

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**DERİN ÖĞRENME İLE GÖRÜNTÜ İŞLEMeye DAYALI KONİK FİBER
SENSÖR GELİŞTİRİLMESİ**

Hüsamettin ŞERBETÇİ

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2025**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

DERİN ÖĞRENME İLE GÖRÜNTÜ İŞLEMESİNE DAYALI KONİK FİBER SENSÖR GELİŞTİRİLMESİ

Hüsamettin ŞERBETÇİ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Konik fiber sensörler, hassas algılama ve ölçüm gerektiren birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Konik fiber sensörlerde algılama, optik spektrum analizör aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yöntemlerin aksine bu tez çalışmasında, derin öğrenme teknikleri kullanılarak görüntü işlemeye dayalı konik fiber sensörler geliştirilmiş ve deneysel olarak algılama yapabileceği gösterilmiştir. Çok modlu fiberlerde kılavuzlanan yüzlerce mod, fiber çıkışında benek deseni adı verilen bir girişim deseni oluşturmaktadır. Fiber sonuna yerleştirilen bir CCD kamera ile gözlemlenen benek desenleri, ölçülecek fiziksel büyüklüğün değişimine bağlı olarak farklılaşmaktadır. Benek deseni görüntülerindeki değişim analiz edilerek algılama işlemi gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında üretilen konik fiber sensörler ile kırılma indisi, gerilme ve sıcaklık olmak üzere üç farklı fiziksel büyüklüğün, geniş bir ölçüm aralığında, yüksek çözünürlüklü ve hassas şekilde algılaması gerçekleştirilmiştir. Algılama işlemi için korelasyon analizi ve bir derin öğrenme yöntemi olan evrişimli sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda basamak ve dereceli indisli sınıfta yer alan dört farklı çok modlu fiber kullanılmıştır. Farklı öz ve kılıf çaplarına sahip fiberlerin sensör duyarlılığına etkisi incelenmiş ve iki farklı dalga boyunda (635 nm ve 1550 nm) çalışılarak dalga boyunun sensör performansına etkileri araştırılmıştır. Ölçülebilen en düşük fiziksel büyüklük değişimi kırılma indisi ölçümlerinde 1.34×10^{-5} , gerilme ölçümlerinde 12.5 $\mu\epsilon$ ve sıcaklık ölçümlerinde 0.5 °C olarak gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında ayrıca konik fiber sensörlerde benek deseni görüntüleme kullanılarak derin öğrenme tabanlı algılama yapılabileceği gösterilmiş ve literatüre yeni bir yaklaşım kazandırılmıştır.

Şubat 2025, 91 sayfa

Anahtar Kelimeler: Konik fiber sensör, Benek deseni, Kırılma indisi, Gerilme, Sıcaklık, Korelasyon analizi, Derin öğrenme, Evrişimli sinir ağı

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPMENT OF TAPERED FIBER SENSOR BASED ON IMAGE PROCESSING WITH DEEP LEARNING

Hüsamettin ŞERBETÇİ

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

Supervisor: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Tapered fiber sensors are utilized in various applications requiring precise detection and measurement. In tapered fiber sensors, detection is performed using an optical spectrum analyzer. Unlike conventional methods, in this thesis, tapered fiber sensors based on image processing were developed using deep learning techniques, and their ability to perform detection was demonstrated experimentally. Hundreds of modes guided in multimode fibers generate an interference pattern called a speckle pattern at the fiber output. The speckle patterns, observed through a CCD camera positioned at the fiber end, vary with changes in the physical parameter being measured. By analyzing changes in the speckle pattern images, detection can be achieved. In this thesis, the developed tapered fiber sensors were used to detect three distinct physical quantities refractive index, strain, and temperature over a broad measurement range with high resolution and precision. Correlation analysis and a deep learning method, convolutional neural networks, were employed for the detection process. Experimental studies utilized four different multimode fibers from the step-index and graded-index classes. The effects of fibers with different core and cladding diameters on sensor sensitivity were examined, and the effects of wavelength on sensor performance were investigated by operating at two different wavelengths (635 nm and 1550 nm). The smallest measurable physical parameter changes were demonstrated as 1.34×10^{-5} in refractive index measurements, $12.5 \mu\epsilon$ in strain measurements, and $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in temperature measurements. In this thesis, it was also demonstrated that deep learning-based detection can be performed using speckle pattern imaging in conical fiber sensors, providing a new approach to literature.

February 2025, 91 pages

Key Words: Tapered optical fiber sensor, Speckle pattern, Refractive index, Strain, Temperature, Correlation analysis, Deep learning, Convolutional neural networks

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmamın her aşamasında rehberlik eden, akademik birikimi ve değerli yönlendirmeleriyle yolumu aydınlatan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. İsa NAVRUZ'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, bu çalışmanın şekillenmesinde ve akademik olarak olgunlaşmamda önemli bir rol oynamıştır. Bilgi ve tecrübelerini paylaşan ve tez çalışmasında yol gösteren Doç. Dr. Fikret ARI hocama teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte her daim yanımda olan, sabırları ve destekleriyle gücümü artıran sevgili eşim Özlem ŞERBETÇİ'ye ve oğlum Ayhan ŞERBETÇİ'ye içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, hayatım boyunca beni destekleyen, bu sürecin üstesinden gelmemde bana güç veren aileme şükranlarımı sunarım.

Hüsamettin ŞERBETÇİ
Ankara, Şubat 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI

ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1 Optik Algılamada Konik Fiber Sensörlerin Kullanımı	5
2.2 Optik Algılamada Benek Deseni Algılama Tekniği	11
3. KURAMSAL TEMELLER.....	17
3.1 Konik Fiber Sensör Temelleri.....	17
3.2 Benek Deseni Görüntüleme ve Korelasyon Analizi	21
3.3 Evrişimli Sinir Ağı Mimarisi.....	27
4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	32
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
5.1 Konik Fiber Sensör Üretim Düzenegi	42
5.2 Sensör Ölçüm Sistemlerinin Kurulması	44
5.2.1 Kırılma indisi ölçüm düzeneğinin kurulması.....	45
5.2.2 Gerilme ölçüm düzeneğinin kurulması.....	46
5.2.3 Sıcaklık ölçüm düzeneğinin kurulması.....	47
5.3 Farklı Fiziksel Büyüklüklerin Benek Deseni Görüntülemeyle Ölçümü	47
5.3.1 Kırılma indisine duyarlılık	48
5.3.2 Gerilmeye duyarlılık.....	54
5.3.3 Sıcaklığa duyarlılık.....	58
6. DERİN ÖĞRENME İLE ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI.....	66
6.1 Derin Öğrenme ile Kırılma İndisi Ölçümü	66
6.2 Derin Öğrenme ile Gerilme Ölçümü	75
6.3 Derin Öğrenme ile Sıcaklık Ölçümü	77
7. SONUÇ.....	81
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ.....	90

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ΔCC	Korelasyon Katsayısı Değişimi
ΔRI	Kırılma İndisi Değişimi
ΔL	Fiber Uzunluğundaki Değişim
ΔT	Sıcaklık Değişimi
d_p	Sızma Derinliği
n_{co}	Fiber Öz Kırılma İndisi
n_{cl}	Fiber Kılıf Kırılma İndisi
θ	Işığın Geliş Açısı
λ	Işık Dalga Boyu
I	Işık Yoğunluğu
φ	Mod Fazı
n_{eff}	Etkin Kırılma İndisi
L	Fiber Uzunluğu
V	Normalize Frekans
$r(z)$	Konik Sensör Bel Yarıçapı
n_{ex}	Dış Ortam Kırılma İndisi
$a_{0m}(x, y)$	X-Y Düzleminde m'inci Modun Genliği
$\phi_{0m}(x, y)$	X-Y Düzleminde m'inci Modun Fazı
M_i	Referans Görüntü
N_i	Referans Görüntü ile Korelasyonu Araştırılan Görüntü
$\bar{M}$	Referans Görüntünün Ortalaması
$\bar{N}$	Referans Görüntü ile Korelasyonu Araştırılan Görüntünün Ortalaması
ε	Gerilme Büyüklüğü

Kısaltmalar

BPM	Işık Yayılım Metodu (Beam Propagation Method)
CC	Korelasyon Katsayısı (Correlation Coefficient)
CCD	Yük Bağlı Ayrıştırıcı (Charge Coupled Device)
CNN	Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network)
DMSO	Dimetil Sülfoksit (C_2H_6SO)
FBG	Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating)
FPI	Fabry-Perot Interferometresi
GI-MMF	Dereceli İndisli Çok Modlu Fiber (Graded Index Multi Mode Fiber)
KFS	Konik Fiber Sensör
LP	Lineer Polarizasyon
LPFG	Uzun Periyotlu Fiber Izgarası (Long Period Fiber Grating)
NIPC	Normalize Yoğunluk İç Çarpım Katsayısı (Normalized Intensity Inner Product Coefficient)
OSA	Optik Spektrum Analizör
ReLU	Doğrultulmuş Lineer Birim (Rectified Linear Unit)
SI-MMF	Basamak İndisli Çok Modlu Fiber (Step Index Multi Mode Fiber)
TDY	Tam Dahili Yansıma

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Tam dahili yansımadaki kaybolan dalga ve sızma derinliği.....	18
Şekil 3.2 Konik fiber sensörün geometrik yapısı	19
Şekil 3.3 Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensör yapısı	23
Şekil 3.4 Çok modlu bir fiberde oluşan benek deseni görüntüsü.....	25
Şekil 3.5 Görüntü işleme adımları	25
Şekil 3.6 Bölütler arası korelasyon katsayısının hesaplanması.....	26
Şekil 3.7 ReLU aktivasyon fonksiyonu	29
Şekil 3.8 Kullanılan CNN mimarisi	31
Şekil 4.1 Konik fiber sensörün tasarımı	32
Şekil 4.2 Konik fiber sensörün üç boyutlu görünüşü.....	33
Şekil 4.3 Konik fiber sensör girişine uygulanan girdi benek deseni görüntüsü.....	34
Şekil 4.4 Bel bölge kalınlığına bağlı korelasyon katsayısı değişimi.....	34
Şekil 4.5 Ortam kırılma indisi değişimine bağlı benek deseni oluşumu.....	36
Şekil 4.6 Bel bölge uzunluğuna bağlı korelasyon katsayısı değişimi	37
Şekil 4.7 Farklı bel çaplarında dalga boyuna bağlı korelasyon katsayısı değişimi.....	38
Şekil 4.8 Farklı bel uzunluklarında dalga boyuna bağlı korelasyon katsayısı değişimi	40
Şekil 4.9 1550 nm dalga boyunda dört farklı referans görüntü için korelasyonun değişimi	40
Şekil 4.10 635 nm dalga boyunda dört farklı referans görüntü için korelasyonun değişimi	41
Şekil 5.1 Elektrotların konumlandırılması ile oluşan geniş ark plazma hacmi.....	43
Şekil 5.2 Konik fiber sensör üretim tezgâhı.....	43
Şekil 5.3 Farklı bel çaplarında sahip fiberlerin inceltme sonrası mikroskop görüntüleri, (a) 62.5/125 µm dereceli indisli fiber, (b) 125/105 µm basamak indisli fiber, (c) 230/200 µm basamak indisli fiber	44
Şekil 5.4 Kırılma indisi ölçüm düzeneğinin gösterimi.....	45
Şekil 5.5 Kırılma indisi değişimi için kullanılan solüsyon kabı	46
Şekil 5.6 Fiber inceltme düzeneği laboratuvar görüntüsü.....	46
Şekil 5.7 Fırın düzeneği görüntüsü	47
Şekil 5.8 8 ml saf su içerisine eklenen etanol miktarına bağlı kırılma indisi değişimi...49	
Şekil 5.9 Bel çapına bağlı korelasyon katsayısının değişimi	49
Şekil 5.10 Bel uzunluğuna bağlı korelasyon katsayısının değişimi	50

Şekil 5.11 10 µl Etanol eklenerek elde edilen korelasyon katsayısının değişimi	51
Şekil 5.12 Işık dalga boyunun sensör duyarlılığına etkisi	52
Şekil 5.13 Saf su-DMSO solüsyonunun kırılma indis değişim aralığı	53
Şekil 5.14 Saf su-DMSO solüsyonu için kırılma indisi-korelasyon katsayısı değişimi	53
Şekil 5.15 Konik fiber sensörün zaman içerisinde ölçüm performansının değişimi.....	54
Şekil 5.16 Gerilme ölçümlerinde bel çapına bağlı korelasyon katsayısının değişimi.....	56
Şekil 5.17 Farklı sensör bel çapları için gerilmeye bağlı korelasyon katsayısının değişimi (a) 20 µm bel çapı, (b) 10 µm bel çapı.....	57
Şekil 5.18 Farklı bel uzunlukları için gerilmeye bağlı korelasyon katsayısının değişimi	57
Şekil 5.19 Gerilme ölçümlerinde dalga boyunun korelasyon katsayısına etkisi.....	58
Şekil 5.20 İnceltilmemiş fiberin 635 nm dalga boyunda 40-80 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi.....	59
Şekil 5.21 İnceltilmemiş fiberin 635 nm dalga boyunda 80-120 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi.....	59
Şekil 5.22 İnceltilmiş fiberin 635 nm dalga boyunda 40-80 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi.....	60
Şekil 5.23 İnceltilmiş fiberin 635 nm dalga boyunda 80-120 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi.....	60
Şekil 5.24 İnceltilmiş fiberin 1550 nm dalga boyunda 40-80 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi.....	61
Şekil 5.25 İnceltilmiş fiberin 1550 nm dalga boyunda 80-120 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi.....	61
Şekil 5.26 Düz ve U-şekilli sensörlerin 635 nm dalga boyunda ve 40-80 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi	63
Şekil 5.27 Düz ve U-şekilli sensörlerin 1550 nm dalga boyunda ve 40-80 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi	63
Şekil 5.28 Düz ve U-şekilli sensörlerin 635 nm dalga boyunda ve 80-120 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi	64
Şekil 5.29 Düz ve U-şekilli sensörlerin 1550 nm dalga boyunda ve 80-120 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi	64
Şekil 6.1 CNN ağının epoch sayısına bağlı olarak doğruluk ve kayıp fonksiyonları	75
Şekil 6.2 Sıcaklık ölçümleri için optimize edilen CNN modeli.....	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 20 °C sıcaklık artışında inceltilmemiş fiber ve KFS’ler için elde edilen korelasyon katsayısı değişimleri	62
Çizelge 6.1 Farklı türdeki fiberler ile 635 nm dalga boyunda gerçekleştirilen deneylerin CNN doğruluk oranları	67
Çizelge 6.2 Newport F-MBB ile 635 nm dalga boyunda elde edilen gerçek ve ölçülen kırılma indisi değerleri	68
Çizelge 6.3 Farklı türdeki fiberler ile 1550 nm dalga boyunda gerçekleştirilen deneylerin CNN doğruluk oranları	69
Çizelge 6.4 Etanol-su karışımının farklı konsantrasyonlarındaki ölçülebilir en küçük kırılma indisi değişimi ve CNN doğruluk oranları	70
Çizelge 6.5 DMSO-su karışımının farklı konsantrasyonlarındaki ölçülebilir en küçük kırılma indisi değişimi ve CNN doğruluk oranları	72
Çizelge 6.6 Benek deseni algılamaya dayalı derin öğrenme tabanlı algılama gerçekleştiren KFS'nin, literatürdeki kırılma indisi sensörleriyle karşılaştırılması	73
Çizelge 6.7 CNN modelinin epoch sayısına bağlı doğruluk oranları	74
Çizelge 6.8 CNN modelinin minibatch boyutuna bağlı doğruluk oranları	74
Çizelge 6.9 635 nm dalga boyunda Nufern-105 fiberinden üretilen KFS’nin CNN doğruluk oranları	76
Çizelge 6.10 Farklı fiber türleri ile gerçekleştirilen deneylerin CNN doğruluk oranları	77
Çizelge 6.11 40-80 °C ölçüm aralığı için ölçülebilir en küçük sıcaklık değerleri ve CNN doğruluk oranları	79
Çizelge 6.12 80-120 °C ölçüm aralığı için ölçülebilir en küçük sıcaklık değerleri ve CNN doğruluk oranları	79

1. GİRİŞ

Optik fiberler gelişimini büyük ölçüde tamamladığı doksanlı yıllardan itibaren hemen her alanda kullanılmaya başlanmıştır. Haberleşme alanında sağladığı eşsiz özelliklerin yanı sıra optik fiberler sağlık, uzay, havacılık, inşaat, askeri, iletişim ve ulaşım gibi pek çok sektörde vazgeçilmez bir bileşen olarak rol oynamaktadır. Optik fiber kablolar sadece haberleşme için değil aynı zamanda optik algılama, dispersiyon bozukluklarını gidermek, kuplör yapısı ile çoğullama, jiroskop gibi pek çok uygulama alanında da kullanılmaktadır. Optik fiberi bu kadar eşsiz kılan özelliklerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Bilginin ışık ile taşınması,
- Kompakt yapıda olması,
- Elektromanyetik parazitlerden etkilenmemesi,
- Zorlu dış ortamlara (sıcaklık, kir vb.) karşı dayanıklı olması,
- Yüksek doğruluk ve hassasiyette ölçüm yapılabilmesi,
- Sahip olduğu kompakt yapı sayesinde kullanım kolaylığına sahip olması,
- Gürültüye karşı duyarlılığının düşük olması,
- Kolay üretilebilir olması gibi birçok özellik, optik fiberleri bir adım öne taşımaktadır.

Fiber optik sensörler, optik fiber teknolojisinin gelişimiyle birlikte, hassas ve güvenilir algılama gerçekleştirebilen sensörlerdir. Bu sensörler, ışığın bir optik fiber boyunca yayılımına dayanır ve bu yayılımın çevresel koşullardan etkilenmesi prensibiyle çalışır. Işık, öz boyunca tam dahili yansıma (TDY) prensibiyle iletilir ve bu süreçte çeşitli fiziksel parametreler (sıcaklık, basınç, gerilim vb.) fiber içerisinde kılavuzlanan ışığın yayılım koşullarını değiştirir. Bu değişiklikler, ışığın yayılımında farklı modülasyonlara yol açar ve bu modülasyonlar, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin algılanması ve ölçümünde kullanılabilir. Ayrıca, fiber optik sensörler, uzaktan algılama ve tehlikeli ortamlarda güvenli bir şekilde ölçüm yapabilme gibi kritik uygulamalarda kullanılabilirler.

Fiber optik sensörler, genellikle içten etkileşimli ve dıştan etkileşimli sensörler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılırlar. Dıştan etkileşimli sensör uygulamalarında optik

fiberler, ölçüm yapılacak ortama ışığı yönlendirmek ve ortamla etkileşen ışığı geri toplama prensibine dayanır. İçten etkileşimli sensör uygulamalarında ise fiber, algılamayı gerçekleştiren bir dönüştürücü (transducer) olarak rol alır. Böyle bir tasarımda ölçüm ortamının fiziksel şartları fiberde kılavuzlanan ışığın kılavuz koşullarını değiştirir. Bu değişimin analiz edilmesiyle algılama için bir dönüştürücüye gereksinim duyulmadan tümüyle optik çalışan bir sensör sistemi kurulabilir.

Literatürde Mach-Zender, Michelson, Fabry-Perot ve Sagnac interferometreleri, FBG ve LPFG ızgara sensörleri, Rayleigh, Brillouin ve Raman dağıtılmış sensörleri, konik fiber sensörler (KFS) ve benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörler gibi pek çok fiber optik sensör türü bulunmaktadır. Bu sensör türleri içerisinde bir dıştan etkileşimli fiber sensör türü olan KFS'ler son yıllarda giderek önem kazanan bir sensör türü olarak ön plana çıkmaktadır.

KFS'ler, fiber optik sensörlerin özel bir türüdür ve özellikle algılama hassasiyetini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu sensörler, fiberin konik bir yapı oluşturacak şekilde tasarlanmasıyla elde edilir. Konik yapı, fiberin belirli bir bölgesinde çapın kademeli olarak azalması veya artmasıyla oluşturulan algılayıcı kısımdır. Fiber içerisinde kılavuzlanan optik modlar konik bölgeye ulaştıklarında kırılma indisi, gerilme ve sıcaklık değişimi gibi dış ortam şartlarından kolayca etkilenebilir. Böylece ışığın fiber içindeki kılavuz koşulları değişir ve bu durum fiberde ilerleyen ışığın dalga boyu spektrumunda gözlemlenebilen kaymalar meydana getirir. KFS'lerde algılama işleminin optik spektrometre kullanılarak gerçekleştirilmesi, yüksek hassasiyet gerektiren sensör uygulamaları için iyi bir aday olabileceği gösterilmiştir (Tian vd. 2011, Li vd. 2012, Chen vd. 2012, Shi vd. 2013, An vd. 2014, Liu vd. 2015, Zhao vd. 2015, Zhang vd. 2017, Shao vd. 2017, Layeghi ve Latifi 2018, Navruz vd. 2018, AL-Mashhadani ve Navruz 2019, Zhang vd. 2019, Singh vd. 2020, Fan vd. 2020).

KFS'lerin üretimi için literatürde bazı yöntemler önerilmiştir. Fiberin algılama bölgesini oluşturmak için alevle ısıtma-çekme (Tian vd. 2011, Li vd. 2012, Zhang vd. 2017, Komanec vd. 2019), elektrik ark-deşarj (AL-Mashhadani ve Navruz 2019, Singh vd. 2020, Serbetci vd. 2022a, Serbetci vd. 2022b, Arı vd. 2023), lazer ile ısıtma (Zibaii vd.

2010, Zhang vd. 2019) gibi ısı ya da kimyasal (Natalia vd. 2011, Kuznetsov vd. 2020) yöntemler kullanılarak konik yapı elde edilebileceği gösterilmiştir. KFS'lerin performansı ve uygulanabilirliği, bel çapının kalınlığına ve bel uzunluğuna bağlı olarak değişir. Her bir uygulama için uygun bel çapının ve uzunluğunun seçimi, sensörün istenen performans özelliklerini karşılaması açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle sensörün kullanılacağı ortam şartlarına, ölçülecek fiziksel büyüklüğe ya da istenilen hassasiyet ve çözünürlük ölçütlerine göre KFS'nin üretimi için uygun yöntemin seçilmesi gerekmektedir.

KFS'lerde algılama işlemi, geleneksel yöntemlerde optik spektrum analizör (OSA) ile gerçekleştirilmektedir. Fiberde oluşturulan konik yapının fiber içerisinde yayılan ışığın kılavuz koşullarını değiştirmesi nedeniyle dalga boyu spektrumunda ortaya çıkan kaymalar OSA ile gözlemlenir ve analiz edilir. Oluşan kaymanın miktarı ile ölçülecek fiziksel büyüklüğün ilişkilendirilmesine dayanan bir algılama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında geleneksel yöntemlerden farklı olarak KFS'ler için benek deseni görüntülerini kullanan yeni bir algılama tekniği sunulmuştur.

Benek deseni görüntüsü, koherent bir lazer ışın kaynağının fiber içerisinde yüzlerce modu uyarması sonucu fiber çıkışında oluşan bir girişim deseni görüntüsüdür. Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensör yapısı bir lazer ışın kaynağı, optik fiber ve CCD kameradan oluşmaktadır. Lazer ile fiber içerisinde uyarılan yüzlerce mod, optik yol boyunca yayılır. Bu modların optik yol uzunlukları birbirinden farklı olmakla birlikte mod genlik ve fazları da farklıdır. Optik fiberde kılavuzlanan tüm modlar fiber çıkışında bir girişim deseni oluşturmaktadır ve bu girişim deseni çıkışa yerleştirilen kamera ile gözlemlenebilmektedir. Benek deseni görüntü ışığın dalga boyuna, fiberin çapına, uzunluğuna, türüne ve diğer tüm optik kılavuz koşullarına bağlı olarak farklılaşabilir. Benek deseni algılamaya dayalı fiber optik sensörün duyarlılığı, benek miktarı ve benek kontrastına bağlı olarak değişebilmektedir. Benek miktarı ve kontrastını etkileyen başlıca etmenler ışık kaynağı, kullanılan optik fiber ve algılama cihazıdır. Sensör duyarlılığı kontrast, benek sayısı ve ışık yoğunluğu ile doğru, çalışılan dalga boyu ile ters orantılı olarak değişmektedir.

KFS'lerde sensörün bel bölgesine ulaşan ışık demeti, dış ortamdaki fiziksel koşullardan etkilenir ve fiber boyunca kılavuzlanan optik modların genlik ve faz bilgileri değişime uğrar. Genlik ve fazda oluşan bu farklılaşma, benek deseni görüntülerinde de değişime neden olur. Benek desenleri ile ölçülecek fiziksel büyüklükte meydana gelen değişim arasında kurulacak ilişki sayesinde algılama işlemi gerçekleştirilebilir. Bunun için literatürde bazı yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan başlıcaları NIPC (Yin vd. 2017, Rohollahnejad vd. 2015, Fujiwara vd. 2018, Fujiwara vd. 2017a, Fujiwara vd. 2017b), korelasyon katsayısı (CC) (Redding ve Cao 2012, Redding vd. 2013a, Redding vd. 2013b, Wang vd. 2017, Meng vd. 2019, Serbetci vd. 2022a, Serbetci vd. 2022b, Arı vd. 2023, Şerbetçi vd. 2024), matris yöntemi (Valley vd. 2016, Cuevas vd. 2018), yapay sinir ağları (Efendioglu vd. 2012) ve derin öğrenme (Efendioglu vd. 2012, Cuevas vd. 2018, Y. Li vd. 2018, Kürüm vd. 2019, Gupta vd. 2019, Şerbetçi vd. 2024) şeklinde sıralanabilir.

Bu tez çalışmasında, 635 nm ve 1550 nm dalga boyunda aydınlatılan KFS'lerin simülasyonları ile deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Farklı türden optik fiberler kullanılarak, farklı bel çapı ve uzunluklarına sahip KFS'ler üretilmiş ve bir kamera ile kaydedilen benek deseni görüntüleri analiz edilmiştir. Bu görüntülerin korelasyon analizleri yapılarak kırılma indisi, gerilme ve sıcaklığa duyarlılıkları araştırılmıştır. Ayrıca bir derin öğrenme yöntemi olan evrişimli sinir ağları (CNN) modeli tasarlanarak bu modelin uygulaması gerçekleştirilmiş ve derin öğrenme tabanlı algılama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışması, derin öğrenme tekniği kullanılarak görüntü işlemeye dayalı konik fiber sensörlerin geliştirilmesini ele almaktadır. Bu bağlamda, ilk olarak konik fiber sensörlerin temel çalışma prensipleri ve mevcut kullanım alanları incelenmiştir. Daha sonra, derin öğrenme algoritmaları ve görüntü işleme teknikleri detaylı bir şekilde ele alınmış ve bu tekniklerin konik fiber sensörlerin performansını nasıl iyileştirebileceği araştırılmıştır. Literatürde bu sensör türleri ile ilgili birçok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Kaynak özetleri kısmında konik fiber sensörler ve benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörler hakkında bir özet sunulmuştur.

2.1 Optik Algılamada Konik Fiber Sensörlerin Kullanımı

Katsumata vd. (2007) evropiyum (Eu) katkılı SiO₂ optik fiber kullanarak bir sıcaklık sensörü geliştirmiştir. Eu katkısının fiberin optik özelliklerini iyileştirdiği ve fiberin konik bölgesinin sıcaklık değişimlerine duyarlılığı artırdığı gösterilmiştir. Tasarım, sıcaklık değişimlerini hassas bir şekilde algılayacak şekilde optimize edilmiştir.

Bai vd. (2010) yüzey geliştirilmiş Raman saçılımı (SERS) prensibiyle çalışan bir konik optik fiber sensörü önermiştir. SERS etkisi kullanılarak moleküllerin yüzeye yakın bölgede Raman saçılımı artırılmış ve yüksek hassasiyetli analitik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, R6G boyar madde çözeltisi için 10⁻⁹ M seviyesine kadar ölçüm hassasiyetine ulaşıldığı rapor edilmiştir.

Latifi vd. (2010) gerçekleştirdikleri çalışmada biyoteknoloji, mikrobiyoloji ve gıda endüstrisi gibi çeşitli alanlarda hızlı ve doğru bakteri büyüme ölçümü yapabilmek amacıyla bir biyosensör önermişlerdir. E. coli K-12 bakterisinin büyüme oranının, kırılma indisi değişikliğine bağlı olarak hassas ve gerçek zamanlı ölçülebileceği gösterilmiştir. 6-7 mikrometre bel çapında ve 3 mm bel uzunluğunda bir konik fiber sensör üretilmiştir. Bel bölgesine yerleştirilen bakterilerin üremesiyle kırılma indisi değişmiştir. Değişen kırılma indisi fiber içerisinde ilerleyen ışık demetlerinin yayılım koşullarını

değiştirmiştir. Dalga boyu spektrumunda meydana gelen kaymalar OSA ile incelenerek bakterilerin büyüme hızları tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2011) yaptıkları çalışmada femtosaniye lazer kullanılarak optik fiberin konik bölgesine doğrudan Fabry-Perot interferometreleri (FPI) yazılması araştırmışlardır. Çalışmada 14 ila 80 μm arasında farklı bel çaplarına sahip tek modlu konik optik fibere yazılmış FPI'lar ile yüksek çözünürlüklü ölçüm yeteneği sağlanmıştır.

Tian vd. (2011) etiket kullanmadan biyomoleküllerin algılanmasını sağlayan, hızlı, yüksek hassasiyetli ve düşük maliyetli bir konik optik fiber biyosensör geliştirmiştir. Bu çalışmada sensör fiberin ısıtılarak çekilmesiyle konik hale getirilmiştir. Konik bölgede ilk iki yayılım modu (HE_{11} ve HE_{12}) arasındaki girişim etkisinden faydalanılarak bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Konik yüzeye bağlanan biyomoleküller, iletim spektrumundaki kaymanın çözülmesi ile belirlenir. IgG antikor-antijen çifti ile yapılan testler, sensörün hızlı tepki süresi ve yüksek hassasiyetini ortaya koymuştur.

Biazoli vd. (2012) çok modlu girişim prensiplerine dayanan konik fiber optik sensörlerin kırılma indisi ölçümlerinde kullanılmasını incelemiştir. Çalışmada, konik fiberin bel çapı 55 μm 'ye kadar inceltilmiş ve önerilen sensör, 1.42–1.43 kırılma indisi aralığında 2946 nm/RIU değerinde maksimum hassasiyet göstermiştir.

Li vd. (2012) polivinil alkol (PVA) kaplamalı çok modlu bir konik fiber sensörde fiber Bragg ızgarası (FBG) kullanarak bir nem sensörü geliştirmiştir. PVA'nın nem değişimlerine duyarlı genleşme özelliği sayesinde sensör, hızlı tepki süresi ve yüksek hassasiyet ile kararlı bir şekilde çalışmıştır.

Chen vd. (2012) mikro-daraltılmış fiber MZI (Mach-Zehnder interferometresi) kullanarak yüksek hassasiyetli kırılma indisi ölçümleri gerçekleştiren bir konik fiber sensör geliştirmiştir. Sensör yapısı, kimyasal aşındırma ve CO_2 lazer ışınımı yöntemleri ile oluşturulmuştur. Çalışmada, 1.34 μm dalga boyunda 600 nm/RIU, 1.61 μm dalga boyunda ise 4000 nm/RIU hassasiyet elde edilmiştir.

Shi vd. (2013) S-şekilli konik fotonik kristal fiber tabanlı bir kırılma indisi sensörü geliştirmiştir. Sensör, S-şekilli konik fiberin fotonik kristal fiber ile kaynaştırılmasıyla oluşturulmuştur. 1.33-1.38 kırılma indis aralığında sensör çözünürlüğü $3.3 \cdot 10^{-4}$ RIU, 1.38-1.44 kırılma indis aralığında ise $8 \cdot 10^{-5}$ RIU olarak hesaplanmıştır. Yüksek kırılma indis aralığında sensör çözünürlüğü arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sensörün termal duyarlılığı 100 °C'nin altında 4.2 pm/°C olarak hesaplanmıştır.

An ve diğerlerine (2014) ait bu çalışmada genişletilmiş iki bel kısmına sahip çok modlu fiberin iki tek modlu fiber arasına yerleştirilmesiyle oluşan bir konik fiber sensör önerilmiştir. Fibere konik yapı, ark füzyon yöntemiyle verilmiştir. Çok modlu fibere ve genişlemiş bel kısımları üzerine ince bir PVA tabakası kaplanarak nem sensörünün duyarlılığı artırılmıştır. Bu yapı, nem değişikliklerine bağlı olarak interferometrik özellikler sergilemektedir. Geliştirilen sensör, 35-85% RH (bağıl nem) aralığında 0.223 nm/%RH hassasiyet sunmaktadır.

Liu vd. (2015) yaptıkları çalışmada manyetik alan algılama için optik mikrofiber konik tabanlı bir fiber sensör geliştirmiştir. Bu çalışmada manyetik alanı daha doğru ölçebilmek için sıcaklıktan kaynaklanan hataları düzeltecek bir hassasiyet matrisi kullanılmıştır. Optik fibere konik yapı ark füzyon tekniği kullanılarak verilmiştir. Üretilen sensör manyetik alanı algılayabilmek için içerisinde manyetik alan değişikliklerine duyarlı sıvı bulunan bir tüp içerisine yerleştirilmiştir. Sensörün performansı, çeşitli manyetik alan ve sıcaklık koşullarında test edilmiştir. Manyetik alan hassasiyeti ve sıcaklık kompanzasyonu, deneysel verilerle analiz edilmiştir. Sensör, 25 °C oda sıcaklığında 20-70 Oe aralığında 0.171 nm/Oe hassasiyet göstermiştir. Ayrıca 30–80 °C aralığında –0,587 nm/°C hassasiyet elde edilmiştir.

Zhao vd. (2015) çoklu daraltılmış (multi-tapered) SMS fiber yapısına dayanan bir kırılma indisi sensörü geliştirmiştir. Konik yapıların sayısının artırılmasıyla sensörün hassasiyetinin de yükseldiği tespit edilmiştir. Sekiz konik yapı içeren sensör, 1.3333–1.3737 kırılma indis aralığında 261.9 nm/RIU hassasiyet göstermiştir.

Fu vd. (2015) kırılma indisi algılaması için bel çevresi genişletilmiş bir Michelson interferometresi tabanlı konik fiber sensör önermiştir. Tek modlu ve çok modlu iki fiberin birleşim noktasının bel çevresinin genişletilmesiyle sensör yapısı oluşturulmuştur. Sensör, 1.351–1.4027 kırılma indis aralığında -178.424 dB/RIU hassasiyetle kırılma indis değişimine doğrusal bir yanıt vermektedir.

Lee vd. (2015) gerçekleştirdikleri çalışmada boş çekirdekli fiber (hollow core fiber) ve daraltılmış fiber tıpa (tapered fiber plug) kullanılarak bir titreşim sensörü tasarlamışlardır. Boş çekirdekli fiber, optik sinyallerin boş bir çekirdek boyunca iletilmesini sağlar ve bu yapı farklı titreşim frekansları ve genlikleri altında test edilerek titreşim algılamada yüksek hassasiyet sunmuştur.

Shao vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada hibrit bir FBG ve ani daraltılmış konik fiber kullanılarak tasarlanmış bir nem sensörü önerilmiştir. Ani daraltılmış konik fiber etrafındaki kaybolan dalga, sensör etrafındaki nemle birlikte değişmektedir. Bu nedenle FBG yansımasının gücü ortam nemi tarafından etkilenmektedir. Geliştirilen sensörün %50–%90 bağıl nem aralığında 0.10 dB/%RH hassasiyetle neme karşı doğrusal bir yanıt verdiğini belirtilmiştir.

Li vd. (2016), konik çok çekirdekli fiber tabanlı yeni bir kırılma indisi sensörü önermiştir. Sensör yapısı, iki tek modlu fiberin arasında konik dört çekirdekli fiberin eklenmesiyle geliştirilmiştir. Tek modlu fiberden çok çekirdekli fiber içerisine enjekte edilen ışık, çoklu kaplama modlarını uyarmakta ve bu modlar arasındaki girişim çevresel kırılma indisi tarafından etkilenmektedir. Sensör, 1.3448 ile 1.3774 kırılma indis aralığı için 171.2 nm/RIU hassasiyet göstermiştir.

Rong vd. (2017), daraltılmış dört çekirdekli bir fiberde modların ters mod eşleşmesine dayalı yüksek hassasiyetli bir gaz refraktometresi geliştirmiştir. İki tek modlu fiber arasına yerleştirilen konik yapı verilmiş dört çekirdekli fiber, karbon dioksit kırılma indisi ölçümlerinde sıcaklık çapraz hassasiyeti olmadan 922.32 dB/RIU'luk bir hassasiyet sunmuştur.

Layeghi ve Latifi (2018), nano manyetik sıvı ile Hi-Bi adiabatik olmayan konik optik fiberi birleştirerek bir harici manyetik alan (EMF) sensörü geliştirmişlerdir. Fiber döngü aynasında polarizasyon denetleyicileri kullanılarak sensörün EMF'ye duyarlılığı artırılmıştır. Sensör, 0–21 mT aralığında 402 pm/mT hassasiyetle çalışmıştır. EMF algılama sınırı ise 5–18.9 μ T olarak belirlenmiştir.

Niu vd. (2018), S fiber konik (SFT) yapısına dayanan bir kırılma indis sensörü geliştirmiştir. Sensör, fiber döngü halka sönümlenmesi (FLRD) tekniği ile kırılma indisi ölçümleri yapmıştır. 1.3330–1.3682 kırılma indis aralığında –3128.954 μ s/RIU'luk yüksek bir duyarlılık sergilemiştir.

Komanec vd. (2018), sıvıların uzun vadeli algılanması için yüzeyi modifiye edilmiş konik fiber sensörler geliştirmiştir. Alev ısıtma tekniğiyle oluşturulan fiber sensör, yüzey modifikasyonu sayesinde 1.415 kırılma indisine sahip sıvılar için 2100 dB/RIU hassasiyet göstermiştir. On iki aylık ölçümlerde çözünürlük 7×10^{-4} RIU seviyesinde korunmuştur.

Al-Mashhadani ve Navruz (2018a) gerçekleştirdikleri çalışmada iki standart tek modlu fiber arasında yer alan çok çekirdekli fiber tabanlı bir KFS kırılma indisi sensörü önermişlerdir. Çok çekirdekli fiber yedi çekirdekten oluşmaktadır ve bu çekirdekler tek bir kaplama ile çevrilidir. Sensör bölgesine konik yapı ark-deşarj tekniği kullanılarak verilmiştir. Konik bölgenin bel uzunluğu ve bel çapı sırasıyla 2 cm ve 20 μ m olarak belirlenmiştir. Kırılma indisinin 1.4454-1.4458 aralığında maksimum hassasiyet 155000 nm/RIU olarak hesaplanmıştır.

AL-Mashhadani ve Navruz (2018b) TAMCF fiber kullanılarak bir çevresel kırılma indisi sensörü önermişlerdir. İki tek modlu fiber arasına, elektrik ark-deşarj yöntemi kullanılarak konik yapı verilmiş TAMCF yerleştirilerek sensör yapısı oluşturulmuştur. 25 μ m bel çapına sahip 10 ve 15 mm bel uzunluğunda iki fiber sensör kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada 1.4430-1.4442 kırılma indis aralığında 35089.28 nm/RIU hassasiyete ulaşılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu aynı bel çapına sahip KFS'lerde bel uzunluğunun artmasıyla sensör hassasiyetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Navruz vd. (2018), konik yapıda inceltilmiş optik fiberin içerisine LPFG yazımı gerçekleştirerek kırılma indisi ölçüm hassasiyetini artırmıştır. 1.3320–1.3328 kırılma indisi aralığında sensör 8188 nm/RIU hassasiyet göstermiştir.

Akhoundi vd. (2019) yaptıkları çalışmada deiyonize su içinde dağılmış Fe_3O_4 nanopartiküllerinden oluşan manyetik sıvı içindeki konik fibere dayanan bir manyetik alan sensörü önermişlerdir. Dağıtılmış algılama yöntemi ile sensörün farklı bölgelerinde manyetik alanları algılayarak daha geniş bir alanı kapsamasını sağlamıştır. Bu sayede sensör, tek bir ölçüm noktasından ziyade geniş bir alanda manyetik alanları tespit edebilmektedir.

Choi vd. (2019), konik yüksek çift kırılmalı fiber tabanlı polarimetrik bir basınç sensörü geliştirmişlerdir. Sensörün basınç hassasiyetinin konik uzunluğa bağlı olduğu belirlenmiş ve 400 μm konik uzunluğunda -35.46 nm/MPa hassasiyet elde edilmiştir.

Yahya vd. (2019), Yahya ve arkadaşları, Pd/ZnO nanoyapılarıyla kaplanmış konik optik fiber tabanlı bir hidrojen sensörü geliştirmişlerdir. Bu nanoyapılar, hidrojen gazıyla etkileşerek sensörün optik özelliklerini değiştirmektedir. ZnO nanoyapıları, kimyasal banyo kaplama (CBD) yöntemi ile konik optik fiber üzerine sentezlenmiştir. 180 $^{\circ}\text{C}$ çalışma sıcaklığında sensörün, sentetik hava içerisindeki farklı hidrojen konsantrasyonlarına karşı duyarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Zhang vd. (2019), sıcaklık ve basıncı eşzamanlı olarak ölçebilen bir konik fiber sensör geliştirmişlerdir. Sensör, kaskat bağlı konik-FBG ve ball-EFPI yapılarını kullanarak bu iki parametreyi ayırt edebilmektedir. Konik yapı kimyasal aşındırma ve ark-deşarj teknikleriyle oluşturulmuştur. Sıcaklık deneyleri, 40-400 $^{\circ}\text{C}$ aralığında, konik-FBG'nin ortalama sıcaklık hassasiyetinin $12.03 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ olduğunu, ball-EFPI'nin ise sıcaklığa karşı duyarsız olduğunu göstermektedir. Basınç deneyleri ise ortam basıncının 0-2 MPa aralığında, konik FBG'nin basınç hassasiyetinin 0.90 pm/MPa olduğunu, ball-EFPI'nin basınç hassasiyetinin ise -38.49 pm/MPa olduğunu göstermektedir.

Kumar vd. (2020), altın nanoparçacıklarla işlevselleştirilmiş konik fiber sensör kullanarak ürik asit (UA) tespiti gerçekleştiren bir sistem geliştirmişlerdir. Sensörde kullanılan konik fiber, plazma tekniğiyle oluşturulmuş ve 40 μm bel çapına sahiptir. Altın nanoparçacık kaplama, sensörün hassasiyetini artırmış ve 10 μM ile 800 μM aralığında doğrusal bir algılama sağlanmıştır. Bu aralık, insan serumunda bulunan 150 μM ile 420 μM UA konsantrasyonlarını kapsamaktadır.

Peng vd. (2020), sıvı seviyesini ve kırılma indis değişimini eşzamanlı ölçen yeni bir konik fiber sensör tasarlamışlardır. SMF ile TPCF kombinasyonu, sıcaklığa duyarsız özellikleri sayesinde karışıklıkları minimize etmiştir. Sensör, 0–10 mm sıvı seviyesi aralığında 0.58466 nm/mm hassasiyet gösterirken, kırılma indis değişimi için 1.336–1.382 aralığında 195.969 nm/RIU hassasiyet sunmuştur.

Literatür taraması, konik fiber sensörlerde algılama işleminin OSA ile fiber içerisindeki ışığın dalga boyu spektrumundaki kaymalarının analiz edilmesiyle gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır. Bu tez çalışmasında OSA kullanmak yerine daha yenilikçi bir yaklaşımla KFS’lerde benek deseni görüntüleme tekniği kullanarak algılama işlemi gerçekleştirilecektir. Bu nedenle benek deseni görüntüleme tekniğini kullanarak algılama gerçekleştirilen sensörler hakkında literatür taraması gerçekleştirilmiş ve sunulmuştur.

2.2 Optik Algılamada Benek Deseni Algılama Tekniği

Cao vd. (2012), çok modlu fiberlerin yüksek çözünürlükte ve düşük kayıplı spektrometreler olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Çalışmada, 1 metre uzunluğundaki fiberle 25 nm bant genişliğinde 0.15 nm çözünürlük elde edilmiş, 5 metre uzunluğundaki fiberle ise 5 nm bant genişliğinde 0.03 nm çözünürlük sağlanmıştır. Optik spektrum analizinde, %10’un altında ekleme kaybı ve 1000’in üzerinde sinyal-gürültü oranı ile mevcut yöntemlere kıyasla üstün performans sağlandığı belirtilmiştir.

Efendioğlu vd. (2012), fiber optik istatistiksel mod sensörlerinin performansını artırmak için birinci ve ikinci moment gibi yenilikçi istatistiksel özellikler kullanmıştır. Bu

özelliklerin sensör hata toleransını azaltarak daha güvenilir ölçümler sunduğu vurgulanmıştır. İstatistiksel mod sensörlerinin kalibre edilerek sensörün hata toleransının azaltılabileceği ve böylece daha güvenilir sensörler tasarlanabileceği belirtilmiştir.

Cao vd. (2013a), çoklu ışık saçılmasına dayalı bir spektrometre tasarımı sunmuştur. Çip boyunca yayılan ışık, dalga boyuna bağlı benek desenleri oluşturmuş ve bu desenlerin kalibrasyon işlemi sonrası giriş spektrumunu yeniden oluşturduğu gözlemlenmiştir. Önerilen yapı ile 1500 nm dalga boyunda 0.75 nm spektral çözünürlük elde edilmiştir.

Cao vd. (2013b) bir diğer çalışmada, standart bir çok modlu optik fiberin, fiberin kılavuz modları arasındaki girişim tarafından üretilen dalga boyuna bağlı benek desenleri ile genel amaçlı bir spektrometre olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. 1 metre uzunluğunda bir fiber ile 100 nm bant genişliği ve 0.4 nm spektral korelasyon genişliği elde edilmiştir. Daha uzun fiberler (20 m) kullanıldığında ise 8 pm spektral çözünürlükle 1 nm bant genişliği sağlanmıştır.

Satar vd. (2015), dışsal pertürbasyonların basamak indisli çok modlu optik fiber çıkışında oluşturduğu benek desen değişikliklerini sensör uygulamaları için değerlendirmiştir. Yük uygulaması sırasında oluşan birinci dereceden moment farklarının yük ile doğrusal bir ilişki sergilediği gösterilmiştir. Bu sonuç, istatistiksel mod analizinin sensör tasarımı için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Xia vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada gerinim dağılımından bağımsız bir FBG sensörü önerilmiş ve deneysel olarak gösterilmiştir. Önerilen sensör sisteminin, görünür bant spektrumunda FBG kullanarak daha küçük boyutta, çok daha düşük maliyette ve daha hızlı yanıt süresi sunmakta olduğu belirtilmiştir.

Coluccelli vd (2016), optik frekans tarayıcıları ile fiber optik spektrometrelerin birleştirilmesine dayalı bir sistem tasarlamıştır. Bu sistem, tek bir ölçümde 0.12 THz'lik bir aralıkta 500 tarak çizgisinin eşzamanlı olarak ölçülmesini sağlamış ve fiber tabanlı spektrometre performansını artırmıştır.

Valley vd. (2016a) çok modlu dalga kılavuzlu benek desenlerinin sıkıştırılmış algılama (CS) yöntemiyle kullanılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sıkıştırılmış algılama, bir sinyalin veya görüntünün daha az veri kullanarak yeniden yapılandırılmasını sağlayan bir tekniktir. Makalede, çok modlu dalga kılavuzlarının benek desenlerinin, sıkıştırılmış algılama teknikleriyle birleştirildiğinde, veri toplama ve işleme süreçlerini optimize edeceği belirtilmiştir.

Valley vd. (2016b) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada benek desenlerinin çok modlu optik dalga kılavuzlarının çıkışında, GHz bandındaki seyrek RF sinyallerini ölçmek için bir sıkıştırılmalı algılama ölçüm matrisinin kullanabileceği belirtilmiştir. Mod kilitli femtosaniye lazer darbeleri, interpulse zamanına yakın bir genişlikte gerilerek RF tarafından modüle edilmekte ve çok modlu bir dalga kılavuzuna enjekte edilmektedir. Dalga kılavuzunun çıkışındaki benek deseni, bir fotodiyot dizisine görüntülenir ve çıktısı bir ADC tarafından dijitalleştirilmektedir.

Ruan vd. (2017), sıcaklık, basınç ve kırılma indisinin ölçülmesi için benek deseni algılama tekniğine dayalı fiber optik bir sensör tasarlamıştır. Sensör, tek modlu fiber ve çok modlu fiberin bir çekirdek offseti ile birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Çalışmada, benek deseni algılama ile yapılan ölçümlerin OSA tabanlı yöntemlere kıyasla daha kompakt ve hassas olduğu gösterilmiştir.

Fujiwara vd. (2017a) benek deseni görüntüsü analizine dayanan bir dokunsal sensör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Sensör sistemi 3 çok modlu fiberle bağlantılı 9 mikro bükülme algılayıcısından oluşmakta ve $30 \times 30 \text{ mm}^2$ boyutunda bir dokunma yüzeyine matris düzeninde kurulmuştur. Sensör karakterizasyonu, 1 mm kuvvet konumu değişikliklerini tespit etme yeteneği ile $0,5 \text{ N}^{-1}$ hassasiyet sağlamaktadır.

Fujiwara vd. (2017b) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise elde edilen benek desenleri kare bir ızgaraya bölünerek alt görüntüler oluşturulmuş ve bu alt görüntüler, benek desenlerinde yerel değişikliklerin algılanmasına olanak tanıyan bir korelasyon tekniği ile işlenmiştir. Mikro bükülme algılayıcısı kullanılarak lineer kaymaları

değerlendirmek amacıyla farklı ızgara boyutlarıyla test edilmiştir. Çalışmada 5×5 ızgara için 0,27 mm aralıkta 2,53 mm-1 hassasiyet elde edilmiştir.

Cuevas vd. (2018), çok modlu optik fiber boyunca oluşan bozunumları meydana geldikleri konuma göre sınıflandırabilen bir sistem tasarlamıştır. Geliştirilen makine öğrenme algoritması ile üç farklı konumu %99, on farklı konumu ise %71 sınıflandırma doğruluğuyla ayırt edebilmiştir.

Murray vd. (2018), çok modlu fiberlerle nicel faz duyarlı optik zaman domain refraktometresi (Φ -OTDR) yöntemini önermiştir. Önerilen yöntem, eksen dışı holografi kullanarak Rayleigh geri saçılım alanını kaydetmekte ve yüksek bir doğrusal doğruluk, minimum faz gürültüsü -80 dB [rel. rad²/Hz] ve 20 kHz bant genişliği sergilemektedir.

Gomez vd. (2018), fiber specklegram sensörlerinin modellenmesi ve optimize edilmesi için sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayalı bir metodoloji geliştirmiştir. Çalışma, kontrollü gerilme koşullarında optik güç değişimi (PFSS) ile fiber benek yoğunluk profilini yeniden oluşturmuştur.

Yan vd. (2018) tek modlu fiber ile bağlı çok modlu fiberler arasında yatay yer değiştirmenin, GLCM adlı bir görüntü işleme algoritması ile tespitini ele alan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. GLCM algoritması, basamak indisli çok modlu fiber benek desenlerinin Fourier faz spektrumlarını analiz etmek için kullanılmıştır. Çalışmada önerilen ölçüm yönteminin geleneksel bir ölçüm yöntemi olan NIPC'den daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Tian vd. (2018) bu çalışmada, saçılma ortamları üzerinden görüntülemenin ölçeklenebilirliğini önemli ölçüde artırmak amacıyla yeni bir derin öğrenme algoritması gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel yöntemlerin, belirli bir saçılma ortamı için geliştirilen "bire bir" modellemesinde sınırlı olduğu ve benek bozulmalarına karşı hassas olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada ise, istatistiksel "birden tüme" yaklaşımı benimsenmiş ve aynı

sınıfa ait farklı dağıtıcılar üzerinden yüksek kaliteli nesne tahminleri yapabilen bir CNN geliştirilmiştir.

French vd. (2018), çok çekirdekli çok modlu fiberleri dalga boyu bilgilerini kodlamak için kullanmış ve nanometre altı çözünürlüğe sahip bir spektral görüntüleyici tasarlamıştır. Çalışma, dalga boyuna bağlı benek desenlerinin 3000'e kadar fiber çekirdeği için karakterize edilebileceğini göstermiştir.

Fujiwara vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada genişletilmiş dinamik aralığa sahip bir polimer optik fiber gerinim sensörü önerilmiştir. 22.600 $\mu\epsilon$ aralığında $3 \times 10^{-3} \mu\epsilon^{-1}$ hassasiyet ve yaklaşık 15 $\mu\epsilon$ çözünürlük elde edilmiştir. Önerilen sensör ile gerilme büyüklüğünün yanı sıra gerilmenin uygulandığı yönün de belirlendiği belirtilmiştir.

Muskens vd. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada benek desenlerinin hızlı spektral ayrıştırılması için derin öğrenme tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Yapay sinir ağı, ölçülen spektral iletim matrisinden alınan sayısal olarak oluşturulmuş çoklu spektral veri setlerini kullanarak eğitilmiştir. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında derin öğrenme ile yeniden yapılandırma aşamasında hem aşırı örneklemede hem de seyrek alt örneklemede kayma ve gürültüye karşı dayanıklı bir sistem oluşturulduğu belirtilmiştir.

Murray vd. (2019) yaptıkları bir diğer çalışmada çok modlu fiberde Rayleigh geri saçılımına bağlı benek deseninin genliğini ölçerek gerilme ölçümü yapılabileceğini göstermişlerdir. Çalışmada, geri saçılan benek deseninin incelenmesi sonucu, sensörün doğrusal bir gerilme tepkisi göstermektedir. Sensörün algılayabildiği minimum gerinim $2.9 \mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$, bant genişliği 20 kHz ve dinamik ölçüm aralığı 1 kHz'de 74 dB olarak belirtilmiştir.

Li vd. (2019) yaptıkları çalışmada çok modlu fiber spektrometresinin çalışma bant genişliğini genişletmek için uzay-bölümü çoğullamanın kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada çok çekirdekli fiber çok modlu fibere entegre edilerek

spektrometre yapısı oluşturulmuştur. 7 çekirdekli bir fiberin 3 çekirdeği ve tek bir çok modlu fiber kullanılarak 1550 nm dalga boyunda 0.02 nm çözünürlükle 30 nm bant genişliği elde edilmiştir. Dalga boyu bölmeli çoğullamaya kıyasla, önerilen yaklaşımın dalga boyu aralığı, çoğullama cihazı tarafından sınırlanmadığı belirtilmiştir.

Gupta vd. (2020) dalga boyu değişimlerini analiz etmek için bir derin öğrenme tabanlı benek deseni dalga boyu ölçer çalışması gerçekleştirmişlerdir. Derin öğrenmenin eğilimleri belirleme ve karmaşık veri setlerindeki düşük sinyal-gürültü oranını aşma yeteneği sayesinde 488 nm'den 976 nm'ye kadar olan dalga boyu aralığında attometre ölçeğinde dalga boyu hassasiyeti sağlanmıştır. Derin öğrenme algoritması olarak CNN kullanılmıştır.

Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörler hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde algılama işleminin benek deseni görüntülerindeki değişikliklerin analiz edilmesiyle gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu değişiklikler korelasyon analizi, NIPC katsayısı ya da yapay zekâ destekli mimarilerle gerçekleştirilmektedir. KFS'lerde geleneksel algılama yöntemi olan OSA yerine benek deseni görüntüleri kullanarak da derin öğrenme tabanlı algılama işlemi gerçekleştirilebileceği ön görülmüş ve gerçekleştirilen çalışmalar bu tez çalışmasında sunulmuştur.

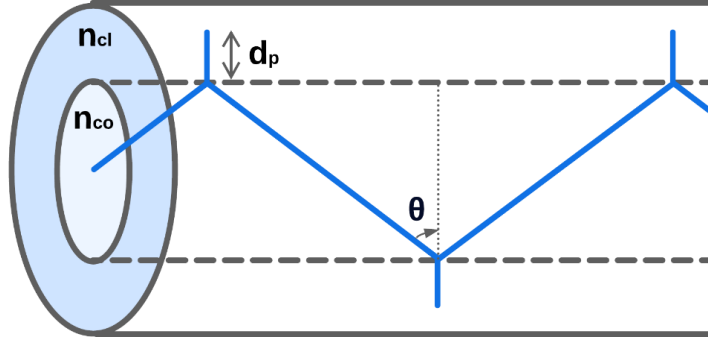
3. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, çalışmada kullanılacak yöntem ve teknolojilerin kuramsal altyapısı ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. İlk olarak, KFS'lerin temel çalışma prensipleri ve bu sensörlerin optik algılama sistemlerindeki işlevleri açıklanmıştır. KFS'de ışığın iletimi ve algılama süreçlerinde sağladığı avantajlar detaylı olarak incelenmiştir. Bölümün bir diğer odak noktası ise, benek deseni görüntülerinin oluşumu ve bu görüntülerin optik sistemlerde bilgi taşımadaki rolüdür. Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörlerin yapısı, benek desenlerinin oluşumu ve bu desenlerin algılama uygulamalarında kullanımı detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Ayrıca, bu tez çalışmasında algılama sürecinde kullanılan analiz yöntemlerinden biri olan korelasyon analizinin, benek deseni görüntülerinin işlenmesinde ve anlamlı çıktılar elde edilmesindeki rolü detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Son olarak, çalışmada kullanılan derin öğrenme yöntemi CNN'nin, veri işleme, öğrenme yöntemi ve benek deseni görüntülerinden bilgi çıkarma konusundaki etkinliği açıklanmıştır. Bu bölüm, çalışmada kullanılan yöntem ve teknolojilerin bilimsel temelini ve sonraki bölümlerde yapılacak analizlerin teorik altyapısını oluşturmaktadır

3.1 Konik Fiber Sensör Temelleri

Işık demetleri, fiber optik kablo içerisinde TDY prensibiyle ilerlemektedir. Işık demeti, daha yüksek kırılma indisine sahip bir ortamdan (fiber özü) daha düşük kırılma indisine sahip bir ortama (fiber kılıfı) geçerken, ışığın normale göre geliş açısına eşit bir açıyla fiber özüne geri yansır. TDY sırasında, ışık demetinin büyük bir kısmı öze geri yansırken, az bir miktarı kılıf arayüzünde ilerleyerek sönümlenir. Kaybolan dalga (Evanescent wave-EW) olarak adlandırılan bu dalga, kılıf çapının sızma derinliğinden (penetration depth-dp) büyük olmasından dolayı kılıfı terk edemez ve bu bölgede sönümlenir. Optik fiberlerde ışığın iletimi şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Tam dahili yansımadaki kaybolan dalga ve sızma derinliği

Kaybolan dalganın genliği, kılıf bölgesinde üstel olarak azalma gösterir ve genliğin $1/e$ değerine düştüğü derinlik, sızma derinliği olarak adlandırılır. Sızma derinliği,

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_{co}^2 \sin^2 \theta - n_{cl}^2}} \quad (3.1)$$

ifadesiyle tanımlanır. Burada λ , ışığın dalga boyunu; n_{co} ve n_{cl} sırasıyla fiber öz ve kılıf kırılma indis değerlerini; θ ise ışığın öz-kılıf arayüzüne geliş açısını temsil etmektedir. Optik fiberler, ışığın fiber özü içerisinde toplanması ve düşük kayıplı bir şekilde iletimi için tasarlanmıştır. Bu nedenle, fiber içerisinde ilerleyen ışık demetinin dış ortama geçişi mümkün değildir. Ancak bazı sensör uygulamaları için ışık demetinin dış ortam üzerinden yansıma yaparak tekrar fiber içerisine kılavuzlanması gerekir (Tian vd., 2011). Bu yansımanın sağlanabilmesi için kaybolan dalga kullanılabilir. Eğer optik fiber, sızma derinliğinin altına inecek şekilde inceltilebilirse, ışık sönümlenmeden dış ortama geçebilir. KFS'nin yapısal özellikleri sayesinde, sönümlenen dalganın algılama yapılacak dış ortam yüzeyinden yansıma yaparak tekrar fiber içerisine toplanması mümkün hale gelmektedir.

KFS'ler üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar herhangi bir deformasyona tabii tutulmamış optik fiber, iki geçiş bölgesi ve bel bölgesidir. Tipik bir KFS gösterimi şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Konik fiber sensörün geometrik yapısı (Şerbetçi vd. 2022a)

KFS'nin geçiş bölgeleri, adyabatik (başlangıç fiberi ile bel bölgesi arasındaki alanın kademeli ve düzgün bir geçişle inceltilmesi) ya da adyabatik olmayan şekilde oluşturulabilir. Sensörün geçiş bölgesinin adyabatik olması, fiber içerisinde kılavuzlanan ışığın daha az kayıplı iletimini sağlamaktadır (Birks vd. 1992). KFS'nin adyabatiklik durumu, bel bölge çapı ve bel bölge uzunluğu gibi birçok parametre, sensör performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde yapılan bazı çalışmalar, bel çapı ve uzunluğunun sensör performansına olan etkilerini ortaya koymuştur (Li vd. 2012, Navruz vd. 2018, AL-Mashhadani ve Navruz 2019). Bu nedenle, KFS tasarımı ve üretimi büyük bir önem taşımaktadır. Optik fibere konik yapı kazandırılması amacıyla literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlardan başlıcaları ısıtma-çekme (Tian vd. 2011, Li vd. 2012, Zhang vd. 2017, Komanec vd. 2019), CO₂ lazer ile aşındırma (Zibaii vd. 2010, Zhang vd. 2019) ve elektrik ark-deşarj (AL-Mashhadani ve Navruz 2019, Singh vd. 2020, Serbetci vd. 2022a, Serbetci vd. 2022b, Arı vd. 2023) tekniği şeklinde sıralanabilir.

KFS uygulamalarında farklı türde fiberler kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, genellikle tek modlu fiberler kullanılarak KFS'lerin üretildiğini göstermektedir (Zibaii vd. 2010, Tian vd. 2011, Shi vd. 2013, Liu vd. 2015, Navruz vd. 2018, Komanec vd. 2019). Tek modlu fiber kullanılan KFS'lerde konik bölgeye ulaşan ışığın bir kısmı geçiş bölgesinin yapısından dolayı dış ortama taşar ve fiber boyunca yayılan ışıktaki zayıflama meydana gelir. Fiberin konik bölgesi, temel modla birlikte kılıftaki yüksek dereceli bir modun geçişine izin verir. Konik bölge boyunca birlikte ilerleyen bu iki mod, konik bölgenin sonunda öz içerisine kılavuzlanır. Bu süreçte iki farklı mod arasında oluşan faz farkı ölçülebilir bir girişim meydana getirir. Sensörün çıkışındaki ışık şiddeti, modlar arası oluşan bu girişime bağlı olarak değişiklik gösterir. Işık şiddeti,

$$I_o = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi \quad (3.2)$$

ile hesaplanır (Fujiwara vd. 2017a). Burada I_1 ve I_2 özde ilerleyen temel modun ve kılıfta ilerleyen yüksek dereceli uyarılmış modun ışık şiddetlerini temsil etmektedir. $\Delta\varphi$ modlar arasındaki faz farkına karşılık gelir. Faz farkı $\Delta\varphi$,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda} \quad (3.3)$$

formülü ile belirlenir. Eşitlik 3.3'te Δn_{eff} etkin kırılma indisini, L fiber uzunluğunu ve λ ışığın dalga boyunu ifade etmektedir. KFS'lerle ilgili yapılan çalışmalarda konik bölgeye uygulanan dışsal etkilerin (fiziksel büyüklüklerin), modlar arasındaki faz farkını etkilediği tespit edilmiştir (Li vd. 2012, Navruz vd. 2018, AL-Mashhadani ve Navruz 2019). Sensör çıkışına ulaşan ışığın dalga boyu spektrumunda, modlar arası oluşan faz farkından dolayı, kaymalar meydana gelmektedir. Bu spektral kaymalar, OSA ile analiz edilerek ölçümü yapılan fiziksel büyüklük ile ilişkilendirilir ve algılama işlemi gerçekleştirilir.

KFS'lerde çok modlu fiberler ile yapılan çalışmaların teorik altyapısı, tek modlu fiberlerden farklıdır (Li vd. 2012, An vd. 2014, Arı vd. 2023, Şerbetçi vd. 2024). Çok modlu bir optik fiberde kılavuzlanan mod sayısı normalize frekans olarak adlandırılan V parametresi ile ilişkilidir. Eğer V parametresi 2.405 değerinden büyükse, optik fiber çok modlu; bu değere eşit ya da daha düşükse, tek modlu olarak sınıflandırılır. Normalize frekansa ait matematiksel gösterim eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (3.4)$$

Optik fiber içerisinde kılavuzlanan mod sayısı öz yarıçapı r 'ye, öz ve kılıfın kırılma indis değerlerine ve ışığın dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir. Fibere konik yapı verilmesi, fiber çapının küçülmesiyle birlikte öz ve kılıfın neredeyse kaynaşmasına yol açar. Konik yapı dolayısıyla yeniden şekillenen optik kılavuzda ışık, öz-kılıf arayüzünde kılavuzlanamaz. Bu nedenle kılıf, öz gibi davranır ve dış ortam ise kılıf özelliği kazanır.

Bu durum konik bölgede V parametresinin değişmesine neden olacaktır. Konik bölge için V parametresi eşitlik 3.5 ile verilmiştir.

$$V_{cl}(z) = \frac{2\pi r(z)}{\lambda} \sqrt{n_{cl}^2 - n_{ex}^2} \quad (3.5)$$

Yeni eşitlikte $r(z)$ konik bölge için bel yarıçapı, n_{ex} ise dış ortamın kırılma indis değerini ifade eder. Fibere konik yapı verilerek daha fazla modun desteklenebildiği bir kılavuz ortamı elde edilmiştir. Fiberin geometrik yapısının değişmesi sonucunda, yansıma yapılan ortam değiştiği için konik bölgede ilerleyen modların sızma derinliği de farklılık gösterecektir. Standart bir fiber için eşitlik 3.1 ile tanımlanan sızma derinliği, konik bölge içerisindeki ışık için yeniden düzenlenerek eşitlik 3.6'da gösterildiği gibi hesaplanabilir (Zibai vd. 2010).

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{cl}^2 \sin^2 \theta - n_{ex}^2}} \quad (3.6)$$

Konik fiber kılavuz yapısı sayesinde dış ortam ile şekillenen fiber modları sensör sonrasında fiber çıkışına ulaşır. Sensör bölgesinde kılavuz koşulları değişen modların oluşturacağı ışık demeti, fiber çıkışında benek deseni görüntüsünü oluşturur. Bu görüntülerin analiziyle algılama işlemi gerçekleştirilebilir.

3.2 Benek Deseni Görüntüleme ve Korelasyon Analizi

Çok modlu bir optik fiberde eşitlik 3.4 ile verilen V parametresine bağlı olarak yüzlerce mod kılavuzlanmaktadır. Basamak indisli çok modlu fiberde yaklaşık $V^2/2$, dereceli indisli fiberde ise $V^2/4$ değerince mod oluşmaktadır. Fiberdeki her bir mod, kendine özgü bir genlik ve faz bilgisiyle kılavuzlanmaktadır. Genlik ve faz bilgilerindeki farklılıklardan dolayı modlar, fiber çıkışında bir girişim deseni oluşturmaktadır. Bu girişim sonucu fiber kesit yüzeyinde oluşan görüntü, benek deseni olarak tanımlanmaktadır.

Benek deseni; fiberin öz çapına, öz ve kılıfın kırılma indislerine, ışığın dalga boyuna ve kılavuz koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir (Meng vd. 2019). Kararlı ve

keskin bir benek deseni elde edebilmek için fibere uygulanacak ışığın eş fazlı (kohorent) ve tek renkli (monokromatik) olması gerekmektedir. Dolayısıyla ışımaya kaynağı olarak lazer kullanılması gerekir. Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörlerde algılama işlemi, ölçülecek fiziksel büyüklüğün sensör bölgesine uygulanmasından önce ve sonra oluşan benek desenleri arasındaki ilişkinin analiz edilmesiyle gerçekleştirilebilir.

Fiber tarafından kılavuzlanan M adet modun toplamı, eşitlik 3.7’de verilen kompleks genlik formu ile ifade edilebilir.

$$A_0(x, y) = \sum_{m=0}^M a_{0m}(x, y) \exp\{i[\phi_{0m}(x, y)]\} \quad (3.7)$$

$a_{0m}(x, y)$ ve $\phi_{0m}(x, y)$ sırasıyla m’inci modun fiber kesit yüzeyindeki genlik ve faz dağılımlarını ifade eder. Fiberin kesit yüzeyinin yer aldığı X-Y düzlemindeki ışık şiddeti mod genliklerinin karesi hesaplanarak eşitlik 3.8’deki gibi ifade edilebilir (Yin vd. 2017).

$$I_0(x, y) = |A_0(x, y)|^2 = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a_{0m} a_{0n} \exp\{i[\phi_{0m} - \phi_{0n}]\} \quad (3.8)$$

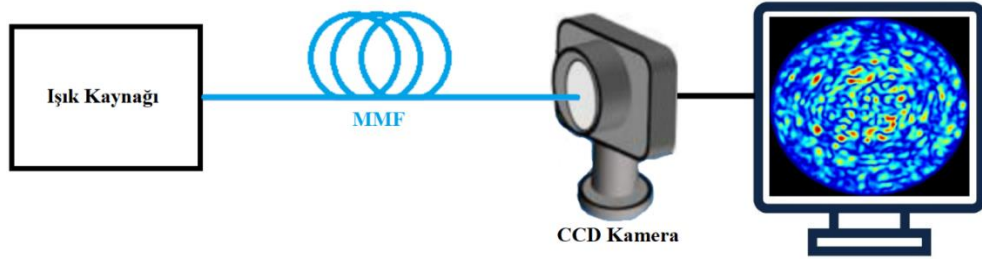
Sensör bölgesinde fiziksel büyüklüğün etkisiyle şekillenen benek deseni görüntüsü karmaşık (kompleks) formda eşitlik 3.9’daki gibi ifade edilebilir.

$$A_0(x, y) = \sum_{m=0}^M [a_{0m}(x, y) + \Delta a_m] \exp\{i[\phi_{0m}(x, y) + \Delta \phi_m]\} \quad (3.9)$$

Burada Δa_m ve $\Delta \phi_m$ sırasıyla genlik ve fazdaki değişimleri göstermektedir. Bu durumda eşitlik 3.8 tekrar düzenlendiğinde benek deseninin yoğunluk dağılımı eşitlik 3.10’da belirtildiği şekilde ifade edilir (Yin vd. 2017).

$$I(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M (a_{0m} + \Delta a_m)(a_{0n} + \Delta a_n) \exp\{i[\phi_{0mn} + \Delta \phi_{mn}]\} \quad (3.10)$$

Fiber çıkışında oluşan benek deseni görüntüsü matematiksel olarak eşitlik 3.10'da hesaplanan ışık yoğunluk fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörler bir lazer ışına kaynağı, optik fiber ve CCD kameradan oluşmaktadır. Bu sensör yapısına ait gösterim şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3 Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensör yapısı

Optik fiberde sensör amaçlı kullanılacak bölgeye uygulanan dışsal etkiler (gerilme, basınç, sıcaklık vb.) fiber çıkışında CCD kamera ile gözlemlenen benek deseni görüntülerinde değişikliklere yol açacaktır. Literatürde, benek deseni görüntüleri derin öğrenme (Efendioğlu vd. 2012, Cuevas vd. 2018, Li vd. 2018, Kürüm vd. 2019, Gupta vd. 2019, Şerbetçi vd. 2024), korelasyon analizi (Redding ve Cao 2012, Redding vd. 2013a, Redding vd. 2013b, Wang vd. 2017, Meng vd. 2019, Serbetci vd. 2022a, Serbetci vd. 2022b, Arı vd. 2023, Şerbetçi vd. 2024), normalize edilmiş yoğunluk iç çarpımı (NIPC) (Rohollahnejad vd. 2015, Yin vd. 2017, Fujiwara vd. 2017a, Fujiwara vd. 2017b, Fujiwara vd. 2018) gibi yöntemlerle analiz edilmiştir.

Sensör bölgesine uygulanan dışsal etki öncesinde kaydedilen benek deseni görüntüsü ile ölçülecek fiziksel büyüklüğün değişimi sonrası kaydedilen görüntü arasındaki normalize edilmiş yoğunluk iç çarpım fonksiyonu, fiberdeki modal faz değişikliklerine karşı yüksek duyarlılık gösterir. NIPC'nin matematiksel gösterimi eşitlik 3.11'de verilmiştir.

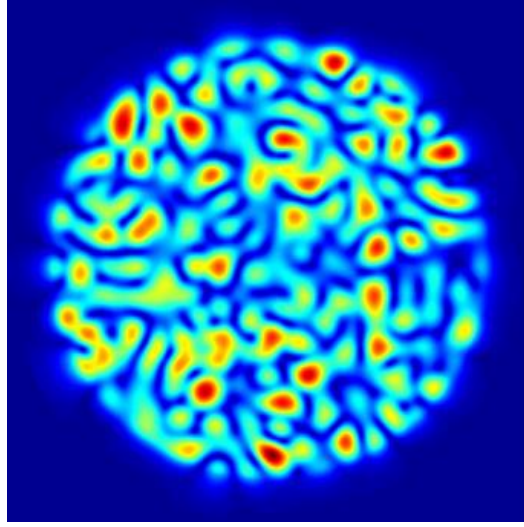
$$NIPC = \frac{\iint I_0(x, y) I(x, y) dx dy}{\sqrt{\iint I_0^2(x, y) dx dy \iint I^2(x, y) dx dy}} \quad (3.11)$$

Fiberin sensör bölgesine herhangi bir etki uygulanmadığı durumda benek deseni görüntüsünde bir değişim oluşmayacaktır. Bu nedenle eşitlik 3.11'den normalize edilmiş yoğunluk iç çarpım katsayı değeri “1” olarak hesaplanacaktır. Uygulanan etkinin niceliğine bağlı olarak benek deseni görüntüsünde değişiklik meydana gelecektir. Bu değişimin sonucunda, etki öncesi kaydedilen referans görüntü ile yeni görüntü arasındaki NIPC değeri 1 ile 0 arasında bir değer alacaktır (Yin vd. 2017). NIPC değeri görüntüler arasındaki benzerlik ilişkisinin gücünü ifade eder. Değerin “0” olması görüntüler arası hiçbir benzerlik ilişkisinin olmadığını gösterirken, “1” değeri görüntülerin aynı olduğu anlamına gelir.

Benek deseni görüntüleme tabanlı fiber sensörlerde, korelasyon analizi kullanılan bir diğer yöntemdir (Arı vd. 2023). Algılama işlemi için ilk adımda, ölçülen fiziksel büyüklüğün değerinin belirlenebilmesi amacıyla bir referans görüntü seçilir. Bu referans görüntü, genellikle sensör bölgesine herhangi bir etkinin uygulanmadığı anda kaydedilen benek deseni görüntüsüdür. Ardından, referans görüntüsü ile değişen benek deseni görüntüsü arasındaki CC hesaplanır. CC'deki değişimlerin analizi sonrası algılama işlemi gerçekleştirilmektedir. CC'ye ait matematiksel gösterim eşitlik 3.12'de verilmiştir. Burada M_i ve N_i sırasıyla referans görüntü ve diğer görüntüyü ifade ederken, $\bar{M}$ ve $\bar{N}$ sırasıyla referans ve diğer görüntünün ortalamasıdır. Korelasyon katsayısı 0 ile 1 arasında bir değer alır.

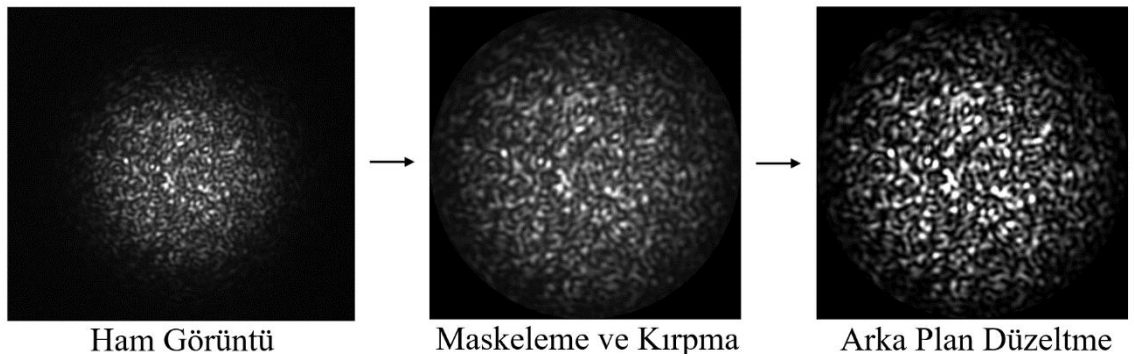
$$CC = \frac{\sum (M_i - \bar{M})(N_i - \bar{N})}{\sqrt{\sum (M_i - \bar{M})^2 \sum (N_i - \bar{N})^2}} \quad (3.12)$$

X-Y düzleminde bulunan fiber kesit yüzeyi CCD kamera ile gözlemlendiğinde, benek deseni görüntüsü fiberin geometrik yapısına uygun biçimde silindirik formda oluşmaktadır. Şekil 3.4'te örnek bir benek deseni sunulmuştur (Serbetci vd. 2022a).



Şekil 3.4 Çok modlu bir fiberde oluşan benek deseni görüntüsü (Serbetci vd. 2022a)

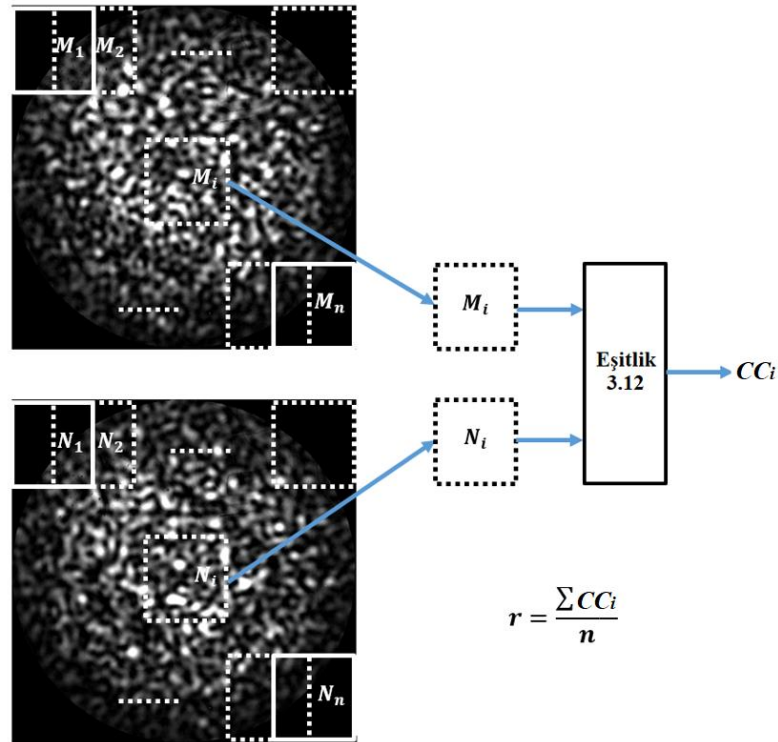
Benek deseni görüntülerinin bölütlenmeden, bir bütün olarak korelasyon analizinden geçirilmesi, silindirik yapının dışında kalan ışıksız alanın referans görüntü ile diğer görüntü arasındaki ilinti artırıcı etki yapacağından, ölçüm duyarlılığını düşürecektir. Bu durumu engellemek için, benek deseni görüntülerine bir dizi görüntü işleme tekniği uygulanması gerekmektedir. Öncelikle silindirik yapının dışındaki ışıksız alan maskelenmelidir. İleri aşamalarda, görüntü kırılmalı ve yalnızca benek deseninin olduğu ilgi bölgesi (Region of Interest - ROI) üzerine odaklanılmalıdır. Son olarak, benek görünürliğini artırmak ve düzensiz ışık dağılımını ortadan kaldırmak için arka plan düzeltilmesi (background correction) yapılmalıdır. Tüm bu görüntü işleme ön adımları şekil 3.5’te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Görüntü işleme adımları

1024x1360 piksel boyutlarında olan ham (raw) veriler, maskeleme ve kırpma işlemleri sonrasında 500x500 piksel boyutuna küçültülmüştür. Bu işlem, deneysel çalışmalarla elde edilen tüm benek deseni görüntülerinin aynı boyutta standart hale getirilmesini sağlamıştır. Arka plan düzeltme işlemi, benek deseni görüntülerinin boyutlarında herhangi bir değişiklik yaratmamıştır. Beneklerin görünürlüğü artırılıp, düzensiz aydınlatma giderildiğinde, benek desenlerinin davranışlarının daha net bir şekilde incelenmesi mümkün olmuştur. Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi, arka plan düzeltme sonrası görüntülerin benek çözünürlüğü yükseltilmiş ve sensörün ölçüm hassasiyeti artırılmıştır.

Referans görüntü ile diğer görüntüler arasındaki korelasyonun hesaplanmasında, görüntülerin bütün halinde incelenmesi ölçüm hassasiyetinde azalmaya yol açmaktadır. Bu sorunu aşmak için, benek desenleri üzerinde 100x100 piksel boyutunda bir bölüt kullanılmış ve bu bölüt her adımda 10 piksel kaydırılarak görüntüler taranmıştır. Bu yöntemle ilişkin görsel şekil 3.6'da sunulmuştur. Bölütleme işlemi sonucunda, korelasyon değerlerinin iyileştiği ve ölçümlerin daha yüksek bir hassasiyetle gerçekleştirilebildiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.6 Bölütler arası korelasyon katsayısının hesaplanması

Referans görüntü ile diğer görüntülerde aynı alt indis değerlerine karşılık gelen bölütler için, eşitlik 3.12'de verilen formül kullanılarak ayrı ayrı korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan tüm korelasyon değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu yöntem, iki görüntü arasındaki korelasyon ilişkisinin daha detaylı incelenmesini sağlayarak ölçüm hassasiyetini artırmaktadır.

3.3 Evrişimli Sinir Ağı Mimarisi

Evrişimli sinir ağları, son yıllarda giderek daha fazla önem kazanan bir derin öğrenme modeli olarak, görüntü sınıflandırma, nesne tespiti, görüntü segmentasyonu, yüz tanıma, işaret işleme, video analizi ve ses tanıma gibi pek çok farklı alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. CNN mimarisi, genellikle evrişim katmanı, aktivasyon fonksiyonu, havuzlama katmanı, tam bağlantılı katman ve sınıflandırma katmanı gibi bileşenlerden oluşmaktadır.

Evrişim katmanı, CNN mimarisinin en önemli katmanlarından biridir. Giriş verilerinin özelliklerini çıkarmak ve öğrenim için kullanılır. Görüntülerin kenar ve köşe gibi düşük seviyeli özelliklerinin yanı sıra daha derin katmanlarda bulunan yüz, nesne parçaları gibi daha yüksek seviyeli özellikleri bu katman içerisinde çıkarılır. Giriş görüntüleri yükseklik, genişlik ve derinlik olmak üzere üç boyuttan oluşmaktadır. Bu katman içerisinde giriş verisinden özellik çıkarma işlemi filtreler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Her bir filtrenin kendine ait bir ağırlık ve bias değeri bulunmaktadır.

Özellik haritasının çıkarılmasında bir diğer önemli parametre ise adım (stride) değeridir. Adım, filtrenin giriş görüntüsü üzerinde kaç piksel değerinde kaydırılacağı bilgisini taşır. Adım değerine bağlı olarak özellik haritasının boyutu değişmektedir. Büyük adım değerleri daha küçük özellik haritası üretirken, küçük adım değerleri daha büyük özellik haritası çıkarılmasını sağlar. Problemin özelliklerine göre adım sayısı belirlenmektedir.

Kenar etkilerini azaltmak ve boyutları korumak için sıfır dolgu (padding) işlemiyle, giriş verisinin çevresine sıfır değerleri eklenmektedir. Orijinal boyutu korumak için “same” dolgusu ya da dolgu oluşturulmaması için “valid” dolgusu yaygın olarak kullanılan sıfır dolgu türleridir.

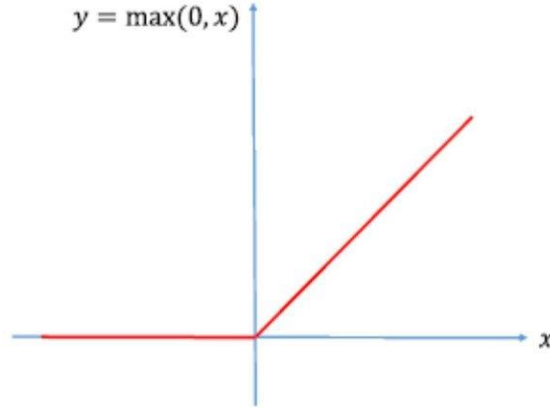
Evrişim katmanının çalışma prensibi aşağıdaki adımlarla ilerlemektedir.

- Filtre, giriş görüntüsü üzerinde belirli adım değerleriyle kaydırılır,
- Giriş görüntü matrisi üzerinde filtrenin bulunduğu her pozisyon için, giriş matrisinin elemanları ile filtre matrisinin elemanları çarpılır ve bu çarpımların her biri toplanır.
- Çıkan değerler, bir aktivasyon fonksiyonundan (ReLU vb.) geçirilir,
- Elde edilen son çıktı bir özellik haritası olarak kaydedilir.

Evrişim katmanının devamında modelin öğrenme kapasitesini artıran, bir katmanın çıktısına doğrusal olmayan bir dönüşüm uygulayan aktivasyon fonksiyonları gelmektedir. Bu fonksiyonlar, bir nöronun girdisine uygulanan ağırlıklı toplamın çıktılarını dönüştürerek, sinir ağlarının doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri öğrenebilmesini sağlar. Eğer sinir ağlarında aktivasyon fonksiyonları kullanılmazsa, ağ yalnızca doğrusal ilişkileri modelleyebilir ve katman sayısı ne olursa olsun, bir lineer dönüşümle sınırlandırılmış olur. Uygun aktivasyon fonksiyonunun seçimi, modelin performansı ve öğrenimini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu tez çalışması kapsamında aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU (Rectified Linear Unit) seçilmiştir.

ReLU fonksiyonu günümüz literatüründe en sık kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından biridir. $[0, \infty]$ aralığında çıktı üretmektedir. Fonksiyona gelen negatif değerler sıfır, pozitif değerler kendi değerleri olarak atanmaktadır. Sadece sıfırdan büyük değerler fonksiyondan geçtiği için ReLU fonksiyonu hesaplama kolaylığı sağlamaktadır. Pozitif bölgelerde türev sabit ve büyüktür. Eğer bir nöron negatif değerler yüzünden tamamen kapanırsa, bu nöron tekrar aktif olamaz. Bu durum öğrenme sürecini olumsuz etkilemektedir. ReLU fonksiyonunun matematiksel ifadesi ve grafiği aşağıda verilmiştir.

$$f(x) = \max(0, x) \quad (3.13)$$



Şekil 3.7 ReLU aktivasyon fonksiyonu

Evrişimsel sinir ağlarında bir diğer önemli katman, havuzlama katmanıdır. Havuzlama katmanında özellik haritalarının boyutu küçültülerek hesaplama maliyeti azaltılır ve modelin genelleme yeteneği artırılır. Ayrıca aşırı öğrenmeyi (overfitting) önleyen ve özniteliklerin boyutunu küçülten bir katman türüdür. Havuzlama, evrişim katmanlarından sonra uygulanarak, çıktı öznitelik haritalarındaki boyutları küçültürken, önemli öznitelikleri korumayı amaçlar. Bu katmanlar, özellikle görüntü sınıflandırma ve nesne tespiti gibi görevlerde yaygın olarak kullanılır. Havuzlama işleminde uzamsal boyutlar (genişlik ve yükseklik) küçülürken, derinlik boyutu (kanal sayısı) değişmez. Yaygın olarak kullanılan havuzlama katmanları maksimum havuzlama (max pooling), ortalama havuzlama (average pooling) ve toplam havuzlamadır (global pooling).

Maksimum havuzlamada, her bir pencere içinde en büyük değer seçilir. Böylece en belirgin özelliklerin korunmasını sağlanırken aynı zamanda arka plan gürültüsü de azaltılmış olur. Özellikle kenar belirginleştirme ve en belirgin özelliklerin korunmasını sağlar. Fakat bu işlem, pencere içerisindeki maksimum değeri korurken diğer değerlerin kaybolmasına neden olduğu için bu durum bilgi kaybına yol açar.

Ortalama havuzlama, her bir pencere içindeki tüm değerlerin ortalamasını alır. Bu işlem tüm özelliklerin ağırlıklı olarak korunmasını sağlar. Ortalama havuzlamayla girdi üzerindeki keskin değişimler yumuşatılarak daha düzgün bir çıktı elde edilmektedir.

Değerlerin ortalaması alındığı için daha geniş bir bilgi seti korunmuş olur. Böylece daha iyi bir genelleme yeteneği sağlanabilir. Maksimum havuzlamaya kıyasla belirgin özelliklerin baskınlığı azalacaktır.

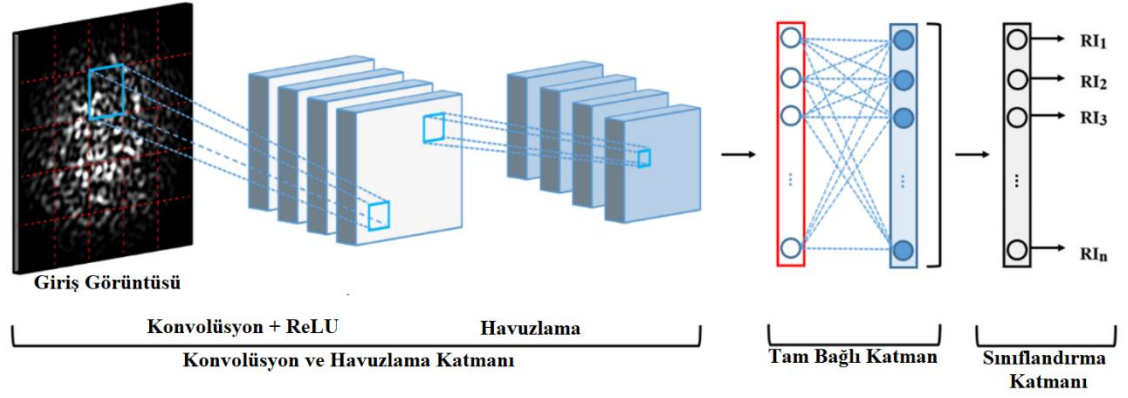
Toplam havuzlamada giriş öznitelik haritasının tüm bölgesi tek bir havuzlama penceresi olarak ele alınır ve tüm harita tek bir değere indirgenir. Böylece model boyutu küçültülerek model parametre sayısı azaltılır ve hesaplama verimliliği artırılır. Çıkış önemli ölçüde basitleştirildiği için aşırı öğrenmenin önüne geçilmiş olunur. Toplam havuzlama yerel bilgilerin tümünü kaybeder ve bu da bazen model performansını olumsuz etkileyebilir.

Yapay sinir ağlarında, özellikle de derin öğrenme modellerinde kullanılan iki temel katman türü olan tam bağlı katman (Fully Connected Layer) ve sınıflandırma katmanı (Classification Layer), ağın çıktısını üretmek için kritik öneme sahiptir. Bu katmanlar, modelin karmaşık karar sınırlarını öğrenmesine ve son sınıflandırma işlemini gerçekleştirmesine yardımcı olur.

Tam bağlı katmanda her nöron, bir önceki katmanda bulunan tüm nöronlarla bağlantılıdır. Bu, bir nöronun önceki katmandaki nöronların çıktıları üzerinde bir ağırlık uyguladığı anlamına gelir. Tam bağlı katman, girdiyi doğrusal olmayan bir şekilde dönüştürerek karmaşık ilişkileri modelleyebilir. Ayrıca çok sayıda parametre içermesi, modelin esnekliğini ve öğrenme kapasitesini artırır. Farklı özellikleri birleştirerek, sınıflandırma veya regresyon gibi görevler için daha anlamlı özellikler üretir. Bu avantajlara karşın çok sayıda parametre içerdiği için, tam bağlı katmanlar aşırı öğrenme riskine karşı savunmasız olabilir. Parametre sayısının fazla olması ayrıca, hesaplama maliyetini artırır ve bu da büyük veri kümeleriyle çalışırken sorun yaratabilir.

Sınıflandırma katmanı bir sinir ağının en son katmanında yer alır ve ağın çıktısını belirli sınıflara ayırmak için kullanılır. Bu katman, modelin tahmin ettiği sınıf olasılıklarını üretir ve son tahminin yapılmasını sağlar. Sınıflandırma katmanı genellikle bir Softmax fonksiyonu içerir. Softmax, birden fazla sınıfa sahip çıktılar için her sınıfın olasılığını hesaplar ve bu olasılıkların toplamı 1 olacak şekilde normalize eder. Sonuçların bire

normalize edilmesi sonuçların daha anlaşılır ve yorumlanabilir olmasını sağlar. Dengesiz sınıf dağılımlarında, bazı sınıfların olasılıkları aşırı derecede düşük olabilir ve bu da modelin performansını olumsuz etkileyebilir. Tez çalışmasında kullanılan MATLAB’de oluşturulan evrişimli sinir ağı modeli gösterimi şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8 Kullanılan CNN mimarisi

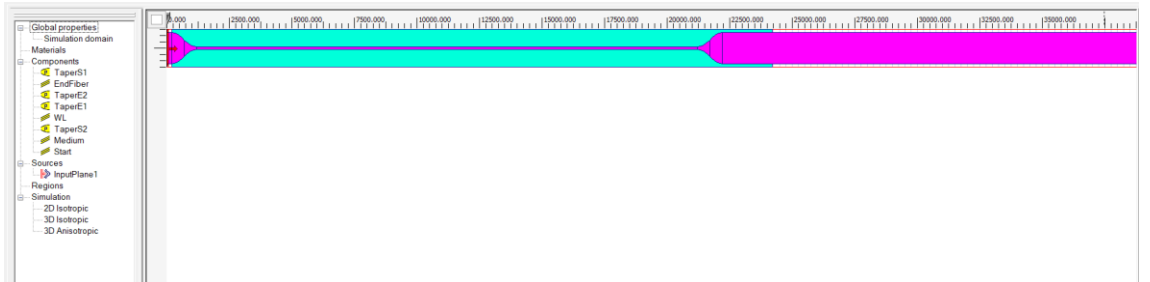
4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

KFS’lerde fibere verilen konik geometrik yapının sensör hassasiyeti üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Işık Yayılım Metodu (Beam Propagation Method-BPM) kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. KFS’lerde sensör hassasiyetini belirleyen en önemli iki faktör, sensör bölgesinin bel çapı ve bel uzunluğudur.

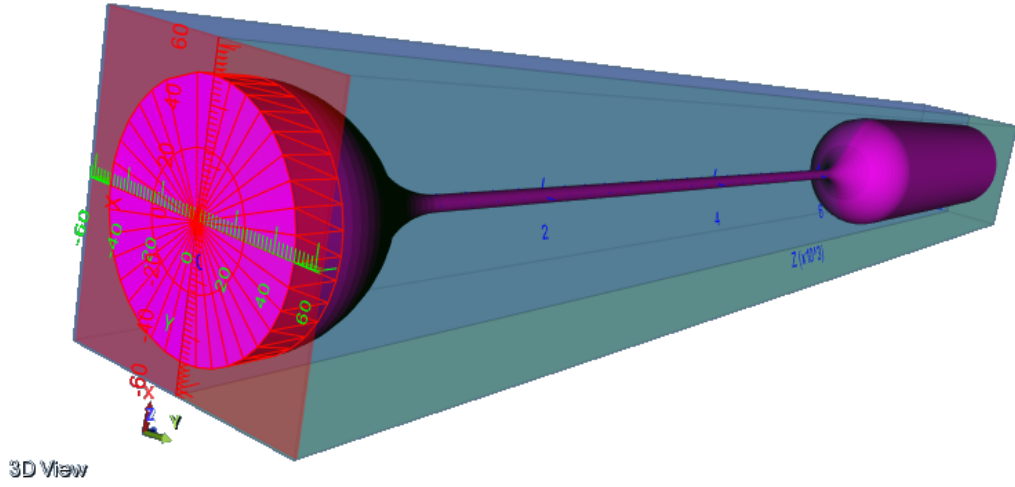
Sensör geometrisinde bulunan her bir parametrenin etkisinin değerlendirilmesi için öncelikle referans değerler tanımlanmıştır. Bu bağlamda, öz ve kılıf yarıçapları sırasıyla 125 μm ve 100 μm olan SI-MMF kullanılmıştır. Konik bölgeye ait parametreler şu şekilde belirlenmiştir:

- Geçiş bölgesi uzunluğu: 1 mm
- Bel çapı: 10 μm
- Bel uzunluğu: 2 cm
- Konik bölge sonrası fiber uzunluğu: 7 cm

Her bir parametrenin etkisinin incelenebilmesi için diğer tüm parametreler sabit tutulmuş ve incelenecek parametre değiştirilerek sensör duyarlılığı araştırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında sadece kırılma indisi değişimi incelenmiştir. Sensörün konik bölgesi, kırılma indisi 1.3300-1.3310 arasında 10^{-4} adımlarla değişen bir madde ile sarmalanmıştır. Tasarlanan simülasyon ortamı şekil 4.1’de gösterilmektedir. Ayrıca sensörün 3 boyutlu gösterimi şekil 4.2’de verilmiştir.



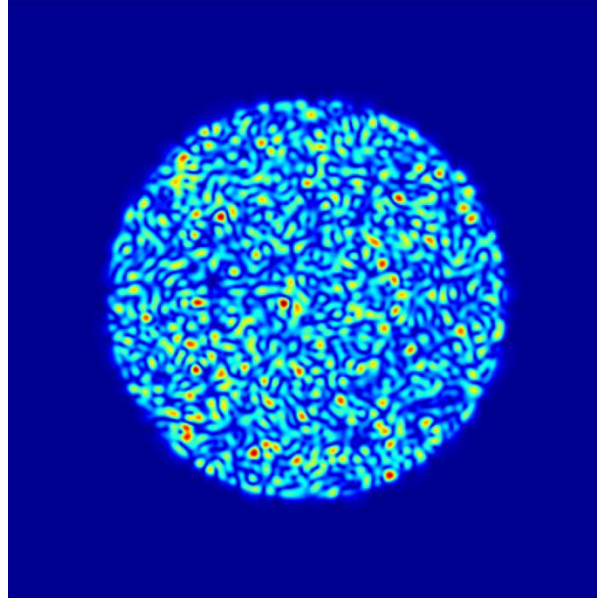
Şekil 4.1 Konik fiber sensörün tasarımı



Şekil 4.2 Konik fiber sensörün üç boyutlu görünüşü

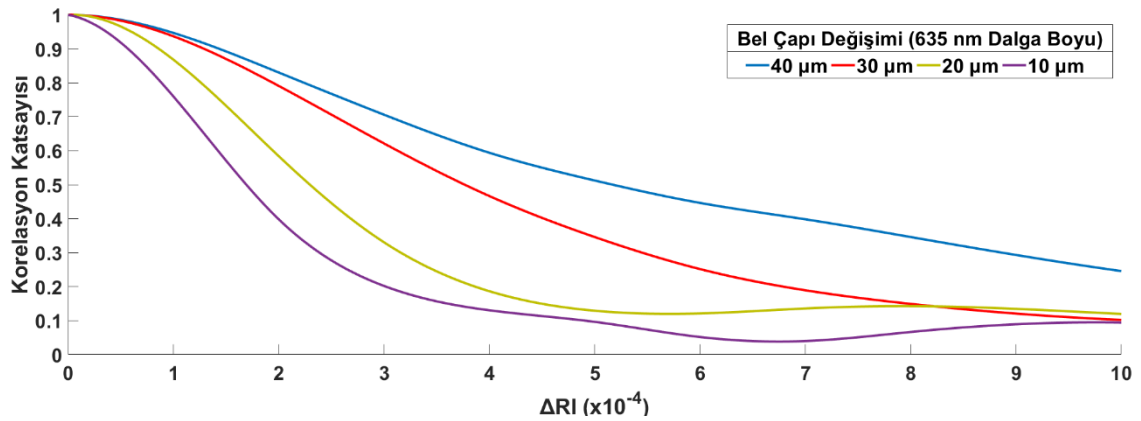
Optik fiber içinde kılavuzlanabilecek mod sayısı, eşitlik 3.4’te ifade edilen normalize frekans V parametresine bağlı olarak değişmektedir. Bu parametre, fiberin öz yarıçapı, öz ve kılıfın kırılma indis değerleri ile doğru orantılı, lazer ışıma kaynağının dalga boyu ile ise ters orantılıdır. Işığın dalga boyu küçüldükçe ve fiberin öz yarıçapı büyüdükçe, kılavuzlanabilecek mod sayısı buna paralel olarak artış göstermektedir. Simülasyon çalışmalarında, öz ve kılıf kırılma indisleri sırasıyla 1.45 ve 1.44 olarak belirlenmiş; lazer ışıma kaynağının dalga boyu ise 635 nm olarak seçilmiştir.

Bessel fonksiyonları kullanılarak fiber içerisinde kılavuzlanabilecek toplam mod sayısı hesaplanmıştır. Buna göre toplamda 870 LP modu hesaplanmıştır. LP_{01} temel modu ile LP_{73-1} modu arasında 870 mod bulunmaktadır. Hesaplanan LP modlarının rotasyonlarıyla birlikte 1666 mod girdi benek deseni görüntüsünü oluşturmaktadır. Hesaplanan her bir mod için rasgele bir genlik ve faz bilgisi atanmış ve elde edilen girdi benek deseni görüntüsü şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3 Konik fiber sensör girişine uygulanan girdi benek deseni görüntüsü

Konik bölge bel çapının sensör duyarlılığı üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için simülasyon çalışmaları kapsamında ilk olarak diğer tüm parametreler sabit tutularak bel çapı 10, 20, 30 ve 40 μm değerlerinde değiştirilerek KFS tasarlanmıştır. Şekil 4.3'te görülen hesaplanmış girdi benek deseni görüntüsü fiber girişine uygulanmıştır. Bel çapının değiştiği her bir sensör tasarımı için kırılma indisi değiştirilmiş ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucu fiber çıkışında kaydedilen benek deseni görüntüleri, görüntü işleme adımlarından geçirilerek korelasyon analizi için hazır hale getirilmiştir. Analiz sonucu bel çapı değişimi için elde edilen kırılma indisi-korelasyon katsayısı grafiği şekil 4.4'te gösterilmiştir.

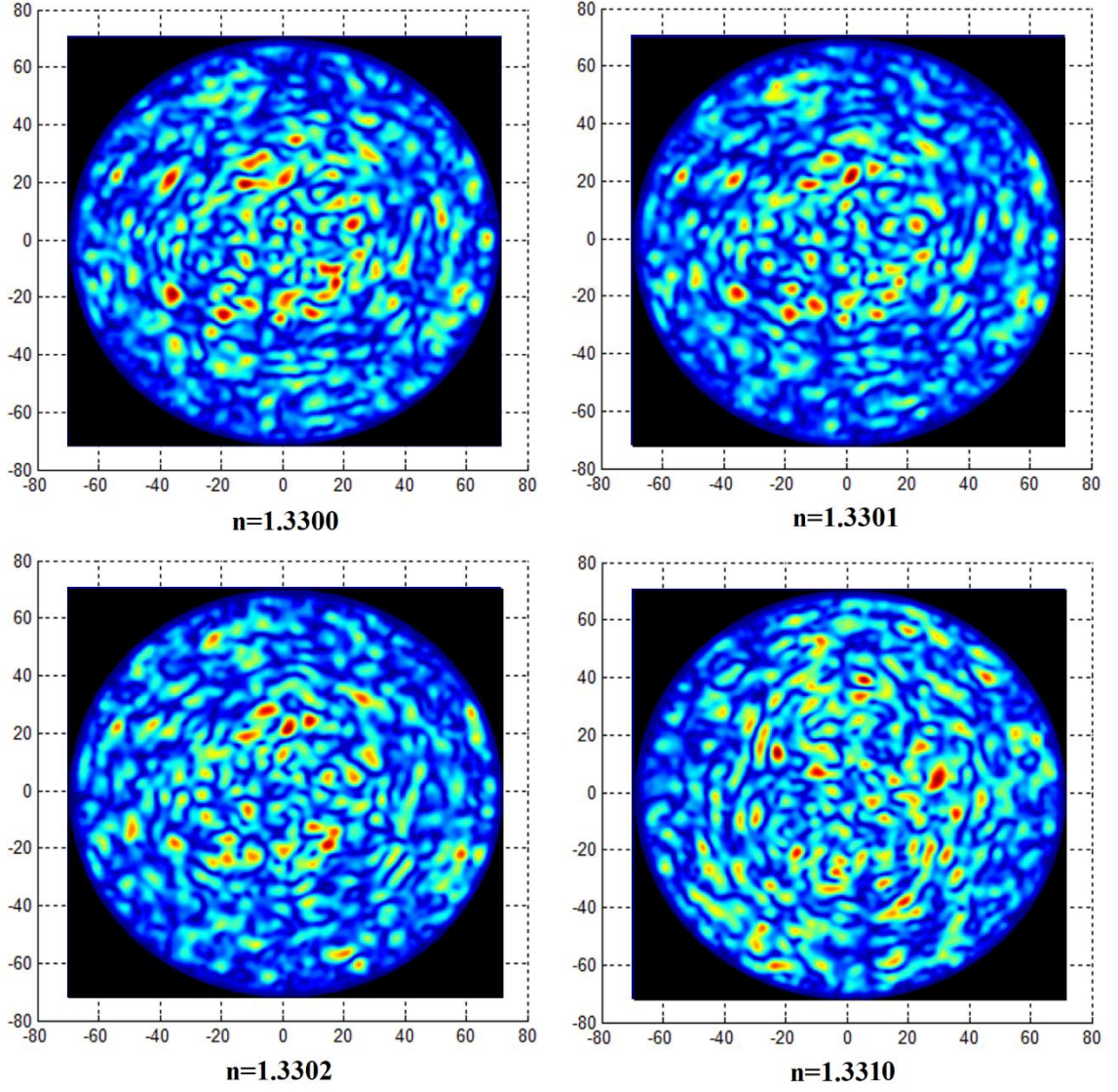


Şekil 4.4 Bel bölge kalınlığına bağlı korelasyon katsayısı değişimi

1.3300 kırılma indis değeriinde kaydedilen benek deseni görüntüsü referans görüntü olarak seçilmiştir. Kırılma indisinin değiştirilmesiyle ortam kılavuz koşulları değişmektedir. Bu değişim fiber içerisindeki modların genlik ve faz değerlerinde değişikliklere neden olduğu için fiber çıkışında gözlemlenen benek deseni görüntülerinde de değişimler meydana gelmektedir. Ortaya çıkan değişim miktarı korelasyon analiziyle sayısallaştırılmıştır. Şekil 4.4'ten görüleceği üzere bel çapının 40 μm olduğu durumda kaydedilen benek deseni görüntüleri ile referans görüntü arasındaki korelasyon katsayısı değişimi diğer bel çaplarına sahip sensörlere kıyasla daha düşüktür. Bu durum, bel çapının büyük olması ve daha az sayıda modun sızma derinliğini aşması ile açıklanabilir. Bel çapı büyüdükçe daha az sayıda mod çevre ortam üzerinden yansımaktadır ve bu durum sensör hassasiyetini düşürmektedir.

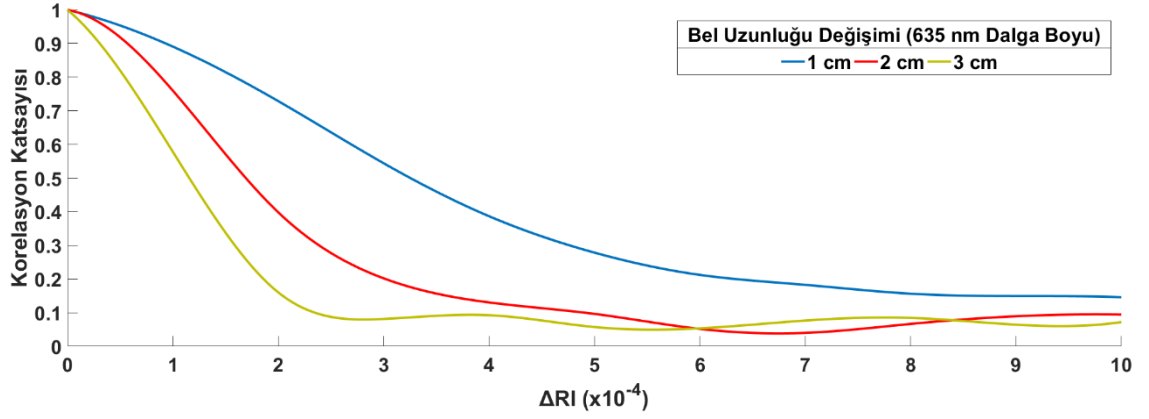
Şekil 4.4 incelendiğinde bel çapı azaldıkça benek deseni görüntüleri arasındaki ilinti oranının düştüğü görülmektedir. Bu simülasyon çalışması göstermiştir ki bel çapı azaldıkça sensör duyarlılığı artmaktadır. Buna karşılık bel çapının aşırı derecede küçültülmesiyle fiber içerisinde kılavuzlanan modlar dış ortama daha fazla nüfuz edeceğinden, modların tekrar fiber içerisine kılavuzlanması zor olacaktır. Bu durumda fiber çıkışındaki ışık yoğunluğu azalacak ve dolayısıyla benek görünürlüğü zayıflayacaktır. Böylece sensör duyarlılığı azalacaktır. Bu nedenle bel çapının istenilen sensör hassasiyetine uygun şekilde seçilmesi büyük öneme sahiptir.

Bel çapı 10 μm olan sensör için yapılan simülasyon çalışmalarından elde edilen bazı benek deseni görüntüleri şekil 4.5'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kırılma indisi değiştikçe benek deseni görüntülerinin referans görüntüden giderek farklılaştığı görülmektedir.



Şekil 4.5 Ortam kırılma indisi değişimine bağlı benek deseni oluşumu

Devam eden çalışmalarda KFS bel uzunluğunun duyarlılığa etkisini araştırmak için diğer parametreler sabit tutulmuş ve sensör bel uzunluğu 1, 2 ve 3 cm değerlerinde değiştirilerek tasarım gerçekleştirilmiştir. Bel uzunluğu için gerçekleştirilen simülasyonlarda da fiber girişine aynı girdi benek deseni görüntüsü uygulanmıştır. Çevre kırılma indisi 1.3300-1.3310 aralığında değiştirilerek çıkışta oluşan benek deseni görüntüleri kaydedilmiştir. Görüntü işleme adımları ve korelasyon analizi sonrası elde edilen kırılma indisi-korelasyon katsayısı grafiği şekil 4.6’da gösterilmiştir.

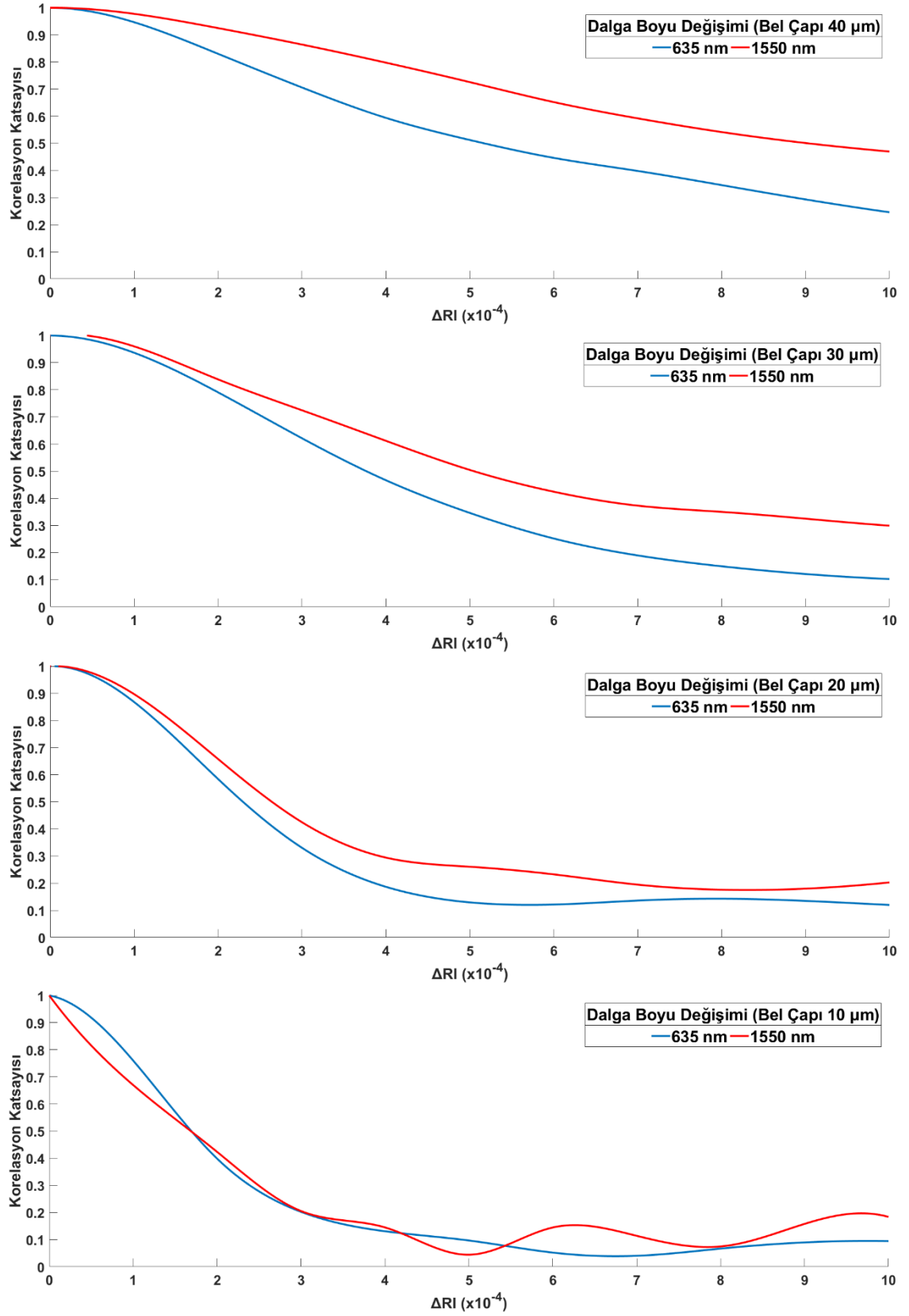


Şekil 4.6 Bel bölge uzunluğuna bağlı korelasyon katsayısı değişimi

Şekil 4.6 incelendiğinde bel uzunluğunun artmasıyla sensör hassasiyetinin arttığı gözlenmektedir. Bel uzunluğu arttıkça, sensör bel bölgesinde daha fazla mod sızma derinliğini aşmaktadır. Bu durum sensör performansını artırmaktadır. Bel uzunluğunun 1 cm olduğu durumda hesaplanan korelasyon katsayıları, 2 ve 3 cm uzunluklar için hesaplanan değerlere kıyasla oldukça düşüktür. Yani benek deseni görüntüleri arasındaki ilinti yüksektir.

2 ve 3 cm için elde edilen grafikler birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Bel uzunluğunun sürekli artması sensör performansını belirli bir noktaya kadar yükseltirken, bel çapı etkisine benzer olarak, bel uzunluğunun yüksek olması fiber çıkışında gözlemlenen ışık yoğunluğunu düşürecek ve benek görünürlüğünü zayıflatacaktır. Bu durum sensör performansını düşürmektedir. Bu nedenle konik yapının tasarımı yapılırken parametreler en uygun değerlerde seçilmelidir.

KFS'nin geçiş bölge uzunluğu ve konik yapı sonrası fiber uzunluğu parametreleri için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, bel çapı ve uzunluğu için yapılan simülasyonlardaki gibi lineer bir sonuç ortaya koymamaktadır. Simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen veriler ışığında deneysel çalışmalar bel çapı ve uzunluğu üzerine yoğunlaşmaktadır. Dalga boyu etkisinin sensör hassasiyeti üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için bel çapı 10 ile 40 μm arasında değişen ve bel uzunluğu 2 cm olarak tasarlanan KFS'ler için 635 nm ve 1550 nm dalga boyunda iki farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.7'de sunulmuştur.

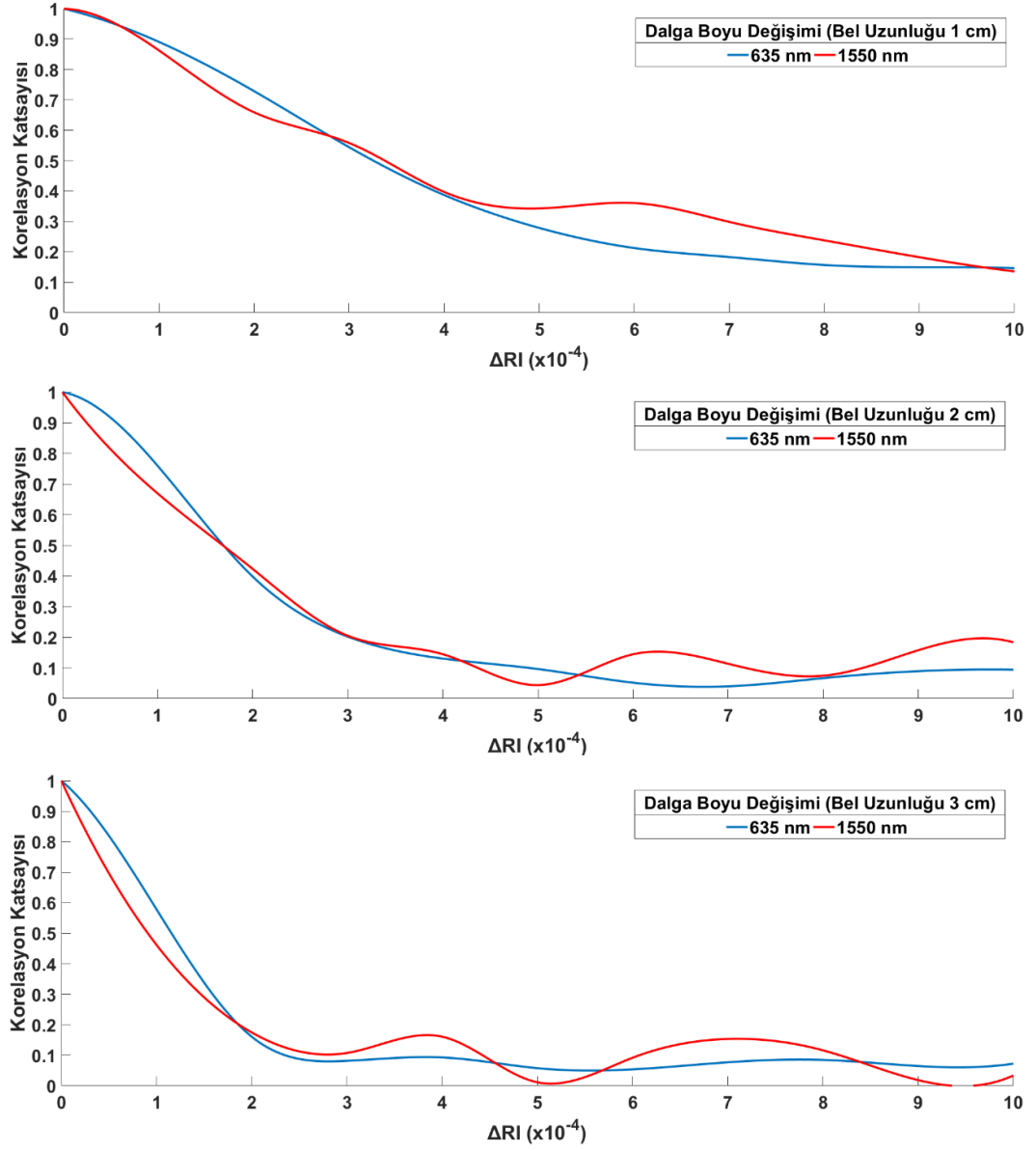


Şekil 4.7 Farklı bel çaplarında dalga boyuna bağlı korelasyon katsayısı değişimi

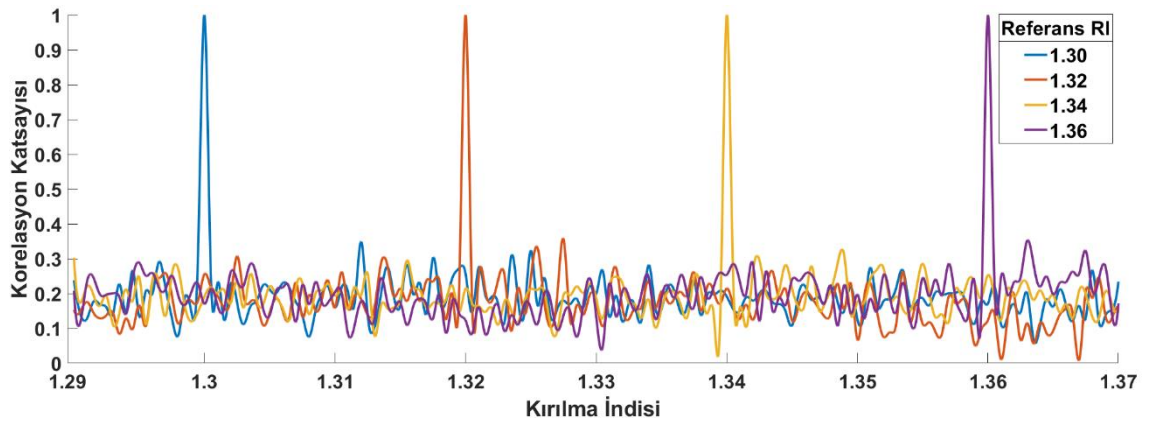
Şekil 4.7 incelendiğinde düşük dalga boyu (635 nm) ile aydınlatılan sensör, yüksek dalga boyu (1550 nm) ile aydınlatılan sensöre kıyasla kırılma indisi değişimine daha duyarlıdır. Bu sonuç, fiberin V parametresi ve mod sayısı ile ilişkilendirilerek açıklanabilir. Dalga boyunun azalması fiberin V parametresini ve dolayısı ile yayılan mod sayısını artıracaktır. İçin benek boyutları küçülecek ve desende daha fazla sayıda benek oluşacaktır. Fiber çıkışındaki görüntü üzerinde benek sayısının artması, bir dijital ekranda piksel sayısının artmasına benzetilebilir. Piksel sayısındaki artışın görüntü çözünürlüğüne sağladığı katkıya benzer bir yaklaşımla, görüntülerdeki benek sayısının artması korelasyon katsayısının daha hızlı değişmesini ve dolayısıyla sensör duyarlılığının yükselmesini sağlar. Bu nedenle 635 nm dalga boyunda çalıştırılan sensör, kırılma indisi değişimine daha yüksek duyarlılık göstermiştir.

Ayrıca bel çapı azaldıkça her iki dalga boyunda aydınlatılan sensörler benzer duyarlılık performansı göstermektedir. 10 µm bel çapı için her iki dalga boyunda da sensörün yüksek duyarlılık gösterdiği görülmektedir. Sensör duyarlılığına dalga boyunun ve bel uzunluğunun birlikte etkisini araştırmak için sabit bir bel çapında (10 µm), bel uzunluğu 1-3 cm arasında değişen KFS'nin 635 ve 1550 nm dalga boylarında elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.8'de sunulmuştur. Şekil 4.8 incelendiğinde, Şekil 4.7'de olduğu gibi 10 µm bel çapına sahip KFS'nin her iki dalga boyunda da yüksek bir duyarlılıkta birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Simülasyon çalışmalarında son olarak KFS'nin ölçüm aralığı araştırılmıştır. 1550 nm dalga boyunda, 1.29 ile 1.37 kırılma indisi aralığında 5×10^{-4} adım aralıklarıyla değişen ortam kırılma indis değerleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar için dört farklı referans görüntü seçilerek diğer görüntülerle oluşturduğu korelasyon araştırılmıştır. Şekil 4.9 incelenirse, korelasyon katsayısının yaklaşık 0.4 ve altında olan bölgede görüntüler arası ilişkinin anlamsız olduğu ve bu seviyenin bir eşik seviyesi olarak kabul edilebileceği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, modellenen konik fiber sensörü ile arzu edilen bir kırılma indis aralığında ölçüm yapılabileceğini göstermektedir.

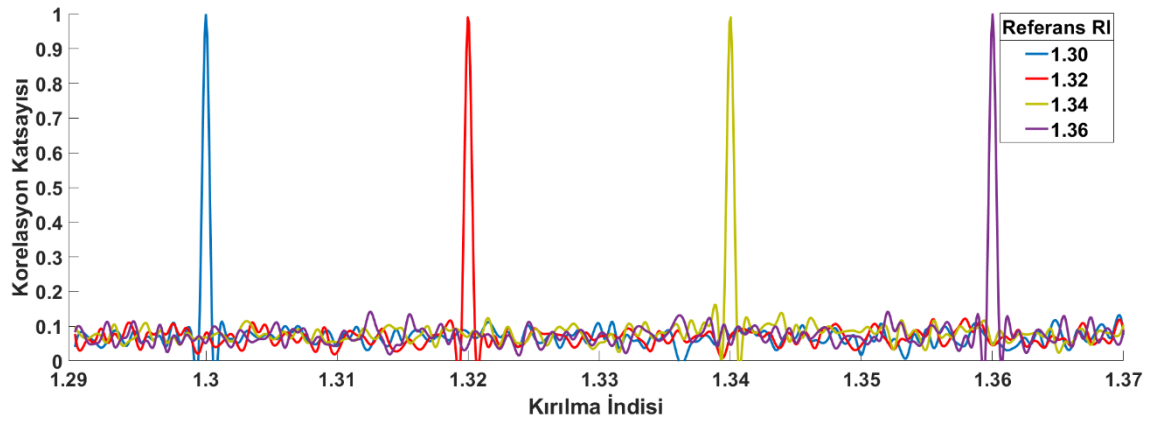


Şekil 4.8 Farklı bel uzunluklarında dalga boyuna bağlı korelasyon katsayısı değişimi



Şekil 4.9 1550 nm dalga boyunda dört farklı referans görüntü için korelasyonun değişimi

1550 nm dalga boyunda yapılan çalışmaların ardından, dalga boyu 635 nm'ye kaydırılarak elde edilen benek deseni görüntülerinde de sensörün ölçüm aralığı araştırılmıştır. Kırılma indisinin 1.29-1.37 aralığı için elde edilen benek deseni görüntülerinde seçilen dört farklı referans görüntü için korelasyon değişim eğrileri şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu grafikten her bir kırılma indisine karşılık gelen benek deseni görüntülerinin eşsiz olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca dalga boyu azaldıkça korelasyondaki eşik seviyenin düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.10 635 nm dalga boyunda dört farklı referans görüntü için korelasyonun değişimi

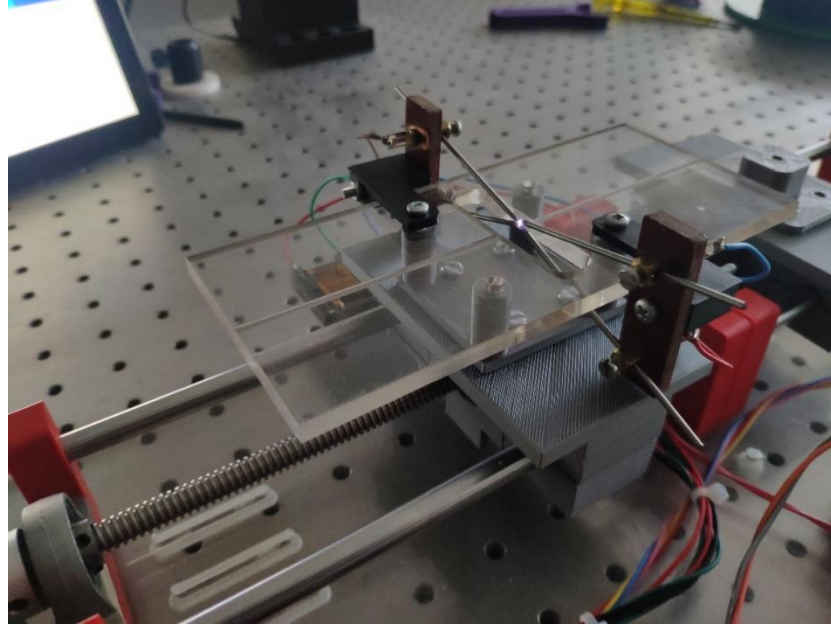
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Konik Fiber Sensör Üretim Düzenegi

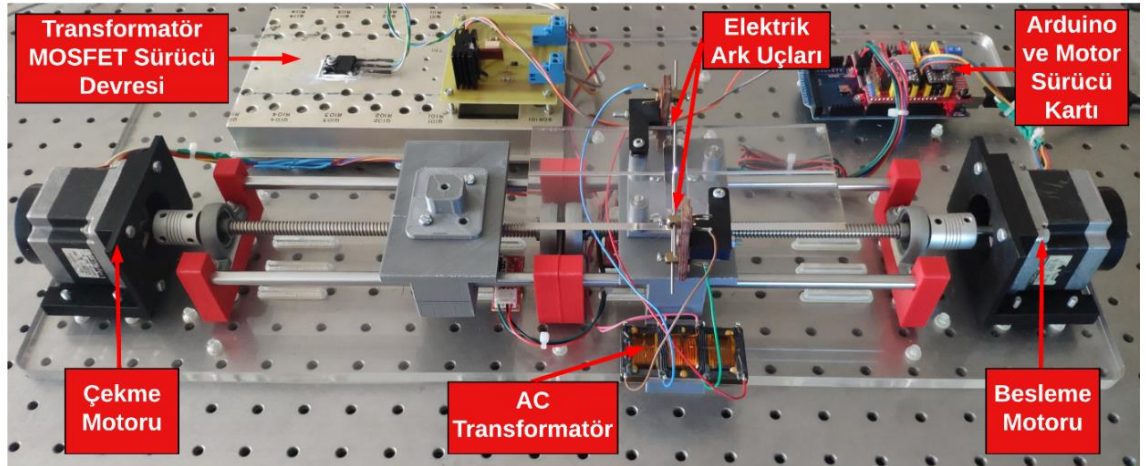
Bu bölümde, KFS üretmek için hazırlanan üretim düzenegi detaylıca açıklanmıştır. İstenilen bel çapı ve bel uzunluğu değerlerine sahip KFS üretebilmek için bir düzenek geliştirilmiştir. Literatürde fiberlere konik yapı verilebilmesi için birçok yöntem sunulmuştur. Bunlar genellikle ısı ya da kimyasal yöntemlerdir. Bu tez çalışmasında optik fiberi konik biçimde şekillendirebilmek için ısı yöntemleri içerisinde yer alan elektrik ark-deşarj tekniğini kullanan bir üretim tezgâhı geliştirilmiştir. Bu tezgâh aracılığıyla standart tek modlu fiberlerden, 200/230 μm öz ve kılıf çapına sahip çok modlu fiberlere kadar geniş bir aralıkta fiber türü inceltilebilmektedir.

Literatürde sunulan elektrik ark-deşarj tekniğini kullanan fiber inceltme düzenekleri, genellikle karşılıklı yerleştirilmiş iki elektrot arasında oluşan ark plazmasını kullanmaktadır. Telekomünikasyon sektöründe kullanılan standart fiberlerin kılıf çapı 125 μm 'dir ve bu tür fiberleri inceltemek için iki elektrotlu bir ark-deşarj düzenegi genellikle yeterli olmaktadır. Ancak 125 μm 'den büyük kılıf çapına sahip çok modlu fiberleri inceltemek için yüksek ark plazma hacmine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle karşılıklı yerleştirilmiş iki elektrot yerine, çapraz yerleştirilmiş dört elektrot kullanılarak fiberin tüm çevresini homojen bir şekilde ısıtabilecek bir plazma hacmi elde edilmiştir. Elektrotlar için uçları sivriltilmiş tungsten teli kullanılmıştır. Elektrotların yerleşimini gösteren fiber inceltme düzeneginin bir görseli şekil 5.1'de sunulmuştur.

Üretim tezgahının bazı mekanik parçaları 3D yazıcı ve lazerle oyma/kesme makinesi kullanılarak üretilmiştir. Fiberin yerleştirileceği platform bir pleksiglas malzemedir. Bu platform bir lazer oyma/kesme makinası kullanılarak işlenmiştir ve üzerine kullanılacak fiber türüne bağlı olarak uygun genişliğe sahip bir kanal açılmıştır. Çekme ve besleme motorlarının, fiber kanallı platformun, fiber tutucuların ve diğer bazı malzemelerin platforma sabitlenmesi için tasarlanan mekanik parçalar 3D yazıcıyla üretilmiştir. Tüm mekanik parçaların bulunduğu üretim tezgâhı görseli şekil 5.2'de gösterilmiştir.



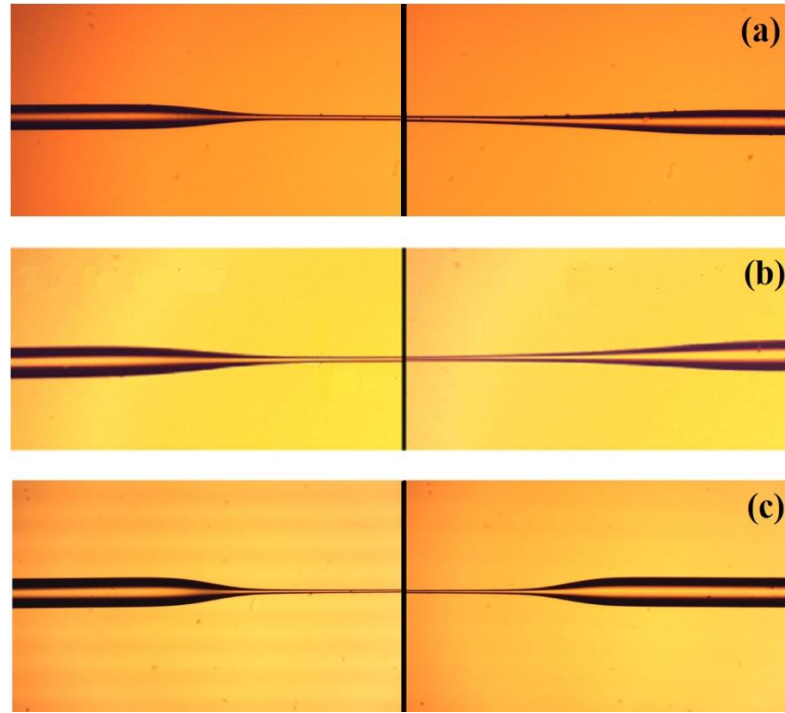
Şekil 5.1 Elektrotların konumlandırılması ile oluşan geniş ark plazma hacmi



Şekil 5.2 Konik fiber sensör üretim tezgâhı

İnceltme işlemi sırasında, optik fiber iki tutucu arasında sabitlenmekte ve elektrik ark-deşarjının başlamasıyla ısıtılmaktadır. Bu işlem esnasında, fiber bir uçtan çekme motoru yardımıyla yavaşça çekilirken, ark uçlarının yer aldığı hareketli platform ters yönde daha düşük hız ve ivme ile ilerletilerek besleme sağlanmaktadır. Süreç boyunca, motorların hız ve ivme değerleri, ısınma süresi ve ark gücü gibi parametreler optimize edilerek, optik fiberin kopmadan hedeflenen geometrik özelliklere sahip bir konik yapı oluşturacak şekilde inceltmesi sağlanmıştır. Şekil 5.3'te, kılıf ve öz çapları sırasıyla 62.5/125 μm olan bir dereceli indisli fiber ile 105/125 ve 200/230 μm çaplarındaki iki basamak indisli

çok modlu fiberin inceltme işlemi sonrası konik geçiş bölgesi ve bel bölgesi çap değişimlerini gösteren mikroskop görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntülerde, fiberlerin kılıf çaplarının geçiş bölgesinde simetrik olarak azalarak konik bir biçim aldığı ve bel bölgesinin oldukça küçük değerlere ($10\text{-}15\text{ }\mu\text{m}$) kadar inceltildiği gözlenmiştir. Yapılan fiber inceltme çalışmalarında, fiberin kopmadan inceltilmesini sağlayabilmek için pek çok denemeler yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda sensör bel çapının $10\text{ }\mu\text{m}$ 'ye kadar düşürüldüğü ve bel uzunluğunu 5 cm 'ye kadar uzatıldığı birçok fiber sensör üretmek mümkün olmuştur.



Şekil 5.3 Farklı bel çaplarında sahip fiberlerin inceltme sonrası mikroskop görüntüleri, (a) $62.5/125\text{ }\mu\text{m}$ dereceli indisli fiber, (b) $125/105\text{ }\mu\text{m}$ basamak indisli fiber, (c) $230/200\text{ }\mu\text{m}$ basamak indisli fiber

5.2 Sensör Ölçüm Sistemlerinin Kurulması

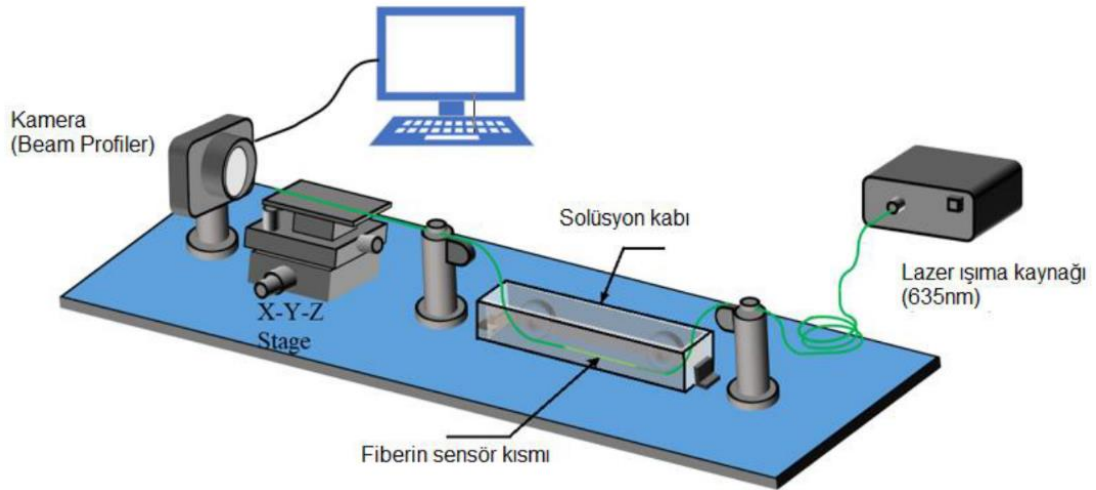
KFS üretim aşaması başarıyla tamamlandıktan sonra, üç farklı fiziksel büyüklüğü ölçebilmek amacıyla çeşitli test düzenekleri kurulmuştur. Bunlardan ilki solüsyonların kırılma indisini ölçmek için geliştirilen kırılma indisi ölçüm düzeneğidir. İkincisi gerilmeyi ölçebilmek için doğrudan fiberin kendisinin gerildiği gerilme ölçüm

düzenegidir. Sonuncusu ise kapalı bir ortamda sıcaklık ölçümü için tasarlanan fiber optik sıcaklık ölçüm düzenegidir.

Üretilen fiber sensörlerin farklı koşullarda test edilmesi amacıyla, fiberin bir ucuna lazer ışığı yönlendirilmiş ve diğer uçtan yayılan modların oluşturduğu benek desenleri kamera ile görüntülenmiştir. Çalışmalar 635 nm ve 1550 nm’de iki farklı dalga boyunda ışıma yapan lazer kanyakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fiber optik sensörlerin ve düzenegi oluşturan tüm mekanik parçaların optiksel ölçümlerde titreşimlere yüksek duyarlılık göstermesi nedeniyle, sistemin tüm parçaları titreşimsiz bir optik masa üzerine sabitlenmiştir.

5.2.1 Kırılma indisi ölçüm düzeneginin kurulması

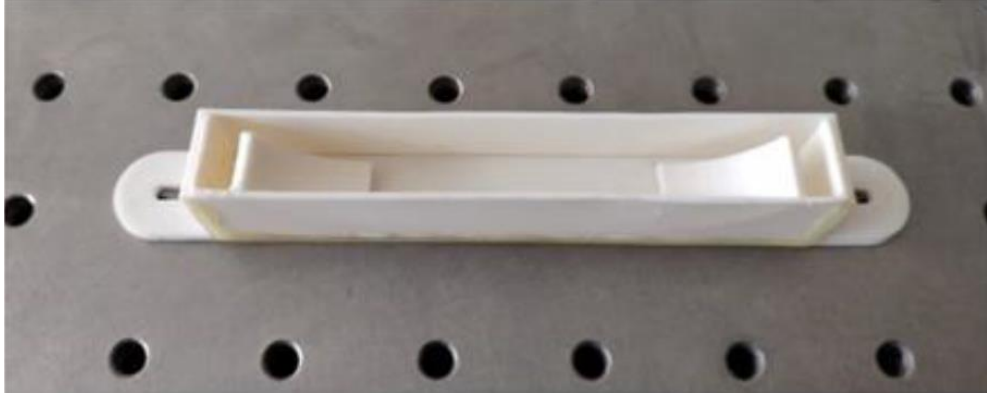
Konik biçimde şekillendirilen fiberlerin sensör olarak test edileceği ilk sistem kurulumu, kırılma indisi ölçümü için gerçekleştirilmiştir. Sensörün kırılma indisi değişimine duyarlılığını belirlemek için tasarlanan ölçüm sistemi şekil 5.4’te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Kırılma indisi ölçüm düzeneginin gösterimi

Sensörün konik bölgesinin kırılmaya karşı mukavemeti oldukça düşüktür. Ayrıca ölçümün sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için bu kısmın ölçüm yapılacak solüsyon içerisine dikkatlice daldırılması, yatay bir düzlemde yerleştirilmesi ve her iki ucundan sabitlenmesi gereklidir. Bu amaçla şekil 5.5’te gösterilen sensörün konik kısmının

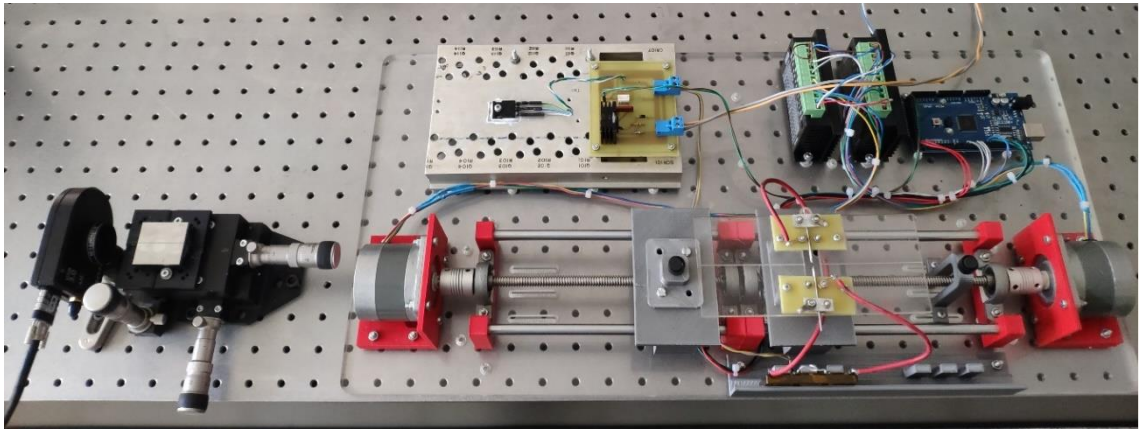
yerleştirilebileceği bir solüsyon kabı 3D yazıcı ile üretilmiş ve titreşimsiz optik masaya sabitlenmiştir. Bu tasarım, fiber sensörün solüsyona kolayca daldırılıp çıkarılabilmesini sağlamıştır. Solüsyonun kırılma indisi, mikropipet yardımıyla bir sıvıya belirli bir konsantrasyonda ikinci bir sıvının eklenmesiyle kontrol edilmiştir.



Şekil 5.5 Kırılma indisi değişimi için kullanılan solüsyon kabı

5.2.2 Gerilme ölçüm düzeneğinin kurulması

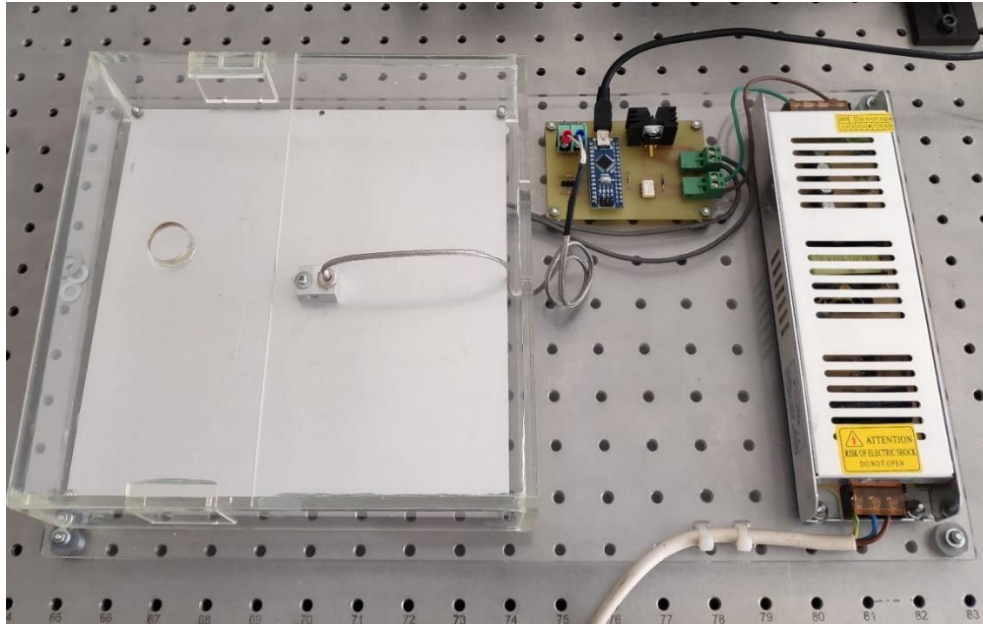
Fiber sensörün gerilme duyarlılığını araştırmak amacıyla, KFS üretim tezgâhını kullanarak bir ölçüm düzeneği geliştirilmiştir. Sensörün bir ucu sabitlenerek kamera objektifine odaklanacak şekilde konumlandırılmıştır. Diğer uç, her adımda mikrometre ölçeğinde gerdirilerek gerilme deneyleri yapılmıştır. Kurulan bu sisteme ait gerilme ölçüm düzeneği görseli şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.6 Fiber inceltme düzeneği laboratuvar görüntüsü

5.2.3 Sıcaklık ölçüm düzeneğinin kurulması

Fiberoptik sensörle sıcaklık ölçümleri gerçekleştirebilmek için, sensörün ölçüm ortamı içerisine düz ya da U-şeklinde yerleştirilebileceği bir fırın düzeneği tasarlanmıştır. Fırının iç ortam sıcaklığının 20 °C (oda sıcaklığı) ile 150 °C aralığında kontrollü bir şekilde ayarlanması için PID kontrollü bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan fırın düzeneğinin görünümü şekil 5.7’de sunulmuştur.



Şekil 5.7 Fırın düzeneği görüntüsü

5.3 Farklı Fiziksel Büyüklüklerin Benek Deseni Görüntülemeye Ölçümü

Üretilen KFS'nin farklı ölçüm ortamlarında test edilmesi amacıyla, ilgili deney düzenekleri kurulduktan sonra ölçüm testlerine ilişkin deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar sırasında farklı tür ve çaplarda dört farklı fiber kullanılmıştır. Basamak indisli çok modlu fiber olarak öz ve kılıf çapı 105/125 μm olan Nufern-105 ile 200/230 μm çapındaki Newport F-MBB kullanılmıştır. Dereceli indisli çok modlu fiber olarak ise 100/140 μm çapında Newport F-MLD ve 62.5/125 μm çapında Newport F-MFD fiberler kullanılmıştır. Lazer ışın kaynağı olarak, görünür bölge için 635 nm dalga boyunda yayınım yapan Thorlabs LDM635 lazer diyot modülü kullanılmıştır. Kızılötesi bölge için

1550 nm dalga boyunda ışınlam yapan Fiberlast FL-WTLS-C/HP kullanılmıştır. Benek deseni görüntüleri Thorlabs BC106-VIS CCD kamera kullanılarak kaydedilmiştir.

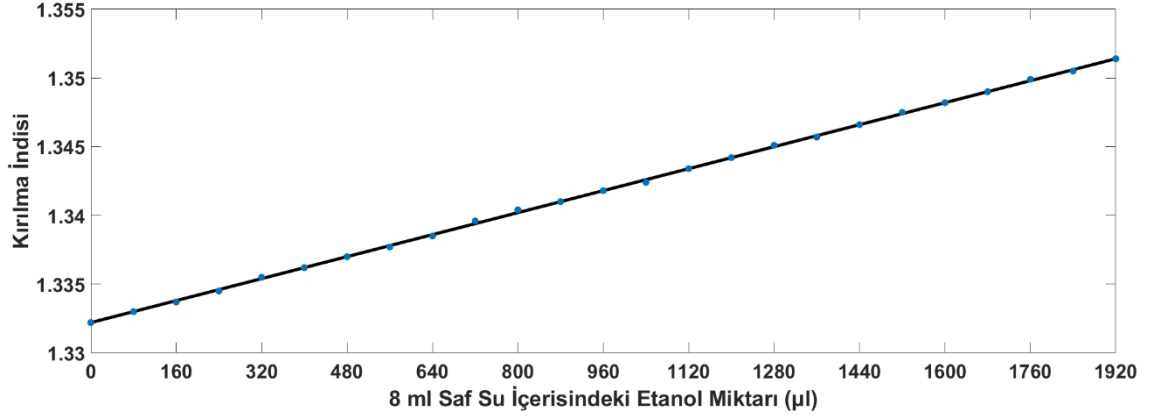
Deneysel çalışmalarda, basamak ya da dereceli indisli farklı türden fiberler kullanarak üretilen sensörlerin kırılma indisi, gerilme ve sıcaklık ölçüm testleri yapılmıştır. Bu aşamada, simülasyon çalışmalarında ele alındığı gibi, sensörün geometrik parametrelerinin ve kullanılan dalga boyunun sensör duyarlılığına etkisi de deneysel olarak araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda ölçümü gerçekleştirebilmek için fiber ucundan kaydedilen benek deseni görüntülerinin öncelikle korelasyon analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde, sensörün ölçüm duyarlılığına etki edebilecek ışın dalga boyundan, sensörün geometrik parametreleri ve yerleşimine kadar tüm etkenler detaylıca araştırılmıştır.

5.3.1 Kırılma indisine duyarlılık

Sensörün geniş bir ölçüm aralığında kırılma indisinin değişimine duyarlılığını test edebilmek için iki farklı solüsyon hazırlanmıştır. Saf su-etanol karışımı 1.33-1.35 kırılma indis aralığı için, saf su-dimetil sülfoksit (DMSO) karışımı ise 1.35-1.42 kırılma indis aralığı için kullanılmıştır. Bu sayede 1.33-1.42 geniş bir kırılma indis aralığında sensörün kırılma indisi değişimine gösterdiği davranış detaylı bir şekilde incelenmiştir.

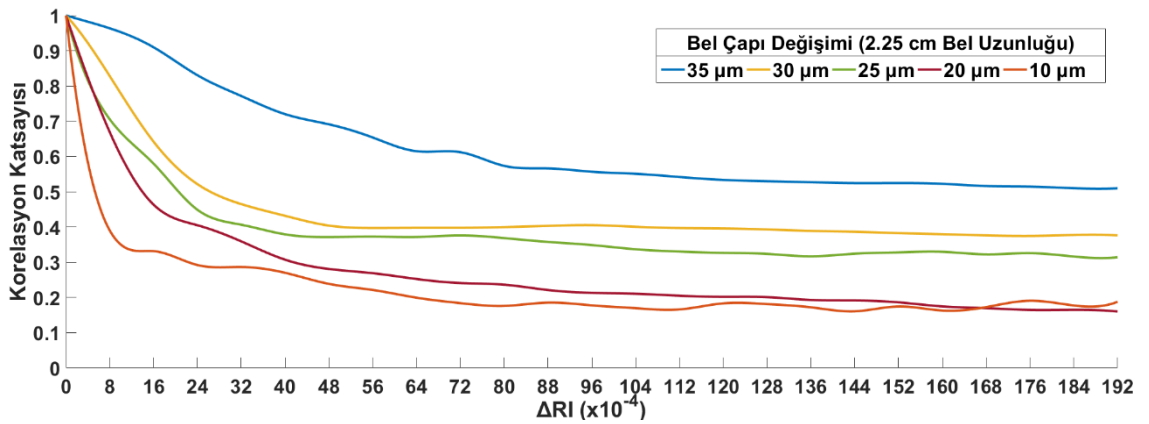
Fiberin algılama bölgesi, tasarlanan solüsyon kabına yerleştirilmiş ve fiber tutucularla birlikte titreşimsiz optik masa üzerine sabitlenmiştir. Daha sonra kırılma indisi 1.3322 olan 8 ml saf su solüsyon kabına eklenmiştir. Saf su eklenmesi sonucu fiber çıkışında oluşan benek deseni görüntüsü CCD kamera ile, korelasyon analizinde referans görüntü olarak kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Kırılma indisi 1.3620 olan 80 µl etanol her adımda mikropipet kullanılarak saf su içerisine eklenmiş ve solüsyonun kırılma indisi değiştirilmiştir. Her etanol ekleme adımında değişen solüsyonun kırılma indisi bir refraktometre (ABBE WYA-2S) kullanılarak kaydedilmiştir. Oluşan saf su-etanol karışımının kırılma indisinin değişim grafiği şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 8 ml saf su içerisine eklenen etanol miktarına bağlı kırılma indisi değişimi

Solüsyonun kırılma indis değeri, her etanol eklenmesinde yukarı yönde yaklaşık 8×10^{-4} değişmiştir. 1.3322–1.3514 kırılma indis aralığında toplam 25 görüntü kaydedilmiştir. Deneyler, farklı bel çaplarına ve uzunluklara sahip her bir KFS için beş kez tekrarlanmıştır. Tüm deneyler 20 °C oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

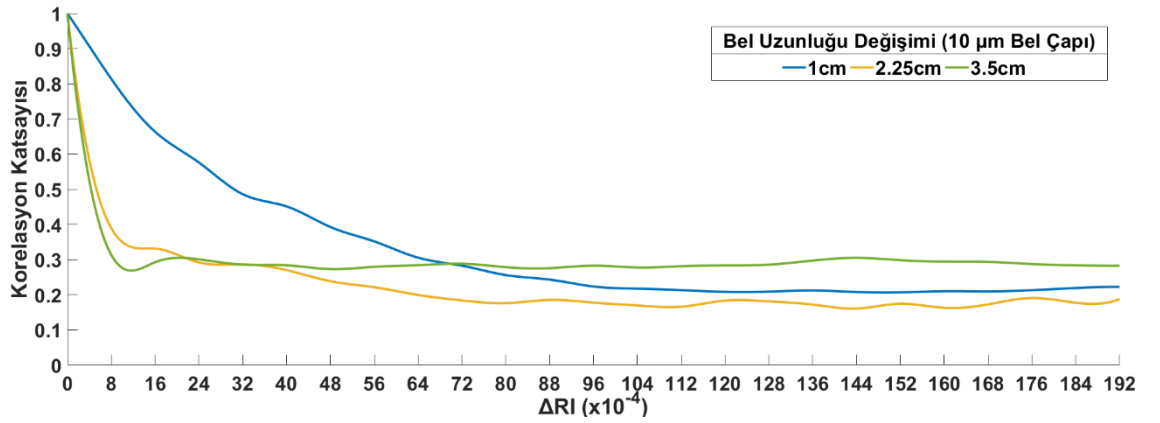
Farklı türdeki konik fiber sensörlerin kırılma indisine olan duyarlılığı deneysel olarak test edilmiş ve elde edilen bulgular, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak tutarlılıkları değerlendirilmiştir. İlk olarak öz ve kılıf çapları 105/125 µm olan Nufern-105 basamak indisli çok modlu fiberi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bel uzunluğu 2.25 cm olan ve bel çapı 10-35 µm arasında değişen sensörlerin 635 nm dalga boyunda kırılma indisi değişimine duyarlılığı test edilmiştir. Ölçüm sonucu kaydedilen benek deseni görüntülerinin analiziyle elde edilen kırılma indisi-korelasyon eğrisi şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9 Bel çapına bağlı korelasyon katsayısının değişimi

Şekil 5.9’da sensörün bel çapı kademeli olarak azaldıkça kırılma indisi değişimine karşı korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. Kırılma indisi değiştikçe korelasyon katsayısı azalmaktadır. Bu azalıştaki eğimin artması, sensörün kırılma indisine daha yüksek duyarlılık gösterdiğine işaret etmektedir. Simülasyon çalışmalarında elde edilen bulgularla tutarlı olarak, bel çapının kademeli olarak azaltılması sensör duyarlılığını artırmaktadır. Şekilden görüleceği üzere 35 μm bel çapına sahip KFS, kırılma indisine en düşük duyarlılığı sergilemiştir. Bel çapı azaldıkça, kırılma indisine olan duyarlılık aşamalı olarak artış göstermiş ve en yüksek duyarlılık 10 μm bel çapındaki KFS’de gözlemlenmiştir. Daha küçük bel çaplarında sensör duyarlılığı artış gösterebilir. Ancak 10 μm ’nin altında incelen bir fiberde iletilen ışığın oldukça zayıf kalmasından dolayı deneysel çalışmalar 10 μm değerinde sonlandırılmıştır.

Deneysel çalışmaların bir sonraki aşamasında konik bölgenin bel uzunluğunun kırılma indisine duyarlılığı araştırılmıştır. Bel çapı 10 μm değerinde sabit tutulmuştur. Bel uzunluğu ise 1, 2.25 ve 3.5 cm olacak şekilde değiştirilmiştir. Elde edilen korelasyon analizi sonuçları şekil 5.10’da sunulmuştur.

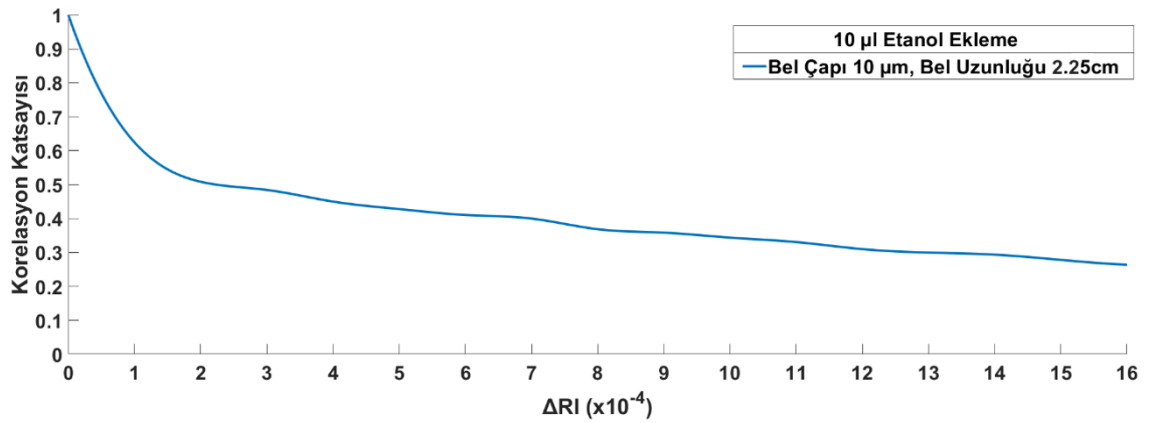


Şekil 5.10 Bel uzunluğuna bağlı korelasyon katsayısının değişimi

Şekil 5.10 incelendiğinde, 1 cm bel uzunluğuna sahip KFS’nin kırılma indisine duyarlılığı düşük kalırken, 2.25 ve 3.5 cm bel uzunluklarındaki KFS’lerde bu duyarlılık nispeten yüksek ve birbirine oldukça yakın sonuç üretmiştir. Simülasyon sonuçlarıyla tutarlı olarak sensör bel uzunluğunun artması kırılma indisi duyarlılığında bir iyileşme sağlamıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, KFS üretim düzeneğinin limitleri içerisinde

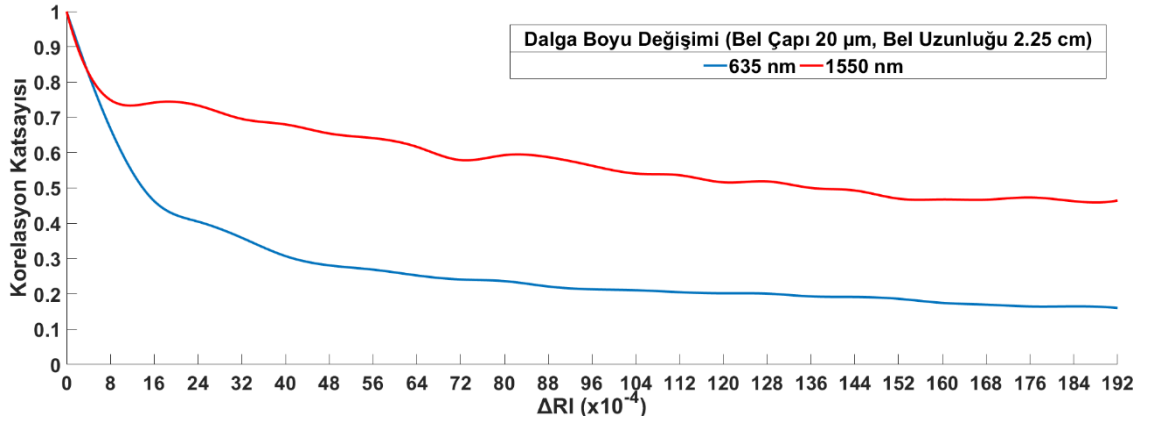
üretimi gerçekleştirilen 2-5 cm bel uzunluklarına sahip sensörlerin, kırılma indisi duyarlılıkları birbirine yakın gözlemlenmiştir.

10 μm bel çapına ve 2.25 cm bel uzunluğuna sahip KFS’de, kırılma indisinin 8×10^{-4} ’lük ilk değişiminde korelasyon katsayısı 1 değerinden yaklaşık 0.3 değerine hızlıca düşmektedir. Korelasyon katsayısındaki bu hızlı düşüş, sensörün bu kırılma indisi aralığında daha yüksek duyarlılık gösterdiğine işaret etmektedir. Bu nedenle deneyler her adımda 80 μl etanol eklemek yerine, 10 μl etanol eklenerek tekrar edilmiştir. Böylece kırılma indisi değişimi her adımda 8×10^{-4} yerine, 1×10^{-4} değiştirilerek daha hassas ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen korelasyon eğrisi şekil 5.11’de sunulmuştur. Bu eğrinin ilgili kırılma indisi aralığında ölçülebilir bir değişim göstermiş olması, KFS’nin 1×10^{-4} ve altındaki kırılma indisi değişimlerini ölçebileceğini göstermektedir.



Şekil 5.11 10 μl Etanol eklenerek elde edilen korelasyon katsayısının değişimi

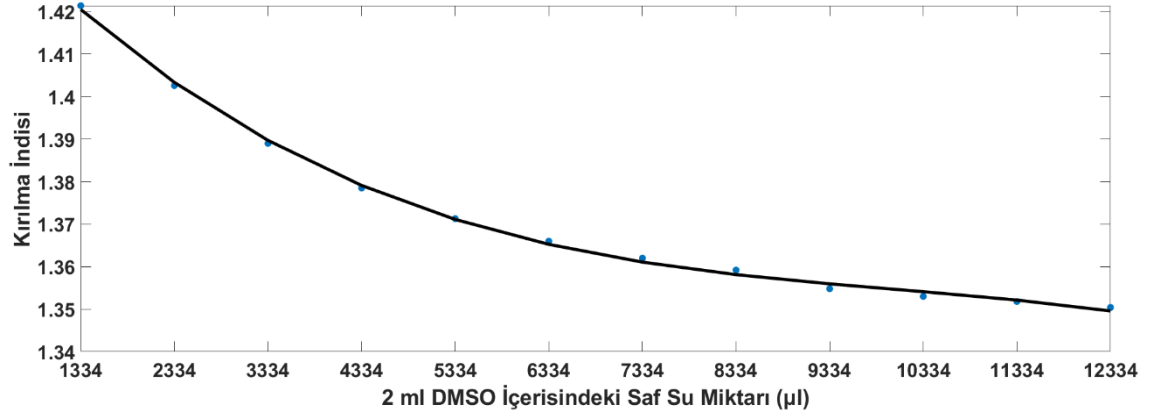
635 nm dalga boyunda yayınım yapan lazer ışına kaynağı yerine 1550 nm dalga boyunda çalışan lazer kullanılarak kızılötesi bölgede deneyler tekrarlanmıştır. Diğer etken parametreler sabit tutularak bu deneylerde dalga boyunun sensör duyarlılığına etkisi araştırılmıştır. Şekil 5.12’de bel çapı 20 μm ve bel uzunluğu 2.25 cm olan KFS’nin görünür ve kızılötesi bölgedeki performansı karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.12 Işık dalga boyunun sensör duyarlılığına etkisi

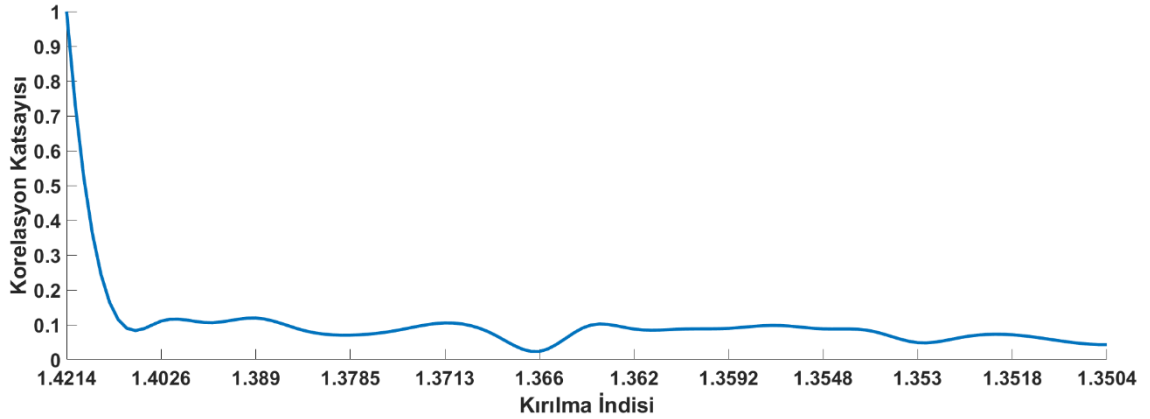
Simülasyon çalışmalarında gözlemlendiği gibi ışık kaynağının dalga boyu arttıkça fiberin V parametresine bağlı olarak kılavuzlanan mod sayısı azalmaktadır. Dalga boyu arttıkça benek deseni görüntülerdeki benek boyutlarının büyümesi ve kamera sensörüne düşen benek sayısının azalması deneysel çalışmalarda da gözlemlenmiştir. Bu durum sensör duyarlılığını azaltıcı yönde etkilemektedir. Görünür bölge ışık kaynağı kullanılarak aydınlatılan KFS'lerin duyarlılıkları sadece kırılma indisi ölçümlerinde değil, gerilme ve sıcaklık ölçümlerinde de daha yüksek performans göstermiştir.

KFS'yi daha geniş bir kırılma indisi aralığında test edebilmek için, 1.33-1.35 kırılma indisi aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ardından kırılma indisinin daha yüksek aralığında (1.35-1.42) Nufern-105 ile deneysel çalışmalar sürdürülmüştür. Fiberin sensör bölgesi tasarlanan solüsyon kabı içerisine yerleştirilmiştir. Oda sıcaklığında kırılma indis değeri 1.4761 olan 2 ml DMSO solüsyon kabı içerisine eklenmiştir. Başlangıç solüsyonunun kırılma indis değerini 1.4214 değerine getirilebilmek için solüsyona 1334 μ l saf su eklenmiştir. Daha sonra her adımda 500 μ l saf su eklenerek kırılma indisi değiştirilmiş ve 1.3504 değerinden sonra saf su ekleme işlemi sonlandırılmıştır. 1.3504-1.4214 kırılma indis değişim aralığı için toplam 12 görüntü kaydedilmiştir. Deneyler beş kez tekrarlanmıştır. Refraktometre ile yapılan ölçümlerde DMSO-Su solüsyonunun eklenen saf su miktarına göre kırılma indisi değişim grafiği şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Saf su-DMSO solüsyonunun kırılma indisi değişim aralığı

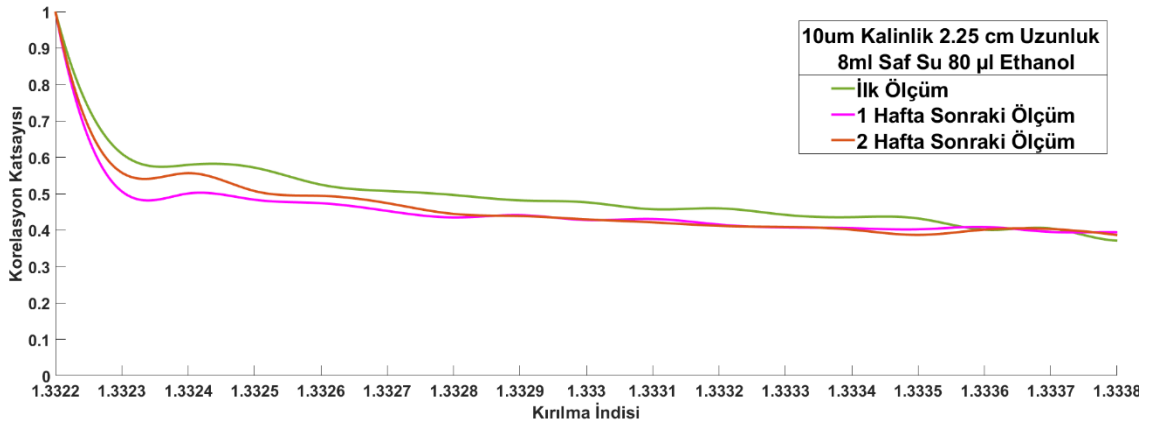
Önceki deneylerde sensör parametrelerinin, sensör duyarlılığına etkileri belirlendiği için bu aşamada 10 µm bel çapına ve 2.25 cm bel uzunluğuna sahip KFS kullanılması uygun görülmüştür. Hazırlanan yeni solüsyonda bu KFS'nin kırılma indisi ölçümü testleri yapılmış ve elde edilen kırılma indisi-korelasyon eğrisi şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14 Saf su-DMSO solüsyonu için kırılma indisi-korelasyon katsayısı değişimi

Şekil 5.14 incelendiğinde ilk kırılma indisi değişiminde bel çapı 10 µm ve bel uzunluğu 2.25 cm olan KFS için ΔCC yaklaşık olarak 0.1 hesaplanmıştır. Bu durum, yeterince küçük bel çapına sahip fiber sensörlerin saf su-DMSO solüsyonuna daha az saf su eklenmesiyle 6×10^{-4} ΔRI 'dan daha küçük kırılma indisi değişikliklerini ölçme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle solüsyona 10 µl ve 5 µl saf su eklenerek deneyler tekrarlanmış ve sırasıyla 1.4214-1.4203 ile 1.4214-1.4211 kırılma indisi aralıklarında sensörün davranışı araştırılmıştır. Yapılan ölçüm deneylerinde KFS'nin 1.34×10^{-5} 'e kadar kırılma indisi değişikliklerine duyarlı olduğu tespit edilmiştir.

Kırılma indisi deneylerinde son olarak konik fiber sensörlerin zaman içerisinde ölçüm performansını test edebilmek amacıyla aynı sensörün farklı zamanlarda gerçekleştirilen kırılma indisi ölçüm deneylerinde korelasyon eğrisinin değişimi şekil 5.15’te verilmiştir. İlk ölçümün üzerinden bir ve iki hafta geçtikten sonra kırılma indisi deneyleri tekrarlanmıştır. Grafik incelendiğinde sensör üretiminin üzerinden iki hafta geçmiş olmasına rağmen elde edilen korelasyon eğrileri birbirleriyle yakın bir karakteristik göstermektedir. Bu sonuç KFS’lerin uygun saklama koşulları altında kararlı çalışabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.15 Konik fiber sensörün zaman içerisinde ölçüm performansının değişimi

5.3.2 Gerilmeye duyarlılık

KFS'nin gerilme duyarlılığı, fiberdeki boylamsal uzamanın benek desenli görüntü üzerindeki etkisi analiz edilerek araştırılmıştır. Bir ucundan sabitlenen optik fiber, diğer uçtan bir motor ile mikrometre adımlarla çekilmesiyle fiberde boylamsal uzama meydana gelmektedir. Çekme yönünde oluşan gerilme (ε), fiberin birim uzunluk başına boylamsal uzunluğundaki değişim ile eşitlik 5.1’de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.1)$$

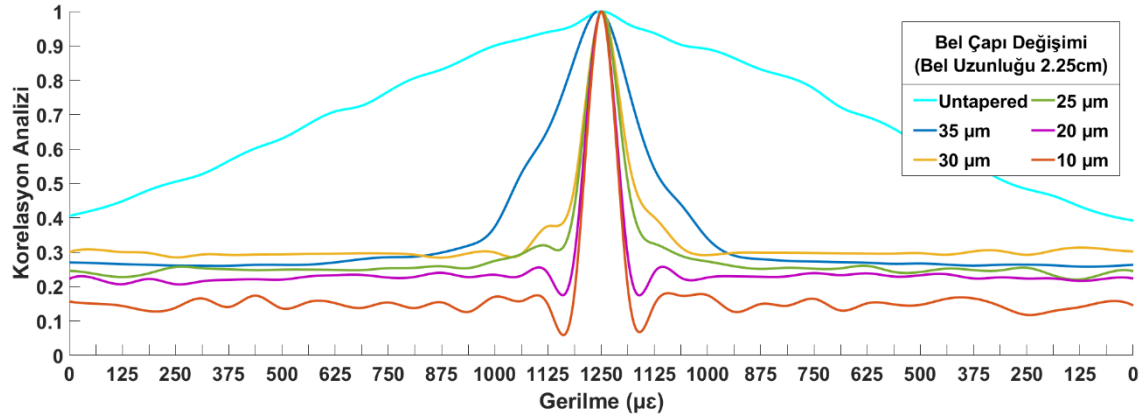
Eşitlikte fiberin ilk uzunluğu L ve uygulanan gerilmeden dolayı fiber uzunluğundaki değişim ΔL ile gösterilmiştir. Elastisite modülü (Young's modülü), gerilme ve baskıya maruz kalan bir malzemenin sertliğini ya da esnekliğini karakterize eden önemli bir parametredir. Optik fiberlerin kalıcı deformasyona uğramadan esneyebilme kabiliyeti, nanometre ölçeğindeki malzeme deformasyonun ölçülebilmesine olanak sağlar.

Konik optik fiberlerde, kılavuzlama koşulu değiştikçe, sensör bölgesinin geometrisi optik modların genliğini ve fazını önemli ölçüde etkiler. Sensöre uygulanan gerilme sonucu, konik fiberdeki etkin kırılma indisi değişir ve bu durum kılavuzlanan modlar arasındaki faz farkının değişmesine neden olur (Tian vd. 2009). Bu değişiklik, benek deseni görüntülerinde değişime yol açar.

Sensörlerin gerilme değişimine duyarlılığı KFS üretim tezgahı kullanılarak araştırılmıştır. Üretim tezgahına yerleştirilen sensör 20 °C oda sıcaklığında, fiberin bir ucuna 2 g ağırlık asılmasıyla sabitlenmiştir. Böylece deney başlangıç koşulları, her deney için sabit tutulmuş ve aynı zamanda fiberin elastikiyet sınırları içinde ölçüm yapılabilirliği test edilmiş ve doğrulanmıştır. 20 cm aralıklarla yerleştirilmiş fiber tutucular arasına optik fiberin sensör bölgesi sabitlenmiştir. Her gerilme adımında hareketli fiber tutucunun 10 motor adımı (12.5 μm ya da 62.5 μe 'e eşdeğer) çekilmesiyle sensör bölgesine gerilmeler uygulanmıştır. Boyuna gerilme 1250 μe değerine ulaştığında, adım aralıkları sabit tutulan hareketli fiber tutucu ters yönde hareket ettirilmiştir. Fiber tutucu başlangıç pozisyonuna geri döndüğünde deney sonlandırılmıştır. Bu prosedür, üretilen her sensör için beş kez tekrarlanmıştır. Her deneyde 41 benek deseni görüntüsü kaydedilmiştir. Korelasyon analizi için kullanılacak referans görüntüsü olarak, maksimum gerilme değerinde (1250 μe) oluşan görüntü seçilmiştir.

Sensörün bel çapı ya da uzunluğu arttıkça bir ölçüm noktası için hesaplanan korelasyon değişiminin (ΔCC) arttığı gözlemlenir. Dekorelasyon oranını $\Delta\text{CC}/\Delta\epsilon$ olarak tanımlanabilir. KFS'nin geometrik yapısının, sensör gerilme duyarlılığı üzerindeki etkisini araştırmak için öncelikle sensör bel uzunluğunu 2.25 cm değerinde sabit tutarak bel çapı 10-35 μm aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca fiberi herhangi bir deformasyona uğratmadan (inceltme işlemi yapmadan) gerilme deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

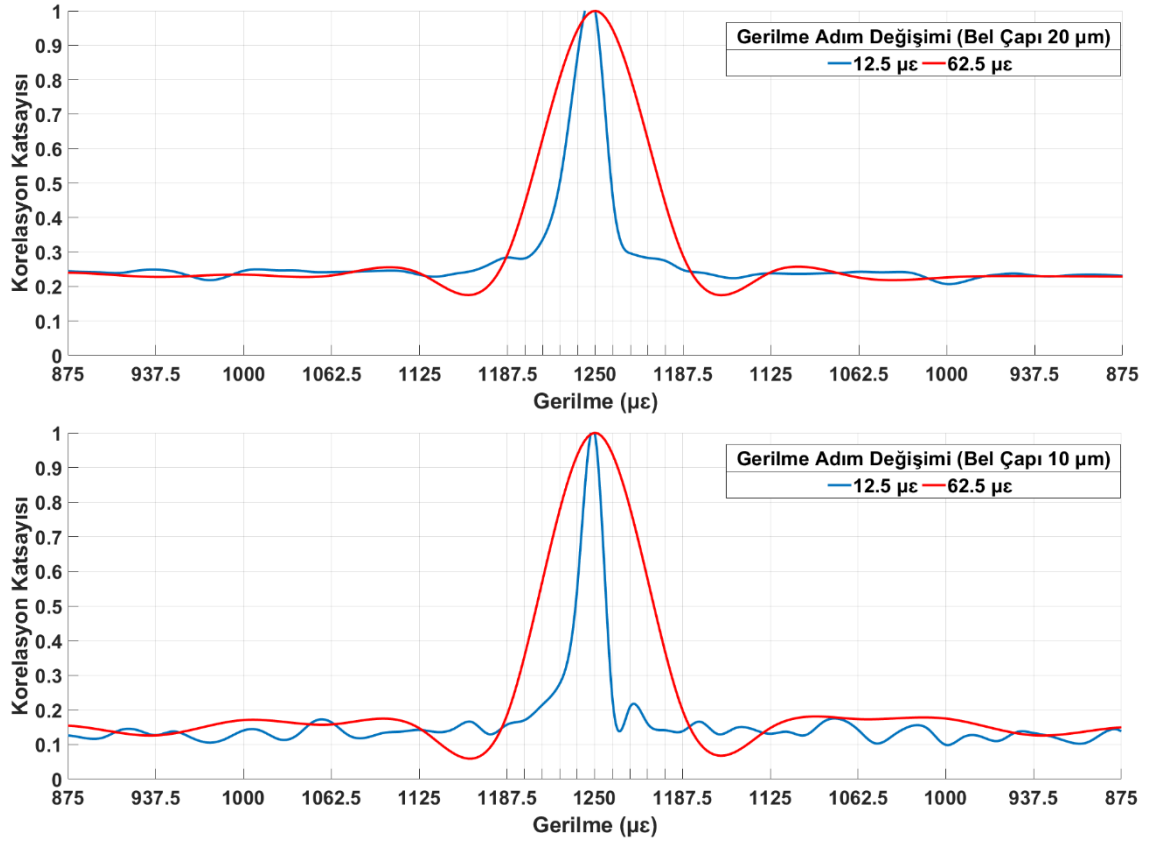
Böylece inceltilmemiş ve incelmiş fiberin gerilme sensöründeki performansı araştırılmıştır. Elde edilen korelasyon analizi sonuçları şekil 5.16’da sunulmuştur.



Şekil 5.16 Gerilme ölçümlerinde bel çapına bağlı korelasyon katsayısının değişimi

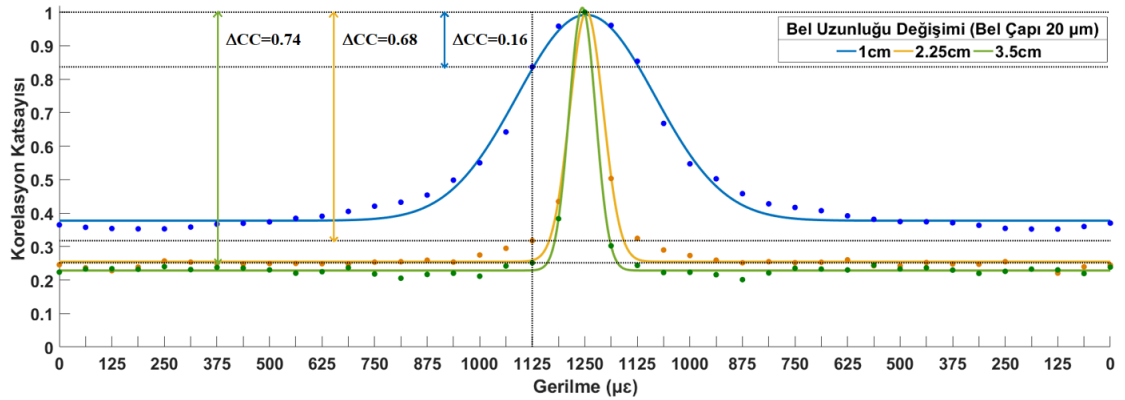
Bel çapı değiştikçe sensör bölgesinde kılavuzlanma koşulları değişir. Bel çapı kademeli olarak azaldıkça, konik bölgede bulunan yüksek dereceli modlar, dış ortama nüfuz eder ve öz-kılıf arayüzünde zayıflar. Şekil 5.16’da görüleceği üzere, bel çapı azaldıkça dekorelasyon oranı artar ve bu da sensör duyarlılığında artış sağlar. Örneğin, konik olmayan bir fiber için dekorelasyon oranı yaklaşık olarak 0.48 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, bel çapı 35 µm ve 10 µm olan sensörler için sırasıyla yaklaşık 1.06 ve 6.80 olarak hesaplanmıştır.

62.5 µε gerilme adımlarıyla yapılan ölçümlerde, bel çapı 20 µm olan fiber için ΔCC yaklaşık olarak 0.7 hesaplanmıştır. Bu değer, bel çapı 10 µm olan sensör için yaklaşık olarak 0.8’dir. Bu durum, yeterince küçük bel çapına sahip fiber sensörlerin 62.5 µε’den daha küçük gerilme değişikliklerini ölçme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle deneyler 10 µm ve 20 µm bel çapları için tekrar edilerek, sensöre 12.5 µε’ya karşılık gelen 2 motor adımlık gerilme artışları uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 5.17’de sunulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere sensörün 12.5 µε değerine kadar küçük gerilme değişikliklerine duyarlı olduğu anlaşılmaktadır. Korelasyon analizi göstermiştir ki, kırılma indisi deneylerinde olduğu gibi bel çapının azalması sensör duyarlılığını artırmaktadır.



Şekil 5.17 Farklı sensör bel çapları için gerilmeye bağlı korelasyon katsayısının değişimi
(a) 20 µm bel çapı, (b) 10 µm bel çapı

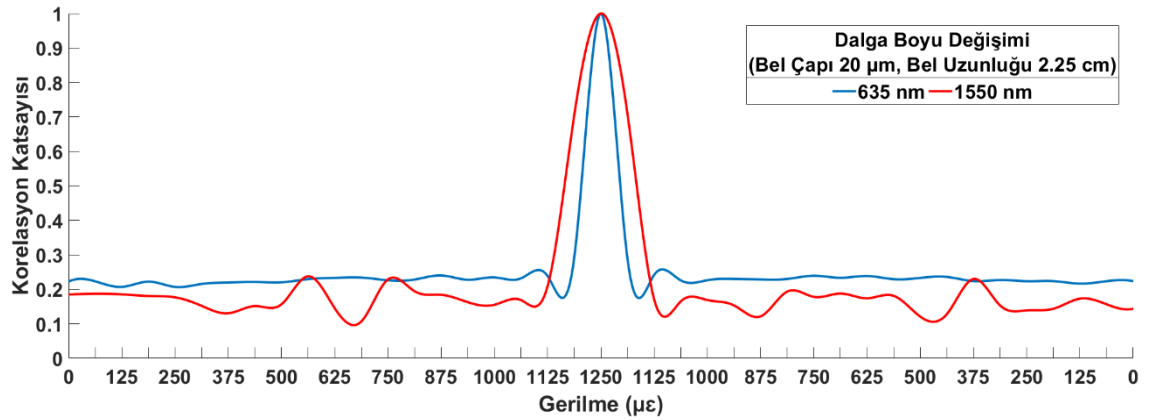
Bel çapı değişiminin sensör duyarlılığına etkisinin belirlenmesinin ardından, bel uzunluğunun etkisini araştırmak amacıyla bel çapı 20 µm değerinde sabit tutulmuş ve KFS'nin bel uzunluğu 1-3.5 cm arasında değiştirilerek gerilme deneyleri tekrar edilmiştir. Elde edilen korelasyon analizi sonuçları şekil 5.18'de sunulmuştur.



Şekil 5.18 Farklı bel uzunlukları için gerilmeye bağlı korelasyon katsayısının değişimi

Şekil 5.18 incelendiğinde, sensörün bel uzunluğu arttıkça korelasyon değişiminin arttığı ve dolayısıyla duyarlılığın arttığı gözlemlenmektedir. Örneğin 1125 $\mu\epsilon$ gerilme değeri için 1 cm bel uzunluğuna sahip KFS'nin korelasyon değişimi 0.16 olarak hesaplanırken, bu değer 2.25 ve 3.5 cm için sırasıyla 0.68 ve 0.74 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç sensörün bel uzunluğunun artmasıyla gerilmeye karşı duyarlılığın arttığını göstermektedir.

Deneyisel çalışmalar ve benek deseni görüntülerinin korelasyon analizi göstermiştir ki; bel uzunluğunun artması ve bel çapının azalmasıyla sensörün duyarlılığı artmaktadır. Devam eden çalışmalarda lazer ışın kaynağı dalga boyunun sensör duyarlılığına etkisini araştırmak için dalga boyu 635 nm'den 1550 nm'ye kaydırılarak, 20 μm bel çapına ve 2.25 cm bel uzunluğuna sahip sensör kullanılarak duyarlılık test edilmiştir. Elde edilen karşılaştırmalı sonuç grafiği şekil 5.19'da gösterilmiştir. Hem simülasyon hem de kırılma indisi deneyisel sonuçlarında elde edilen bulgulara benzer şekilde, gerilme deneylerinde de dalga boyunun azalmasıyla sensör duyarlılığının arttığı gözlemlenmiştir.

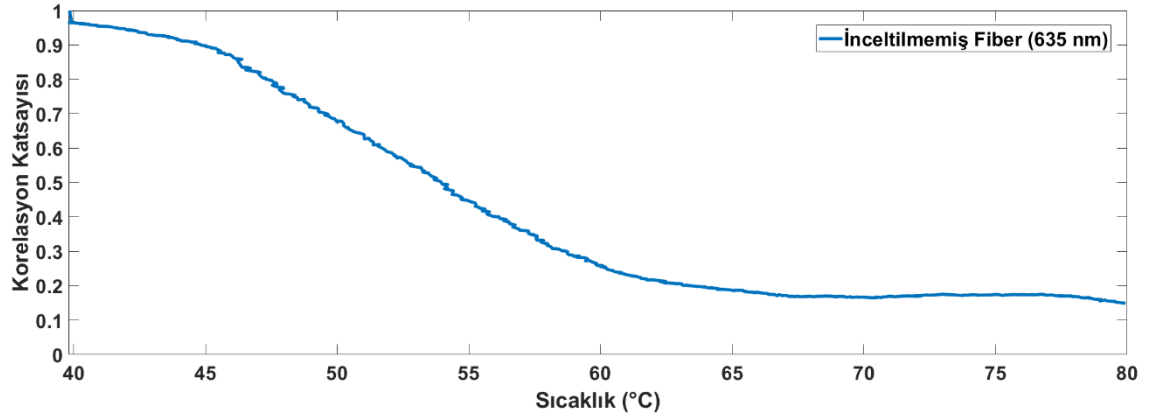


Şekil 5.19 Gerilme ölçümlerinde dalga boyunun korelasyon katsayısına etkisi

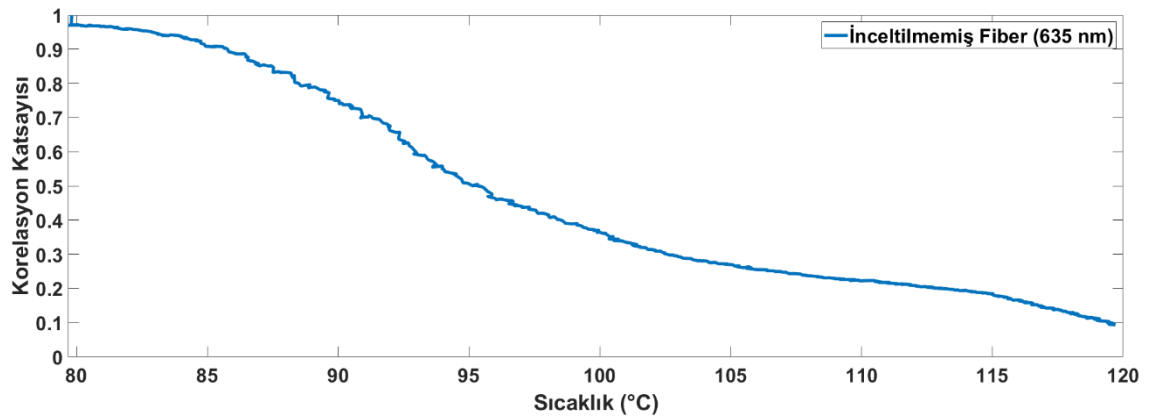
5.3.3 Sıcaklığa duyarlılık

Sıcaklık algılama için yürütülen deneyisel çalışmalarda iki farklı sensör tasarımı kullanılmıştır. İlk sensör tasarımında, fibere herhangi bir inceltme işlemi uygulanmadan sensörün sıcaklık duyarlılığı araştırılmıştır. İkinci sensörde ise fiberin bel çapı 10 μm ve bel uzunluğu 2.25 cm olacak şekilde inceltilmesiyle üretilen KFS'nin sıcaklık duyarlılığı

araştırılmıştır. Çalışmalar 635 nm dalga boyunda, 40-80 °C ve 80-120 °C ölçüm aralıklarında iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İnceltilmemiş fiber sensör için 40-80 °C ölçüm aralığına ait korelasyon analizi grafiği şekil 5.20’de, 80-120 °C aralığına ilişkin korelasyon analiz grafiği ise şekil 5.21’de sunulmuştur.



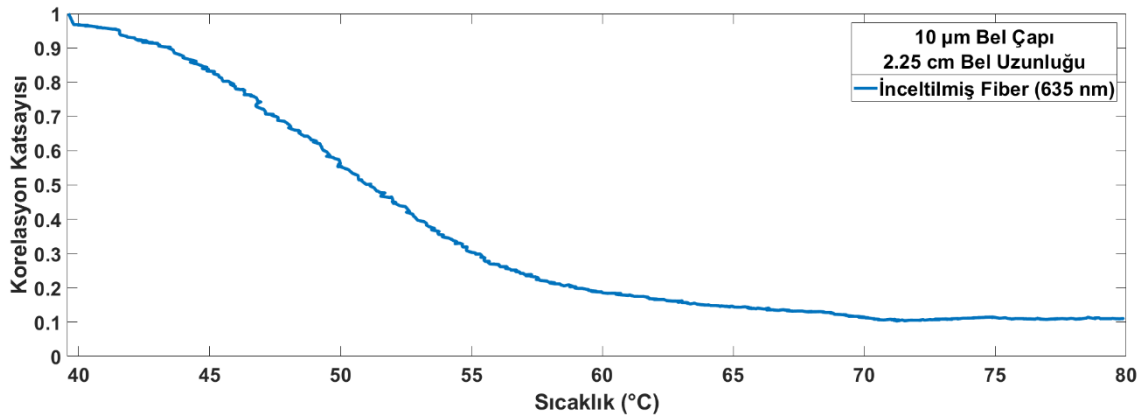
Şekil 5.20 İnceltilmemiş fiberin 635 nm dalga boyunda 40-80 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi



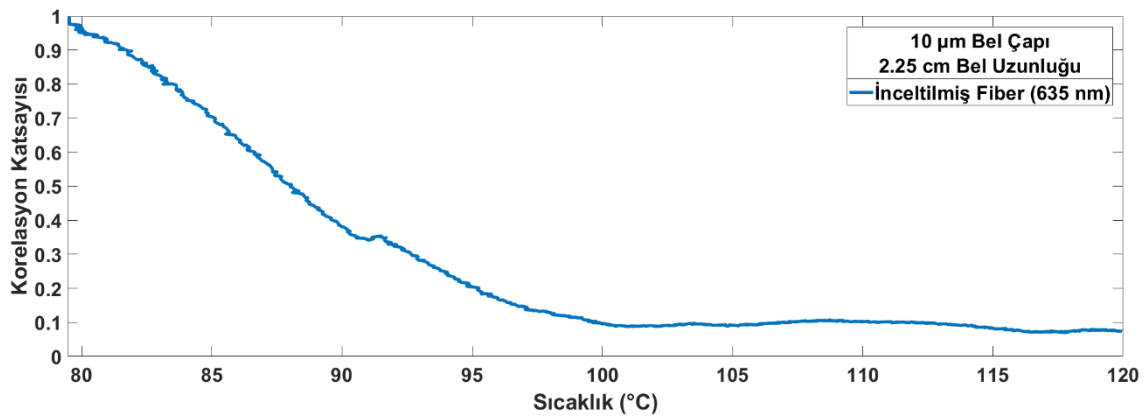
Şekil 5.21 İnceltilmemiş fiberin 635 nm dalga boyunda 80-120 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi

Şekil 5.20 ve 5.21 incelendiğinde iki farklı ölçüm aralığında, referans görüntünün etiketlendiği 40 °C ve 80 °C’den itibaren sıcaklık arttıkça korelasyon katsayısının düşüyor olması inceltilmemiş fiberin sıcaklık değişimlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. 40 °C’de etiketlenen referans görüntü ile 20 °C sıcaklık artışı sonucu 60 °C’de kaydedilen benek deseni görüntü arasındaki korelasyon katsayısı yaklaşık 0.75’tir. Benzer şekilde 80 °C’de etiketlenen referans görüntü ile 20 °C sıcaklık artışı sonucu 100 °C’de kaydedilen benek deseni görüntü arasındaki korelasyon katsayısı 0.63 olarak

hesaplanmıştır. Bu sonuç her iki ölçüm aralığında da korelasyon katsayısının düşüş karakteristiğinin benzer davranışta olduğu göstermektedir. Bu davranışın fibere konik yapı verilmesiyle değişip değişmeyeceğini anlamak ve konik yapıli fiber sensörlerin sıcaklık duyarlılığını araştırmak için fiberi 10 μm bel çapı ve 2.25 cm bel uzunluğu olacak şekilde incelterek 40-80 $^{\circ}\text{C}$ ve 80-120 $^{\circ}\text{C}$ ölçüm aralığında deneyler tekrarlanmıştır. Elde edilen korelasyon değışim eğrileri sırasıyla şekil 5.22 ve şekil 5.23'te verilmiştir.



Şekil 5.22 İnceltilmiş fiberin 635 nm dalga boyunda 40-80 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değışimi

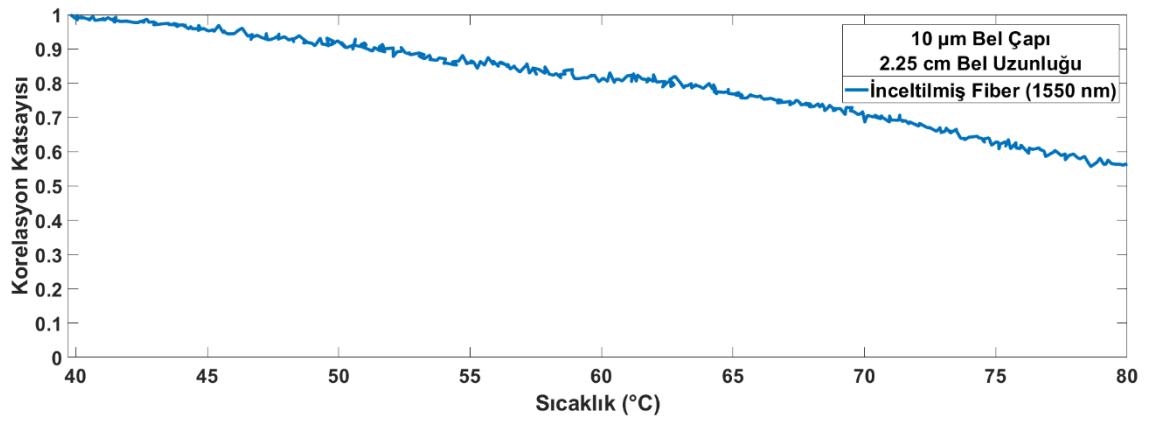


Şekil 5.23 İnceltilmiş fiberin 635 nm dalga boyunda 80-120 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değışimi

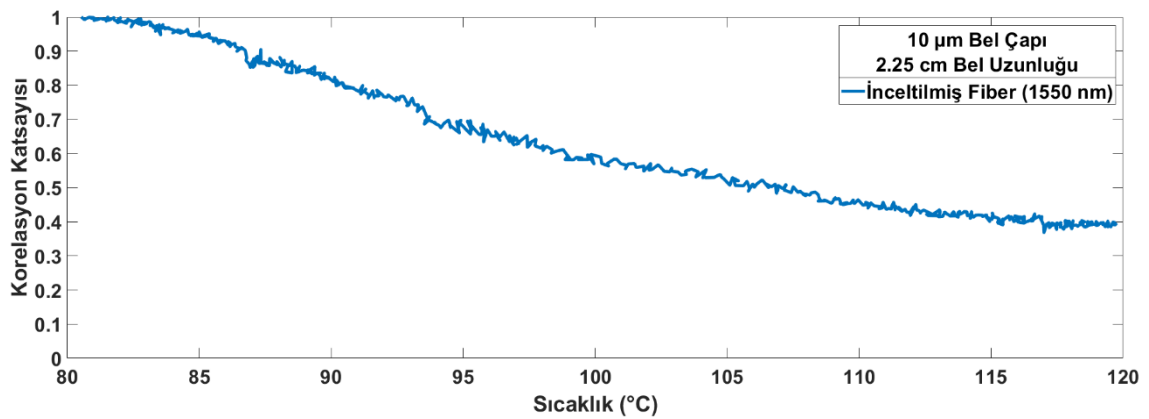
Şekil 5.22 incelendiğinde konik yapı verilmiş inceltilmiş fiberde 40 $^{\circ}\text{C}$ 'de etiketlenen referans görüntü ile 20 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık artışı sonucu 60 $^{\circ}\text{C}$ 'de kaydedilen benek deseni görüntü arasındaki korelasyon katsayısı yaklaşık 0.82 olarak hesaplanırken, şekil 5.23'te 80 $^{\circ}\text{C}$ 'de etiketlenen referans görüntü ile 20 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık artışı sonucu 100 $^{\circ}\text{C}$ 'de kaydedilen benek deseni görüntü arasındaki korelasyon katsayısı yaklaşık 0.90 olarak

hesaplanmıştır. Şekil 5.20 ve 21, şekil 5.22 ve 23 ile karşılaştırıldığında aynı sıcaklık ölçüm aralıklarında KFS, inceltilmemiş fibere kıyasla sıcaklık değişimine daha yüksek bir duyarlılık göstermektedir. Bu sonuç KFS'ler ile sıcaklık ölçümlerinde duyarlılığın artırılabilceğini göstermektedir.

KFS'nin 1550 nm dalga boyundaki sıcaklık duyarlılığını araştırmak için lazer dalga boyu 635 nm'den 1550 nm dalga boyuna kaydırılmış ve deneyler aynı sıcaklık aralıklarında tekrar edilerek korelasyon-sıcaklık değişim grafikleri elde edilmiştir. 40-80 °C ve 80-120 °C ölçüm aralıkları için grafikler sırasıyla şekil 5.24 ve şekil 5.25'te sunulmuştur.



Şekil 5.24 İnceltilmiş fiberin 1550 nm dalga boyunda 40-80 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi



Şekil 5.25 İnceltilmiş fiberin 1550 nm dalga boyunda 80-120 °C sıcaklık aralığında korelasyon katsayısının değişimi

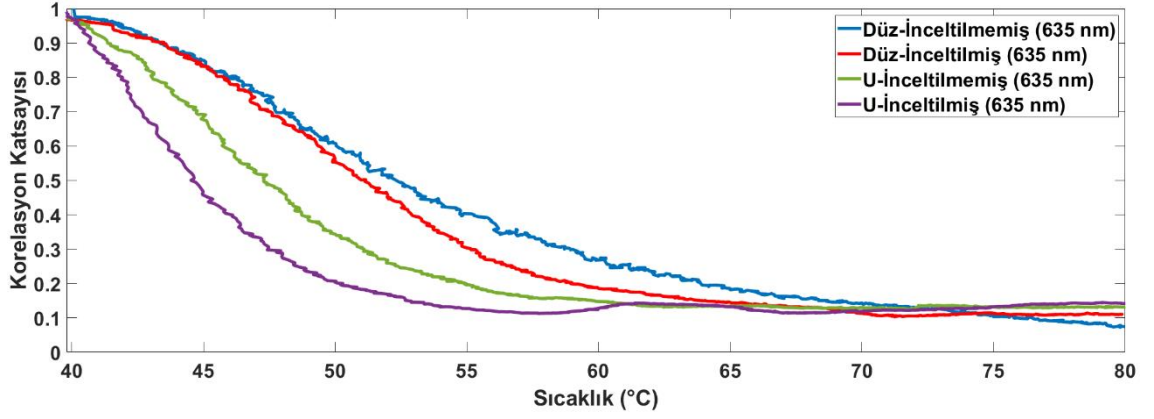
Şekil 5.24'te görülen korelasyon değişim grafiği fiber sensörün 40-80 °C sıcaklık aralığında ölçüm duyarlılığını göstermektedir. 40 °C'de etiketlenen referans görüntüden

itibaren 20 °C sıcaklık artışı ile korelasyon katsayısında yaklaşık 0.19'luk bir düşüş görülmektedir. Şekil 5.25'te verilen 80-120 °C sıcaklık aralığı için korelasyon değişim grafiğinde referans görüntüden itibaren ilk 20 °C sıcaklık artışında korelasyon katsayısı yaklaşık 0.41'lik bir düşüş gözlenmiştir. 1550 nm dalga boyunda yapılan sıcaklık testlerinde 635 nm'de olduğu gibi yüksek sıcaklık değerlerinde korelasyon katsayısının daha fazla düşüş göstermesi, bu aralıklar için sensörün sıcaklığa daha yüksek duyarlılıkta olduğuna işaret eder. Tüm sıcaklık deney sonuçları incelendiğinde fiberin konik biçimde inceltilmesi, sensörün sıcaklık değişimine karşı duyarlılığını artırmaktadır. Farklı sıcaklık ölçüm aralıklarında 20 °C sıcaklık artışında inceltilmemiş fiber ve KFS'ler için elde edilen korelasyon katsayısı değişimleri çizelge 5.1'de sunulmuştur.

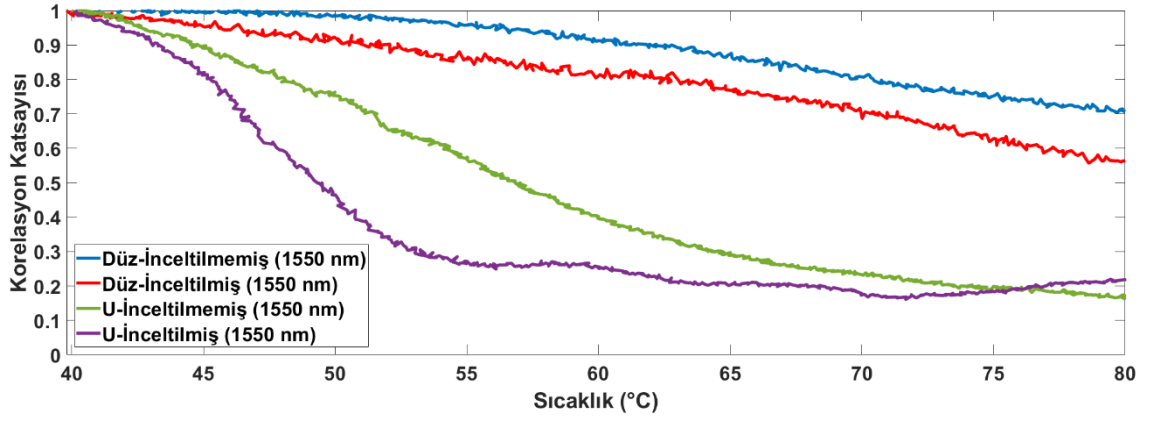
Çizelge 5.1 20 °C sıcaklık artışında inceltilmemiş fiber ve KFS'ler için elde edilen korelasyon katsayısı değişimleri

	Dalga Boyu	Korelasyon Katsayısı Değişimi	
		40-80 °C	80-120 °C
İnceltilmemiş Fiber	635 nm	0.75	0.63
KFS	635 nm	0.82	0.90
KFS	1550 nm	0.19	0.41

Sıcaklık deneylerinde şimdiye kadar yapılan testlerde fiber, fırın içerisine düz bir formda yerleştirilmiştir. Fiberin U-biçimde yerleştirilmesi sensörün sıcaklık duyarlılığına olumlu yönde etki yapabilir. Bu etkiyi araştırmak için sensör, düz ve U-biçiminde olmak üzere iki farklı formda fırın ortamına yerleştirilerek sabitlenmiştir. Şekil 5.26 ve 5.27'de, sırasıyla 635 nm ve 1550 nm dalga boylarında, inceltilmiş ve inceltilmemiş fiberlerin düz ve U-formda yerleştirilmesi sonucu 40-80 °C ölçüm aralığında belirlenen sıcaklık-korelasyon katsayısı değişim grafikleri gösterilmiştir.



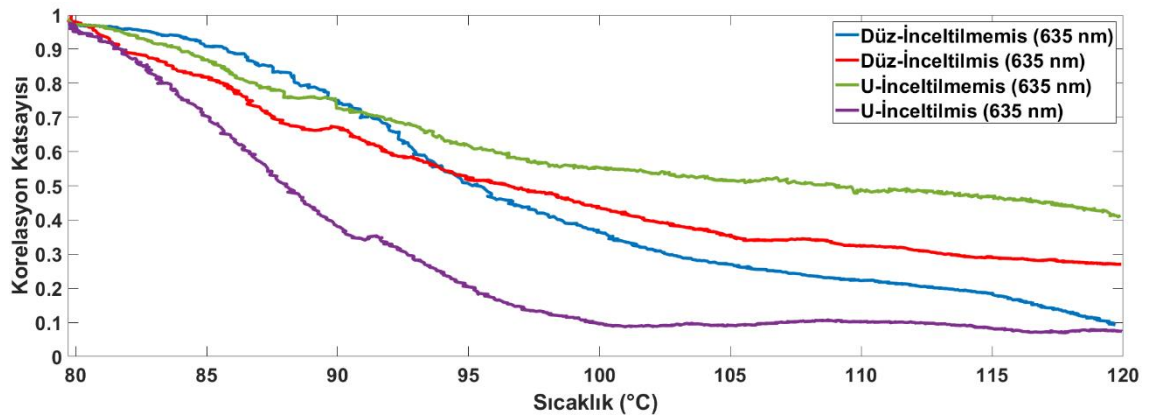
Şekil 5.26 Düz ve U-şekilli sensörlerin 635 nm dalga boyunda ve 40-80 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi



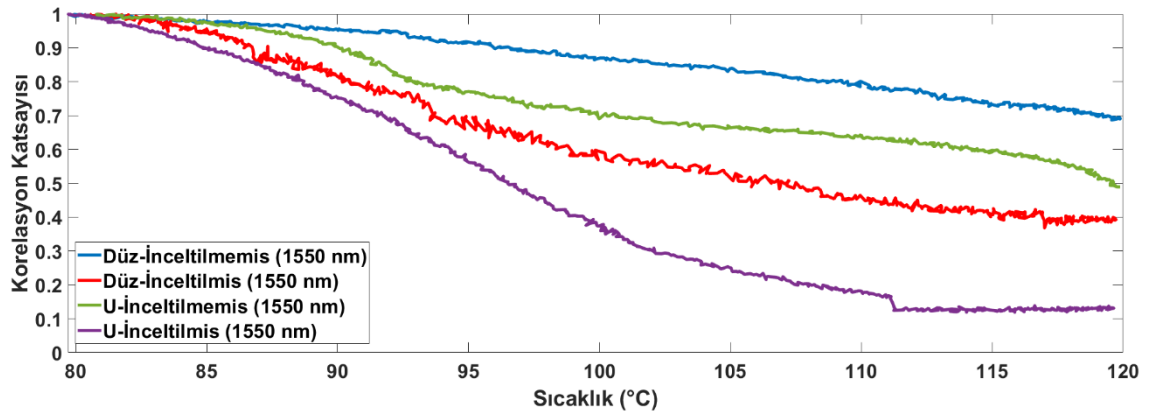
Şekil 5.27 Düz ve U-şekilli sensörlerin 1550 nm dalga boyunda ve 40-80 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi

Şekil 5.26 ve 5.27 incelendiğinde, her iki dalga boyu için de U-formda yerleştirilen sensörün sıcaklık duyarlılığının, düz formda yerleştirilen sensöre göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.26'da 635 nm dalga boyunda en yüksek duyarlılığı U-formda ve inceltilmiş fiberin gösterdiği anlaşılmaktadır. Duyarlılık performansında U-form inceltilmiş fiberi, U-form inceltilmemiş fiber sensörü takip etmektedir. Konik biçimde inceltilmiş ve düz formda yerleştiren sensörün sıcaklık duyarlılığı, inceltilmemiş U-form fiberden oldukça geride kalmaktadır. Sonuç olarak, sıcaklık ölçümü yapılacak ortamda fiberin U-formda sabitlenmesinin sıcaklık duyarlılığına yüksek bir katkı sağladığı tespit edilmiştir. En düşük sensör performansını beklediği üzere inceltilmemiş düz formdaki fiber sensör göstermektedir.

Şekil 5.26 ve şekil 5.27 birbiriyle kıyaslandığında 635 nm dalga boyunda yapılan sıcaklık ölçümlerinde sensör duyarlılığının 1550 nm dalga boyunda yapılan ölçümlere göre daha yüksek performans gösterdiği anlaşılmıştır. Kırılma indisi ve gerilme ölçümleri için yapılan deneylerde de tespit edildiği üzere 635 nm dalga boyundaki ışığa ile aydınlatılan fiberde daha fazla mod taşındığından dolayı artan benek sayısı, 1550 nm dalga boyuna kıyasla duyarlılık artışı sağlamaktadır. Bu nedenle sıcaklık ölçümlerinde en iyi performansın, 635 nm dalga boyunda aydınlatılan konik biçimde inceltilmiş ve U-formundaki fiber sensörün gösterdiği anlaşılmıştır. 40-80 °C arası yapılan sıcaklık deneylerinin ardından düz ve U-formda yerleştirilmiş aynı fiber sensörleri 80-120 °C aralığında test etmek için deneyler tekrarlanmıştır. Şekil 5.28 ve 5.29’da sırasıyla 635 nm ve 1550 nm dalga boyları için inceltilmiş ve inceltilmemiş fiberlerin düz ve U-formunda 80-120 °C arası sıcaklık-korelasyon katsayısı grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.28 Düz ve U-şekilli sensörlerin 635 nm dalga boyunda ve 80-120 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi



Şekil 5.29 Düz ve U-şekilli sensörlerin 1550 nm dalga boyunda ve 80-120 °C sıcaklık aralığındaki korelasyon katsayısının değişimi

Şekil 5.28 incelendiğinde, 80-120 °C sıcaklık aralığında ve 635 nm dalga boyunda çalışan sensörün, 40-80 °C aralığında elde edilen sonuçlara benzer şekilde, en yüksek sıcaklık duyarlılığını inceltirilmiş U-form sensörün sergilediği görülmektedir. Bu sensörü sırasıyla inceltirilmiş düz form ve inceltirilmemiş U-formdaki sensörler izlemektedir. En düşük sıcaklık duyarlılığı ise inceltirilmemiş düz form sensörde gözlemlenmiştir. Şekil 5.29’da gösterildiği üzere dalga boyunun 1550 nm’ye kaydırıldığı deneysel çalışmalarda, inceltirilmiş/inceltirilmemiş ve düz/U form fiber sensörlerin duyarlılık karakteristikleri birbirleriyle kıyaslandığında 635 nm dalga boyunda elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde. Sıcaklık değişimlerine en yüksek duyarlılığı inceltirilmiş U-form fiber sensör göstermiştir.

İnceltirilmiş U-form fiber sensörün 635 ve 1550 nm dalga boylarındaki performansları kıyaslandığında beklenildiği üzere 635 nm dalga boyunda aydınlatılan sensörün daha yüksek duyarlılığa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.28 ve 29’da inceltirilmiş U-form fiber sensörlerin ilk 10 °C’deki sıcaklık değişimlerine karşı korelasyon katsayısındaki düşüş miktarları 635 ve 1550 nm dalga boyları için sırasıyla 0.62 ve 0.23 olarak ölçülmüştür.

6. DERİN ÖĞRENME İLE ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI

Farklı türlerden ve çeşitli çaplarda üretilen konik fiber sensörlerin kırılma indisi ile gerilme ve sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılıkları bölüm 5'te sunulan korelasyon analizi kullanılarak incelenmiştir. Bu analiz, sensörlerin fiziksel parametrelere verdiği tepkilerin nicel olarak değerlendirilmesini sağlamış ve elde edilen sonuçlar, bu sensörlerin farklı uygulama alanlarındaki potansiyel performanslarını ortaya koymuştur. Ancak bu tür geleneksel analiz yöntemleri, genellikle verilerin doğrusal ilişkilere dayandığı varsayımını temel alır ve karmaşık, doğrusal olmayan ilişkileri tam olarak yakalama konusunda sınırlı kalabilir. Bu nedenle, korelasyon analizine dayalı bulguların daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi ve doğruluklarının artırılması amacıyla, derin öğrenme tabanlı algoritmaların sunduğu avantajlardan yararlanmak önem arz etmektedir. Bu bağlamda, özellikle görüntü işleme ve örüntü tanıma alanlarında yüksek doğruluk oranlarıyla öne çıkan CNN, konik fiber sensörlerden elde edilen verilerin işlenmesi ve analiz edilmesi için güçlü bir araç olarak tercih edilmiştir. Bu bölümde, CNN algoritması kullanılarak kırılma indisi, gerilme ve sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, bu yöntemle elde edilen sonuçların analizi ve önceki yöntemlerle karşılaştırmalı değerlendirmesi sunulacaktır.

6.1 Derin Öğrenme ile Kırılma İndisi Ölçümü

Nufern-105 optik fiberi kullanılarak yapılan korelasyon analizinin ardından, farklı türden optik fiberler kullanılarak 1.33-1.35 kırılma indisi aralığında deneysel çalışmalar, 635 nm ve 1550 nm dalga boyları için tekrarlanmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde bölüm 3.3'te ayrıntılı olarak sunulan CNN modeli ile derin öğrenme tabanlı algılama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 5.3.1'de yapılan deneysel çalışmalarda, 1.3322–1.3514 ölçüm aralığı için saf su-etanol solüsyonunun kırılma indisi her adımda yaklaşık 8×10^{-4} değişmektedir. Bu bölümde 62.5/125 GI-MMF ile 100/140 GI-MMF ve 105/125 SI-MMF ile 200/230 SI-MMF etiketli dereceli ve basamak indisli fiberler kullanılarak KFS'ler üretilmiştir. Üretilen her bir KFS'nin özdeş geometrik parametrelere sahip olmasına dikkat edilmiş ve

bu aşamada 10 μ m bel çapında ve 2.25 cm bel uzunluğunda fiber sensörleri üretilmiştir. KFS'ler ile yapılan kırılma indisi ölçümlerinde veri setini artırmak için kırılma indisinin her bir değişim aralığında ölçümler beş kez alınmıştır. Benek deseni görüntülerden oluşan veri setinin %15'i test, %15'i doğrulama ve %70'i ağı eğitimi için ayrılmıştır.

Eğitim parametrelerinin ve optimizasyon algoritmasının seçimi, ağı eğitimi oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle bu parametreleri uygun değerlere ayarlayabilmek için farklı denemeler yapılmıştır. CNN'de optimizasyon algoritması olarak sgd kullanılırken, epoch sayısı 120, öğrenme oranı 0.001 ve minibatch sayısı 20 olarak belirlenmiştir. 635 nm dalga boyu için gerçekleştirilen eğitim, doğrulama ve test sonuçları çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Farklı türdeki fiberler ile 635 nm dalga boyunda gerçekleştirilen deneylerin CNN doğruluk oranları

Basamak İndisli Çok Modlu Fiberler				Dereceli İndisli Çok Modlu Fiberler			
Nufern 105 (105/125)		Newport F-MBB (200/230)		Newport F-MLD (100/140)		Newport F-MFD (62.5/125)	
Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)
100	100	100	96	96	88	92	84

Çizelge 6.1 incelendiğinde SI-MMF'lerin GI-MMF'lere kıyasla daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. SI-MMF'lerde oluşan benek deseni sayısının daha fazla olması ve benek boyutlarının daha küçük olması nedeniyle benek deseni görüntülerindeki değişim daha belirgindir. Görüntülerdeki değişim miktarı (CC'nin sıfıra doğru azalması) ne kadar fazla olursa CNN'in öğrenme ve tahmin yeteneği de bununla ilişkili olarak artmaktadır. Korelasyon analizinde de tespit edilen bu durum, CNN'in performansını arttırmaktadır. F-MBB ve Nufern-105 etiketli SI-MMF'lerle yapılan ölçüm sonuçları birbirlerine yakın sonuçlar üretmekle birlikte, Nufern-105 fiberin daha yüksek test doğruluk oranına sahip olduğu görülmüştür.

Benzer bir sonuç, farklı öz çapına sahip dereceli indisli fiberler ile yapılan sensör çalışmalarında da gözlenmiştir. 100/140 F-MLD ve 62.5/125 F-MFD etiketli Newport

GI-MMF'ler ile yapılan deneylerin CNN performansları kıyaslandığında öz çapı 100 μm olan fiberin daha yüksek bir doğrulama ve test doğruluk oranı ile ölçüm gerçekleştirebildiği görülmektedir. Bu iyileşmenin, öz çapı büyük olan dereceli indisli fiberde ortaya çıkan benek deseni sayısının daha fazla olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Newport F-MBB (200/230) fiber ile yapılan deneysel çalışmalardan örnek bir çıktı olarak, test sınıfı için kaydedilen benek deseni görüntüleri CNN'e uygulandığında çıktı olarak elde edilen kırılma indisi ölçüm sonuçları çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2 Newport F-MBB ile 635 nm dalga boyunda elde edilen gerçek ve ölçülen kırılma indisi değerleri

Gerçek Değer	1.3322	1.3330	1.3338	1.3346	1.3354	1.3362	1.3370
Ölçülen Değer	1.3322	1.3330	1.3338	1.3346	1.3354	1.3362	1.3370
Gerçek Değer	1.3378	<u>1.3386</u>	1.3394	1.3402	1.3410	1.3418	1.3426
Ölçülen Değer	1.3378	<u>1.3378</u>	1.3394	1.3402	1.3410	1.3418	1.3426
Gerçek Değer	1.3434	1.3442	1.3450	1.3458	1.3466	1.3474	1.3482
Ölçülen Değer	1.3434	1.3442	1.3450	1.3458	1.3466	1.3474	1.3482
Gerçek Değer	1.3490	1.3498	1.3506	1.3514			
Ölçülen Değer	1.3490	1.3498	1.3506	1.3514			

Çizelge 6.2'de kırılma indisi sensörü ile 25 farklı ölçümde elde edilen gerçek değerlere karşı ölçülen değerler görülmektedir. Bu ölçümlerden 24'ünde CNN, kırılma indisini doğru tahmin etmiştir. Ağ yalnızca 1.3386 gerçek değerine karşılık gelen kırılma indisini, bir önceki değer olan 1.3378 olarak tahmin etmiştir. Oluşan bu hata ΔRI adımına karşılık gelen 8×10^{-4} gibi oldukça küçük bir değerdir. CNN hatalı tahmin yaptığında dahi ölçülen değer, gerçek değere en yakın komşu değere kaymaktadır.

Görünür bölgede gerçekleştirilen deneysel çalışmaların devamında, 1550 nm dalga boyunda ölçümler yapılarak 1.3322-1.3514 kırılma indisi aralığı için benek deseni görüntülerinden oluşan yeni bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri seti ile CNN eğitimi gerçekleştirilmiştir ve elde edilen doğrulama ve test doğruluk oranları çizelge 6.3'te sunulmuştur.

Çizelge 6.3 Farklı türdeki fiberler ile 1550 nm dalga boyunda gerçekleştirilen deneylerin CNN doğruluk oranları

Basamak İndisli Çok Modlu Fiberler				Dereceli İndisli Çok Modlu Fiberler			
Nufern 105 (105/125)		Newport F-MBB (200/230)		Newport F-MLD (100/140)		Newport F-MFD (62.5/125)	
Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)
96	84	100	92	92	76	92	72

635 nm dalga boyunda yapılan ölçüm deneylerinde olduğu gibi 1550 nm dalga boyunda da 1.3322-1.3514 aralığında 25 farklı kırılma indisi değeri için ölçümler yapılmıştır. SI-MMF'ler ve GI-MMF'ler ile üretilen farklı KFS'lerin ölçüm sonuçlarını özetleyen çizelge 6.3'teki test doğrulukları incelendiğinde %92 değeri ile Newport F-MBB'yi kullanan KFS'nin en yüksek ölçüm performansına sahip olduğu görülmektedir. Newport F-MBB'yi %84 test doğruluk oranıyla Nufern-105 ile üretilen KFS takip etmektedir. SI-MMF ve GI-MMF'ler kendi aralarında kıyaslandıklarında, Çizelge 6.1'de olduğu gibi SI-MMF'lerin daha yüksek bir test doğruluk oranına sahip olduğu görülmektedir.

Farklı türden GI-MMF ve SI-MMF'ler kullanılarak üretilen tüm KFS'ler içerisinde, 635 nm dalga boyunda çalıştırılan Nufern-105 KFS'nin doğrulama ve test doğruluk oranları, 8×10^{-4} ve üzerindeki ΔRI değerlerinde %100 ile sonuçlanmıştır. Bu sonuç sensörün kırılma indisini daha yüksek bir çözünürlükte algılayabileceğine işaret etmektedir. Kırılma indisinin en küçük değişim aralığı olan 8×10^{-4} değerinden daha küçük değişimlerde sensörün performansını test edebilmek için yeni bir solüsyon hazırlanmıştır. 8 ml saf suya 80 µl yerine 10 µl etanol ilave ederek hazırlanan solüsyonda, 1.3322-1.3338 aralığında kırılma indisi her adımda 1×10^{-4} değişmektedir. 17 farklı kırılma indisi değerini üreten bu solüsyonla gerçekleştirilen tüm deneyler beş kez tekrarlanmıştır. Önceki

çalışmalarda olduğu gibi kaydedilen benek desenlerinden oluşan veri setinin %15'i doğrulama, %15'i test ve %70'i eğitim için kullanıldı. Eğitilen CNN, 1×10^{-4} kırılma indisi değişimlerini %94,12 gibi yüksek bir doğrulukla tahmin etmiştir. 17 farklı kırılma indisi değeri için KFS ile yapılan ölçümlerde CNN 16 farklı kırılma indisi değerini doğru tahmin etmiştir. Ölçülen değerlerden sadece birisi gerçek değere en yakın komşu değer olarak tahmin edilmiştir. Tüm ölçümlerde en büyük hata değeri 1×10^{-4} olarak gözlenmiştir. Bu sonuçlar, Nufern-105 fiberi ile üretilen KFS'nin 1×10^{-4} gibi küçük kırılma indisi değişimlerine duyarlı olduğunu ve yeterli veri seti ile eğitilen CNN'nin yüksek bir doğrulukta ölçüm sonucu üretebildiğini göstermektedir. 80 µl ve 10 µl etanol eklenerek hazırlanan iki farklı solüsyon uygulamasında ölçebilen en küçük kırılma indisi değişimleri ile CNN doğruluk oranları, çizelge 6.4'te sunulmuştur.

Çizelge 6.4 Etanol-su karışımının farklı konsantrasyonlarındaki ölçülebilir en küçük kırılma indis değişimi ve CNN doğruluk oranları

Eklenen Etanol Miktarı	Ölçüm Aralığı	Ölçülebilir En Küçük Kırılma İndis Değişimi	CNN Doğruluk Oranları	
			Val. (%)	Test (%)
80 µl	1.3322-1.3514	8×10^{-4}	100	100
10 µl	1.3322-1.3338	1×10^{-4}	100	94.12

Kırılma indisinin 1.3322-1.3514 aralığında değiştiği deneysel çalışmaların ardından, daha yüksek kırılma indisi değerlerinde KFS'yi test edebilmek için saf su-DMSO karışımı kullanarak kırılma indisinin 1.3504-1.4214 aralığında değiştiği solüsyonlar hazırlanmıştır. Bu değişimler, saf su-etanol solüsyonlarından farklı olarak şekil 5.13'te gösterildiği gibi doğrusal değildir. İlk aşamada 2 ml DMSO ve 1334 µl saf su karıştırılarak elde edilen başlangıç solüsyonuna her adımda 500 µl saf su eklenerek, 1.4214-1.3504 aralığında kırılma indisinin en küçük 6×10^{-4} değerinde azalan yönde değiştiği yeni solüsyonlar elde edilmiştir. Bu solüsyonlar ile yapılan ölçüm deneyleri beş kez tekrarlanmıştır. Ölçüm deneylerinde kaydedilen benek deseni görüntüler ile eğitilen CNN, %100 doğrulama ve test doğruluk oranlarıyla kırılma indis değerlerini başarıyla tahmin etmiştir.

Bu sonuçlardan sensörün bu kırılma indis aralığında daha düşük indis değişimlerini algılayabileceği öngörüsüyle başlangıç solüsyonuna 500 µl yerine her adımda 10 µl ve 5 µl saf suyun eklendiği yeni solüsyonlar hazırlanmıştır. Başlangıç solüsyonuna her adımda 10 µl saf su eklenmesiyle 1.4214-1.4203 aralığında kırılma indisinin en küçük 2.67×10^{-5} değerinde değiştiği solüsyon hazırlanmıştır. Her adımda 5 µl saf su eklenerek hazırlanan solüsyonun kırılma indisi 1.4214-1.4211 aralığında en küçük 1.34×10^{-5} değerinde değişmektedir. Bu solüsyonlarla 1.34×10^{-5} değerine kadar düşen kırılma indisi değişimine karşı KFS'nin duyarlılığını ve ölçüm doğruluğunu test etmek için iki farklı ölçüm deneyi yapılmış ve bu deneyler beş kez tekrarlanmıştır. Ölçüm deneylerinde kaydedilen benek deseni görüntüleri ile eğitimi gerçekleştirilen CNN, kırılma indisinin 2.67×10^{-5} değişimini %100 doğrulama ve test doğruluk oranlarıyla tahmin ederken, 1.34×10^{-5} değişimini sırasıyla %97.5 ve %95 doğrulama ve test doğruluk oranlarıyla başarıyla tahmin etmiştir.

Ek olarak, şekil 5.13'ten görüleceği üzere hazırlanan saf su-DMSO solüsyonunda DMSO konsantrasyonu azaldıkça kırılma indisindeki değişim de azalmaktadır. Bu değişimin az olduğu 1.36'lar civarında kırılma indisi değerlerini ölçebilmek ve bu bölgede KFS'nin performansını değerlendirebilmek için, 2 ml DMSO'ya 6334 µl saf su ilave edilerek kırılma indisi 1.3629 olan yeni bir solüsyon hazırlanmıştır. Bu solüsyona her bir adımda sırasıyla 25 µl ve 15 µl saf su eklenerek DMSO konsantrasyonu kademeli biçimde azaltılmıştır. Böylece kırılma indisinin 1.3629-1.3610 ile 1.3629-1.3622 aralıklarında değiştiği bölgede sensörün duyarlılığı ve ölçüm doğruluğu araştırılmıştır. Ölçülebilir en küçük kırılma indis değişiminin 1×10^{-4} olduğu 1.3629-1.3610 kırılma indis aralığında CNN'nin doğrulama ve test doğruluk oranları %100 olarak gözlenirken, ölçülebilir en küçük kırılma indis değişiminin 6×10^{-5} olduğu 1.3629-1.3622 kırılma indis aralığında bu oranlar sırasıyla %100 ve %95 olarak elde edilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda saf su-DMSO solüsyonları kullanarak yapılan tüm deneysel çalışmalara ilişkin kırılma indisinin ölçüm aralığı, ölçülebilir en küçük kırılma indisi değişimi ve CNN performansı çizelge 6.5'te sunulmuştur.

Çizelge 6.5 DMSO-su karışımının farklı konsantrasyonlarındaki ölçülebilir en küçük kırılma indis değişimi ve CNN doğruluk oranları

Eklenen Saf Su Miktarı	Ölçüm Aralığı	Ölçülebilir En Küçük Kırılma İndis Değişimi	CNN Doğruluk Oranları	
			Val. (%)	Test (%)
500 µl	1.4214-1.3504	6×10^{-4}	100	100
10 µl	1.4214-1.4203	2.67×10^{-5}	100	100
5 µl	1.4214-1.4211	1.34×10^{-5}	97.5	95
25 µl	1.3629-1.3610	1×10^{-4}	100	100
15 µl	1.3629-1.3622	6×10^{-5}	100	95

500 µl saf su eklenerek gerçekleştirilen ilk deneyde, ölçülebilir en düşük ΔRI , 6×10^{-4} olarak hesaplanmıştır. Ancak bu değer, deneyin her adımında değişen DMSO konsantrasyonuna bağlı olarak solüsyonun kırılma indisi değişimi olan ΔRI değeri ile sınırlıdır. Şekil 5.13'te DMSO konsantrasyonu ile değişen kırılma indisi eğrisinin 1.42'ler civarındaki eğimi, 1.36 civarındaki eğiminden daha yüksektir. Eklenen su miktarının 5 ve 10 µl olarak sınırlandırıldığı ölçüm deneylerinde 1.42'ler civarında 1.34×10^{-5} değerine kadar sensörün kırılma indis değişimlerini ölçebileceği gösterilmiştir.

Kırılma indisi değişim aralığının 1.42 civarında olduğu ve 10 µl saf su eklenerek gerçekleştirilen ikinci ölçüm deneyinde, CNN'nin %100 doğrulukta sonuç üretmesi sensörün 2.67×10^{-5} değerinde değişen kırılma indisi değişimlerine duyarlı olduğunu göstermiştir. Sensörün çok daha küçük kırılma indisi değişimlerini algılayabileceği öngörüsüyle, her adımda 5 µl saf su eklenerek gerçekleştirilen üçüncü deneyde, ölçülebilir en düşük kırılma indisi değişimi CNN'nin %95 doğrulukta sonuç ürettiği 1.34×10^{-5} olarak tespit edilmiştir.

Kırılma indisinin 1.36'lar civarında değiştiği ölçüm aralığında KFS'yi test edebilmek için solüsyona 25 µl ve 15 µl saf su eklenerek gerçekleştirilen deneylerde ise, CNN'nin doğruluk oranları sırasıyla %100 ve %95 olarak hesaplanmış ve bu değerlerdeki çözünürlükler 1×10^{-4} ve 6×10^{-5} olarak tespit edilmiştir. Literatürde bulunan fiber optik kırılma indis sensörleri incelendiğinde, tez çalışmasında geliştirilen sensörün, kendi sınıfında kırılma indisini oldukça geniş bir aralıkta ve yüksek bir duyarlılıkta ölçebileceği

gösterilmiştir. Derin öğrenme tabanlı algılama yapan KFS'nin literatürdeki diğer kırılma indisi sensörleriyle olan karşılaştırmalı analizi çizelge 6.6'da sunulmuştur.

Çizelge 6.6 Benek deseni algılamaya dayalı derin öğrenme tabanlı algılama gerçekleştiren KFS'nin, literatürdeki kırılma indisi sensörleriyle karşılaştırılması

Literatürdeki Çalışmalar	Ölçüm Aralığı	Ölçülebilir En Küçük Kırılma İndis Değişimi
(Mollah vd. 2019)	1.34 – 1.39	9.09×10^{-6}
(Hasan vd. 2018)	1.33 – 1.38	2.17×10^{-5}
(Osório vd. 2017)	1.333 – 1.461	2.5×10^{-4}
(Gao vd. 2014)	1.33 – 1.35	5×10^{-5}
(Paul vd. 2019)	1.33 – 1.40	1.72×10^{-5}
Bu Tez Çalışması	1.3322-1.4214	1.34×10^{-5}

Kırılma indisi ölçümü gerçekleştirilen fiber sensörlerde, ölçüm aralığının genişliği ve duyarlılık önemli performans göstergeleridir. Literatürdeki farklı tipteki fiber sensörlerin ölçüm aralığı ve duyarlılıkları çizelge 6.6'da sunulmuştur. Bu bağlamda, üretilen KFS, kendi sınıfındaki kırılma indisi sensörlerine kıyasla iyi bir performansa sahiptir.

Son olarak seçilen CNN eğitim parametrelerinin, doğrulama ve test doğruluk oranlarına etkisini belirlemek amacıyla, kırılma indisinin 1.42 civarında olduğu ve 10 µl saf suyun eklendiği ikinci deneyden elde edilen veri setiyle, farklı epoch sayısında ve minibatch boyutlarında eğitimler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada ilk olarak diğer CNN parametreleri sabit tutularak epoch sayısı 60, 80, 100 ve 120 değerleri kullanılarak eğitimler gerçekleştirilmiştir. Eğitim sonucu epoch sayısına bağlı oluşan doğrulama ve test doğruluk oranları çizelge 6.7'de sunulmuştur.

Çizelge 6.7'deki sonuçlar incelendiğinde, epoch sayısındaki artışın CNN'nin test ve doğruluk yüzdeleri arttırdığı görülmektedir. Epoch sayısındaki artış CNN'nin, eğitim verilerindeki örüntüleri daha iyi öğrenebilmesini ve başarılı bir genelleme ile tahmin yapabilmesini sağlamaktadır. Bu durum CNN'nin test doğruluk yüzdesindeki artış ile

açıkça görülmektedir. Bununla birlikte epoch sayısının çok yüksek değerlerinde ağıın aşırı öğrenme (overfitting) eğilimine girebileceği dikkate alınarak, bu değerin uygun seçilmesi önem arz etmektedir. Yapılan denemelerde epoch sayısının kurulan ağ modelinde 120 olarak seçilmesi uygun bulunmuştur.

Çizelge 6.7 CNN modelinin epoch sayısına bağlı doğruluk oranları

Epoch Sayısı	Minibatch Boyutu	Öğrenme Oranı	CNN Doğruluk Oranları	
			Val. (%)	Test (%)
60	20	10^{-3}	95	87.5
80	20	10^{-3}	95	92.5
100	20	10^{-3}	100	97.5
120	20	10^{-3}	100	100

İkinci aşamada epoch sayısı 120 değerine sabitlenerek, minibatch boyutu 40, 30 ve 20 değerlerine ayarlanmış ağ her seferinde yeniden eğitilmiştir. Minibatch boyutuna bağlı elde edilen doğrulama ve test doğruluk oranları çizelge 6.8’de sunulmuştur.

Çizelge 6.8 CNN modelinin minibatch boyutuna bağlı doğruluk oranları

Minibatch Boyutu	Epoch Sayısı	Öğrenme Oranı	CNN Doğruluk Oranları	
			Val. (%)	Test (%)
40	120	10^{-3}	95	87.5
30	120	10^{-3}	95	90
20	120	10^{-3}	100	100

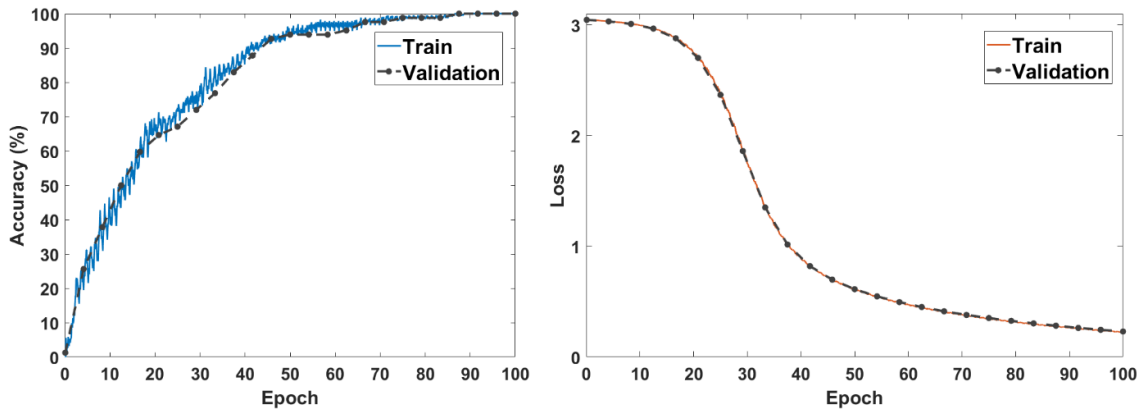
Çizelge 6.8’de sunulan veriler, minibatch boyutunun kademeli olarak azalması, CNN’nin test ve doğrulama oranlarında artış sağlamıştır. Küçük minibatch boyutları, modelin ağırlık güncellemelerini daha sık yapmasına olanak tanıyarak öğrenme sürecini hızlandırmakta ve modelin daha iyi genelleme yapmasını sağlamaktadır. Bu durum, özellikle karmaşık veri setlerinde, modelin farklı veri örüntülerini daha ayrıntılı bir şekilde öğrenmesine katkı sunmaktadır. Ancak, minibatch boyutunun aşırı

küçültülmesinin modelin kararlılığını olumsuz yönde etkileyebileceği ve öğrenme sürecinde dalgalanmalara yol açabileceği nedeniyle kurulan ağda minibatch boyutu 20 olarak seçilmiştir.

6.2 Derin Öğrenme ile Gerilme Ölçümü

Gerilme deneylerinde kaydedilen benek deseni görüntülerinin korelasyon analizi KFS'nin gerilmeye duyarlı olduğunu bölüm 5.3.2'de gösterilmişti. Bu bölümde Nufern-105 fiber kullanılarak üretilen KFS'ye ek olarak Newport F-MBB, Newport F-MLD ve Newport F-MFD ile üretilen KFS'lerin 0-1250 $\mu\epsilon$ aralığında gerilme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veri seti üzerinden CNN ile gerilme ölçümü yapılmıştır. Bölüm 3.3'te geliştirilen CNN modeli bu bölümde epoch ve minibatch parametreleri güncellenerek gerilme ölçümü için uyarlanmıştır.

İlk aşamada Nufern-105 fiberi ile 635 nm dalga boyunda gerçekleştirilen deneylerde, sırasıyla inceltilmemiş fiber (bel çapı 125 μm) ile 35 μm ve 10 μm bel çaplarına sahip KFS'ler çeşitli gerilme adımları altında test edilmiştir. Deneyler önceki çalışmalarda olduğu gibi beş kez tekrarlanmış ve veri setinin eğitim, doğrulama ve test için ayrılan yüzdeleri sırasıyla %70, %15 ve %15 olarak belirlenmiştir. Ağın eğitim ve doğrulama süreçlerindeki doğruluk ve kayıp fonksiyonları şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 CNN ağının epoch sayısına bağlı olarak doğruluk ve kayıp fonksiyonları

Şekil 6.1’de epoch sayısının bir fonksiyonu olarak çizilen doğruluk ve kayıp fonksiyonları incelendiğinde, eğitimin yaklaşık 90 epoch’da %100’e ulaştığı görülmektedir. İnceltilmemiş fiber ile 35 μm ve 10 μm bel çaplarına sahip KFS’lere sırasıyla her adımda 62.5 $\mu\epsilon$, 43.75 $\mu\epsilon$, 31.25 $\mu\epsilon$ ve 12.5 $\mu\epsilon$ değerlerinde gerilmeler uygulanmıştır. Kaydedilen benek deseni görüntüleri CNN ile eğitim için etiketlenerek ağın performansı test edilmiştir. Çeşitli bel çapları ve değişken gerilme adımlarına bağlı olarak ağın performansını göstermek için, CNN doğrulama ve test doğruluk oranları çizelge 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.9 635 nm dalga boyunda Nufern-105 fiberinden üretilen KFS’nin CNN doğruluk oranları

Gerilme Adımı	125 μm (İnceltilmemiş Fiber)		35 μm		10 μm	
	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)
62.5 $\mu\epsilon$	82.93	78.05	100	100	100	100
43.75 $\mu\epsilon$	Denenmedi	Denenmedi	97.56	95.12	100	100
31.25 $\mu\epsilon$	Denenmedi	Denenmedi	80.48	73.17	100	100
12.5 $\mu\epsilon$	Denenmedi	Denenmedi	Denenmedi	Denenmedi	93.44	88.52

Çizelge 6.9 incelendiğinde, 12.5 $\mu\epsilon$ ’luk gerilme adımı hariç diğer gerilme adımlarında 10 μm bel çapına sahip KFS hem doğrulama hem de test sürecinde %100 doğruluk başarısı göstermiştir. İnceltilmemiş fiberde ise korelasyon analizinde de gözlemlendiği gibi benek deseni görüntülerindeki değişim nispeten zayıf kaldığı için bu sensör daha düşük bir performans göstermiştir. Bu yüzden daha hassas algılamanın test edileceği küçük gerilme adımları için inceltilmemiş fiber ile deneysel çalışmalar bu aşamada sonlandırılmıştır.

35 μm bel çapına sahip KFS ile yapılan ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere gerilme adımı küçüldükçe ağın doğruluk oranları düşmektedir. Gerilme ölçümünde KFS’nin ölçüm yapabileceği en küçük değişimi araştırmak için gerilme adımı 62.5 $\mu\epsilon$ ’dan 12.5 $\mu\epsilon$ ’a kadar dört kademede düşürülmüştür. 12.5 $\mu\epsilon$ ’luk değişimleri algılamak için yapılan ölçümlerde en yüksek performansın 10 μm bel çapına sahip KFS ile elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak gerilme deneylerinden sensör bel çapı azaldıkça KFS’nin daha yüksek bir duyarlılıkla gerilme ölçümü yapılabildiği bulgusuna ulaşılmıştır.

10 μm bel çapına ve 2.25 cm bel uzunluğuna sahip Nufern-105 KFS ile 1550 nm dalga boyunda gerçekleştirilen ölçüm deneylerinde de ağın doğruluk oranları, 635 nm dalga boyunda gözlemlendiği gibi, 62.5 μe gerilme adımlarında %100 çıkmıştır. Diğer fiber türleri ile yapılan gerilme ölçümlerinde de bel çapı ile sensör performansı arasında benzer bir ilişki gözlemlenmiştir. Ayrıca fiberin basamak indisli veya dereceli indisli olması, fiber öz çapının büyüklüğü gibi doğrudan fibere ait fiziksel parametreler de gerilme sensörü performansını etkilemektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda lazer kaynağının dalga boyu 635 nm'den 1550 nm'ye kaydırılması, mod sayısını ve dolayısıyla benek sayısını azaltacağından, sensör duyarlılığını olumsuz etkilemektedir. Bu durum, çizelge 6.10'daki sonuçlardan da anlaşılabileceği üzere CNN performansına yansımış ve 1550 nm dalga boyunda çalıştırılan KFS'nin ağ doğrulukları nispeten düşük kalmıştır. Diğer yandan GI-MMF fiber türleri için bel çapının artması ile CNN performansında artış gözlenmiştir. Ancak tüm fiber türleri içerisinde derin öğrenme ile yapılan ölçümlerde Nufern-105 SI-MMF'den üretilen KFS'nin, gerilme değişimine en yüksek duyarlılığı gösterdiği tespit edilmiştir.

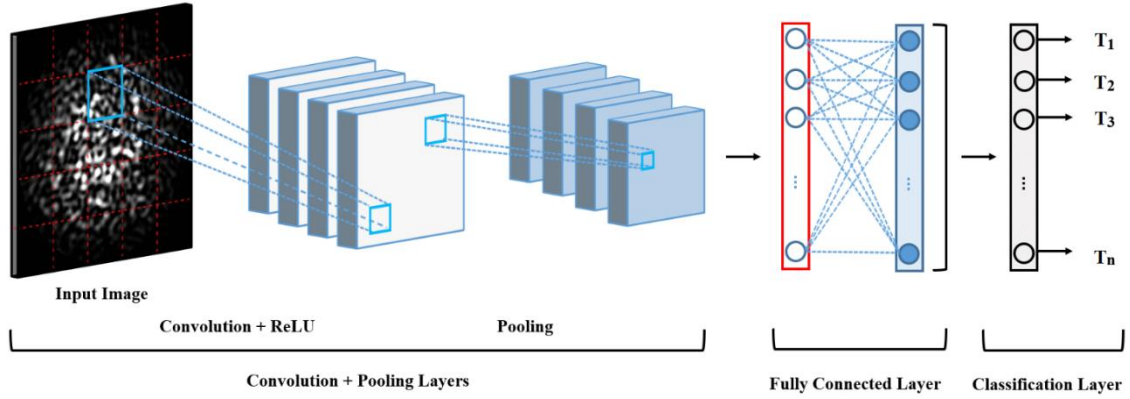
Çizelge 6.10 Farklı fiber türleri ile gerçekleştirilen deneylerin CNN doğruluk oranları

Dalga Boyu	Basamak İndisli Çok Modlu Fiberler				Dereceli İndisli Çok Modlu Fiberler			
	Nufern 105 (105/125)		Newport F-MBB (200/230)		Newport F-MLD (100/140)		Newport F-MFD (62.5/125)	
	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)	Val. (%)	Test (%)
635 nm	100	100	100	90.91	97.56	87.80	86.59	65.85
1550 nm	100	100	100	90.24	97.56	70.73	90.24	36.59

6.3 Derin Öğrenme ile Sıcaklık Ölçümü

Kırılma indisi ve gerilme ölçümlerinde olduğu gibi sıcaklık deneylerinde kaydedilen benek deseni görüntüleri CNN algoritması ile eğitilerek sıcaklık ölçüm değerlerini tahmin

etmek için kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümü için geliştirilen CNN modelinde kullanılan katmanlar şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Sıcaklık ölçümleri için optimize edilen CNN modeli

Bölüm 5.3.3’te 40-80 °C ve 80-120 °C sıcaklık aralıklarında Nufern-105 fiber kullanılarak sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen benek deseni görüntüleri korelasyon analizi yöntemiyle değerlendirilerek, KFS’nin sıcaklığa duyarlılığı araştırılmıştır. Yapılan analizler, fibere konik yapı verilmesinin ve sensörün fırın ortamına U-şekilli yerleştirilmesinin KFS’nin sıcaklık değişimine duyarlılığını artırdığını göstermiştir. Bunun yanı sıra fiberi 1550 nm yerine 635 nm dalga boyunda aydınlatmanın da sensör duyarlılığını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, bel çapı 10 μm ve bel uzunluğu 2.25 cm olan KFS kullanılarak, 635 nm dalga boyunda ve sensörün fırın ortamına U-şekilli yerleştirilmesiyle 40-80 °C ve 80-120 °C sıcaklık aralıkları için deneyler tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler, %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test oranında bölünerek CNN modeli eğitilmiştir. Eğitim süreci sonunda elde edilen sonuçlar, Çizelge 6.11 ve Çizelge 6.12’de sunulmuştur.

Çizelge 6.11 40-80 °C ölçüm aralığı için ölçülebilir en küçük sıcaklık değerleri ve CNN doğruluk oranları

Ölçüm Aralığı	Ölçülebilir En Küçük Sıcaklık Değeri (°C)	CNN Doğruluk Oranları	
		Val. (%)	Test (%)
40-80 °C	1	100	91.02
40-80 °C	0.75	99.27	85.21
40-80 °C	0.5	95.13	79.73

Çizelge 6.12 80-120 °C ölçüm aralığı için ölçülebilir en küçük sıcaklık değerleri ve CNN doğruluk oranları

Ölçüm Aralığı	Ölçülebilir En Küçük Sıcaklık Değeri (°C)	CNN Doğruluk Oranları	
		Val. (%)	Test (%)
80-120 °C	1	100	91.41
80-120 °C	0.75	100	86.35
80-120 °C	0.5	99.23	81.44

Çizelge 6.11 incelendiğinde 40-80 °C aralığında ölçülebilir en küçük sıcaklık değerinin (0.5 °C, 0.75 °C ve 1 °C), CNN doğruluk oranlarında belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Test doğruluk oranları incelendiğinde ölçülebilir en küçük sıcaklık değerinin 1 °C olduğu durumda ağ tahmin performansı en iyi sonucu vermiştir. 1 °C'lik ΔT 'de, doğrulama (validation) oranı %100, test oranı ise %91.02'dir. ΔT 'nin 0.75 °C olduğu durumda doğrulama oranı bir düşüşle %99.27 olurken, test oranı %85.21 olarak hesaplanmıştır. Test doğruluğundaki bu azalma, daha hassas sıcaklık değerlerinde ağın genel performansının bir miktar zayıfladığını göstermektedir. 0.5 °C ΔT değerinde ise doğrulama oranı %95.13 ve test oranı ise %79.73 olarak hesaplanmıştır. Ağın doğruluk oranları, ölçülebilir en küçük sıcaklık değerinin artışıyla birlikte doğrulama ve test süreçlerinde daha yüksek performans göstermektedir. Doğrulama oranlarının genellikle yüksek seviyelerde (%95 ve üzeri) seyretmesi, ağın eğitim verilerine iyi uyum sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, en iyi genel performans, 1 °C'lik ölçülebilir en küçük sıcaklık değişiminde elde edilmiştir.

Çizelge 6.12 incelendiğinde 80-120 °C aralığında 1 °C'lik ΔT 'de, ağın doğrulama oranı %100, test oranı ise %91.41 olarak kaydedilmiştir. CNN hem eğitim hem de test verisinde yüksek doğruluk oranı sergileyerek, 1 °C'lik duyarlılıkta güçlü bir genelleme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. 0.75 °C'lik ΔT değerinde Doğrulama oranı %100 seviyesini korurken, test doğruluk oranı %86.35 olarak hesaplanmıştır. Test doğruluğundaki bu azalma, daha küçük sıcaklık farklarını ölçerken ağın, genelleme yeteneğinin zayıfladığına işaret etmektedir. Son olarak ΔT 'nin 0.5 °C olduğu durumda doğrulama oranı %99.23 olurken, test oranı ise %81.44 olarak hesaplanmıştır. 80-120 °C aralığında CNN, doğrulama setinde genel olarak yüksek bir doğruluk oranı göstermiştir.

40-80 °C ve 80-120 °C sıcaklık aralıklarında elde edilen sonuçların genel olarak benzer bir performans sergilediği görülmüştür. Buna rağmen, 80-120 °C aralığında doğruluk oranları, 40-80 °C aralığına göre genel olarak daha yüksektir. Bu durum, ağın daha yüksek sıcaklık aralıklarında daha iyi genelleme yapabildiğini ve bu aralıktaki sıcaklık değişimlerinin benek desenleri üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğunu göstermektedir. 1 °C ölçülebilir en küçük sıcaklık değeri her iki sıcaklık aralığında da en iyi performansı sağlamaktadır. Tüm bu sonuçlar ışığında Nufern-105 fiber ile üretilen KFS'nin 0.5 °C sıcaklık değişimlerine duyarlı olduğu görülmektedir.

7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, benek deseni algılamaya dayalı KFS yapısı, ölçüm yöntemleri ve performansları detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın başlangıcında, literatür taraması ile mevcut tekniklerin kapsamlı bir analizi yapılmış ve fiber sensör teknolojilerindeki güncel eğilimler değerlendirilmiştir. Bu bağlamda hem KFS'lerin hem de benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörlerin avantajları, zorlukları ve uygulama alanları incelenmiş, elde edilen sonuçlar literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılarak sunulmuştur.

Çalışmanın teorik kısmında, KFS'lerin kırılma indisi ölçümü için tasarlanmasında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları önemli bir rol oynamıştır. Kullanılan fiberin fiziksel özellikleri belirlenmiş, 100/125 μm öz ve kılıf çaplarına sahip basamak indisli çok modlu fiberin konik yapı parametreleri detaylandırılmıştır. Bu parametreler arasında özellikle bel çapı ve bel uzunluğunun sensörün kırılma indisi duyarlılığına etkisi simülasyon çalışmalarıyla araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, bel çapının azalması ve bel uzunluğunun artmasıyla sensör duyarlılığının arttığını göstermiştir. Bu durum sensör duyarlılığı artırmak için KFS'lerin geometrik parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Ayrıca dalga boyunun sensör performansı üzerindeki etkisi de ilk aşamada simülasyon çalışmalarıyla incelenmiştir. Bu çalışmalar, fiber sensör girişine 635 nm veya 1550 nm'de çalışan lazer uygulanarak iki farklı dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Korelasyon analizi üzerinden elde edilen sonuçlar, daha düşük dalga boyunda çalışan sensörün kırılma indisi değişimine daha yüksek duyarlılık sunduğunu göstermektedir. Bu durum fiberin, normalize frekansıyla (V parametresiyle) ilişkilendirilmiş ve teorik olarak açıklanmıştır.

DeneySEL çalışmalarda farklı türden fiberler kullanılarak farklı bel çapı ve uzunluklarında KFS'ler üretilmiştir. Bu sensörlerin kırılma indisi, gerilme ve sıcaklık değişimlerine duyarlılıklarını test edebilmek için ölçüm ortamları hazırlanmış ve ölçüm deneyleri yapılarak algılama performansları araştırılmıştır. Kırılma indisi ölçümlerinde kullanılan Nufern-105, Newport F-MBB, Newport F-MLD ve Newport F-MFD dört farklı fiber türü

ile 1.33-1.42 kırılma indisi ölçüm aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bel çapının azalması, bel uzunluğunun artması ve dalga boyunun azalması sensör duyarlılığını artıran önemli faktörler olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular KFS'nin kırılma indisi için yapılan simülasyon çalışmalarında elde edilen sonuçlarla tutarlıdır.

Kırılma indisi ölçümlerinde elde edilen benek deseni görüntüleri, korelasyon analizinde ve CNN algoritmasının eğitiminde kullanılmıştır. Korelasyon analizleri, kırılma indisi değişimlerinin benek deseni üzerinde benzersiz etkiler yarattığını ve oluşan benek deseni görüntülerinin birbirini tekrar etmediğini göstermiştir. Bu durum kırılma indisi ölçümlerinde CNN algoritmasının yüksek doğrulukla kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Gerçekleştirilen eğitimlerde geliştirilen algoritmanın %100'e varan doğrulukta, 1.34×10^{-5} çözünürlükte kırılma indisi ölçebildiği gösterilmiştir.

Gerilme ölçümleri için yapılan deneylerde de simülasyon ve deneysel çalışmaları destekleyen sonuçlar elde edilmiştir. 0-1250 $\mu\epsilon$ ölçüm aralığında gerçekleştirilen deneyler, simülasyon çalışmalarıyla uyumlu olarak, bel çapının küçülmesi, bel uzunluğunun artması ve dalga boyunun düşmesiyle sensör hassasiyetinin arttığını göstermiştir. CNN algoritması ile yapılan analizlerde, 12.5 $\mu\epsilon$ çözünürlükte gerilme ölçümleri %100'e varan doğrulukla elde edilmiştir. Bu sonuçlar, konik fiber sensörlerin gerilme ölçümleri için yüksek hassasiyetli bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Konik fiber sensörlerin sıcaklık ölçümlerindeki performansları da deneysel olarak incelenmiştir. 40-120°C aralığında gerçekleştirilen deneylerde, konik yapının fiber sensör üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Korelasyon analizleri, konik yapı verilen fiber sensörlerin, inceltilmemiş fiberlere kıyasla daha yüksek hassasiyet gösterdiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda dalga boyunun sıcaklık ölçümlerinde de sensör hassasiyeti üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Düşük dalga boylarında hassasiyetin arttığı, bu çalışmada da doğrulanmıştır.

Sıcaklık ölçümleri için fiber sensörlerin düz ve u-şekilde fırın ortamına yerleştirilmesi sonucunda elde edilen korelasyon analizleri, fiberin U-şekilli yerleştirilmesinin sensör hassasiyetini artırdığını göstermiştir. Bu çalışma, fiber sensörlerin yerleşim şeklinin dahi

sensör performansını optimize edebileceğini göstermesi açısından önemlidir. CNN algoritması kullanılarak, 0.5 °C duyarlılıkta sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tezde gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmalar sonucunda, konik fiber sensörlerin çeşitli parametrelerle hassasiyetinin optimize edilebileceği ve benek deseni algılamaya dayalı sensörlerin yüksek doğrulukta ölçümler gerçekleştirebileceği kanıtlanmıştır. Özellikle bel çapı, bel uzunluğu ve dalga boyu gibi parametrelerin fiber sensörlerin performansını belirleyici unsurlar olduğu ortaya konulmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, KFS'lerin biyomedikal, endüstriyel ve çevresel izleme gibi birçok uygulama alanında kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Simülasyon ve deneysel çalışmaların tutarlılığı, bu çalışmada kullanılan yöntemlerin geçerliliğini ve doğruluğunu desteklemektedir. CNN algoritması ile yapılan ölçümlerin benek deseni algılamaya dayalı fiber sensör çalışmalarında yüksek doğruluk oranları sunması, bu teknolojinin gelecekteki sensör uygulamalarında önemli bir yer edineceğini göstermektedir. Ayrıca, farklı fiber türleri kullanarak ve fiberi uygun biçimde şekillendirerek geliştirilen fiber sensörler, birçok uygulama alanında iyi bir aday olabilir.

Sonuç olarak, bu tezde gerçekleştirilen çalışmalar, benek deseni algılamaya dayalı konik fiber sensörlerin performansını artırmaya yönelik önemli bulgular ortaya koymuş ve bu teknolojilerin gelişimine katkı sağlamıştır. Gelecekteki çalışmalarda, bu sensörlerin daha geniş uygulama alanlarına entegre edilmesi ve ölçüm duyarlılıklarının daha da yükseltilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- AL-Mashhadani, Z.A.A. and Navruz, I. 2018. Ultrahigh Sensitive Refractive Index Sensor Based on Tapered Multicore Optical Fiber. *Commun.Fac.Sci.Univ.Ank.Series A2-A3* 60(2), pp. 1–14.
- Akhoundi, F., Norwood, R.A. and Peyghambarian, N. 2019. Low-Cost Magneto-Optic Sensor Based on Tapered Fiber and Distributed Sensing Concept. *IEEE Photonics Technology Letters* 31(11), pp. 901–904. doi: 10.1109/LPT.2019.2912744.
- AL-Mashhadani, Z.A.A. and Navruz, I. 2019. Highly sensitive measurement of surrounding refractive index using tapered trench-assisted multicore fiber. *Optical Fiber Technology* 48, pp. 76–83. doi: 10.1016/j.yofte.2018.12.022.
- An, J., Jin, Y., Sun, M. and Dong, X. 2014. Relative humidity sensor based on SMS fiber structure with two waist-enlarged tapers. *IEEE Sensors Journal* 14(8), pp. 2683–2686. doi: 10.1109/JSEN.2014.2313878.
- Arı, F., Şerbetçi, H. and Navruz, İ. 2023. Tapered fiber optic refractive index sensor using speckle pattern imaging. *Optical Fiber Technology* 79, p. 103366. doi: 10.1016/j.yofte.2023.103366.
- Biazoli, C.R., Silva, S., Franco, M.A.R., Frazão, O. and Cordeiro, C.M.B. 2012. Multimode interference tapered fiber refractive index sensors.
- Birks, T.A. and Li, Y.W. 1992. The Shape of Fiber Tapers. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10. No. 4. doi: 10.1109/50.134196
- Chen, N.K., Yang, T.H., Feng, Z.Z., Chen, Y.N. and Lin, C. 2012. Cellular-dimension picoliter-volume index microsensing using micro-abrupt-tapered fiber Mach-Zehnder interferometers. *IEEE Photonics Technology Letters* 24(10), pp. 842–844. doi: 10.1109/LPT.2012.2188999.
- Choi, S., Lee, S.L., Kim, J., Kim, M.S., Kim, D.K. and Lee, Y.W. 2020. Tapered Length Dependence of Pressure Sensitivity in Polarimetric Fiber Pressure Sensor Based on Tapered High Birefringence Fiber. *IEEE Sensors Journal* 20(5), pp. 2492–2503. doi: 10.1109/JSEN.2019.2952925.
- Coluccelli, N., Cassinerio, M., Redding, B., Cao, H., Laporta, P. and Galzerano, G. 2016. The optical frequency comb fibre spectrometer. *Nature Communications* 7. doi: 10.1038/ncomms12995.
- Cuevas, A.R., Fontana, M., Rodriguez-Cobo, L., Lomer, M. and Lopez-Higuera, J.M. 2018. Machine Learning for Turning Optical Fiber Specklegram Sensor into a Spatially-Resolved Sensing System. Proof of Concept. *Journal of Lightwave Technology* 36(17), pp. 3733–3738. doi: 10.1109/JLT.2018.2850801.
- Efendioglu, H.S., Yildirim, T., Toker, O. and Fidanboyu, K. 2012. Design of intelligent fiber optic statistical mode sensors using novel features and artificial neural

- networks. In: INISTA 2012 - International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications. doi: 10.1109/INISTA.2012.6247006.
- Fan, R. et al. 2020. Liquid Level and Refractive Index Double-Parameter Sensor Based on Tapered Photonic Crystal Fiber. *Journal of Lightwave Technology* 38(14), pp. 3717–3722. doi: 10.1109/JLT.2020.2975814.
- French, R., Gigan, S. and Muskens, O.L. 2018. Snapshot fiber spectral imaging using speckle correlations and compressive sensing.
- Fu, H. et al. 2015. In-Fiber Quasi-Michelson Interferometer Based on Waist-Enlarged Fiber Taper for Refractive Index Sensing. *IEEE Sensors Journal* 15(12), pp. 6869–6874. doi: 10.1109/JSEN.2015.2465165.
- Fujiwara, E., Marques dos Santos, M.F. and Suzuki, C.K. 2017a. Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division. *Applied Optics* 56(6), p. 1585. doi: 10.1364/ao.56.001585.
- Fujiwara, E., Wu, Y.T., dos Santos, M.F.M., Schenkel, E.A. and Suzuki, C.K. 2017b. Development of a tactile sensor based on optical fiber specklegram analysis and sensor data fusion technique. *Sensors and Actuators, A: Physical* 263, pp. 677–686. doi: 10.1016/j.sna.2017.07.031.
- Gao, D., Guan, C., Wen, Y., Zhong, X., Yuan, L. 2014. Multi-hole fiber based surface plasmon resonance sensor operated at near-infrared wavelengths. *Opt Commun*, 313, pp. 94-98. doi: 10.1016/j.optcom.2013.10.015
- Gupta, R.K., Bruce, G.D., Powis, S.J. and Dholakia, K. 2019. Deep learning enabled laser speckle wavemeter with a high dynamic range.
- Hasan, M.R., Akter, S., Rifat, A.A., Rana, S., Ahmed, K., Ahmed, R. 2018. Spiral photonic crystal fiber-based dual-polarized surface plasmon resonance biosensor. *IEEE Sens J*, 18 pp. 133-140. doi: 10.1109/JSEN.2017.2769720
- Komanec, M., Nemecek, T., Vidner, P.M., Martan, T., Lahodny, F. and Zvanovec, S. 2019. Structurally-modified tapered optical fiber sensors for long-term detection of liquids. *Optical Fiber Technology* 47, pp. 187–191. doi: 10.1016/j.yofte.2018.11.010.
- Kuznetsov, P.I., Sudas, D.P. and Savel'ev, E.A. 2020. Formation of Fiber Tapers by Chemical Etching for Application in Fiber Sensors and Lasers. *Instrum Exp Tech* 63, 516–521. <https://doi.org/10.1134/S0020441220040302>
- Kürüm, U., Wiecha, P.R., French, R. and Muskens, O.L. 2019. Deep learning enabled real time speckle recognition and hyperspectral imaging using a multimode fiber array. *Optics Express* 27(15), p. 20965. doi: 10.1364/oe.27.020965.
- Layeghi, A. and Latifi, H. 2018. Tunable Ferrofluid Magnetic Fiber Sensor based on Nonadiabatic Tapered Hi-Bi Fiber in Fiber Loop Mirror. *Journal of Lightwave Technology* 36(4), pp. 1097–1104. doi: 10.1109/JLT.2017.2781623.

- Li, J., Zhang, X., Wang, W., Pang, F., Liu, Y. and Wang, T. 2011. Direct inscription of intrinsic Fabry-Perot interferometers in optical fiber tapers with a femtosecond laser. In: 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, ACP 2011. doi: 10.1117/12.905596.
- Li, T., Dong, X., Chan, C.C., Zhao, C.L. and Zu, P. 2012. Humidity sensor based on a multimode-fiber taper coated with polyvinyl alcohol interacting with a fiber bragg grating. *IEEE Sensors Journal* 12(6), pp. 2205–2208. doi: 10.1109/JSEN.2011.2181358.
- Li, Y., Xue, Y. and Tian, L. 2018. Deep speckle correlation: a deep learning approach toward scalable imaging through scattering media. *Optica* 5(10), p. 1181. doi: 10.1364/optica.5.001181.
- Liu, Y., Qin, Q., Liu, H. huan, Tan, Z. wei and Wang, M. guang. 2018. Investigation of an image processing method of step-index multimode fiber specklegram and its application on lateral displacement sensing. *Optical Fiber Technology* 46, pp. 48–53. doi: 10.1016/j.yofte.2018.09.007.
- Liu, Z.J. et al. 2015. An Optical Microfiber Taper Magnetic Field Sensor With Temperature Compensation. *IEEE Sensors Journal* 15(9), pp. 4853–4856. doi: 10.1109/JSEN.2015.2429911.
- Majid, S., Ali, A.H., Satar, S.M.A., Ali, A.H., Mays, M. and Abbas, K. 2014. Designing of an optical fiber sensor of statistical mode via image processing of speckle pattern changes. *International Journal of Scientific and Research Publications* 5(10).
- Meng, Z. et al. 2019. Multimode fiber spectrometer with scalable bandwidth using space-division multiplexing. *AIP Advances* 9(1). doi: 10.1063/1.5052276.
- Mollah, M.A., Razzak S.M.A., Paul, A.K., Hasan, M.R. 2019. Microstructure optical fiber based plasmonic refractive index sensor. *Sens Biosensing Res*, 24. doi: 10.1016/j.sbsr.2019.100286
- Murray, M.J., Davis, A., Kirkendall, C. and Redding, B. 2019. Speckle-based strain sensing in multimode fiber. *Optics Express* 27(20), p. 28494. doi: 10.1364/oe.27.028494.
- Murray, M.J., Davis, A. and Redding, B. 2018. Multimode fiber Φ -OTDR with holographic demodulation. *Optics Express* 26(18), p. 23019. doi: 10.1364/oe.26.023019.
- Natalia, D.H., Óscar, E., María-Cruz, N., Agustín, G., Elena Be., Guillermo O. 2011. Improved performance of SPR sensors by a chemical etching of tapered optical fibers. *Optics and Lasers in Engineering* 49(8), p. 1065-1068. doi:10.1016/j.optlaseng.2011.03.012.
- Navruz, I., Ari, F., Bilsel, M. and AL-Mashhadani, Z.A. 2018. Enhancing refractive index sensitivity using micro-tapered long-period fiber grating inscribed in biconical

- tapered fiber. *Optical Fiber Technology* 45, pp. 201–207. doi: 10.1016/j.yofte.2018.07.018.
- Niu, P., Zhao, J., Zhang, C., Bai, H., Sun, X., Bai, J. and Chen, L. 2019. S Fiber Taper-Based Fiber Loop Ring-Down Refractometer. *IEEE Sensors Journal* 19(3), pp. 970–975. doi: 10.1109/JSEN.2018.2880800.
- Osório, J.H., Oliveira, R., Aristilde, S., Chesini, G., Franco, M.A.R., Nogueira, R.N. 2017. Bragg gratings in surface-core fibers: Refractive index and directional curvature sensing *Opt Fiber Technol*, 34, pp. 86-90. doi: 10.1016/j.yofte.2017.01.007
- Paul, A.K., Sarkar, A.K., Khaleque, A. 2019. Dual-core photonic crystal fiber plasmonic refractive index sensor: a numerical analysis. *Photonic Sensors*, 9, pp. 151-161. doi: 10.1007/s13320-018-0524-7
- Redding, B. and Cao, H. 2012. Using a multimode fiber as a high resolution, low loss spectrometer. *Optics Letters* Vol. 37, Issue 16, pp. 3384-3386. doi: 10.1364/OL.37.003384
- Redding, B. et al. 2013a. All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction. *Opt. Express* 21, 6584-6600. doi: 10.1364/OE.21.006584
- Redding, B., Liew, S.F., Sarma, R. and Cao, H. 2013b. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip. *Nature Photonics* 7(9), pp. 746–751. doi: 10.1038/nphoton.2013.190.
- Rohollahnejad, J., Xia, L., Ran, Y. and Cheng, R. 2015. Deformation independent FBG strain sensor based on speckle pattern processing. *ICOCN 2015 - 14th International Conference on Optical Communications and Networks, Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/ICOCN.2015.7203648.
- Serbetci, H., Navruz, I. and Ari, F. 2022a. Development of Fiber Optic Refractive Index Sensor Using Speckle Pattern Imaging. In: 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU55565.2022.9864752.
- Serbetci, H., Navruz, I. and Ari, F. 2022b. Strain Measurement in Tapered Fiber Sensors by Speckle Pattern Imaging. *ELECO22*.
- Shao, M., Zang, Y., Qiao, X., Fu, H. and Jia, Z.A. 2017. Humidity Sensor Based on Hybrid Fiber Bragg Grating/Abrupt Fiber Taper. *IEEE Sensors Journal* 17(5), pp. 1302–1305. doi: 10.1109/JSEN.2016.2631536.
- Shao, Z., Qiao, X. and Rong, Q. 2017. Highly sensitive gas refractometer based on inverse mode-coupling of cladding-to-core modes in a tapered four-core fiber. *25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*

- Shi, F., Wang, J., Zhang, Y., Xia, Y. and Zhao, L. 2013. Refractive index sensor based on S-tapered photonic crystal fiber. *IEEE Photonics Technology Letters* 25(4), pp. 344–347. doi: 10.1109/LPT.2013.2238623.
- Singh, L., Zhu, G., Singh, R., Zhang, B., Wang, W., Kaushik, B.K. and Kumar, S. 2020. Gold Nanoparticles and Uricase Functionalized Tapered Fiber Sensor for Uric Acid Detection. *IEEE Sensors Journal* 20(1), pp. 219–226. doi: 10.1109/JSEN.2019.2942388.
- Şerbetçi, H., Navruz, I. and Ari, F. 2024. A fiber optic refractive index sensor with extremely high dynamic range utilizing deep learning-speckle pattern imaging. *Ain Shams Engineering Journal* 15(12), p. 103122. doi: 10.1016/j.asej.2024.103122.
- Tian, Y., Wang, W., Wu, N., Zou, X. and Wang, X. 2011. Tapered optical fiber sensor for label-free detection of biomolecules. *Sensors* 11(4), pp. 3780–3790. doi: 10.3390/s110403780.
- Tian, Z. and Yam, S.S.H. 2009. In-Line Abrupt Taper Optical Fiber Mach–Zehnder Interferometric Strain Sensor. *IEEE Photonics Technology Letters* 21(3), p. 161–163. doi: 10.1109/LPT.2008.2009360.
- Tsai, Y.-N., Chen, C.-Y., Chen, G.-H. and Lee, C.-L. 2015. All Fiber Vibration Sensor Based on a Tapered Fiber Plug Fused Hollow Core Fiber. 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC).
- Valley, G.C., Sefler, G.A. and Justin Shaw, T. 2016a. Multimode waveguide speckle patterns for compressive sensing. *Optics Letters* 41(11), p. 2529. doi: 10.1364/ol.41.002529.
- Valley, G.C., Sefler, G.A. and Shaw, T.J. 2016b. Use of optical speckle patterns for compressive sensing of RF signals in the GHz band. In: *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications IX*. SPIE, p. 97470B. doi: 10.1117/12.2208738.
- Yahya, N.A.M., Hamid, M.R.Y., Ong, B.H., Rahman, N.A., Mahdi, M.A. and Yaacob, M.H. 2020. H₂ Gas Sensor Based on Pd/ZnO Nanostructures Deposited on Tapered Optical Fiber. *IEEE Sensors Journal* 20(6), pp. 2982–2990. doi: 10.1109/JSEN.2019.2957838.
- Yin, S., Ruffin, P. B., Yu, F. T. S. 2017. "Fiber Optic Sensors". CRC Press.
- Zhang, C., Ning, T., Li, J., Pei, L., Li, C. and Lin, H. 2017. Refractive index sensor based on tapered multicore fiber. *Optical Fiber Technology* 33, pp. 71–76. doi: 10.1016/j.yofte.2016.11.008.
- Zhang, W., Zhuang, W., Dong, M., Zhu, L. and Meng, F. 2019. Dual-Parameter Optical Fiber Sensor for Temperature and Pressure Discrimination Featuring Cascaded Tapered-FBG and Ball-EFPI. *IEEE Sensors Journal* 19(14), pp. 5645–5652. doi: 10.1109/JSEN.2019.2905635.

- Zhao, Y., Cai, L. and Hu, H.F. 2015. Fiber-Optic Refractive Index Sensor Based on Multi-Tapered SMS Fiber Structure. *IEEE Sensors Journal* 15(11), pp. 6348–6353. doi: 10.1109/JSEN.2015.2458893.
- Zibaii, M.I., Kazemi, A., Latifi, H., Azar, M.K., Hosseini, S.M. and Ghezelaigh, M.H. 2010. Measuring bacterial growth by refractive index tapered fiber optic biosensor. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 101(3), pp. 313–320. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2010.07.017.
- Wang, J.J., Yan, S.C., Ruan, Y.P., Xu, F. and Lu, Y.Q. 2017. Fiber-optic point-based sensor using specklegram measurement. *Sensors (Switzerland)* 17(10). doi: 10.3390/s17102429.