denklem (1.6) elde edilir. Böylece Denklem (1.6) sıcaklığın, periyodu ve etkin kırıcılık indisini etkilemesiyle Bragg dalga boyu değişimine etkisini vermektedir. Denklem (1.7)'de Denklem (1.6)'daki $((1/\Lambda)/(d\Lambda/dT))$ ifadesi α yani termal genleşme sabiti ve ikinci kısımda $((1/n_{eff})/(\frac{dn_{eff}}{dT}))$ ifadesi η yani termo-optik katsayı olarak ifade edilmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T \quad (1.7)$$

Gerinime bağlı hassasiyet ise Denklem (1.3)'ün yer değiştirmeye bağlı kısmi türevidir [7]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_L} = 2n_{eff} \frac{d\Lambda}{dL} + 2\Lambda \frac{dn_{eff}}{dL} \quad (1.8)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dL} \Delta L + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dL} \Delta L \quad (1.9)$$

Benzer dönüşümler Denklem (1.8) için yapıldığında Denklem (1.9) elde edilir. Bir fiber optik kabloya gerinim uygulandığı zaman Denklem (1.9)'un iki kısmı olan $((1/\Lambda)/(d\Lambda/dL))$ ile $((1/n_{eff})/(\frac{dn_{eff}}{dL}))$ ifadeleri Bragg dalga boyu değişimi üzerinde zıt etkiler oluşturur, ilk ifadede ızgaralar arası mesafenin artması ile periyod artışına bağlı olarak Bragg dalga boyu artarken diğer ifadede gerinime bağlı birim hacimdeki yoğunluğun azalması ile birlikte etkin kırıcılık indisinin azalmasıyla Bragg dalga boyu azalır. Bu iki etki bir arada incelendiğinde Denklem (1.10) elde edilir:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\epsilon_z \quad (1.10)$$

ϵ_z ızgaranın gerinimini, ρ_e opto-elastik katsayıyı temsil etmektedir. Denklem (1.7) ile Denklem (1.10) birleştirildiğinde Bragg dalga boyunun sıcaklık ve gerinime bağlı değişimi Denklem (1.11)'deki gibi olmaktadır.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\epsilon_z + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (1.11)$$

Denklem (1.11) Ge katkılanmış silika fiber için Denklem (1.12), Denklem (1.13) ve Denklem (1.14)'deki değerleri almaktadır:

$$\rho_e(\text{opto} - \text{elastik katsayı}) = 0.22 \quad (1.12)$$

$$\alpha(\text{Termal genleşme katsayısı}) = 0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \quad (1.13)$$

ve

$$\eta(\text{Termo – optik katsayı}) = 8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \quad (1.14)$$

Böylece 1550 nm dalga boyu (1500-1600 nm dalga boyu aralığı sensör uygulamalarında ve genel olarak telekom/haberleşme uygulamalarında kullanılmaktadır) için ızgaraların sıcaklık ve gerinim hassasiyeti Denklem (1.15) ve Denklem (1.16)'daki gibi olmaktadır [7]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda T} = 10.2 \frac{pm}{^{\circ}\text{C}} \quad (1.15)$$

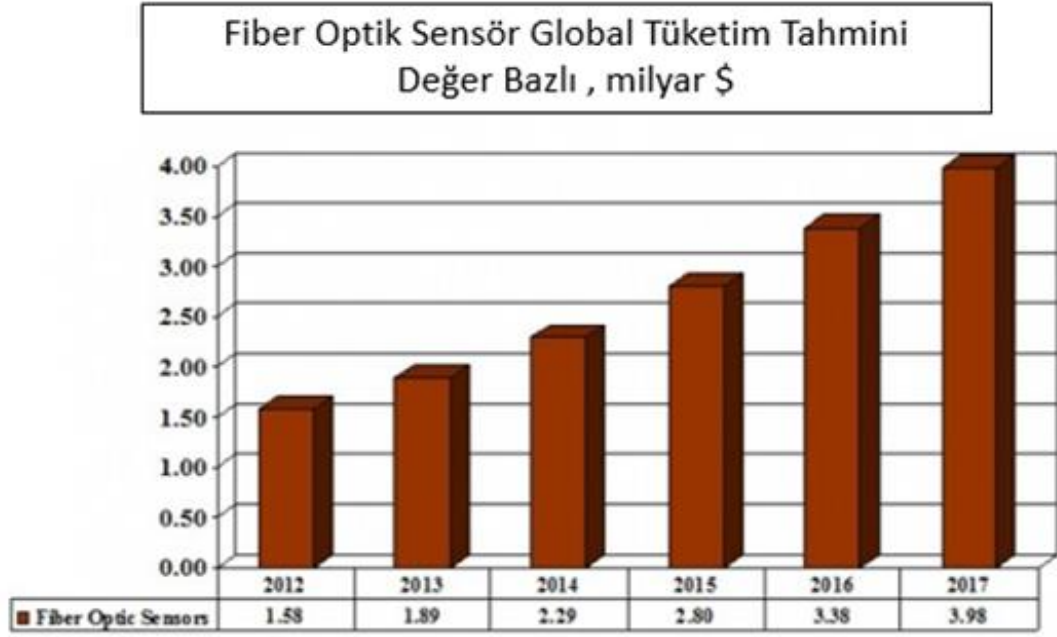
ve

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{\epsilon}} = 1 \frac{pm}{\mu\epsilon} \quad (1.16)$$

1.2. FBG Yapılarının Literatürdeki Yeri ve Önemi

FBG sistemler fotonik endüstrisinin temel taşlarıdır ve fotonik sektöründe birçok alanda kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerin pazardaki yerini daha net bir şekilde ifade edebilmek adına ElectroniCast (yıllık fiber optik sensör marketinin büyüme rakamlarını belirten danışmanlık kurumu) tarafından 27 Ağustos 2016 Cumartesi günü yayınlanan rapora göre dağıtım (distributed) ve nokta (point) fiber optik sensörlerin pazar payının 2020 yılında 4.49 milyar dolara ulaşması tahmin edilmektedir.

ElectroniCast tarafından yayınlanan Şekil 1.3'te verilen grafikteki verilere göre optik sensörlerin tüketim değerinin yıllık % 20.3 gibi bir artış oranıyla 2012 den 2017'ye 1.58 milyar dolardan 3.98 milyar dolara çıkacağı tahmin edilmiştir.



Şekil 1.3: 2017 – 2012 yılları arası global FBG sensörlerin tüketim verisi [9]

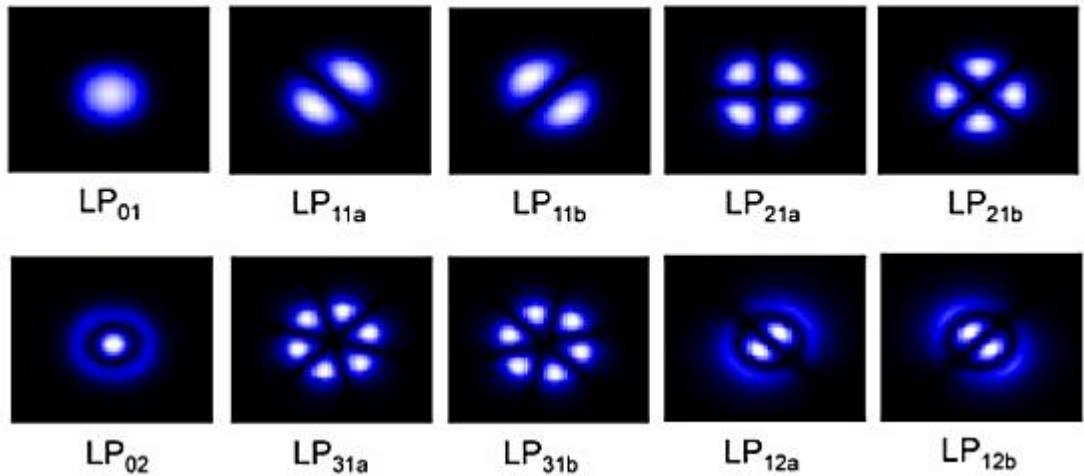
Genel anlamda fiber optik sensörlerin toplam pazar payı 2015 yılında 2.79 milyar dolara ulaşmıştır. 2015–2020 yılları arasında %10'luk yıllık ortalama artış oranıyla 4.49 milyar dolara ulaşması öngörülmektedir. Bahsi geçen rakamlar birikimli rakamlar olmayıp belirli bir aralık ve yıl için verilmiştir [10].

2011 yılına dair fiber sensörlerin patent dağılımı incelendiğinde ise yaklaşık olarak %50'sinin FBG sensörler üzerine olduğu görülmektedir [11].

Yukarıda verilen inceleme ve market değerlerinden de anlaşılacağı üzere fiber sensörler ve özellikle FBG temelli sensörler günümüz ve gelecek teknolojik uygulamalarının vazgeçilmez birer parçası olacaktır ve bu anlamda gelecek nesil sistemlerin hemen hepsinde FBG ve fiber sensörlerin yer alacağı açıktır.

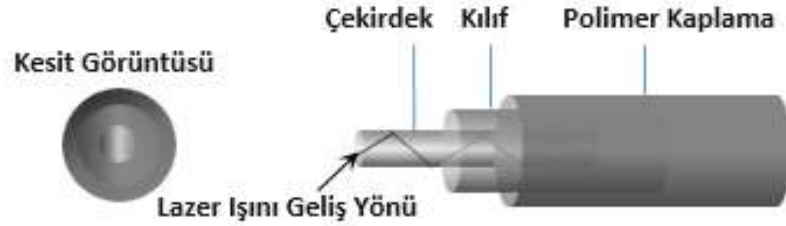
2. TEORİK İNCELEME

Temelde çekirdek (core) ve kılıf (clad) olmak üzere silika yapılardan oluşan fiber optik kabloların çalışma prensibi Snell Yasası'na dayanmaktadır. İçerdiği Ge atomlarından dolayı kılıf bölgesinden daha yüksek kırıcılık indisine sahip olan (daha yoğun olan) çekirdek bölgesine kılavuzlanan belirli bir dalga boyundaki lazer ışını (ışık sinyali) çekirdek ve kılıf arayüzeyine geldiğinde çok yoğun ortamdaki az yoğun ortama geldiği için toplam iç yansıma kuralına uyarak geldiği ortama geri yansır. Böylece lazer ışını fiber optik kablo boyunca taşınır. İçerisinde taşıdıkları ışın karakteristiğine bağlı olarak fiber optik kablolar tek mod'lu (single mode) ve çok mod'lu (multi mode) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Lazer ışınının içeride ilerlerken izlediği her bir yol bir mod'a karşılık gelmektedir. Şekil 2.1'de farklı fiber modları verilmektedir, bunlara Şekil 2.2'deki gibi içeride ilerleyen ışık sinyalinin sahip olduğu elektromanyetik alan dağılımları da diyebiliriz [12,13]. Tek mod'lu fiber optik kablolar içerisinde sadece bir tek mod hareket eder. Bunu sağlayabilmek için fiber optik kablonun çekirdek kısmı $\sim 6-10 \mu\text{m}$ (mikrometre) genişliğinde sınırlandırılmaktadır. Fiber optik kablo içerisinde birden fazla elektromanyetik alan dağılımı, birden fazla yol varsa bu türdeki fiber kablolar çok mod'lu (multimode) fiber optik kablolar denir. Fiber kablo içerisine daha fazla mod alabilmek için çekirdek çapları daha büyüktür $\sim 50 - 62,5 \mu\text{m}$ gibi.



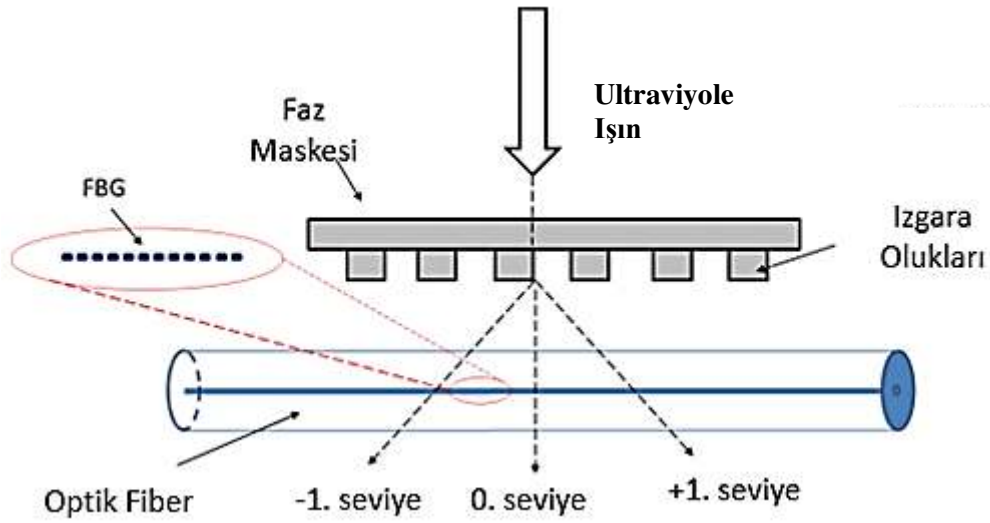
Şekil 2.1: Fiber modları [12]

Tek mod'lu fiberler daha çok uzun mesafelere sinyal iletimi için düşük güç gerektiren uygulamalarda, çok mod'lu fiberler ise kısa mesafeli yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Fiber optik kablo çeşitleri sadece bu farklılıklarla kalmayıp çok farklı tipte fiber optik kablo çeşitleri vardır. Fakat bunlar çalışmanın kapsamı dışında olduğu için burada verilmemektedir.



Şekil 2.2: Fiber optik kablo bileşenlerinin ve lazer ışınının şematik gösterimi [13]

FBG üretimi ise çoğunlukla polimer kaplaması sıyrılmış tek mod'lu (single-mode) fiber optik kabloların belirli bir mesafede yoğun UV ışının periyodik girişimine maruz bırakılması ile kırıcılık indisinde kalıcı bir artış meydana getirme sistematiğine dayanmaktadır. Ultraviyole ışına maruz bırakıldığında kırıcılık indisinin artışına sebep olan mekanizma ışığa duyarlılık (photosensitivity) olarak adlandırılmaktadır. Işığa duyarlılık konusu halen daha üzerine araştırmalar yapılan ve farklı modeller üretilen bir konudur. Burada bahsedilecek olan ışığa duyarlılık çeşidi Ge katkılanmış tek mod'lu fiberlerdeki ışığa duyarlılıktır. Ge katkılanmış fiberlerdeki ışığa duyarlılığa dair en çok kabul gören model ise fiber optik kablonun Ge katkılı olduğunda içerideki Silika (Si) atomlarının Ge atomları ile kısmen yer değiştirmesi ve Ge-Si atomları arasında yanlış bağların oluşmasıyla ve bu bağların UV lazer ışınları ile etkileşimiyle birlikte kusur bölgelerinin oluşmasıdır. Si ve Ge atomları arasında oluşan bağlar 244-248 nm gibi UV dalga boyunda yüksek emilime sahip olduğu için bu dalga boylarına sahip bir elektromanyetik dalga bu bölgelere düşürüldüğünde Si-Ge bağları koparak kusur olarak adlandırılan Ge zayıf bölgelerini (Germanium-oxygen deficiency center) oluştururlar. Bu kusurların artışına bağlı olarak fiber optik kablonun çekirdek bölgesinde UV ışınların düştüğü bölgelerde Şekil 2.3'te görülen ızgara yapıları üzerinde kırıcılık indis artışı meydana gelmektedir [2].



Şekil 2.3: FBG sensörü yazım mekanizmasının şematik gösterimi [2]

Meydana getirilen kırıcılık indisi artışından kaynaklanan desen yapısındaki ızgaraların periodu (ızgara merkezinden diğer ızgara merkezine olan mesafe) belirli bir genişlikteki spektrumda hangi dalga boyunun geriye yansıtılacağını (filtreleneceğini) belirlemektedir [2]. Burada meydana gelen yansıtma Bragg yansıtma kuralından yola çıkılarak, Bragg yansıtma şartını yerine getiren ve ızgara periodunun tam katı olan dalga boyunun geri yansıtılması ve diğer dalga boylarının neredeyse hiç etkilenmeden iletilmesini sağlamaktadır. Geriye yansıtılacak dalga boyunun ve yansıtma oranında belirlenebilmesi FBG sistemlerinin en avantajlı özelliğidir. Yansıtılma oranı (% kaçının yansıtılacağı) temelde kullanılacak olan optik fiberin UV ışına ne derecede hassas olduğuna, kullanılacak fiberin Ge ile katkılanma yoğunluğuna, kullanılan UV ışının uygulanma süresine, şiddetine ve ızgaraların toplam uzunluğuna bağlı olarak belirlenir [1]. Dalga boyuna bağlı filtreleme özelliği ile telekomünikasyondan (WDM: wavelentgh division multiplexer olarak), fiber lazer sistemlerine (seçici ayna olarak kavite oluşturmak için) ve sensör uygulamalarına kadar çok geniş kullanım alanları bulunmaktadır [1].

Kapsam olarak bakıldığında FBG sensörler silikadan oluşan fiber optik kablo temelli oldukları için elektriksel olarak yalıtıkandırılar (elektriği iletmezler), pasif bir bileşen oldukları için herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar, elektromanyetik parazitlerden etkilenmezler, çevre koşullarına dayanıklıdırılar, uzun mesafelerde sinyalleri taşıyabilirler. Tek bir fiber optik kablo üzerinde çoğaltılıp (easy to multiplex) ayrı hatlara bölünebilirler, bakım gerektirmezler, yapıları itibari ile kompozit

malzemelere entegre etmeye elverişlidirler. Bahsettiğimiz üstün özellikleri sayesinde FBG sensörlerin yer aldıkları kullanım alanlarını aşağıdaki gibi listeleyebiliriz [14-24];

- Rüzgar türbinlerinin kanatlarında, kanatlardaki kompozit malzeme içerisine gömülerek, oluşan gerinimi ölçmek amacıyla kullanılırlar.
- Günümüzde uçakların gövde ve kanatlarına yerleştirilen gerinim (strain) sensörler daha ziyade yer testlerinde kullanılmaktadırlar ve bu testler için mühendisler binlerce sensöre ihtiyaç duymaktadırlar. Eski nesil elektriksel sensörlere kıyasla tek bir hatta çoğaltılabildikleri, daha yüksek hassasiyette ölçüm sundukları ve daha küçük boyutlu oldukları için artık FBG sensörler kullanılmaya başlanmıştır. Gelecek nesil uçakların ise sadece yer testlerinde değil uçuş sırasında da kontrollerini sağlamak için özellikle kompozit malzeme ile kaplanan kanatlarda kompozit malzemelerin katmanları arasındaki sağlamlığı kontrol etmek, kanatların gövdeye birleştiği bölgelerdeki gerinimleri ölçmek (bu bölgeler en çok gerinime maruz kalmaktadır) için yine gerinim (strain) sensörü olarak kullanılması planlanmaktadır ve bu alanda çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir.
- Ortam koşullarına dayanıklı oldukları için ve bakım ile herhangi bir güç kaynağı gerektirmedikleri için yeni nesil uydularda kullanılmaktadırlar.
- Akıllı köprüler diye tabir edilen köprülerde köprü boyunca oluşan gerinimleri kontrol etmek ve gerekli görüldüğünde ilgili bölgeye erken müdahale sağlamak amacıyla yine gerinim sensörleri olarak kullanılmaktadırlar.
- Elektriksel olarak yalıtkan oldukları için yüksek gerilim bölgelerinde ve elektriksel iletkenliğin önem arz ettiği uygulamalarda kullanılmaktadırlar.
- Gaz/petrol ve boru hatlarında meydana gelebilecek sızıntıları tesbit etmek ve ortam şartlarından kaynaklı muhtemel gerinimleri ölçmek için gerinim sensörleri kullanılmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu bölümde deneysel çalışmalar sırasında üretim ve karakterizasyon sisteminin kurulumunda kullanılan bileşenler ve kıyaslanan fiber optik kablo tipleri verilmektedir. Ayrıca fiber optik kabloların temel özelliklerinden, çalışma prensiplerinden ve çeşitlerinden bahsedildiği teorik altyapı anlatılmaktadır.

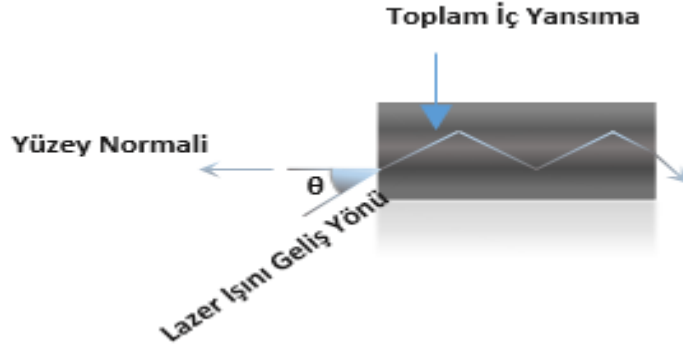
3.1.1. Fiber optik kablo

Fiber optik kablolar en temelde çekirdek bölgesindeki Ge katkısıyla, çekirdek ve kılıf bölgelerinin kırıcılık indis farklılığına bağlı olarak ışınların bu iki farklı ortam arasında Şekil 3.1’de gösterildiği gibi taşındığı optik yapılardır [13]. Deneysel çalışmalarda üç farklı tipte fiber optik kablo kullanılmıştır. Kullanılan fiber optik kablolar farklı Ge konsantrasyonlarına sahiptir. Bir fiber optik kabloda Ge konsantrasyonunun artması fiber kablonun ışığa duyarlılığını artırır. Fiber optik kablonun kırıcılık indisinin artması fiberin numerik açıklık (NA-Numerical aperture) değerinin artışına neden olmaktadır. NA değeri ise Denklem (3.1)’de görüldüğü üzere çekirdek (core) ve kılıf (clad) bölgelerinin kırıcılık indis farkları tarafından belirlenir.

$$NA = \frac{1}{n_0} \sqrt{(n_{core}^2 - n_{clad}^2)} \quad (3.1)$$

n_0 içinde bulunulan ortamın kırıcılık indisine eşittir ve hava için bu değer 1’e eşittir. Böylece Denklem (3.2)'yi aşağıdaki gibi yazabiliriz :

$$NA = \sqrt{(n_{core}^2 - n_{clad}^2)} \quad (3.2)$$



Şekil 3.1: Fiber optik kablo içerisindeki toplam iç yansıma şematiği [13]

Burada açıklanması gereken bir diğer parametre de V numarası (V number) diğer bir adıyla normalize frekans parametresidir ve bir fiberin taşıyacağı mod sayısını belirler. V numarası boyutsuz bir büyüklüktür ve sıklıkla basamak indisli fiberleri tanımlamak için kullanılır. V numarası matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

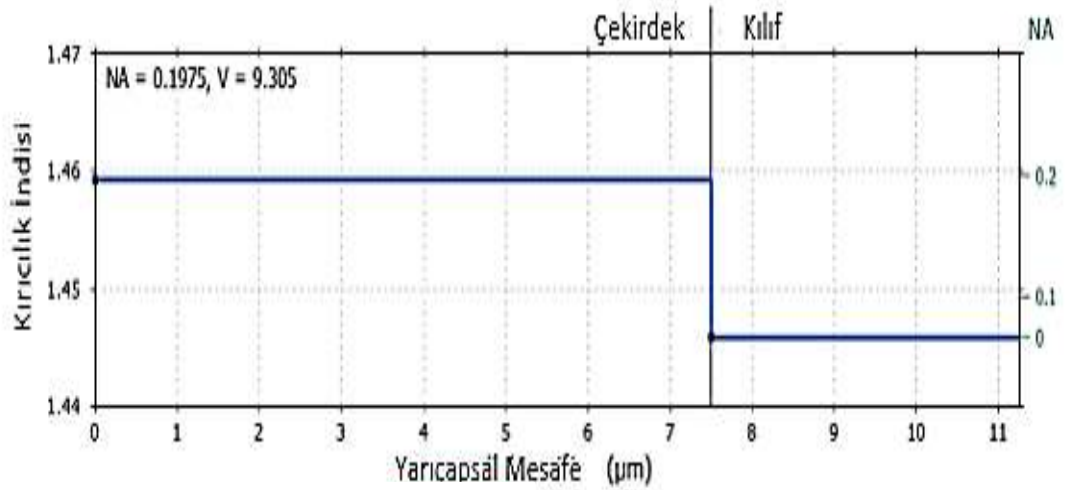
$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{(n_{core}^2 - n_{clad}^2)} \quad (3.3)$$

λ dalga boyu, a fiber çekirdek yarıçapı, NA numerik açıklık değerini ifade etmektedir. Eğer ki V numarası < 2.405 ise bu V numarasına sahip fiberler polarizasyon doğrultusunda tek bir mod taşırlar ve tek mod'lu (single-mode) fiber olarak ifade edilirler. Eğer ki $V > 2.405$ ise çok mod'lu (multi-mode) fiber olarak ifade edilirler.

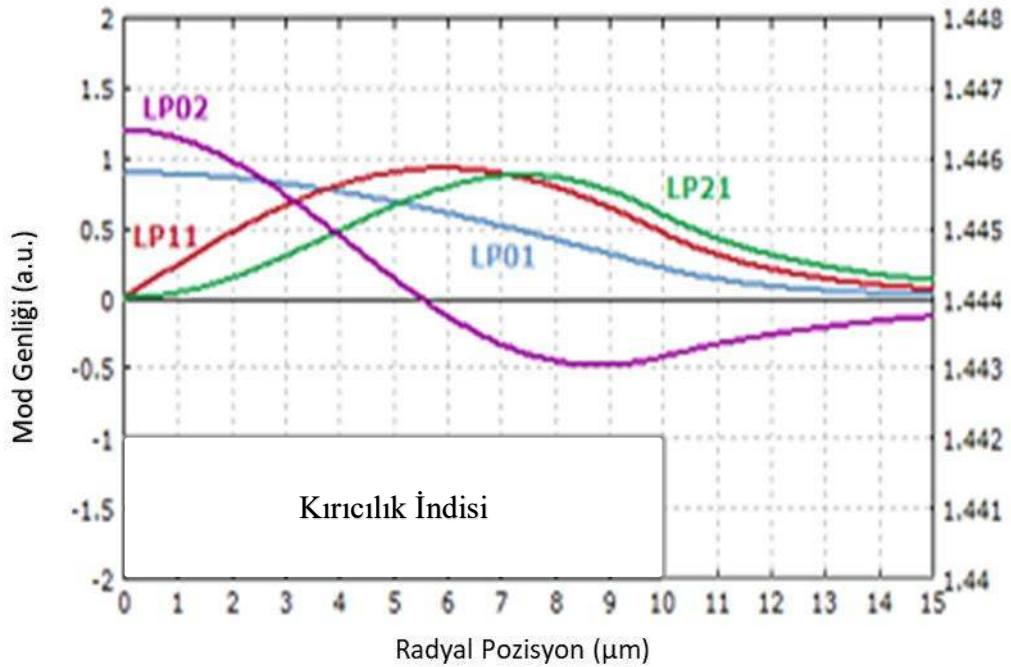
Denklem (3.3)'ten görüleceği üzere Bragg dalga boyu fibere işlenmiş olan ızgara periyodu ve etkin kırıcılık indisinin çarpımının iki katına eşittir. Tek mod'lu bir fiber için sadece birtane etkin kırıcılık indisi vardır fakat fiber optik kablo çok mod'lu olduğu zaman her bir mod için ayrı bir etkin kırıcılık indisi bulunur ve bu farklı etkin kırıcılık indis değerlerinden dolayı fiber içerisinde bulunan mod sayısının pik değerleri spektrum görüntüsünde elde edilir. Yani tek bir FBG yapısı birden fazla dalga boyu için filtreleme özelliği gösterir ki bu istenen bir durum değildir. Bu yüzden fiber optik kablo üreticileri bu çoğulluktan kaçınmak için fiber optik kablunun çekirdek çapını küçültürler. Denklem (3.3)'ten görülebileceği gibi çekirdek yarıçapı (a)'nın azalması V numarasını da azaltacağından aynı dalga boyu ve numerik açıklık değeri için tek mod'lu yapı elde edilmesini sağlamaktadır. Bu da Ge konsantrasyonu ile fiber çekirdek çapı arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır.

3.1.1.a. Basamak indisli (step-index) fiberler

Optik fiberler farklı kırıcılık indis profillerine sahip olabilirler. En temel kırıcılık indis profili Şekil 3.2’de gösterilen kare indis profilidir ve bu indis profilinde kırıcılık indisi fiber çekirdeği boyunca sabittir ve kılıfın kırıcılık indisinden büyüktür.



Şekil 3.2: Basamak indisli fiber kırıcılık indis profil diagramı



Şekil 3.3: Basamak indisli bir fiberde LP modlarının mod fonksiyonları

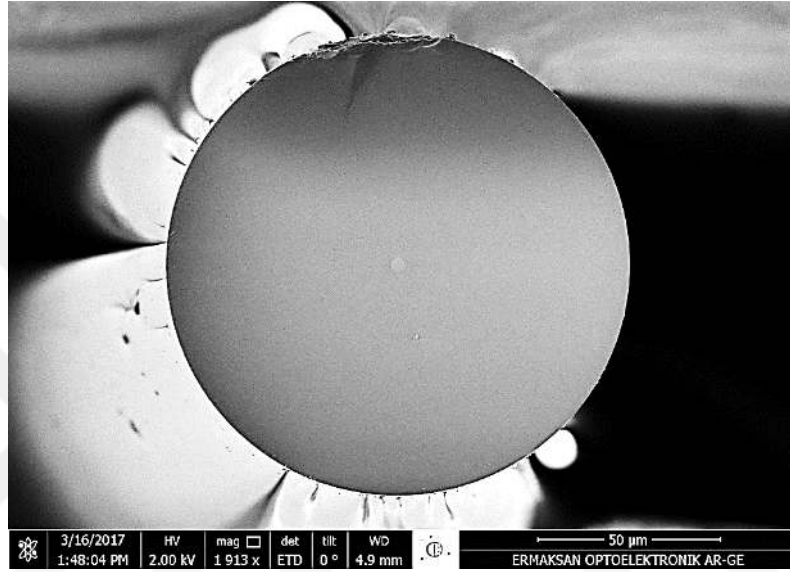
Şekil 3.3’teki kırıcılık indis profili farklı polarizasyon durumlarından bağımsız olarak 4 farklı mod içermektedir.

Deneysel çalışmalar boyunca kullanılacak ve farklı parametreler için kıyaslanacak olan 3 farklı Ge konsantrasyonuna ve dolayısıyla farklı çekirdek çaplarına sahip fiber optik kablolar da basamak indis sınıfına giren fiber optik kablolardır, yani çekirdek ve kılıf kırıcılık indisleri arasında keskin bir sınır vardır ve yine çekirdek ve kılıf kırıcılık indisleri bu bölgeler boyunca sabittir.

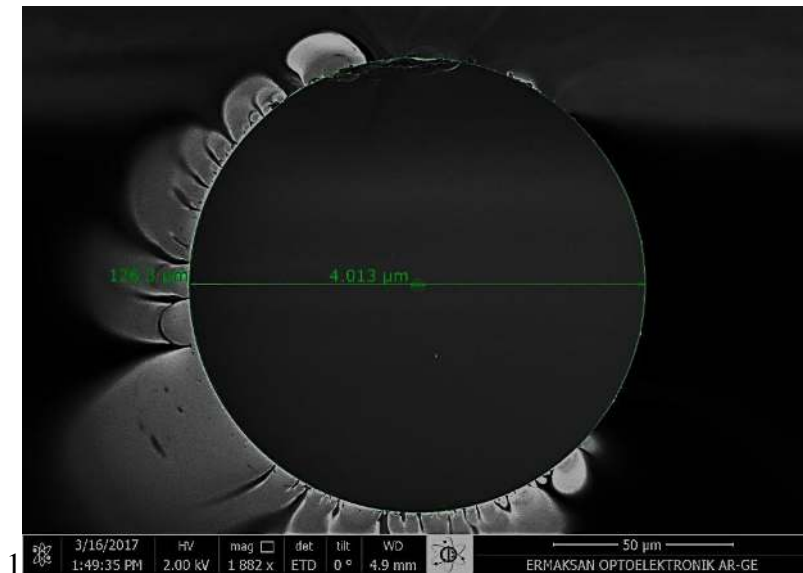
Deneysel çalışmalardan önce materyal başlığı altında endüstriyel olarak satılan 3 farklı fiber optik kablonun farklı Ge konsantrasyonlarına bağlı olarak farklılaşan çekirdek çaplarının ürün data formlarında verilen değerlerle ne kadar uyuyduğunu gözlemlemek ve tam olarak ne kadarlık farklardan bahsettiğimizi gözlemlemek adına hazır olarak temin edilmiş olan bu fiber optik kablolar Bölüm 3.2 “yöntem” kısmında anlatılmış olan fiber hazırlama yöntemleri ile kılıflarından belli bir uzunlukta arındırılmış, alkol ile ıslatılmış pamuksuz peçete ile silinerek temizlenmiş ve özel kesici cihazla ucu $\sim 0^\circ$ olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Daha sonrasında hazırlanmış olan bu fiberler sırasıyla uç kısımlarına yakın bölgelerden kesilerek taramalı elektron mikroskopuna özel tutucu (holder) yardımı ile yerleştirilmiştir ve 3 farklı fiber içinde genel form incelenmiş, çekirdek ve kılıf çaplarının ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen incelemeler için “FEI nova–nano 450” marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar üç farklı fiber için Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’daki gibi verilmiştir:

3.1.1.a. 4.2 / 125 Fiber

Sırasıyla 4.2/125 μm çekirdek ve kılıf çaplarına sahip, en yüksek Ge konsantrasyonunda ve dolayısıyla tek mod özelliğini koruyabilmek için en küçük çapta üretilmiş olan fiber optik kablonun taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınmış kesit görüntüsü Şekil 3.4.a’da ve gerçek çap ölçüm sonuçları (4.013 μm çekirdek, 126.3 μm kılıf) Şekil 3.4.b’de verildiği gibidir:



(a)

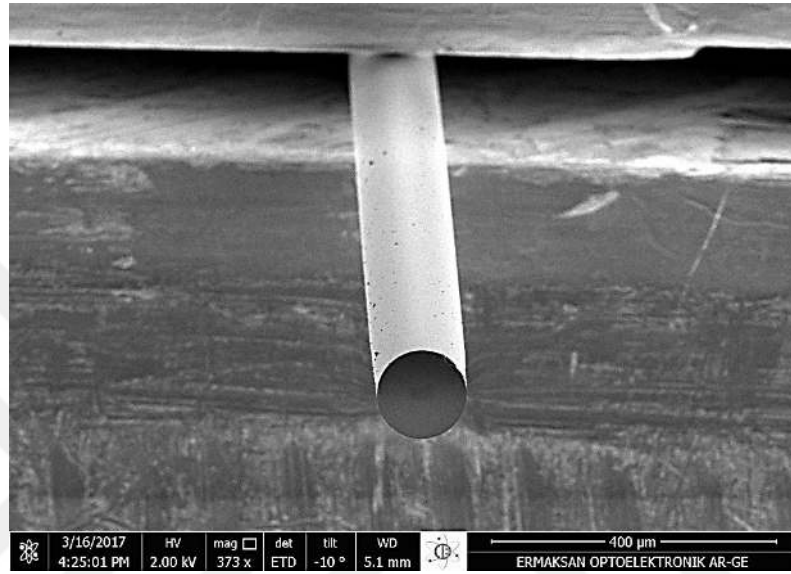


(b)

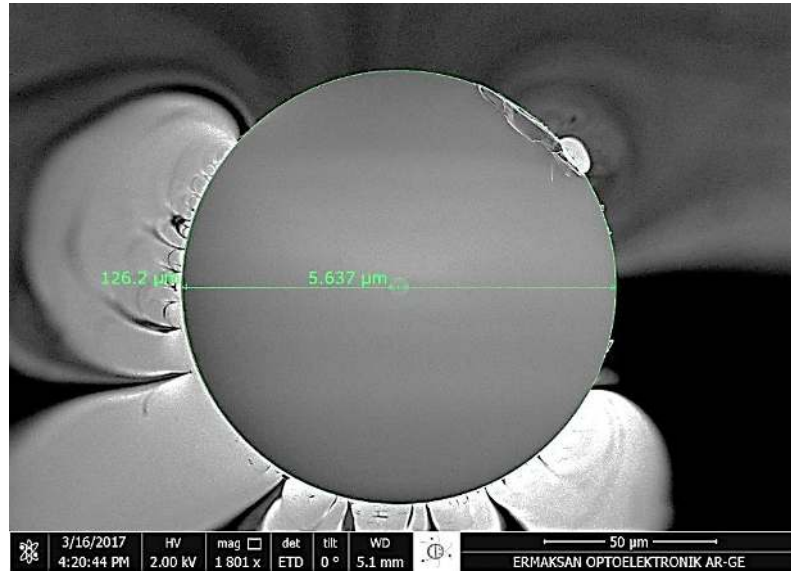
Şekil 3.4: (a,b) [4.2 /125] fiber optik kablo SEM görüntüleri

3.1.1.a. 6.4 / 125 Fiber

Sırasıyla 6.4/125 μm çekirdek kılıf çaplarına sahip olan ve 4.2 μm çekirdek çapına sahip fibere göre daha düşük Ge konsantrasyonuna sahip fiber optik kablunun taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınmış kesit görüntüsü Şekil 3.5.a'da ve gerçek çap ölçüm sonuçları (5.637 μm çekirdek, 126.2 μm kılıf) Şekil 3.5.b'de verildiği gibidir:



(a)

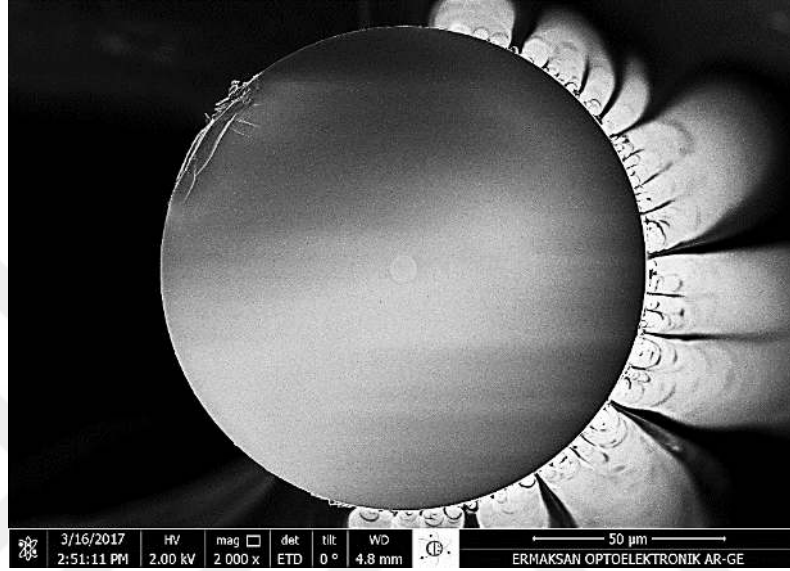


(b)

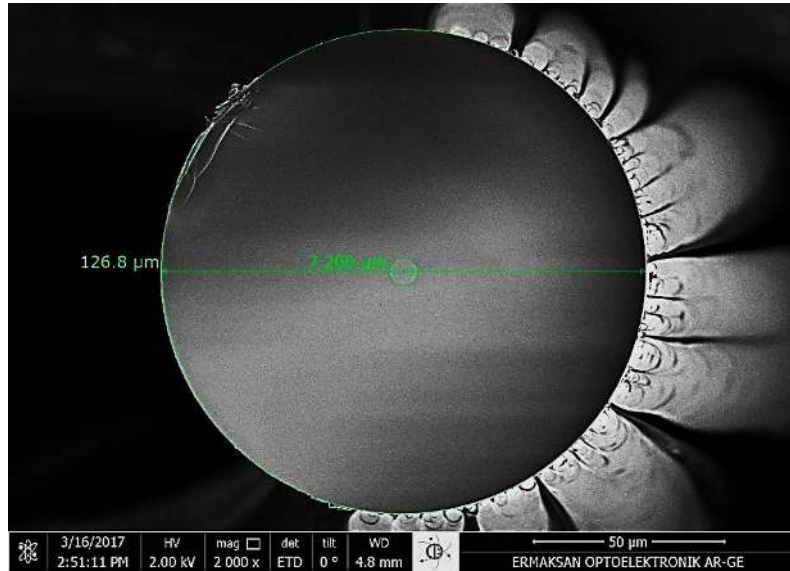
Şekil 3.5: (a,b) [6.4 /125] fiber optik kablo SEM görüntüleri

3.1.1.a. 7.8 / 125 Fiber

Sırasıyla 7.8/125 μm çekirdek kılıf çaplarına sahip 6.4 μm çekirdek çapına sahip olan fibere göre daha düşük Ge konsantrasyonuna sahip fiber optik kablunun elektron mikroskobu (SEM) ile alınmış kesit görüntüsü Şekil 3.6.a'da ve gerçek çap ölçüm sonuçları (7.200 μm çekirdek, 126.8 μm kılıf) Şekil 3.6.b'de verildiği gibidir:



(a)

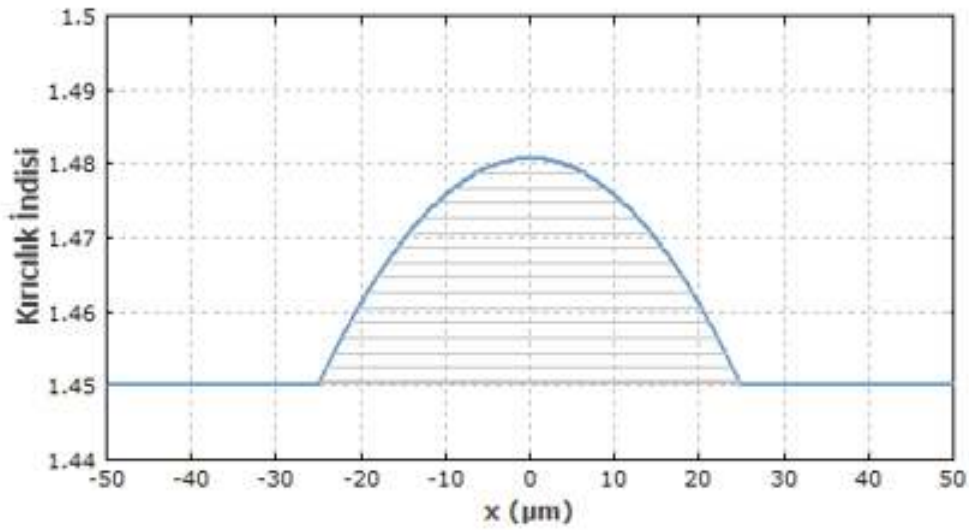


(b)

Şekil 3.6: (a,b) [7.8 /125] fiber optik kablo SEM görüntüleri

3.1.1.b. Dereceli indisli (graded-index) fiberler

Radyal pozisyonu boyunca devamlı olarak kırıcılık indis profili değişen kırıcılık indisine sahip fiberlerdir. Birçok çok mod'lu fiber basamak indisli fiberdir ki bu fiberlerin çekirdek ve kılıflarının kırıcılık indisleri arasında net bir sınır vardır fakat bazı fiberlerde vardır ki kırıcılık indis profili açısal mesafesi boyunca Şekil 3.7'de görüldüğü gibi çap mesafesi boyunca merkezde maksimum olacak şekilde düzgün bir şekilde artmaktadır [25].



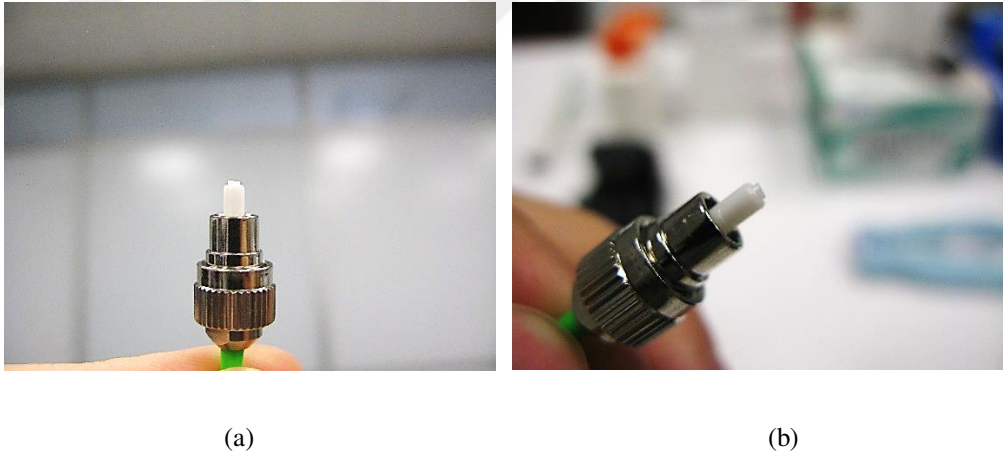
Şekil 3.7: Dereceli indisli fiber optik kablo kırıcılık indis profili

3.1.2. Ucu açılı işlenmiş konnektörlü fiber optik kablo

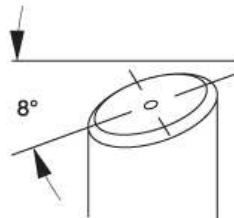
Konnektörlü fiber optik kablolar kaynaklandırma (splice) işlemleri sırasında kullanılan çıplak fiber optik kabloların aksine uç kısmında konnektör bulunan fiber optik kablolardır. Konnektörlü fiber optik kabloları lazer ışın kaynağının çıkışına takarak lazer kaynağında üretilen ışınları fiber optik kablo içerisinde taşıyabilir ve konnektörlü fiberden doğrudan çıkış alıp taşınan ışığı yönlendirebiliriz. Ayrıca başka bir konnektörlü fiber optik kablo ve iki tane konnektörlü fiberi birbirine bağlamayı sağlayan konnektör adaptörü kullanarak bir kablodan diğerine konnektörler vasıtasıyla ışınları aktarabiliriz. Bu özelliği sayesinde farklı özelliklere sahip fiber optik bileşenleri konnektörlü fiberlere sahip olmaları halinde bu şekilde birbirlerine bağlayabiliriz.

Konnektör tipleri kullanım amacına göre çeşitlilik göstermektedir. Genel olarak incelediğimizde FC (fiber konnektör - Fiber Connector), ST (vida dişli - Screw Thread), LC (ismini üretici firmadan almaktadır - Lucent Connector), SC (kare konnektör - Square Connector) yada özel konnektörler olarak sınıflandırılabilirler. Örneğin; LC tipi konnektörler aktif cihazların giriş ve çıkışlarında kullanılırken, FC tipi konnektörler vidalı yapısı sayesinde daha sağlam bağlantılar sunar ve titreşim ve benzeri etkilere karşı daha az hassastırlar.

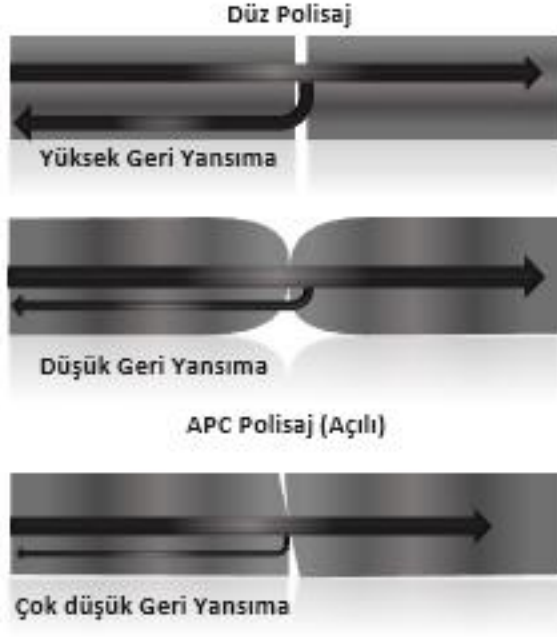
FBG sensör üretim ve karakterizasyon düzeneğinin kurulumunda FC/APC konnektörlü kablolar (patchcords) kullanılmıştır. Buradaki APC tabirinin açılımı “Angled Physical Contact” yani açılı fiziksel temas olmaktadır. APC olan haricinde PC yani ‘Physical Contact’ – düz fiziksel bağlantı çeşidine sahip konnektörler de bulunmaktadır. FC/APC tipi bir konnektörün APC bağlantı tipi konnektörlü fiberin ucunda bulunan ferrül (ferrule) olarak isimlendirilen seramik bloğun Şekil 3.8’deki gibi açılı olarak işlenmiş/polisaj yapılmış olduğunu belirtmektedir. Burada standart olarak Şekil 3.9’da görülen 8°’lik açı kullanılmaktadır [26].



Şekil 3.8: FC/APC konnektörü ve montaj yapılmış fiber optik kablo görseli



Şekil 3.9: FC/APC konnektörlü fiber optik kablo 8° açılı ferrül görseli [26]



Şekil 3.10: Farklı tiplerdeki polisajları olan konnektörlerin geri yansımada kıyaslamada görseli [26]

Şekil 3.10’da görüldüğü gibi FC/APC konnektörlü bir fiber optik kablo kullanılması-
nın sebebi, FC/APC konnektörün ucundaki açılı işlenmiş olan seramik bloğun açılı
yüzeyi sayesinde konnektörlerin bağlantı noktasında ışınların bir konnektörden
diğerine geçerken düz yüzeyin sebep olacağı geri yansımanın engellenmesidir [26].
Böylece yüzey açısının ışığı geriye değil, fiberin dışına doğru yansıtması ile geri
yansımadan kaynaklı spektrumda oluşabilecek sorunlar önlenmektedir.

3.1.3. Fiber optik izolatör

Fiber optik izolatörler lazer sinyalinin sadece tek yönlü olarak iletip ters yönde gelen
sinyali yada lazer ışınlarını bloke edip geçirmeyen optik pasif yapılardır. Şekil 3.11’de
görüldüğü gibi fiber optik izolatörlerin üzerinde sinyali ya da lazer ışınlarını geçirme
yönü bir ok ile gösterilmektedir. İzolatör bu yönlü ışınları/sinyali geçirirken ters yönde
gelen ışınları belirli ölçüde izole edebilmektedir.

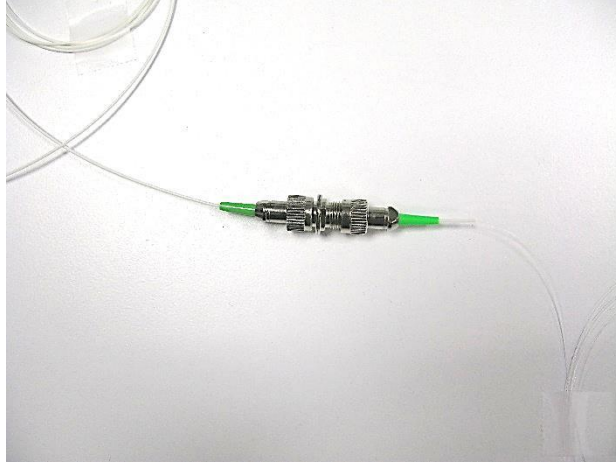


Şekil 3.11: Fiber optik izolatör yakın çekim görseli

Deney düzeneğinde fiber optik izolatör kullanılmasının sebebi de dördüncü bölümde ayrıntılı olarak anlatılacak olan karakterizasyon düzeneğinde sorgulayıcı ünite üzerinde dört farklı kanal bulundurduğu ve aynı zamanda bütün kanallarda sinyal üretildiği için iletim hattı tarafında bulunan konnektörlü fiber bağlantısında da lazer sinyali fiber optik kabloya iletileceği için diğer tarafta bu sinyalin spektrumunda bir etki oluşturması istenilmediğinden dolayı ok yönü iletim yönüne bakacak şekilde sisteme entegre edilir. İzolatörün izolasyon gücüne bağlı olarak yeterli olmadığı takdirde birden fazla izolatör art arda bağlanabilir.

3.1.4. FC/APC konnektör adaptörü

Konnektör adaptörü çok basit bir şekilde iki ayrı konnektörü birbirlerine bağlamak ve birinde taşınan ışınları/sinyali diğer konnektör üzerinden diğer hatta aktarmayı sağlayan adaptörlerdir (Şekil 3.12). Konnektör adaptörleri birbirine bağlanacak olan konnektörlü fiberlerin konnektör tiplerine göre farklılık göstermektedir. Eğer FC/PC tipinde konnektörler birbirlerine bağlanacaksa konnektör adaptörü de FC/PC konnektörlere uygun tipte adaptör olmalıdır. Eğer kullanılacak olan konnektörler FC/APC tipinde konnektörler olacaksa kullanılacak olan konnektör adaptörü yine bağlantı tipine uygun adaptör olmalıdır çünkü FC/APC tipi konnektörleri birbirine bağlayacak olan konnektör adaptörü konnektör uç kısımlarındaki açılı yüzeylerin birbirleri ile örtüşmelerini sağlayacak şekilde hizalamayı mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.12: Konnektörlü fiberlerin bağlandığı fiber konnektör adaptörü görseli

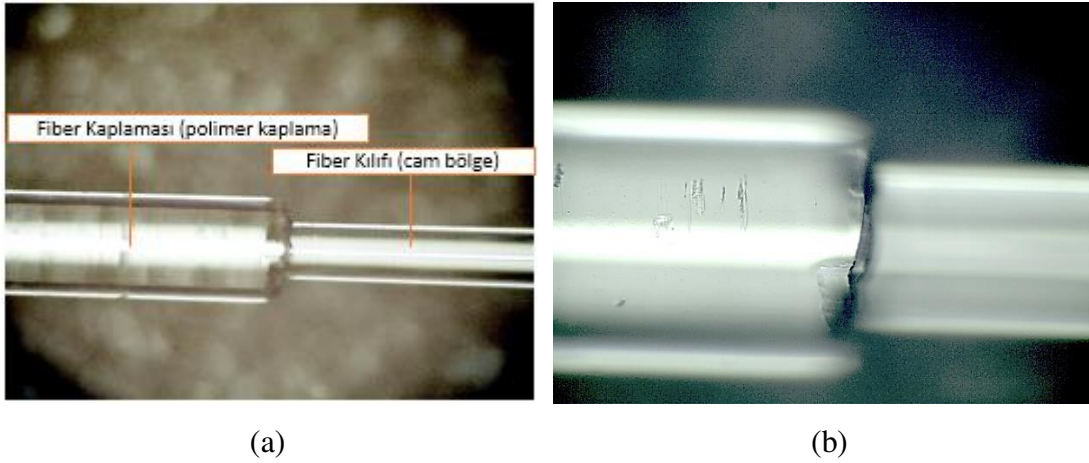
3.2. Yöntem

Bu bölümde deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan fiber soyma, temizleme, kesme, kaynaklandırma yöntemleri ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

3.2.1. Fiber soyma ve temizleme

FBG üretiminde ideal FBG sensörler elde edebilmek için fiberlerin hazırlanma adımları çok önemlidir. Fiber optik kablounun silika yüzeyinde hiçbir polimer kalıntısı kalmayacak şekilde temiz bir yüzey elde ederek kılıfından arındırılması (stripping) gerekmektedir (Şekil 3.13). FBG yapıları belirli uzunluktaki fiber optik kablounun belirli bir bölümünde oluşturulduğu için diğer fiber uygulamalarından farklı olarak fiberin uç kısmından değil “window stripping” olarak tabir edilen ve fiber optik kablounun orta kısmından belirli uzunlukta yapılan sıyırma işlemleri uygulanmaktadır.

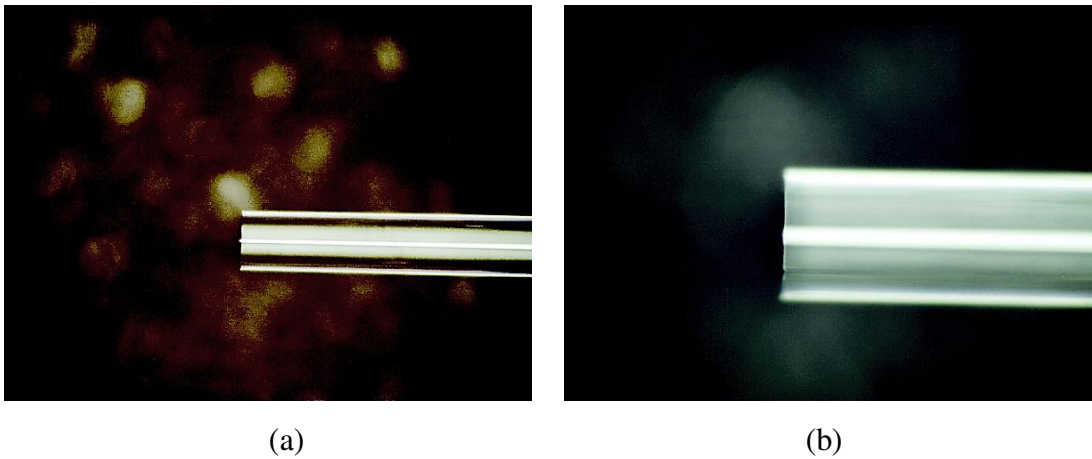
Fiber optik kablo soyma işlemlerinde kimyasal kullanılarak soyma işlemi, mekanik soyma gibi birçok yöntem kullanılmaktadır ve temizleme yöntemi olarak da ultrasonik temizleme ya da alkol varlığında silme işlemleri uygulanabilmektedir. Uygulanan yöntemlerin hassasiyeti sonuç uygulamada fiberin mukavemetini etkilediği için hassas olarak gerçekleştirilmelidir, aksi durumda fiber soyma ve temizleme adımları sırasında özensiz ve kontrolsüz yapılan işlemler fiber içerisinde mikro çatlak vb. yapılara sebep olabileceğinden özellikle gerinim sensörü vb. uygulamalarda fiberin dayanım noktasını sınırlandırmaktadır.



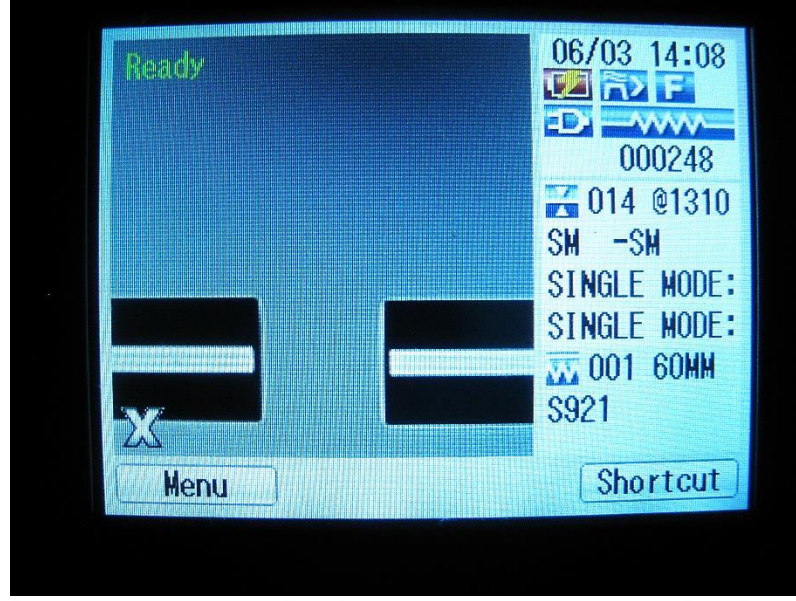
Şekil 3.13: Kılıfı sıyrılmış fiber optik kablo görseli; sırasıyla 10X (a) ve 20X (b) büyütme faktörü altındaki optik mikroskop görüntüsü

3.2.2. Fiber kesme

Fiber kesme işlemi FBG üretimini doğrudan etkilemese de FBG üretim ve karakterizasyon düzeneğinin kurulumundaki fiber bağlantı (kaynatma, splice) noktalarındaki kaynatma kalitesini ve sonuç sinyal kayıp değerini etkilediği için önemli bir adımdır. İdeal olarak 1°'nin altında kesim kalitesi elde etmek gerekmektedir. 125 μm kılıf çapına sahip kaplamasından arındırılmış bir fiber optik kablunun uç kısmının kesilmiş görüntüsünün sırasıyla 10X ve 20X büyütme faktörü altında optik mikroskop görüntüsü aşağıdaki gibidir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: Fiber optik kablunun uç kısmının kesiminin 10X (a) ve 20X (b) büyütme faktörü altındaki optik mikroskop görüntüsü



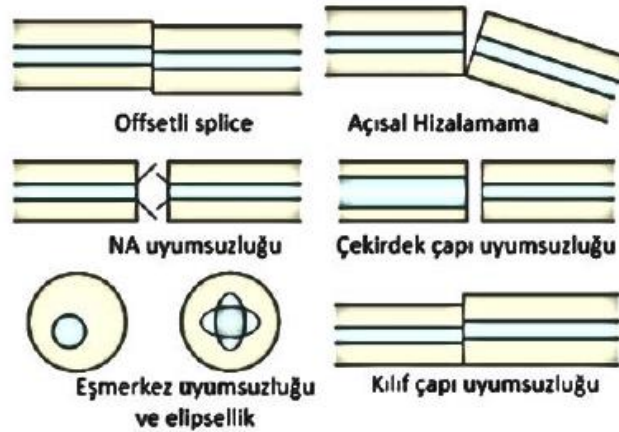
Şekil 3.15: Açılı kesilmiş bir fiber kablo (solda) ve ideal olarak düzgün kesilmiş bir fiber kablo (sağda)

İdeal olmayan ve ideal düzgünlükte kesilmiş fiber optik kablo örnekleri fiber kaynaklandırma cihazına yerleştirilmiş olarak Şekil 3.15'teki gibi görünmektedir.

3.2.3. Fiber kaynaklandırma

Fiber kaynaklandırma FBG karakterizasyon düzeneğinin oluşturulmasında önemli bir parametredir. Gerçekleştirilen kaynatma işleminin kalitesi spektrumdaki gürültü seviyesini ve salınımları doğrudan etkilemektedir.

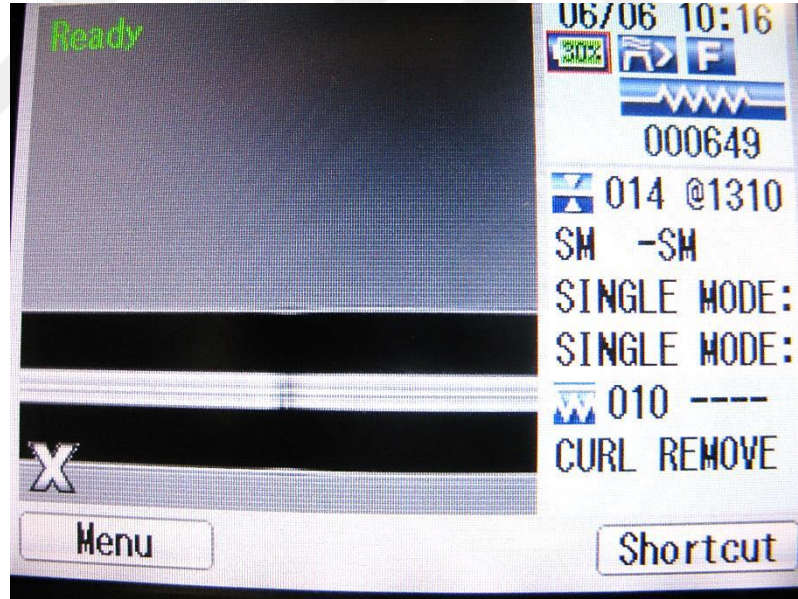
Fiber kaynatma noktalarındaki genel kayıp faktörleri Şekil 3.16'da verilmektedir [27]. Ayrıca Şekil 3.17'de ideal olarak kesilerek fiber kaynaklandırma cihazına yerleştirilmiş fiberlerin kaynaklandırma öncesi görüntüsü verilmektedir.



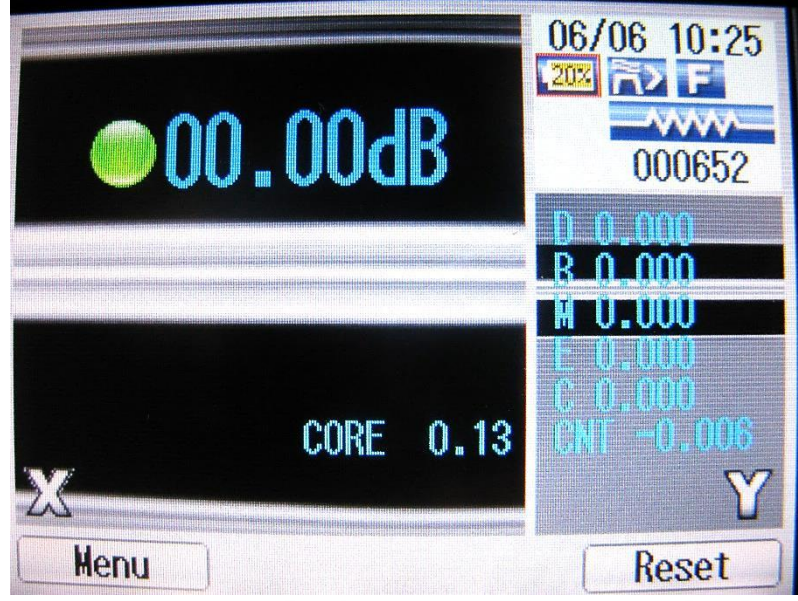
Şekil 3.16: Fiber kaynaklandırma uyumsuzlukları [27]



Şekil 3.17: Kaynatma (splice) öncesi düzgün olarak, sıfır derece (0°) ile, kesilmiş ve hizalanmış fiber kablolar



Şekil 3.18: İdeal olmayan kusurlu kaynatma (splice) sonucu



Şekil 3.19: İdeal kaynatma (splice) sonucu

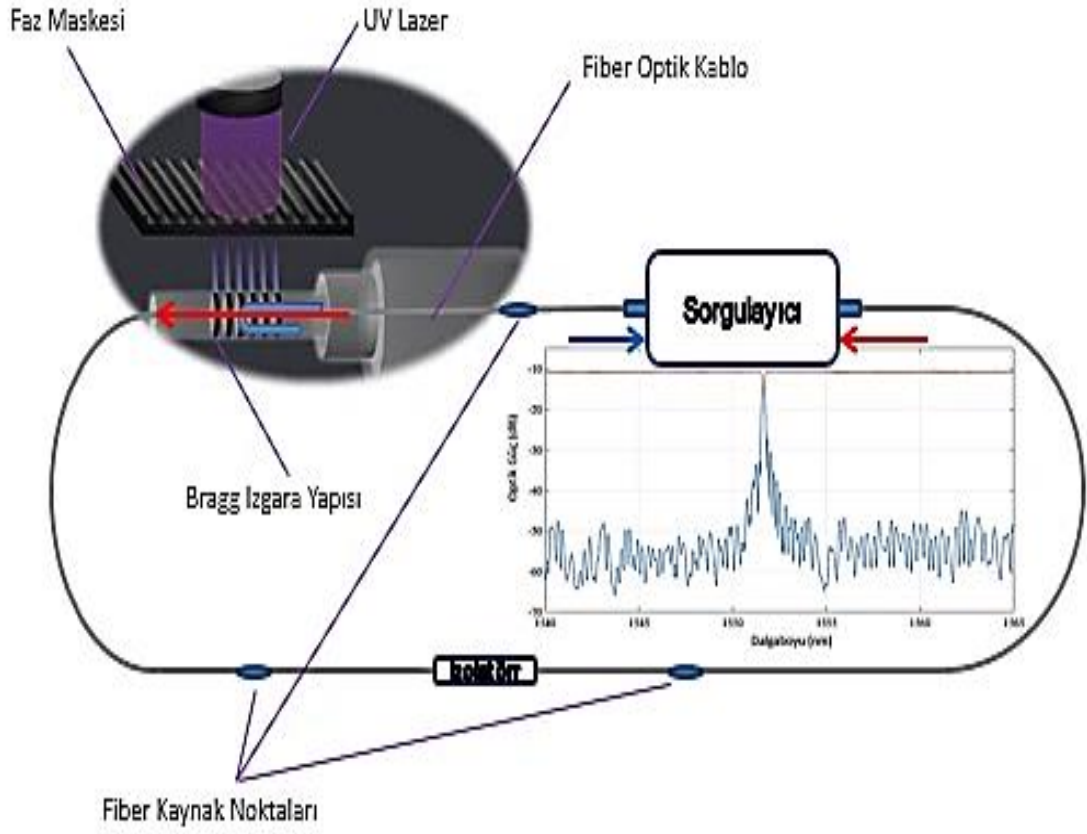
Şekil 3.19’da görüldüğü gibi Şekil 3.18’de verilenin aksine ideal olarak gerçekleştirilmiş olan bir fiber kaynaklandırma işleminde bağlantı bölgesinde hava boşluğu, kusur, aşırı sıcaklıktan incelme veya şişme, çekirdek ve/veya kılıf bölgelerinde eş merkezsizlik (örtüşmeme) gibi olumsuzluklar olmamalıdır. Kaynaklandırma işlemi sonrasında mümkün mertebe 00.00 dB kayıp değeri elde edilmeye çalışılıp Şekil 3.19’dakine benzer bütünleşik ve kusursuz fiber yapısı elde edilecek şekilde reçete parametreleri ayarlanmalıdır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

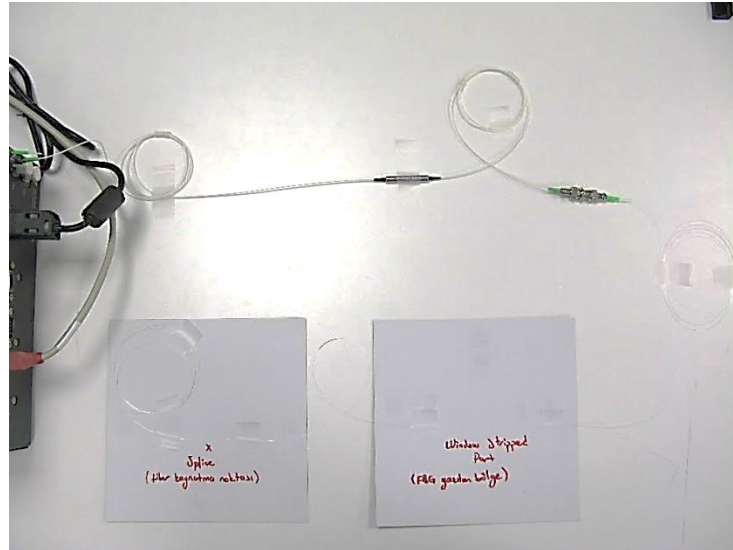
4.1. FBG Üretim ve Karakterizasyon Düzenekinin Kurulması

Deneyisel çalışmalar boyunca FBG sensör üretiminde farklı parametrelerin ve değişkenlerin etkilerinin incelenmesi amacıyla Şekil 4.1’de şematiği, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te fotoğrafı verilmiş olan üretim ve entegre karakterizasyon sistemi kurulmuştur. Bu sistemde yer alan elemanlar materyal bölümünde ayrıntılı olarak aktarılmış olmakla birlikte özetle FBG yapılarının fiber boyunca oluşturulmasını sağlayan bir UV lazer kaynağı, fiber üzerinde girişim oluşturmak üzere yerleştirilmiş ve istenilen dalga boyu vb. özellikleri sağlayacak şekilde tasarlanmış olan bir faz maskesi, fiberin düzgün ve gergin bir şekilde hizalanmasını sağlayan ve iki ucunda fiber tutucuları bulunan mekanik bir fikstür (mekanizma), içerisinde entegre bir lazer kaynağı bulunan ve iki kanalına bağlantı yapılan bir sorgulayıcı (interrogator) kullanılmıştır. Ayrıca iletim tarafında kırmızı ok ile gösterilen yönde sorgulayıcı üniteye bağlı olan konnektörlü fiberden de yansıma tarafındaki gibi bir lazer sinyal çıkışı alındığı için ve bu bağlantı noktasından mavi ok yönünde yansıma bölgesine bu lazer ışının ilerlemesi istenmediği için ışığın sadece tek yönde geçişine müsaade eden fiber optik izolatör yapıları kullanılmıştır.

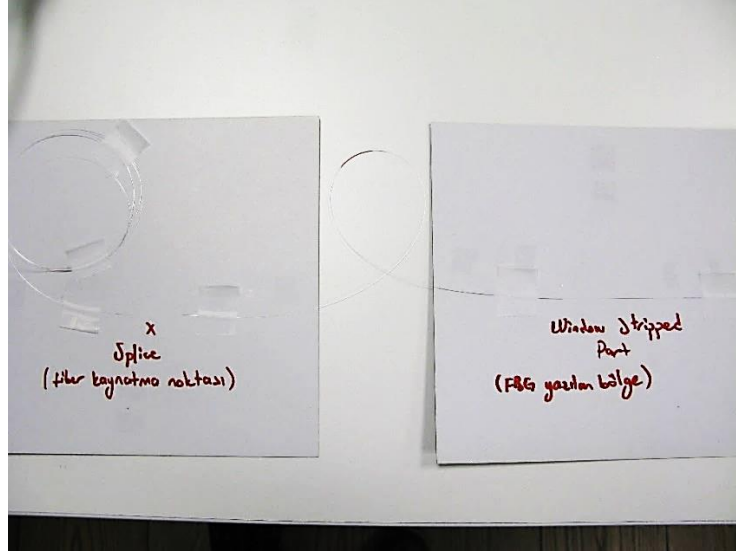
Deneyisel çalışmalar sırasında kaplamasından arındırılıp temizlendikten sonra FBG yazımı için düzeneğe yerleştirilen farklı Ge katkı oranında (farklı çekirdek çaplarına sahip) fiber optik kablolar uçlarından biri sorgulayıcının yansıma (reflection) bacağına bağlı olan konnektörlü fiberin boş ucuna, diğer ucuda iletim (transmission) tarafındaki izolatörün boş ucuna kaynaklandırılır (splice). İzolatörün diğer fiber ucu da sorgulayıcı ünitenin iletim tarafında bağlı olan konnektörlü fiberin boştaki ucuna kaynaklandırılır ve böylece sistem kurulmuş olur.



Şekil 4.1: FBG üretim ve karakterizasyon sistem şematiği



Şekil 4.2: Gerçek karakterizasyon düzeneği görseli



Şekil 4.3: Gerçek karakterizasyon düzeneği yakın görüntüsü

4.2. Değişken Parametrelerin İrdelenmesi

Deneyisel çalışmalar süresince farklı Ge katkıları ve dolayısıyla farklı çekirdek çaplarına (4.2, 6.4 ve 7.8 μm) sahip üç farklı fiber optik kablo kullanılarak bu fiber optik kablolarla eşit uzunlukta, eşit enerjide, eşit sayıda UV lazer atımları yapılarak her bir fiberin bu atımlara bağlı olarak iletim ve yansıma spektrumlarındaki değişimler gözlemlenmiş ve herbirinin 250 birimlik lazer atımlarına maruz kaldıklarındaki yansıtıcılık oranlarının ne şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte farklı çaplardaki bu FBG'ler ile üretilmiş olan birbirine yakın yansıtıcılık oranlarına sahip sensörlerin eşit gerinim kuvvetleri altında çap farklılıklarına bağlı olarak dalga boyu kayma miktarlarında yani hassasiyetlerinde bir farklılık olup olmadığı incelenmiştir. Yine bu çalışmalar süresince tek bir tip fiber optik kablo üzerinde oluşturulmuş iki farklı dalga boyundaki FBG sensörlerin bu dalga boyu farklılıklarına bağlı olarak eşit gerinim kuvvetleri altında verdikleri cevaplarda bir farklılık olup olmadığı incelenmiş ve bu denemelerin tekrar edilebilirliklerini irdelemek adına 3 farklı tipteki fiber optik kabloların her biri için bu çalışmalar yinelenmiştir. Devam eden süreçte irdelenen parametrelere ek olarak yine tek tip bir fiber optik kabloda ~%50 ve ~%90 yansıtıcılık oranlarına sahip FBG yapıları oluşturularak ayrı ayrı bu fiberlere eşit gerinim kuvvetleri yine eşit aralıklarla arttırılarak uygulandığında farklı yansıtma oranlarının sensör tepkilerine bir etkisi olup olmadığı, düşük yansıtıcılı mı yoksa yüksek yansıtıcılı FBG sensörlerin mi daha iyi olduğunu anlamak adına çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yine bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçların rastlantı mı

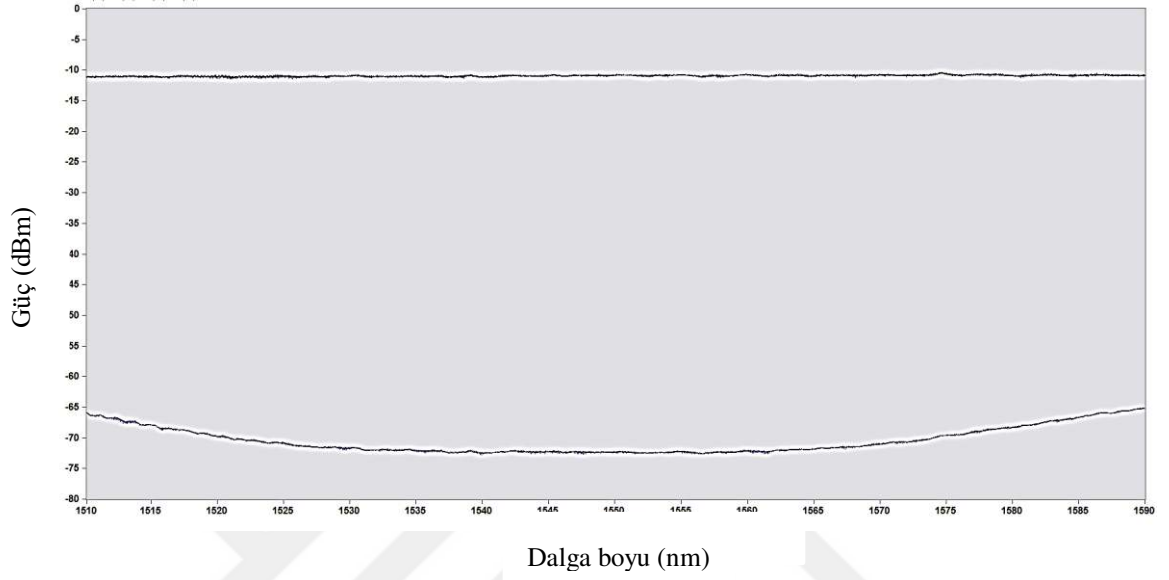
yoksa tekrar edilebilir mi olduğunu anlamak adına yine mevcut olan üç farklı fiber optik kablo tipi için çalışmalar yinelenmiştir. Ayrıca FBG sensör üretim ve karakterizasyon sisteminin kurulumu sırasında kullanılan üç farklı tipteki fiber optik kablunun sistemin kurulumu sırasındaki bağlantı noktalarında meydana gelen kayıp değerlerine bağlı olarak sistemin ölçüm hassasiyetine ne şekilde etki ettiği değerlendirilmiştir.

Bu amaçla öncelikle 3 farklı fiber de ayrı ayrı hazırlanıp her birine sırasıyla eşit sayıda (250 atım), eşit enerjide UV lazer atımları gerçekleştirilmiş ve hem Şekil 4.4 (a), Şekil 4.5 (a), Şekil 4.6 (a), Şekil 4.7 (a), Şekil 4.8 (a) ve Şekil 4.9 (a)'daki temel durumdaki spektrumları, hemde 250 atım sonraki Şekil 4.4 (b), Şekil 4.5 (b), Şekil 4.6 (b), Şekil 4.7 (b), Şekil 4.8 (b) ve Şekil 4.9 (b)'deki yansıma ve iletim eğrilerindeki değişimler sorgulayıcı cihazının kendi arayüzü ile incelenmiştir. Spektrum görüntülerindeki üst kısımda yer alan siyah (lineer skalada- turuncu) hat iletim spektrumunu, alt kısımdaki mavi hat ise yansıma spektrumunu göstermektedir. Burada belirtmelidir ki Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da 7.8/125 fiber optik kablo için verilen grafikler ikinci 250 atım yani 500 atım için verilmiştir. Bunun sebebi ilk 250 atımda gürültü seviyesini aşan bir pik elde edilemediği için yansıtıcılık oranı ölçülememiştir. Bu sonuç bile başlı başına bu fiberin diğerlerine göre ışığa duyarlılığının az olduğunu ispatıdır. Ayrıca yine bu grafikler dB yani logaritmik skaladaki sonuçları verdiği için gürültüler çok net olarak görülmekte ve asıl spektrumu incelemeyi zorlaştırmaktadır. Merkez dalga boyuna bağlı spektrumu daha net olarak görebilmek için Denklem (4.1)'deki dönüşüm kullanılarak ölçüm dataları dB skalasından lineer (mW) skalasına dönüşüm yapılarak MATLAB ile çizilmiş ve gürültüler baskılanarak daha net bir analiz imkanı elde edilmiştir:

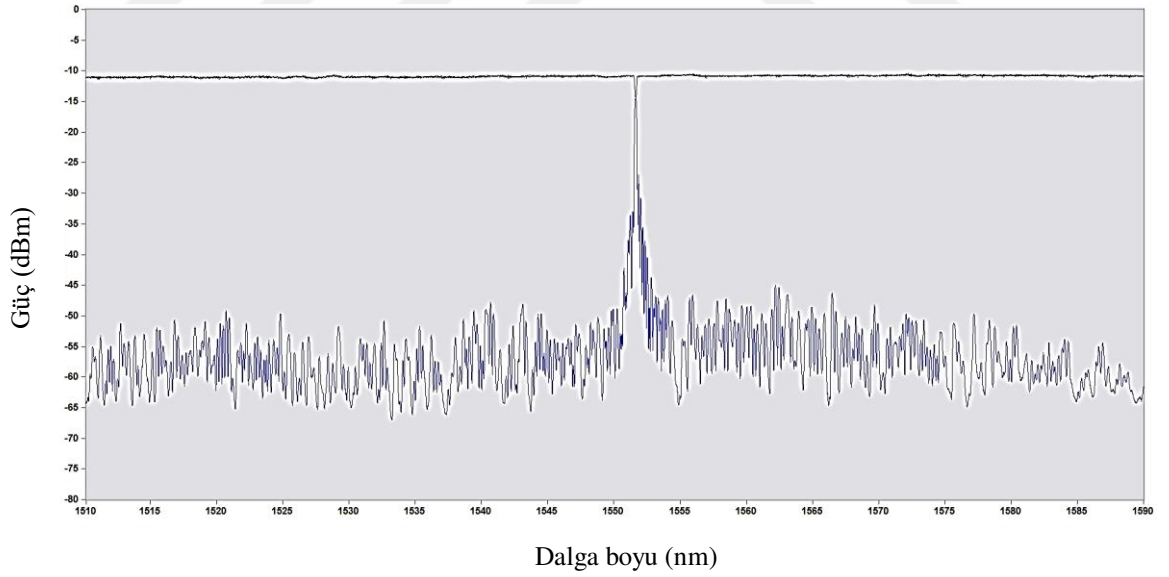
$$x \text{ (mW)} = 10^{(y(\text{dB}) / 10)} \quad (4.1)$$

4.2.1. Fiber çaplarının ışığa duyarlılıklara etkisinin incelenmesi

4.2.1.1. [4.2/125] çaplarındaki fiber optik kablo ile ilk atış denemesi

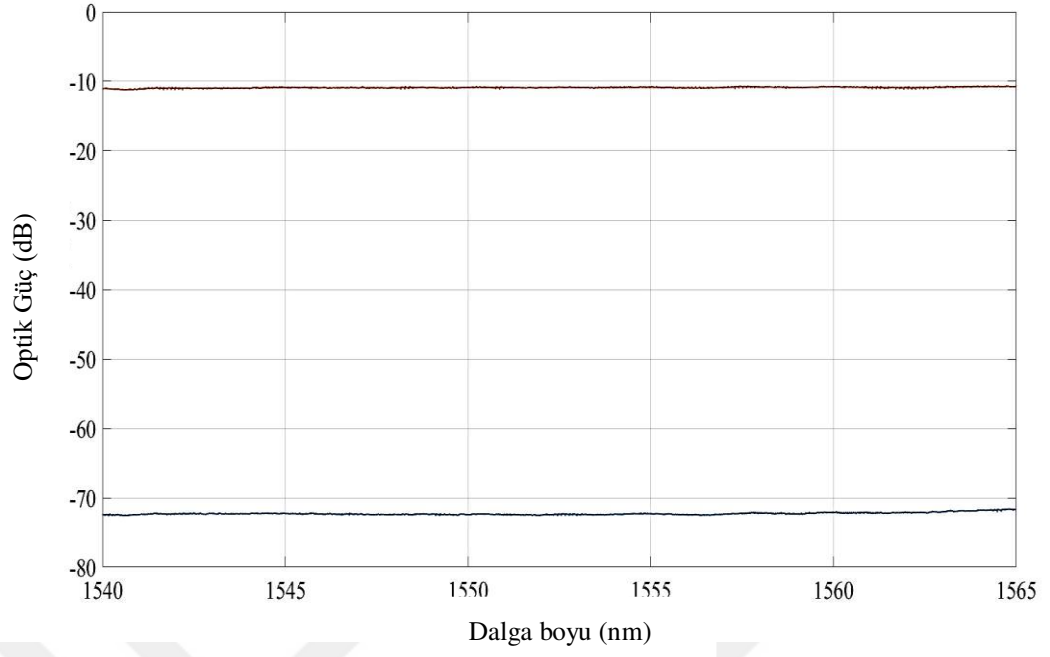


(a)

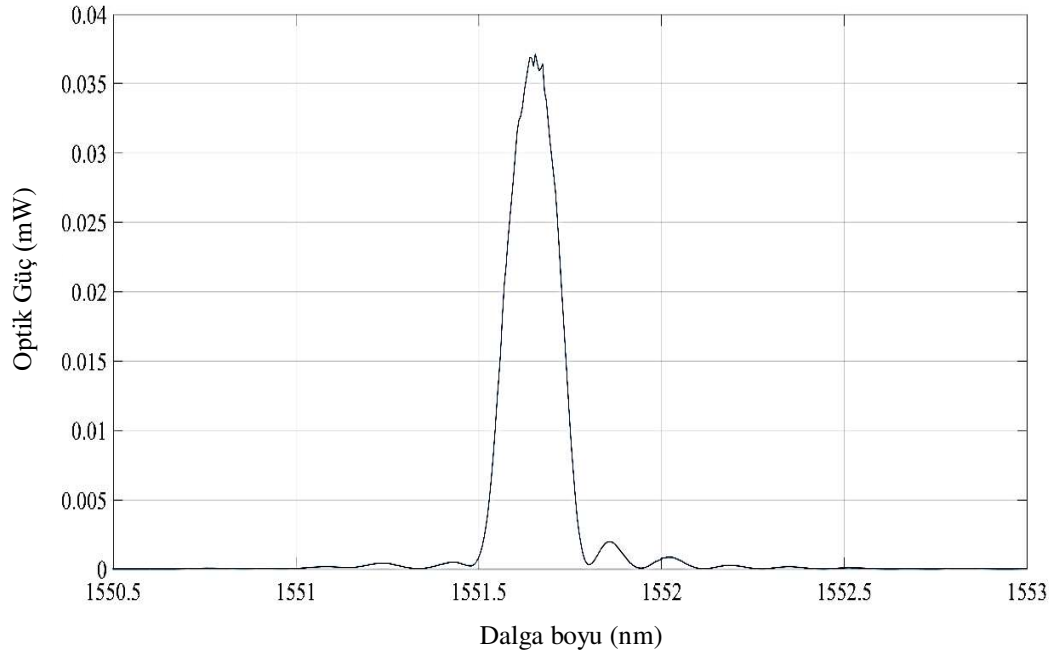


(b)

Şekil 4.4: (a) (4.2/125) μm fiber ile yapılan denemede logaritmik skaladaki (dB) temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum



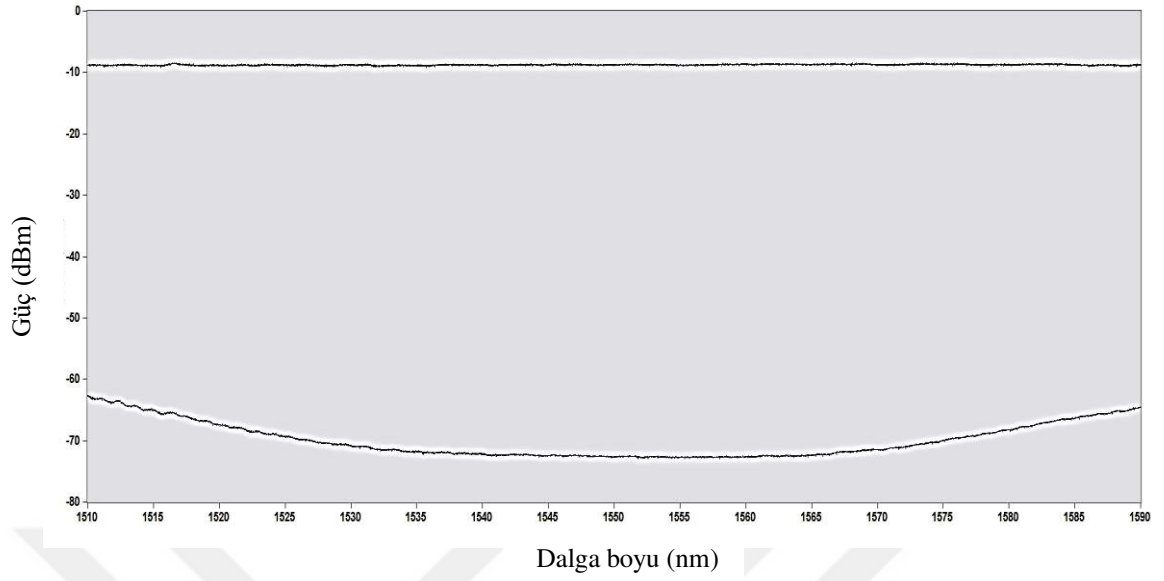
(a)



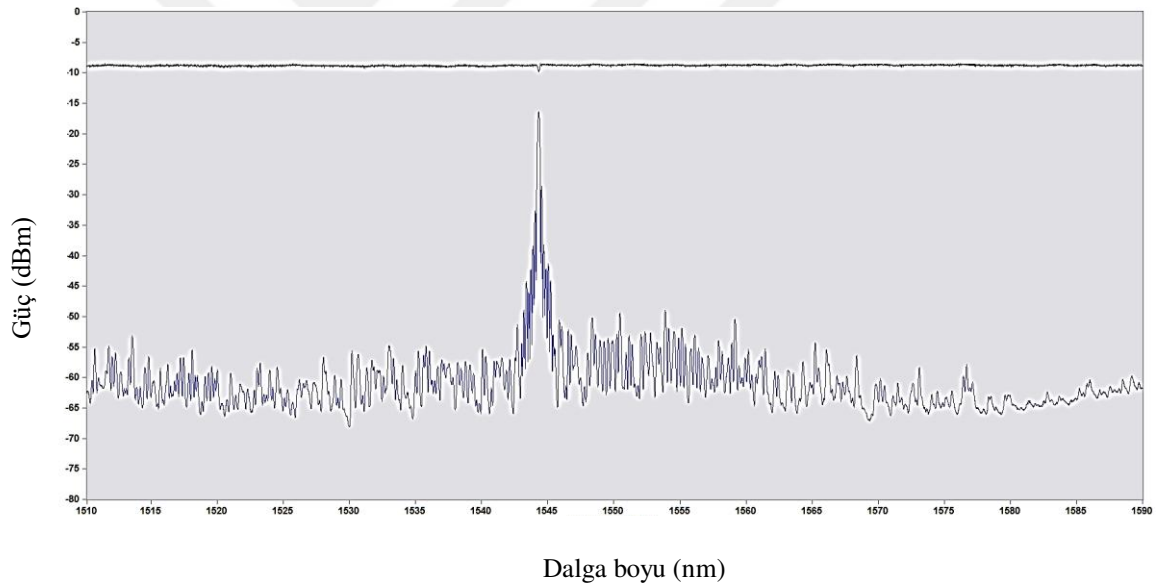
(b)

Şekil 4.5. (a) (4.2/125) μm fiber ile yapılan denemede lineer (mW) skaladaki temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum

4.2.1.2. [6.4/125] çaplarındaki fiber optik kablo ile ilk atış denemesi

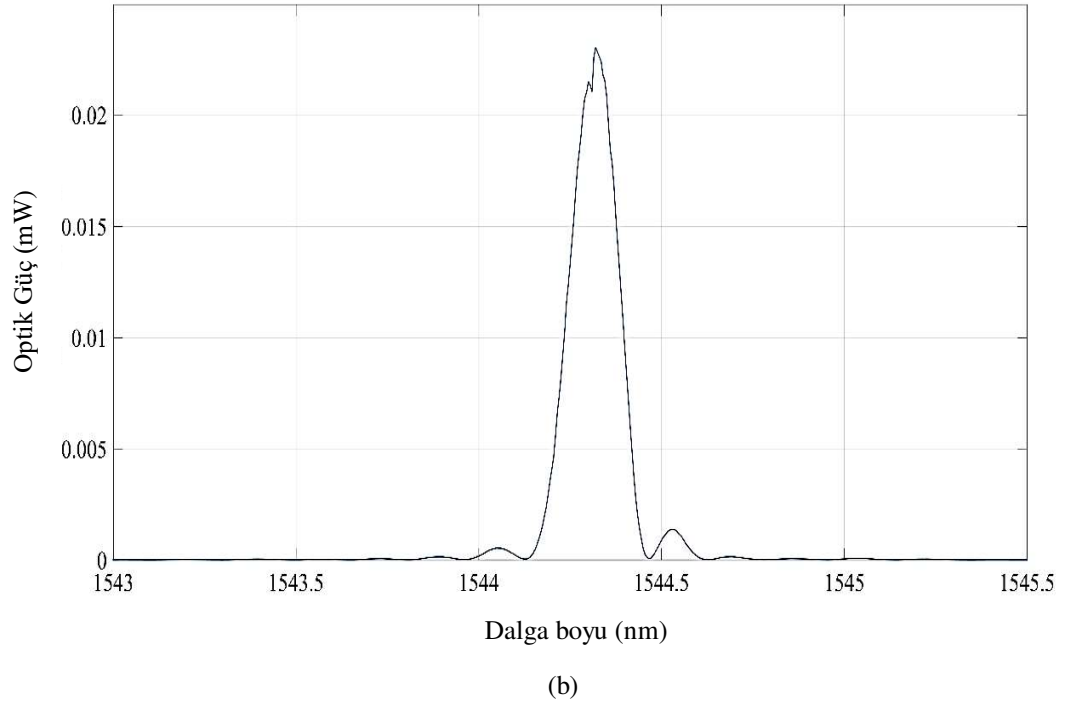
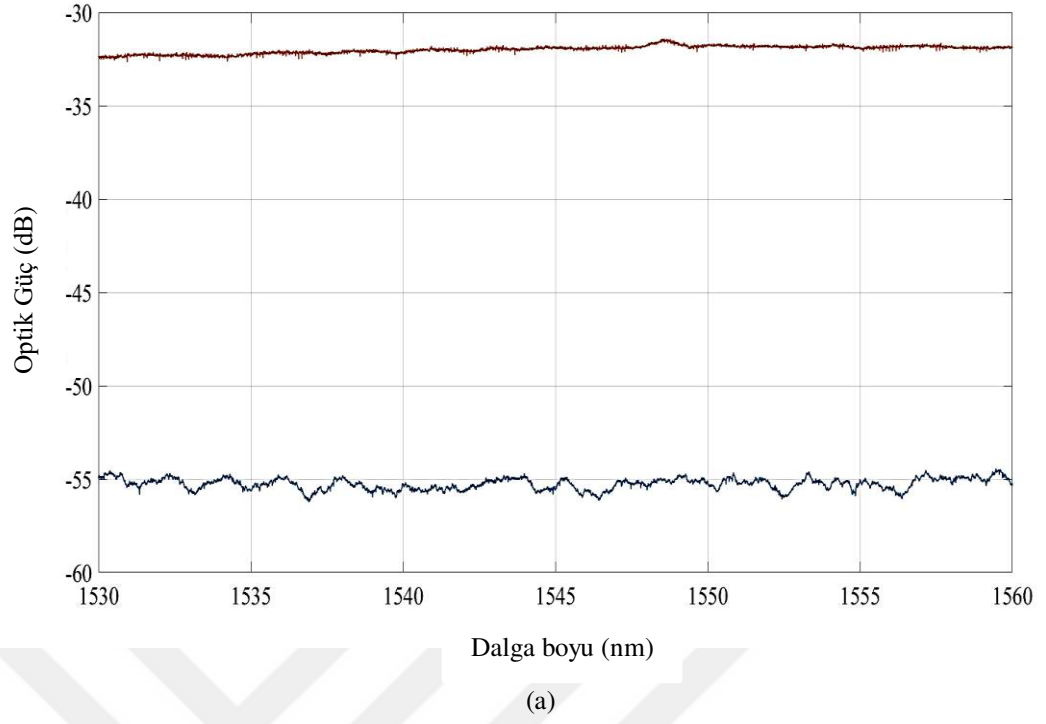


(a)



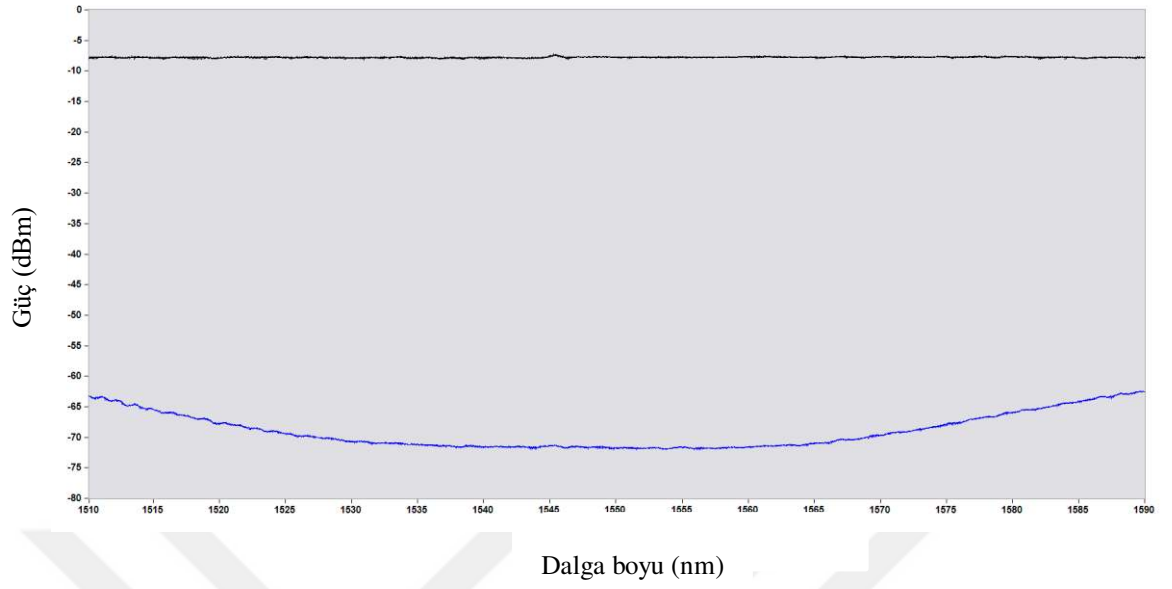
(b)

şekil 4.6: (a) (6.4/125) μm fiber ile yapılan denemede logaritmik skaladaki (dB) temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum

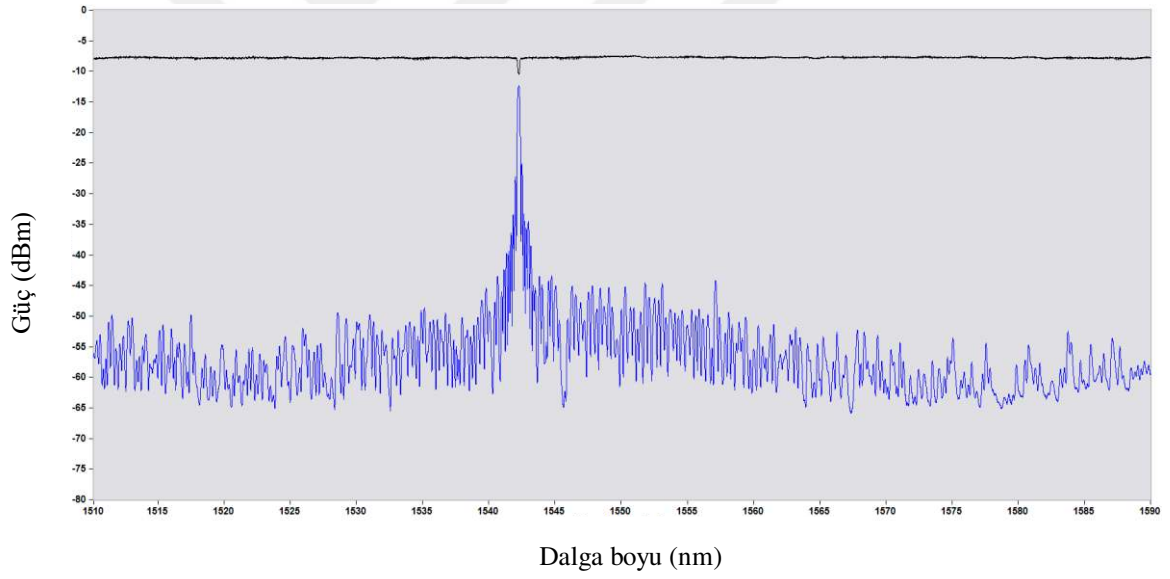


Şekil 4.7: (a) (6.4/125) μm fiber ile yapılan denemede lineer (mW) skaladaki temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 250 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum

4.2.1.3. [7.8/125] çaplarındaki fiber optik kablo ile ilk atış denemesi

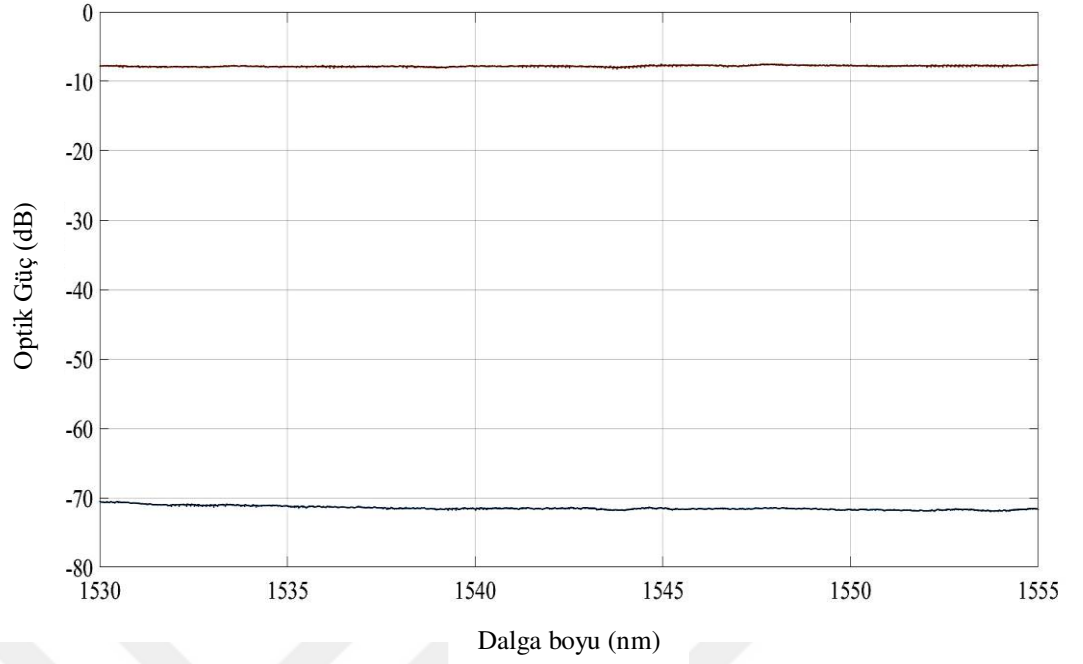


(a)

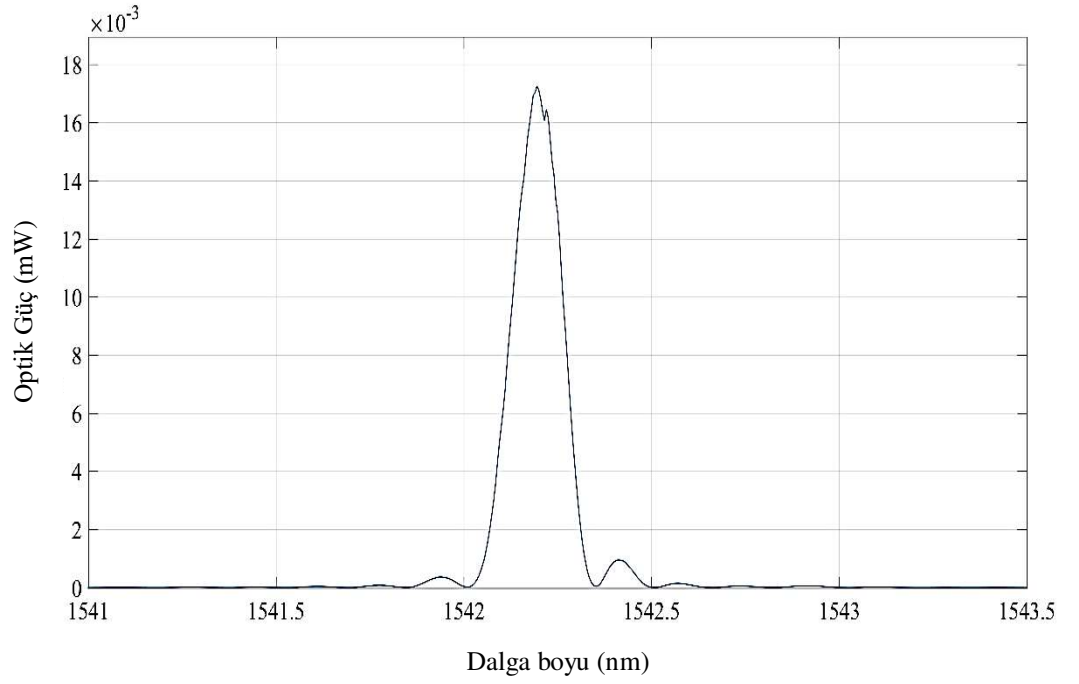


(b)

şekil 4.8: (a) (7.8/125) m fiber ile yapılan denemede logaritmik skaladaki (dB) temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 500 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum



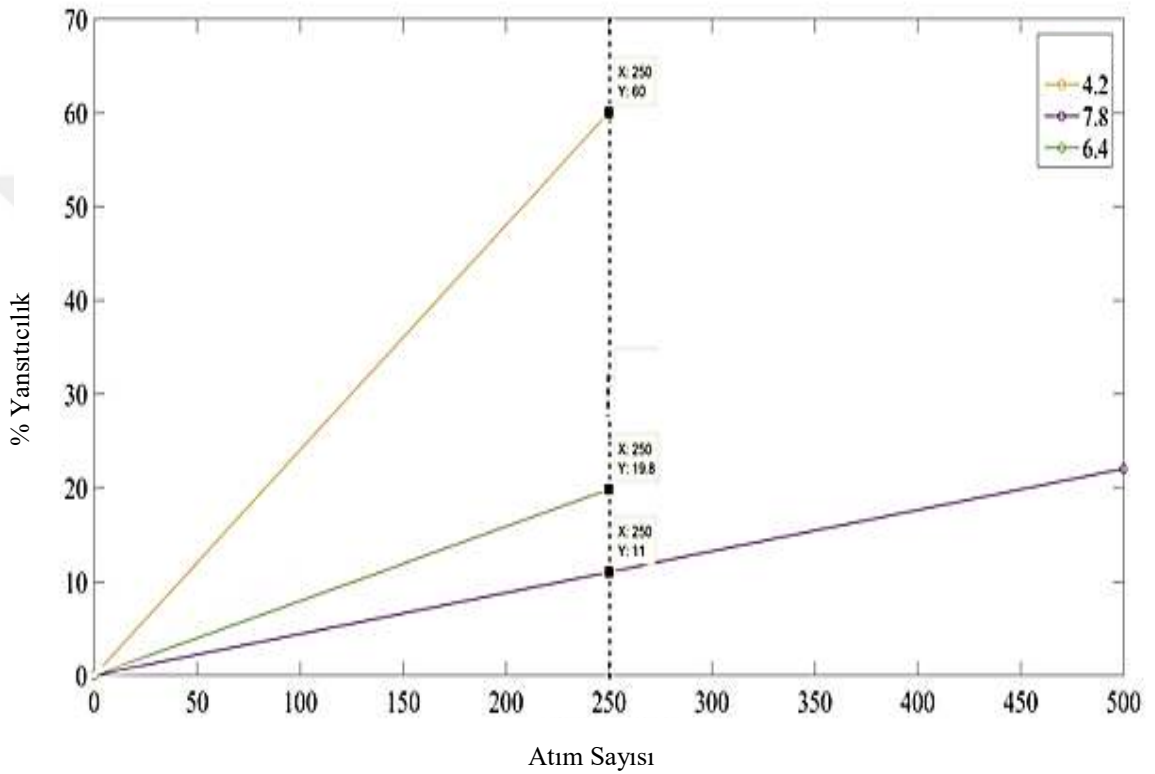
(a)



(b)

Şekil 4.9: (a) (7.8/125) μm fiber ile yapılan denemede lineer (mW) skaladaki temel (base) spektrum görüntüsü ve (b) 500 atımlık ilk atış sonucu elde edilen spektrum

Sonuç olarak elde edilmiş olan veriler tek bir grafikte toplandığında Şekil 4.10'daki sonuç elde edilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere referanstaki çalışmada belirtildiği gibi Ge katkısı yüksek olan ve dolayısıyla küçük çekirdek çapına sahip olan 4.2 μm 'luk fiber eşit sayıdaki ilk lazer atımlarında en yüksek yansıtma oranına sahip FBG sensör olmuştur ve bu fiber optik kabloyu sırasıyla 6.4 μm ve 7.8 μm çekirdek çaplarına sahip fiber optik kablolar izlemiştir. Bu çalışma ile çap/konsantrasyon farklılığına bağlı olarak gerçekleşen ışığa duyarlılığın nasıl değiştiği değerlerle gösterilmiştir [28].

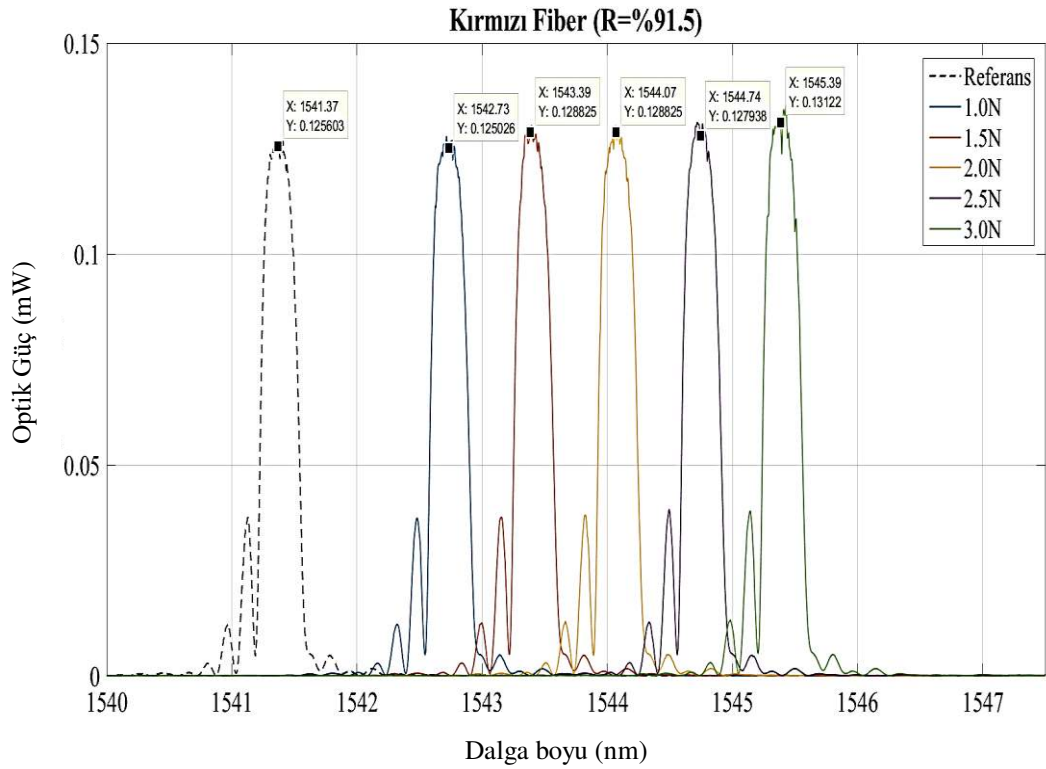


Şekil 4.10: Üç farklı Ge katkısına sahip fiberin ilk atış sonuçlarına bağlı olarak yansıtma değerleri

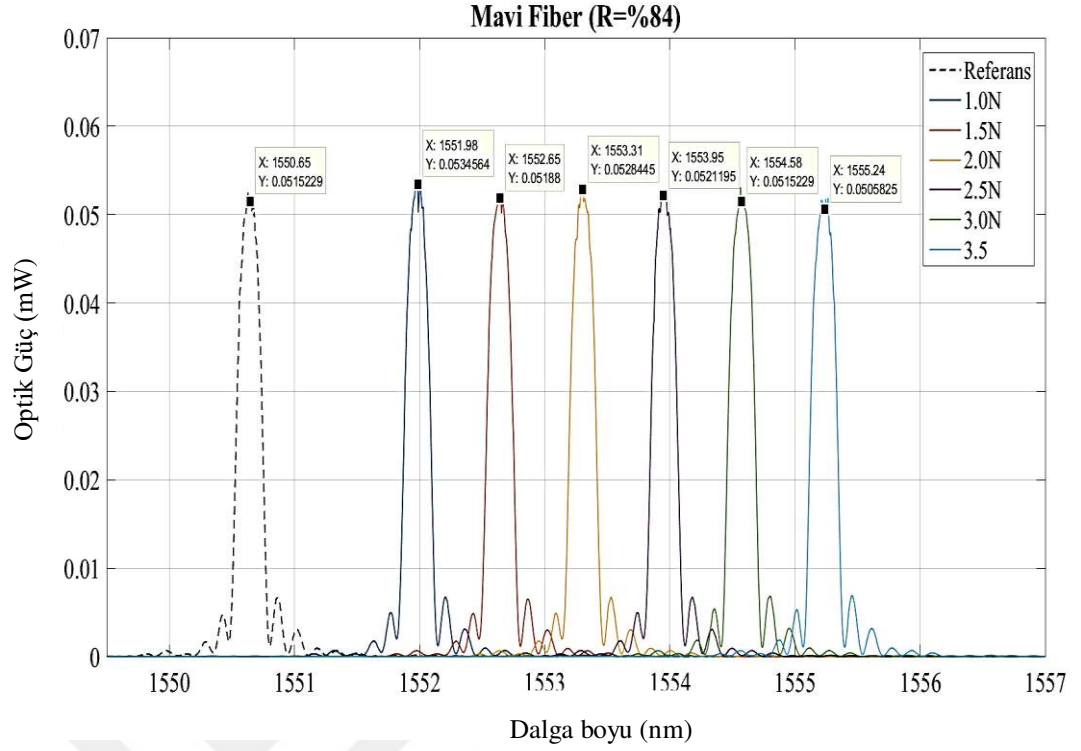
4.2.2. Üç farklı çapta fiber optik kablodan üretilmiş FBG sensörlerin karakteristiklerinin incelenmesi

Bu bölümde farklı çekirdek çaplarına sahip fiberlerden üretilmiş FBG sensörlerin çekirdek çaplarının farklılığının hassasiyete yani gerinim kuvvetlerine karşı verdikleri tepkilere (dalga boyu kayması) etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. Bu amaçla önce 0 (sıfır) gerinime yakın fakat fiberin tamamen düz olduğundan emin olunacak bir gerginlik değerinde 0.5 N (Newton)'da FBG yazımı yapıldı ve sonrasında fiber optik kablo serbest bırakılmış ve bu durumda yansıma (reflection) spektrumunda verdiği merkez dalga boyu kaydedilerek referans merkez dalga boyu elde edilmiştir. Daha

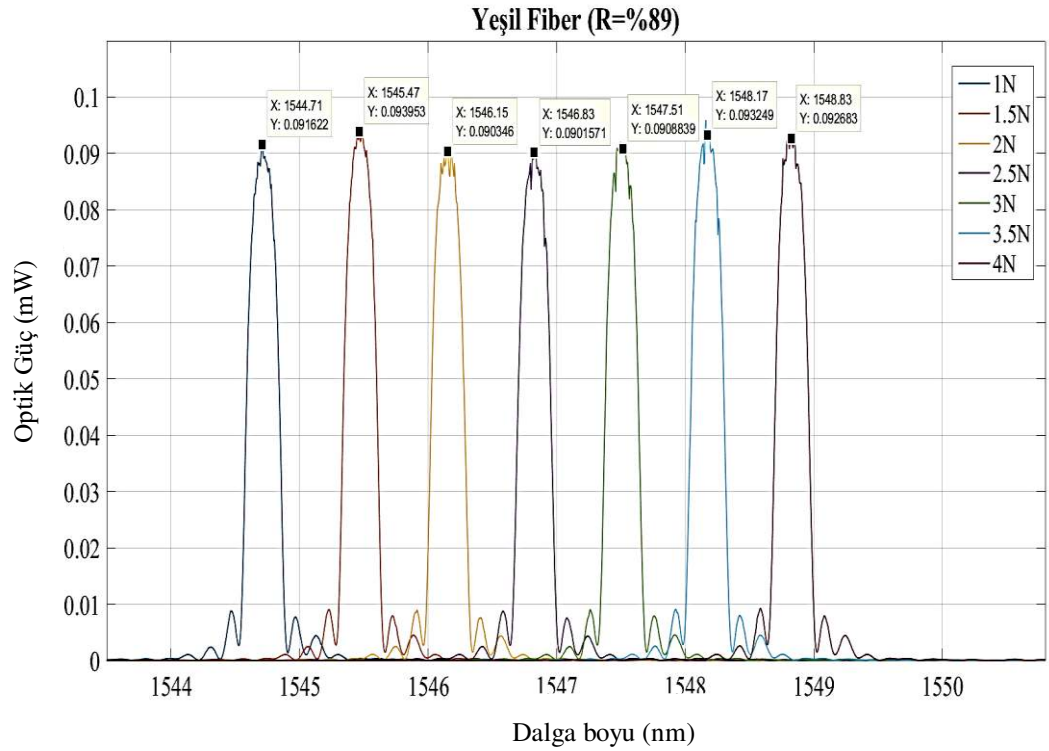
sonrasında 0.5 N'luk eşit artışlarla 4 N'a kadar gerinim kuvvetleri arttırılmış ve artışa bağlı dalga boyu kaymaları gözlemlenmiştir (Şekil 4.11, 4.12, 4.13). Yapılan bu işlemler 3 farklı fiber içinde ayrı ayrı uygulanmış ve her biri için elde edilen referans dalga boyuna bağlı olarak eşit aralıklarla uygulanmış gerinim kuvvetleri altında dalga boylarındaki kayma miktarları kıyaslanmıştır. Grafik başlıklarında yazılı olan kırmızı, mavi ve yeşil fiberler sırasıyla 7.8/125, 4.2/125, 6.4/125 fiberleri temsil etmektedir. Deneylerin tamamında ayrı ayrı kendi makaralarından kesildikten sonra dışarıdan bakıldığında bu fiberlerin arasında bir fark olmadığı ve birbirinden ayırt edilemeyeceği için denemeler sırasında karışmalarını önlemek adına birer metre olarak makaralardan kesilen bu fiberlerin uç kısımları kırmızı, yeşil ve mavi renklerde belirli uzunluklarda boyanmıştır. Farklı çekirdek çaplarına sahip üç fiber için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:



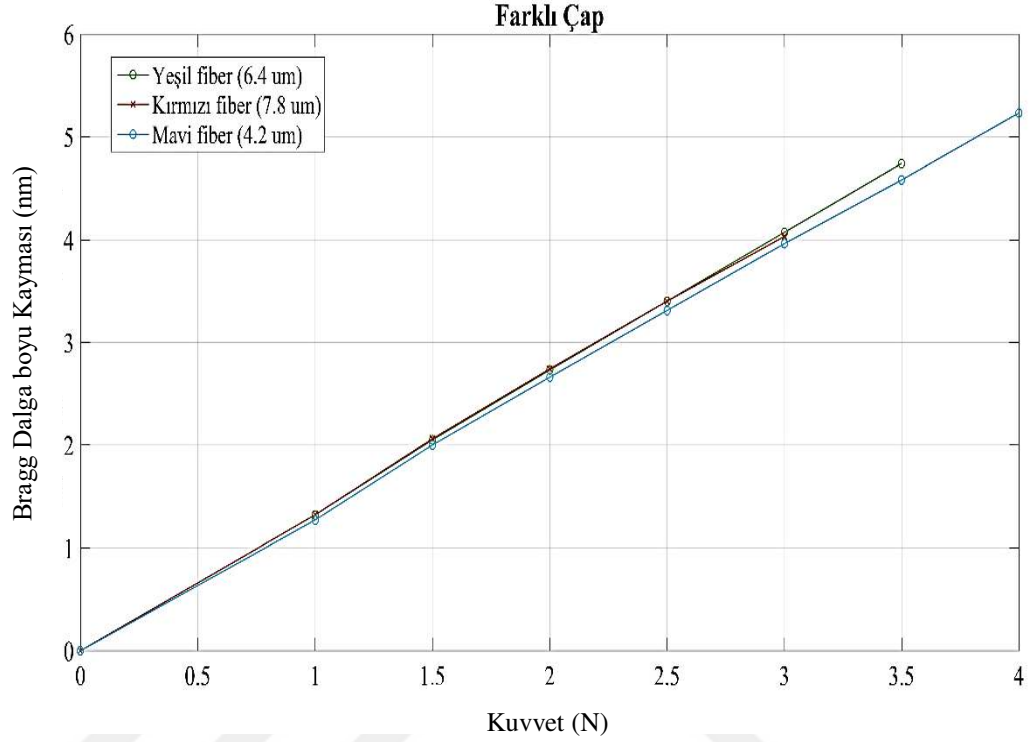
Şekil 4.11: Kırmızı (7.8/125) fiber optik kablo ile üretilmiş %91.5 yansıtıcılık oranına sahip FBG sensörün sabit gerinimler altındaki dalga boyu kayması



Şekil 4.12: Mavi (4.2/125) fiber optik kablo ile üretilmiş %84 yansıtıcılık oranına sahip FBG sensörün sabit gerinimler altındaki dalga boyu kayması



Şekil 4.13: Yeşil (6.4/125) fiber optik kablo ile üretilmiş %89 yansıtıcılık oranına sahip FBG sensörün sabit gerinimler altındaki dalga boyu kayması



Şekil 4.14: Farklı çaptaki 3 fiber optik kablonun belirli gerinim kuvvetleri altındaki davranışları. Gerinim–dalga boyu grafikleri eğim kıyaslaması

Yapılan bu ilk denemede ve tekrar edilebilirliğin incelendiği sonraki denemelerde gerinime bağlı dalga boyu kayma miktarlarının eğim değerleri Çizelge 1’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Denemeler sırasında sadece fiber çaplarının farklılığını irdeleyebilmek için mümkün olduğunca eşit yansıtıcılıklara sahip FBG’ler üzerinden kıyaslamalar yapılmıştır. Ayrıca grafiklerde verilmiş olan maksimum gerinim değerlerinin 3 N, 3.5 N ve 4 N gibi değişmesinin sebebi verilen en son değere kadar fiberlerin dayanması fakat üst değere çıkılırken (maksimum denenen değer 4 N’dur) gerinime dayanamayıp fiberin FBG yazılan bölgesinden kopmasından dolayı ölçüm alınamamasıdır. Burada elde edilen sonuçlara göre her ne kadar fiber mukavemetleri ile çekirdek çapları arasında bir ilişki varmış gibi görünse de sonraki denemelerde bu değerlerin de değiştiği ve tamamen fiber hazırlama prosedürlerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 1: Farklı çekirdek çaplarına sahip fiberlerden üretilmiş FBG sensörlerin gerinim hassasiyetlerinin kıyaslanması

Fiber Tipi	Yansıtıcılık Değeri	Eğim (Hassasiyet)
Mavi Boyalı (4.2/125)	%84	$y = 1,309x + 0,019754$
Yeşil Boyalı (6.4/125)	%89	$y = 1,3737x + 0,022456$
Kırmızı Boyalı (7.8/125)	%91.5	$y = 1,3414x + 0,0092857$
Mavi Boyalı (4.2/125)	% 60	$y = 1,3121x + 0,0059649$
Yeşil Boyalı (6.4/125)	% 50	$y = 1,359x - 0,0052459$
Kırmızı Boyalı (7.8/125)	% 50	$y = 1,3537x + 0,0021429$
Mavi Boyalı (4.2/125)	%48	$y = 1,3123x + 0,0014386$
Yeşil Boyalı (6.4/125)	% 54	$y = 1,3126x - 0,0042632$
Kırmızı Boyalı (7.8/125)	% 49	$y = 1,3342x - 0,0022807$

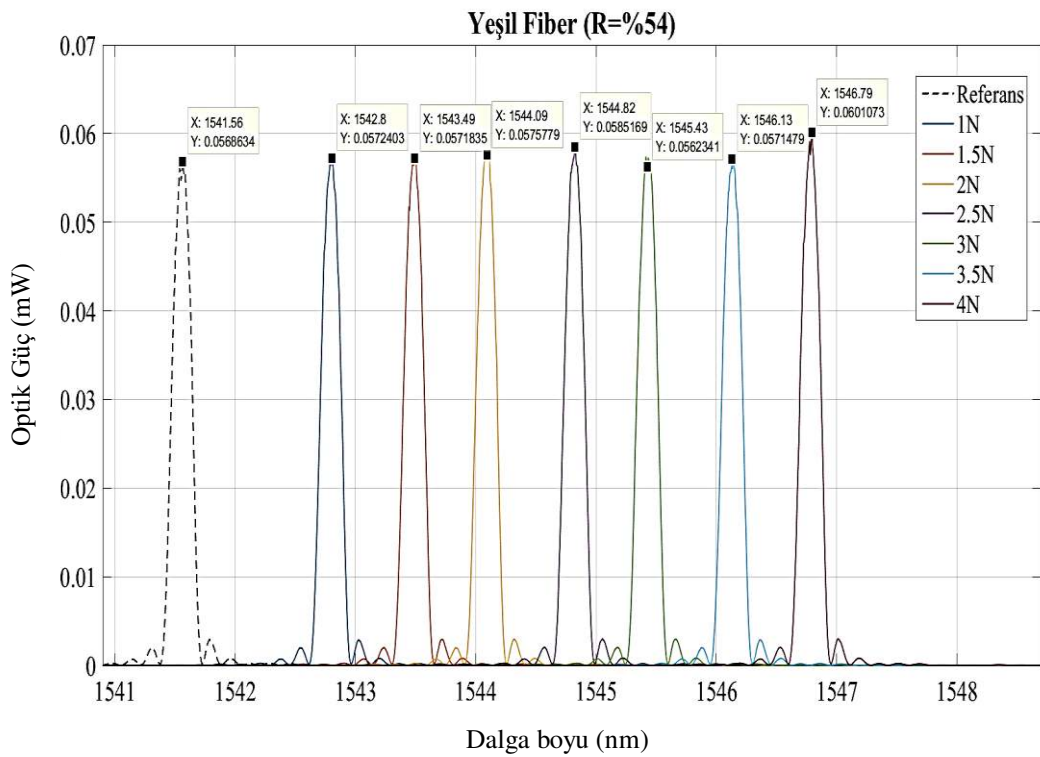
Şekil 4.14'te yapılan ilk denemeye ait sonuç diyagramda görüldüğü gibi eğimlerde (gerinim tepkilerinde) kıyaslanabilir bir farklılık varmış ve çap arttıkça gerinim hassasiyeti artıyormuş gibi görünse de tekrarlı testlerde görülmüştür ki sonraki denemelerde Çizelge 1'de verildiği gibi bu değerler değişmiş ve kıyaslanabilir bir sonuç elde edilememiştir. Böylece sonuçlar birbirlerine çok yakın olduğu için anlaşılmıştır ki fiber optik kablo çekirdek çap farklılığının sabit gerinimler altındaki sensör tepkilerine bir etkisi yoktur.

4.2.3. Farklı merkez dalga boylarına sahip FBG sensörlerin sabit gerinimler altındaki tepkilerinin incelenmesi

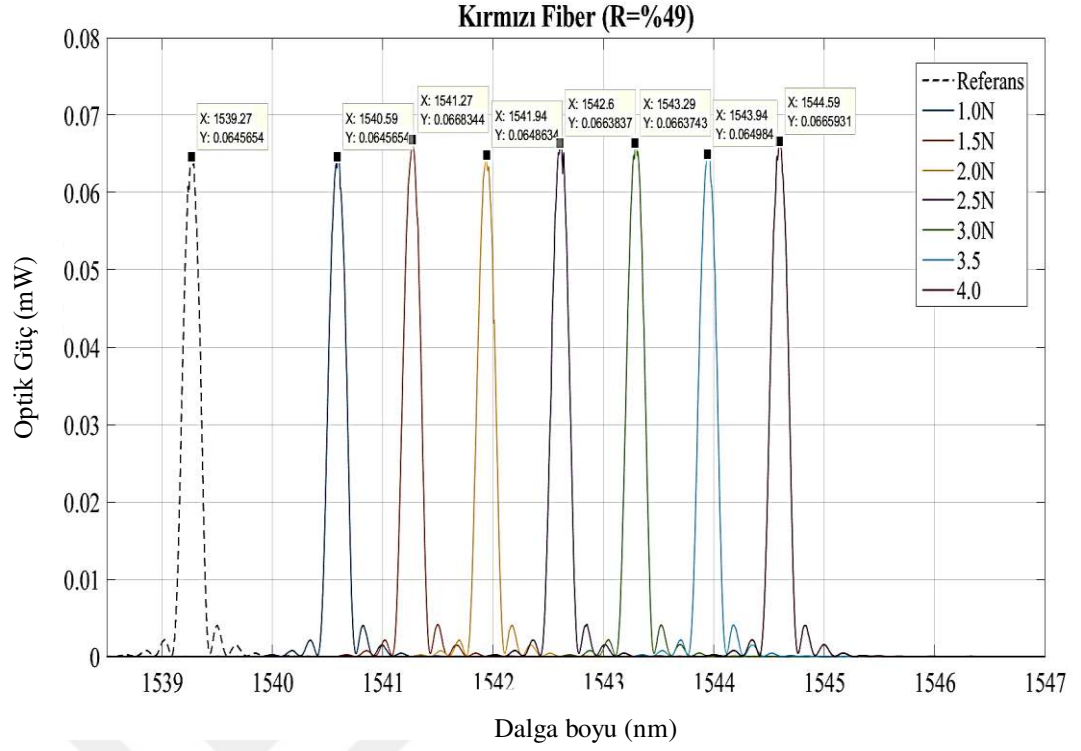
Normal şartlarda farklı merkez dalga boyuna sahip FBG sensörler üretebilmek için her bir dalga boyu için yeni bir faz maskesi kullanmak gerekmektedir. Fakat halihazırdaki şartlarda bu mümkün olmadığından ve mevcutta sadece 1 adet faz maskesi bulunduğundan farklı dalga boyunda FBG sensör üretebilmek için yazım yapılmadan önce fiber optik kabloya fiberleri sabitlemek için ve konumlandırmak için kullanılan fiber tutucu düzenek ile gerinim uygulanmıştır. Böylece gerinim uygulanmış fiber optik kablo ölçümler sırasında serbest bırakıldığında gergin haldeki

ızgara periyoduna göre farklı bir ızgara periyoduna sahip olacağından Denklem (1.3.)'e göre farklı bir merkez dalga boyu verecektir. Bu yöntemden yola çıkılarak 3 farklı fiber tipi içinde önce 1'er N'luk gerinimler altında daha sonra 2'şer N'luk gerinimler altında FBG yapıları oluşturulmuş ve daha sonra bunların 4 N'a kadar 0.5'N luk artışlarla tepkileri incelenmiştir (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17). Her bir fiber için dalga boyu kayma miktarları yaklaşık %50 yansıtıcılık oranları elde edilmiş FBG sensörler ile kıyaslanmıştır.

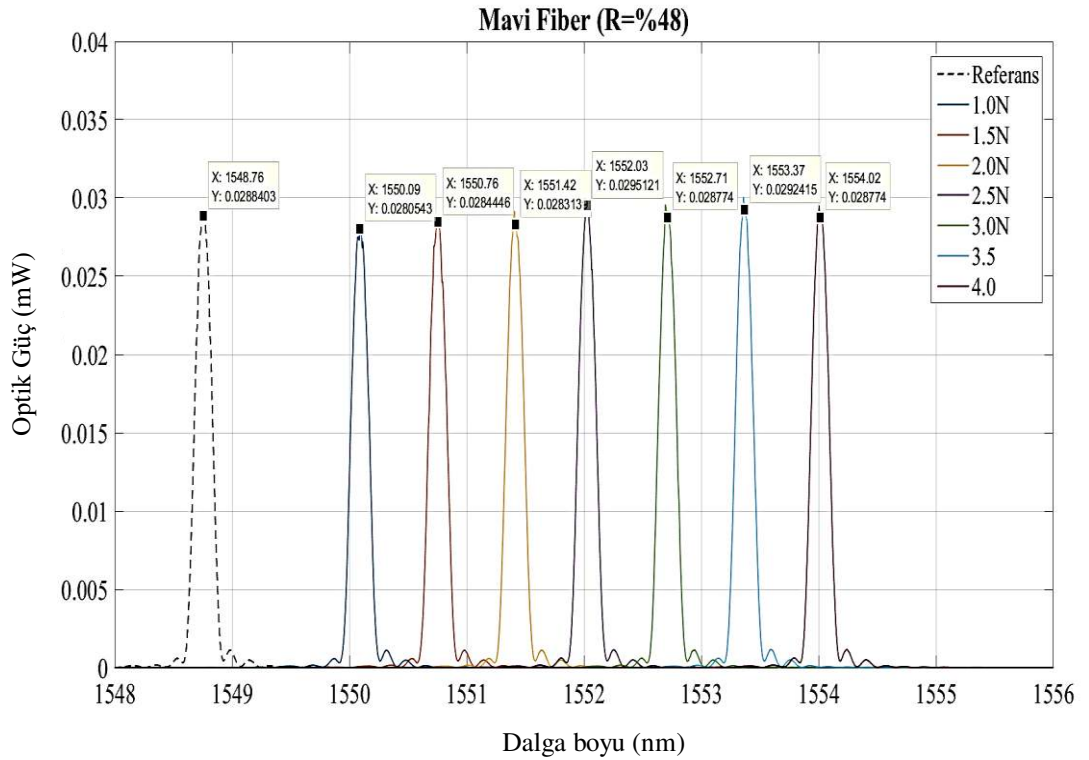
Herbir fiber optik kablo için dalga boyu kayma miktarları aşağıdaki grafiklerdeki gibidir:



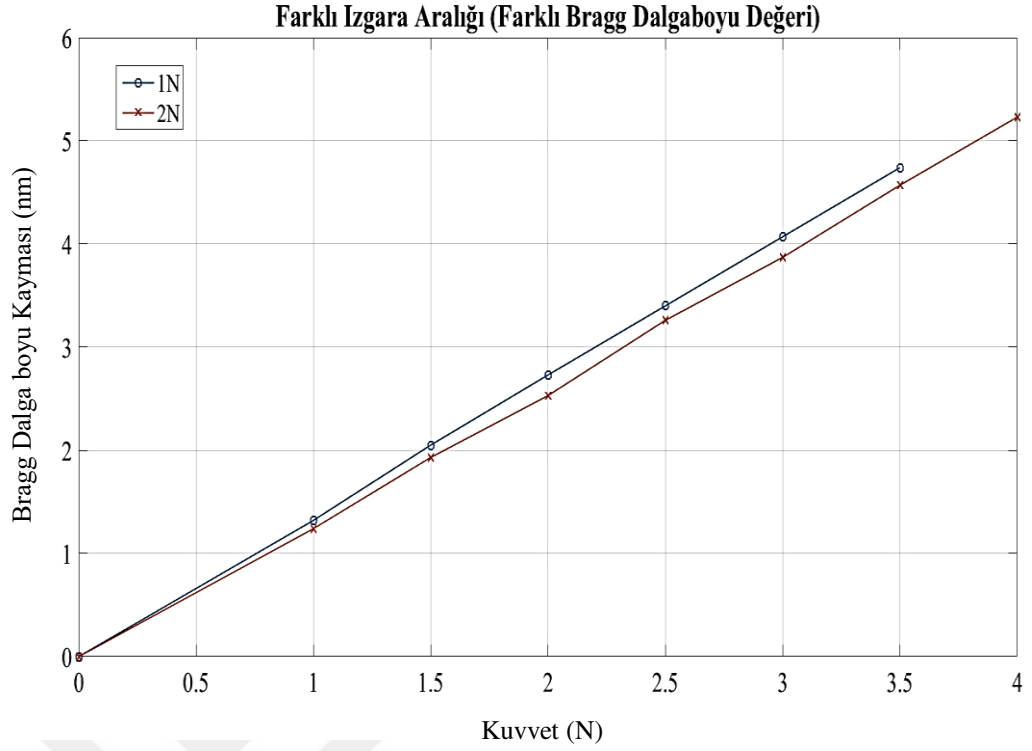
Şekil 4.15: 6.4/125 fiber kabloya yazılmış %54 yansıtıcılı FBG sensörün gerinim tepkisi



Şekil 4.16: 7.8/125 fiber kabloya yazılmış %49 yansıtıcı FBG sensörün gerinim tepkisi



Şekil 4.17: 4.2/125 fiber kabloya yazılmış %48 yansıtıcı FBG sensörün gerinim tepkisi



Şekil 4.18: Farklı gerinimlerde yazılmış farklı merkez dalga boylarına sahip FBG sensörlerin tepkilerini ifade eden eğimleri

Yapılan çalışmalarda farklı merkez dalga boyları sadece fiberi gererek elde edildiği için sabit gerinimler altındaki tepkileri net olarak analiz edilememiş olmakla birlikte yapılan ilk denemenin sonucuna göre daha çok gerilmiş olan yani serbest bırakıldığı zaman daha fazla büzüşmeye bağlı olarak daha dar ızgara aralıklarına ve dolayısıyla daha küçük merkez dalga boyu değerine sahip olan fibere göre, daha az kuvvetle gerilmeden dolayı daha geniş ızgara aralığı ve daha büyük merkez dalga boyu değerine sahip olan FBG sensörün hassasiyeti daha yüksek görünmektedir. Fakat Çizelge 2’de de görüleceği üzere yapılan tekrarlı denemeler sonucunda bu değerlerin değiştiği gözlemlenmiştir.

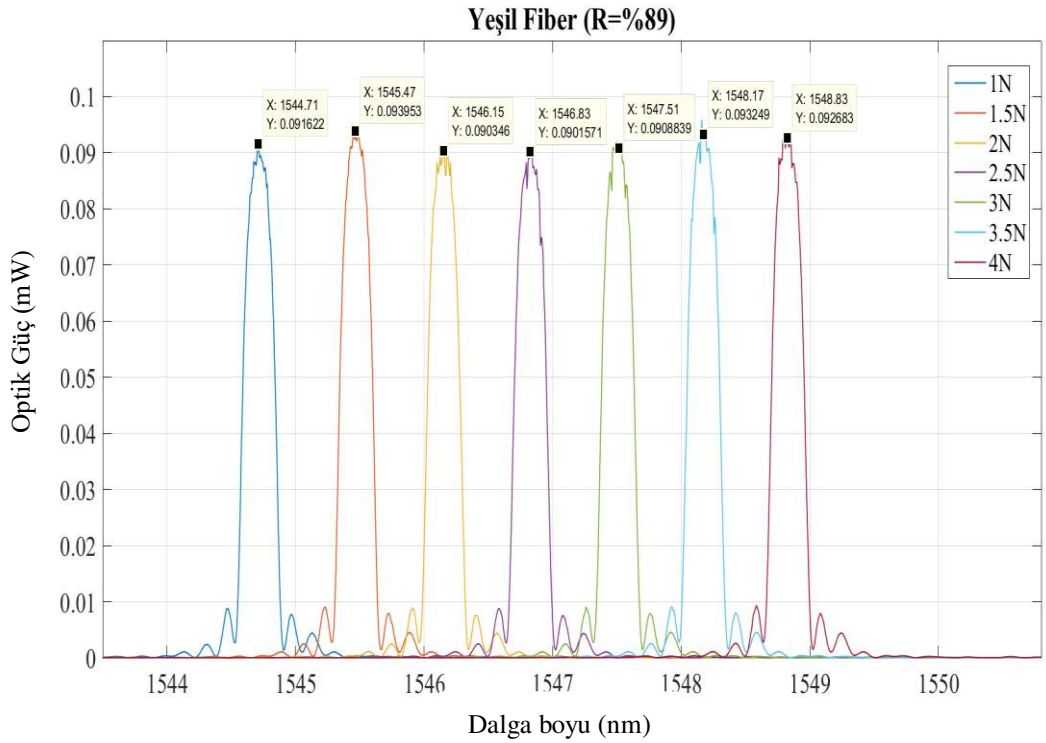
Çizelge 2: Farklı dalga boylarına bağlı gerinim hassasiyetlerinin kıyaslanması

Uygulanan Gerinim	Fiber	Yansıtıcılık Oranı	Eğim(hassasiyet)
1 N	Mavi (4.2/125)	% 60	$y = 1,3121x + 0,0059649$
2 N	Mavi (4.2/125)	% 48	$y = 1,3123x + 0,014386$
1 N	Yeşil (6.4/125)	% 50	$y = 1,359x - 0,00052459$
2 N	Yeşil (6.4/125)	% 54	$y = 1,3126x + 0,042632$
1 N	Kırmızı (7.8/125)	% 50	$y = 1,3537x + 0,0021429$
2 N	Kırmızı (7.8/125)	% 49	$y = 1,3342x + 0,0022807$

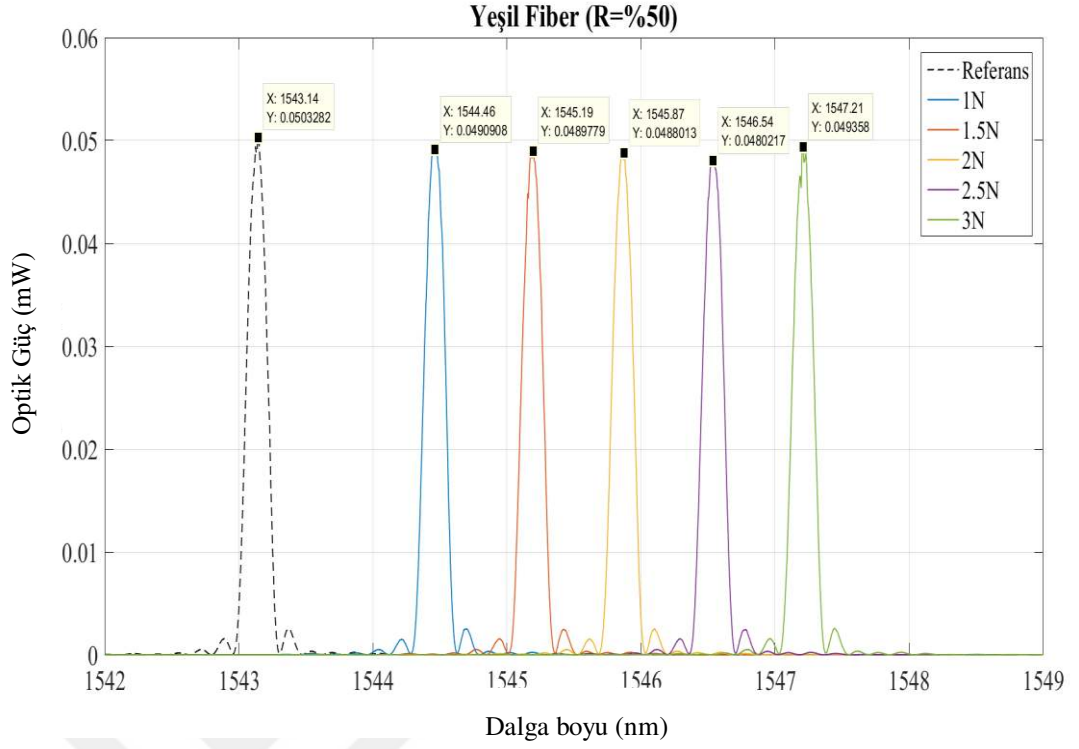
Çizelge 2'ye baktığımızda ilk denemeye ait Şekil 4.18'deki gibi gerçekten de dalga boyu arttıkça gerinim hassasiyeti artıyor gibi görünmektedir. Fakat Mavi fiber ile yapılan denemede görülmektedir ki farklı dalga boyları birbirine çok yakın olmakla birlikte diğerlerinin aksine küçük dalga boyu değerinde daha yüksek hassasiyet vermektedir. (1 N için $1,3121x + 0,0059649$ ve 2 N için $1,3123x + 0,014386$). Sonuç olarak bu değer dalga boyu arttıkça hassasiyet artar gibi bir genelleme yapmayı mümkün kılmamaktadır. Fakat başta da belirtildiği gibi daha net bir sonuç elde etmek adına bu deneme birbirinden tamamen farklı dalga boyları veren iki ayrı faz maskesi kullanılarak üretilmiş FBG sensörler ile tekrar edilirse bu konuda daha kesin bir kanıya varılabilir. Böyle bir denemenin sonucunda referans çalışmada öngörüldüğü gibi dalga boyu arttıkça gerinim hassasiyeti artar (örn: 1300 nm'de 11.1 pm/gram, 1550 nm'de 13.3 pm/gram gibi...) sonucuna varılabilir [29].

4.2.4. Farklı yansıtma oranlarının sabit gerinim altında sensör karakteristiğine etkisinin incelenmesi

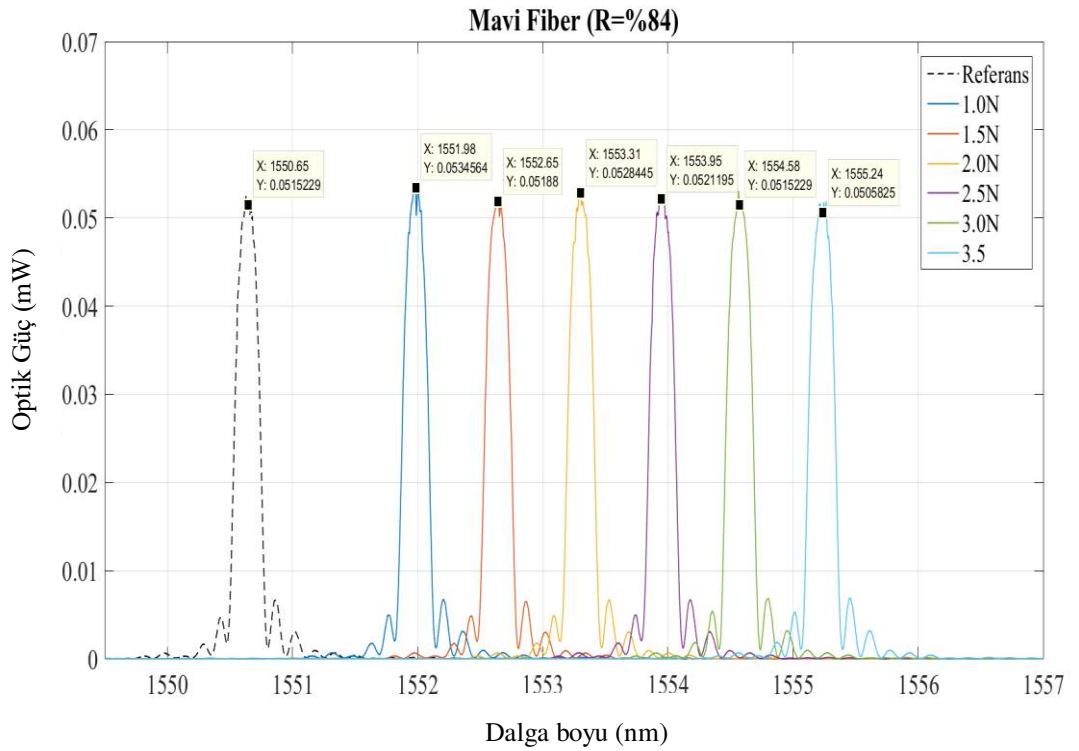
Bu çalışmada üç farklı fiber tipi içinde düşük ve yüksek yansıtıcılığın FBG sensörlerin tepkilerine etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. Bir FBG sensör üretirken yansıtıcılık oranının ne olması gerekir sorusundan yola çıkılarak gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada ~% 50 düşük yansıtıcılık ve ~% 90 yüksek yansıtıcılık değeri olarak belirlenerek her üç fiber içinde düşük ve yüksek yansıtıcılığa sahip FBG yapıları oluşturularak yine sabit gerinimler altında tepkileri analiz edilmiştir. Bahsedilen üç ayrı fiber için elde edilen grafikler Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te verilmiştir:



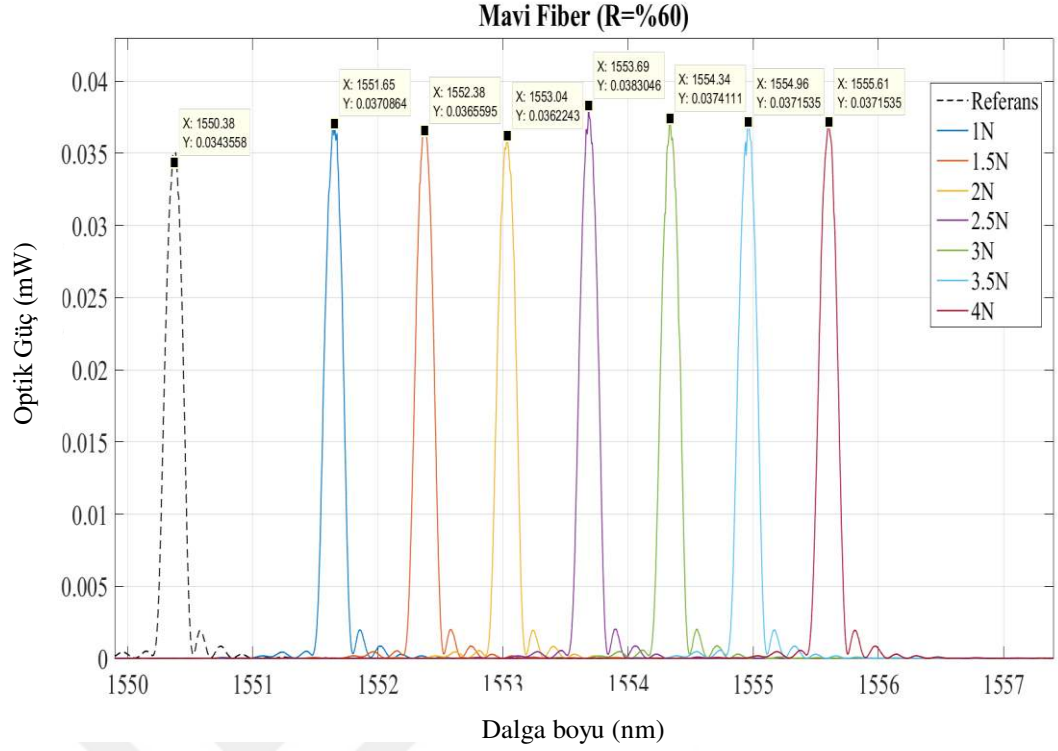
Şekil 4.19: 6.4/125 fiber ile üretilmiş % 89’luk yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi



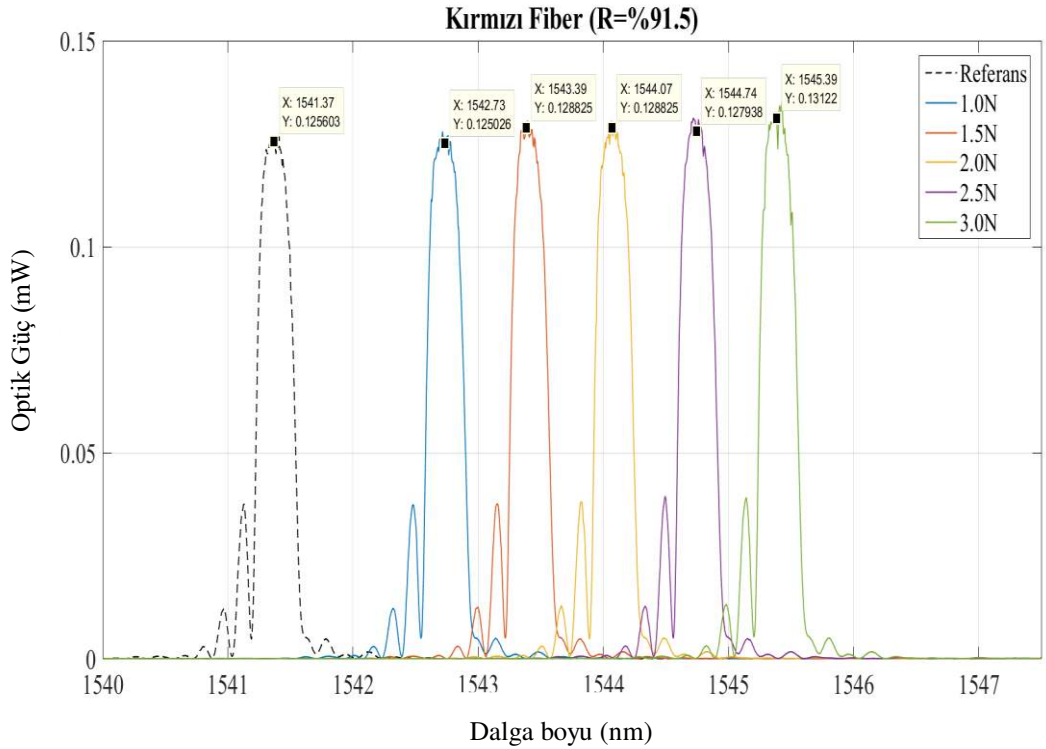
Şekil 4.20: 6.4/125 fiber ile üretilmiş %50'lik yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi



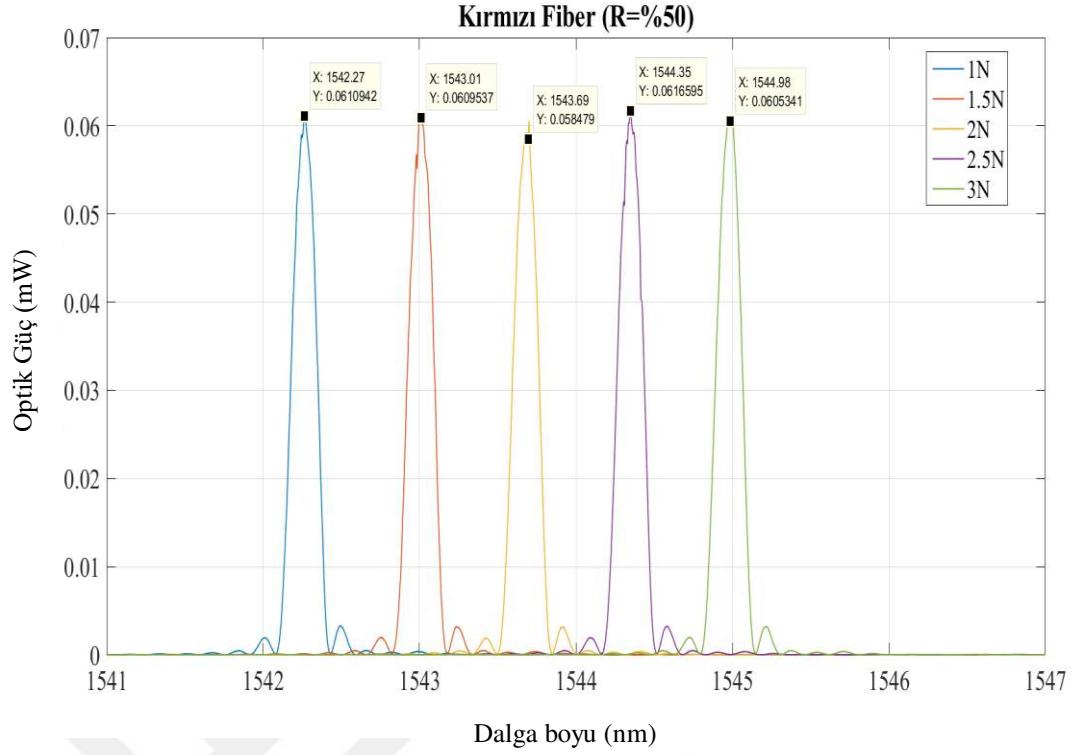
Şekil 4.21: 4.2/125 fiber ile üretilmiş %84'lük yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi



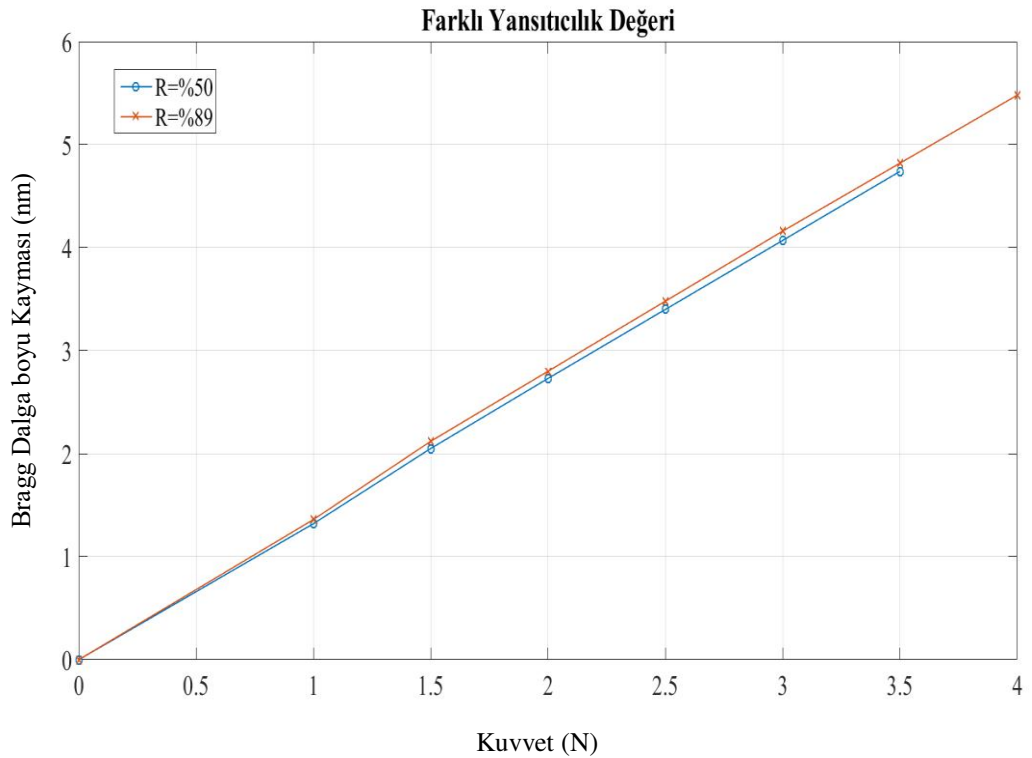
Şekil 4.22: 4.2/125 fiber ile üretilmiş %60'lık yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi



Şekil 4.23: 7.8/125 fiber ile üretilmiş %91.5'lik yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi



Şekil 4.24: 7.8/125 fiber ile üretilmiş %50'lik yansıtma oranına sahip FBG sensörün gerinim tepkisi



Şekil 4.25: Farklı yansıtıcılık değerine sahip FBG sensörlerin gerinim tepkisi

Bu çalışma kapsamında yine yapılan ilk denemede Şekil 4.25'te görüleceği gibi yüksek yansıtıcılığa sahip olan FBG sensör daha hassas olarak görülsede yine tekrarlı

denemelerde Çizelge 3'te verildiği gibi bu değerlerin diğer iki tekrarlama da kırmızı ve mavi renkte fiberlerle yapılan denemelerde aksi sonuç verdiği görülmüştür.

Çizelge 3: Yansıtıcılık oranlarının gerinim sensör tepkisine etkisinin kıyaslanması

Fiber	Yansıtıcılık Oranı	Eğim (hassasiyet)
Mavi (4.2/125)	% 84	$y = 1,309x + 0,019754$
	%60	$y = 1,3121x + 0,0059649$
Yeşil (6.4/125)	% 89	$y = 1,3737x + 0,022456$
	% 50	$y = 1,359x - 0,0052459$
Kırmızı (7.8/125)	% 91.5	$y = 1,3414x + 0,0092857$
	% 50	$y = 1,3537x + 0,0021429$

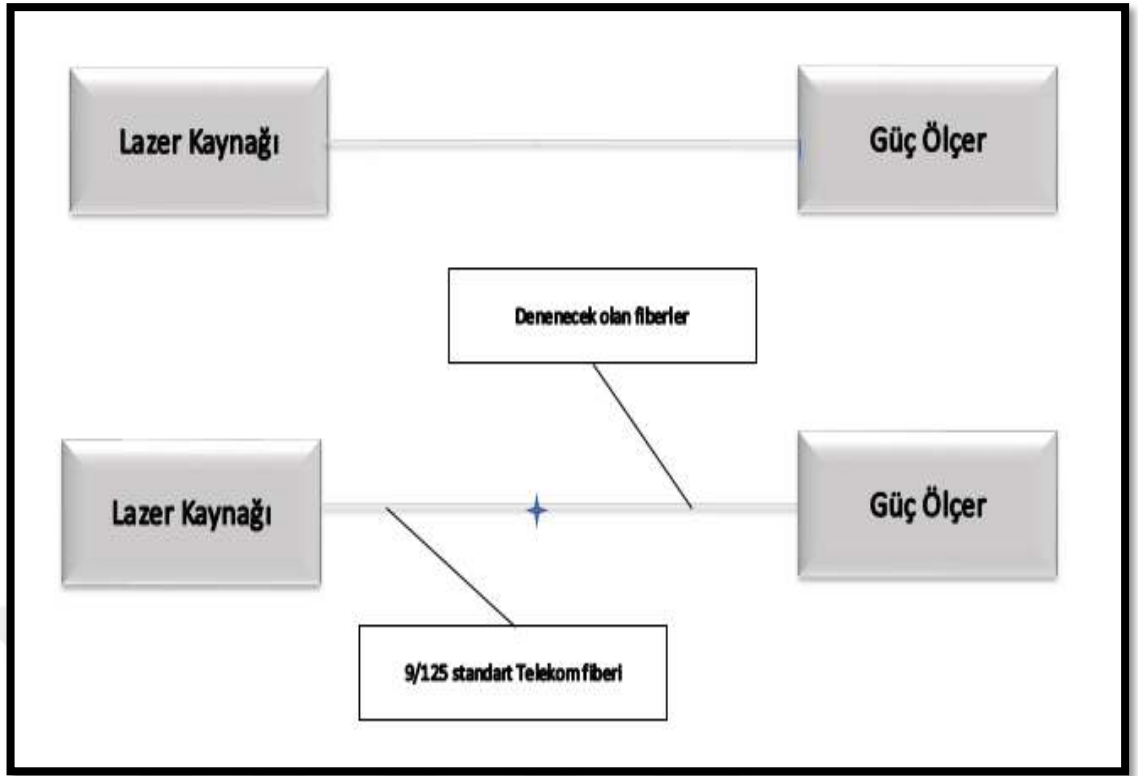
Bu çalışmada tekrar edilen denemelerde %50 yansıtıcılığa sahip FBG'nin %90'lığa göre eğimi daha az iken diğer bir denemede tam tersi sonuç çıkmıştır ve bahsedilen farklılıklar yukarıdaki Çizelge 3'te görüldüğü gibi birbirine çok yakın değerlerdedir. Böylece yansıtıcılık oranında sensör karakteristiğine bir etkisi olmadığı netleştirilmiştir.

4.3. Fiber aplarına Bağlı Olarak Kaynatma Noktalarındaki Kayıpların Kıyaslanması

FBG üretim sistemindeki fiberlerin bağlantı noktalarındaki kayıp değerlerini incelemek için deney düzeneği aşığıdaki Şekil 4.26’da verildiği gibi kurulmuştur. Bu ölçümleri yapmak için 1310 ve 1550 nm dalga boylarında tünellenebilir bir “Fabry Perot” lazer kaynağı ve diğer yanda lazer kaynağından gelen gücü ölçebilmemize imkan sağlayan bir güç ölçüm ünitesi bulunmaktadır. Ölçüm sırasında öncelikle referans güç değerini ölçmek için lazer kaynağının çıkışına bağlı olan FC/PC konnektörlü 9/125 çekirdek ve kılıf çaplarına sahip olan fiber optik kabloun çıplak olan ucu belirli mesafede kılıfı sıyrılıp temizlenip fiber kesici cihaz ile kesildikten sonra uygun fiber adaptörü ile güç ölçerin yuvasına yerleştirilir. Daha sonrasında lazer kaynağı aktif hale getirilir ve doğrudan lazer kaynağından gelen ve herhangi bir kaynatma noktasından geçmeyen referans güç değeri optik güç ölçer ile ölçülerek kaydedilir.

Referans güç ölçümü yapıldıktan sonra referans ölçümün yapıldığı fiber optik kablo güç ölçerden ve adaptör içerisinden çıkartılır. Sonrasında FBG üretim sistemindekine benzer yapıyı kurmak için sırasıyla 3 farklı fiber optik kablo’nun bir ucu hazırlanıp kesildikten sonra fiber kaynatma sisteminin bir tarafına yerleştirilir. Hali hazırda kesilmiş olan ve referans ölçümünde kullanılan smf28 fiber optik kabloun hazır olan ucu da fiber kaynatma sisteminin diğer tarafına yerleştirilir ve uygun kaynatma reçetesi kullanılarak ideal birleşmeyi sağlayacak şekilde kaynaklandırma işlemi Şekil 4.27’deki gibi yapılır. Kaynaklandırma işleminden sonra deneme fiberinin boşta olan diğer ucu referans güç ölçümündekine benzer şekilde hazırlanarak optik güç ölçere yerleştirilir. Tekrar lazer sistemi aktif hale getirilir ve kaynatma noktasından geçtikten sonra geriye kalan güç değerini okuyacak şekilde lazer gücü optik güç ölçerde ölçülür. Bu ölçümlere bağlı olan kayıp değeri manuel olarak Denklem (4.2) kullanılarak hesaplanabileceği gibi ölçüm sisteminin kendisi otomatik olarak bu sonucu vermektedir ve kaydedilmiş referans güç değeri ile deneme fiberinin kaynatılmasına bağlı olarak kaynatma noktasındaki kayıp değeriyle birlikte yapılan ölçümü kıyaslayarak dB cinsinden kayıp değerini vermektedir.

$$dB \text{ kayıp} = -10 \log \frac{\text{Ölçülen Güç}}{\text{Referans Güç}} \quad (4.2)$$



Şekil 4.26: Fiber kaynaklandırma (splice) kayıp değerleri ölçüm düzeneği şematiği



Şekil 4.27: farklı çekirdek çaplarına sahip iki fiberin kaynaklandırma (splice) görseli

Bu şekilde ölçümler yapılmış ve 3 farklı fiber tipi için beşer defa tekrar edilerek istikrarlı sonuçlar hedeflenmiştir. Çizelge 4 üç farklı fiber tipi için yapılan bu ölçümlere ait sonuçları vermektedir.

Çizelge 4: Üç farklı fiber optik kablo ile smf28 fiber kablo kaynaklandırma noktası kayıp ölçüm değerleri

4.2 /125 – smf28 Bağlantısı			Ortalama
Referans	Ölçülen	Kayıp	2.20 dB
20.26 Mw	11.993 mW	2.277 dB	
20.26 Mw	12.076 mW	2.246 dB	
20.25 Mw	12.055 mW	2.252 dB	
20.26 Mw	12.377 mW	2.141 dB	
20.26 Mw	12.442 mW	2.117 dB	
6.4 /125 – smf28 Bağlantısı			0.93 dB
20.25 Mw	16.305 mW	0.944 dB	
20.26 Mw	16.340 mW	0.937 dB	
20.25 Mw	16.315 mW	0.939 dB	
20.26 Mw	16.350 mW	0.931 dB	
20.27 Mw	16.319 mW	0.942 dB	
7.8 /125 – smf28 Bağlantısı			0.229 dB
20.23 Mw	18.853 mW	0.305 dB	
20.20 Mw	18.949 mW	0.278 dB	
20.25 Mw	18.979 Mw	0.282 dB	
20.24 Mw	18.976 mW	0.280 dB	
20.24 Mw	18.963 mW	0.282 dB	

Çizelge 4’teki sonuca göre Ge katkısına bağlı olarak NA değeri arttıkça (dolayısıyla daha öncesinde bahsedildiği gibi tek mod’lu yapıyı korumak için fiber çekirdek çapı azaldıkça) kaynaklandırma noktasındaki uyumsuzluk artmakta ve kayıp değeri artmaktadır. Herbir fiber optik kablo çeşidi ile yapılan 5’er ölçüm sonucunda sonuçların tekrar edilebilir ve istikrarlı olduğu görülmüştür ve bu ölçümlerde ortalama olarak 4.2/125 – smf28 bağlantısında ~ 2.20 dB, 6.4/125 – smf28 bağlantısında ~ 0.93 dB ve 7.8/125 – smf28 bağlantısında ~ 0.229 dB kayıp değeri elde edilmiştir.

Teorik olarak fiber kaynatma noktalarındaki kayıp değerlerini (splice loss) incelediğimizde ise fiberlerdeki kaybın en temelde iki çeşit olduğunu görürüz. Bunlar iç

(intrinsic) ve dış (extrinsic) kayıplardır. İç kayıplar kaynaklandırılan fiber optik kabloların çapları ile alakalı iken dış kayıplar kaynaklandırılacak fiberlerin hizalanması vb. etkiler ile alakalıdır. Deney düzeneğinin kurulumunda ideal splice işlemi amaçlanmıştır ve kaynaklandırmalar ideal kesim kaliteleri ve kaynatma reçeteleri ile gerçekleştirildiği için dış kayıplar göz ardı edilerek fiber optik kabloların yapısal farklılıklarından kaynaklı iç kayıplar üzerinde durulacaktır.

4.3.1. İç (intrinsic) kayıplar ve teorik hesaplama

Dahili (iç) kayıplar iki fiber arasındaki 3 farklı uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır. Bunlar çekirdek boyut farkı, numerik açıklık (NA) farkı ve mode alan çap (mode field diameter-MFD) uyumsuzluğudur.

Çekirdek boyut farklılığından kaynaklı kayıplar Denklem (4.3)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$Kayıp_{\text{çekirdek}} = -10 \log \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \quad (4.3)$$

a_1 ve a_2 çekirdek boyutlarıdır ve $a_1 \geq a_2$ 'dir.

Bu kayıp ölçümü çok mod'lu (multi-mode) fiberoptik kablolar için daha uygundur. Numerik açıklık uyumsuzluğundan kaynaklı kayıplar Denklem (4.4)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$Kayıp_{NA} = -10 \log \left(\frac{NA_2}{NA_1} \right) \quad (4.4)$$

$NA_1 \geq NA_2$. Yine bu ölçüm yöntemi de çok-modlu (multi-mod) fiber optik kablolar için daha doğru sonuç vermektedir. Tek-modlu (single-mode) fiberlerdeki kayıplar ise mod alan çapı (MFD)'na bağlı olarak ölçülmektedir [30].

$$L_{MFD} = -10 \log \left[\frac{4}{(MFD_1/MFD_2 + MFD_2/MFD_1)^2} \right] \quad (4.5)$$

Denklem (4.5) hem çekirdek hem numerik açıklık (NA) uyumsuzluğuna bağlı kayıpları içermektedir ve tipik olarak en doğru dahili (iç) kayıp değerini vermektedir.

Tek mod'lu fiberlerin birbirine bağlantısı ve kaynaklandırılması çok yaygın bir uygulamadır ve MFD bütün fiberoptik kablolar için verilen bir değer olduğundan kayıp değerini hesaplaması kolaydır.

Denklem (4.5)'e göre 3 farklı tipteki fiber optik kablolar için teorik kayıp değerleri hesaplandığında Çizelge 5'teki sonuçlar elde edilmektedir. Fiberlerin çekirdek çapları için SEM ölçümlerinde ölçülen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5: Üç farklı fiber optik kablo ile smf28 fiber kablo kaynaklandırma kayıp hesaplama değerleri

Fiber Bağlantısı	Hesaplanan Kayıp Değeri
4.0 / 125 – smf 28	- 2,58 dB
5.5 / 125 – smf 28	- 1,01 dB
7.2 / 125 – smf 28	- 0,21 dB

Çizelge 5'te elde edilen teorik sonuçlar ile ölçümlerde elde edilen sonuçlar kıyaslandığında ölçümler sırasında elde edilen sonuçların teorik hesaplama sonucunda elde edilen kayıp değer tahminlerine çok yakın olduğu ve bu sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucunda Ge katkısının artışı ile birlikte ışığa duyarlılığın artmasına bağlı olarak eşit enerji ve sayıdaki atımlara karşı yansıtıcılığında arttığı görülmüştür. Bununla birlikte gerinime bağlı dalga boyu kayma miktarı yani hassasiyetin sadece malzeme sabitine bağlı olduğu ve farklı yansıtma oranlarına, farklı çekirdek çaplarına, farklı merkez dalga boylarına (cenral wavelength – Bragg wavelength) bağlı olmadığı deneysel çalışmalar sonucunda anlaşılmıştır. Ayrıca FBG sensörlerin üretiminde ölçüm tekrar edilebilirliğine etkisini görmek adına farklı çaplarda fiber optik kabloların smf28 sınıfı konnektörlü fiber bağlantılarında meydana gelen kayıp değerlerini incelediğimizde yüksek Germanyum katkısına bağlı nümerik açıklık (NA) ve dolayısı ile mod alan çapı (MFD) nın artmasına bağlı olarak kayıp değerinin de arttığı ve ölçümler ile teorik hesaplamaların tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmalar sonucunda söylenebilir ki sensör üretiminde kullanılacak olan fiber optik kablo seçilirken fiber optik kablonun ışığa duyarlılığının ne olduğu, ışığa duyarlılıkla bağlantı noktalarında meydana gelen kayıp değerlerinin ne olduğu kıyaslanmalıdır. Bu kıyaslama ile birlikte bu iki parametrenin avantaj dezavantajları kıyaslanıp iki parametre içinde ideal sonuçları veren fiberoptik kablo seçilmelidir. Bu kıyaslamalar göz önünde bulundurulduğunda çalışmalar süresince kıyaslanan 4.2/125, 6.4/125 ve 7.8/125 çaplarındaki farklı Ge katkılarına sahip fiber optik kablolar içerisinden ideal kontrol edilebilir yansıtıcılık ve sistem kurulumunda bağlantı noktalarındaki kayıplara bağlı ideal ölçüm tekrar edilebilirliği sunduğu için 6.4/125 çaplarındaki fiber optik kablo en ideal seçimdir. Bu seçim ile birlikte kontrol edilebilir yansıtıcılıklara sahip, <150 pm bant genişliğine ve ~10 pm merkez dalga boyu tekrar edilebilirliğine, >10 dB yan mod baskılama oranına sahip FBG sensörler üretilebilmiştir.

Bu parametrelerin haricinde FBG sensör üretiminde daha da kapsamlı bir analiz elde edebilmek adına ileriki çalışmalar için FBG sensörler ile herhangi bir çevresel etkeni ölçerken en az ne kadarlık bir değişimi (dalga boyu kayması ve buna karşılık gelen

çevresel etki değeri değişimi) algılayabileceğimizi belirlemek yani kısaca FBG sensörlerin spektrumunun çözünürlüğünü belirlemek ve farklı yansıtma miktarının buna etkisini irdelemek adına ~%10'dan başlayarak 10'ar birimlik yüzdelik artışlarla ~%90'a kadar yansıtma oranlarına sahip FBG'ler yazarak bunları belirli frekans altında eşit sürelerde merkez dalga boyu ölçümüne tabi tuttuğumuzda merkez dalga boyunun +/- değişim değeriyle birlikte ne olduğunun ölçümü yapılabilir ve ölçüm süresi sonucunda elde edilen dataların standart sapması hesaplanabilir. Bu standart sapma değeri her bir yansıtıcılık değeri için kıyaslanarak yansıtma oranının FBG sensörlerin merkez dalga boyu ölçüm hassasiyetine etkisi incelenebilir. Son olarak farklı uzunluklarda üretilmiş olan FBG lerin sensör karakteristiğine ne şekilde etki ettiği de incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Othonos, A., *Fiber Bragg gratings*. Review of Scientific Instruments, 1997. **68**(12): p. 4309-4341.
- [2] Al-Fakih, E.A., et al., *The capability of fiber Bragg grating sensors to measure amputees' trans-tibial stump/socket interface pressures*. Sensors (Basel), 2013. **13**(8): p. 10348-57.
- [3] Al-Sarawi, S.F., et al., *The experimental evaluation of FBG sensors for strain measurement of prestressed steel strand*. 2005. **5649**: p. 463.
- [4] Anderson, E.H., et al., *Development of damage monitoring system for aircraft structure using a PZT actuator/FBG sensor hybrid system*. 2004. **5388**: p. 425.
- [5] Berghmans, F., et al., *First results from in line strain measurements with FBG sensors on the pantograph collector of underground trains*. 2010. **7726**: p. 772605.
- [6] Canning, J., et al., *High strain FBG sensors for structural fatigue testing of military aircraft*. 2012. **8351**: p. 83511M.
- [7] M, M., et al., *A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors*. 2013.
- [8] Jyotsna, R.M., Chattopadhyay, M., *Spectral characteristic of uniform fiber Bragg grating using couple mode theory*. 2013. **7856**:p. 2320-2084.
- [9] Fiber optik sensör global tüketim tahmini. <http://www.electronicast.com>., (Ağustos 2017).
- [10] Fiber optik sensör global tüketim tahmini. <http://www.electronicast.com>., (Ağustos 2016).
- [11] FBG Sensors. <http://www.patentinspiration.com>., (Eylül 2015).
- [12] Igarashi, K., et al., *Performance evaluation of selective mode conversion based on phase plates for a 10-mode fiber*. Opt Express, 2014. **22**(17): p. 20881-93.
- [13] Presby H.M. and Marcuse D., *Refractive index and diameter determinations of step index optical fibers and preforms*. Applied Optics, December 1974. Vol 13. No 12.
- [14] Jäger, D.S., et al., *Using FBG sensor array for monitoring structural security*. 2008. **7278**: p. 72780A.
- [15] Jiang, Y.D., et al., *Study on the experiment of cable tension measurement with FBG sensors*. 2010. **7658**: p. 765845.
- [16] Kahandawa, G.C., et al., *Use of FBG Sensors for SHM in Aerospace Structures*. Photonic Sensors, 2012. **2**(3): p. 203-214.
- [17] Kundu, T., et al., *FBG sensors for the measurement of the dynamic response of offshore oil platform model*. 2005. **5768**: p. 354-362.

- [18] Schmid, U., et al., *Test-bed for the remote health monitoring system for bridge structures using FBG sensors*. 2009. **7362**: p. 736215.
- [19] Shen, S., et al., *Discrimination between temperature and strain based on a simple FBG sensor*. 2004. **5279**: p. 641.
- [20] Sun, Y., et al., *Strain measurement of steel structure using a novel FBG sensor packaged by titanium alloy slice*. 2005. **6019**: p. 60194G.
- [21] Tomizuka, M., et al., *Multiple damage detection techniques by dynamic strain measurements using FBG sensors*. 2007. **6529**: p. 65293J.
- [22] Udd, E., et al., *Impact monitoring in smart composites using stabilization-controlled FBG sensor system*. 2004. **5384**: p. 279.
- [23] Udd, E., et al., *Sensing delamination in epoxy encapsulant systems with fiber Bragg gratings*. 2016. **9852**: p. 98520G.
- [24] Udd, E., et al., *Long FBG sensor characterization of residual strains in AS4/PPS thermoplastic laminates*. 2004. **5384**: p. 267.
- [25] Khular, E., et al., *Effect of the refractive index dip on the propagation characteristics of step index and graded index fibers*. *Optics Communications*, 1977. 110029, India.
- [26] Fiber optic termination tutorial. <http://http://www.lanshack.com/fiber-optic-tutorial-termination.aspx>., (Temmuz 2017).
- [27] Connectors and splices: Correct alignment spells success. <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25152>., (Eylül 2017).
- [28] K. O. Hill and G. Meltz, Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview, *J. Lightwave Tech.*, 15, pp. 1263–1276 (1997).
- [29] M. G. Xu et al., “Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors,” *Electron. Lett.*, vol. 30, p. 1085, 1994.
- [30] Fiber Splicing. Blair, S. http://www.ece.utah.edu/~blair/T/ece5411/notes/2_13_12.pdf, (2008)., (Ekim 2016).

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ümit BAYRAM
Doğum Tarihi ve Yeri : 02.08.1988/ESKİŞEHİR
E-posta : umitbayram2627@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, Fizik Mühendisliği (İngilizce), 2013
- **Yüksek Lisans** : Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (2014-...devam ediyor)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- ERMAKSAN Makina San.ve Tic. A.Ş. / AR-GE Mühendisi (10.06.2014 -...)

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- *Konferans sözlü sunum: Ümit BAYRAM ve İsrail KÜÇÜK, Investigation Of Effects Of Different Parameters On The Responses And Characteristics Of Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors. 4th International Conference on Materials Science and Nanotechnology For Next Generation (MSNG-2017) 28-30 Haziran 2017, Saraybosna, Bosna Hersek.*