ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ÇOK AMAÇLI ÖLÇÜMLER İÇİN İNCELTME TEKNİĞİ KULLANAN TEK DAMARLI FİBER SENSÖRLERİN GEOMETRİK TASARIMI

Mustafa BİLSEL

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2021

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ÇOK AMAÇLI ÖLÇÜMLER İÇİN İNCELTME TEKNİĞİ KULLANAN TEK DAMARLI FİBER SENSÖRLERİN GEOMETRİK TASARIMI

Mustafa BİLSEL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Modern haberleşme teknolojilerinin gelişimindeki en büyük katkıyı kuşkusuz ışıkla bilgi taşıyabilen optik fiberler sağlamıştır. Çok yüksek iletişim bant genişliği, düşük güç kaybı, küçük boyut ve sinyal bozucu dış etkenlere karşı güvenli olması yönüyle avantajlar sunan optik fiberler, sadece telekomünikasyon sektöründe değil farklı disiplinlerde ve özellikle sensör teknolojisi araştırmalarında da oldukça dikkat çekmektedir. Bu tez çalışmasında, standart tek modlu telekom fiberini deforme ederek kırılma indisi, sıcaklık ve gerinim ölçebilen sensörler üzerine bir araştırma ve geliştirme çalışması yürütülmüştür. Sensör tasarımlarında fiberi incelterek ve kalınlaştırarak farklı geometrik deformasyonların sensör performansına etkileri araştırılmış ve analiz edilmiştir. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında sayısal hesaplamalar ve simülasyon yöntemiyle sensör başlığının maksimum duyarlılık için optimum geometrisi belirlenmiştir. Devam eden aşamalarda ısıl yöntem kullanan bir fiber inceltme düzeneği geliştirerek fiber sensörlerinin deneysel üretimi çalışmaları yürütülmüştür. Üretilen fiber sensörleri için birer test düzeneği kurarak kırılma indisi, sıcaklık ve gerinim duyarlılıkları ayrı ayrı test edilmiş ve sensör duyarlılıkları analiz edilerek rapor edilmiştir. Ayrıca fiberi periyodik ızgara desenli biçimlendirerek dalgaboyu spektrumunda iki rezonans dip noktasına sahip bir fiber sensörü geliştirilmiştir. Bu sensör eşzamanlı sıcaklık ve gerinim ölçebilen yenilikçi bir fiber sensörü tasarımı olarak literatürde bir ilktir. Tasarlanan sensörün üretimi gerçekleştirilerek sensör duyarlılığı deneysel çalışmalarla test edilmiş ve literatür ile karşılaştırmalı başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak bu tezde geliştirilen geometrik deformasyon teknikleri ile kırılma indisi, sıcaklık ve gerinimi ayrık yada eş zamanlı ölçebilen yüksek duyarlılığa sahip, ucuz maliyetli fiber sensörlerin kolayca üretilebileceği gösterilmiştir.

Temmuz 2021, 104 sayfa

Anahtar Kelimeler: İnceltilmiş fiber, Periyodik ızgara, Gerinim, Sıcaklık, Kırılma indisi, Eş zamanlı ölçüm

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

GEOMETRICAL DESIGN OF SINGLE CORE FIBER SENSORS USING TAPERING TECHNIQUE FOR MULTIPURPOSE MEASUREMENTS

Mustafa BİLSEL

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Optical fibers that can carry information by light have undoubtedly made the greatest contribution to the development of modern communication technologies. Optical fibers, which offer advantages such as very high communication bandwidth, low power loss, small size and safety against signal external factors, attract much attention not only in the telecommunication sector but also in different disciplines and especially in sensor technology researches. In this thesis, a research and development study was carried out on sensors that can measure refractive index, temperature and strain by deforming a standard single-mode telecommunication fiber. The effects of different geometric deformations on sensor performance by tapering and enlarging the the fiber diameter in sensor designs have been investigated and analyzed. In the first stage of the experimental studies, the optimum geometry of the sensor head for maximum sensitivity was determined by numerical calculations and simulation method. In further stages, experimental fabrication of fiber sensors were carried out by developing a setup using thermal method to taper the fiber. Refractive index, temperature and strain sensitivity were tested separately by establishing test setups for the fabricated fiber sensors and the sensor sensitivities were analyzed and reported. Also, a fiber sensor having two resonance dip points in the wavelength spectrum has been designed by shaping the fiber with a periodic grating pattern. This sensor that can measure temperature and strain simultaneously is novel in the literature with its unique design. By fabricating the designed sensor, the sensitivity of the sensor has been tested in experimental studies and successful results when compared with the literature have been obtained. As a result, it has been shown that with the geometric deformation techniques developed in this thesis, high-sensitivity and low-cost fiber sensors that can measure the refractive index, temperature and strain discretely or simultaneously can be easily fabricated.

July 2021, 104 pages

Key Words: Tapered fiber, Periodic grating, Strain, Temperature, Refractive index, Simultaneous measurement

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında değerli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. İsa NAVRUZ' a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Sensör üretim düzeneğinin kurulumunda çok büyük katkıları olan ve sıcaklık ölçümleri için gerekli fırının üretilmesinde yol gösteren tez danışmanı hocam Doç. Dr. Fikret ARI' ya teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez ara raporlarında gelecek dönem çalışmaları hakkında kıymetli görüşlerini sunan ve yaptığım çalışmalar nedeniyle sürekli motive eden tez danışmanı hocam Yrd. Doç. Dr. Çağlar ARPALI' ya teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen, teknik destek, tecrübe ve görüşlerini paylaşan değerli arkadaşım Murat OĞUZ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Kalınlaştırılmış optik fiber üretimi için gerekli füzyon birleştirme cihazını çok defa kullanmama izin veren Net Sistem Bilgisayar Elektronik Alt Yapı Hizmetleri firmasına desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Sıcaklık ölçüm ekipmanları temininde yardımcı olan arkadaşım Halit Levent KARAMAN' a desteğinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de sonsuz teşekkürler ederim.

Mustafa BİLSEL
Ankara, Temmuz 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER DİZİNİ ..... **viii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
2. OPTİK FİBERLERİN YAPISI, MOD YAYILIMI ve SENSÖR KARAKTERİSTİĞİ **8**
2.1 Optik Fiberler, Yapısı ve Işığın İletimi **8**
2.2 Optik Fiber Türleri **9**
2.3 Optik Fiberde Işığın Yayılımı **11**
2.4 Dik Alan Bileşenleri Olarak Dalga Denklemi **14**
2.5 Işığın Yayılma Metodu (BPM) **15**
2.6 Mod Alan Çapı **18**
2.7 Optik Fiber Sensörler **19**
2.7.1 Modülasyon tabanlı optik fiber sensörler **20**
2.7.2 İnterferometrik optik fiber sensörler **22**
3. KURAMSAL TEMELLER **24**
3.1 İnceltilmiş Optik Fiber (İOF) Sensörleri Algılama Prensibi **24**
3.1.1 İOF sensörün geometrik profili **26**
3.1.2 İOF sensörün adiabatiklik koşulu **27**
3.1.3 Optik fiberde stres ve gerinim etkisi **30**
3.1.4 İOF sensörün sıcaklık, gerinim ve kırılma indisi tepkisi **32**
3.2 Kalınlaştırılmış Optik Fiber (KOF) Sensörleri Algılama Prensibi **33**
3.3 Izgara Desenli Optik Fiber Sensörlerin Algılama Prensibi **38**
3.4 Çift Izgara Desenli Sensör Yapısı ve Algılama Prensibi **41**
4. MATERYAL ve YÖNTEM **43**

4.1 İOF Sensörü İnceltme Teknikleri 43
4.1.1 Elektrik ark tekniği 43
4.2 Optik Fiberin İnceltilmesi için Geliştirilen Düzenek 44
4.3 Gerinim Ölçüm Düzeneği 49
4.4 Sıcaklık Ölçüm Düzeneği 50
4.5 Sıcaklık ve Gerinim için Eş Zamanlı Ölçüm Tekniği 51
5. BULGULAR ve TARTIŞMA 53
5.1 Simülasyon Sonuçları 53
5.1.1 İOF sensörü tasarımı ve simülasyon sonuçları 53
5.1.2 KOF-İOF sensörü tasarımı ve simülasyon sonuçları 55
5.1.3 Izgara desenli sensör tasarımı ve simülasyon sonuçları 58
5.1.4 Çift ızgara desenli sensör tasarımı ve simülasyon sonuçları 60
5.2 Deneysel Sonuçlar 62
5.2.1 İOF sensörü ölçüm sonuçları 62
5.2.1.1 İOF sensörü tipik spektrumu ve mod analizi 63
5.2.1.2 İOF sensörü ile gerinim ölçümü 65
5.2.1.3 İOF sensörü ile sıcaklık ölçümü 68
5.2.1.4 İOF sensörü eş zamanlı sıcaklık ve gerinim ölçüm sonuçları 71
5.2.1.5 İOF sensör deneysel ölçüm tekrarlanabilirliği 71
5.2.2 KOF-İOF sensörü ölçüm sonuçları 73
5.2.2.1 KOF-İOF sensörü tipik spektrumu ve mod analizi 76
5.2.2.2 KOF-İOF sensörü ile gerinim ölçümü 77
5.2.2.3 KOF-İOF sensörü ile sıcaklık ölçümü 80
5.2.2.4 KOF-İOF sensörü eş zamanlı sıcaklık ve gerinim deneysel sonuçları 81
5.2.2.5 KOF-İOF sensör deneysel ölçüm tekrarlanabilirliği 82
5.2.3 Izgara desenli sensörün ölçüm sonuçları 84
5.2.3.1 Izgara desenli sensör tipik spektrumu ve mod analizi 85
5.2.3.2 Izgara desenli sensör ile gerinim ölçümü 86
5.2.3.3 Izgara desenli sensör ile sıcaklık ölçümü 88
5.2.3.4 Izgara desenli sensör eş zamanlı sıcaklık ve gerinim ölçüm sonuçları 89
5.2.3.5 Izgara desenli sensör için deneysel ölçüm tekrarlanabilirliği 90
6. SONUÇLAR 91

KAYNAKLAR 95
ÖZGEÇMİŞ.....101

SİMGELER DİZİNİ

ϕ	Faz farkı
λ	Dalgaboyu
$n_{öz}$	Öz kırılma indisi
$n_{kılıf}$	Kılıf kırılma indisi
2w	Spot çapı
V	V sayısı
Λ	Izgara periyodu
T	Sıcaklık
σ	Stres
ε	Gerinim
Y	Young sabiti
ν	Poisson oranı
F	Kuvvet
A	Alan
E	Elektrik alan şiddeti
d_p	Sızma derinliği
$n_{öz}$	Öz kırılma indisi
$n_{kılıf}$	Kılıf kırılma indisi
n_{etk}	Etkin kırılma indisi
I	Işık şiddeti
Ω	Yerel incelme açısı
z_b	Atım uzunluğu
z_t	Yerel incelme uzunluğu
β	Yayılma sabiti
λ_{dip}	Dip dalgaboyu
λ_{rez}	Rezonans dalgaboyu
ξ	Termal-optik katsayısı
ΔL	Boyca uzama
F	Kuvvet
R_F	İnceltilmemiş fiber çapı
$R_{İOF}$	İnceltilmiş fiber çapı
R_{KOF}	Kalınlaştırılmış fiber çapı
p	Fotoelastik sabiti
α	Termal-genişleme katsayısı

Kısaltmalar

BPM	Işın yayılma metodu
FBG	Kısa periyotlu ızgaralar
İOF	İnceltilmiş optik fiber
KOF	Kalınlaştırılmış optik fiber

LPG	Uzun periyotlu ızgaralar
MZI	Mach-Zehnder girişim ölçer
OSA	Optik spektrum analizör
PWM	Sinyal genişlik modülasyonu
SLD	Süper-ışıma diyotu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Optik fiberin yapısı 8
Şekil 2.2 a. Tek damarlı ve b. Çok damarlı fiberler 10
Şekil 2.3 Mod alan çapı 19
Şekil 2.4 Optik fiber sensör genel çalışma prensibi 20
Şekil 2.5 Mach-Zehnder girişim ölçer 23
Şekil 3.1 İOF sensör geometrisi 24
Şekil 3.2 Azalan çaplı sol geçiş bölgesi (Harun vd. 2013) 28
Şekil 3.3 Fiberin yatay eksende boyca uzaması 31
Şekil 3.4 KOF-İOF sensör geometrisi 34
Şekil 3.5 KOF sensörü mikroskop görüntüsü 34
Şekil 3.6 Izgara desenli optik fiber sensörü (LPG) 38
Şekil 3.7 Çift ızgara desenli sensör 41
Şekil 4.1 Optik fiber sensör üretim düzeneği 45
Şekil 4.2 Üretim düzeneği elektriksel şeması 46
Şekil 4.3 Üretim düzeneği şematik gösterimi 46
Şekil 4.4 Optik fiber inceltme düzeneğinin kontrol yazılım kodunun akış şeması 48
Şekil 4.5 Gerinim ölçüm düzeneği 50
Şekil 5.1 Simülasyon amaçlı İOF sensör tasarımı 54
Şekil 5.2 İOF sensörün kırılma indisi spektrumu 54
Şekil 5.3 İOF sensörün kırılma indisi hassasiyeti 55
Şekil 5.4 Simülasyon amaçlı KOF-İOF sensör tasarımı 56
Şekil 5.5 KOF-İOF sensörün kırılma indisi spektrumu 57
Şekil 5.6 KOF-İOF sensörün kırılma indisi hassasiyeti 57
Şekil 5.7 Simülasyon amaçlı ızgara desenli sensör tasarımı 58
Şekil 5.8 Izgara desenli sensörün kırılma indisi spektrumu 59
Şekil 5.9 Izgara desenli sensörün hassasiyeti 59
Şekil 5.10 Simülasyon amaçlı çift ızgara desenli sensör tasarımı 60
Şekil 5.11 Çift ızgara desenli sensörün kırılma indisi spektrumu 61
Şekil 5.12 Çift ızgara desenli sensörü kırılma indisi hassasiyeti 61
Şekil 5.13 Üretilen İOF sensörün mikroskop görüntüsü 62
Şekil 5.14 İOF sensörünün hava ortamında tipik spektrumu 63
Şekil 5.15 İOF sensör transmisyon spektrumunun hava ortamında Fourier dönüşümü 64
Şekil 5.16 İOF sensörün farklı gerinim değerleri için transmisyon spektrumu 66
Şekil 5.17 İOF sensörü a. dipA, b. dipB ve c. dipC dip noktalarının gerinim değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü 67
Şekil 5.18 İOF sensörünün gerinim hassasiyeti 68
Şekil 5.19 İOF sensörünün farklı sıcaklıklar için transmisyon spektrumu 68
Şekil 5.20 a. dipA, b. dipB ve c. dipC bölgelerinin sıcaklık değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü 70
Şekil 5.21 İOF sensörün sıcaklık hassasiyeti 70
Şekil 5.22 İOF sensörünün tekrarlanan gerinim ölçüm sonuçları 72

Şekil 5.23 İOF sensörünün tekrarlanan sıcaklık ölçüm sonuçları 72
Şekil 5.24 a.KOF ve b. İOF mikroskobik görüntüsü 74
Şekil 5.25 KOF transmisyon spektrumu 75
Şekil 5.26 KOF-İOF sensörü tipik spektrumu 76
Şekil 5.27 İOF sensörün transmisyon spektrumunun Fourier dönüşümü 77
Şekil 5.28 KOF-İOF sensörünün farklı gerinim değerleri için transmisyon spektrumu 77
Şekil 5.29 KOF-İOF sensörü a. dipA, b. dipB ve c. dipC bölgelerinin gerinim değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü 79
Şekil 5.30 KOF-İOF sensörünün gerinim hassasiyeti 79
Şekil 5.31 KOF-İOF sensörünün farklı sıcaklıklar için transmisyon spektrumu 80
Şekil 5.32 KOF-İOF sensörünün sıcaklık hassasiyeti 81
Şekil 5.33 KOF-İOF sensörünün tekrarlanan gerinim ölçüm sonuçları 83
Şekil 5.34 KOF-İOF sensörünün tekrarlanan sıcaklık ölçüm sonuçları 83
Şekil 5.35 Çift ızgara desenli sensör üretim düzeneği 84
Şekil 5.36 Çift ızgara desenli sensörün mikroskop görüntüsü; a. Izgara-1 ve b. Izgara-2 85
Şekil 5. 37 Çift ızgara desenli sensörünün tipik spektrumu; İç şekil: Spektrumun Fourier dönüşümü 86
Şekil 5.38 Çift ızgara desenli sensörün gerinim spektrumu; İç şekil: Sol-dip ve sağ-dip 87
Şekil 5.39 Çift desenli sensörün gerinim hassasiyeti 87
Şekil 5.40 Çift ızgara desenli sensörün sıcaklık hassasiyeti. İç şekil: Çift ızgara desenli sensörün transmisyon grafiği ve dip noktalarının büyütülmüş görüntüsü 88
Şekil 5.41 Çift ızgara desenli sensörün tekrarlanan gerinim ölçüm sonuçları 90
Şekil 5.42 Çift ızgara desenli sensörün tekrarlanan sıcaklık ölçüm sonuçları 90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 İOF sensörde uyarılan modlar ve etkin kırılma indisleri 65
Çizelge 5.2 KOF-İOF sensörünün gerinim ve sıcaklık hassasiyetlerinin literatür karşılaştırması 82
Çizelge 5.3 Izgara-1 ve Izgara-2 parametreleri 85
Çizelge 5. 4 Çift ızgara desenli sensörün sıcaklık ve gerinim hassasiyetlerinin literatür karşılaştırması 89

1. GİRİŞ

Son birkaç on yılda internet, elektronik ticaret, bilgisayar ağları, ses ve görüntü multimedya transferleri içerikli bilgi trafiği muazzam büyüklükte veri transferi gerektirmektedir. Yüksek bant genişliği ile bu veri trafiği ihtiyacına en iyi çözüm olan optik fiberlerin kullanımı ve talebi gün geçtikçe artmaktadır. Optik fiberler, bakır-koaksiyel kablo, uydu ve radyo gibi diğer veri iletişim sistemleri ile karşılaştırıldığında birtakım avantajlar sunmaktadır: 200 km' ye kadar sinyal tekrarlama gerektirmeme, elektrik taşımadığı için elektromanyetik girişimden etkilenmeme, hafif olma, ucuz maliyet, yüksek veri güvenliği, uydu sistemlerinden çok daha uzun süreli kullanım ömürleri, -40 ^{o}C ile 80 ^{o}C arasında tipik çalışma aralıkları. Optik fiberler bu üstün özellikleri ile haberleşme ve bilgi teknoloji ağlarında temel konumundadır ve gelecek nesil platformlarda da odak noktası olmayı sürdürecektir.

Haberleşme amaçlı kullanılan tek-modlu optik fiberler silindirik yapıda iç içe geçmiş öz ve onu çevreleyen kılıftan oluşmaktadır. Fiber özü germanyum ile katkılanarak özün kırılma indisi kılıfa göre artırılır ve fiber içerisinde ilerleyen ışık tam iç yansımaya uğrayarak fiber içerisinde kalır. Bu tasarım sayesinde, gönderilecek bilgi uzun mesafeler boyunca fiberin bir ucundan diğer ucuna minimum kayıpla iletilir. Optik fiberler tek damarlı ve çok damarlı olarak üretilmektedirler. Tek kılıf içerisine birden çok özün yerleştirilmesiyle üretilen çok damarlı fiberler ile aynı iletişim hattında bant genişlikleri çok yüksek oranlara çıkarılabilmektedir.

Optik fiberler modern haberleşme sistemlerinde mükemmel bir iletişim hattı olmasının yanında son yıllarda algılama sistemlerinde yoğun bir araştırma konusu haline gelmiştir. Optik fiberlerin uzun mesafeli bilgi iletimini düşük kayıpla sağlayabilmesi üstün bir özellik olmasına rağmen dış çevreyi algılama amaçlı kullanımlar için uygun değildir. Optik fiberde ilerleyen ışığın dış ortamla etkileşmesi sağlanarak ışık parametrelerinin modülasyonu ile algılama amaçlı kullanımı sağlanmaktadır.

Araştırmacılar, 1990'lı yıllardan günümüze kadar gerek üretim kolaylığı ve gerekse yüksek duyarlılıkları nedeniyle farklı optik fiber algılayıcı tasarımları geliştirmişler ve bunları farklı ortam büyüklüklerini algılamak üzere test ederek performanslarını analiz etmişlerdir. Günümüz teknolojisinde, ölçülecek büyüklüğün niteliğine bağlı olarak mekanik, elektriksel, kimyasal, biyokimyasal ve optiksel pek çok sensör türü geliştirilmiştir. Optik fiber sensörler, küçük, hafif, elektrik ve manyetik ortamdan etkilenmeme, çok hızlı cevap verme, yüksek duyarlılık, uzaktan algılama ve en önemlisi birden çok değişkeni eş zamanlı algılayabilme kabiliyetleri nedeniyle, özellikle son birkaç on yıldır araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir.

Literatür araştırmaları optik fiber sensörlerin sıcaklık, gerinim, kırılma, basınç, pH, yer değiştirme, dönme, titreşim, nem, radyasyon, gaz, sıvı seviyesi, biyolojik ve kimyasal maddeler, gerçek zamanlı medikal monitarizasyonu ve inşaat, makine, uçak mühendisliklerinde deformasyon takibi gibi pek çok alanda birçok parametreyi algılayabildiğini göstermiştir. Elektrikle değil ışıkla çalıştığı için petrol, doğalgaz üretim ve iletim tesislerinde, nükleer santrallerde ve nükleer tıp gibi yanıcı, patlayıcı, yüksek radyasyon ya da yüksek oranda elektromanyetik dalga yayan ortamlarda çalışabilmesi, birden çok değişkeni eş zamanlı algılayabilmesi optik fiber sensörlerin önemini bir kat daha artırmıştır.

Optik fiberi algılama amaçlı kullanmanın bir yolu, fiber çapını azaltmaktır. Bu sayede hem sönümlenen dalga güçlendirilir hem de çap azaldığı için dış ortam ile etkileşim sağlanır. Fiberin bir bölgesinin çapının azaltılması ile üretilen sensörler literatürde inceltilmiş optik fiber (İOF) sensörler olarak bilinmektedir. Standart fiber özünde temel modda ilerleyen optik gücün ışık mod alan uyumsuzluğundan dolayı kılıf modlarına ayrışması ve incelme bölgesi çıkışında temel mod ile kılıf modlarının girişimini esas almaktadır. Optik fiberi algılama amaçlı kullanmanın diğer bir yolu, önceki yöntemin tam tersi olarak fiberin bir bölgesini kalınlaştırmaktır ve bu tür sensörler kalınlaştırılmış optik fiber (KOF) sensörler olarak bilinmektedir. KOF sensörler, iki standart fiberin özel amaçlı füzyon birleştiriciler ile birbiri içine doğru itilerek bir bölgesinin kalınlaştırılması ile o bölgede optik yol farkı oluşturulması esasına dayanmaktadır. Kalınlaştırılmış bölge çıkışında faz farkından dolayı fiber çıkış spektrumunda girişim

gözlenmektedir. Fiber sensör tasarımında başka bir yöntem, fiber kırılma indisinin periyodik modülasyonu ile ızgara tasarımıdır ve bu tür sensörler ızgara desenli sensörler olarak bilinmektedir. Uzun periyotlu ızgara (LPG) ve kısa periyotlu ızgara (FBG) sensör tasarımında en sık karşılaşılan yapılardır. Izgara tabanlı sensörler, fiberin bir bölgesinin kırılma indisinin farklı yöntemlerle periyodik modülasyona uğratılması ile çıkış spektrumunda rezonsans dalgaboyları merkezli zayıflama bantları oluşturulması ilkesine dayanmaktadır. Her üç sensör yapısında çıkış spektrumu dış ortam parametrelerinden etkilenmekte ve spektrumda değişimler gözlemlenmektedir. Değişimin monitorize edilmesi ile istenilen parametre bu sensörler ile algılanabilmektedir. Yüksek hassasiyeti, düşük maliyeti ve en önemlisi çoklu parametreleri algılama yeteneklerinden dolayı İOF sensörler, KOF sensörler ve ızgara desenli sensörler dış ortam parametrelerini algılamak için üstün birer aday haline gelmiştir.

Birden çok parametrenin eş zamanlı ölçümü optik fiber sensörlerde önemli bir başlıktır ve birtakım avantajlar getirmektedir. Bunlardan birincisi, ölçülecek ortamda her iki parametrenin aynı anda değiştiği ve parametreler arasında çapraz-hassasiyet olduğu durumlarda çözüm sunmasıdır. Diğeri ise algılama sisteminde birden çok sensöre gerek duyulmadan hem düşük maliyetli hem de karmaşık olmayan sistemler kurulmasına imkan sağlamaktadır. Bu duruma örnek olarak; gerinim ölçen sensör üretildiği malzeme olan silikanın iç yapısından dolayı sıcaklık artışından etkilenmektedir ve bu iki parametreyi birbirinden ayırt etmek gerekmektedir. Bu durumun üstesinden gelmenin bir yolu sıcaklık ve gerinim ölçümlerini ayrık olarak gerçekleştirip analitik yöntemlerle sıcaklık doğrulamalı gerinim veya gerinim doğrulamalı sıcaklık değerleri elde etmektir.

Araştırmacılar farklı fiber malzemeleri ve farklı geometrilerdeki İOF, KOF ve ızgara desenli sensörleri araştırmanın yanı sıra birtakım metotlarla bu sensörlerin kombinasyonu olan sensör türevleri geliştirmişlerdir. Öz çapı farklı fiberler ile oluşturulan kombinasyonlar, öz çapları aynı olup belirli bir eksen sapması ile birleştirilen fiberler, dikey eksenine oyuk yerleştirilerek hava boşluğu oluşturulan fiberler, özel fiber türleri kullanımı ve bunların hibrit konfigürasyonları en sık karşılaşılan metotlardır.

Literatürde bu hibrit yapılar ile farklı parametreleri algılamak için pek çok çalışma yapılmıştır: LPG ile yüksek-çift kırınımlı fiber halka aynası kombinasyonu (Frazão vd. 2006), FBG ile çok-modlu fiberi birleştirme (Zhou vd. 2008), periyodik olarak dizilen mikro inceltmeli ızgaralar (Yoon vd. 2012), tek-modlu fibere yazdırılan FBG' nin S formunda inceltilmesi (Li vd. 2013), LPG ile polarizasyon korumalı fiber halka aynasının uçuca eklenmesi (Chu vd. 2014), FBG ile çok-modlu fiberin füzyon birleştirme ile eklenmesi ile elde edilen yapının iki tek-modlu fiber arasına yerleştirme (Sun vd. 2015). Bu sensör yapıları yeterli hassasiyete sahip olmalarına rağmen karmaşık yapıya sahiptirler. Diğer taraftan özel fiberler tabanlı Mach-Zehnder girişim ölçerler ile de sensör tasarımları gerçekleştirilmiştir: standart fiberin dikey kesitine femtosecond laserle fiber merkezine oyuk açılıp tekrar standart fiberle birleştirilen sensör tasarımı ile optik yol farkı oluşturulması (Chen vd. 2015), iki KOF yapısının sıralı eklenmesi (Dong vd. 2015), iki standart fiber arasına ince özlü fiberin eksen sapması ile eklenmesi (Zhou vd. 2014), öz-olmayan çok-modlu fiberin inceltilmesi (André vd. 2012), CO2 lazer ile tek-modlu fibere Z şekli verilmesi (Zhang vd. 2017). Bu tasarımların dezavantajı, üretim maliyetlerinin yüksek olması ve/veya özel tür fiberlere gereksinim duyulmasıdır.

Bunun yanında, ön inceltme işlemi ile çapı azaltılan fiberlerin üzerine LPG yazdırılması ile üretilen sensör tasarımları araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Örneğin, kalın çaplı ön-inceltme fiberi üzerine yazdırılan tek LPG ile periyodik olarak mikro-inceltme tasarımı (Yoon vd. 2013) ve oldukça düşük çaplı ön-inceltme üzerine mikro ızgara yazdırılması ile kırılma indisi algılama çalışmaları yapılmıştır (Navruz vd. 2018).

Diğer taraftan gerinim ve sıcaklık ölçümleri için LPG yapı içeren bazı hibrit optik fiber girişim ölçer tabanlı sensör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu hibrit yapılar, farklı tekniklerle üretilen LPG' ler, İOF yapı üzerine yazdırılan LPG' ler ve özel tür fiber kullanan yapılardır. Femtosecond ve CO_2 lazerle yazdırılan uçuca eklenmiş iki LPG (Zhang vd. 2018), bir tanesi kimyasal olarak aşındırma yöntemi ile inceltilmiş fiber üzerine yazdırılan LPG ile standart fiber üzerine yazdırılan LPG' den oluşan çift LPG tasarımı (Jiang vd. 2015), filaman ısıtma ve CO_2 lazerle üretilen iki LPG kombinasyonu (Yang vd. 2015) literatürde yer bulan tasarımlardır. CO_2 lazer, femtosecond lazer ve filaman ısıtma teknikleri pahalı cihazlar gerektirmekte ve işlem süreçleri karmaşıktır.

Bu tasarımların yanı sıra bazı araştırmacılar füzyon birleştiriciler kullanarak LPG ile mikro-küre yapılarını seri olarak bağlamışlar (Ascorbe vd. 2017) ve tek-modlu fibere üzerine LPG yazdırarak (Du vd. 2018) gerinim ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Fakat füzyon birleştiricilerdeki fiber tutucularının kısıtlı hareket kapasitesi LPG üretimine de sınırlar getirmektedir. (Najari vd. 2015) tarafından sıcaklığa duyarsız fotonik kristal fiber ile standart fibere yazdırılan LPG' lerin birleştirilmesiyle sensör tasarlanmış ancak tasarımın özel tür fiber bağımlılığı vardır.

Son olarak, inceltilmiş fiberleri temel alan sensörler tasarlanmıştır: yüksek eğimli geçiş bölgesine sahip iki inceltme geometrisi füzyon birleştirme ile tasarlanması (Tian vd. 2008a), eş zamanlı kırılma indisi ve sıcaklık ölçümleri için inceltilmiş Mach-Zehnder girişim ölçer (Lu vd. 2009), eş zamanlı yer değiştirme, sıcaklık ve kırılma indisi eş zamanlı ölçümleri için standart haberleşme fiberi 10 μm' ye kadar inceltme (Kieu vd. 2006). Bu tasarımlarda, fiberlerin inceltme işlemleri füzyon birleştiriciler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve fiber tutucular yaklaşık 1 mm hareket kapasitesine sahiptir ve üretilen sensörün bel çapı ve uzunluğuna sınırlama getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, eş zamanlı gerinim ve sıcaklık ölçümleri için optik fiber sensör tasarımları gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçları analiz edilmiştir. Deneysel çalışmalar öncesi, simülasyon yöntemleri ile farklı tasarımlar yapılarak kırılma indisine hassasiyetleri hesaplanmıştır. 3 farklı sensör için geliştirilen tasarım, önerilen üretim tekniği ve elde edilen sıcaklık ve gerinim sonuçları ile literatüre kazandırılmıştır.

Birinci tasarımda, elektrik ark tekniği kullanılarak standart tek modlu fiber ile İOF yapısı elde edilmiş ve eş zamanlı gerinim/sıcaklık hassasiyetleri ve çözünürlükleri analiz edilmiştir. Işığın yayılma metodu (BPM) simülasyonları yapılmış ve ardından girişim spektrumunun Fourier analizleri ile sensör çıkış spektrumuna katkıda bulunan uyarılan modlar belirlenmiştir. Ayrık ölçümlerde sensörün sıcaklık/gerinim hassasiyetleri ve eş zamanlı ölçümlerde sıcaklık/gerinim çözünürlükleri matris yöntemiyle hesaplanmıştır.

İkinci sensör tasarımında, KOF ile İOF yapıları seri olarak eklenerek KOF-İOF sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. KOF yapısı programlanabilir füzyon birleştirici ile iki fiberin birleştirilmesi ile üretilmiştir. İOF yapısı, elektrik ark metodu ile üretilmiş ve ilk tasarıma göre bel çapı artırılıp ve bel uzunluğu kısaltılarak kırılmaya karşı daha dayanıklı bir sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü sensör tasarımı, İOF yapısı üzerine yazdırılan 2 farklı ızgara deseni ile gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmamızda Navruz vd. (2018) tarafından üretilen sensör kırılma indisi ölçümlerinde yüksek hassasiyet ile başarılı sonuçlar vermiştir. Bu sensöre çoklu-kanal dalgaboyu seçiciliği kazandırmak için ikincil bir ızgara deseni eklenerek çıkış spektrumunda iki farklı rezonans dalgaboyu elde edilmiştir. Farklı rezonans dalgaboylarının sıcaklık ve gerinime farklı tepkiler vermesi ile bu parametrelerin eş zamanlı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, optik fiber türleri, ışığın modal yayılma analizi, ışığın yayılma metodu ile simülasyonu için teorik analiz ve optik fiber sensör türleri detaylı olarak açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, İOF sensörlerin çalışma prensibi detaylı olarak açıklanmaktadır. Elektrik ark tekniği ile üretilmek istenilen İOF sensör geometrik profili için matematiksel yaklaşım incelenmiştir. Kılıf modlarının uyarılması için gerekli geçiş bölgesi geometrik yapısının adiabatiklik koşulu detaylı olarak incelenmiştir. İOF sensörlerde gerinim formülasyonu ile sıcaklık, gerinim ve kırılma indisine bağlı dalgaboyu kayması analiz edilmiştir. Bunun yanında, KOF sensör çalışma prensibi ve üretim tekniği anlatılmıştır. KOF-İOF sensör tasarımında sensör çapı farklılığından kaynaklı sensör üzerinde oluşan gerinim değişimi detaylı olarak analiz edilmiştir. Son olarak, ızgara desenli sensörlerin çalışma prensibi ve üretim tekniği bu bölümde sunulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde İOF sensör inceltme teknikleri sunulmuştur. Optik fiberin inceltilmesi ve geometrik şekillendirilmesi için kullanılan üretim düzeneğinin çalışma

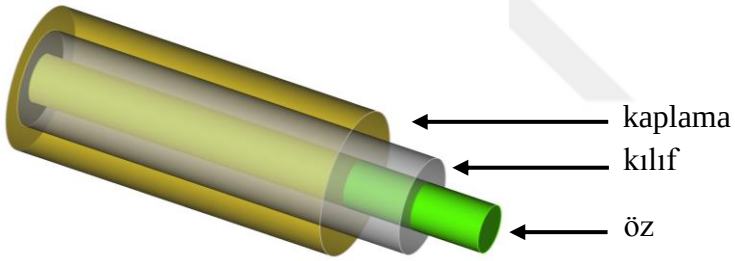
prensibi anlatılmıştır. Bu sensörlerin sıcaklık ve gerinim ölçümleri için kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır. İncelenen sensör türlerinin ayrık sıcaklık ve gerinim ölçüm sonuçlarının eş zamanlı ölçümlerde çözünürlüğünün hesaplanabilmesi için kullanılan matris yönteminin detayları bölüm sonunda sunulmuştur.

Tezin sonuç bölümünde, simülasyon ve deney çalışmalarından elde edilen sonuçlar özetlenerek yorumlanmış ve tezden elde edilen kazanımlar fiber sensörleri alanında çalışacak araştırmacıların dikkatine sunulmuştur.

2. OPTİK FİBERLERİN YAPISI, MOD YAYILIMI ve SENSÖR KARAKTERİSTİĞİ

2.1 Optik Fiberler, Yapısı ve Işığın İletimi

Optik fiber, bilgiyi bir noktadan diğer bir noktaya ışık formunda taşıyan etrafı plastik bir koruma katmanı ile kaplı çubuk şeklinde çok ince bir cam ortamıdır. Bakır iletim sistemlerinden farklı olarak elektriksel yapı içermemektedir. Basit bir optik fiber iletim sistemi, elektrik sinyali ışık sinyaline çeviren dönüştürücü, ışığı taşıyan optik fiber, ışık sinyalini tekrar elektrik sinyale çeviren alıcıdan oluşmaktadır. Şekil 2.1' de gösterildiği gibi cam çubuk öz olarak adlandırılan iç kısım ve onu çevreleyen kılıf katmanı olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Fiber özüne gönderilen ışık, öz ve kırılma indisi farkından dolayı tam iç yansımaya uğrayarak fiber ekseni boyunca ilerlemeye devam edebilmektedir.



Şekil 2.1 Optik fiberin yapısı

Fiber özü tarafından kabul edilen ışık demetlerinin karakteristiği sayısal açıklık (NA) değeri ile hesaplanır:

$$NA = \sin\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{2.1}$$

Burada, kabul açısı θ_a, öz ve kılıfın kırılma indisleri n_1 ve n_2 ile gösterilmiştir. Fiber tarafından kabul edilecek tam konik açı $2\theta_a$ kadar olmalıdır. Tam konik açı içerinde gelen ışınlar fiber özü aracılığıyla kılavuzlanabilmektedir.

Farklı açılarda öz içerisine giren ışınlar aynı yolu takip etmezler. Fiber özü merkezine yakın gelen ışınlar, yani küçük açılarla gelen, öz eksenine daha paralel ilerleyecekleri için daha kısa yol izlerler. Öz kenarına yakın gelen ışınlar, yani büyük açılarla gelen, daha zikzaklı bir yol izlerler ve dolayısıyla daha uzun yol alırlar. Farklı gelme açısı ve öze girme noktasından kaynaklı her bir yol fiberde bir moda karşılık gelmektedir. Bir optik fiberin taşıyabileceği mod sayısı M:

$$M = \frac{V^2}{2} \tag{2.2}$$

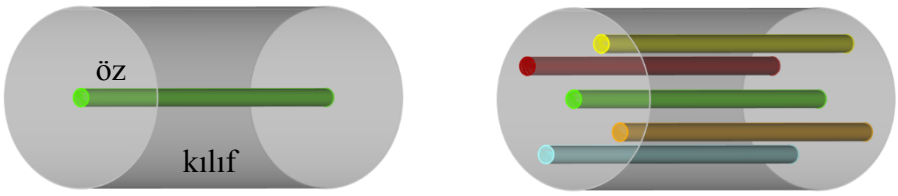
ile tanımlanır. Burada, V sayısı fiberin çapı, öz ve kılıf kırılma indislerine ve ışığın dalgaboyuna bağlı bir parametredir ve

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{2.3}$$

ile hesaplanır. Burada, fiber yarıçapı a, ışık dalgaboyu λ ile gösterilmiştir. Fiber yarıçapı, a, değerinin belli bir değere kadar azaltılarak V değerinin 2.405' ten az olması durumunda fiber tek bir modu desteklemektedir. Yarıçapın artırılmasıyla V>2.405' ten büyük olan durumlarda fiber birden çok modu desteklemektedir.

2.2 Optik Fiber Türleri

Şekil 2.2' de gösterildiği gibi optik fiberler, üretim esnasında kılıf içerisine yerleştirilen öz sayısına göre tek damarlı ve çok damarlı fiberler olarak sınıflandırılabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan tek damarlı fiberlerde tek bir öz, 125 μm çaplı kılıfın merkezine yerleştirilmiştir. Çok damarlı fiberler ortak bir kılıf içerisinde birden çok öz içermektedir. Öz sayısı, kılıf içerisine yerleştirilmesi ve kılıf çapı uygulama türüne göre değişmektedir.



(a) (b)

Şekil 2.2 a. Tek damarlı ve b. Çok damarlı fiberler

Optiksel açıdan tek damarlı ve çok damarlı fiberler her bir damardaki özün içerisinde taşıdıkları mod sayısına göre tek modlu ve çok modlu fiberler olarak iki grupta sınıflandırılırlar.

Çok modlu fiberlerin büyük öz çaplarından dolayı, ışınlar farklı yollar izleyerek (farklı modlar) fiber içerisinde ilerler. Büyük çaplarından dolayı ışık kaynağının kolayca eşleştirilmesi, ucuz ışık kaynakları ile kullanımı, konnektör ve birleştirme işlemi çok modlu fiberlerin önemli avantajlarındandır. Yüksek kayıp oranları, düşük bant genişlikleri nedeniyle kısa mesafeli bilgi taşıma kapasiteleri ise dezavantajlarıdır.

Fiber özündeki kırılma indisinin değişiminin şekillenmesine göre fiberler, kademeli indisli ve dereceli indisli olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Kademeli indisli çok modlu fiberlerde, özün kırılma indisi sabittir. Modların farklı optik yol almaları, fiber çıkış sinyalinde modal yayılmaya neden olur. Dereceli indisli fiberlerde öz kırılma indisi profili öz merkezinden kılıfa doğru azalmaktadır. Öz merkezine yakın yayılan modların optik yolu kısa olmasına rağmen yüksek kırılma indisi değerinden dolayı hızı düşüktür. Öz-kılıf arayüzüne yakın yayılan modların optik yolu daha uzun olmasına rağmen düşük kırılma indisi nedeni ile daha hızlıdır. Bu sayede her iki türdeki modlar yakın zamanlarda fiber çıkışına ulaşmakta ve modal yayılma etkisi minimuma inmektedir.

Tek modlu fiberlerin tipik öz ve kılıf çapları sırasıyla 5-12 μm ve 125 μm' dir. Tek modlu fiberler bant genişliği ve kayıp açısından çok modlu fiberlere göre oldukça yüksek performans sağlamaktadır. Öz çapının düşük olması nedeniyle sadece bir modu

desteklemektedirler, bu sayede modal yayılma etkisi yoktur ve yüksek bant genişliği gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3 Optik Fiberde Işığın Yayılımı

Öz yarıçapı a olan tek modlu fiberin kırılma indisi profili

$$n(r) = \begin{cases} n_{1,} & 0 < r < a, \quad \text{öz} \\ n_{2,} & r > a, \quad kılıf \end{cases} \tag{2.4}$$

Pratikte, standart fiberde öz ve kılıf kırılma indisi oransal farkı $\Delta=(n_1-n_2)/n_2 << 1$ olduğundan dolayı zayıf kılavuzlama yaklaşımı kullanılabilir. Bu yaklaşımda, modlar enine dalga (E alan vektörü ilerleme yönüne dik) alınıp ve x yada y polarize seçilebilir. Bu şekilde seçilen modlar LP modları olarak adlandırılmaktadır. Bu yaklaşıma göre, elektrik alanın dik bileşenleri (E_x yada E_y)

$$\nabla^2 \Psi = \frac{n^2}{c^2}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \tag{2.5}$$

dalga denklemini sağlamalıdır. Dalga denkleminin silindirik koordinatlarda çözümü (Trager 2012):

$$\Psi(r, \phi, z, t) = \psi(r, \phi)e^{i(\omega t - \beta z)} \tag{2.6}$$

Burada, açısal frekans ω, yayılma sabiti β ile gösterilmiştir. Eşitlik 2.6, fiberde ilerleyen bir modu tanımlamaktadır. 2.6 eşitliği, 2.5' te yerleştirilirse

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \left[k_o^2 n^2(r) - \beta^2\right]\psi = 0 \tag{2.7}$$

Ortamın silindirik simetrikliğinden dolayı eşitlik 2.7 değişken ayrımı metodu ile çözülebilir. ϕ açısı bağımlılığı cos lϕ yada sin lϕ formunda olacaktır. Bu durumda dik modal alan

$$\Psi(r,\phi,z,t) = R(r)e^{i(\omega t-\beta z)}\begin{cases}\cos l\phi\\ \sin l\phi\end{cases} \tag{2.8}$$

ile tanımlanabilir. Burada radyal kısım, R(r),

$$r^2\frac{d^2R}{dr^2} + r\frac{dR}{dr} + \left\{\left[k_o^2 n^2(r) - \beta^2\right]r^2 - l^2\right\}R = 0 \tag{2.9}$$

eşitliğini sağlamalıdır. Eşitlik 2.9' un çözümü, kılavuzlanan modlar ve radyasyon modları olarak ikiye ayrılabilir.

Optik ortamın etkin kırılma indisi (Trager 2012)

$$n_{etk} = \frac{\beta}{k_o} \tag{2.10}$$

ile tanımlıdır. β^2 değerinin

$$n_2^2 < \frac{\beta^2}{k_o^2} < n_1^2 \tag{2.11}$$

şartını sağlaması durumunda radyal alanlar, R(r), fiber özü içerisinde salınırlar ve kılıf içerisinde yok olurlar ve β değeri belirli değerler alabilir. Bu değerler kılavuzlanan modlar olarak bilinmektedir. Belirli bir l değeri için, doğrusal polarize olmuş modlar olarak bilinen birkaç LP_{lm} kılavuzlanan modu vardır, burada m=1, 2, 3 .. tamsayı değerleri almaktadır.

β^2 değerinin

$$0 < \frac{\beta^2}{k_o^2} < n_1^2 \tag{2.12}$$

şartını sağlaması durumunda radyal alanlar, R(r), hem fiber özü hem de kılıfı içerisinde salınırlar ve β değeri sürekli değerler alır. Bu değerler radyasyon modları olarak bilinmektedir.

Tek modlu fiber için eşitlik 2.9' un çözümü Bessel fonksiyonları, J_l ve K_l, formundadır (Trager 2012):

$$\psi(r,\phi) = \begin{cases} \dfrac{A}{J_l(U)} J_l\left(\dfrac{Ur}{a}\right)\left(\dfrac{Ur}{a}\right)\begin{pmatrix}\cos l\phi \\ \sin l\phi\end{pmatrix}, & r < a \\ \dfrac{A}{K_l(W)} K_l\left(\dfrac{Wr}{a}\right)\left(\dfrac{Wr}{a}\right)\begin{pmatrix}\cos l\phi \\ \sin l\phi\end{pmatrix}, & r > a \end{cases} \tag{2.13}$$

Burada, A sabit bir sayı, U ve W terimleri

$$U \equiv a\sqrt{k_o^2 n_1^2 - \beta^2}$$
$$W \equiv a\sqrt{\beta^2 - k_o^2 n_2^2} \tag{2.14}$$

ile tanımlıdır. Normalize V parametresi

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} = k_o a\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{2.15}$$

V parametresi optik fiberler için oldukça önemli bir parametredir. V<2.405 şartının sağlanması durumunda fiber sadece temel mod olarak bilinen LP_{01} modunu desteklemekte ve tek modlu fiberler olarak adlandırılmaktadır. V>2.405 durumunda, optik fiber birden çok modu desteklemekte ve çoklu modlu fiberler olarak adlandırılmaktadır.

2.4 Dik Alan Bileşenleri Olarak Dalga Denklemi

Optik dalga kılavuzları gibi homojen olmayan ortamlarda ışık yayılımının tam olarak anlaşılması için dik alan bileşenleri olan elektrik ve manyetik alanın dalga denklemlerinin yazılması gerekmektedir. Optik fiberlerde dalga yayılım yönünde kırılma indisi yavaş değişmektedir. Bu nedenle elektrik ve manyetik alan bileşenleri ayrıştırılabilir (Hu vd. 2020). Dalga denkleminin elektrik alan bileşeni monokromatik ışık kaynağı için tekrar yazılırsa

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} + \nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{E}) - n^2 k_o^2 \boldsymbol{E} = 0 \tag{2.16}$$

Elektrik alan dik ve enine bileşenlerine ayrılırsa

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{E}_{\perp}(\boldsymbol{r}) + E_z(\boldsymbol{r})\boldsymbol{u_z} \tag{2.17}$$

Burada

$$\boldsymbol{E}_{\perp}(\boldsymbol{r}) = E_x(\boldsymbol{r})\boldsymbol{u_x} + E_y(\boldsymbol{r})\boldsymbol{u_y} \tag{2.18}$$

Benzer şekilde ∇ diferansiyel operatörü dik ve enine bileşenlerine ayrılırsa

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{u_x} + \frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{u_y} + \frac{\partial}{\partial z}\boldsymbol{u_z} \tag{2.19}$$

elde edilir. Bu durumda 2.16 eşitliği

$$\nabla^2 \boldsymbol{E}_{\perp} + \nabla^2 E_z \boldsymbol{u}_z - \nabla\left(\nabla_{\perp} \cdot \boldsymbol{E}_{\perp} + \frac{\partial E_z}{\partial z}\right) + n^2 k_o^2 \boldsymbol{E} = 0 \tag{2.20}$$

Dik bileşenler açısından bu eşitlik

$$\nabla^2 \boldsymbol{E}_{\perp} - \nabla_t\left(\nabla_t \cdot \boldsymbol{E}_{\perp} + \frac{\partial E_z}{\partial z}\right) + n^2 k_o^2 \boldsymbol{E}_{\perp} = 0 \tag{2.21}$$

olarak yazılır. Diğer taraftan izotropik ve doğrusal olmayan ortamlar için Gauss yasası

$$\nabla_{\perp} \cdot (n^2 \boldsymbol{E}_{\perp}) + n^2 \frac{\partial E_z}{\partial z} + E_z \frac{\partial n^2}{\partial z} = 0 \tag{2.22}$$

olarak genişletilebilir. Dalganın yayılma yönünde kırılma indisi değişimi ihmal edilirse ($\partial n^2/\partial z \approx 0$), 2.22 eşitliğindeki elektrik alanın z bileşeninin kısmi türevi

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} \approx -\frac{1}{n^2} \nabla_{\perp} \cdot (n^2 \boldsymbol{E}_{\perp}) = -\frac{\nabla_{\perp} n^2}{n^2} \cdot \boldsymbol{E}_{\perp} - \nabla_{\perp} \cdot \boldsymbol{E}_{\perp} \tag{2.23}$$

Bu ifade 2.21 eşitliğine yerleştirilirse

$$\nabla^2 \boldsymbol{E}_{\perp} - \nabla_{\perp} \left(\nabla_{\perp} \cdot \boldsymbol{E}_{\perp} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) + n^2 k_o^2 \boldsymbol{E}_{\perp} = 0 \tag{2.24}$$

x ve y bileşenleri açısından elektrik alan ifadesi

$$\nabla^2 E_x + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial x} E_x \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial y} E_y \right] + n^2 k_o^2 E_x = 0 \tag{2.25}$$

$$\nabla^2 E_y + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial x} E_x \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial y} E_y \right] + n^2 k_o^2 E_y = 0 \tag{2.26}$$

elde edilir.

2.5 Işığın Yayılma Metodu (BPM)

Fotonik cihazların tasarım ve optimizasyonu için homojen olmayan ortamlarda dalga yayılımının sayısal tekniklerle simülasyonu gerekmektedir. Maxwell denklemlerinin çözümü ile elektromanyetik alan dağılımını hesaplayan birçok teknik geliştirilmiştir. Bunların arasında en popüler olanı sonlu farklı zaman tabanlı algoritmadır (FDTD) (Huang vd. 1992). Optik kılavuzlarda dik bileşenler dalgaboyu ile orantılı ifade

edilebilirken, ilerleme yönündeki boyutlar dalgaboyu büyüklüğüne göre aşırı büyüktürler. Bu nedenle FDTD metodu, dalga kılavuzları simülasyonlarında yüksek işlem zamanı gerektirmektedir. Bu metot yerine optik eksenle çok küçük açılar yapan paraksiyel ışınları kullanan paraksiyel yaklaşım tabanlı ışın yayılma metodu (BPM) geliştirilmiştir. Paraksiyel yaklaşım sadece paraksiyel ışınların yayılımını (genellikle z ekseni yönünde) kullanmaktadır. Optik gücün büyük bir kısmı dalga yayılma yönünde (z ekseni) taşınırken, yayılmanın tersi yönlerde güç akışı zayıftır.

Elektromanyetik dalganın elektrik yada manyetik alan bileşenleri ortamda hızlı değişmektedir ve değişim oranı dalgaboyu ebatlarındadır. Bu durum, simülasyon ortamının çok küçük hücrelerden oluşan bir örgü kullanımı gerektirir. BPM metodunda işlem zamanı problemini çözmek için referans bir kırılma indisi seçilerek hızlı değişen elektrik veya manyetik alan bileşenleri yerine x, y, z eksenlerinde yavaş değişen bir dalga tanımlanmaktadır ve bu yavaş değişen alan (SVEA) olarak adlandırılmaktadır. Bu sayede simülasyonu gerçekleştirilecek ortamın örgü alanı daha büyük hücrelere bölünerek işlem yükü azaltılır.

Optik fiberlerde ilk önerilen BPM metodu Fourier dönüşümü metodudur. Vektörel yayılım formülasyonu içermeyip sadece zayıf kılavuzlanma türü dalga kılavuzlarında skaler yayılıma izin vermektedir. Ayrıca yayılma örgü bileşenlerinin küçük olması nedeniyle uzun işlem zamanı gerektirmektedir. Bu dezavantajlarından dolayı, sınırlı fark BPM ve sınırlı eleman BPM algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmaların Fourier dönüşümlü BPM metoduna göre üstün özellikleri tam vektörel yayılma yapılabilmesi ve kısa işlem zamanı imkanı sunmalarıdır. Sınırlı fark BPM metodunda, dalga yayılma yönüne dik düzlemler dikdörtgensel örgülere ayrılmıştır. Her bir örgü noktasındaki elektrik alan bir sonraki noktanın elektrik alanını belirlemektedir. Sınırlı eleman BPM metodunda, dik düzlem köşe/düğüm elemanlarına ayrılmıştır ve dikey/enine alan bileşenleri her bir elemanın köşe/düğüm fonksiyonları olarak ifade edilmektedir. Simülasyonda elde edilmek istenilen doğruluğa bağlı olarak köşe/düğüm eleman sayısı değiştirilebilmekte ve bu sayede simülasyon süresi optimize edilebilmektedir. Sonuç olarak, sonlu elemanlı BPM metodu simülasyonu gerçekleştirilecek yapıyı istenilen ebatlara ayırabilme imkanı sağlarken, sınırlı fark BPM metodu dikdörtgen örgü

yapısıyla sayısal açıdan kolay uygulanabilir bir metottur. Her iki metodun da izotropik olmayan ve doğrusal olmayan dalga kılavuzlarına uygulanabilir olması en önemli özellikleridir.

Üç boyutlu bir dalga kılavuzunda z yönünde yayılan ve yayılma yönünde kırılma indisi değişimi yavaş olan bir dalga kılavuzu düşünelim. Dalga bileşenleri ilerleme yönünde ve dik yönde olmak üzere ikiye ayrılabilir. Dik elektrik alan bileşeni

$$\boldsymbol{E}_{\perp} = \boldsymbol{\Psi}_{\perp} e^{-in_o k_o z} \tag{2.27}$$

ile tanımlanabilir. Burada, yavaş değişen alan $\boldsymbol{\Psi}_{\perp}$, referans ortamın kırılma indisi (referans kırılma indisi) n_o ile gösterilmiştir. x ve y doğrultusunda SVEA bileşenleri Ψ_x ve Ψ_y ile gösterilebilir. Bu durumda elektrik alanın x ve y bileşenlerinin z eksenine göre ikinci türevleri (Pedrola 2015)

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = -\left[\frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial z^2} - 2in_o k_o \frac{\partial \Psi_x}{\partial z} - n_o^2 k_o^2 \Psi_x\right] e^{-in_o k_o z} \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -\left[\frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial z^2} - 2in_o k_o \frac{\partial \Psi_y}{\partial z} - n_o^2 k_o^2 \Psi_y\right] e^{-in_o k_o z} \tag{2.29}$$

Bu eşitliklerin 2.25 ve 2.26' da yerleştirilmesi ile yavaş değişen alanların x ve y bileşenleri

$$\frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial z^2} - 2in_o k_o \frac{\partial \Psi_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial x}\Psi_x + \frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial y}\Psi_y\right] + k_o^2(n^2 - n_o^2)\Psi_x = 0 \tag{2.30}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial z^2} - 2in_o k_o \frac{\partial \Psi_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial x}\Psi_x + \frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial y}\Psi_y\right] + k_o^2(n^2 - n_o^2)\Psi_y = 0 \tag{2.31}$$

SVEA yaklaşımına göre Ψ_x ve Ψ_y alanlarının z eksenine göre değişimi yavaş olduğundan

$$\frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial z^2} << 2n_o k_o \frac{\partial \Psi_x}{\partial z} \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial z^2} << 2n_o k_o \frac{\partial \Psi_y}{\partial z} \tag{2.33}$$

yaklaşımında bulunulabilir. Bu yaklaşımla 2.30 ve 2.31 eşitlikleri

$$\begin{aligned} & 2in_o k_o \frac{\partial \Psi_x}{\partial z} \\ &= \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial x}\Psi_x + \frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial y}\Psi_y\right] \\ &+ k_o^2(n^2 - n_o^2)\Psi_x \end{aligned} \tag{2.34}$$

$$\begin{aligned} & 2in_o k_o \frac{\partial \Psi_y}{\partial z} \\ &= \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial x}\Psi_x + \frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2}{\partial y}\Psi_y\right] \\ &+ k_o^2(n^2 - n_o^2)\Psi_y \end{aligned} \tag{2.35}$$

formuna dönüşür. 3 boyutlu dalga kılavuzları için tam vektörel BPM eşitlikleri 2.34 ve 2.35' te verilen eşitliklerdir. Başlangıç $\boldsymbol{\Psi}_\perp$ alanı bilinen bir durumda, dik alan bileşenlerinin z>0 konumlarındaki değişimi bu eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

2.6 Mod Alan Çapı

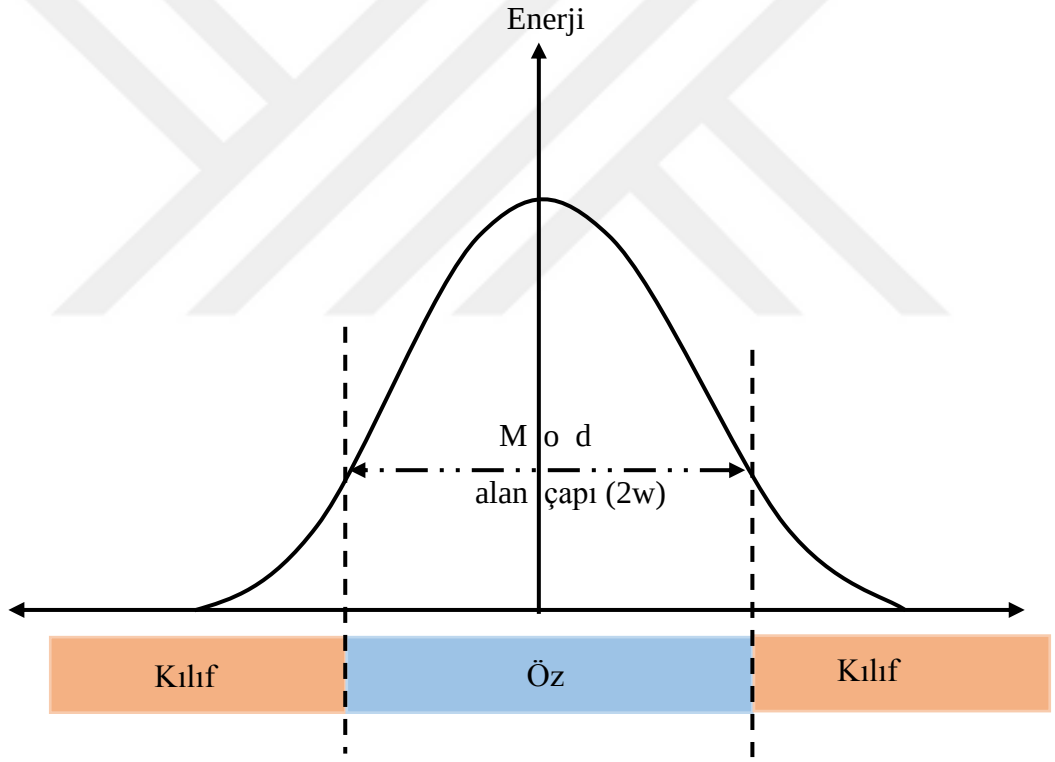
Tek modlu fiberlerde mod alan çapı, ışın dalga enerjisinin büyük bir kısmının geçtiği fiber bölgesini ifade etmektedir. Tek modlu fiberlerde, temel mod alan dağılımı Gauss dağılımına yakınsanabilir (Serway 2018):

$$\psi(x,y) = Ae^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2}} = Ae^{-\frac{r^2}{\omega^2}} \tag{2.36}$$

Burada, ω terimi mod alan dağılımının spot genişliği, 2w terimi mod alan çapıdır. Tek modlu fiberlerde empirik spot genişliği (Marcuse 1978)

$$\frac{w}{a} \approx 0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^{6}} \qquad (2.37)$$

ile ifade edilir. Örneğin; $n_{öz}$=1.45205, $n_{kılıf}$=1.44681, 2a=8.2 μm olan standart bir fiber 1550 nm dalgaboyunda mod alan çapı 10.2 μm olarak bulunur. Şekil 2.3' te gösterildiği gibi mod alan çapı öz çapından daha büyüktür, bu nedenle fiber içerisinde ilerleyen optik gücün küçük bir kısmı kılıf içine sızmakta ve üstel olarak zayıflayarak sönümlenen dalga olarak kılıf içerisinde ilerlemektedir.



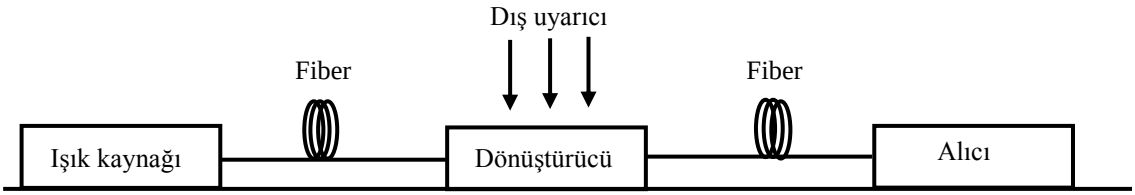
Şekil 2.3 Mod alan çapı

2.7 Optik Fiber Sensörler

Optik fiber sensörler, fiber özü içerisinde ilerleyen ışığın şiddeti, fazı, dalgaboyu ve polarizasyon durumunun dış ortam değişkeni tarafından modüle edilmesi prensibiyle algılama yapmaktadır. Bu açıdan modülasyon türüne göre ışık şiddeti, faz, dalgaboyu ve

polarizasyon olmak üzere 4 ana kategoride sınıflandırılabilir. Diğer bir sınıflandırmada ise kullanım alanlarına göre optik fiber sensörler fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal olarak ayrılırlar. Bir diğer sınıflandırma ise iç etkileşimli, dış etkileşimli ve her ikisinin hibrit bileşeni olan sönümlenen dalga sensörleri olarak yapılabilir. İçsel sensörlerde fiber içerisinde ilerleyen ışığın modülasyonu fiber içerisinde gerçekleşirken, dışsal senörlerde algılama harici bir optik elemanda gerçekleşir ve fiber sadece ışığı bu optik elemana taşıma görevi görür. Sönümlenen dalga sensörlerinde fiber, ışığı taşıma görevi görürken modülasyon yine fiber içerisinde gerçekleşir. Diğer taraftan, optik fiber sensörler algılama bölgesine göre nokta, dağıtılmış ve yarı-dağıtılmış olmak üzere 3' e ayrılabilir. Sonuç olarak, optik fiber sensörlerin kategorize edilmesinde kabul edilmiş bir standart yoktur.

Optik fiber sensör içeren algılama sistemlerinin genel çalışma prensibi Şekil 2.4' te gösterilmiştir. Algılama sistemi ışık kaynağı, optik fiber kablo, dönüştürücü ve alıcıdan oluşmaktadır. Işık kaynağı olarak lazer, LED ve lazer diyot türevleri kullanılırken, optik fiber kablo olarak tek-modlu, çok-modlu ve özel fiber türleri kullanılmaktadır. Fiber kablo türleri, fiber kablo deformasyonları ve optik elemanlar dönüştürücü olarak görev yapmaktadır ve algılama bu bölgede gerçekleşmektedir. Sensör çıkışı ışık algılama mekanizmasında, kullanılan dalgaboyuna cevap veren alıcılar içeren optik spektrum analizörler yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.4 Optik fiber sensör genel çalışma prensibi

2.7.1 Modülasyon tabanlı optik fiber sensörler

Dış ortam tarafından modüle edilen optik parametreler açısından optik fiber sensörler faz modülasyonlu, polarizasyon modülasyonlu, dalgaboyu modülasyonlu ve ışık şiddeti modülasyonlu olmak üzere 4 ana başlık altında toplanabilir.

Faz modülasyonlu optik fiber sensörler, fiber içerisinde ilerleyen iki ışık dalgası arasındaki optik yol farkından kaynaklı faz farkının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Ölçülecek büyüklük fiber sensörde ΔL kadar optik yol farkına neden olması durumunda faz farkı Δϕ (Righini vd. 2009)

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L \tag{2.38}$$

ile ifade edilir. Burada, fiberde ilerleyen ışığın dalgaboyu λ ile gösterilmiştir. Eşitlik 2.38' de sadece optik yol farkı dikkate alınarak faz farkı hesaplanmıştır. Ancak ışığın dalgaboyu da fiberin kırılma indisine bağlıdır. Dış ortam parametresi ile fiberin kırılma indisinin değişmesi durumunda faz farkı (Righini vd. 2009):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_o}(n\Delta L + L\Delta n) \tag{2.39}$$

Burada, λ_o fiber içerisinde ilerleyen ışığın dış ortam etkisi olmadığı durumdaki dalgaboyudur.

Dalgaboyu modülasyonlu sensörlerde, fiberde ilerleyen ışığın dış ortamla etkileşmesi ile dalgaboyundaki değişimi esas almaktadır (Rajan 2017). Bragg ızgara, florasan ve siyah-cisim sensörleri dalgaboyu modülasyonlu sensörlerdir. En yaygın kullanılan dalgaboyu modülasyonlu sensörler Bragg ızgara sensörleridir. Bragg ızgara sensörleri fiber özü kırılma indisinde periyodik değişimler meydana getirilerek üretilmektedir. Periyodik kırılma indisi modülasyonu ile ileri yayılma temel modundan geri yayılma temel moduna geçiş sağlanmaktadır. Resonant dalgaboyu olarak da adlandırılan Bragg dalgaboyu (Krohn vd. 2014)

$$\lambda_B = 2n_{etk}\Lambda \tag{2.40}$$

ile ifade edilir. Burada ızgara periyodu Λ, etkin kırılma indisi n_{etk} ile gösterilmiştir.

Işık şiddeti modülasyonlu sensörler, ilk kullanılan ve en basit optik fiber sensörlerdendir. Bu tür sensörler, fiber içerisinde ilerleyen optik sinyalin bükülme, yansıma veya dış ortamın değişmesi ile ışık şiddetinin modülasyonunu esas almaktadır (Rajan 2017). Kolay üretilmeleri, düşük maliyetleri ve basit algılama sistemleri öne çıkan avantajlarıdır. Işık şiddeti modüsayonlu sensörler basit yapıya sahip olmalarına rağmen fiberdeki bükülme, ışık kaynağı gücündeki dalgalanma gibi nedenlerden sinyal zayıflaması ve sinyal şiddeti kararsızlığı görülebilmekte ve bu durum sensör sisteminin güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Polarizasyon modülasyonlu optik fiber sensörler, çift kırınımlı optik fiberde ilerleyen ışığın polarizasyon durumunun iki farklı faz hızından dolayı değişim göstermesi ilkesini esas almaktadır. Polarizasyon durumu, fiberin maruz kaldığı stres, gerinim, basınç ve sıcaklıkla değişmektedir. Polarizasyon modülasyonu temel alan optik fiber sensörlerde bu polarizasyon değişimi ölçülmekte ve dış ortam değişkeni algılanmaktadır. Gerinim ve sıcaklık, fiberin uzunluğundaki (L) değişim her bir modun yayılma sabitini (β) etkilemektedir. Gerinim ve sıcaklığın değişimi ile meydana gelen faz farkı değişimi, ϕ, (Rajan 2017)

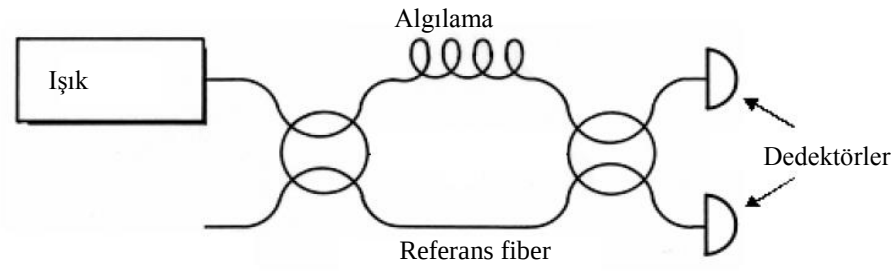
$$\frac{\delta(\Delta\phi)}{\delta X} = \Delta\beta \frac{\partial L}{\partial L} + L\Delta\beta \frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial X} \tag{2.41}$$

ile ifade edilir. Burada sıcaklık veya gerinim X ile gösterilmiştir.

2.7.2 İnterferometrik optik fiber sensörler

Faz kaymaları genellikle interferometrik yöntemler aracılığıyla ölçülmektedir. Optik fiber sensörlerde en sık kullanılan girişim ölçerler Mach-Zehnder, Sagnac ve Fabry-Perot girişim ölçerlerdir. Literatürde en yaygın kullan interferometrik sensörler Mach-Zehnder girişim ölçerlerdir.

Şekil 2.5’ te Mach-Zehnder girişim ölçerin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.5 Mach-Zehnder girişim ölçer

Mach-Zehnder girişim ölçerleri 2 ışın tabanlı girişim ölçerlerdir. Kaynaktan çıkan ışık ışın-bölücü ile 2 farklı kola ayrılır. Kollardan birisi ölçülecek dış ortama maruz bırakılırken, diğeri referans kolda yoluna devam etmektedir. Işın-birleştirici ile tekrar toplanan ışık spektrumunda yapıcı ve yıkıcı girişim meydana gelir. Kollarda oluşan faz farkı, ölçülecek parametre tarafından tetiklenen optik yol farkı ile orantılıdır. Hidrofonlar ile akım ve manyetik alan sensörlerinin temel çalışma prensibi Mach-Zehnder girişim ölçerlerdir.

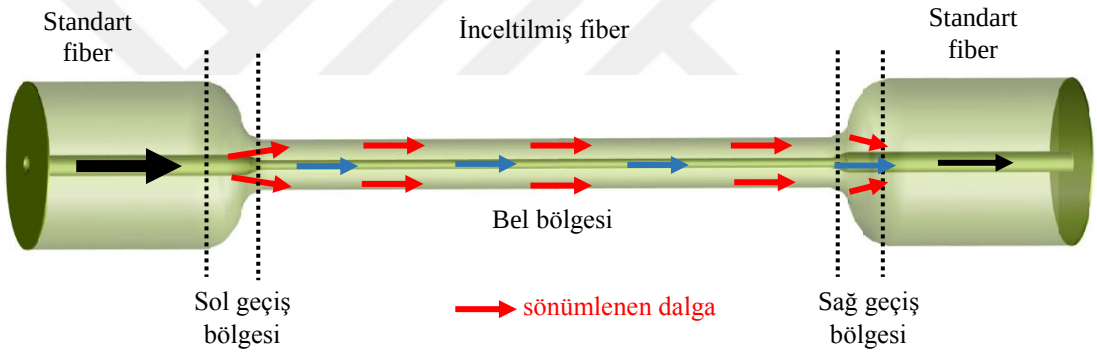
Sagnac girişim ölçerler 2 ışın bileşenli girişim ölçer olmaları açısından Mach-Zehnder girişim ölçerler ile benzerdir. Fibere gönderilen ışık ışın-bölücü ile ikiye ayrılarak aynı fibere ters yönde gönderilir. Fiberin bir bölgesi sarmal şeklindedir. Sarmal hareketsiz iken saat yönündeki ve tersi yöndeki ışınlar detektöre faz farkı olmadan ulaşır. Eğer sarmala dönme hareketi uygulanırsa, ışınlardan birisi diğerinden daha uzun yol alacağından her iki ışın arasında faz farkı oluşur. Jiroskoplar bu çalışma prensibini esas almaktadır.

Fabry-Perot girişim ölçerler referans fiber kullanmayan çoklu-ışın girişim ölçerleridir. Fiber içerisinde birden çok yansımadan dolayı girişim meydana gelir. Fiber sonuna eklenen ayna ile rezonans kavitesi oluşturulur. Kaviteden dolayı ışığın bir kısmı çoklu yansımaya uğrarken, bir kısmı da kavite içerisinde ilerlemeye devam eder. Dış ortam parametresine maruz kalan ışığın faz farkı her geçişte artmaktadır. Fabry-Perot girişim ölçerlerin sıcaklık ve basınç ölçümlerine uygun yapıları vardır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1 İnceltilmiş Optik Fiber (İOF) Sensörleri Algılama Prensibi

Fiber çapının lokal bir bölgede azaltılması ile üretilen algılama mekanizmaları İOF sensörler olarak bilinmektedir. İOF sensörlerin şematik gösterimi Şekil 3.1' de verilmiştir. İOF sensörler azalan çaplı sol geçiş bölgesi, sabit çaplı bel bölgesi, artan çaplı sağ geçiş bölgesi olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Sol ve sağ geçiş bölgelerinin uzunlukları eşit ise bu yapıya bikonik İOF sensörler denilmektedir. Fiberin çektirilme süresi, hızı, ısıtılma sıcaklığı gibi sensör üretim parametreleri değiştirilerek farklı geometrik yapılarda İOF sensörler üretilebilmektedir.



Şekil 3.1 İOF sensör geometrisi

Fiber inceltme işlemi ile fiber öz çapı azalmakta ve eşitlik 2.3' e göre V sayısı azalmaktadır. Eşitlik 2.37' ye göre V sayısının azalması ile mod alan çapı artmaktadır. Bu sayede ışığın kılıf içerisine giren kısmı artacak yani sönümlenen dalga daha kuvvetli olacaktır. Daha kuvvetli sönümlenen dalga ile fiber dış ortamla etkileşime geçer ve dış ortam değişiklikleri algılanabilmektedir.

Mod alan çapının artması sonucu, ışığın öz içerisine kılavuzlanma koşulu değişmektedir. Artık bu yeni durumda fiber kılıfı yeni öz, dış ortam da yeni kılıf olarak görev yapmaktadır. Eşitlik 2.3' te verilen V sayısı yerine $V_{kılıf}$ sayısı

$$V_{kılıf} = \frac{2\pi a_{ince}}{\lambda}\sqrt{n_{kılıf}^2 - n_{dış}^2} \quad (3.1)$$

ile ifade edilir. Burada inceltilmiş fiber yarıçapı a_{ince} ve dış ortam kırılma indisi $n_{dış}$ ile gösterilmektedir.

İnceltilmiş fiber sensörlerde, ışın demeti farklı modlara ayrılır. Bunlardan bir tanesi fiber özünde tam iç yansıma ile yoluna devam eden LP_{01} modudur ve temel mod olarak adlandırılmaktadır. Diğer modlar fiber kılıfı içerisinde ilerleyen yüksek dereceli LP_{lm} modlarıdır ve kılıf modları olarak adlandırılmaktadır.

İOF sensörlerde algılama, fiber özünde ilerleyen temel moddaki ışığın bir kısmının inceltme bölgesinde kılıfa sızarak kılıf-moduna geçmesi ve yayılma sabitleri farklı olan bu modların fiber çıkışında girişim yapması esasına dayanmaktadır. Sol geçiş bölgesine gelen temel moddaki ışığın bir kısmı birkaç yüksek dereceli kılıf modlarına geçiş yapar. Bu geçişin sebebi, öz çapının aniden azalması ile mod alan uyumsuzluğu oluşması ve ışığın artık fiber özüne hapsolamamasıdır. Farklı kılıf modları bel bölgesi boyunca farklı optik yolları takip ederek sağ geçiş bölgesine farklı zamanlarda ulaşır ve dolayısıyla aralarında faz farkı oluşur. Bu faz farkından dolayı, temel mod ile uyarılmış yüksek dereceli kılıf modları arasında sağ geçiş bölgesi çıkışında girişim meydana gelir. Aynı fazlı modlar arasında yapıcı girişim sonucu tepe noktaları ve farklı fazlı modlar arasında yıkıcı girişim sonucu dip noktalarından oluşan fiber çıkış spektrumu elde edilir. Optik fiber sensörü çevreleyen dış ortam şartlarındaki bir değişim, fiber çıkış spektrumundaki dip noktalarının daha uzun dalgaboylarına (kırmızı kayma) veya daha kısa dalgaboylarına (mavi kayma) kaymalarına neden olur. Bu dış ortam koşullarının değişim miktarı, spektrumdaki dip yada tepe noktalarının dalgaboyu kaymasının ölçülmesi ile hesaplanabilir.

Temel mod ile uyarılmış kılıf modları girişimi sonucu, fiber çıkışında elde edilen ışık şiddeti:

$$I = I_{öz} + I_{kılıf} + 2\sqrt{I_{öz}I_{kılıf}}\cos(\phi) \quad (3.2)$$

Burada fiber özünde ve kılıfında ilerleyen ışınların şiddeti $I_{öz}$ ve $I_{kılıf}$ ile gösterilmiştir. Temel ve kılıf modları arasındaki optik yol farkından dolayı oluşan faz farkı (Tian vd. 2008b):

$$\phi = \frac{2\pi \Delta n_{etk} L}{\lambda} \tag{3.3}$$

Burada $\Delta n_{etk} = n_{etk}^{öz} - n_{etk}^{kılıf}$ ifadesi öz ile kılıf modları arasındaki etkin kırılma indisi farkı, bel uzunluğu L, dalgaboyu λ ile gösterilmiştir Faz farkı (2m+1)λ ifadesine eşit olduğu durumda, yıkıcı girişim meydana gelir ve spektrumdaki dip dalgaboyu (Xia vd. 2010)

$$\lambda_{dip} = \frac{2\Delta n_{etk} L}{2m + 1} \tag{3.4}$$

ile bulunur.

3.1.1 İOF sensörün geometrik profili

Fiber inceltme işleminde, ısıtılan fiber bir ucundan veya her iki ucundan çektirilerek bel çapı azaltılmaktadır fakat toplam hacim korunmaktadır. Bel çapı değişimi ve boyca uzama arasındaki ilişki, hacim korunumu ilkesine göre hesaplanabilir. Kenny vd. (1991) tarafından fiber çektirme mesafesi ve ısıtılan bölge uzunluğu ile inceltilmiş fiber geometrisi arasındaki bağıntı matematiksel olarak gösterilmiştir. Bu bağıntılar kullanılarak, istenilen geometride İOF sensör üretilebilir.

Başlangıç yarıçapı r_o olan ve L_o uzunluğundaki sabit bölgesi bir ısı kaynağı ile ısıtılan fiberin, yatay eksende x mesafesi kadar uzatılması durumunda, fiberin incelen bölgesinin bel yarıçapı (Kenny vd. 1991)

$$r_{bel}(x) = r_0 exp^{-x/2L_o} \tag{3.5}$$

bağıntısı ile bulunur. Sağ ve sol geçiş bölgelerinin boylamsal eksende (z ekseni) yarıçap değişimi üsteldir:

$$r(z) = r_0 exp^{-z/L_o} \tag{3.6}$$

Isıtılan sabit bir bölge yerine doğrusal olarak değişen bir $L(x) = L_o + \alpha x$ bölgesi ısıtılması durumunda geçiş bölgesinin yarıçap profili

$$r(z) = r_0 \left[1 + \frac{2\alpha z}{(1-\alpha)L_0}\right]^{-1/2\alpha} \tag{3.7}$$

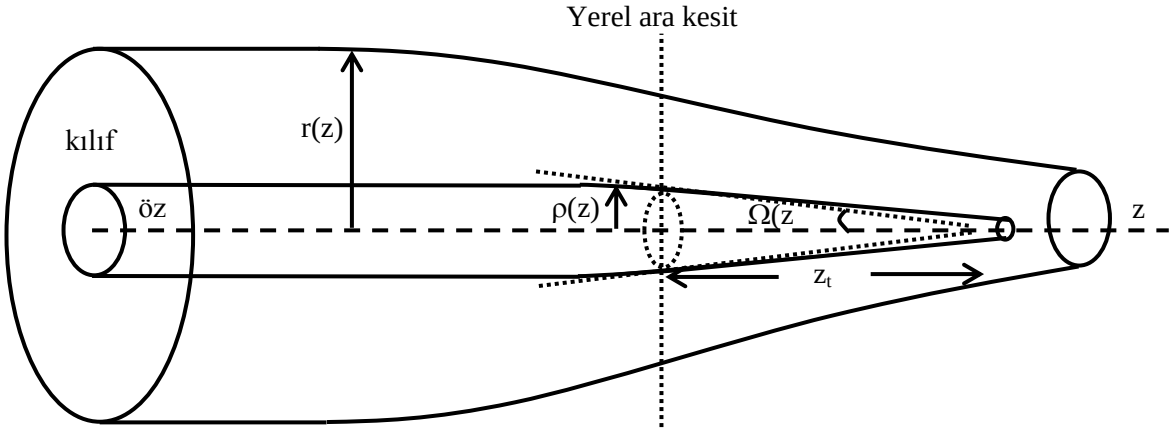
ile bulunur. α değerinin değiştirilmesiyle farklı geometrik profillerde İOF sensör üretilebilir.

α değerinin artmasıyla sensörün bel bölgesi uzamakta ve geçiş bölgesi açısı arttığından adiabatik-olmayan sensör karakteristiği sergilemektedir. Sabit ısı kaynağını belirten $\alpha=0$ durumunda bel bölgesi kısa kalmakta ve eğim açısı düşük olduğu için sensör adiabatik özellik göstermektedir.

3.1.2 İOF sensörün adiabatiklik koşulu

Fiber içinde ilerleyen dalganın alan dağılımı, geçiş bölgesindeki öz ve kılıf çaplarının değişimi ile farklılık gösterir. Bu çapların değişim oranı, ışığın temel modundan yüksek dereceli modlara enerji transferini belirler. Enerji transferi sonucu, fiber çıkışında önemli miktarda kayıp meydana gelmektedir. İnceltilmiş fiberin adiabatiklik şartını sağlaması durumunda, bu kayıp miktarı minimize edilebilir (Birks vd. 1992).

İnceltilmiş fiberin azalan çaplı sol geçiş bölgesi Şekil 3.2' de gösterilmiştir. z ekseni, inceltilmiş fiberin boylamsal konumu göstermektedir. Fiber girişim spektrumundaki maksimumlar arası mesafe, atım uzunluğu (z_b) olarak ifade edilmektedir



Şekil 3.2 Azalan çaplı sol geçiş bölgesi (Harun vd. 2013)

Adiabatiklik koşuluna göre, temel mod ile sol geçiş bölgesinden dolayı uyarılan ikincil mod arasındaki atım uzunluğu, yerel incelme uzunluğundan (z_t) daha kısa olmalıdır:

$$z_b < z_t \tag{3.8}$$

Şekil 3.2' ye göre yerel inceltme açısı

$$\Omega = \tan^{-1}\frac{d\rho}{dz} \tag{3.9}$$

Burada, ρ ve Ω sırasıyla yerel öz yarıçapı ve inceltme açısıdır. Pratikte Ω(z)<<1 olduğundan

$$z_t \approx \frac{\rho}{\Omega} \tag{3.10}$$

olarak yazılabilir. İki mod arasındaki yerel geçiş uzunluğu, atım uzunluğu (z_b=$z_b(z)$) olarak alınabilir. Pratikte atım uzunluğu, iki modun faz farkının 2π olduğu mesafedir. Temel mod ve ikincil yerel mod arasındaki yerel geçiş uzunluğu

$$z_b = \frac{2\pi}{\beta_1 - \beta_2} \tag{3.11}$$

Burada, β_1 ve $\beta 2$ temel ve uyarılan modun yayılma sabitleridir. Yayılma sabiti, ışığın dalgaboyuna ve etkin kırılma indisine bağlıdır:

$$\beta = kn_{etk} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{etk} \tag{3.12}$$

3.9 ve 3.11 eşitlikleri, 3.8 eşitsizliğine yerleştirilir ve tekrar düzenlenirse

$$tan\Omega < \frac{\rho(\beta_1 - \beta_2)}{2\pi} \tag{3.13}$$

eşitsizliği elde edilir. Eşitsizlikteki tanΩ terimi yerel öz yarıçapının değişimini göstermektedir.

İncelme bölgesinde $z_t >> z_b$ olması durumunda, ihmal edilecek seviyede modlar arası geçiş olur ve temel mod ihmal edilecek düzeyde kayıpla ilerlemeye devam eder. Bu tür sensörler adiabatik olarak bilinmektedir. Tam tersi durumda, ($z_t << z_b$) temel mod (LP_{01}) bir üst düzey moda (genellikle LP_{02}) geçiş yapar ve bu tür sensörler adiabatik-olmayan kayıplı sensörler olarak bilinmektedir. Buna göre, $z_t = z_b$ durumu her iki tür sensör arasındaki mod geçişi açısından kritik açıyı ifade etmektedir ve

$$\Omega_{kritik} = \frac{\rho(\beta_1 - \beta_2)}{2\pi} \tag{3.14}$$

olarak ifade edilir.

Lokal incelme açısı θ olsun. Eğer $\theta << \Omega_{kritik}$ ise modlar arasında geçiş oluşmayacaktır, tersi durumda, $\theta >> \Omega_{kritik}$ modlar arası geçiş gerçekleşecektir. Bu şartı temel alarak, fiber çapı azalma oranını düşük tutarak (düşük eğim) adiabatik sensörler üretilebilir. Bu durumda geçiş bölgesi uzunluğu artacaktır. Pratikte geçiş bölgesi bu şekilde uzun tutulması fiber sensörün kompakt yapısını bozmaktadır. Bu yüzden, kısa inceltilmiş fiber sensörler tercih edilmektedir. İnceltme uzunluğu ve çap azalma oranı arasındaki dengeyi sağlamak için bir f faktörü tanımlayarak (Harun vd. 2013)

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{f\rho(\beta_1 - \beta_2)}{2\pi} \tag{3.15}$$

eşitliği yazılabilir. Burada f değeri, eğimden dolayı 0 ile 1 arasında değerler alabilir. f=1 durumunda ideal profil elde edilir. Pratikte ise f=0.5 olduğunda ihmal edilebilecek kadar kayıplı, ancak geçiş bölgesi uzunluğu ideal profilin 2 katı kadar uzunlukta sensör üretilebilir.

İnceltme işlemi süresince, öz yarıçapı azaldıkça öz modunun etkin kırılma indisi (n_{etk}) de azalır. n_{etk} değeri kılıf kırılma indisine yaklaştığı zaman, LP_{01} öz modu artık kılavuzlanamaz ve $n_{hava} < n_{etk} < n_{kılıf}$ durumunda kılıf modları oluşur ve kılıf içerisinde ilerlemeye devam eder. Bu durum, öz modu kesim noktası olarak bilinmektedir. Öz-kılıf geçiş değeri olan $V_{öz}/V_{kılıf}$ ifadesi ile bir S parametresi tanımlanabilir (Black vd. 1986):

$$V_{\text{öz}/kılıf} = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{a}{2S}\sqrt{n_{\text{öz}}^2 - n_{kılıf}^2} \cong \sqrt{\frac{2}{lnS}}\left[1 + \frac{0.26}{lnS}\right]^{-1/2} \tag{3.16}$$

olarak verilmiştir. Burada kılıf çapı a ile gösterilmiştir. Örneğin, öz çapı 8.2 μm, kılıf çapı 125 μm ve dolayısıyla kılıf/öz çapları oranı S=15.24 olarak bulunur. Buradan $V_{öz}/V_{kılıf}$= 0.82 elde edilir. 1550 nm dalgaboyunda fiberin kırılma indisi değerleri $n_{öz}$=1.4581 ve $n_{kılıf}$=1.4536 olan bir fiber için, teorik olarak temel moddan kılıf modlarına geçiş için 125 μm kılıf çapının 51.1 μm' ye kadar inceltilmesi gerekmektedir. Farklı özellikteki fiberler için bu değer 40-50 μm arasındadır.

3.1.3 Optik fiberde stres ve gerinim etkisi

Stres, dışardan uygulanan bir kuvvetle katıların fiziksel yapısının deformasyona uğrama oranını gösteren bir niceliktir ve uygulanan kuvvetle doğru orantılıdır. Cismin birim yüzeyine (A) etki eden kuvvet (F) olarak stres (σ) terimi (Serway 2018)

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.17}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Gerinim ise, strese maruz kalan cismin deformasyon derecesinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Katılarda tam bozulmaya neden olmayacak derecede stres uygulandığında, gerinim stres ile doğru orantılıdır. Bu orantı sabitine esneklik sabiti denir. Esneklik sabiti cismin deforme olma derecesini göstermektedir. 3 tür deformasyon vardır ve her birine ait farklı esneklik sabitleri tanımlanmaktadır:

a. Young sabiti: Katı bir maddenin boyca uzamaya gösterdiği direncin ölçümüdür.
b. Eksen kayma sabiti: Katı bir maddenin iç yapısındaki düzlemlerin kayma hareketine direncidir.
c. Hacim esneklik sabiti: Katıların ve sıvıların hacimlerindeki değişmeye olan direncidir.

Şekil 3.3' te başlangıç uzunluğu L_o olan ve bir ucundan sabitlenmiş fibere yatay ekseni doğrultusunda bir F kuvveti uygulandığında uzunluğu ΔL kadar artacaktır.



Şekil 3.3 Fiberin yatay eksende boyca uzaması

Fiber üzerinde oluşan gerinim (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \tag{3.18}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Fiberin boyca uzamaya gösterdiği direnci ifade eden Young sabiti (Y),

$$Y = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{3.19}$$

(3.17)' nin (3.19)' da yerleştirilmesi ile gerinim ifadesi

$$\varepsilon = \frac{F}{A.Y} \tag{3.20}$$

formuna dönüşür. Buna göre, gerinim fiberin kesit alanı ile ters orantılıdır. Fibere uygulanan gerinim, 3.18 veya 3.20 eşitlikleri ile hesaplanabilir.

3.1.4 İOF sensörün sıcaklık, gerinim ve kırılma indisi tepkisi

Fiberin hammaddesi olan erimiş-silika, dış ortamdaki sıcaklık değişimine veya fiber kablo üzerine uygulanan bir kuvvete oldukça duyarlıdır. Şekil 3.1' de gösterilen İOF sensörün girişim spektrumundaki dip dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimi eşitlik 3.4' ün sıcaklığa bağlı türevi alınarak elde edilebilir:

$$\frac{\partial \lambda_{dip}}{\partial T} = \frac{2}{2m+1}\left[\Delta n_{etk}\frac{\partial L}{\partial T} + L\left(\frac{\partial n_{etk}^{\text{öz}}}{\partial T} - \frac{\partial n_{etk}^{kılıf}}{\partial T}\right)\right] \tag{3.21}$$

Burada, sıcaklık T, sensörün bel uzunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi ∂L/∂T, öz ve kılıfın etkin kırılma indislerinin sıcaklığa bağlı değişimi $\frac{\partial n_{etk}^{\text{öz}}}{\partial T} - \frac{\partial n_{etk}^{kılıf}}{\partial T}$ ile gösterilmiştir. Bel uzunluğu ve kırılma indisinin değişimi, hem fiberin uzama miktarını gösteren termal-genişleme katsayısına hem de silikanın kırılma indisinin sıcaklıkla değişimini gösteren termal-optik katsayısına bağlıdır. Silika için termal-genişleme katsayısı ve termal-optik katsayıları sırasıyla 0.55 x 10^{-6} /^{o}C ve 8.0 x 10^{-6} /^{o}C' dir (Lopez-Higuera 2002). Bu katsayılar, sensörün sıcaklık hassaslığında $\frac{\partial n_{etk}^{\text{öz}}}{\partial T} - \frac{\partial n_{etk}^{kılıf}}{\partial T}$ teriminin baskın olduğunu göstermektedir (Chen vd. 2012, Chen vd. 2015).

Sıcaklık artışı ile hem fiber özünün ve hem de kılıfının etkin kırılma indisi artar. Ge ile katkılanmış fiber özünün termal-optik katsayısı erimiş-silikadan yapılan kılıfa göre daha yüksek olduğundan, özün etkin kırılma indisindeki artış daha fazladır (Lu vd. 2009). Bu durumda, öz ile kılıf etkin kırılma indisleri farkı artmakta ve dip dalgaboyu transmisyon spektrumunda daha uzun dalgaboylarına kaymaktadır (kırmızı kayma).

Fiber ekseni boyunca gerinim uygulandığında, spektrumda dip dalgaboyu kayması eşitlik 3.4' ün gerinime bağlı türevi alınarak türetilebilir:

$$\frac{\partial \lambda_{dip}}{\partial \varepsilon} = \frac{2}{2m+1}\left[\Delta n_{etk}\frac{\partial L}{\partial \varepsilon} + L\left(\frac{\partial n_{etk}^{\text{öz}}}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial n_{etk}^{kılıf}}{\partial \varepsilon}\right)\right] \tag{3.22}$$

Burada fibere uygulanan eksenel gerinim ε ile gösterilmiştir ve ε=ΔL/L olarak tanımlanmaktadır. Fiberin ilk uzunluğu L, uygulanan gerinimden dolayı fiber uzunluğundaki değişim ΔL ile gösterilmiştir.

Benzer şekilde, eşitlik 3.4' ün dış ortam kırılma indisine, $n_{dış}$, göre türevi alınarak spektrumda dip dalgaboyu değişimi türetilebilir:

$$\frac{\partial \lambda_{dip}}{\partial n_{dış}} = -\frac{\frac{2L}{2m+1}\frac{\partial n_{etk}^{kılıf}}{\partial n_{dış}}}{1 - \frac{2L}{2m+1}\left(\frac{\partial n_{etk}^{\text{öz}}}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_{etk}^{kılıf}}{\partial \lambda}\right)} \tag{3.23}$$

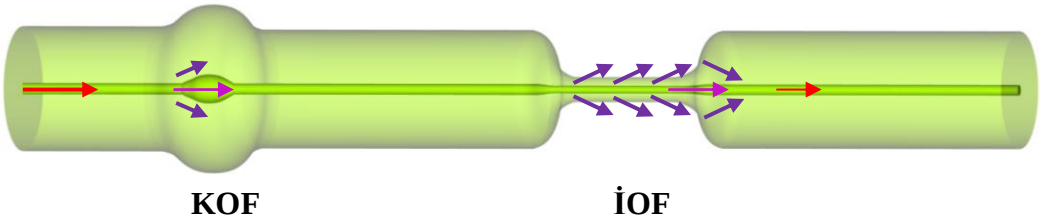
Fiber çapı azaltılırsa kılıf modlarının dış ortamdaki sönümlenen dalgası artar ve sensörün kırılma indisi hassasiyeti artar.

3.2 Kalınlaştırılmış Optik Fiber (KOF) Sensörleri Algılama Prensibi

KOF sensörü, iki fiberin füzyon birleştirici ile yüksek oranda iç içe geçirilmesi ile elde edilmektedir. Standart fiber birleştirmede, fiberlerin iç içe geçme uzunluğu genellikle 10 μm' dir. KOF sensör yapısında ise bu oran 100-150 μm arasındadır. Elde edilen KOF sensör geometrisi Şekil 3.4' te gösterilmiştir.

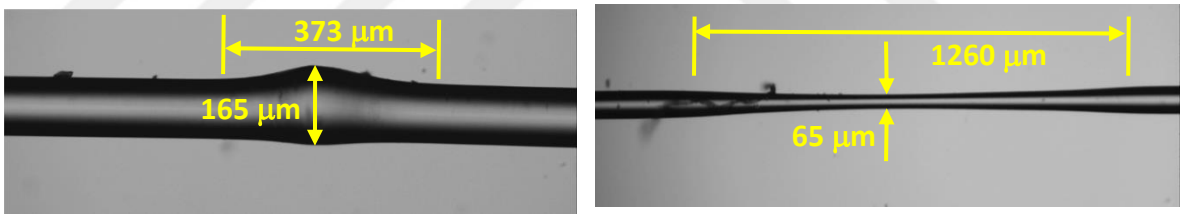
İOF sensör yapısının KOF sensör yapısı ile seri bağlanmasıyla KOF-İOF sensörü oluşturulmaktadır. Fiber içerisinde ilerleyen ışık İOF yapısı ile karşılaştığında, mod alan çapı uyumsuzluğundan dolayı kılıf modlarına uyarılır ve ışık ikiye ayrılarak bir kısmı öz içinde, diğer kısmı da kılıf içinde ilerlemeye devam eder. Sensördeki KOF yapısının

görevi, daha fazla sönümlenen dalga üreterek sensörün dış ortamla etkileşmesini sağlamaktır.



Şekil 3.4 KOF-İOF sensör geometrisi

Tez çalışmasında, KOF sensör yapısı iç içe geçme uzunluğu manuel olarak ayarlanabilen Fujikara FSM 60S model füzyon birleştirici ile üretilmiştir. İki fiberin füzyon birleştirme esnasında iç içe geçme uzunluğu 150 µm seçilmiş ve diğer füzyon parametreleri değiştirilmemiştir. Elde edilen tipik KOF yapısının mikroskop görüntüsü Şekil 3.5' te gösterilmiştir. Bel çapı 125 µm' den 165 µm' ye çıkarken bel uzunluğu 373 µm' dir.



Şekil 3.5 KOF sensörü mikroskop görüntüsü

KOF-İOF sensör yapısı, Mach-Zehnder girişim ölçer prensibine göre çalışmaktadır. KOF-İOF yapısı içerisinde, öz-modu ile birlikte bir tane kılıf-modu olduğu varsayılırsa, sensör çıkışındaki girişim şiddeti, I,

$$I^2 = I_{öz}^2 + I_{kılıf}^2 + 2I_{öz}I_{kılıf}\cos(\phi) \tag{3.24}$$

Eşitlikte öz modunun alan şiddeti $I_{öz}$, kılıf modunun alan şiddeti $I_{kılıf}$, aralarındaki faz farkı ise ϕ ile gösterilmektedir ve burada ϕ

$$\phi = \frac{2\pi \Delta n_{etk} L}{\lambda} \tag{3.25}$$

ile ifade edilir. $\phi=(2k + 1)\pi$ olması durumunda çıkış ışık şiddeti λ_{dip} değerine düşer ve 3.25 eşitliğinden

$$\lambda_{dip} = \frac{2\Delta n_{etk} L}{2k + 1} \tag{3.26}$$

bulunur.

KOF-İOF sensör yapısı bir Mach-Zehnder girişim ölçer olarak davrandığı için sensörün dip dalgaboyunun sıcaklık, gerinim ve kırılma indisine bağlı değişimi 3.21-3.23 eşitlikleri ile hesaplanabilir.

Şekil 3.4' te gösterilen KOF-İOF sensörü, birbirine seri bağlı KOF yapısı ve İOF yapısından oluşmaktadır. KOF, İOF ve işlem görmemiş standart fiber uzunlukları sırasıyla L_{KOF}, $L_{İOF}$ ve L_F olmak üzere sensörün toplam uzunluğu:

$$L = L_{İOF} + L_{KOF} + L_F \tag{3.27}$$

İOF yapısı, KOF yapısı ve fiberin kalınlıkları farklıdır ve dışardan uygulanan gerinime farklı mekanik direnç gösterirler, bu nedenle her birine etki eden gerinim farklı olacaktır. Sensörün bir ucu sabitlenip diğer ucuna kuvvet uygulanarak gerinim uygulandığında İOF, KOF ve fibere aynı F kuvveti etki eder:

$$F = \Delta\varepsilon_F Y A_F = \Delta\varepsilon_{KOF} Y A_{KOF} = \Delta\varepsilon_{İOF} Y A_{İOF} \tag{3.28}$$

Burada, fiber, KOF ve İOF yapılarındaki gerinimler ve kesit alanları sırasıyla ε_F, ε_{KOF}, $\varepsilon_{İOF}$, A_F, A_{KOF}, $A_{İOF}$ ile, Young sabiti ise Y gösterilmektedir. KOF, İOF ve fiber aynı malzemeden üretildiği varsayılırsa Young sabitleri aynı olacaktır ve 3.28 eşitliği

$$\Delta\varepsilon_F A_F = \Delta\varepsilon_{KOF} A_{KOF} = \Delta\varepsilon_{İOF} A_{İOF} \tag{3.29}$$

olarak sadeleştirilebilir. Eşitlik 3.29' da alanlar yerine konulursa KOF, İOF ve fiber arasındaki gerinim ilişkisi:

$$\frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_{KOF}} = \left(\frac{R_{KOF}}{R_F}\right)^2, \qquad \frac{\varepsilon_{KOF}}{\varepsilon_{İOF}} = \left(\frac{R_{İOF}}{R_{KOF}}\right)^2, \qquad \frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_{İOF}} = \left(\frac{R_{İOF}}{R_F}\right)^2 \tag{3.30}$$

Eşitlikte fiber, KOF ve İOF yapılarının çapları R_F, R_{KOF} ve $R_{İOF}$ ile gösterilmiştir. Diğer taraftan, eşitlik 3.18 ile verilen gerinim ifadeleri cinsinden

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta L_F}{L_F}, \qquad \varepsilon_{KOF} = \frac{\Delta L_{KOF}}{L_{KOF}}, \qquad \varepsilon_{İOF} = \frac{\Delta L_{İOF}}{L_{İOF}} \tag{3.31}$$

yazılabilir. Eşitlikte fiber, KOF ve İOF yapılarının uzunlukları ve artış miktarı sırasıyla L_F, L_{KOF}, $L_{İOF}$, ΔL_F, ΔL_{KOF}, $\Delta L_{İOF}$ ile gösterilmektedir. Sensöre etki eden toplam gerinim;

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_F + \Delta L_{KOF} + \Delta L_{İOF}}{L_F + L_{KOF} + L_{İOF}} \tag{3.32}$$

3.31 eşitliği 3.32' de yerleştirilirse toplam gerinim,

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_F L_F + \varepsilon_{KOF} L_{KOF} + \varepsilon_{İOF} L_{İOF}}{L_F + L_{KOF} + L_{İOF}} \tag{3.33}$$

elde edilir. 3.30 ve 3.33 eşitlikleri kullanılarak fibere etki eden gerinim, ε_F,

$$\varepsilon_F = \varepsilon_t \frac{L_F + L_{KOF} + L_{İOF}}{L_F + \left(\frac{R_F}{R_{KOF}}\right)^2 L_{KOF} + \left(\frac{R_F}{R_{İOF}}\right)^2 L_{İOF}} \tag{3.34}$$

olarak bulunur. Benzer şekilde KOF yapısına etki eden gerinim,

$$\varepsilon_{KOF} = \varepsilon_t \frac{L_F + L_{KOF} + L_{\text{İ}OF}}{\left(\frac{R_{KOF}}{R_F}\right)^2 L_{F+} L_{KOF} + \left(\frac{R_F}{R_{\text{İ}OF}}\right)^2 L_{\text{İ}OF}} \tag{3.35}$$

İOF yapısına etki eden gerinim,

$$\varepsilon_{\text{İ}OF} = \varepsilon_t \frac{L_F + L_{KOF} + L_{\text{İ}OF}}{\left(\frac{R_{\text{İ}OF}}{R_F}\right)^2 L_{F+} \left(\frac{R_{\text{İ}OF}}{R_{KOF}}\right)^2 L_{KOF} + L_{\text{İ}OF}} \tag{3.36}$$

bağıntıları ile hesaplanır. Örneğin, 125 μm çapında standart tek-modlu bir fiberin KOF yapısının çapı/uzunluğu 160/300 μm, İOF yapısının çapı/uzunluğu 18μm/30 mm olsun. Toplam uzunluk 150 mm olması durumunda, fiber/KOF/İOF yapılarına etki eden gerinim 7.9/7.6/383 με olarak bulunur. İOF yapısının çapı, fiber ve KOF yapısına göre çok küçük olduğundan, İOF yapısına etki eden gerinim en fazladır ve bu yüzden gerinime oldukça duyarlıdır.

İOF sensöründe ise sadece standart fiber ve İOF yapısı vardır. KOF-İOF sensöründeki benzer hesaplamalar yapılacak olursa, İOF yapısına etki eden gerinim,

$$\varepsilon_{\text{İ}OF} = \varepsilon_t \frac{L_F + L_{\text{İ}OF}}{\left(\frac{R_{\text{İ}OF}}{R_F}\right)^2 L_F + L_{\text{İ}OF}} \tag{3.37}$$

fibere etki eden gerinim ise,

$$\varepsilon_F = \varepsilon_t \frac{L_F + L_{\text{İ}OF}}{L_F + \left(\frac{R_F}{R_{\text{İ}OF}}\right)^2 L_{\text{İ}OF}} \tag{3.38}$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

3.3 Izgara Desenli Optik Fiber Sensörlerin Algılama Prensibi

FBG ve LPG olmak üzere literatürde iki tür ızgara yapısı yaygın olarak yer almaktadır. Üretim açısından aralarındaki temel fark ızgara periyodudur. FBG periyodu 100 μm' den kısa olup kısa periyotlu olarak da bilinmektedir, LPG periyodu genellikle 10-100 μm arasındadır. Diğer bir fark ise çalışma prensipleridir. LPG sensörü şematik gösterimi Şekil 3.6' da gösterilmektedir. LPG' lerde ileri-yayılma öz modu aynı yönde ilerleyen birkaç kılıf moduna geçiş yaparken, FBG' lerde ileri-yayılma öz modu Bragg dalgaboyunda geri yansıyan ters-yayılma öz moduna geçiş yapar. LPG' de birkaç kılıf moduna geçiş olduğundan çıkış spektrumunda birkaç zayıflama bandı görülürken, FBG' lerde sadece bir tane zayıflama bandı gözlemlenir.



Şekil 3.6 Izgara desenli optik fiber sensörü (LPG)

İlk LPG Vengsarkar vd. (1996) tarafından üretilmiştir. Fiber özündeki periyodik kırılma indisi değişimi ultraviole (UV) ışıma ile gerçekleştirilmiştir. UV ışıma LPG üretiminde çok yaygın bilinen bir metot olmasına rağmen karmaşık ve uzun üretim süreci bu metodun dezavantajlarıdır. Bu nedenle sonraki süreçlerde farklı üretim metotları geliştirilmiştir: elektrik-ark metodu, CO_2 lazer ışınlaması (Davis vd. 1998), mekanik zorlama (Cardenas-Sevilla vd. 2009), femtosecond lazer ışınlama (Kondo vd. 1999), UV ışınlama (Meltz vd. 1989) ve iyon atımı uygulaması (Fujimaki vd. 2000). Bu metotlar arasında, üretim kolaylığı ve her türden fibere uygulanabilme imkanı sunan ark metodu en yaygın kullanılanıdır.

Fiberin bir bölgesinin kırılma indisinin periyodik bozunumu kırılma ızgarası görevi yapar, bu nedenle LPG formülasyonu, kırılma eşitlikleri ile analiz edilebilir. Kırılma ızgarasına θ_1 açısı ile gönderilen ışık dalgası için ızgara eşitliği (Erdogan 1997a),

$$nsin\theta_2 = nsin\theta_1 + m\frac{\lambda}{\Lambda} \tag{3.39}$$

Eşitlikte m kırılma derecesi, θ_2 kırılma açısıdır. Mod yayılma sabiti

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) n_{etk} \tag{3.40}$$

ile ifade edilebilir, burada n_{etk}=n sinθ bağıntısı kullanılmıştır. 3.40 eşitliği, 3.39' da yerleştirilirse

$$\beta_2 = \beta_2 + m\frac{2\pi}{\Lambda} \tag{3.41}$$

bağıntısı elde edilir. Burada β_1 ve β_2 sırasıyla öz ve kılıf modlarının yayılma sabitleridir. LPG' nin rezonans dalgaboyu aşağıda belirtilen faz-eşleşme şartını sağlamalıdır (Vengsarkar vd. 1996):

$$\lambda_{res} = \left(n_{etk}^{\text{öz}} - n_{etk}^{kılıf,m}\right)\Lambda \tag{3.42}$$

Burada, m kılıf modu derecesini, λ_{res} rezonans dalgaboyunu, $n_{etk}^{\text{öz}}$ ve $n_{etk}^{kılıf,m}$ sırasıyla öz ve m' nci dereceden kılıf modlarının etkin kırılma indislerini göstermektedir. Faz-eşleşme şartını sağlayan rezonans dalgaboyları, öz modundan kılıf modlarına geçiş ile oluşan zayıflama bantlarının merkez dalgaboyunu göstermektedir.

Kılıf modundaki ışık, saçılma kayıplarından dolayı üstel olarak sönümlenir ve fiber çıkış spektrumunda kayıp bantları gözlemlenir. Faz-eşleşme şartına göre rezonans dalgaboyundaki kayma, ızgara periyodu ile öz ve kılıf modlarının etkin kırılma indislerine bağlıdır. Kayıp bantlarındaki minimum iletim:

$$T_m = 1 - sin^2(\kappa_m L) \tag{3.43}$$

ile ifade edilir. Burada, m 'nci kılıf modunun geçiş katsayısı κ_m, ızgara uzunluğu L ile gösterilmiştir. Geçiş katsayısı, öz ve kılıf modları çakışma integrali ile mod yayılma sabitinin büyüklüğü kullanılarak hesaplanmaktadır (Erdogan 1997b).

LPG' lerin kılıf yarıçapı büyük olduğundan çok miktarda kılıf modunu desteklemektedir. Kılıf modlarının derecesinin artması ile LPG' nin hassasiyeti artmaktadır (Gouveia vd. 2013). Faz-eşleşme eşitliğine göre uyarılan kılıf modlarının derecesi, ızgara periyodu ile öz ve kılıf modlarının etkin kırılma indisi farkına bağlıdır.
LPG' lerin sıcaklık hassasiyeti temel olarak faz-eşleşme şartı ile verilen rezonans dalgaboyuna bağlıdır. Faz-eşleşme şartının sıcaklığa bağlı türevi ile LPG sıcaklık hassasiyeti hesaplanabilir (Dianov vd. 1996):

$$\frac{d\lambda_{res}}{dT} = \frac{\Lambda\left(\frac{\delta n_{etk}^{öz}}{\partial T} - \frac{\delta n_{etk}^{kılıf,m}}{\partial T}\right) + \frac{\lambda}{\Lambda}\frac{d\Lambda}{dT}}{1 - \Lambda\left(\frac{\delta n_{etk}^{öz}}{\partial \lambda} - \frac{\delta n_{etk}^{kılıf,m}}{\partial \lambda}\right)} \tag{3.44}$$

LPG' lerin içsel yapıları çevre sıcaklığı değişimine duyarlıdır ve bu yüzden rezonans dalgaboyunun sıcaklık bağımlılığı LPG' leri sıcaklık algılamada önemli bir aday haline getirmektedir. Eşitlik 3.44' teki silikanın genişleme katsayısı $\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\frac{d\Lambda}{dT}\right)$ küçük değerler almaktadır, bu yüzden hassasiyet daha çok öz ve kılıf modlarının etkin kırılma indisi farkına bağlıdır (Dianov vd. 1996). Sıcaklığın artmasıyla rezonans dalgaboyları uzun dalgaboylarına kaymaktadır (kırmızı kayma).

Eksenel gerinim LPG' ler için diğer önemli bir parametredir. LPG' nin gerinim hassasiyeti eşitlik 3.42' de verilen faz-eşleşme şartının gerinime bağlı türevinin alınması ile elde edilebilir (Bhatia 1999):

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\varepsilon} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{etk})}\left(\frac{dn_{etk}^{öz}}{\partial \varepsilon} - \frac{dn_{etk}^{kılıf,m}}{\partial \varepsilon}\right) + \Lambda\frac{d\lambda}{d\Lambda} \tag{3.45}$$

Gerinim hassasiyeti öz ve kılıf modlarının etkin kırılma indisi farkına bağlıdır. Diğer taraftan, herhangi bir kılıf modunun yerel eğimine, dλ/dΛ, terimine bağlıdır. Her iki

etkiden gelen terimlerin büyüklüğü, rezonans dalgaboyunun kısa veya uzun dalgaboylarına kayma yönünü belirlemektedir.

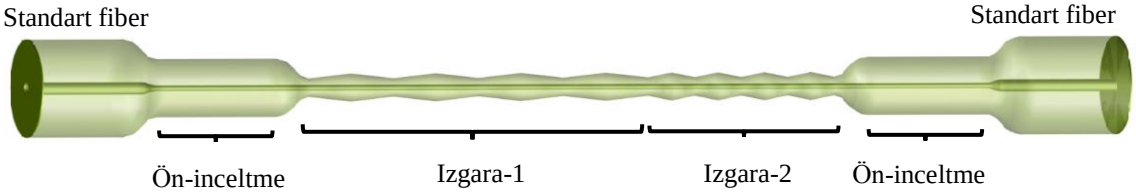
Ortam kırılma indisi n içerisine yerleştirilen LPG' lerin rezonans dalgaboylarının kırılma indisine bağlı değişimi (Bhatia 1999)

$$\frac{d\lambda}{dn} = \frac{d\lambda}{dn_{etk}^{kılıf,m}} \frac{dn_{etk}^{kılıf,m}}{dn} \tag{3.46}$$

ile hesaplanabilir. Her bir kılıf modu için $\frac{dn_{etk}^{kılıf,m}}{dn}$ terimi özgün değerler alır. Spektral kayma yönü, dλ/dΛ eğrisinin eğimine göre değişmektedir.

3.4 Çift Izgara Desenli Sensör Yapısı ve Algılama Prensibi

Çift ızgara desenli sensörün şematik gösterimi Şekil 3.7' de gösterilmiştir. Üretim işlemi, ön-inceltme ve üzerine farklı ızgara deseni yazdırma olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. Tez çalışmasında her iki üretim işlemi elektrik ark metodu (Navruz vd. 2018) ile gerçekleştirilmiştir. Bu metot, fiberi yumuşama sıcaklığına kadar ısıtıp çektirme esasına dayanmaktadır.



Şekil 3.7 Çift ızgara desenli sensör

Temel modun ileri-kılıf modlarına dönüşümünden dolayı transmisyon spektrumunda bazı dalgaboylarında zayıflama bantları oluşur. Faz eşleşme prensibine göre periyodu Λ olan bir ızgara desenli sensörün eşitlik 3.42' de verilmiştir. Izgara desenli sensöre uygulanan gerinim, öz ve kılıf modları kırılma indisi farkında azalmaya neden olur

(Zhou vd. 2001). Eşitlik 3.42' ye göre etkin kırılma indisleri farkının azalması ile rezonans dalgaboyu kısa dalgaboylarına kayacaktır. Çift ızgara desenli sensöre dışardan gerinim uygulandığında, D ve d çaplarındaki ön-inceltme fiberi ve LPG kısımlarındaki kırılma indisi değişimi (Yoon vd. 2013),

$$\delta n_{D,d} = -\frac{1}{2} p [n_{D,d}(r)]^3 \varepsilon_{D,d} \tag{3.47}$$

ile ifade edilir. Burada, d ve D sırasıyla ön-inceltme ve LPG çapları, n_d ve n_D etkin kırılma indisleri, p fotoelastik sabiti, Y Young sabiti, $\varepsilon_D=F/(Y\pi D^2)$ ve $\varepsilon_d=F/(Y\pi d^2)$ uyarılan gerinimlerdir. Dışardan gerinim uygulandığında d ve D çaplarına etki eden krılma indisi farkı (Lin vd. 2001)

$$\Delta n(r) = \delta n_d - \delta n_D = -\frac{1}{2} p [n(r_D)]^3 \left[\frac{D^2}{d^2} - 1\right] \varepsilon_D \tag{3.48}$$

Gerinim hassasiyeti, 3.48 eşitliğinin faz eşleşme eşitliğinde yerleştirilip türevinin alınması ile bulunabilir (Yoon vd. 2013):

$$\frac{\partial \lambda_{res}}{\partial \varepsilon} = -\frac{\varepsilon_D}{2}\left(\frac{D^2}{d^2} - 1\right)\left(p^{\text{öz}}\left[n_{\text{öz},D}(r)\right]^3 - p^{kılıf}\left[n_{kılıf,D}(r)\right]^3\right)\Lambda + \frac{\partial \lambda_{res}}{\partial \Lambda}\frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \tag{3.49}$$

Burada, öz ve kılıf modlarının fotoelastik sabitleri ve etkin kırılma indisleri sırasıyla $p^{\text{öz}}$, $p^{\text{kılıf}}$, $n_{\text{öz},D}$ ve $n_{\text{kılıf},D}$ ile gösterilmektedir. Benzer şekilde, sensörün sıcaklık hassasiyeti (Yoon vd. 2013):

$$\frac{\partial \lambda_{res}}{\partial T} = \lambda_{res}\frac{\frac{\partial \lambda_{res}}{\partial \Lambda}}{n_{\text{öz},D}(r) - n_{kılıf,D}(r)}\left(\alpha + \frac{\xi_{\text{öz}} n_{\text{öz},D}(r) - \xi_{kılıf} n_{kılıf,D}(r)}{n_{\text{öz},D}(r) - n_{kılıf,D}(r)}\right) \tag{3.50}$$

Burada, termal-genişleme katsayısı α, öz ve kılıf bölgelerinin termal-optik katsayıları sırasıyla $\xi_{\text{öz}}$ ve $\xi_{\text{kılıf}}$ ile gösterilmiştir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1 İOF Sensörü İnceltme Teknikleri

Fiber sensörün üretiminde alevle ısıtma, kimyasal aşındırma ve elektrik ark teknikleri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Alevle ısıtma yönteminde (Bilodeau vd. 1988, Brambilla vd. 2004) fiberin dış plastik koruması sıyrılarak bir bölgesi hareketli alev kaynağı ile taranarak ısıtılırken, fiber her iki ucundan hareketli tutucular ile çektirilerek çapı azaltılmaktadır. Fiber çektirme hızı, alevin fiberi tarama hızı ve taranan bölgenin uzunluğu bilgisayar kontrollüdür. Çektirme hızının yavaş olması, sensörün geçiş bölgelerinin adiabatik yani düşük eğimli olmasına neden olmaktadır. Bu üretim tekniği ile geçiş bölgesi uzun sensörler üretilebilmektedir. Çektirme hızının artırılması ile geçiş bölgesi eğimi yüksek olan adiabatik-olmayan fiber sensörler üretilmektedir (Brambilla vd. 2004, Ozcan vd. 2007).

Kimyasal aşındırma metodunda, fiberin plastiği sıyrılmış kısmı yaklaşık %5' lik hidroflorik asit içine konularak aşındırılırken, fiberin aşınmasını istenmeyen bölgesi yağ içinde bırakılır (Pangaribuan vd. 1992). Bu metodun diğer metotlara göre üstünlüğü, tekrarlanabilirliğin yüksek olması ve adiabatik-olmayan sensörler üretilebilmesidir.. Dezavantajı ise, kullanılan kimyasalların zararlı olmasıdır.

4.1.1 Elektrik ark tekniği

Elektrik ark tekniğinde (Ishikura vd. 1986), ısıtma işleminde alev yerine elektrik ark kullanılmaktadır. Elektrik ark üretmek için gereken yüksek voltaj bir transformatör ile sağlanmaktadır. Bu voltaj yaklaşık olarak 30000 V olup havada yaklaşık 1 cm' ye kadar ark oluşturur. Literatürde fiber sensörü üretmek için füzyon birleştirici cihazın kendisi doğrudan kullanılmaktadır yada bunun yerine özgün tasarımlarla üretilmiş düzenekler kullanılmaktadır (Tian vd. 2008c, Li vd. 2011). Füzyon birleştirici kullanımının dezavantajı, fiberi tutucuların eksenel hareket kapasitesinin az olması (en fazla ~1-2 mm) ve dolayısıyla üretilen sensörlerin bel bölgesinin kısa kalmasıdır. Her iki tür ark

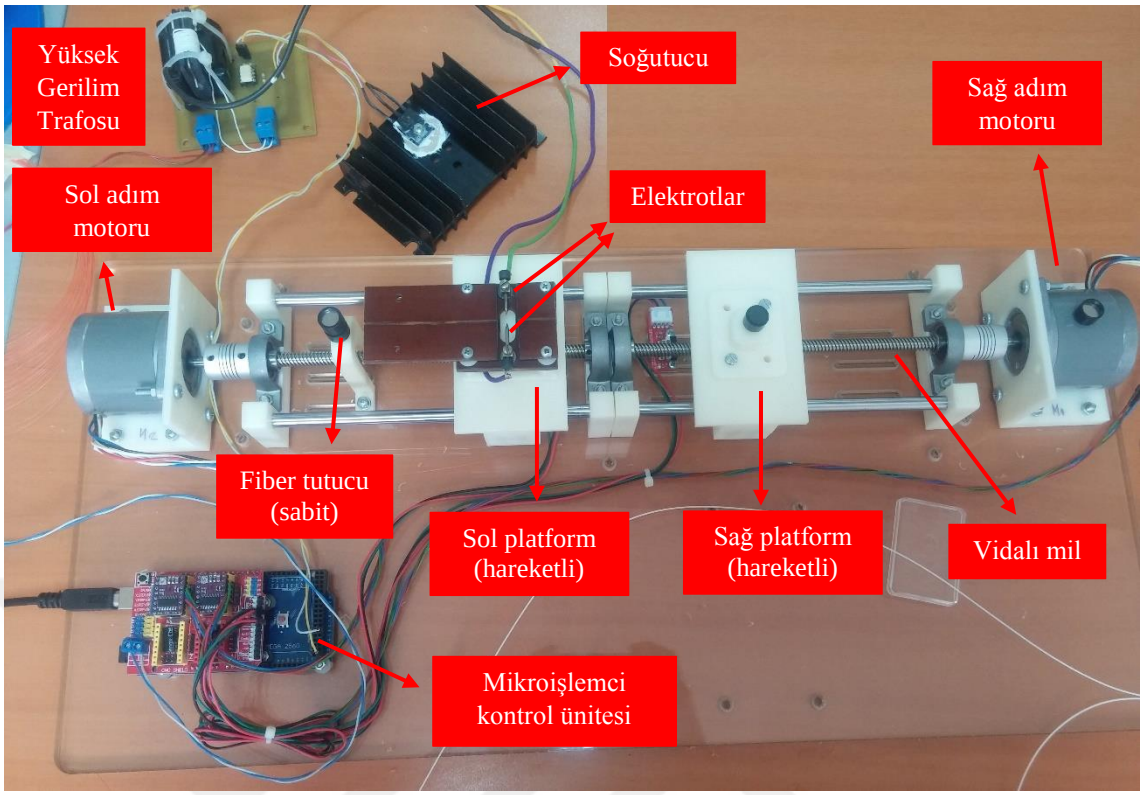
üretiminde yüksek sıcaklıklara dayanıklı elektrotlar kullanılmaktadır. Ark ile ısıtılan fiber, her iki ucundan zıt yönde çektirilmektedir. Uygun çektirme hızı, ivmesi ve ark şiddeti ayarlanarak istenilen geometrik parametrede sensör üretilebilmektedir.

4.2 Optik Fiberin İnceltilmesi için Geliştirilen Düzenek

Optik fiber sensörün inceltmesi ve geometrik şekillendirmesi için geliştirilen düzenek Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Fiber inceltme işleminde, elektrotlara yüksek voltaj uygulanarak ark elde edilerek fiberin bir bölgesi ısıtılmaktadır. Yüksek voltaj, trafo ve soğutucu üzerinde bulunan MOSFET transistör ile üretilmektedir. Ark gücü, sinyalin genişlik modülasyonu (PWM) ayarlanarak kontrol edilmektedir. Bu sayede, farklı şiddette ark elde edilebilmekte ve fiberin çok küçük bölgesel bir kısmı ısıtılabilmektedir.

Adım motorları ve ark parametreleri, Arduino Mega CNC shield mikroişlemci ile kontrol edilmektedir. Arkın konumunun sabit olması durumunda, fiberin hep aynı bölgesi ısıtılacağı için incelen bölge kısa kalacaktır. Çektirmeye devam edilmesi durumunda fiberde aşırı incelmeden dolayı kopma yaşanacaktır. Bunu engellemek için elektrotlar hareketli bir platforma yerleştirilmiştir. Elektrot uçları arası mesafe yaklaşık 3 mm' dir. Elektrot tutucu sol platform ve fiber tutucu sağ platform zıt yönde hareket ettirilerek istenilen uzunlukta ve istenilen geometrik şekle sahip inceltilmiş fiber üretilebilmektedir. Adım motorlarının hızları, ivmeleri, çalışma süreleri kontrol mikroişlemcisinden sağlanan sinyalin PWM boşluk doluluk oranı ayarlanarak kontrol edilmektedir.

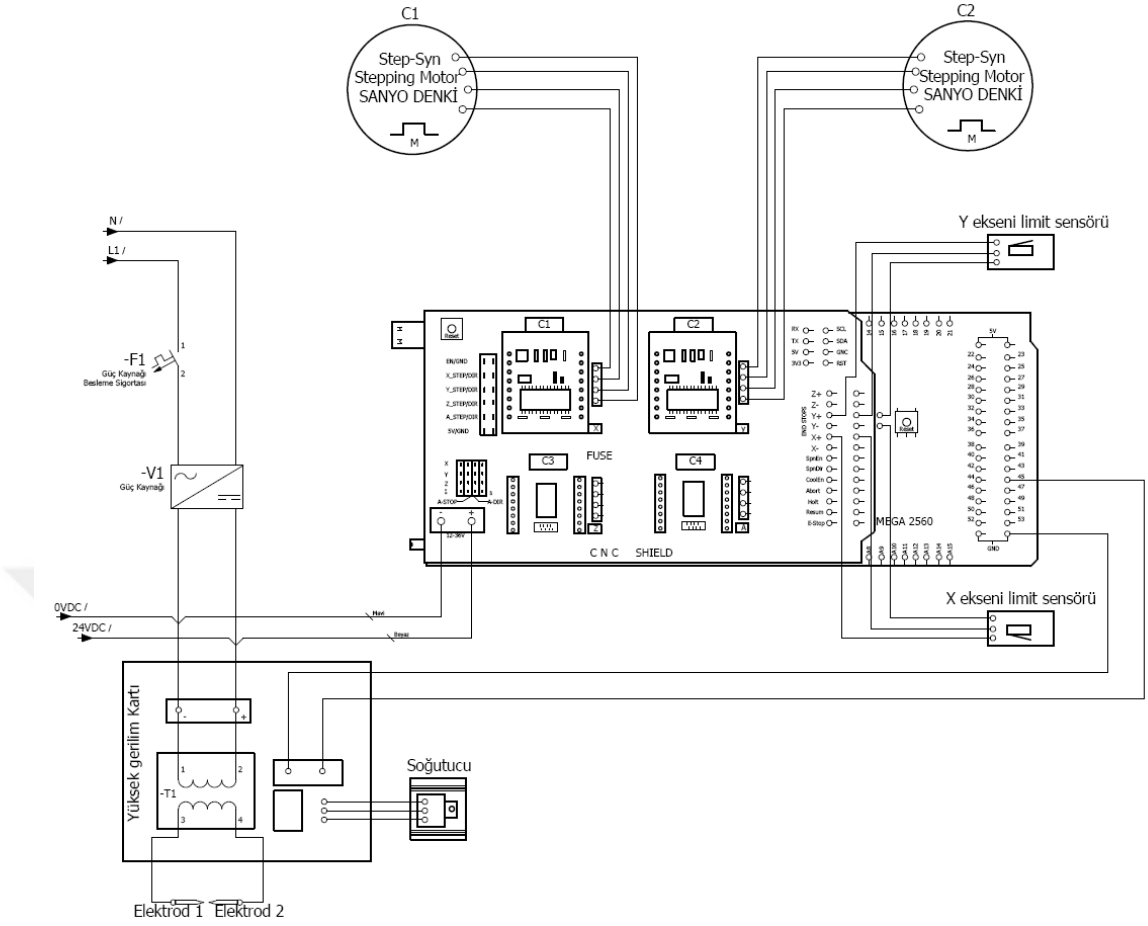
Çektirme işlemi esnasında kaymayı engellemek için fiber kablo, platformlara güçlü mıknatıslarla tutturulmuştur. Platformlar, adım motorlara kaplin konnektörü ile bağlanmış vidalı mil üzerine oturtulmuştur. Vidalı milin adım genişliği ve adım motorun adım açısı, düzeneğin her bir adımda eksenel hareket çözünürlüğünü belirlemektedir. Kurulan düzenek, her bir adımda 1.25 μm eksenel hareket çözünürlüğüne sahiptir.



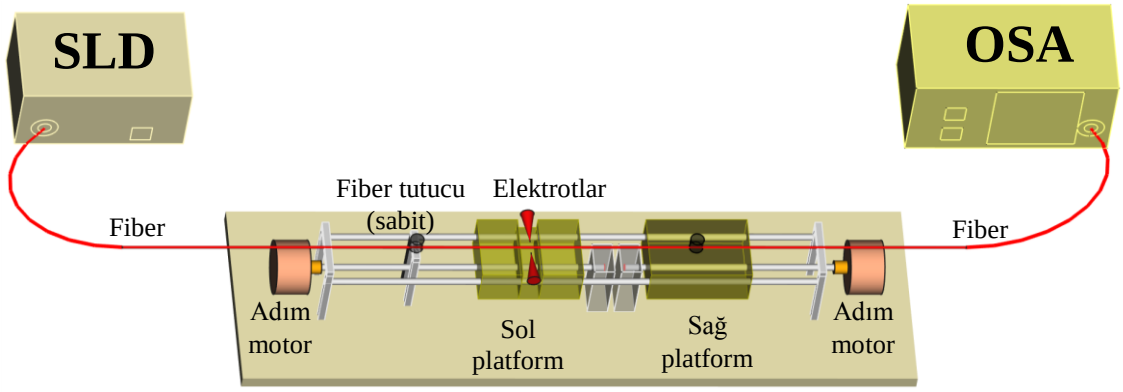
Şekil 4.1 Optik fiber sensör üretim düzeneği

Deney düzeneği elektriksel şeması Şekil 5.2' de gösterilmiştir. Mikroişlemci kontrol ünitesinin ve yüksek gerilim trafosuna uygulanacak sinyalin üretilmesi için iki kanallı 0-24V DC ayarlı bir güç kaynağı kullanılmıştır. Mikroişlemci kontrol ünitesi yazılımı ile elektrot tetikleme zamanı, süresi ve şiddeti ile platformların hızları ve ivmeleri istenilen şekilde ayarlanabilmektedir.

Üretim sürecinin kontrollü bir şekilde yürütülebilmesi için fiber sensörün bir ucundan SLD (süper-ışıma diyotu) kaynak ile ışık gönderilmiş, diğer ucundaki sensör çıkış spektrumu optik spektrum analizör (OSA) ile monitörize edilmiştir. Şekil 4.3' te bu üretim düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Kullanılan SLD kaynak 1450-1650 nm geniş bant aralığındadır, OSA ise maksimum 30 pm çözünürlüklü Thorlabs OSA-202 model cihazdır.



Şekil 4.2 Üretim düzeneği elektriksel şeması

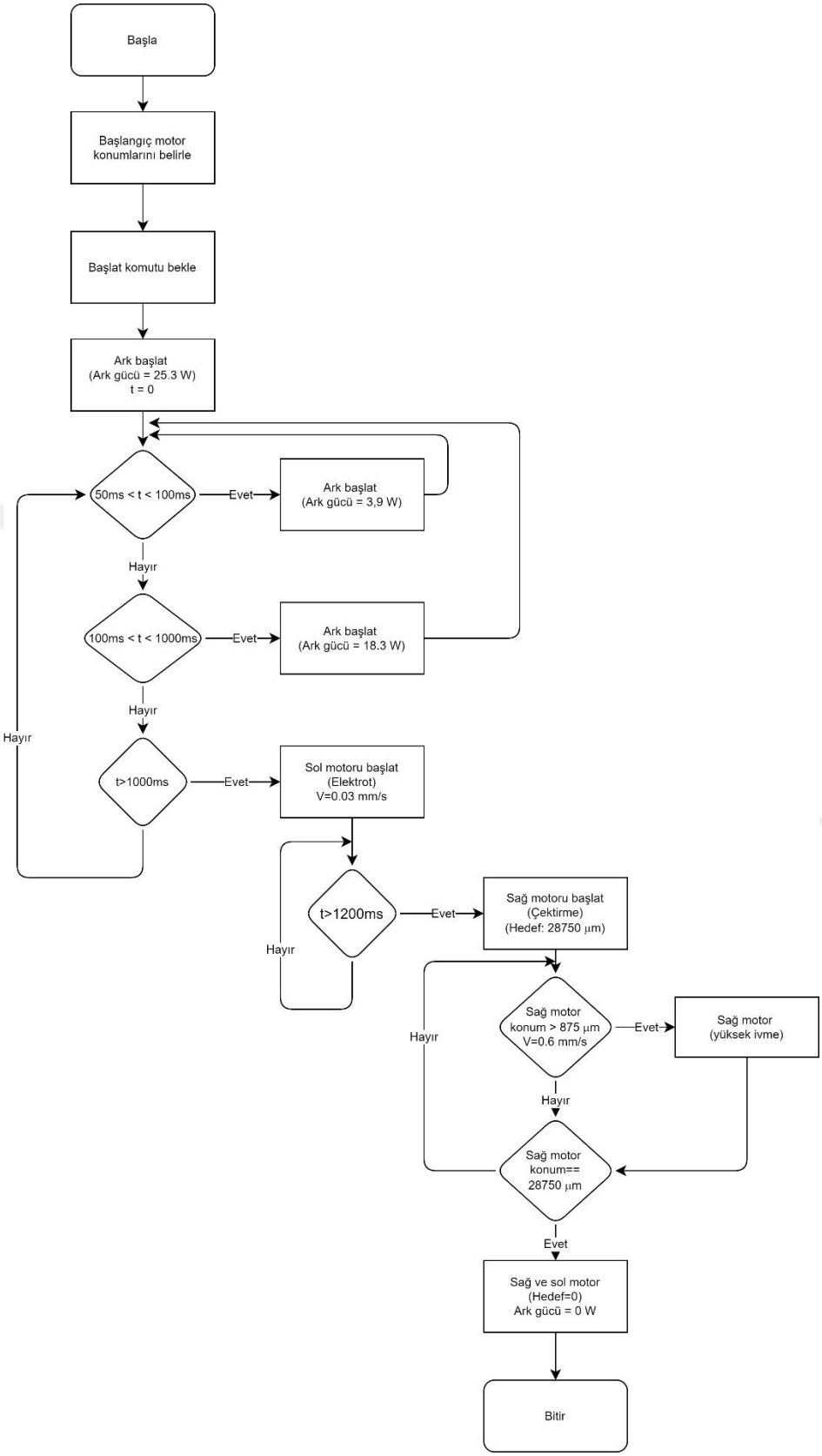


Şekil 4.3 Üretim düzeneği şematik gösterimi

Optik fiberin istenilen biçimde inceltilmesi ve geometrik şekillendirilmesi için adım motorlarının hızları ve ivmeleri, uygulanacak arkın gücü, fiberin boyca uzama miktarı

ve çapı dikkate alınarak kontrol yazılımları geliştirilmiştir. Yazılımın akış şeması Şekil 4.4' te gösterilmiştir. Elektrot tutucu sol platformun ve fiber uzatma için kullanılan sağ platformun tüm deneysel çalışmalarda aynı başlangıç koşullarda başlaması için sol motor saat yönünde, sağ motor saatin tersi yönünde hareket ettirilir. Düzeneğin orta noktasındaki anahtarlara gelen motorlar durur ve tam tersi yönde hareket ederek tüm deneylerde aynı başlangıç noktalarına konumlandırılırlar. Bu konumda, inceltilecek fiber yatayda düz olacak şekilde her iki ucundan sol ve sağ platformların üzerine Thorlabs HFM001 mıknatıslarıyla tutturulur.

İOF sensör üretimi için yüksek gerilim trafosu girişine 25.3 W yüksek güç kısa bir süre (50 ms) uygulanarak ilk ark oluşturulur, ardından ark gücü 3.9 W' a düşürülerek inceltme işlemi öncesi başlangıç seviyesinde bekletilir. Tekrarlanan denemeler sonucu, fiberin yumuşama sıcaklığına erişmesi için gerekli olan ark gücünün 18.3 W olduğu bulunmuştur. Aynı bölgenin uzun süre ısıtılması fiberde kopmalara neden olmaktadır, bunu engellemek için elektrotları taşıyan sol platform sola doğru 0.03 mm/s düşük hızla harekete başlatılır. Ardından sağ platform diğer platformun tersi yönünde 0.06 mm/s daha yüksek hızla hareket ettirilir. Sağ platformun bu hareketiyle ısıtılan fiber hem çektirilip uzatılmakta hem de elektrotlar arasına işlem görmemiş fiber kısımlarının beslemesi sağlanmaktadır. Yazılımda sağ platform için set edilen değere ulaşıldığında adım motorları ve ark durarak program sonlanmaktadır. Ayrıca Şekil 4.3' te gösterildiği gibi inceltme işlemi esnasında fiber sensör çıkış spektrumu OSA ile gerçek zamanlı monitorize edilmektedir. İstenilen spektrumun elde edildiği durumlarda sağ motor ayarlanan değere gelmeden önce kullanıcı yazılımı manuel olarak durdurulabilmektedir.



Şekil 4.4 Optik fiber inceltme düzeneğinin kontrol yazılım kodunun akış şeması

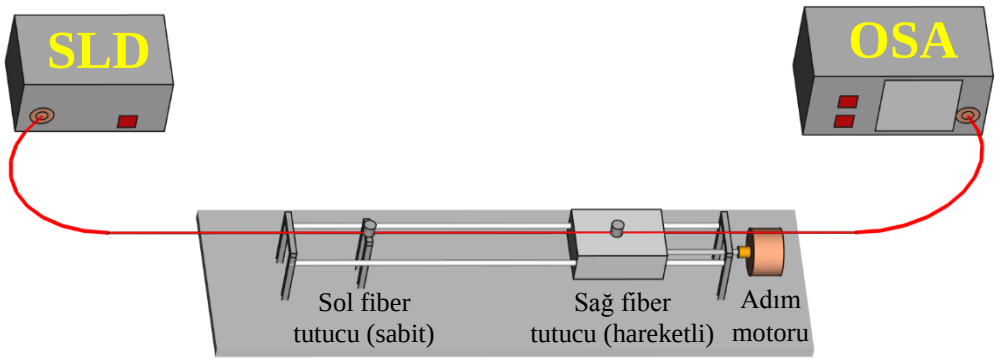
Izgara desenli fiber sensör üretimi, yukarıda anlatılan İOF geometrisi oluşturulması ve ardından üzerine iki farklı ızgara deseni yazdırılması olmak üzere iki aşama içermektedir. İOF geometrisi üretimi ardından elektrotlar İOF sol geçiş bölgesi üzerine gelmeyecek şekilde inceltilmiş homojen çaplı bel bölgesine konumlandırılır. Düşük ızgara uzunluğu elde edebilmek için arkın gücünün düşürülerek etkin ısıtma alanının azaltılması gerekmektedir. İOF üretimindeki 18.3 W' lık ark gücü ile yaklaşık 1 mm genişliğinde ark elde edilirken gücün 9.3 W' a düşürülmesiyle yaklaşık 0.5 mm genişliğinde ark elde edilebilmektedir. Bu sebeple ızgara deseni oluşturmak için 9.3 W' lık ark gücü kullanılmıştır. Bu gücün altındaki değerlerin, fiberi yumuşama sıcaklığına getirmediği yapılan denemelerde gözlemlenmiştir. 1500 ms ön ısıtmanın ardından sağ platform 0.04 mm/s düşük hızla hareket ettirilerek fiberin hem yumuşama sıcaklığına gelmesi hem de kopmadan çektirilmesi sağlanmıştır.

Sol ve sağ platformların set edilen değerlerde zıt yönlerde hareketi ile istenilen ızgara uzunluğu elde edilir. Birinci ızgaranın birinci periyodu oluşturulduktan sonra ark gücü 3.9 W' a düşürülerek sol platform set edilen değer kadar sola kaydırılarak ikinci periyot için konumlandırılır. Bu esnada, OSA ile gerçek zamanlı monitörize edilen sensör spektrumunun uygunluğuna kullanıcı tarafından karar verilmesi için tanımlanan bekleme süresince motorlar hareketsiz bekletilir. Bu döngünün tekrarlanması ile yeni ızgara periyotları oluşturulmaktadır. İstenen spektrumun elde edilmesi ile kullanıcı döngüyü manuel olarak durdurabilmekte ve ikinci ızgara deseni üretimi başlatılmaktadır. İkinci ızgara deseni üretiminde, ark gücü ve bekleme süreleri aynı iken platformların eksenel hareket mesafeleri farklıdır.

4.3 Gerinim Ölçüm Düzeneği

Gerinim ölçüm düzeneği Şekil 4.5' te gösterilmiştir. Fiberin bir ucu sol fiber tutucuya sabitlenerek diğer ucu adım motor ile kontrol edilen sağ fiber tutucuya tutturulmuştur. Sağ fiber tutucu sağ yönde hareket ettirilerek sensörler üzerinde gerinim oluşturulmuştur. Uygulanacak gerinimin büyüklüğüne sensörün kalınlığına göre karar verilmiştir. İnce yapılarından dolayı İOF ve ızgara desenli sensörlerin boyu her

defasında 12.5 μm, kalın yapısından dolayı KOF-İOF sensörünün boyu her defasında 25 μm uzatılarak sensörler üzerinde gerinim meydana getirilmiştir. Bu değerler, OSA ile gözlemlenen spektrum dip noktalarının fark edilebilir kaymalar meydana getirmektedir.



Şekil 4.5 Gerinim ölçüm düzeneği

4.4 Sıcaklık Ölçüm Düzeneği

Sensörün sıcaklık ölçümleri için rezistans ısıtmalı bir fırın geliştirilmiştir. Fırında ısıtma işlemi için 300 W güç rezistans kullanılmıştır. Güç kontrolü için ENDA ETC4420 dijital doğrusal-integral-türev (PID) sıcaklık kontrol cihazı kullanılmıştır. Fırın sıcaklığı, ayarlanan değerden ±0.1 ^{o}C doğrulukla sabit tutulabilmektedir. Ayrıca fırın sıcaklığı, 0.1 ^{o}C çözünürlüklü dijital termometre (Testo 100) kullanılarak harici olarak ölçülmektedir. Fırın sıcaklığının dengeye gelmesi için her bir ölçüm öncesi yaklaşık 15-20 dakika beklenmesi gerekmektedir. Uzun süreli sıcaklık monitorizasyonu ile sıcaklık değerinin sabit kalması sonucu bu bekleme süresine karar verilmiştir.

Optik fiber sensörler ince yapılarından dolayı gerinime çok duyarlı oldukları için termal genleşmeden dolayı boyca uzaması dikkate alınmış ve sıcaklık deneyleri boyunca sensör düz bir yüzey üzerinde tutulmuştur. Bu sayede, sıcaklık ölçümlerinde gerinim etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Optik fiber sensörler ince yapılarından dolayı gerinime oldukça duyarlıdır. Eşitlik 3.21' de gösterildiği gibi dip dalgaboyunun sıcaklıkla değişimi, hem termal uzamaya hem de

kırılma indisi değişimine bağlıdır. Termal uzama, fiber üzerinde gerinim oluşturmakta spektrum diplerinde sıcaklık ile ters yönde spektral kaymalara neden olmaktadır. Bu etki dikkate alınmış ve sıcaklık deneyleri boyunca sensör düz bir yüzey üzerinde tutularak, termal uzamadan kaynaklı fiber üzerinde oluşabilecek gerinim ortadan kaldırılmıştır.

4.5 Sıcaklık ve Gerinim için Eş Zamanlı Ölçüm Tekniği

İki veya üç parametre algılayan sensörlerde, ölçülecek parametrenin ayırt edilmesi önemlidir. Bunun göstergesi ise sensörün her bir parametre için çözünürlüğünün hesaplanmasıdır. Sıcaklık ve gerinim parametrelerini algılama işleminde, parametrelerden biri sabit tutulup, diğeri değiştirilerek ayrık zamanlı ölçümler yapılır. Ters matris yöntemi ile dış ortamın sıcaklık ve gerinim değişimi, transmisyon spektrumundaki dip noktalarının kayma miktarları ve deneysel olarak ölçülen hassasiyetleri kullanılarak hesaplanabilir. Eş zamanlı ölçümler için sensörün çözünürlüğü, gerinim ve sıcaklık spektrumlarında iki dip noktası seçilerek matris yöntemi (Jin vd. 1997) ile hesaplanabilir:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{dipA} \\ \Delta\lambda_{dipB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{T,dipA} & S_{\varepsilon,dipA} \\ S_{T,dipB} & S_{\varepsilon,dipB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Eşitlikte sıcaklık veya gerinimden dolayı spektrumlardaki dipA ve dipB noktalarının spektral kaymaları $\Delta\lambda_{dipA}$ ve $\Delta\lambda_{dipB}$, sıcaklık ve gerinim hassasiyetleri $S_{T,dipA}$, $S_{T,dipB}$, $S_{\varepsilon,dipA}$ ve $S_{\varepsilon,dipB}$, ortamın sıcaklık ve gerinim değişimi ise ΔT ve $\Delta\varepsilon$ ile gösterilmiştir. Spektral kaymalar ile sıcaklık ve gerinim hassasiyetleri deney sonuçlarından hesaplanmaktadır. Sensör ile algılanmak istenen sıcaklık ve gerinim değişimi, ters matris yöntemi kullanılarak eşitlik 4.1' den elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{|D|} \begin{bmatrix} S_{\varepsilon,dipB} & -S_{\varepsilon,dipA} \\ -S_{T,dipB} & S_{T,dipA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{dipA} \\ \Delta\lambda_{dipB} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Eşitlikte D determinantı, $D= S_{T,dipA}\cdot S_{\varepsilon,dipB} - S_{\varepsilon,dipA}\cdot S_{T,dipB}$ ile hesaplanır.

Deneyde gözlemlenen dalgaboyu kaymasındaki hata, OSA çözünürlüğünden kaynaklıdır. OSA' nın çözünürlüğü δ(Δλ) ise, sensörün sıcaklık/gerilme çözünürlüğü

$$\begin{bmatrix} \delta(\Delta T) \\ \delta(\Delta \varepsilon) \end{bmatrix} = \left| \frac{1}{|D|} \right| \begin{bmatrix} S_{\varepsilon,dipB} & -S_{\varepsilon,dipA} \\ -S_{T,dipB} & S_{T,dipA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(\Delta\lambda_{dipA}) \\ \delta(\Delta\lambda_{dipB}) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ile hesaplanır. Eşitlikten anlaşılacağı üzere, sensör çözünürlüğünü iyileştirmek için D determinantının yüksek olması gerekmektedir. Bunu sağlamanın yolu, spektrum diplerinin ölçülen parametrelere farklı şiddette tepki vermesidir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

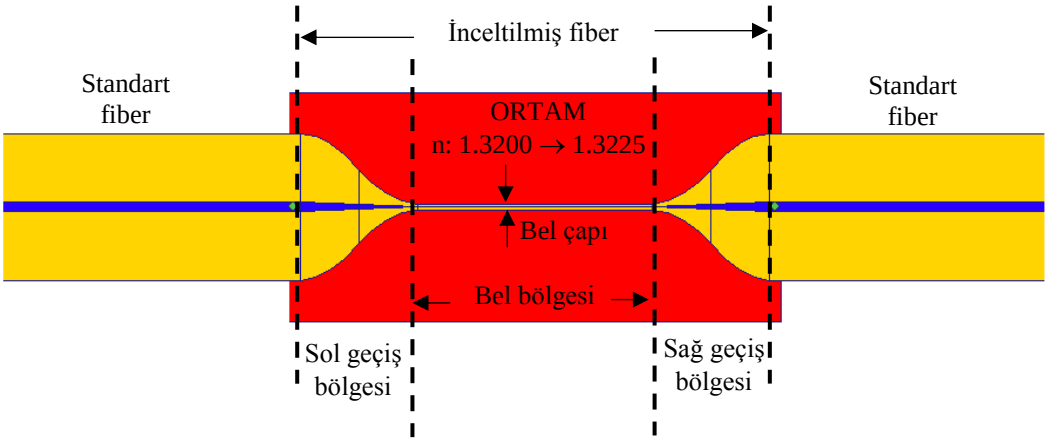
5.1 Simülasyon Sonuçları

Deneysel çalışmalar öncesinde tasarlanmak istenen optik fiber sensörlerin geometrik parametrelerinin belirlenmesi için sayısal metotlar kullanılarak farklı sensör tasarımları gerçekleştirilmiş ve bu tasarımların spektrumları ile kırılma indisine hassasiyetleri hesaplanmıştır. Simülasyon çalışmalarında Bölüm 2.5' te ayrıntıları anlatılan BPM metodu kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında ilk önce sensörün geometrik tasarımı gerçekleştirilmiş ve kırılma indisi ortamı sensör etrafında oluşturulmuştur. Sensör içerisinde yayılan elektrik ve manyetik alanlarının dik ve enine bileşenlerinin dağılımını hesaplayan BPM ile tasarlanan sensörün çıkış spektrumu elde edilmiştir. Tasarlanan sensörlerin farklı kırılma indislerinde elde edilen çıkış spektrumlarının dip noktalarının takibi ile sensörlerin kırılma indisine tepkileri hesaplanmıştır.

Simülasyon çalışmalarında basitten karmaşık tasarıma doğru sırasıyla İOF sensör, KOF-İOF sensör, İOF üzerine yazdırılan tek ızgara desenli ve yine İOF üzerine yazdırılan çift ızgara desenli sensörlerin farklı kırılma indislerinde transmisyon spektrumları ve kırılma indisi hassasiyetleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalarda üretilecek sensörlerin geometrik parametrelerini belirlemek için önemli ipuçları vermiştir.

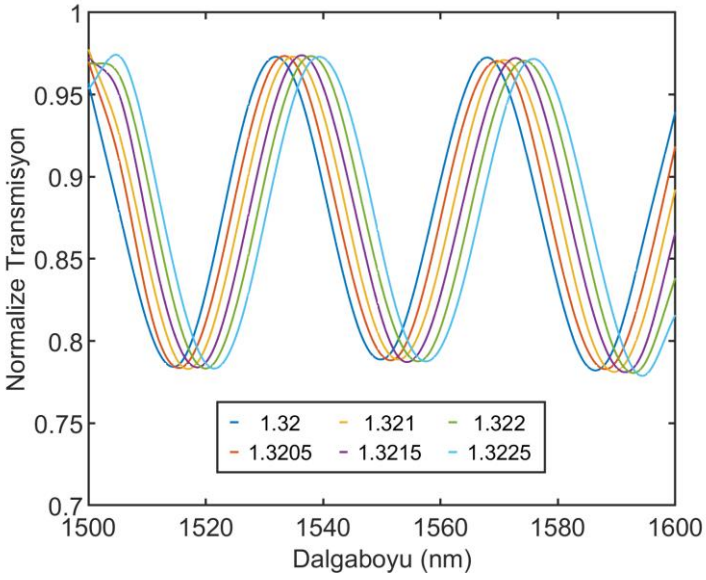
5.1.1 İOF sensörü tasarımı ve simülasyon sonuçları

Kırılma indisine duyarlı bir İOF sensörü oluşturmak için optik fibere uygulanacak deformasyonun geometrisi mikrometre hassasiyetinde bir şekillendirme gerektirmektedir. Simülasyonu gerçekleştirilen İOF sensör tasarımı Şekil 5.1' de gösterilmiştir. Standart fiberin kılıf/öz çapı 125/8 μm, sensörün inceltilmiş bel bölgesi kılıf/öz çapı 5/0.32 μm, inceltilmiş bel bölgesi uzunluğu 2000 μm, sağ ve sol geçiş bölgesi uzunlukları eşit olup 1000 μm, giriş ve çıkış fiber uzunlukları 50000 μm olarak alınmıştır. Fiberin öz ve kılıf kırılma indisleri sırasıyla 1.450 ve 1.445' tir.



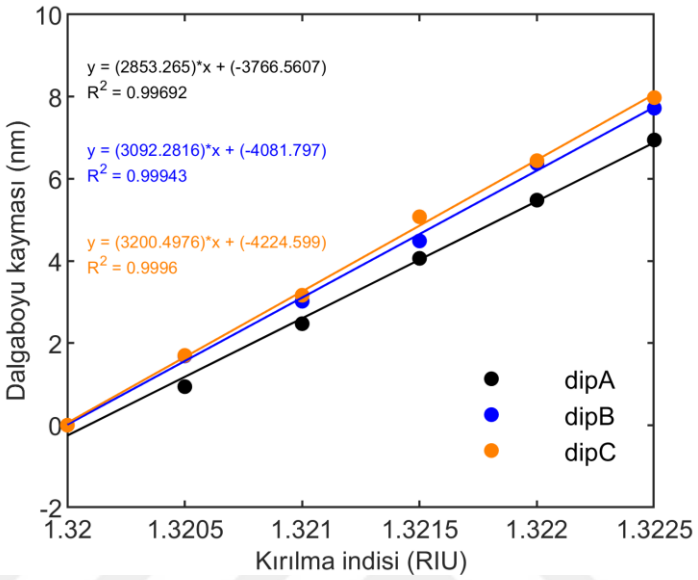
Şekil 5.1 Simülasyon amaçlı İOF sensör tasarımı

Tasarlanan sensörün dış ortam kırılma indisi 1.3200 ile 1.3225 arasında 5.10^{-4} adımlarla değiştirilmesi ile elde edilen kırılma indisi spektrumu Şekil 5.2' de gösterilmiştir. Kırılma indisinin artmasıyla spektrum uzun dalgaboylarına kaymaktadır. Ortam kırılma indisi n=1.3200 durumunda 1514.47, 1549.78 ve 1586.39 nm dalgaboylarında dipA, dipB ve dipC dip noktaları elde edilmiştir. Kırılma indisinin 1.3200' dan 1.3225' e artırılmasıyla bu diplerin hesaplanan toplam spektral kaymaları sırasıyla 6.95, 7.74 ve 7.96 nm' dir.



Şekil 5.2 İOF sensörün kırılma indisi spektrumu

Tasarlanan sensörün dipA, dipB ve dip C için kırılma indisi hassasiyetleri sırasıyla 2853.3, 3092.3 ve 3200.5 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Ölçümlerdeki doğrusallık katsayıları (R^2) 0.99' dan daha yüksektir.



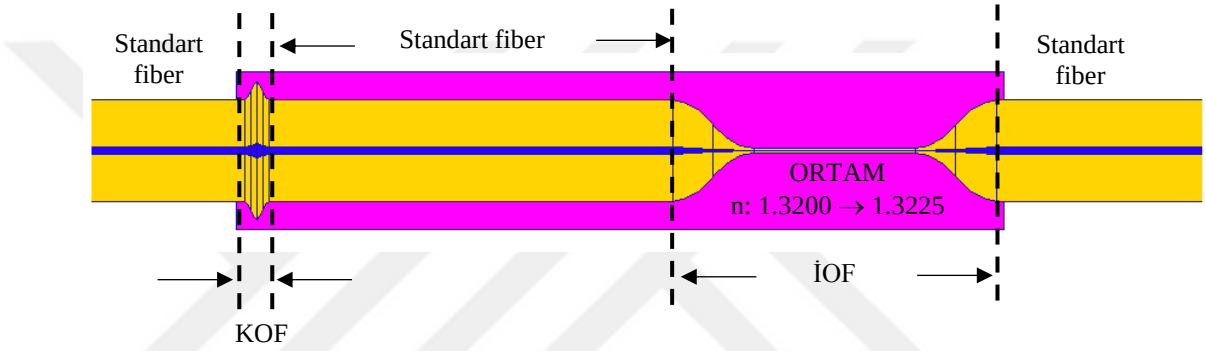
Şekil 5.3 İOF sensörün kırılma indisi hassasiyeti

Önceki çalışmalarımız (Navruz vd. 2016) sensör geometrisindeki inceltilmiş bel çapı, bel bölgesi uzunluğu ve geçiş bölgeleri uzunluklarının oldukça önemli tasarım parametreleri olduğunu göstermiştir. Bel çapının azalması ile iki dip arası mesafeyi ifade eden saçak aralığı azalmakta ve dolayısıyla spektrumdaki dip sayısı artmaktadır. Bununla beraber spektrumdaki tepe ve dip noktaları arasındaki farkı gösteren yok olma oranı artmaktadır ve bu da sensördeki optik güç kaybının arttığını göstermektedir. Bel uzunluğunun artması ile saçak aralığı azalmakta ve dolayısıyla dip sayısı artmaktadır. Geçiş bölgesi uzunluğunun artması ile sensör adiyabatik karakteristik sergilemekte ve optik güç kaybı azalarak yok olma oranı azalmaktadır.

5.1.2 KOF-İOF sensörü tasarımı ve simülasyon sonuçları

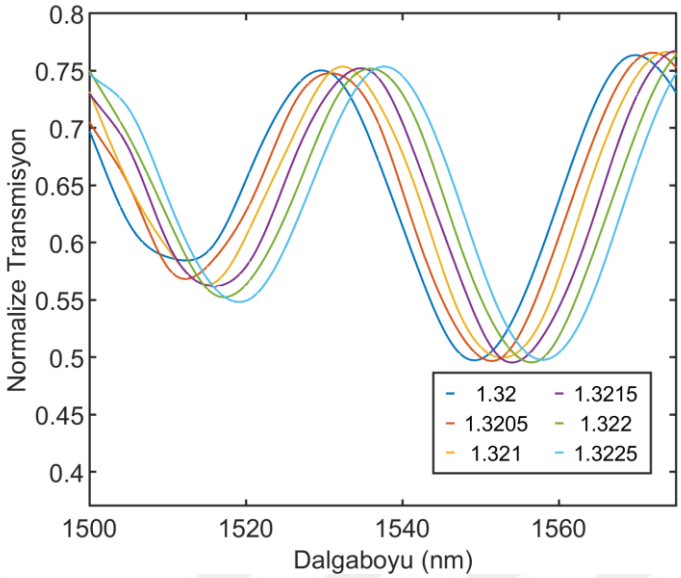
Tasarlanan KOF-İOF sensörün şematik gösterimi Şekil 5.4' te gösterilmiştir. Sensör 2 kısımdan oluşmaktadır: giriş KOF yapısı ve takip eden İOF yapısı. İOF yapısı

geometrik parametreleri, Bölüm 5.1.1' de verilen parametreler ile aynıdır. KOF yapısı, pratikte Fujikura FSM 60S model özel bir tür fiber birleştirme cihazı ile üretilmektedir. Cihaz ile maksimum 150 μm üst üste çakışma oranı seçilebilmekte ve bu durumda KOF yapısının uzunluğu yaklaşık 350 μm, kılıf ve öz çapları sırasıyla 170 μm ve 17 μm olmaktadır. Mümkün olan en fazla sayıda kılıf modları uyarabilmek için simülasyonlarda KOF yapısının geometrik parametreleri bu şekilde seçilmiştir. KOF ve İOF yapısı arası mesafe 5000 μm, giriş ve çıkış fiber uzunlukları 25000 μm olarak seçilmiştir. Standart fiberin öz ve kılıf kırılma indisleri sırasıyla 1.450 ve 1.445' tir.



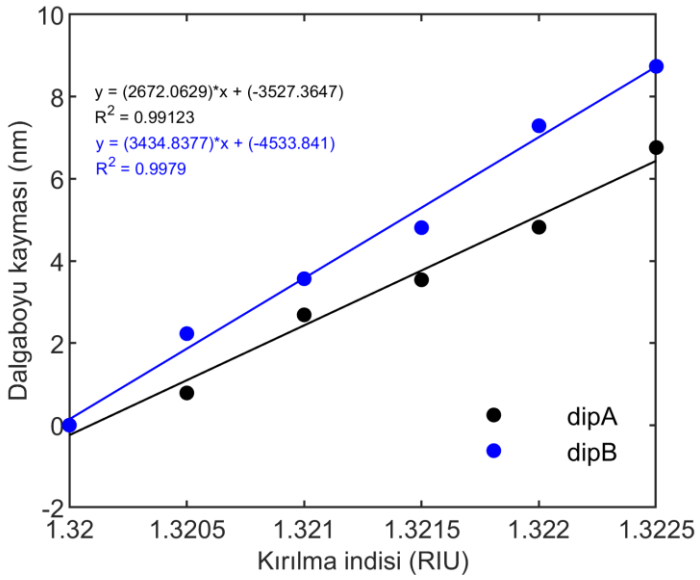
Şekil 5.4 Simülasyon amaçlı KOF-İOF sensör tasarımı

Dış ortam kırılma indisinin 1.3200 ile 1.3225 arasında 5.10^{-4} adımlarla değiştirilmesi ile elde edilen kırılma indisi spektrumu Şekil 5.5' te gösterilmiştir. Kırılma indisinin artmasıyla spektrum kırmızı kayma sergilemiştir. Ortam kırılma indisi n=1.3200 durumunda, 1512.34 ve 1588.31 nm dalgaboylarındaki dipA ve dipB minimum noktaları elde edilmiştir. Dış ortam kırılma indisi 1.3200-1.3225 arasında 5.10^{-4} adımlarla değiştirildiğinde, dipA ve dipB noktalarının toplam spektral kaymaları 6.78 ve 8.72 nm olarak hesaplanmıştır. KOF yapısının kalın olması nedeniyle sönümlenen dalga azalmakta ve İOF yapısına göre kırılma indisine duyarlılığı azalmaktadır. Bu nedenle, dipA noktasının KOF yapısından, dipB noktasının İOF yapısından kaynaklı olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 5.5 KOF-İOF sensörün kırılma indisi spektrumu

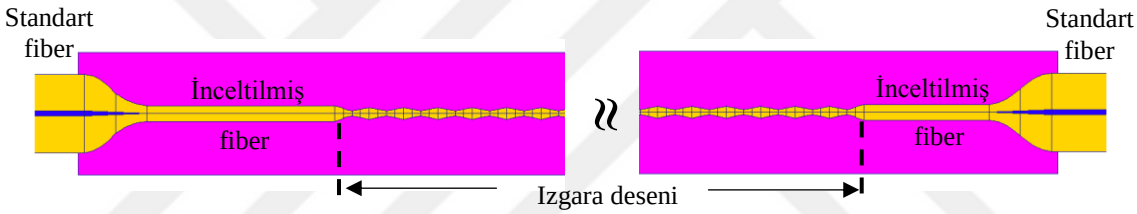
Spektrumdaki dipA ve dipB noktalarının kırılma indisi değişimi ile elde edilen KOF-İOF sensörün kırılma indisi hassasiyetleri Şekil 5.6' da gösterilmiş ve sırasıyla 2672.1 ve 3434.8 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. İOF sensör ile karşılaştırıldığında sensöre KOF yapısı eklenmesi ile kırılma indisi hassasiyeti artırdığı gözlenmiştir. Bunun nedeni, KOF yapısı ile uyarılan kılıf modlarının güçlendirilmesidir.



Şekil 5.6 KOF-İOF sensörün kırılma indisi hassasiyeti

5.1.3 Izgara desenli sensör tasarımı ve simülasyon sonuçları

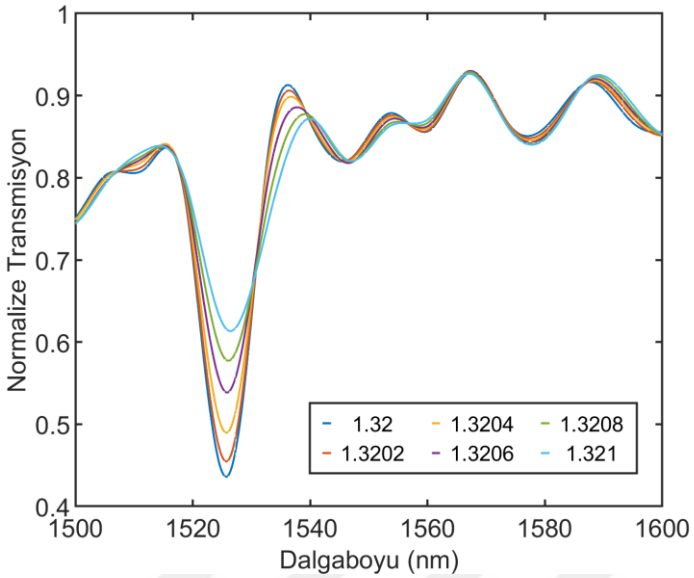
Tasarlanan ızgara desenli sensörün şematik gösterimi Şekil 5.7' de gösterilmiştir. Sensör tasarımı 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk önce Bölüm 5.1.1' de verilen İOF sensörü tasarlanmış ve sonrasında üzerine ızgara deseni oluşturulmuştur. İOF yapısı geometrik parametreleri, Bölüm 5.1.1' de verilen parametreler ile aynıdır. Izgara başlangıç ve bitiş noktalarının İOF geçiş bölgelerine uzaklıkları 2000 μm' dir. Izgara deseni geometrik parametreleri: ızgara sayısı N=20, ızgara periyodu Λ=550 μm, ızgaralarda tepe-tepe çapı 19 μm ve çukur-çukur çapı 8 μm' dir. Sensör giriş ve çıkış fiber uzunlukları 900 μm olarak seçilmiştir. Standart fiberin öz ve kılıf kırılma indisleri sırasıyla 1.450 ve 1.445' tir.



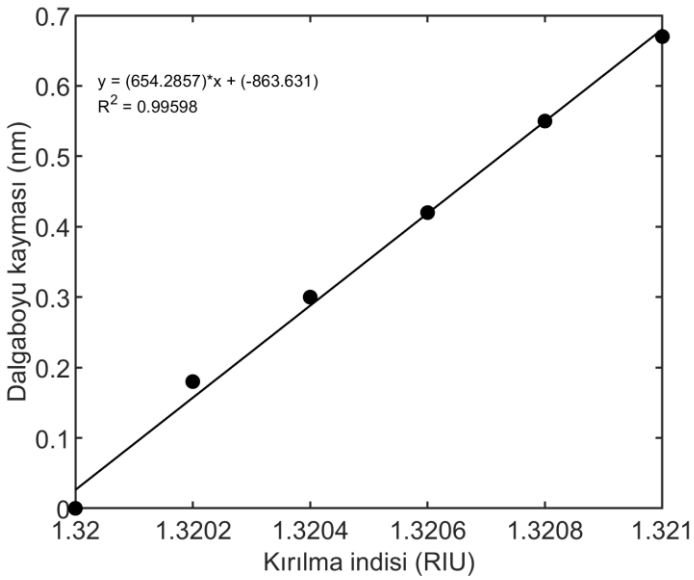
Şekil 5.7 Simülasyon amaçlı ızgara desenli sensör tasarımı

Dış ortam kırılma indisi 1.3200-1.3210 RIU arasında 2.10^{-4} RIU adımlarla artırılması ile elde edilen kırılma indisi spektrumu Şekil 5.8' de gösterilmiştir. Kırılma indisinin artması, spektrum diplerinde kırmızı kaymaya neden olmuştur. Ortam kırılma indisi n=1.3200 durumunda, 1525.69 nm' de rezonans dalgaboyu elde edilmiştir. Ortam kırılma indisi değiştirildiğinde, rezonans dalgaboyunun toplam spektral kayması 0.72 nm olarak hesaplanmıştır.

Rezonans dalgaboyunun kırılma indisine bağlı spektral kayması ile elde edilen kırılma indisi hassasiyeti Şekil 5.9' da gösterilmiştir. Kırılma indisi hassasiyeti 654.3 nm/RIU olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8 Izgara desenli sensörün kırılma indisi spektrumu

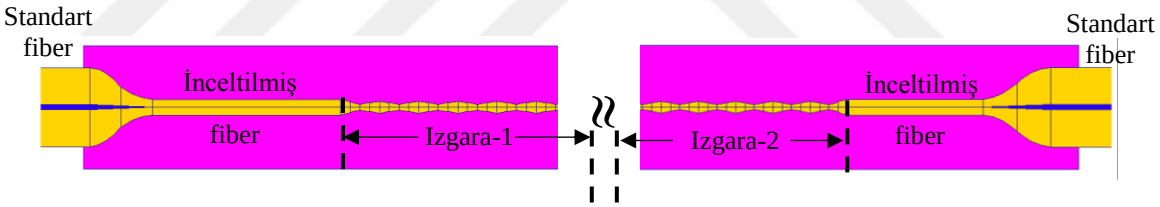


Şekil 5.9 Izgara desenli sensörün hassasiyeti

Önceki çalışmalarımız (Navruz vd. 2016), ızgara periyodunun artması ile dip dalgaboyunun mavi kayma gösterdiğini ve yok olma oranının azaldığını göstermiştir.

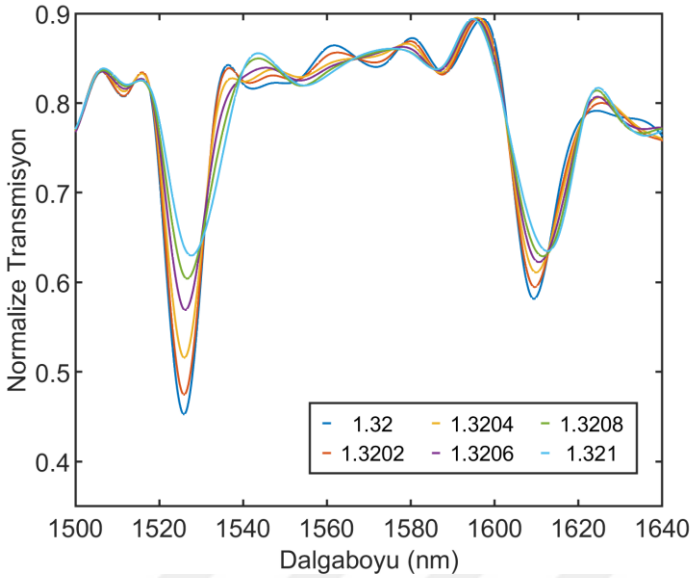
5.1.4 Çift ızgara desenli sensör tasarımı ve simülasyon sonuçları

Optik fiber sensörlerin çoklu parametre ölçümlerinde kullanılması için transmisyon spektrumunda en az 2 dip noktası olmalıdır. Bu nedenle, Bölüm 5.1.3' teki tasarıma ikinci bir ızgara deseni eklenerek spektrumda iki dip noktası elde edilmesi beklenmektedir. Bu amaçla, Bölüm 5.1.1' de verilen İOF sensörü üzerine farklı geometride iki ızgara deseni tasarlanmıştır. Tasarlanan çift ızgara desenli sensörün şematik gösterimi Şekil 5.10' da gösterilmiştir. Izgara başlangıç ve bitiş noktalarının İOF geçiş bölgelerine uzaklıkları 3000 μm' dir. Sol ve sağ ızgaraların (sırasıyla Izgara-1 ve Izgara-2) geometrik parametreleri: ızgara sayıları N_1= N_2=20, ızgara periyotları Λ_1=625 μm ve Λ_2=550 μm, Izgara-1 için tepe-tepe çapı 16 μm ve çukur-çukur çapı 7 μm, Izgara-2 için tepe-tepe çapı 19 μm ve çukur-çukur çapı 9 μm' dir. Sensör giriş ve çıkış fiber uzunlukları 900 μm olarak seçilmiştir. Standart fiberin öz ve kılıf kırılma indisleri sırasıyla 1.450 ve 1.445' tir.



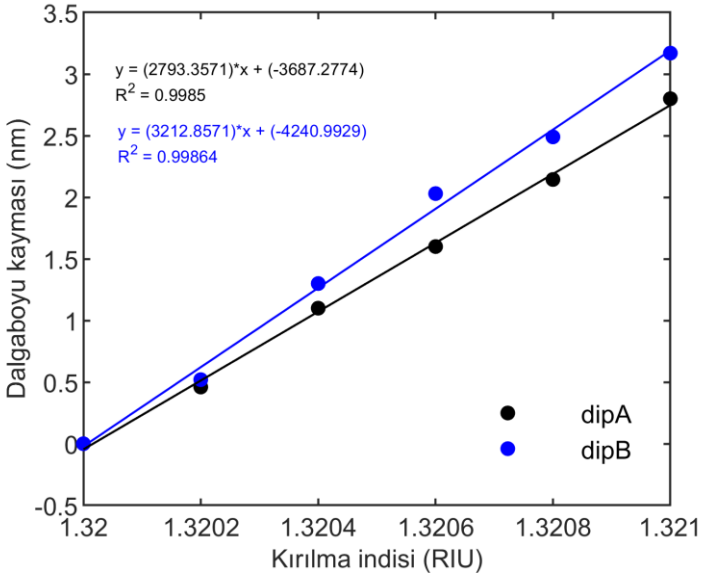
Şekil 5.10 Simülasyon amaçlı çift ızgara desenli sensör tasarımı

Dış ortam kırılma indisinin 1.3200 ile 1.3210 arasında 2.10^{-4} RIU adımlarla değiştirilmesi ile elde edilen sensörün kırılma indisi spektrumu Şekil 5.11' de gösterilmiştir. Kırılma indisinin artmasıyla spektrumdaki dip noktaları uzun dalgaboylarına kaymaktadır. Ortam kırılma indisi n=1.3200 durumunda, 1525.88 ve 1609.36 nm dalgaboylarında sırasıyla dipA ve dipB dip noktaları elde edilmiştir. Ortam kırılma indisi değiştirildiğinde, dipA ve dipB noktalarının toplam spektral kaymaları 1.78 ve 3.24 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.11 Çift ızgara desenli sensörün kırılma indisi spektrumu

Dip noktalarının kırılma indisi hassasiyetleri Şekil 5.12' de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dipA ve dipB için kırılma indisi hassasiyetleri 2793.4 ve 3212.8 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Tekli ızgara desenli sensör ile karşılaştırıldığında, çift ızgara desenli sensörün kırılma indisi hassasiyetinin arttığı gözlenmiştir.

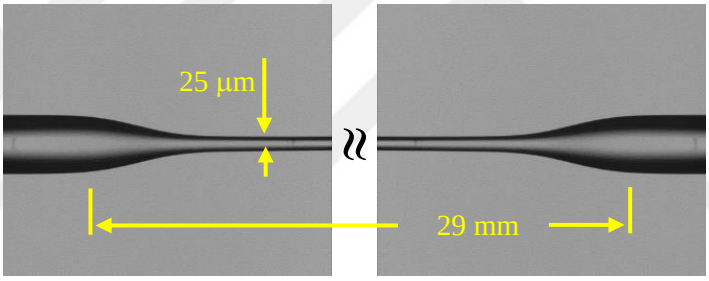


Şekil 5.12 Çift ızgara desenli sensörü kırılma indisi hassasiyeti

5.2 Deneysel Sonuçlar

5.2.1 İOF sensörü ölçüm sonuçları

Bu çalışmada, MZI temel alan standart haberleşme tek-modlu fiber kullanan İOF sensör üretilmiş ve eş zamanlı gerinim ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İOF sensör, elektrik ark metodu kullanılarak Bölüm 4.2' de detayları verilen düzenekte üretilmiştir. Bilgisayar kontrollü düzenek ile fiberin bir kısmı yumuşama sıcaklığına kadar ısıtılıp çektirilmektedir. Üretilen İOF sensörünün mikroskop görüntüsü Şekil 5.13' te gösterilmiştir. Sensörün bel çapı 25 μm ve bel uzunluğu 29 mm' dir.



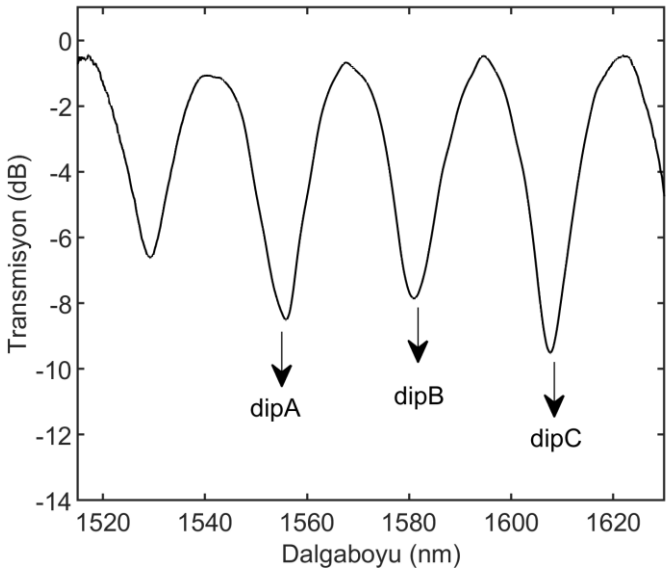
Şekil 5.13 Üretilen İOF sensörün mikroskop görüntüsü

Tekrarlanabilirliği test etmek için bel çapının dikkate alındığı 10 adet aynı parametrelere sahip İOF sensör üretilmiştir. Burada bel çapı 25 μm olarak set edilmiş ve örneklerin bel çapları ölçüldüğünde standart sapmaları % 2.2 olarak hesaplanmıştır.

Tasarlanan İOF sensörün sıcaklık ve gerinim ölçüm analizleri için 1450-1650 nm dalgaboyu aralığında çalışan SLD geniş bant ışıma kaynağı kullanılmış ve fiber çıkış spektrumu maksimum çözünürlüğü 30 pm olan Thorlabs OSA-202 ile kaydedilmiştir.

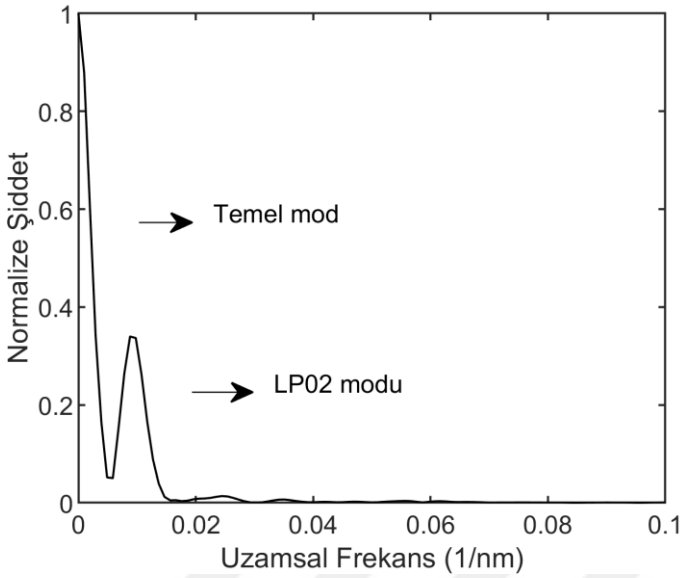
5.2.1.1 İOF sensörü tipik spektrumu ve mod analizi

Oda sıcaklığındaki hava ortamında sensörün tipik spektrumu Şekil 5.14' te gösterilmiştir. Kılıf modları ile temel mod arasındaki güçlü girişimden dolayı çıkış spektrumu, tepe ve çukurlardan oluşan sinüs formunda osilasyonlar göstermektedir. Gerinim ve sıcaklık ölçümleri için 1555.8, 1580.9 ve 1607.6 nm dalgaboylarında bulunan dipA, dipB ve dipC' nin sıcaklık ve gerinim değiştirildiğinde spektral kaymaları gözlenmiştir.



Şekil 5.14 İOF sensörünün hava ortamında tipik spektrumu

Girişime katkısı bulunan baskın kılıf modlarını bulmak için transmisyon spektrumunun Fourier dönüşümü alınmıştır. İOF sensörün girişim grafiğinin uzamsal frekans spektrumu Şekil 5.15' te gösterilmiştir. Şiddeti 1' e eşit olan çizgi temel moda karşılık gelmekte ve onu izleyen tepe noktaları kılıf modlarını göstermektedir. Şekle göre 0.009 nm^{-1} uzamsal frekansında normalize şiddeti 0.33 olan baskın bir kılıf modu oluşurken, 0.024 ve 0.035 uzamsal frekanslarında şiddetleri sırasıyla 0.01 ve 0.006 olan zayıf kılıf modları sensör içerisinde uyarılmıştır.



Şekil 5.15 İOF sensör transmisyon spektrumunun hava ortamında Fourier dönüşümü

Uyarılan baskın kılıf modu türüne karar vermek için kılıf ve temel modları arasındaki etkin kırılma indisi değerleri, analitik ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Bunu yapmak için ışığın yayılma metodu ile simülasyonlar yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İki komşu dip arasında λ_c merkez dalgaboyunda eşitlik 3.4' ün Taylor açılımı (Geng vd. 2011)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_o^2}{\Delta n_{etk}^m L} \tag{5.1}$$

ile ifade edilir. Burada, λ_o ışıma kaynağı merkez dalgaboyu, Δn_{etk}^m terimi m' nci derece kılıf modu ile temel mod arasındaki etkin kırılma indisi farkı, L ise sensör uzunluğudur. λ_o=1568 nm, L=29 mm ve $\Delta\lambda$=25.6 nm alınırsa, deneysel olarak etkin kırılma indisi farkı eşitlik 5.1' e göre $\Delta n_{eff}^m = 3.32 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, BPM simülasyonları gerçekleştirilerek uyarılan modların etkin kırılma indisleri hesaplanmıştır. n_{co}=1.4493, n_{cl}=1.444, n_{hava}=1.0 alınarak yapılan hesaplamada sensörde uyarılan yüksek dereceli modların kırılma indisi değerleri Çizelge 5.1' de verilmiştir. LP01 ve LP02 için etkin kırılma indisleri sırasıyla 1.4458917 ve 1.4425047 olarak bulunmuştur. İki mod arasındaki kırılma indisi farkı $3{,}39.10^{-3}$ değerine eşittir. Bu da

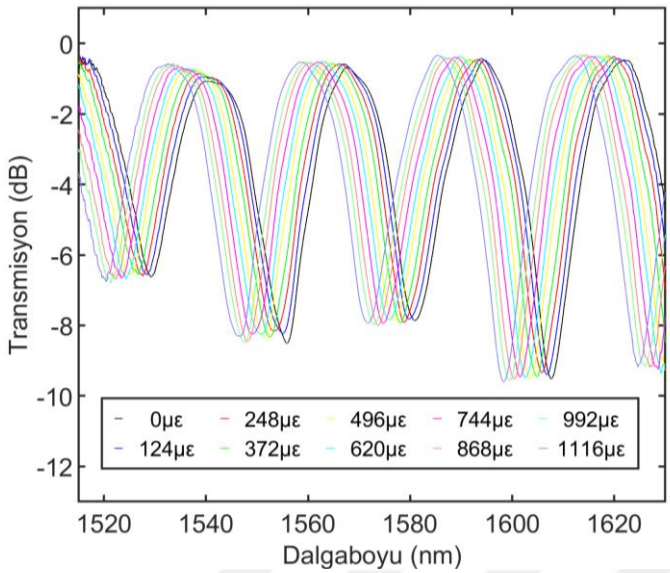
FFT grafiğinde görülen baskın yüksek dereceli modun LP02 modu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.1 İOF sensörde uyarılan modlar ve etkin kırılma indisleri

Mod	n_{eff}	Δn_{eff}
LP01	1. 4458917	
LP02	1. 4425047	0.003387
LP03	1. 4368488	0.009043
LP04	1. 4285001	0.017392
LP05	1. 4174699	0.028422
LP06	1. 4037156	0.042176
LP07	1. 3871663	0.058725
LP08	1. 3677291	0.078163
LP09	1. 345288	0.100604
LP11	1. 4452516	0.00064

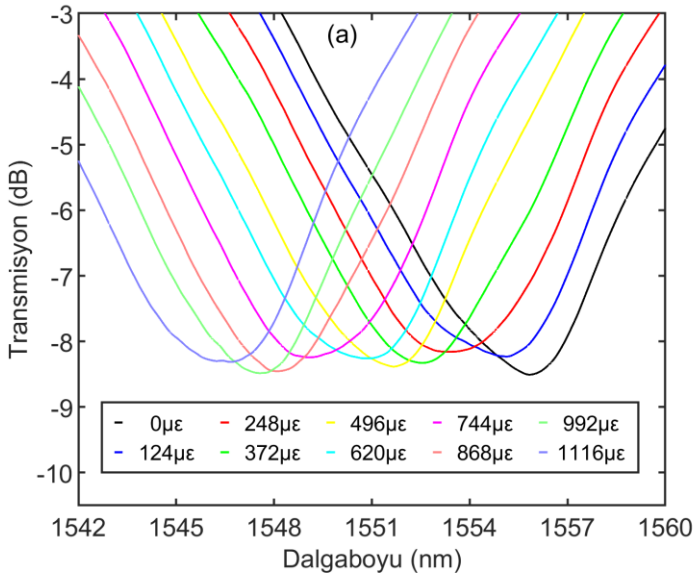
5.2.1.2 İOF sensörü ile gerinim ölçümü

Gerinim ölçümleri için ortam sıcaklığı sabit tutularak Bölüm 4.3' te verilen düzenek kullanılmıştır. Sensörün bir ucu sabitlenerek diğer ucu bir adım motorunun hareketlendirdiği platforma tutturulmuştur. Sensöre gerinim uygulamak için platform her aşamada 12.5 μm hareket ettirilerek sensöre her seferinde 124 με gerinim uygulanmıştır. Gerinimin artırılması ile Şekil 5.16' da görüldüğü gibi spektrumda mavi kaymalar gözlenmiştir.

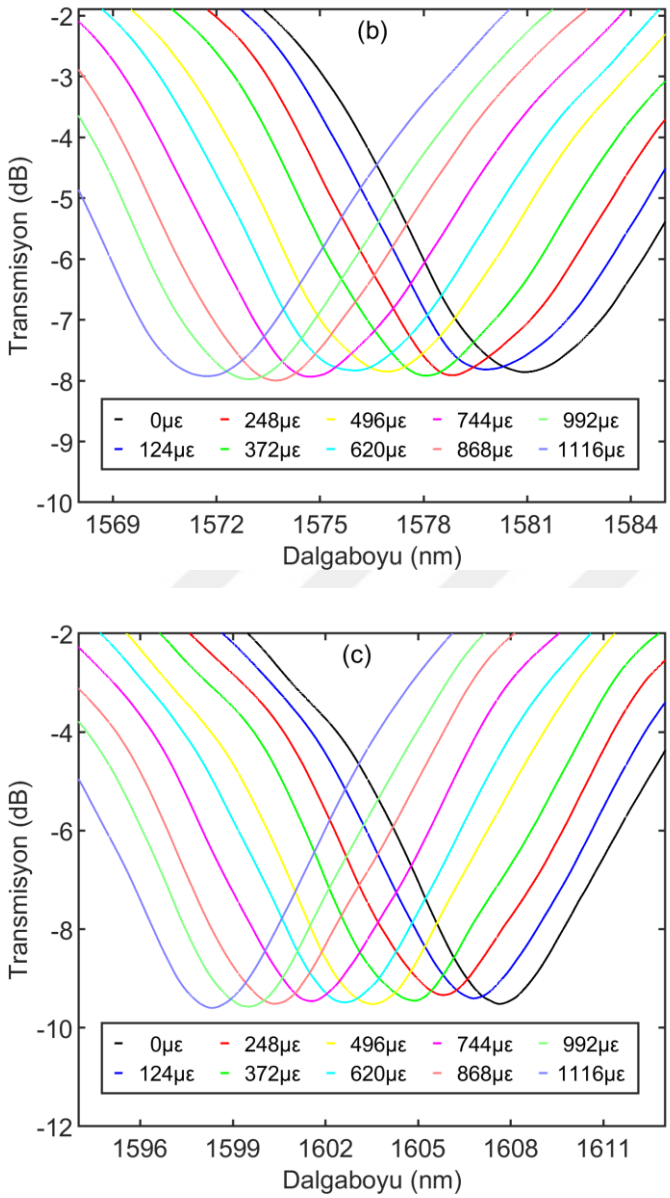


Şekil 5.16 İOF sensörün farklı gerinim değerleri için transmisyon spektrumu

Spektrumdaki dipA, dipB ve dipC noktalarının dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş hali Şekil 5.18' de gösterilmiştir. 0-1116 με arasında gerinim uygulanarak dipA, dipB ve dipC noktaları için toplam spektral kaymalar 9.1, 9.2 ve 9.3 nm olarak ölçülmüştür.

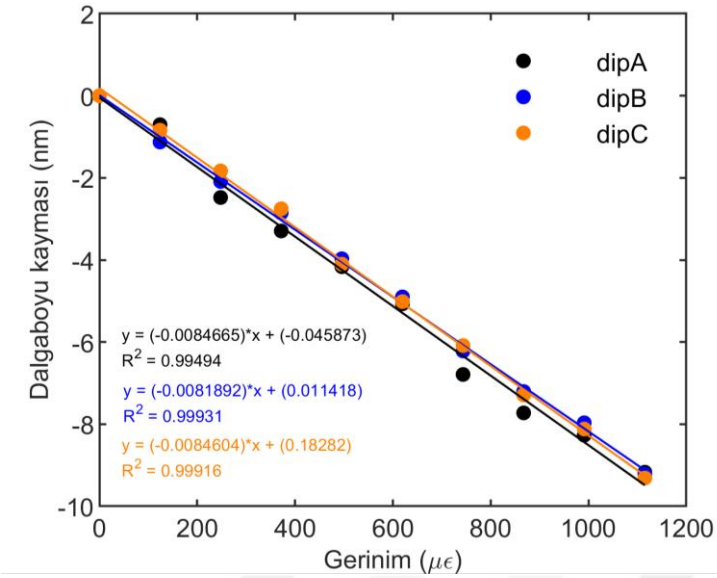


Şekil 5.17 İOF sensörü a. dipA, b. dipB ve c. dipC dip noktalarının gerinim değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü



Şekil 5.18 İOF sensörü a. dipA, b. dipB ve c. dipC dip noktalarının gerinim değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü (devam)

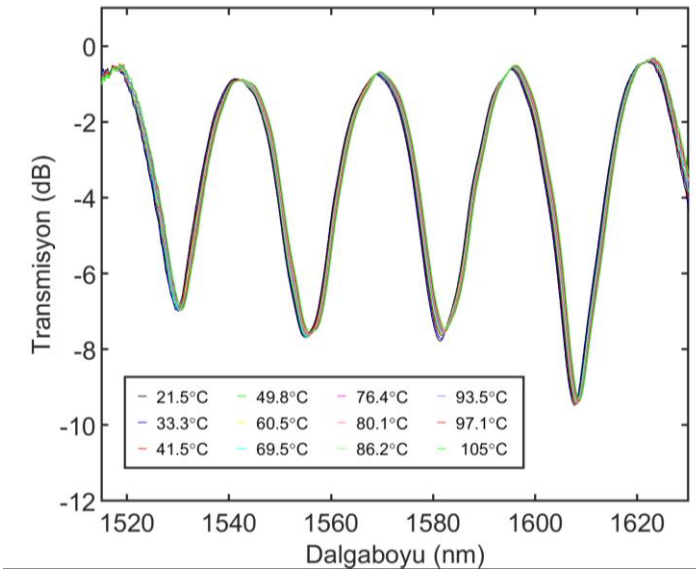
Sensörün gerinim hassasiyeti, doğrusal regresyon yöntemi ile hesaplanmıştır ve elde edilen grafik Şekil 5.19' de verilmiştir. Grafiğe göre dipA, dipB ve dipC için 8.4665 pm/με, 8.1892 pm/με ve 8.4604 pm/με gerinim hassasiyetleri hesaplanmıştır. Bu hassasiyet değerlerinin birbirine çok yakın olması, pratik kullanımında herhangi bir dip noktasının seçilmesinin ciddi bir fark oluşturmayacağını göstermektedir.



Şekil 5.19 İOF sensörünün gerinim hassasiyeti

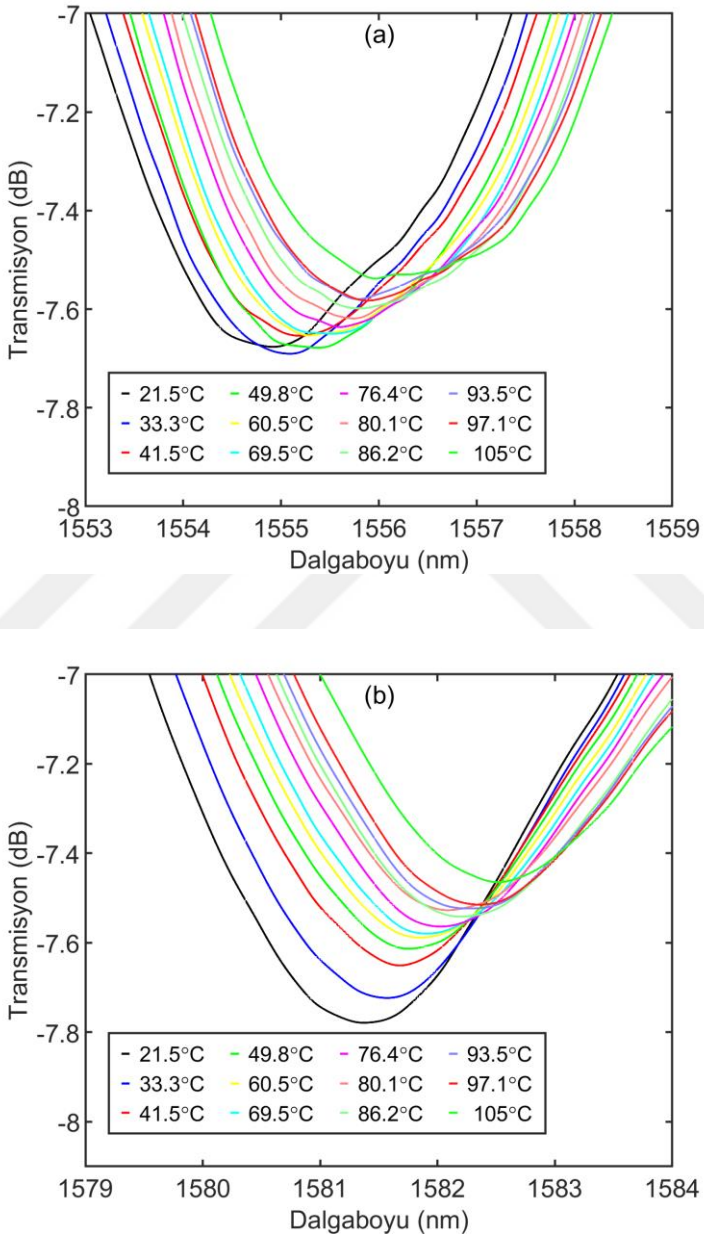
5.2.1.3 İOF sensörü ile sıcaklık ölçümü

İOF sensörün sıcaklık tepkisi için sensör Bölüm 4.4' te detayları verilen PID kontrollü fırına yerleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığı ile 105 ^{o}C arasında değiştirilmiştir. Sensörün sıcaklığın artırılması ile Şekil 5.20' da gösterilen transmisyon spektrumu elde edilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla tüm spektrum dip noktalarının uzun dalgaboylarına kaydığı açıkça görülmektedir.

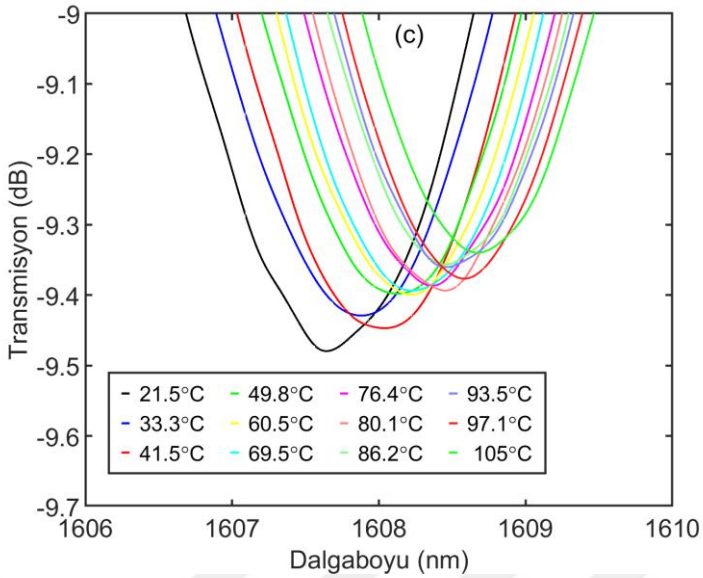


Şekil 5.20 İOF sensörünün farklı sıcaklıklar için transmisyon spektrumu

Transmisyon spektrumu dip noktalarının büyütülmüş görüntüsü Şekil 5.22' de gösterilmektedir. Sıcaklığın artması ile dipA, dipB ve dipC' nin toplam spektral kaymaları sırasıyla 1.0, 1.1, 1.1 nm' dir. Sensör aynı fiberden üretildiği için spektrum dip noktaları sıcaklığa benzer oranda tepki vermektedir.

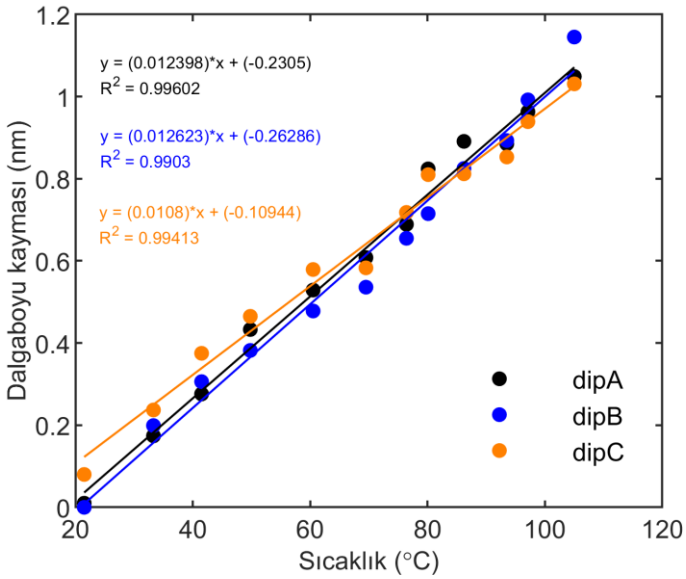


Şekil 5.21 a. dipA, b. dipB ve c. dipC bölgelerinin sıcaklık değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü



Şekil 5.22 a. dipA, b. dipB ve c. dipC bölgelerinin sıcaklık değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü (devam)

Sensörün sıcaklık hassasiyetleri Şekil 5.23' de gösterilmiştir. Sensörün dip A, dipB, dipC için sıcaklık hassasiyetleri sırasıyla 12.398, 12.623 ve 10.800 pm/^{o}C olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.23 İOF sensörün sıcaklık hassasiyeti

5.2.1.4 İOF sensörü eş zamanlı sıcaklık ve gerinim ölçüm sonuçları

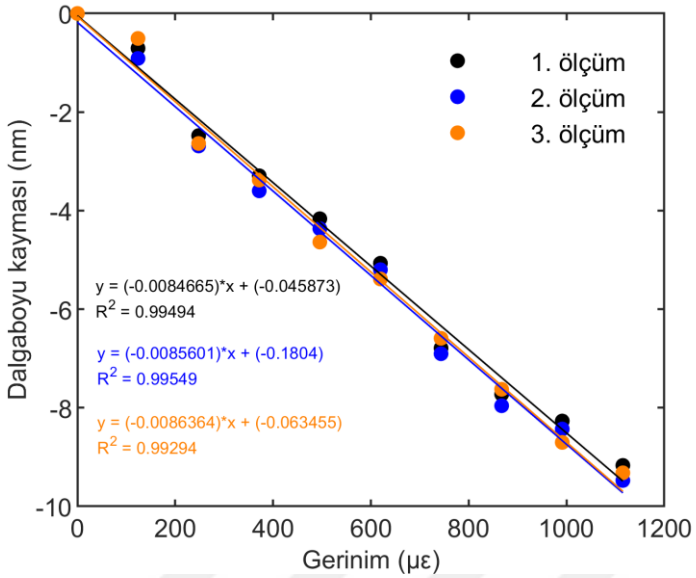
Gerinim ve sıcaklık değişkenlerinin eş zamanlı uygulanma durumunu incelemek için 2 dip noktasına gerek duyulmaktadır. Bu değişkenlerin ayırt edilmesi eşitlik 4.1' de verilen katsayısı matrisi kullanılarak yapılabilir. İki dip noktası seçilerek katsayısı matrisi

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_1\\ \Delta\lambda_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}12.623 & -8.1892\\ 10.800 & -8.4604\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta T\\ \Delta\varepsilon\end{bmatrix} \tag{5.2}$$

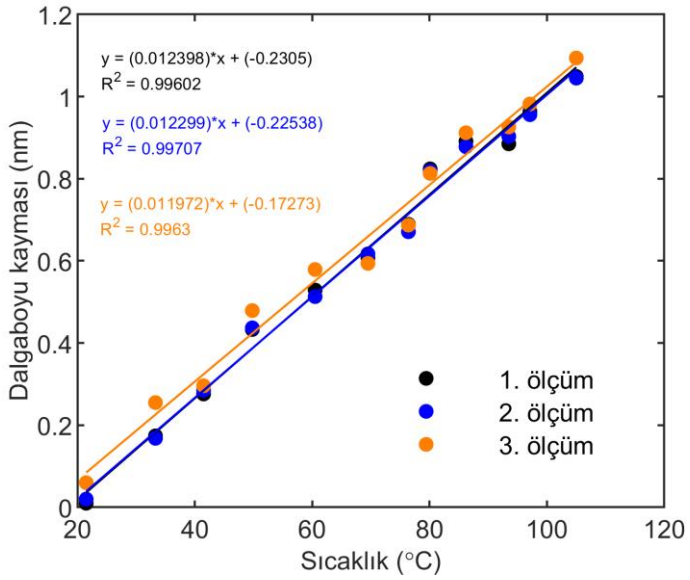
olarak yazılır. Eşitlikte $\Delta\lambda_1$ ve $\Delta\lambda_2$ dalgaboyu kaymasını, ΔT ve $\Delta\varepsilon$ ise sensör ortamındaki sıcaklık ve gerinim değişimlerini göstermektedir. Sensörün sıcaklık ve gerinim çözünürlüğü, sadece dip noktalarının hassasiyet değerlerine değil aynı zamanda kullanılan optik spektrum analizörün çözünürlüğüne de bağlıdır. 10 pm çözünürlüklü optik spektrum analizörü ile kullanılması durumunda, $\Delta\lambda$ değeri 10 pm olur. Bu değer, eşitlik 5.2' de yerleştirilirse, sensörün sıcaklık ve gerinim çözünürlükleri 9.07 ^{o}C ve 12.76 με olarak hesaplanır.

5.2.1.5 İOF sensör deneysel ölçüm tekrarlanabilirliği

Ölçümlerin tekrarlanabilirliğini bulmak amacıyla gerinim ve sıcaklık ölçümleri deney koşulları değiştirilmeden 3 kez tekrarlanmıştır. Spektrumdaki dipA noktası kullanılarak yapılan gerinim hassasiyet grafikleri Şekil 5.24' de gösterilmiştir. Gerinim ve sıcaklık ölçümlerindeki standart sapma değerleri sırasıyla %1.0 ve %1.8 olarak hesaplanmıştır. Benzer sonuçlar diğer dip noktaları için de bulunmuştur. Bu sonuçlar, ölçümlerde yüksek tekrarlanabilirlik oranı elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 5.24 İOF sensörünün tekrarlanan gerinim ölçüm sonuçları



Şekil 5.25 İOF sensörünün tekrarlanan sıcaklık ölçüm sonuçları

Gerinim, eşitlik 3.20' de tanımlandığı üzere bel bölgesinin kesit alanına bağlıdır. Bu nedenle İOF sensör küçük bel çapından dolayı gerinime oldukça duyarlıdır. Ayrıca sensörün hem gerinim hem de sıcaklık ölçebilmesi sensörün önemli avantajlarındandır.

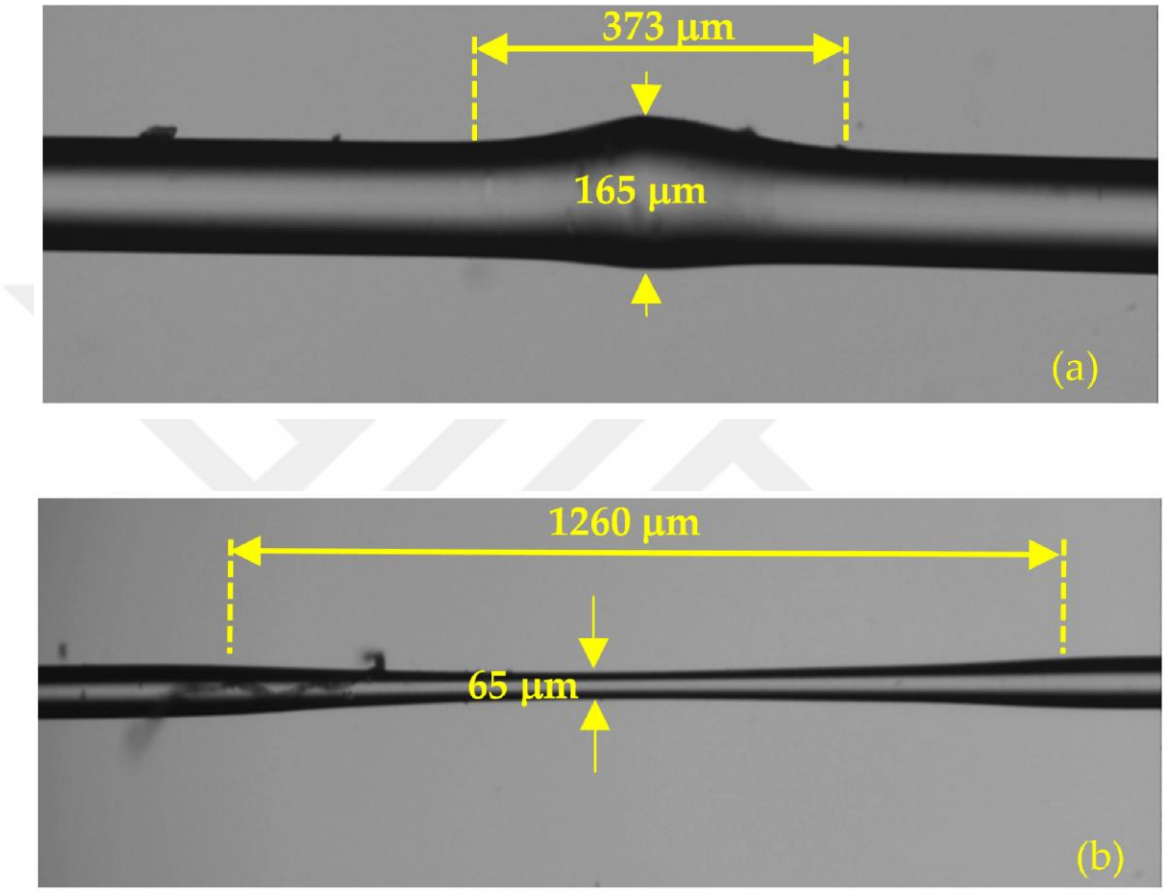
5.2.2 KOF-İOF sensörü ölçüm sonuçları

Tezin bu bölümünde inceltilmiş optik fiber (İOF) ve kalınlaştırılmış optik fiberin (KOF) ard arda sıralanması ile oluşturulan KOF-İOF sensörü incelenmektedir. KOF yapısı özel bir füzyon birleştirici cihazı ile üretilmiştir. İOF üretimi ise elektrik ark metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu metot, fiberin bir küçük bölgesinin yumuşama sıcaklığına kadar ısıtılıp çektirilmesine esasına dayanmaktadır.

Fiber optik sensör transmisyon spektrumlarında iki dip arası açıklık saçak mesafesi olarak bilinmektedir. Elektrik ark metodunda elektrotların etkin ısıtma alanı geniş olduğundan İOF adiabatikliği olumsuz yönde etkilenmektedir ve istenilen saçak aralığında transmisyon spektrumu elde edebilmek için sensör uzun üretilmektedir. Uzun ve ince sensör tasarımı sensörün kırılganlığını ve dolayısıyla pratik kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. İOF yapısı ile KOF yapısı birleştirilerek yüksek dereceli kılıf modları uyarılarak gerekli olan adiabatiklik koşulu sağlanabilir. Bu sayede, İOF yapısı daha kısa ve daha kalın üretilerek istenilen saçak mesafesi elde edilebilecektir. Işık KOF yapısı ile etkileşime geçtiğinde yüksek dereceli kılıf modları oluşarak ikiye ayrılır. Birincisi öz içerisinde ilerleyen temel mod, diğeri mod alan çapı uyumsuzluğundan dolayı kılıfa geçen kılıf modlarıdır. KOF ile yüksek dereceli kılıf modlarına geçen ışık İOF çapının az olması nedeniyle sönümlenen dalga olarak dış ortama kolaylıkla nüfuz edebilir. Sıcaklık, gerinim veya kırılma indisi gibi dış ortam parametrelerinin değişmesiyle girişim spektrumunda dalgaboyu kaymaları gözlenir ve bu sayede dış ortam değişimleri transmisyon spektrumundaki kaymalarla algılanabilir.

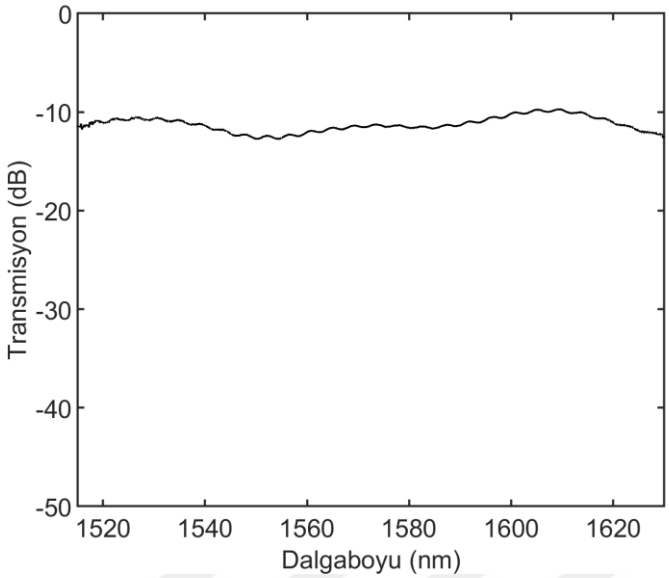
KOF ve İOF yapılarının mikroskop görüntüleri Şekil 5.26' te gösterilmiştir. Üretilen sensör, KOF yapısı ve onu takip eden İOF yapısının ard arda sıralanmasından oluşmaktadır. KOF yapısı, Fujikara FSM-60s model fiber birleştirici kullanılarak üretilmiştir. Bu modelde diğerlerinden farklı olarak, birleştirme esnasında fiberlerin üst üste çakışma parametresi 0-150 μm arasında ayarlanabilmektedir. Fiber birleştirici içerisindeki tutuculara yerleştirilen fiberlere elektrotlarla ark uygulanırken aynı anda fiberler birbirlerine doğru hareket ettirilir, bu sayede fiberin çapı artırılır ve Şekil 5.26.a' da gösterilen kalın bir fiber yapısı oluşturulur. Üretim esnasında yüksek modların

oluşması için diğer birleştirme parametreleri değiştirilmeden maksimum üst üste çakışma oranı olan 150 µm seçilmiştir. İşlem sonucunda, 125 µm' lik standart kılıf çapı 165 µm' ye çıkarılmıştır ve kalınlaştırılmış bölge uzunluğu 373 µm' dir. İOF yapısı, 1.26 mm uzunluğu ve 65 µm' lik kalın bel çapı ile kompakt yapıdadır.



Şekil 5.26 a.KOF ve b. İOF mikroskobik görüntüsü

Optik spektrum analizör ile sadece KOF spektrumu incelenmiş ve transmisyon spektrumu Şekil 5.27' te gösterilmiştir. Şekle göre KOF yapısı, fiberde 9.6-12.7 dB arası kayba neden olmaktadır. Bu kayıp oranı, toplam ışık enerjisinin %5-10' luk kısmının öz içerisinde ilerlemeye devam ettiğini, %90-95' lik kısmının kılıf içerisine geçerek sönümlenen dalga olarak ilerlediğini göstermektedir.



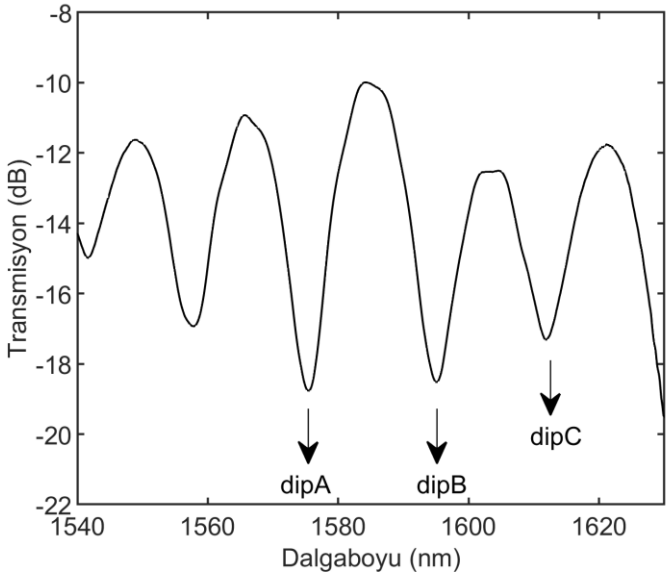
Şekil 5.27 KOF transmisyon spektrumu

İOF sensör üretimi Bölüm 4.1.1' de detayları verien elektrik ark metodu ile gerçekleştirilmiştir. Koruyucu katmanı sıyrılan fiber, sağ ve sol fiber tutuculara yerleştirilir. Sol fiber tutucu sabit iken sağ fiber tutucu bilgisayar kontrollü bir adım motorla her bir adımda 1.25 μm çözünürlükle hareket edebilmekte ve ısıtma esnasında fiberi çektirme görevi görmektedir. Elektrotlar ise hareketli platform üzerine oturtulmuş ve hareketli platform, sağ fiber tutucu ile özdeş bir adım motorla aynı çözünürlükle hareket etme kapasitesine sahiptir ve üretim aşamasında elektrotları sağ fiber tutucu ile ters yönde hareket ettirmektedir. Sağ fiber tutucu fiberi çektirirken, elektrot platformu ters yönde tutucuya göre çok daha düşük hızda hareket etmektedir. Tutucu ile eş zamanlı olarak elektrotların hareket etmesi, fiberin sadece bir bölgesindeki hacimsel azalmayı kontrol etmekte ve dolayısıyla kopmaları engellemekte, bu sayede homojen çaplı inceltilmiş bölge üretilebilmesine imkan sağlamaktadır.

KOF-İOF sensör tasarımında ilk önce KOF üretilmiş, ardından ondan yaklaşık 2 cm uzaklıkta İOF üretilmiştir. Tekrar üretilebilirlik açısından aynı bel çapında 10 adet İOF üretilmiş ve mikroskop ölçümleri sonucu %1.8 standart sapma hesaplanmıştır.

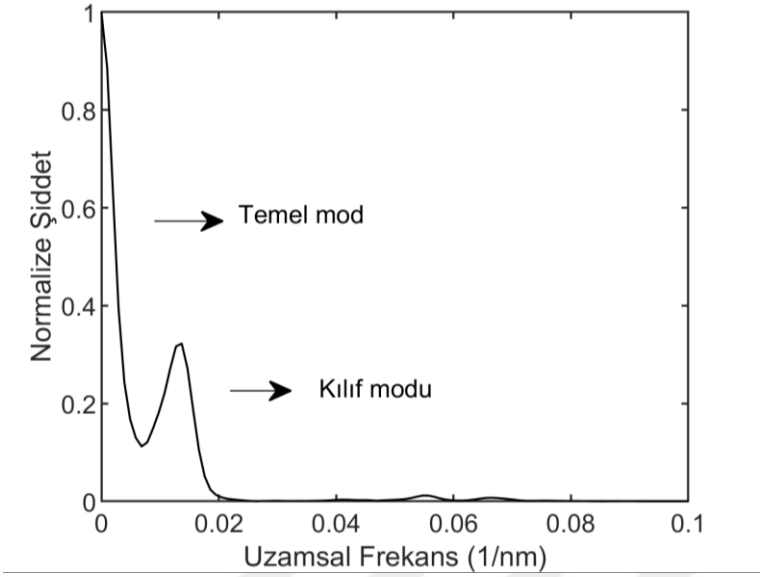
5.2.2.1 KOF-İOF sensörü tipik spektrumu ve mod analizi

Tasarlanan KOF-İOF sensörün oda sıcaklığındaki hava ortamında tipik spektrumu Şekil 5.28' da gösterilmiştir. Transmisyon spektrumunun 1575.5, 1595.2 ve 1611.8 nm dalgaboylarında dipA, dipB ve dipC olarak adlandırılan dip noktaları elde edilmiştir. 1575.5 nm dalgaboyundaki dip noktasının yok olma kaybı oranı 8.7 dB iken toplam kayıp 18.76 dB' dir.



Şekil 5.28 KOF-İOF sensörü tipik spektrumu

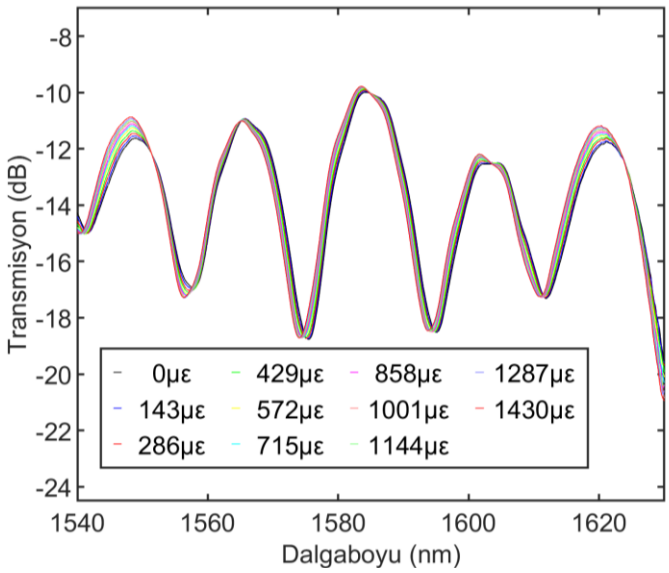
Şekil 5.28' daki spektrumu oluşturan dalga formlarının belirlenmesi için Fourier dönüşüm gerçekleştirilmiş, elde edilen uzamsal frekans spektrumu Şekil 5.29' de gösterilmiştir. Normalize şiddetin 1' e yükseldiği soldaki çizgi temel modu, 0.014/nm uzamsal frekanstaki tepe baskın kılıf modunu göstermektedir. 0.056/nm ve 0.066/nm uzamsal frekanslarındaki küçük tepeler, 2 adet zayıf kılıf modu oluştuğunu göstermektedir. Sonuç olarak, sadece bir tane baskın kılıf modu uyarılmış ve öz modu ile girişime girerek Şekil 5.28' daki girişim spektrumunu oluşturmuştur.



Şekil 5.29 İOF sensörün transmisyon spektrumunun Fourier dönüşümü

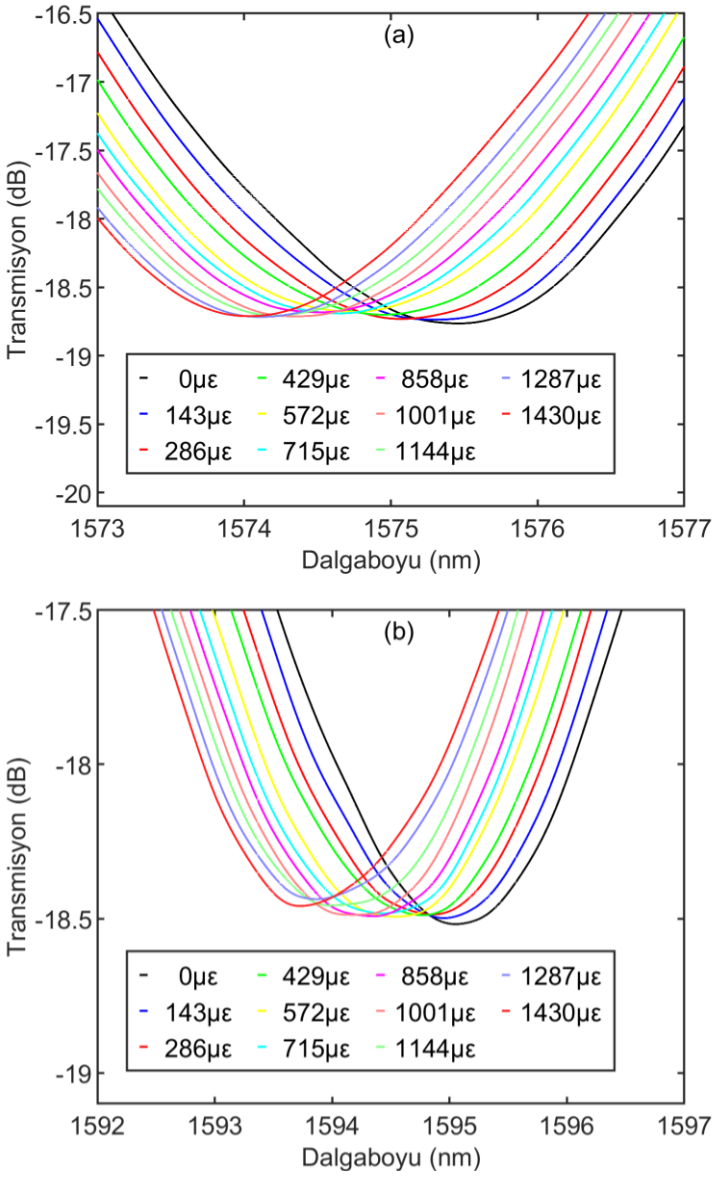
5.2.2.2 KOF-İOF sensörü ile gerinim ölçümü

Gerinim ölçümleri için Şekil 4.5' te gösterilen ölçüm düzeneği kullanılmıştır. KOF sensörün kalın bel çapından dolayı her aşamada 25 μm çektirilerek sensör üzerinde 143 με, toplamda ise 1430 με gerinim uygulanmıştır. Şekil 5.30' de gösterildiği gibi girişim spektrumundaki dip noktalarının kısa dalgaboylarına kaydığı gözlenmiştir.

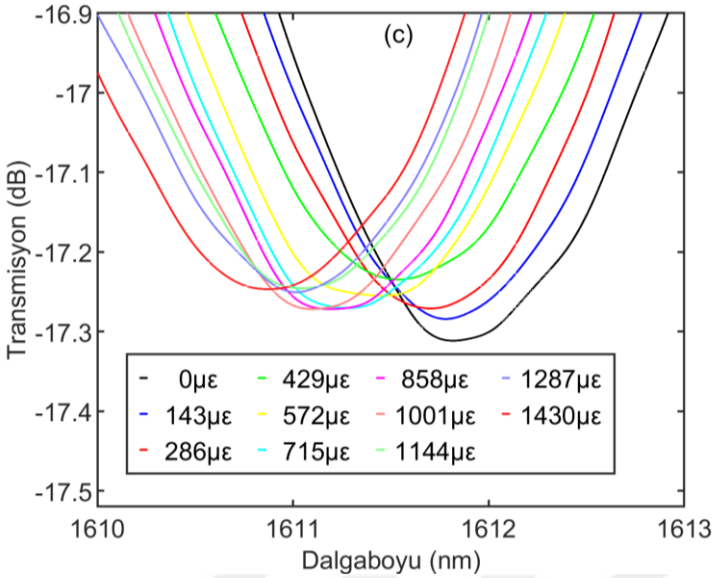


Şekil 5.30 KOF-İOF sensörünün farklı gerinim değerleri için transmisyon spektrumu

Dip noktalarındaki hafif dalgalanmalar hassasiyet hesaplamalarında beklenmedik hatalara neden olabilmektedir. Bu durumdan emin olmak için dipA, dipB ve dipC noktalarının büyütülmüş grafikleri Şekil 5.32' da verilmiş ve dalgalanma gözlenmemiştir. Şekle göre dipA, dipB ve dipC minimum noktalarındaki toplam dalgaboyu kayması sırasıyla 1.44, 1.30 ve 0.94 nm' dir. Spektrumdaki dipC noktasının hassasiyeti diğerlerinden düşüktür. Gerinim, kesit alanı ile ters olduğundan dipC' nin KOF yapısından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

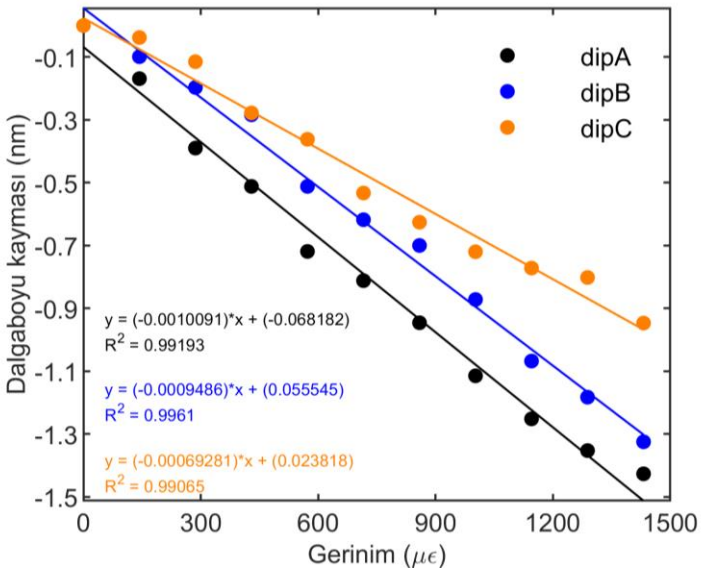


Şekil 5.31 KOF-İOF sensörü a. dipA, b. dipB ve c. dipC bölgelerinin gerinim değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü



Şekil 5.32 KOF-İOF sensörü a. dipA, b. dipB ve c. dipC bölgelerinin gerinim değişiminden kaynaklı dalgaboyu kaymalarının büyütülmüş görüntüsü (devam)

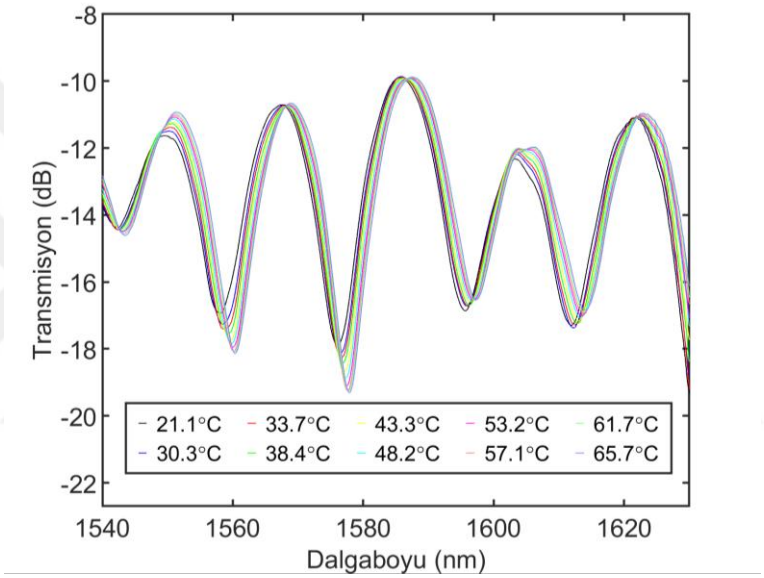
Dip noktalarındaki kaymaların gerinime göre değişim grafiği Şekil 5.33' da verilmiştir. R^2>0.99 değerleri, spektral kaymanın gerinimle büyük bir doğrusallık içinde olduğunu göstermektedir. Şekil 5.33' a göre dipA, dipB ve dipC minimum noktalarının gerinim hassasiyetleri sırasıyla 1.00 pm/με, 0.95 pm/με ve 0.69 pm/με' dur. Ölçümler 30 pm çözünürlüklü optik spektrum analizörle gerçekleştirilmiştir. 10 pm çözünürlüklü bir OSA ile yapılması durumunda sensör ile 9.90 με çözünürlükle gerinim algılanabilir.



Şekil 5.33 KOF-İOF sensörünün gerinim hassasiyeti

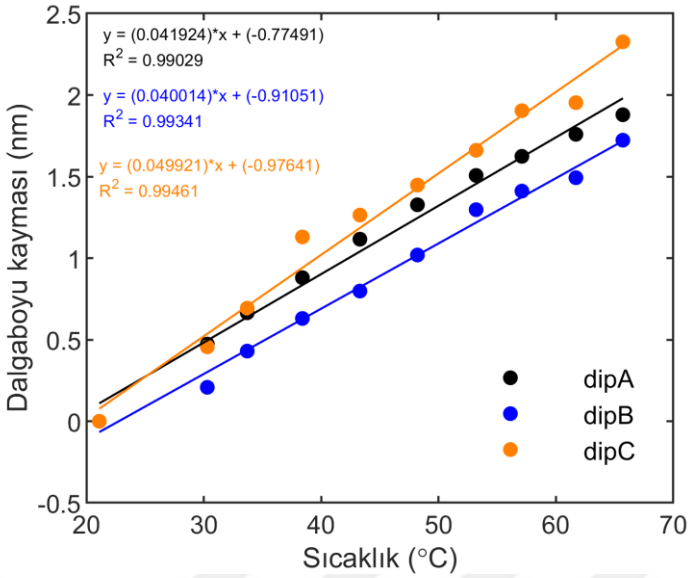
5.2.2.3 KOF-İOF sensörü ile sıcaklık ölçümü

Sıcaklık ölçümleri için sensör Bölüm 4.4' te detayları verilen fırına yerleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı 21.1 ^{o}C' den 65.7 ^{o}C' ye kadar set edilen değerler arasında artırılmıştır. Fırın sıcaklığının dengeye gelmesi için her bir ölçüm öncesi yaklaşık 20 dakika beklenmiştir. Elde edilen spektrum Şekil 5.34' de gösterilmiştir. Sıcaklığın artması ile spektrum sağa kaymaktadır. Spektrumdaki dipA, dipB ve dipC' nin toplam spektral kayma miktarları sırasıyla 1.88, 1.73 ve 2.32 nm' dir.



Şekil 5.34 KOF-İOF sensörünün farklı sıcaklıklar için transmisyon spektrumu

Sensörün sıcaklık hassasiyetleri, Şekil 5.35' de görüldüğü gibi dipA, dipB ve dipC için sırasıyla 41.924, 40.014 ve 49.921 pm/^{o}C olarak bulunmuştur. 0.99' dan yüksek bulunan doğrusallık katsayıları, dalgaboyu kayması ile sıcaklık değişiminin yüksek doğrusallıkta olduğunu göstermektedir. Ayrık zamanlı ölçümlerde ve 10 pm çözünürlüklü bir OSA kullanılması durumunda, sensörün sıcaklık çözünürlüğü (dipC referans alınırsa) 0.2 ^{o}C' dir.



Şekil 5.35 KOF-İOF sensörünün sıcaklık hassasiyeti

5.2.2.4 KOF-İOF sensörü eş zamanlı sıcaklık ve gerinim deneysel sonuçları

Eş zamanlı gerinim ve sıcaklık ölçümlerinde, KOF-İOF sensörün çözünürlüğü katsayı matrisi yöntemi ile hesaplanabilir:

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_B\\ \Delta\lambda_C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}40.014 & -0.9486\\ 49.921 & -0.692\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta T\\ \Delta\varepsilon\end{bmatrix} \quad (5.3)$$

10 pm çözünürlüklü OSA ile eş zamanlı ölçümlerde sensörün gerinim ve sıcaklık çözünürlükleri sırasıyla 45.80 με ve 0.83 ^{o}C olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki sıcaklık ve gerinim ölçen sensörler ile KOF-İOF sensörün hassasiyet karşılaştırması Çizelge 5.2' de verilmiştir.

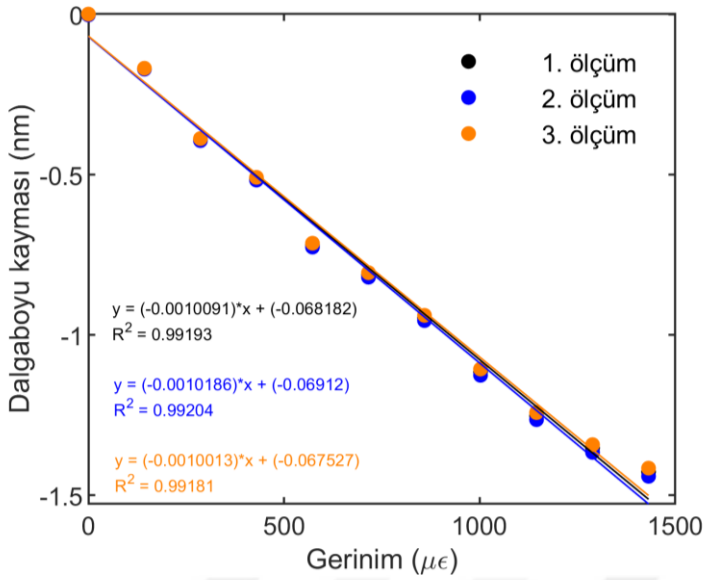
Çizelge 5.2 KOF-İOF sensörünün gerinim ve sıcaklık hassasiyetlerinin literatür karşılaştırması

Sensör No	Sensör [Ref.]	Gerinim Hassasiyeti (pm/με)	Sıcaklık Hassasiyeti (pm/°C)
1	(Sun vd. 2015)	0.48	52.00
2	(Zhou vd. 2008)	-0.84	-243.40
3	(Jiang vd. 2015)	2.57	8.50
4	(Yoon vd. 2012)	-0.55	49.60
5	(Li vd. 2012)	54.97	14.71
6	(Dong vd. 2015)	1.03	57.50
7	(André vd. 2012)	-23.70	16.56
8	(Qi vd. 2012)	0.65	40.17
9	(Hu vd. 2020)	0.76	13.20
10	(Naeem vd. 2019)	-1.86	9.70
11	**KOF-İOF**	**1.00**	**49.92**

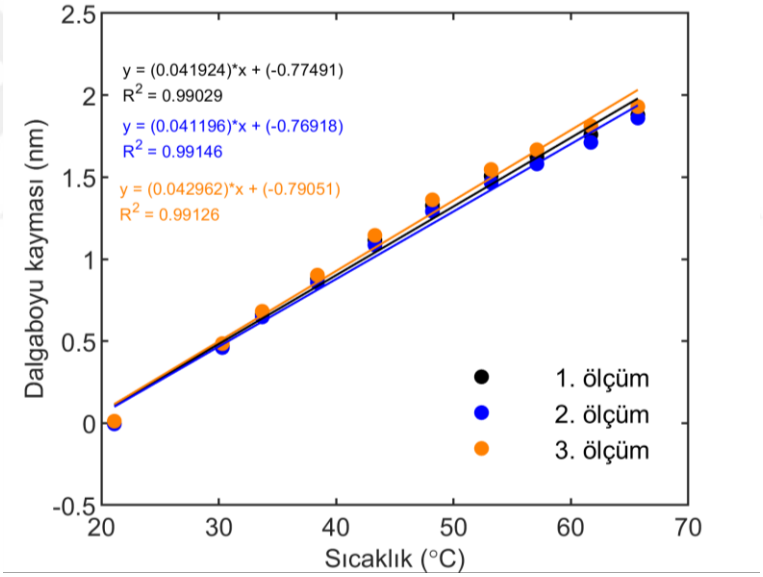
Çizelge 5.2 göre KOF-İOF sensörünün gerinim hassasiyeti 1, 2, 4, 8, 9 numaralı sensörlerden, sıcaklık hassasiyeti 3, 5, 7, 8, 9, 10 numaralı sensörlerden daha yüksektir. KOF-İOF sensörünün gerinim hassasiyeti 6 numaralı sensör ile benzer, gerinim hassasiyeti daha düşüktür.

5.2.2.5 KOF-İOF sensör deneysel ölçüm tekrarlanabilirliği

Ölçümlerin tekrarlanabilirliğini belirlemek için sensörün ayrık zamanlı gerinim ve sıcaklık ölçümleri, aynı ortam koşullarında 3 defa tekrarlanmıştır. Spektrumdaki dipA noktası referans alınarak elde edilen tekrarlı gerinim ve sıcaklık hassasiyet grafikleri sırasıyla Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’ te gösterilmiştir.



Şekil 5.36 KOF-İOF sensörünün tekrarlanan gerinim ölçüm sonuçları

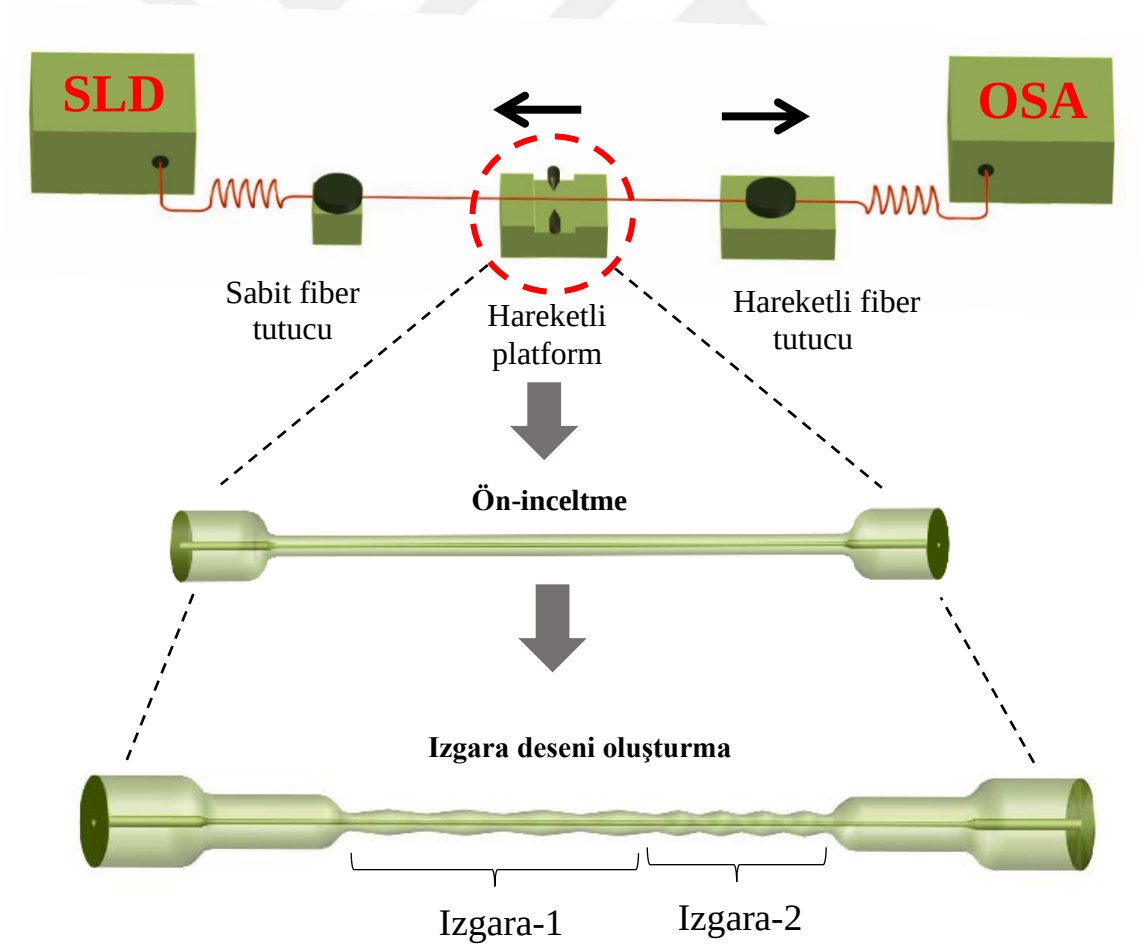


Şekil 5.37 KOF-İOF sensörünün tekrarlanan sıcaklık ölçüm sonuçları

Gerinim ve sıcaklık hassasiyet değerlerindeki standart sapmalar sırasıyla %0.8 ve %2.1 olarak hesaplanmıştır. Benzer değerler dipB ve dipC için de elde edilmiştir. Bu değerler, ölçümlerin tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Sıcaklık ölçümlerindeki standart sapmanın yüksek olmasının sebebi sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlik ve fırın sıcaklığındaki kararsızlıktır.

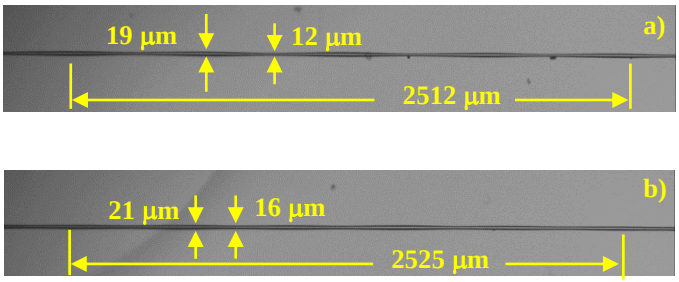
5.2.3 Izgara desenli sensörün ölçüm sonuçları

Deneysel çalışmaların son aşamasında, fiberin inceltilme bölgesine farklı geometrik yapılarda ızgara desenleri yazdırılarak çift ızgara desenli yeni bir sensör üretilmiştir. Eş zamanlı ölçümler için sensör tasarımının, iki farklı dip noktası oluşturan iki yapı içermesi gerekmektedir. Bu şartı sağlamak için iki farklı ızgara deseni seri bağlanmıştır. Sensör çıkış spektrumunda her bir ızgara deseninin özgün dip noktaları oluşturması ve onların da dış ortam değişikliklerine hassasiyetlerinin farklı olması beklenmektedir. Çift ızgara desenli sensör tasarım aşamaları Şekil 5.38' te gösterilmiştir. Sensör üretimi 2 aşamada gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamada 125 µm kalınlığındaki standart tek-modlu fiber inceltilerek 30 µm çapta ve 22.6 mm uzunlukta İOF yapısı üretilmiştir. İkinci aşamada, bu inceltilmiş yapı üzerine 2 farklı ızgara deseni oluşturulmuştur.



Şekil 5.38 Çift ızgara desenli sensör üretim düzeneği

Üretilen ızgara desenlerinin mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 5.39.a ve Şekil 5.39.b' de gösterilmiştir. Izgara-1 ve Izgara-2 geometrik parametreleri Çizelge 5.3' te verilmiştir.



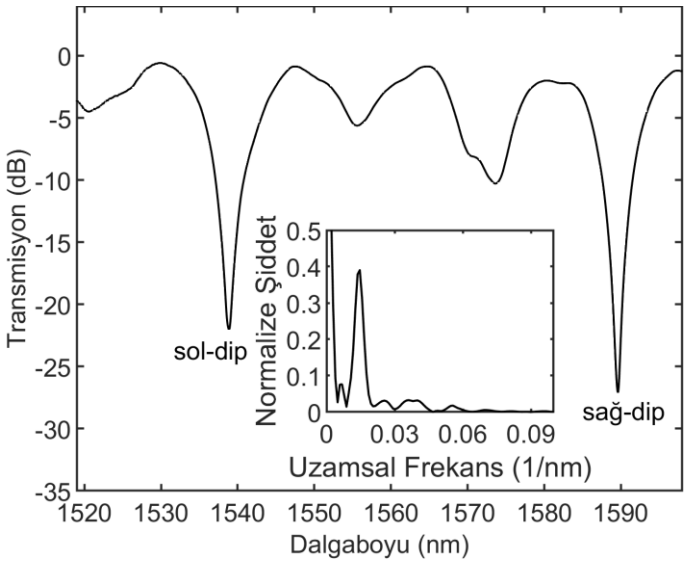
Şekil 5.39 Çift ızgara desenli sensörün mikroskop görüntüsü; a. Izgara-1 ve b. Izgara-2

Çizelge 5.3 Izgara-1 ve Izgara-2 parametreleri

	Izgara-1	**Izgara-2**
Periyot sayısı	9	14
Izgara periyodu (µm)	628	505
Tepe çapı (µm)	19	21
Çukur çapı (µm)	12	16

5.2.3.1 Izgara desenli sensör tipik spektrumu ve mod analizi

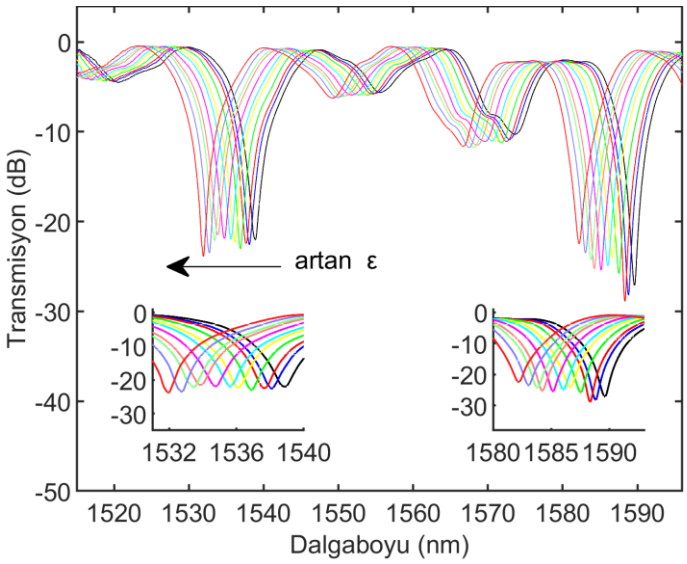
Sensörün hava ortamındaki transmisyon spektrumu Şekil 5. 40' de gösterilmiştir. İki farklı ızgara deseninden dolayı 1538.8 ve 1589.6 nm resonans dalgaboylarında iki dip noktası elde edilmiştir. Rezonans dalgaboylarının spektrumdaki konumlarına göre sol-dip ve sağ-dip olarak ifade edilmektedir. Sol-dip ve sağ-dip kayıp oranları sırasıyla -22.0 dB ve -27.1 dB' dir. Girişim spektrumuna katkıda bulunan kılıf modlarını incelemek için Şekil 5. 40' deki tipik spektrumun Fourier dönüşümü alınıp Şekil 5. 40 iç grafiğinde görülen uzamsal frekans spektrumu elde edilmiştir. 0.015/nm uzamsal frekansında bulunan tepe, temel modla girişime giren baskın kılıf modunu göstermektedir. Bunun yanında 0.007/nm, 0.025/nm, 0.036/nm ve 0.055/nm uzamsal frekanslarındaki zayıf kılıf modları da girişime katkıda bulunmaktadır.



Şekil 5. 40 Çift ızgara desenli sensörünün tipik spektrumu; İç şekil: Spektrumun Fourier dönüşümü

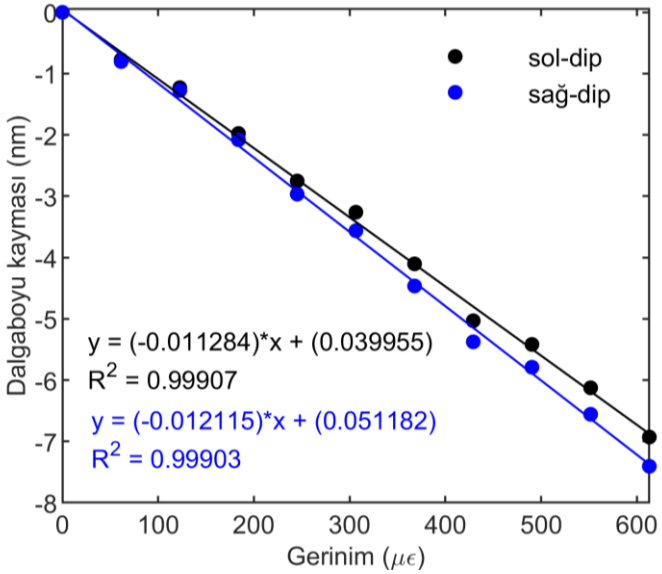
5.2.3.2 Izgara desenli sensör ile gerinim ölçümü

Gerinim ölçümleri için çift ızgara desenli sensörü Şekil 4.5' teki düzeneğe yerleştirilmiştir. Gerinimin artırılmasıyla elde edilen transmisyon spektrumu Şekil 5.41' de gösterilmiştir. Sensörün düşük bel çapından dolayı yüksek gerinimlerde kopmasını engellemek için her seferinde 61.2 με düşük gerinim uygulanmıştır. Toplamda 612 με gerinim uygulanarak spektrumun sola doğru daha kısa dalgaboylarına kaydığı gözlenmiştir. Dalgaboyu kaymalarının detaylı görüntüsü Şekil 5.41 iç grafiğinde verilmiştir. Buna göre, sol-dip ve sağ-dip rezonans dalgaboylarının toplam spektral kayma sırasıyla 6.94 nm ve7.41 nm' dir.



Şekil 5.41 Çift ızgara desenli sensörün gerinim spektrumu; İç şekil: Sol-dip ve sağ-dip büyütülmüş görünümü

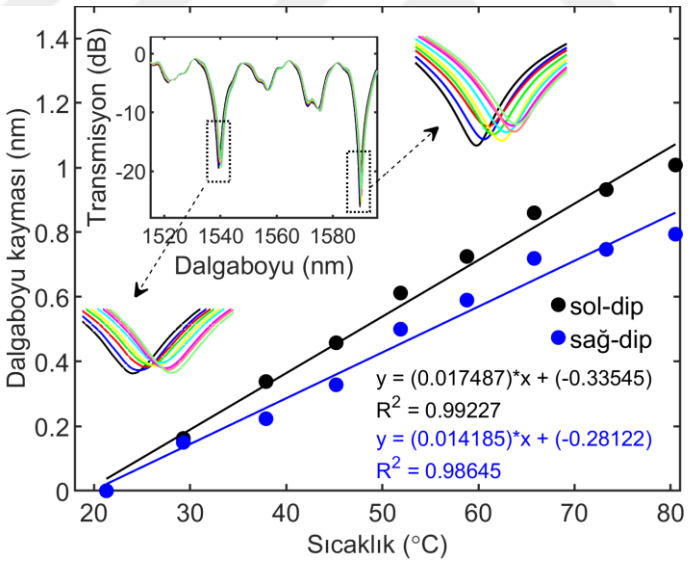
Sol-dip ve sağ-dip spektral kaymalarının doğrusal regresyonu Şekil 5.42' de gösterilmiştir. Gerinim değişimi ile spektral kayma arasında doğrusal bir bağıntı olup, 0.999' da daha yüksek doğrusallık katsayısı elde edilmiştir. Sensörün gerinim hassasiyeti sol-dip ve sağ dip için sırasıyla 11.28 pm/με ve 12.11 pm/με olarak hesaplanmıştır. Sensör transmisyon spektrumunun 10 pm çözünürlüklü bir OSA ile kaydedilmesi durumunda sağ-dip ile elde edilebilecek gerinim çözünürlüğü 0.82 με olacaktır.



Şekil 5.42 Çift desenli sensörün gerinim hassasiyeti

5.2.3.3 Izgara desenli sensör ile sıcaklık ölçümü

Sıcaklık ölçümleri Bölüm 4.4' te detayları verilen fırınla yapılmıştır. Sıcaklık değeri 21.3-80.5 ^{o}C arasında artırılarak elde edilen transmisyon spektrumu ve dip dalgaboylarındaki spektral kaymalar Şekil 5.43 iç grafiğinde gösterilmektedir. Sıcaklığın artırılmasıyla spektrum uzun dalgaboylarına kaymaktadır. Sol-dip ve sağ-dip spektral kaymaları sırasıyla 1.01 nm ve 0.79 nm' dir. Dip noktalarındaki kaymalarının doğrusal regresyonu ile hesaplanan sıcaklık hassasiyetleri Şekil 5.43' da gösterilmiştir. Sol ve sağ dip için sırasıyla 17.5 pm/^{o}C ve 14.2 pm/^{o}C hassasiyet değerleri hesaplanmıştır. Sıcaklık değişimi ile dalgaboyu kayması arasında 0.99' dan yüksek doğrusallık katsayısı hesaplanmıştır. Sensörün 10 pm çözünürlüklü OSA kullanılması durumunda sıcaklık ölçme çözünürlüğü 0.5 ^{o}C' dir.



Şekil 5.43 Çift ızgara desenli sensörün sıcaklık hassasiyeti. İç şekil: Çift ızgara desenli sensörün transmisyon grafiği ve dip noktalarının büyütülmüş görüntüsü

5.2.3.4 Izgara desenli sensör eş zamanlı sıcaklık ve gerinim ölçüm sonuçları

Önceki çalışmalarda olduğu gibi eş zamanlı sıcaklık ve gerinim ölçümü yapabilmek için katsayı matrisi kullanılmıştır. Dip noktalarının deneysel olarak hesaplanan hassasiyet değerlerinin matrise yerleştirilmesiyle aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_1\\ \Delta\lambda_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}17.487 & -11.284\\ 14.185 & -12.115\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta T\\ \Delta\varepsilon\end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Eş zamanlı ölçümlerde sensörün sıcaklık ve gerinim çözünürlüğü sırasıyla 4.5179 ^{o}C ve 6.1153 με olarak hesaplanmıştır.

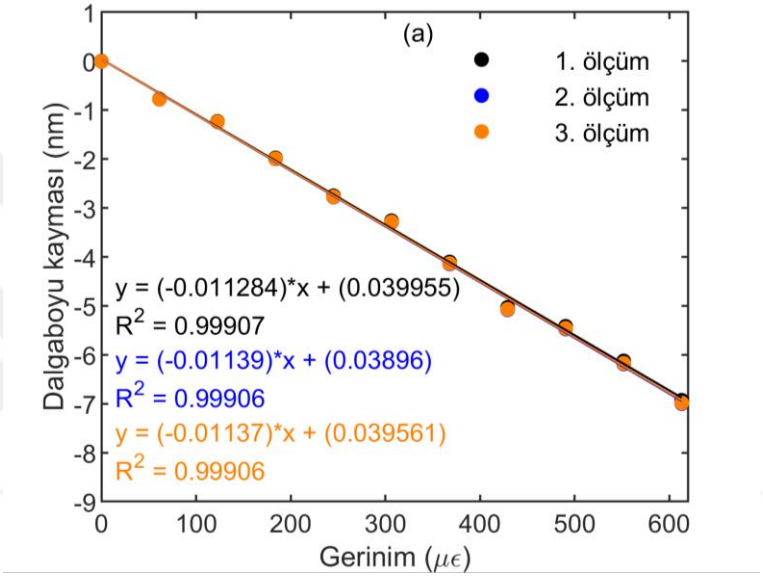
Literatürde yer bulan sıcaklık ve gerinim ölçen sensörlerle çift ızgara desenli sensörün hassasiyet karşılaştırma Çizelge 5. 4' te verilmiştir. Buna göre, ön inceltme ve çift LPG yapısı ile gerinim hassasiyetinin iyileştirildiği açıkça görünmektedir. Çizelgedeki sensörlerin sıcaklık hassasiyeti tamamen birbirinden farklıdır, bunun sebebi sıcaklık hassasiyetinin sensör üretiminde kullanılan fiberin malzemesine bağlı olmasıdır. Gerinim hassasiyeti ön inceltme çapı azaltılarak daha da iyileştirilebilir, çünkü gerinim fiberin kesit alanı ile ters orantılıdır.

Çizelge 5. 4 Çift ızgara desenli sensörün sıcaklık ve gerinim hassasiyetlerinin literatür karşılaştırması

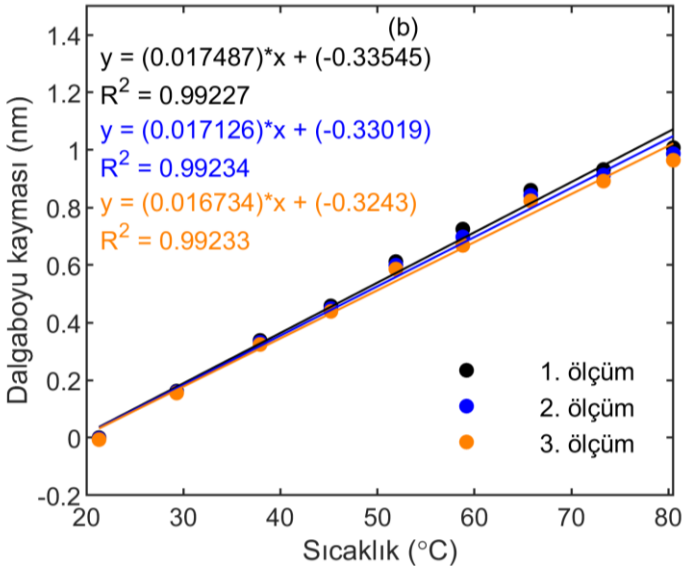
Sensör No	Sensör [Ref.]	Gerinim Hassasiyeti (pm/με)	Sıcaklık Hassasiyeti (pm/°C)
1	(Yoon vd. 2012)	-0.5	49.6
2	(Du vd. 2018)	-0.6	68.1
3	(Ascorbe vd. 2017)	1.0	66.0
4	(Zeng vd. 2015)	-1.4	80.0
5	(Yang vd. 2015)	-1.5	52.0
6	(Zheng vd. 2017)	-2.5	25.1
7	(Jiang vd. 2015)	2.6	8.5
8	(Zhang vd. 2018)	-7.2	-41.1
9	(Yoon vd. 2013)	-10.3	68.5
10	**Çift ızgara desenli sensör**	**-12.1**	**17.5**

5.2.3.5 Izgara desenli sensör için deneysel ölçüm tekrarlanabilirliği

Ölçüm tekrarlanabilirliği için ortam koşulları değiştirilmeden ölçümler 3 defa tekrarlanmış ve sol-dip için elde edilen sonuçlar Şekil 5.44 ve Şekil 5.45' de gösterilmiştir. Gerinim ve sıcaklık ölçümlerindeki standart sapma sırasıyla %0.5 ve %2.2 olarak hesaplanmış ve ölçüm işlemlerinin yüksek oranda doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 5.44 Çift ızgara desenli sensörün tekrarlanan gerinim ölçüm sonuçları



Şekil 5.45 Çift ızgara desenli sensörün tekrarlanan sıcaklık ölçüm sonuçları

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, çoklu parametre algılama için optik fiber sensörler simülasyon yöntemleriyle tasarlanmış ve deneysel yöntemlerle üretimleri gerçekleştirilerek ölçülecek parametrelere tepkileri analiz edilmiştir. Literatürde optik fiberin sensör olarak kullanımı için pek çok yaklaşım bulunmaktadır. En sık kullanılan yaklaşımlar fiberin inceltilmesi, kalınlaştırması ve kırılma indisinde periyodik modülasyonlar oluşturulması ile ızgara oluşturulması ve bunların kombinasyonlarıdır. Bu yaklaşımlardaki amaç, fiber çapının artırılması veya azaltılması ile ışığın mod alan çapının değiştirilmesidir. Mod alan çapının bu beklenmedik değişimi, fiber özü içerisinde tek bir modda ilerleyen ışığın bir kısmının kılıf içerisine geçerek kılıf modları olarak ilerlemeye devam etmesine yol açar. Öz ile kılıf modlarının yayılma ortamlarının (öz ve kılıf) kırılma indisleri birbirinden farklıdır ve dolayısıyla hızları da farklıdır. Modların aynı yolu almasına rağmen hızlarının farklı olması optiksel bir terim olarak faz farkı veya optik yol farkı olarak bilinmektedir. Modlar arası faz farkından dolayı, optik fiber sensör çıkışında yapıcı ve yıkıcı girişimler oluşmakta, diğer bir deyişle sensör çıkış spektrumunda tepe ve dip noktaları gözlenmektedir. Diğer taraftan kılıfın ve fiber özünün kırılma indisi, gerinim ve sıcaklıkla değişmektedir ve bu değişim aynı büyüklükte değildir. Dolayısıyla sensöre uygulanan gerinim veya sensör ortam sıcaklığının değişimi, modlar arasındaki faz farkını artırmakta yada azaltmaktadır. Bu da sensör çıkış spektrumundaki tepe ve dip noktalarında spektral kaymalara neden olmaktadır. Bu değişimin monitorizasyonu ile dış ortamın gerinimi ve sıcaklığı algılanabilmektedir.

Tez çalışmasının ilk aşamasında farklı sensör tasarımları gerçekleştirilmiş ve simülasyon teknikleri kullanılarak bu sensörlerin kırılma indisine tepkisi analiz edilmiştir. Beklenen sonuçların alınmasıyla, tasarlanan sensörlerin üretim aşamasına geçilerek üretilen sensörlerin ayrık ve eş zamanlı sıcaklık ve gerinime tepkileri detaylı olarak araştırılmıştır. Üretilen sensörler aşağıda listelenmiştir:

- İOF sensör
- KOF-İOF sensör

- İOF üzerine ızgara desenleri oluşturularak üretilen çift ızgara desenli sensör

İOF sensör inceltme tekniği, KOF-İOF sensör hem inceltme hem de kalınlaştırma teknikleri, çift ızgara desenli sensör inceltme ve ızgara oluşturma teknikleri ile üretilmiştir. Fibere inceltme ve ızgara deseni oluşturma işlemleri, bilgisayar kontrollü düzenekte üretilirken, fiber kalınlaştırma işlemi özel bir tür füzyon birleştirici ile gerçekleştirilmiştir. Her sensör üretimi için farklı kontrol yazılımları geliştirilmiştir. Sensörün sıcaklık testleri için 300 W gücünde rezistans ısıtmalı ve PID yöntemle sıcaklık kontrolü sağlanan bir fırın geliştirilmiştir. Fırın iç sıcaklığı, set edilen sıcaklıkta ±0.1 ^{o}C hassasiyetle stabil tutulabilmektedir. Sensörün gerinim testleri için ağırlık bağlayarak gerinim oluşturma geleneksel yöntemi yerine, adım motorlarla mikron bazında sensörü uzatarak yüksek hassasiyette gerinim oluşturma yöntemi kullanılmıştır.

İlk olarak, bel çapı 25 μm ve bel uzunluğu 29 mm olan İOF sensör üretilmiştir. Üretim tekrarlanabilirliğini test etmek için bel çapı uzunluğu dikkate alınarak 10 adet sensör üretilmiş ve % 2.2 standart sapma hesaplanmıştır. Bu değer, ölçüm düzeneğinin stabilitesini göstermektedir. Sensörün çıkış spektrumunda 3 dip noktası gözlenmiştir. Sensörde girişime katkısı bulunan modları belirlemek için BPM simülasyonları gerçekleştirilmiş ve deneysel spektrumun Fourier dönüşümleri ile karşılaştırılmıştır. Sensörde tek bir baskın kılıf modunun (LP02) girişime katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Gerinimin artmasıyla çıkış spektrumu dip noktaları mavi kayma, sıcaklığın artmasıyla kırmızı kayma gözlenmiştir. Sensörün ayrık zamanlı ölçümlerde en yüksek gerinim ve sıcaklık hassasiyetleri sırasıyla 8.4665 pm/με ve 12.623 pm/^{o}C olarak hesaplanmıştır. Gerinim ve sıcaklık ölçümleri tekrarlanabilirliği için ölçümler 3 defa tekrarlanmış ve standart sapma değerleri sırasıyla %1.0 ve %2.4 olarak bulunmuştur. Sensörün eş zamanlı ölçümlerde sıcaklık ve gerinim çözünürlükleri 9.07 ^{o}C ve 12.76 με olarak hesaplanmıştır. İOF sensör, sadece inceltme yapısı içermektedir, dolayısıyla dip noktaları sıcaklık ve gerinime benzer tepkiler vermektedir. Bunun sonucu olarak, eş zamanlı ölçümlerdeki sıcaklık çözünürlüğü değeri yeterli düzeyde değildir. Çözünürlüğü iyileştirmek için tezin ilerleyen farklı sensör tasarımları üzerinde çalışmalara devam edilmiştir.

Çoklu parametre ölçen optik fiber sensörlerin, ortam değişkenlerinin eş zamanlı değiştiği durumda onları ayırt edebilme yeteneğini gösteren çözünürlük terimi önemli bir kavramdır. Çözünürlüğü iyileştirmenin yolu, sensör diplerinin ortam değişkenlerine farklı tepkiler verebilmesidir. Bunu sağlamak için sensör iki farklı yapıdan oluşmalı veya yapıların üretim malzemelerinin optiksel karakteristikleri farklı olmalıdır. Tez çalışmasında standart optik fiber kullanıldığı için iki farklı yapı oluşturulması yoluna gidilmiştir. Üretilen ikinci sensörde bu durum dikkate alınarak kalınlıkları farklı KOF-İOF sensörü üretilmiştir. Kalın çapından dolayı KOF yapısının ve ince çapından dolayı İOF yapısının gerinime farklı tepkiler vermesi düşünülmüştür. KOF-İOF sensör üretimi iki aşama gerektirmektedir. İlk önce, özel bir tür füzyon birleştirme cihazı ile (Fujikura FSM 60s) fiber üzerinde KOF yapısı oluşturulmuş, ardından İOF yapısı KOF bitimine deney düzeneğinde üretilmiştir. KOF yapısı ile fiber çapı 125 μm' den 165 μm' ye çıkarılmış ve bel uzunluğu 373 μm' dir. İOF yapısında bel çapı artırılıp ve bel uzunluğu kısaltılarak ilk tasarıma göre kırılmaya karşı daha dayanıklı bir sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrık ölçümlerde sensörün gerinim ve sıcaklık hassasiyetleri sırasıyla 1.00 pm/με ve 49.92 pm/^{o}C olarak hesaplanmıştır. Ayrık ölçümlerde sensörün gerinim ve sıcaklık çözünürlükleri sırasıyla 9.9 με ve 0.2 ^{o}C olarak hesaplanmıştır. Elde edilen çözünürlük değerleri, bu yeni tasarım ile sıcaklık hassasiyetinin iyileştirildiğini göstermektedir.

Üçüncü sensör tasarımı, İOF yapısı üzerinde iki farklı ızgara deseni içermektedir. İki ızgara olmasının nedeni, sensöre çoklu-kanal dalgaboyu seçiciliği kazandırmaktır, yani spektrumda iki farklı dip noktası elde etmektir. Sensör üretimi 2 aşamalıdır. Birinci aşamada, 125 μm kalınlığındaki fiber inceltilerek 30 μm' ye indirilmiş, ikinci adımda bu inceltilmiş yapı üzerine 2 farklı ızgara deseni oluşturulmuştur. İki farklı ızgara deseninden dolayı 2 dip noktası elde edilmiştir. Ayrık ölçümlerde sensörün gerinim ve sıcaklık hassasiyetleri sırasıyla 12.11 pm/με ve 49.92 pm/^{o}C olarak hesaplanmıştır. Ayrık ölçümlerde sensörün gerinim ve sıcaklık çözünürlükleri sırasıyla sırasıyla 0.82 με ve 0.5 ^{o}C. Eş zamanlı ölçümlerde, çift LPG sensörün sıcaklık ve gerinim çözünürlükleri sırasıyla 4.51 ^{o}C ve 6.11 με olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçların literatür çalışmaları ile karşılaştırması Bölüm 5' te çizelgeler halinde verilmiştir. Özet olarak üretilen sensörlerin avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Pahalı cihazlar gerektirmemektedir.
- Karmaşık üretim yöntemleri içermemektedir.
- İOF ve ızgara desenli sensörler ince yapılarından dolayı yüksek gerinim hassasiyetlerine sahiptir.
- KOF-İOF sensörü kompakt yapıya sahiptir.
- Yüksek üretilebilirlik ve ölçüm tekrarlanabilirliğine sahip olduklarından kararlı yapıya sahiptirler.
- İnceltme bel çaplarından dolayı kırılma indisi ölçümleri için de kullanılabilirler.
- En önemlisi, üretilen sensörler transmisyon spektrumlarındaki birden çok dip noktasından dolayı çoklu parametre algılamaya yapabilmektedirler.

Tez çalışmaları süresince elde edilen deneysel kazanımlar ve teorik araştırma sonuçları doğrultusunda aşağıdaki gelecek dönem çalışmalarının sensörün performasını artıracağı düşünülmektedir:

- Fiber sensörlerin sıcaklık duyarlılığı fiberin üretim malzemesine bağlıdır. Fotonik kristal fiberde öz ile kılıf kırılma indisleri birbirine yakın olduğu için sıcaklığa duyarsız iken standart tek-modlu fibere göre gerinim duyarlılığı 5 kat daha fazladır. Mevcut sensör tasarımlarının bir bölümü fotonik kristal fiber ile tasarlanarak eş zamanlı ölçümlerde sensörün çözünürlüğü iyileştirilebilir.
- Öz kısmı boron ve/veya germanyum ile katkılandırılmış özel fiber türleri kullanılarak sıcaklık hassasiyetleri iyileştirilebilir.
- Izgara desenli sensörde ızgaralardan birinin üretim yöntemi değiştirilerek diğerinden oldukça farklı geometriye sahip ızgara üretilebilir. Bu sayede, dip noktalarının sıcaklık ve gerinime tepkileri farklı olacaktır.
- Fiber inceltme tekniği ile sönümlenen dalga güçlendirilmekte ve sensör kırılma indisi ölçümlerine uygun bir aday haline gelmektedir. Tasarlanan sensörlerin gerinim, sıcaklık ve kırılma indisleri eş zamanlı ölçümleri için araştırılabilir.

KAYNAKLAR

André, R. M., Biazoli, C. R., Silva, S. O., Marques, M. B., Cordeiro, C. M. ve Frazão, O. 2012. Strain-temperature discrimination using multimode interference in tapered fiber. IEEE Photonics Technology Letters, 25, 155-158.

Ascorbe, J., Coelho, L., Santos, J. L., Frazão, O. ve Corres, J. M. 2017. Temperature compensated strain sensor based on long-period gratings and microspheres. IEEE Photonics Technology Letters, 30, 67-70.

Bhatia, V. 1999. Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing. Optics Express, 4, 457-466.

Bilodeau, F., Hill, K. O., Faucher, S. ve Johnson, D. C. 1988. Low-loss highly overcoupled fused couplers: Fabrication and sensitivity to external pressure. Journal of Lightwave Technology, 6, 1476-1482.

Birks, T. A. ve Li, Y. W. 1992. The shape of fiber tapers. Journal of Lightwave Technology, 10, 432-438.

Black, R. J. ve Bourbonnais, R. 1986. Core-mode cutoff for finite-cladding lightguides. IEEE Proceedings J (Optoelectronics), 133, 377-384.

Brambilla, G., Finazzi, V. ve Richardson, D. J. 2004. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers. Optics Express, 12, 2258-2263.

Cardenas-Sevilla, G., Monzon-Hernandez, D., Torres-Gomez, I. ve Martinez-Rios, A. 2009. Mechanically induced long-period fiber gratings on tapered fibers. Optics communications, 282, 2823-2826.

Chen, H. F., Wang, D. N. ve Wang, Y. 2015. Simultaneous strain and temperature sensing using a slightly tapered optical fiber with an inner cavity. Analyst, 140, 1859-1862.

Chen, L. X., Huang, X. G., Li, J. Y. ve Zhong, Z. B. 2012. Simultaneous measurement of refractive index and temperature by integrating an external Fabry-Perot cavity with a fiber Bragg grating. Review of Scientific Instruments, 83, 053113.

Chu, J., Shen, C., Qian, F., Zhong, C., Zou, X., Dong, X. ve Jiang, T. 2014. Simultaneous measurement of strain and temperature based on a long-period grating with a polarization maintaining fiber in a loop mirror. Optical Fiber Technology, 20, 44-47.

Davis, D., Gaylord, T., Glytsis, E., Kosinski, S., Mettler, S. ve Vengsarkar, A. 1998. Long-period fibre grating fabrication with focused CO2 laser pulses. Electronics Letters, 3, 302-303.

Dianov, E., Kurkov, A., Medvedkov, O. ve Vasiliev, S. 1996. Photoinduced long-period fiber grating as a promising sensor element. In Proc. of Eurosensors X, The 10th European Conf. on Solid-State Transducers, 5, Leuven.

Dong, B., Peng, Y., Wang, Y. ve Yu, C. 2015. Mode division multiplexing in a fiber modal interferometer for dual-parameters measurement. IEEE Photonics Technology Letters, 28, 143-146.

Du, C., Wang, Q. ve Zhao, Y. 2018. Long-period fiber grating sensor induced by electric-arc discharge for dual-parameter measurement. Instrumentation Science & Technology, 46, 1-11.

Erdogan, T. 1997a. Fiber grating spectra. Journal of Lightwave Technology, 8, 1277-1294.

Erdogan, T. 1997b. Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters. Journal of the Optical Society of America A, 8, 1760-1773.

Frazão, O., Marques, L. M., Santos, S., Baptista, J. M. ve Santos , J. L. 2006. Simultaneous measurement for strain and temperature based on a long-period grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror. IEEE Photonics Technology Letters, 18, 2407-2409.

Fujimaki, M., Ohki, Y., Brebner, J. ve Roorda, S. 2000. Fabrication of long-period optical fiber gratings by use of ion implantation. Optics Letters, 25, 88-89.

Geng, Y., Li, X., Tan, X., Deng, Y. ve Yu, Y. 2011. High-sensitivity Mach–Zehnder interferometric temperature fiber sensor based on a waist-enlarged fusion bitaper. IEEE Sensors Journal, 11, 2891-2894.

Gouveia, C. A., Baptista, J. M. ve Jorge, P. A. 2013. Refractometric optical fiber platforms for label free sensing. Current Developments in Optical Fiber Technology, 345-373.

Harun, S., Lim, K., Tio, C., Dimyati, K. ve Ahmad, H. 2013. Theoretical analysis and fabrication of tapered fiber. Optik, 124, 538-543.

Hu, Q., Wang, P., Rao, B., Wang, M., Wang, Z. ve Xu, X. 2020. Simultaneous measurement of temperature and strain using double-cladding fiber based hybrid Bragg grating. OSA Continuum, 3, 1031-1037.

Huang, W., Xu, C., Chu, S. ve Chaudhuri, S. 1992. The finite-difference vector beam propagation method: analysis and assessment. Journal of Lightwave Technology, 10, 295-305.

Ishikura, A., Kato, Y. ve Miyauchi, M. 1986. Taper splice method for single-mode fibers. Applied optics, 2519, 3460-3465.

Jiang, N., Zhu, H., Bao, K. ve Hu, Y. 2015. Simultaneous discrimination of strain and temperature using dual-gratings in one fiber. Optik, 126, 3974-3977.

Jin, W., Michie, W. C., Thursby, G., Konstantaki, M. ve Culshaw, B. 1997. Simultaneous measurement of strain and temperature: error analysis. Optical Engineering, 36, 598-609.

Kenny, R., Birks, T. ve Oakley, K. 1991. Control of optical fibre taper shape. Electronics letters, 27, 1654-1656.

Kieu, K. Q. ve Mansuripur, M. 2006. Biconical fiber taper sensors. IEEE Photonics Technology Letters, 18, 2239-2241.

Kondo, Y., Nouchi, K., Mitsuyu, T., Watanabe, M., Kazansky, P. ve Hirao, K. 1999. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses. Optics Letters, 24, 646-648.

Krohn, D., MacDougall, T. ve Mendez, A. 2014. Fiber optic sensors fundamentals and applications. SPIE, 315, Washington.

Li, B., Jiang, L., Wang, S., Yang, J., Wang, M. ve Chen, Q. 2012. High sensitivity Mach–Zehnder interferometer sensors based on concatenated ultra-abrupt tapers on thinned fibers. Optics & Laser Technology, 44, 640-645.

Li, B., Jiang, L., Wang, S., Zhou, L., Xiao, H. ve Tsai, H. 2011. Ultra-abrupt tapered fiber Mach-Zehnder interferometer sensors. Sensors, 11(6), 5729-5739.

Li, J., Zhang, W., Gao, S., Bai, Z., Wang, L., Liang, H. ve Yan, T. 2013. Simultaneous force and temperature measurement using S fiber taper in fiber Bragg grating. IEEE Photonics Technology Letters, 26, 309-312.

Lin, C. Y., Wang, L. A. ve Chern, G. W. 2001. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors. Journal of Lightwave Technology, 19, 1159.

Lopez-Higuera, J. 2002. Handbook of Optical Fibre Sensing Technology. Wiley, 810, England.

Lu, P., Men, L., Sooley, K. ve Chen, Q. 2009. Tapered fiber Mach–Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. Applied Physics Letters, 94, 131110.

Marcuse, D. 1978. Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers. Journal of the Optical Society of America, 68, 103-109.

Meltz, G., Morey, W. ve Glenn, W. H. 1989. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. Optics Letters, 14, 823-825.

Naeem, K., Chung, Y. ve Kim, B. H. 2019. Cascaded two-core PCFs-based in-line fiber interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature. IEEE Sensors Journal, 19, 3322-3327.

Najari, M., Javan, A. M. ve Amiri, N. 2015. Hybrid all-fiber sensor for simultaneous strain and temperature measurements based on Mach–Zehnder interferometer. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 126, 2022-2025.

Navruz, I., Ari, F. ve Bilsel, M. 2016. Yüksek Duyarlıklı Bio-Kimyasal Fiberoptik Algılayıcıların Araştırılması ve Üretilmesi. TÜBİTAK Proje No: 1114E040, Ankara.

Navruz , I., Ari, F., Bilsel, M. ve Zinah, A. 2018. Enhancing refractive index sensitivity using micro-tapered long-period fiber grating inscribed in biconical tapered fiber. Optical Fiber Technology, 45, 201-207.

Ozcan, L. C., Treanton, V., Guay, F. ve Kashyap, R. 2007. Highly symmetric optical fiber tapers fabricated with a CO2 laser. IEEE Photonics Technology Letters, 19, 656-658.

Pangaribuan, T., Yamada, K., Jiang, S., Ohsawa, H. ve Ohtsu, M. 1992. Reproducible fabrication technique of nanometric tip diameter fiber probe for photon scanning tunneling microscope. Japanese Journal of Applied Physics, 31, L1302.

Pedrola, G. 2015. Beam Propagation Method for Design of Optical Waveguide Devices. John Wiley & Sons, 381, Madrid.

Qi, T., Xiao, S., Shi, J., Zhou, Z., Bi, M. ve Li, P. 2012. Simultaneous strain and temperature measurement using compact core-offset inter-modal interferometer with embedded fiber Bragg grating. 2012 Asia Communications and Photonics Conference (ACP, 7-10 November (s. 1-3. Guangzhou, China: IEEE.

Rajan, G. 2017. Optical fiber sensors: advanced techniques and applications. CRC Press, 544, Newyork.

Righini, G., Tajani, A. ve Cutolo, A. 2009. An Introduction to Optoelectronic Sensors. World Scientific, 570, Singapore.

Serway, R. 2018. Physics for scientists and engineers. Thomson Brooks/Cole, 1382, California.

Sun, H., Yang , S., Zhang, X., Yuan, L., Yang, Z. ve Hu, M. 2015. Simultaneous measurement of temperature and strain or temperature and curvature based on an optical fiber Mach–Zehnder interferometer. Optics Communications, 340, 39-43.

Tian, Z. ve Yam, S. H. 2008a. In-line abrupt taper optical fiber Mach–Zehnder interferometric strain sensor. IEEE Photonics Technology Letters, 21, 161-163.

Tian, Z., Yam, S. ve Loock, H. 2008b. Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber. Optics letters, 33, 1105-1107.

Tian, Y. ve Scott, S.-H. 2008c. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers. IEEE Photonics Technology Letters, 20, 626-628.

Trager , F. 2012. Handbook of Lasers and Optics. Springer, 1178, Newyork.

Vengsarkar, A. M., Lemaire, P. J., Judkins, J. B., Bhatia, V., Erdogan, T. ve Sipe, J. E. 1996. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. Journal of Lightwave Technology, 14, 58-65.

Xia, T. H., Zhang, A. P., Gu, B. ve Zhu, J. J. 2010. Fiber-optic refractive-index sensors based on transmissive and reflective thin-core fiber modal interferometers. Optics Communications, 283, 2136-2139.

Yang, W., Geng, T., Yang, J., Zhou, A., Liu, Z., Geng, S. ve Yuan, L. 2015. A phase-shifted long period fiber grating based on filament heating method for simultaneous measurement of strain and temperature. Journal of Optics, 17, 075801.

Yoon, M.-S., Park, S. ve Han, Y.G. 2012. Simultaneous Measurement of Strain and Temperature by Using a Micro-Tapered Fiber Grating. Journal of Lightwave Technology, 30, 1156-1160.

Yoon, M. S., Kim, H. J., Kim, S. J. ve Han, Y. G. 2013. Influence of the waist diameters on transmission characteristics and strain sensitivity of microtapered long-period fiber gratings. Optics Letters, 38, 2669-2672.

Zeng, H., Geng, T., Yang, W., An, M., Li, J., Yang, F. ve Yuan, L. 2015. Combining two types of gratings for simultaneous strain and temperature measurement. IEEE Photonics Technology Letters, 28, 477-480.

Zhang, C., Lu, P., Liao, H., Ni, W., Fu, X., Jiang, X. ve Zhang, J. 2017. Simultaneous measurement of axial strain and temperature based on a Z-shape fiber structure. IEEE Photonics Journal, 9, 1-8.

Zhang, N., Xu, W., You, S., Yu, C., Dong, B. ve Li, K. 2018. Simultaneous measurement of refractive index, strain and temperature using a tapered structure based on SMF. Optics Communications, 410, 70-74.

Zhang, W., Hao, J., Lou, X., Dong, M. ve Zhu, L. 2018. All-fiber dual-parameter sensor based on cascaded long period fiber grating pair fabricated by femtosecond laser and CO2 laser. Fiber and Integrated Optics, 37, 66-78.

Zheng, Z. M., Yu, Y. S., Zhang, X. Y., Guo, Q. ve Sun, H. B. 2017. Femtosecond laser inscribed small-period long-period fiber gratings with dual-parameter sensing. IEEE Sensors Journal, 18, 1100-1103.

Zhou, D. P., Wei, L., Liu, W. K., Liu, Y. ve Lit, J. W. 2008. Simultaneous measurement for strain and temperature using fiber Bragg gratings and multimode fibers. Applied Optics, 47, 1668-1672.

Zhou, J., Liao, C., Wang, Y., Yin, G., Zhong, X., Yang, K., Sun, B., Wang, G. ve Li, Z. 2014. Simultaneous measurement of strain and temperature by employing fiber Mach-Zehnder interferometer. Optics Express, 22, 1680-1686.

Zhou, K., Liu, H. ve Hu, X. 2001. uning the resonant wavelength of long period fiber gratings by etching the fiber's cladding. Optics Communications, 197, 295-299.