



T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ

**Kimyasal Banyo Biriktirme Yöntemi ile CdS Kaplanmış Fiber Optik Sensörlerin
Mukavemet ve Hassasiyet Ölçümleri**

Proje No: FHD-2021-1768
Proje Türü: Hızlı Destek Projesi

Proje Yürütücüsü:

Malik KAYA
Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu
Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü

Araştırmacılar:

Prof. Dr. Okan ESENTÜRK: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Ankara, Türkiye
Prof. Dr. Umut SARAÇ: Bartın Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Eğitimi Bölümü, Bartın, Türkiye
Arş. Gör. Dr. Celal AŞICI: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Eskişehir, Türkiye
Prof. Dr. M. Celalettin BAYKUL: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve
Malzeme Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından 1768 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kasım 2022
ESKİŞEHİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	5
ABSTRACT	6
1. GİRİŞ	7
2. MATERYAL ve METOT	12
3. BULGULAR	19
4. SONUÇ	23
KAYNAKLAR	24

TEŞEKKÜR

Bu projedeki tüm çalışmalar Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) birimi tarafından desteklenmiştir.

ÖZET

Fiber Halka Döngü Sönümler Spektroskopisi (FHDSS) tekniğinin uygulandığı Fiber optik sensörler (FOS) günümüzde birçok alanda yüksek hassasiyetli, anlık ve eşzamanlı ölçümler sunması nedeniyle erken teşhis amaçlı kullanılmaktadır. 1550 nm lazer kaynağı, farklı birleştirme oranlarına sahip tek modlu fiber kablo, güç metre ve sensörü kullanılarak oluşturulacak sadeleştirilmiş sistemdeki fiber halkanın bir kısmı sensör başlığı olarak kullanılacak ve bu bölge kimyasal banyo biriktirme yöntemi uygulanarak CdS ince film ile kaplanacaktır. Kaplanan film tabakalarının sistemin toplam optik kaybındaki değişime etkisi anlık olarak gözlenebilecektir. İlk kez CdS nanoyapılı ince film yapılar tek modlu fiber optik üzerine kaplanacak ve FHDSS sisteminde yüksek hassasiyette sistem hassasiyeti ve sensör mukavemeti test edilecektir. Sensör bölgesine, ince film kaplama öncesi ve sonrası, uygulanacak gerilim sonucu değişen toplam optik kaybın ölçülmesi ile sistem hassasiyeti ve sensörlerin mukavemet testleri gerçekleştirilecektir. Sonrasında inceltirilmiş sensör başlığı CdS nano yapılı ince film ile kaplanarak sistem hassasiyeti ve sensör mukavemet testleri gerçekleştirilecektir. Optimize edilmiş ince film kaplı fiber optik sensörler, sensör bölgesi yüzeyinin farklı modifikasyonları ile kimyasal element izleme, hedef molekül/element ölçümler gibi birçok alanda erken teşhis amaçlı kullanılabilir. FHDSS tekniğinin sunmuş olduğu hızlı ve gerçek zamanlı anlık ölçümler, numune ile birden çok kez etkileşim olanağı, farklı dalga boyları ile çalışabilme gibi üstün avantajların fiber optik sensörlerin elektriksel yalıtıcılık, esneklik, küçük hacim kaplama, portatiflik ve minimum veri kaybı ile çok uzak mesafelere veri iletimi gibi üstün özellikleri birleştirilerek, mukavemeti ve hassasiyeti artırılmış CdS nanoyapılı ince film kaplı fiber optik sensörler biyomedikal, yapısal sağlık görüntüleme, fiziksel ve kimyasal uygulamalar gibi birçok alanda erken teşhis amaçlı kullanım için yüksek potansiyele sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Basınç sensörü, gerilim sensörü, portatif sistem, fiber optik sensörler, portatif sensör ağı, FHDSS tekniği, CdS ince film, N,N-Diethyl-p-phenylenediamine (NDPD) kaplama, nanoyapılar, sensör uygulamaları, sensör üretimi.

ABSTRACT

Fiber optic sensors (FOS) to which the Fiber Loop Ringdown Spectroscopy (FLRDS) technique is applied, are used in many areas today for early diagnosis purposes because they offer high precision, instantaneous and simultaneous measurements. A part of the fiber ring in the simplified system to be created using a 1550 nm laser source, a single-mode fiber cable with different coupling ratios, a power meter and a sensor will be used as the sensor head, and this region will be covered with a CdS thin film by applying the chemical bath deposition method. The effect of the coated film layers on the change in the total optical loss of the system can be observed instantly. For the first time, thin film structures with CdS nanostructures will be coated on single-mode fiber optics and high-precision system sensitivity and sensor strength will be tested in the FLRDS system. System sensitivity and resistance tests of the sensors will be carried out by measuring the total optical loss, which changes as a result of the voltage applied to the sensor area, before and after thin film coating. Afterwards, the thinned sensor head will be covered with a thin film with CdS nanostructure, and system sensitivity and sensor strength tests will be carried out. Optimized thin-film coated fiber optic sensors can be used for early diagnosis in many areas such as chemical element monitoring, target molecule/element measurement with different modifications of the sensor area surface. Fast and real-time instant measurement offered by the FLRDS technique, the possibility of interacting with the sample multiple times, the ability to work with different wavelengths, etc. CdS nanostructured thin film coated fiber optic sensors with enhanced strength and sensitivity by combining their superior properties have a high potential for early diagnosis purposes in many areas such as biomedical, structural health imaging, physical and chemical applications.

Keywords: Pressure sensor, strain sensor, portable system, fiber optic sensors, portable sensor network, FLRDS, CdS thin films, N,N-Diethyl-p-phenylenediamine (NDPD) coating, nanostructures, sensor applications, sensor fabrication.

1. GİRİŞ

Literatürde FHDSS tekniğinin avantajları hakkında birçok makale, kitap ve tez bulunmaktadır (1-20). Literatürdeki fiber optik basınç/gerilim sensörü çalışmaları ile ilgili Wang ve Scherrer (21,22) 99:1 birleştiricili tek modlu fiber halka ve 1650 nm merkez dalga boylu lazer kullanarak dizayn ettiği FHDSS sisteminde, fiber halkanın bir bölümünü sensör bölgesi olarak kullanmış ve 418 g ağırlığa kadar bu sensör bölgesine ağırlık uygulayarak basınç sensörü çalışmasını gerçekleştirmiştir. Li ve ekibi tarafından (23) yapılan kuvvet ve sıcaklık eş zamanlı ölçümü çalışması piyasada mevcut olan, hazır Fiber Bragg Grating (FBG) sensörler kullanılarak dalga boyu - zaman değişimi sorgulama tekniği ile kuvvetin ve sıcaklığın ölçümünü çalışmışlardır. Çalışma dalga boyu taramalı fiber lazer, EDFA fiber amplifikatör, akusto optik modülatör gibi birçok sistem bileşeni kullanıldığı için yüksek maliyetli, büyük hacim kaplayan, portable olma özelliğini taşımayan, kompleks ve maliyetli sisteme sahiptir. Diğer çalışmada ise Chen ve ekibi (24) polimer kaplı FBG sensörler kullanılarak oluşturulmuş fiber halkada kaydırma ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sistem bileşenleri olarak CO₂ lazer, 1550 nm merkez dalga boylu FBG, Optik Spektrum Analizörü (OSA), fotodedektör ve osiloskop gibi yüksek maliyetli bileşenler içermektedir. Kaya ve Esentürk (17) 1550 nm merkez dalga boylu lazer ve 99.1 birleştiricili tek modlu fiber halka kullanarak gerilim sensörü çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada sistem hassasiyeti geliştirilmiş bir FHDSS sistemi kullanılmıştır.

FOS'lar yüksek hassasiyet, küçük boyut, düşük veri kaybı ve uzun mesafe uygulamaları sağladığından, bilim adamları geniş uygulama alanları nedeniyle son otuz yıldır fiber optik sensörlere (FOS'ler) odaklanmışlardır. FOS sistemi ile birlikte kullanılan Fiber Döngü Ringdown Spektroskopisi (FLRDS) tekniği, Cavity Ringdown Spektroskopisi (CRDS) tekniğinden geliştirilmiş çok fonksiyonlu bir tespit tekniğidir. CRDS tekniğinde boşluk bölgesi olarak iki adet yüksek yansıtıcı ayna kullanıldığından, FLRDS tekniğinde boşluk olarak bir optik kablo kullanılır. FLRDS tekniği, döngü içine hapsedilen küçük parça lazer darbesinin ölçülen büyüklüklerle birkaç kez etkileşimi nedeniyle zaman alanına dayalıdır. Bu nedenle, FLRDS sistem ölçüm kararlılığı ve hassasiyeti, çoklu etkileşimler nedeniyle aşırı derecede artar. FLRDS tekniği, fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametre ölçümü/izleme ve yapısal sağlık izleme gibi yaygın uygulama alanlarına sahiptir [15,18,19,21,25-33]. Diğer tip

gerinim sensörleri yaygın olarak kullanılsa da FOS'ların FLRDS tekniğine sahip gerinim sensörleri çoğunlukla kullanılmaktadır [34-40]. FLRDS tekniği, döngüdeki bir lazer ışınının çoklu geçişi nedeniyle gelişmiş algılama hassasiyeti, ölçülen büyüklüklerle çoklu etkileşime neden olması, düşük maliyet, kolay kurulum, basitlik ve taşınabilir bir ağ sisteminin kurulmasına olanak sağlaması gibi çeşitli avantajlar sunar.

Aaron ve ekibi (41) 40 cm uzunluklu çok modlu fiberin 3 cm'lik kısmına kimyasal daldırma yöntemi ile CdS kaplayarak gaz çemberi içerisinde test edilmiştir. Bu sistemde beyaz ışık kaynağından çıkan ışınlar, çok modlu fiber içerisinden geçirilerek spektrometre yardımıyla spektral responslar ölçümlenmiştir. Işık kaynağı sensör bölgesinden tek bir kez geçirilerek her seferinde tek sinyal alınmıştır. Bizim önerdiğimiz çalışmada ise fiber halka kullanılacak ve FHDSS tekniğinin sunmuş olduğu ultra yüksek hassasiyet sayesinde, fiber halka içerisine hapsedilen çok küçük orandaki lazer pulsunun sönüme ulaşmaya kadar sensör bölgesi ile çoklu etkileşim yapması nedeni ile çok daha hassas ölçümler gerçekleştirilecektir. Cortina ve ekibi (42) güneş pili uygulamaları için selüloz asetat fiberleri CdS nanoparçacık kaplamışlardır. Farklı uygulamalar için farklı teknikler kullanılarak, farklı fiber türleri üzerine CdS ince film çalışmaları literatürde karşımıza çıkmaktadır (43,44). FHDSS tekniği kullanılarak CdS ince filmi tek modlu fiber üzerine ilk defa kaplanacak ve sensör uygulamaları ilk kez gerçekleştirilecektir.

Araştırmacılar, çeşitli fiber optik sistem ve farklı fiber türleri kullanarak gerinim tespitine odaklanmıştır. Tarsa et al. [45], 7.4 $\mu\epsilon$ 'lik bir gerinim duyarlılığı ile 74 nm minimum yer değiştirmeye sahip 10 mm konik fiber kullandı. Bu kısa sensör bölgesi ve daha ince konik bölge, kırılma ve kullanım üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Zhou et al. [46], optik zayıflatıcı, Erbium olarak ek optik bileşenlere sahip bir fiber halkada Mach Zehnder İnterferometre (MZI) oluşturmak için bir SMF'ye eklenen 4,8 cm'lik bir fotonik kristal fiber (PCF) kullanarak en düşük gerinim değerini 3,6 $\mu\epsilon$ olarak hesapladı. Katkılı Optik Fiber Amplifikatör (EDFA), Fiber Bragg Izgara (FBG) ve optik spektrum analizörü (OSA). Çalışmaları çıplak elyaf kullanılarak yürütülmüş olup, sistemleri ve elyaf türleri bu çalışmada kullanılanlardan farklıdır.

Projenin özgün değeri ultra yüksek hassasiyete sahip FHDSS tekniğinin kullanıldığı bir spektroskopik ölçüm sisteminde CdS nanoyapılı ince filmlerin kimyasal banyo biriktirme

yöntemi ile fiber üzerine üretilerek sensör uygulaması çalışmasıdır. Sistemin optimizasyonu tamamlandıktan sonra üretilcek olan sensörlerin sistem kararlılığı, hassasiyeti gibi özelliklerinin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilecektir. Öncelikle ESOGÜ SHMYO Optik ve Fotonik Laboratuvarındaki mevcuth FHDSS sisteminde tek modlu fiber halkanın plastik ceketten arındırılmış küçük bir kısmı kullanılarak sensör bölgesi oluşturulacak ve bu bölge kimyasal banyo daldırma yöntemi ile CdS nanoyapılı ince film ile kaplanacaktır. Sistemin hassasiyeti ve sensörün mukavemet testleri, sensör bölgesine kaplama öncesinde ve sonrasında uygulanacak gerilim ile ortaya konulacaktır. Sonrasında sensör bölgesi asit içerisinde aşındırılarak inceltilecek ve elde edilen daha hassas sensör başlığı aynı yöntemle CdS nanoyapılı ince film ile kaplanacaktır. Aynı testler yapılarak sistemin hassasiyeti ve sensör mukavemeti test edilecektir.

Literatürde her ne kadar CdS kaplanmış fiber optik sensör uygulamaları çalışmaları yer alsa da bu çalışmalar tamamen farklı sistem dizaynı ile farklı sistem bileşenleri ve teknikler içermektedir. Bu projedeki FHDSS sensör sistemi uygulaması başarılı bir şekilde sonuçlandırıldıktan sonra sağlık, otomotiv, inşaat, endüstri gibi çoğu alanda bir veya birçok parametrenin değişimleri eş zamanlı olarak gözlenebilir. Yüksek hassasiyete ve düşük maliyete sahip FHDSS tekniğinin kullanıldığı fiber optik sensörler ile oluşturulan sensör sistemi ve sensör ağı ile elde edilebilecek ön veriler erken teşhis amaçlı olarak da kullanılabileceği için hem ekonomik, hem de sosyal olarak insanlığa fayda sağlayacaktır.

Sensör bölgesi kaplandığında/kaplandığında/kapsüllendiğinde başka bir olay ortaya çıkar. Sensör kafası bölgesini değiştirmek sensör hassasiyetini ve dayanıklılığını iyileştirebileceğinden, bu iyileştirme sadece sensörlerin zorlu ortamlardaki kullanım ömründe değil, aynı zamanda hassasiyetleri de arttırılabilir. Wang et. al. [47], gömülü yalıtım benimsendiğinde iç mekanizmanın değişimini incelediler. Gerinim transferi teorisi ile ana malzeme ile gömülü sensörler arasındaki arayüzey bağınyı ayırarak gömülü optik fiber sensördeki arayüzey bağlama mekanizmasını ayrıntılı olarak araştırdılar. Birkaç çalışmada, sensörlerin hassasiyetini ve dayanıklılığını geliştirmek için Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) tekniği kullanılmıştır [49-54]. Amaçları, yapısal sağlık izlemede zorlu ortam ve tıbbi/biyomedikal uygulamalarda kimyasal ortam gibi farklı ortamlarda sensörün hassasiyetini ve dayanıklılığını arttırmaktır. Wang et. al. [55] ayrıca 3D asfalt kaplama deformasyonunu izlemek için FBG ve fiber optik sensör üzerinde çalıştı. Yoğun trafikte ve farklı sıcaklık

değerlerinde asfalt kaplamanın 3 boyutlu yer değiştirmesini ve gerinim değişimini analiz etmek için sensörleri y ekseninde farklı katmanlara ve x ekseninde konumlara yerleştirdiler.

1960'larda Maiman [56] tarafından yapılan bir deneyde gerçekleştirilen lazer keşfi, yüksek yoğunluklu bir ışık kaynağına izin verir. Bu, doğrusal olmayan optiğe son derece önemli bir kapı açtı [57]. Bu zamana kadar, optik etkilerin çoğu, yalnızca gelen ışık alanı ile bir ortamın doğrusal bir malzeme tepkisi arasındaki ilişki nedeniyle düşünülmüştür. Bununla birlikte, ışık alanı yoğunluğu yüksekse, gelen ışık özelliklerini önemli ölçüde değiştiren doğrusal olmayan optik etkiler ortaya çıkar.

Doğrusal olmayan optikteki diğer ilerlemeler, son yıllarda hem doğrusal olmayan optik alanında hem de daha yüksek teknolojilerle endüstride devrim yaratan geleneksel optik fiberlerin icatlarına izin verdi. Bu nedenle optik fiberler, 20. yüzyılda bilimdeki en büyük keşiflerden biri olarak kabul edilir ve lineer olmayan fiber optik olarak yeni bir fizik alanı kurulmuştur [58]. Hemen ardından, parametrik karıştırma işlemleri, optik solitonlar ve dinamikleri, fiberlerde kendi kendine faz modülasyonu vb. gibi birçok yeni doğrusal olmayan fenomen keşfedildi [59-65].

Optik fiberlerde, ışığın yayılma süreci, toplam iç yansıma (TIR) fenomenine dayalı olarak gerçekleşir. Bununla birlikte, TIR tarafından geleneksel ışık yayılımı, optik zayıflama ve doğrusal olmama ile ilgili çeşitli sınırlamalara sahiptir. Bu etkileri en aza indirmek için fiber optiğin geliştirilmesinde bir kilometre taşı olan Fotonik Kristal Elyafların (PCF) keşfi gibi farklı yayılma mekanizmalarına odaklanılmıştır. Işığın fiber çekirdekte yayılması, bant aralığı mekanizmasına bağlıdır. Erken PCF'nin ana yapısı, daha sonra katı çekirdekli PCF olarak adlandırılan katı çekirdekli altıgen bir kafes içinde oluşturulan hava delikleri ile silikadan imal edilen mikro yapıli liflerden oluşur [66].

Optik fiberlerdeki ışık yayılım teorisi Refs [57, 67, 68]'de bulunabilir. Başlangıçta, birkaç ana kavramı, özellikle dispersiyonu sabitlemek için standart adım indeksli fiberlerde lineer yayılma ile başlanabilir. Ayrıca, bu prosedür, genelleştirilmiş Doğrusal Olmayan Schrödinger Denklemlerine (GNLSE) yol açan doğrusal olmayan yayılma durumuna genişletilebilir, böylece ışık yayılım ilerlemesindeki karakterize edilen parametreler ve nicelikler ayrıntılı olarak belirtilir. Rastgele bir dağıtıcı ortam için, geleneksel optik fiberlerle ilgili çeşitli kavramların verildiği Ref [4]'te NLSE'nin standart bir türevi sunuldu. Son makalemizde,

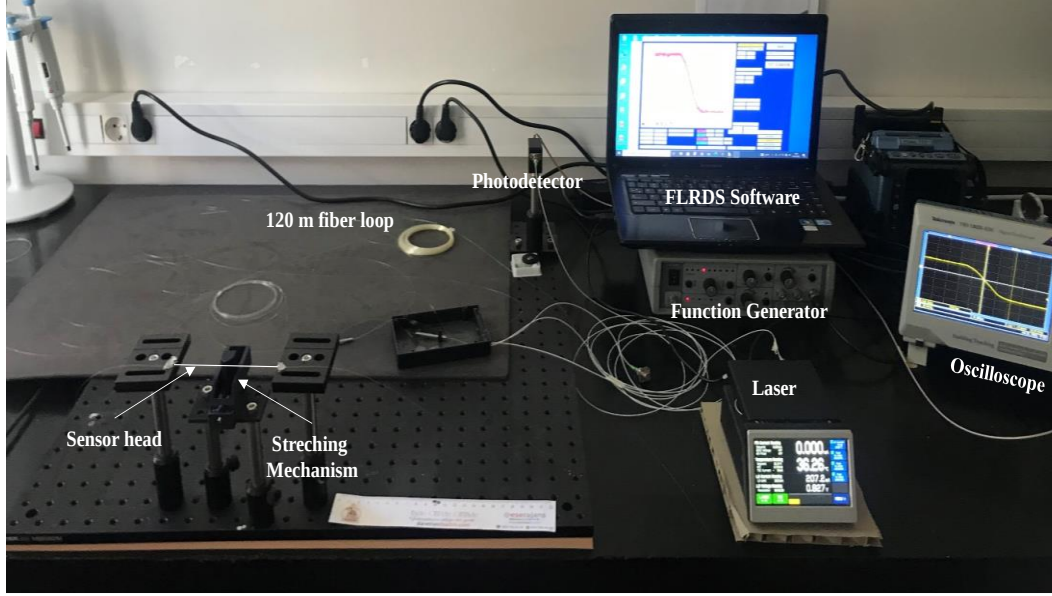
örneğin madencilikte kullanılacağını umduğumuz geleneksel fiber döngü ile yapılan yeni bir sensör tipini anlatacağız. PCF'ler tarafından yapılan bir sensör, yakın gelecekteki makalemizin konusu olacaktır.

Bu çalışmada, tek modlu fiberin (SMF) bir parçası olarak oluşturulan sensör kafasının bir fiber döngüsünde N,N-Dietil-p-fenilendiamin (NDPD) kaplamasının sensör dayanıklılığı ve duyarlılığı üzerindeki etkisini sunduk. FLRDS tekniği ile bir FOS'un hızlı yanıt, gerçek zamanlı izlenmesi ile sonuçlanan kolay bir kurulum kullandık. Bu çalışmada hedef, çıplak ve NDPD kaplı sensör kafaları ayrı ayrı kullanıldığında sistemin toplam optik kaybının farkını göstermektir. Elde edilen algılama limitleri, osiloskop, lazer kaynağı, fotodedektör gibi optik bileşenlerin herhangi bir kısıtlamasından tamamen bağımsızdır ve OSA, EDFA vb. gibi ek optik cihazlar gerektirmez. Sonuçlar, sensör kaplamasının sensör dayanıklılığını etkileyebileceğini ancak hassasiyet, sensör üretim süreçlerine bağlıdır. Bu tür sensörler, yapısal sağlık izleme, biyomedikal ve tıbbi uygulamalar, arazi kayması, çatlak algılama veya rüzgar türbini izleme uygulamalarında daha uzun ömür, gerçek zamanlı izleme, hızlı tepki ve yüksek hassasiyet avantajlarından yararlanmak için kullanılabilir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. FHDSS Tekniği

Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi (FHDSS) yöntemi birçok lazer pulsunun sönüme ulaşınca kadar dolanımı sayesinde çok etkili ve hassas bir yöntem olması nedeniyle, son 30 yıldır biyomedikal, yapısal sağlık görüntüleme, kimyasal element izleme uygulamalarda, tıp ve daha birçok alanda geniş bir uygulama alanı bulan bir tekniktir. FHDSS tekniğinde fiber halka içinde dolanan lazer ışınının sensör bölgesindeki emilimi/saçılması sonucu optik kayba uğrar. Bu sensör bölgesi fiberin bir parçası veya kolimatörler ile oluşturulmuş bir boşluk olabilir. Her halka için bu kayıp farklı olduğu için, lazer ışınının fiber halka döngü zamanındaki değişimi belirleme yeteneğine sahip olması nedeniyle çok küçük hacimlerdeki örnekleri dahi yüksek hassasiyette belirleme kabiliyetine sahiptir. Birçok uluslararası bilimsel çalışmalarda, tanınmış bilimsel dergilerde yer bulan çalışmalarda, FHDSS tekniği mevcut haliyle kabul edilerek yüksek bir potansiyele sahip olduğu kabul edilmiş ve desteklenmiştir. FHDSS tekniği, bir lazer ışınının fiber halka turundaki optik kaybını ölçen zamana dayalı bir tekniktir. Bir FHDSS sistemi dört ana bölümden oluşur; ışık kaynağı, fiber halka ile sensör bölgesi, detektör ve elektronik cihazlar. Lazer ışınları gerekli optik malzemeler ve bileşenler yardımı ile fiber halka içerisine gönderilir ve halka içerisinde döngüsü sağlanır. Bu lazer ışınının halkadaki her bir dolanımında, fiber halkadaki birleştiriciler (couplers) yardımıyla çok düşük miktarının halka içerisinden detektöre ulaşımına izin verilir. Her bir tur sırasında oluşan optik kayıplar kullanılan optik bileşenlere, kullanılan lazer ışını dalga boyuna, sensör bölgesinde bulunan ek bir basınç/gerilim uygulaması katsayılarına göre değişir. Optik sistemin bileşenlerinin aynı kalması koşulu ile sensör bölgesinde yapılacak değişiklikler her bir halka turu esnasındaki optik kaybı değiştireceğinden, halkada bulunan ışığın miktarındaki azalma sensör bölgesine uygulanan herhangi bir gerilim, basınç, ortamın kırılma indeksi değişimi veya emilim/soğurma/saçılma gibi parametreler hakkında bilgi verecektir. Sistemin temel amacı, sensör bölgesinde herhangi bir değişim (gerilim, basınç, vs) olmadan en düşük kayıplı sensör sistemini elde ederek en fazla sayıda halka içerisinde turu sağlayabilmektir. Böylece sensör bölgesinde oluşacak herhangi bir fiziksel değişimin verimli ve doğru ölçümü yapılabilecektir.



Şekil 1. FHDSS sisteminin deney düzeneği kurulumu.

Lazer ışık kaynağı kullanılarak oluşturulmuş bir FHDSS sisteminde, fiber optik bir kavitede hapsedilen lazer ışını, her bir turdaki kayıpları nedeniyle eksponansiyel bir azalış gösterir. Şekil 3 (b), Şekil 3 (a)'daki fiber halka döngü sisteminde hapsedilmiş bir tek lazer ışını pulsunun eksponansiyel eğrisini göstermektedir. Bu ise lazer pulsunun sönüm (ringdown) zamanı olarak bilinir. Benzer işlemlerden sonra veriler toplanıp azalma katsayısı aşağıdaki denklemlerle hesaplanır ve referansla karşılaştırılarak sensör bölgesinde oluşan değişimin etkisi bulunur. Bir lazer pulsu ışınının her bir geçişteki kaybına uygun olarak, zaman içerisindeki şiddeti;

$$I = I_0 e^{-(Act/nL)} \quad (1)$$

Burada I_0 fiber içerisine hapsedilen ilk lazer ışını şiddeti, A ışının tur başına toplam fiber iletim kaybı, c vakum ortamındaki ışık hızı, n ortalama fiber kırıcılık indisi ve L fiber halkanın toplam uzunluğudur. Fotodedektörün yakaladığı I ışın şiddetinin I_0/e değerine düşmesi için geçen zaman sönüm zamanı (ringdown time(RDT)) olarak isimlendirilir ve Eşitlik (2) ile verilir.

$$\tau_0 = nL/cA \quad (2)$$

$$\tau = nL/[c(A + B)] \quad (3)$$

Basınç, gerilim, kırıcılık indisi gibi bir ölçüm olayı sensör başlığında gerçekleştirilmeye başladıysa sistemde ek olarak bir optik kayıp oluşacaktır. Bu ek optik kayıp FHDSS

sensörünün sönüm zamanını Eşitlik (3)'te verildiği gibi değiştirecektir. Eşitlik (2) ve (3) kullanılarak ek optik kayıp olan B değeri hesaplanabilir:

$$B = (nL/c)(1/\tau - 1/\tau_0) \quad (4)$$

$$B_{\min} = (t_r/\tau_0)(\sigma/\tau_{\text{ave}}) = (1/m)(\sigma/\tau_{\text{ave}}) \quad (5)$$

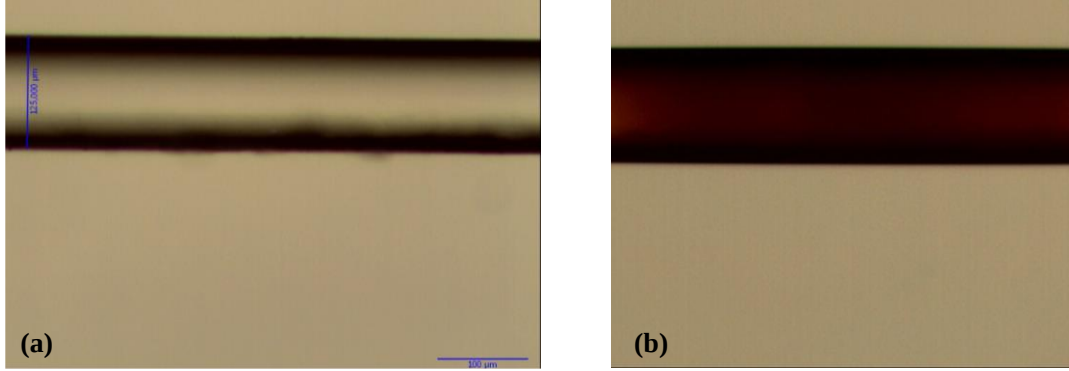
Eşitlik (5), gerilim, basınç veya sensör başlığı çevresindeki ortamın değişmesi gibi bir ölçüm aktivitesi gerçekleştiği zaman sensörün sönüm zamanlarının elde edilmesi ile ölçüm gerçekleştirilir. Bu projedeki bir FHDSS sensörü için B hava ve su çözeltileri arasındaki optik kayıp olarak kullanılacaktır. Hava ile her bir su çözeltisinin kırıcılık indisleri birbirinden farklı olduğu için sensör başlığı ve su arayüzeyinin optik kırıcılık indisi, sensör başlığı her su çözeltisine daldırıldığı zaman etkilenecektir. Böylece minimum ölçülebilir optik kayıp Eşitlik (4) ile hesaplanabilir. Burada t_r lazer ışınının fiber halkadaki bir dönme için aldığı zaman, m dönme sayısı ve σ standart sapma olarak verilir. σ/τ_{ave} sistemin baseline kararlılığını vermektedir. Bir FHDSS sensörünün iki farklı ortam için ölçebileceği minimum sönüm zamanı $\tau_{\min}$ sistemin baseline kararlılığı ve sensörün üzerinde herhangi bir ek optik kayıp olmadığı durumdaki sönüm zamanı kullanılarak belirlenir. Bu çalışmadaki FHDSS sensörü için m değeri 31, t_r değeri ise 489.4 ns olarak hesaplanmıştır.

2.2. Fiber Özellikleri

Çıplak SMF'nin kaplama ve çekirdek çapları üretici (Corning, ABD) tarafından sırasıyla 125 μm ve 8,2 μm olarak verilmektedir. Lazer darbesi fiber döngüsüne yayıldığında absorpsiyon kaybı, ekleme kaybı ve birleştiricilerdeki kayıplar dahil olmak üzere toplam sistem optik kaybı, 0.01 dB'ye kadar fiber ek kaybı nedeniyle 0.40 dB'den daha az bulundu.

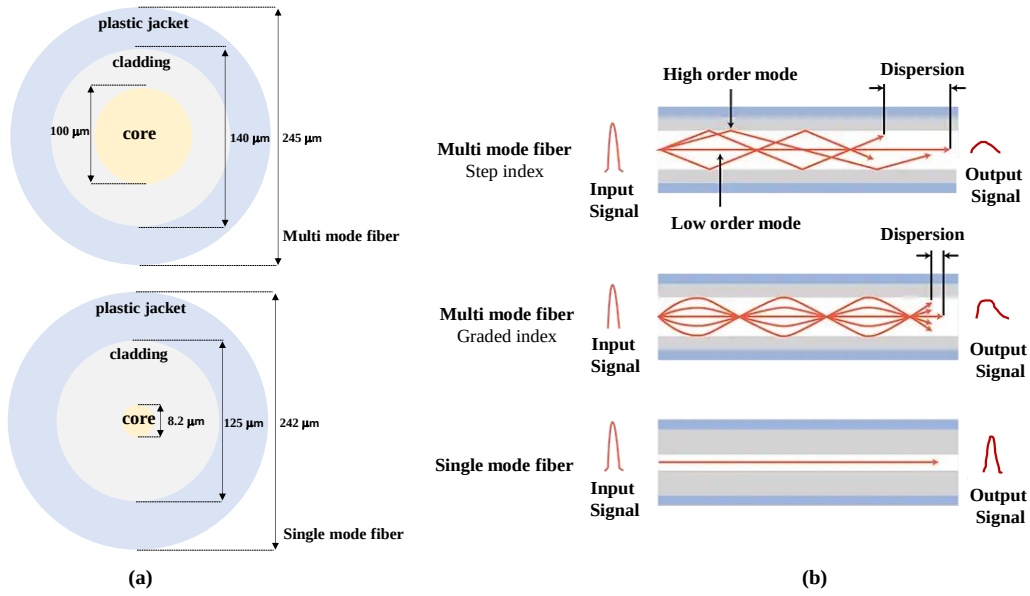
1550 $\pm$ 0,5 nm'lik merkezi dalga boyunda lazer darbesi oluşturmak için 14 pimli bir kelebek dış boşluk lazer diyotu kullanıldı. Çalışma akımında 282 mA ve 35.1 $^{\circ}\text{C}$ çalışma sıcaklığında 40 mW çıkış gücüne sahiptir. Lazer diyot sürücüsü, lazer diyot kontrollü çalışma sıcaklığı ve akımı sağlamaktadır. Fonksiyon üretici, üretilen lazer darbesini kare modüle etmek için kullanıldı. Lazer ışınının çok küçük bir miktarı (%0,1) ilk birleştirici tarafından fiber ilmeğe bağlanırken, ışının geri kalanı birleştirici tarafından 99.9:0.1 birleştirme oranı nedeniyle havaya gönderildi. Bu nedenle, ayrılan ışın, başka bir FLRDS sistemi için bir ışık kaynağı

olarak kullanılabilir. %0,1 lazer ışını, birkaç gidiş-dönüş yaşayan fiber döngü boyunca yayıldığından, %0,1'i, aynı bağlantı oranına (99.9:0.1) sahip ikinci birleştirici tarafından her gidiş dönüş sonunda dedektöre yönlendirilir. Bu nedenle, fotodetektör sinyalleri toplar ve verileri çizmek için osiloskopa gönderilir.



Şekil 2. Tek modlu fiberin a) kaplanmamış b) NDPD kaplanmış mikroskop görüntüleri.

Fiber optik kablolar, cam veya plastik malzemeler kullanılarak üretilir. Işık, fiberin çekirdeği aracılığıyla bir uçtan diğerine iletilir. İletim süreci, kaplama kırılma indisinden daha yüksek çekirdek kırılma indisi nedeniyle toplam iç yansımaya (TIR) göre gerçekleşir ve ışığın zayıflaması Beer Lambert Yasasına uyar. Işık kaynağı olarak lazer veya ışık yayan diyot (LED) ışık kaynakları kullanılmaktadır. Fiber optik kablolar metalik iletkenlerle karşılaştırıldığında, fiber optik kabloların en avantajlı özelliği, uzun mesafelere daha fazla bilginin oldukça düşük kayıpla aktarılmasında oldukça önemli olan bant genişliğidir. Ayrıca fiber optik kabloların elektriksel izolasyon ve elektromanyetik parazitlere karşı bağışıklık, küçük boyut, esneklik, ağırlık ve taşınabilirlik gibi birçok avantajı vardır [14,16, 69,70]. Fiber optik kablolar, iletişim ve aydınlatmadan güç dağıtımına ve algılamaya kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir.



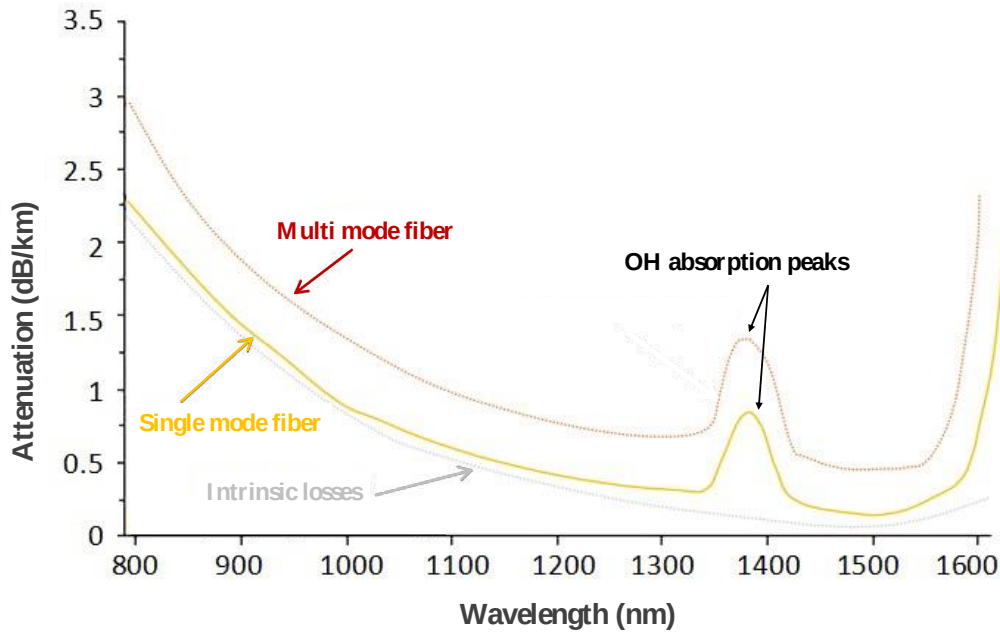
Şekil 3. a) Tek modlu fiberin yapısı ve b) fiber optik indeks türleri.

Şekil 3.a'da gösterildiği gibi, bir fiber optik kablo koruyucu kaplama tabakası olarak çekirdek, kılıf ve plastik kılıftan oluşur. Çekirdek bölgesindeki ışığın kılavuz tipine bağlı olarak, fiberler Şekil 3.b'de gösterildiği gibi üç gruba ayrılabilir: 1) adım indeksli çok modlu fiberler, 2) dereceli indeksli çok modlu fiberler ve 3) tek modlu fiberler. Tek modlu fiberlerde, ışık bir yol boyunca yönlendirildiği için yalnızca temel mod (01 modu) iletilir. Tek modlu fiberlerde fiber öz ve kaplama yarıçapı üretici firma (Corning, Inc. Co. NC, ABD) tarafından sırasıyla 8.2 μm ve $125.0 \pm 0.7 \mu\text{m}$ olarak verilmektedir [71]. Kaplama çapı $242.0 \pm 5.0 \mu\text{m}$ olarak verilmiştir. Işık çok dar bir bölge boyunca hareket ettiğinden, çekirdek kaplama arayüzünden yansıma, çok modlu fiberlerden çok daha düşüktür. Tek modlu fiberlerde çok önemli bir parametre, ışığın fibere kabul açısı ile ilişkili sayısal açıklık (NA) değeridir. Çünkü NA'ya bağlı olan dalga boyu kesme değeri fiber tipini karakterize eder. Cutoff dalga boyu değerinin altında, daha yüksek dereceli modlar, sıfır dereceli mod ile birlikte iletebilir. Bu nedenle, dalga boyu kesme değeri, dolayısıyla NA değeri, ister çok modlu ister tek modlu fiber olsun, fiber özelliklerini karakterize etmede kritik bir rol oynar.

Çok modlu fiberdeki çekirdeğin çapı, tek modlu fiberden çok daha büyük olduğundan, çok modlu fiberlerde daha yüksek dereceli modlar iletebilir. Çok modlu dereceli indeksli fiberlerdeki çekirdek kırılma indisi, çekirdek kaplama arayüzüne doğru radyal olarak azalır. Bu nedenle, ışık çekirdek kaplama arayüzünde çekirdek merkezinden daha hızlı yayılır. Çok modlu kademeli indeks fiber bant genişliği, adım indeksli fiberlerden daha yüksek olmasına

rağmen, yine de tek modlu fiber bant genişliklerinden daha düşüktür. Geniş bir çekirdek ve kaplama yarıçapına sahip çok modlu fiberler pazarlarda mevcuttur [72-75]. Genel olarak, yerel alan ağları olarak orta menzilli iletişim için çok modlu dereceli indeks fiberler kullanılır.

Çok modlu adım indeksli bir fiberdeki çekirdek kırılma indisi, çekirdek merkezinden çekirdek/kaplama arayüzüne doğrusal olarak değişir. Çok modlu adım indeksli fiberlerde modların yol uzunlukları farklı olduğu için dispersiyon problemi oluşur. Bu nedenle, bu tür lifler kısa mesafeli iletimlerde kullanılır.



Şekil 4. Farklı fiber modlarında dalga boyu ile atenüasyon ilişkisi.

Mevcut çalışmada, fiber döngüsünü kurmak için 1550 nm merkezi dalga boyunda 120 m'lik çıplak olmayan tek modlu fiber kullanıldı. Tek modlu fiber ve 1550 nm merkezi dalga boyunun seçim nedenleri şunlardır: i) daha düşük kayıp oranı ile uzun mesafe iletimi, ii) daha dar çıkışlı lazer darbesinin ölçülen büyüklüklerle etkileşimi nedeniyle artan hassasiyet, iii) Şekil 4'te görüldüğü gibi, daha düşük zayıflama 1550 nm bölgesinde tek modlu fiber.

Sistem optik kaybı, desibel (dB) cinsinden zayıflama olarak bilinir ve şu şekilde hesaplanır:

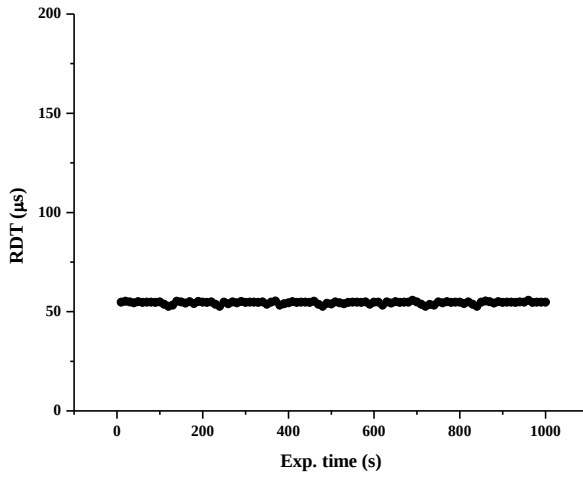
$$A \text{ (dB)} = 10 \log (P/P_0) \quad (6)$$

burada P_0 ve P sırasıyla giriş ve çıkış sinyallerinin ışıık gücüdür. Fiber zayıflaması, Şekil 4'te gösterildiğı gibi dalga boyuna güçlü bir şekilde bağılıdır.

Fiber döngü halkalama sistemi hassasiyetini etkileyen parametrelerden biri, toplam zayıflama ile ilgili toplam optik kayıptır. Bir optik fiberde zayıflamanın çeşitli nedenleri Rayleigh saçılması, absorpsiyon ve bükölme olarak bilinir. Rayleigh saçılması için, çekirdek malzemenin mikro ölçeğindeki kırılma indisi varyasyonları, önemli miktarda ışıık saçılmasına neden olacak, dolayısıyla önemli optik kayıplara neden olacaktır. Sistemimizde Rayleigh saçılması etkisi, dalga boyuna bağılı olduğı için çok düşüktür. Absorpsiyon, sistemin toplam kaybında biraz etkilidir, ancak üreticiler tarafından kirlilikler tarafından önemli ölçüde azaltılır. Eğilme, zayıflamada kritiktir çünkü optik kayıp, azalan bükölme yarıçapı ile katlanarak artar [76].

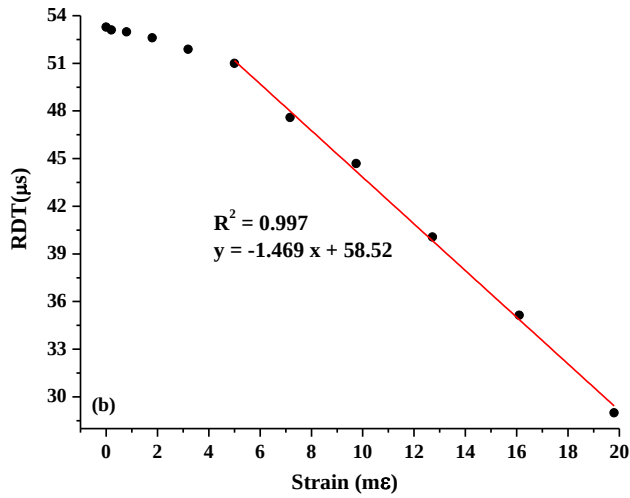
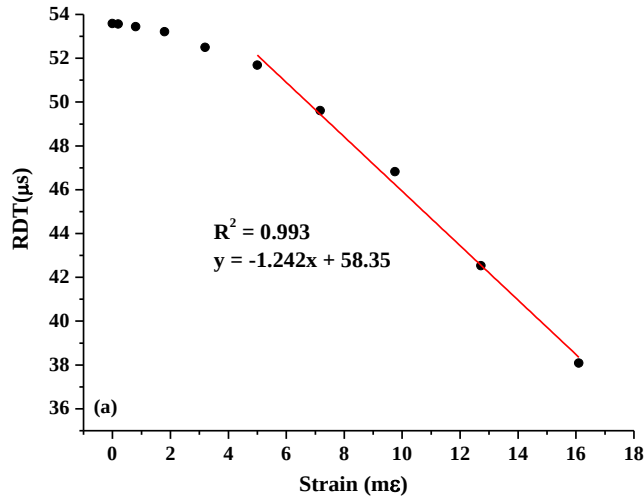
3. BULGULAR

Şekil 5, kaplanmamış sensör başlığına sahip FLRDS sisteminin temel verilerini göstermektedir. 10 cm uzunluğundaki sensör başlığı kademelerde silikon ile sabitlendi ve ardından sensörün RDT'si 54,5 μ s olarak kaydedildi. 10 sn'lik adımlarla 128 ortalama 100 veri kaydedildi. Veri setine dayalı olarak, 1- σ standart sapma ve ortalama RDT kullanılarak sistemin başlangıç kararlılığı %1,18 olarak hesaplanmıştır. Bu tür bir sistem tarafından saptanabilir en düşük optik kayıp Denklem 5 kullanılarak 105,96 μ dB olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. FHDSS sensör sisteminin temel (baseline) eğrisi.

Şekil 6, hem kaplanmamış hem de kaplanmış sensör kafalarının esneme verilerini gösterir. Şekil 6.a.'da kaplanmamış sensör kafası 1 mm'lik adımlarla orta noktadan 9 mm'ye kadar gerdirilmiştir. İlk dört veri arasındaki RDT değişimi çok düşüktü, bu nedenle fiberin ve sabit noktaların mikro uzamasına atfedilebilir. Diğer veriler, artan germe mesafesi ile doğrusal davranış gösterdi. Gerilme mesafesi arttıkça gerinim değeri de artar. Kaplamasız sensör başlığı için gerinim duyarlılığı 4.34×10^{-3} ϵ olarak hesaplandı.



Şekil 6. 10 cm'lik sensör başlığına sahip a) kaplanmamış ve b) kaplanmış sensör başlıklarının lineer eğrileri.

Şekil 6.a'da, FLRDS sistem hassasiyetini ve çalışma prensibini göstermek için iki bitişik veri arasındaki optik kayıp hesaplanmıştır. Sensör başlığı gerilmemiş konumdan 1 mm uzatıldığında optik kayıp değişimi 4.43 μdB olarak hesaplandı. Bu optik kayıp değeri, sistem minimum algılanabilir optik kayıp değerinden çok daha düşüktür. Bu nedenle, bu tür bir FLRDS sistemi ile ölçülemez. Bu nedenle, ilk dört veri değeri arasındaki optik kayıp değişimi, hem fiberin hem de sabit uçlardaki mikro uzamaya bağlandı. Dördüncü ve beşinci veriler

arasındaki optik kayıp, ölçülebilir minimum optik kayıptan daha yüksek olan ve bu tür bir sistem tarafından tespit edilebilen 125.1 μ dB olarak hesaplanmıştır. Kaplamasız sensör kafası 9 mm'ye kadar uzatıldı çünkü daha fazla germe mesafeleri sensör kafasının kırılmasına neden olabilir. Şekil 6.b. için, iki bitişik veri arasındaki optik kayıp aynı şekilde hesaplanabilir. Kaplamalı sensör sistemi için gerinim duyarlılığı $5,69 \times 10^{-3}$ ϵ olarak hesaplanmıştır. FLRDS sistem hassasiyeti aynı olduğundan, sistem minimum ölçülebilir optik kaybı aynı olacaktır. İlk dört veri arasındaki optik kayıp değişikliği, bu tür FLRDS sistemi tarafından saptanabilir minimum optik kayıptan daha düşük olduğundan, mikro uzamalara atfedilebilir. Dördüncü ve beşinci veriler arasındaki optik kayıp değişimi, bu tür FLRDS sisteminin tespit edilebilir minimum kaybindan daha yüksek olan 130.2 μ dB olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, bu değişiklik ölçülebilir ve daha fazla uzatılmış veriler arasındaki optik kayıp değişimi gözlemlenebilir. Şekil 6'da gösterildiği gibi, kaplama sensör kafasının sensör dayanıklılığını arttırdığı ancak sensör hassasiyetini değiştirmedığı sonucuna varılabilir. Sensör kafası kazınmış fiber ile hazırlanırsa sensör hassasiyeti değişikliği gözlemlenebilir. Daha küçük fiber yarıçapı, daha yüksek sensör hassasiyeti.

Önceki çalışmamızda [17], 80 cm ve 10 cm çıplak sensör kafaları, fiber ilmekli çıplak SMF fiber kullanılarak ve iki disk arasına yerleştirilerek, literatürdeki en düşük temel stabilite olan %0.22 temel stabilite FLRDS sistemi ile kullanılmıştır. Sensör kafaları orta noktalardan ve orta noktalardan gerildi. 10 cm sensör kafası orta noktadan 1 cm 0,5 cm'lik adımlarla gerildi. Sensör kafası uzunluğu ne kadar küçük olursa, daha yüksek optik kayıp ve diğer uzantılarda kırık sensör kafası oluşturması nedeniyle uzatma mesafesi o kadar küçük olur. Mevcut çalışmada, FLRDS sisteminin davranışı, önceki çalışmamızdaki [17] FLRDS sistemi ile 10.0 cm sensör başlığı orta noktadan gerildiğinde benzerdir. İlk olarak, birkaç veri sensör kafası uzaması ile ilgilidir ve geri kalanı doğrusal davranış sunar. Diğer bir çalışmada, Habel ve Bismarck [77] sentetik optik fiberlerin polimerik kaplama etkisini incelemiştir. Çok ince organik tabaka kaplanmış fiberin beton ortamındaki dayanım değişimini araştırmışlardır. Sonuçlardan, polimerik kaplamaların betonun sertleşmesi sırasında gömme prosedüründen, ilk prizden ve büzülmeden kurtulduğunu bulmuşlardır. Ayrıca polimerik kaplama gömme işleminde elyafın dayanıklılığını artırsa da çimento karışımındaki kimyasal işlemler sensör kaplamayı uzun süre etkilemiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada, fiber halkadan 10 cm SMF, hem kaplanmamış hem de NDPD kaplanmış sensör kafası olarak kullanılmış ve orta noktalardan denge konumlarından sırasıyla

9.0 mm ve 10.0 mm'ye 1.0 mm'lik adımlarla gerilmiştir. Sonuçlar, NDPD kaplı sensör kafasının, kaplamasız sensör kafasından daha iyi dayanıklılık gösterdiğini gösterdi. Bu nedenle, sensörler zorlu ortamlarda kullanılacak veya uzun süreli kullanım için sensör dayanıklılığını artırmak için diğer gömülü sistemler kaplanabilir. FLRDS sistemli bu tür sensörler, düşük maliyet, yüksek hassasiyet, gerçek zamanlı ölçüm ile hızlı tepki ve taşınabilirlik imkanı ile gömülü sistemlerde, yapısal sağlık izlemede, fiziksel, kimyasal veya biyolojik tür tespit uygulamalarında kullanılabilecek çekici bir potansiyele sahip olabilir.

4. SONUÇ

FOS'ların dayanıklılığı ve hassasiyeti için kaplamanın sensör kafası üzerindeki etkisini araştırmak için, kaplanmamış ve NDPD kaplı 10.0 cm sensör kafaları, 1.0 mm'lik adımlarla sırasıyla orta noktalardan 9.0 mm ve 10.0 mm'ye kadar gerildi. İlk olarak, fiber özellikleri ve faktörleri, sistemin sınırlamaları ve optimizasyonu detaylı olarak açıklanmıştır. Ardından, deneysel sonuçlar analiz edilir. FLRDS sisteminin minimum algılanabilir optik kaybının hesaplanmasında önemli rol oynayan en düşük taban çizgisi %1,18 olarak elde edilmiştir. Kaplamasız ve NDPD kaplamalı sensörlerin gerinim duyarlılıkları sırasıyla 4.34×10^{-3} ϵ ve 5.69×10^{-3} ϵ olarak hesaplanmıştır. Kaplamasız ve kaplamalı sensör davranışları benzer eğilim gösterse de kaplamalı sensör daha yüksek dayanıklılık göstermiştir. Sonuçlar, sensör kafasındaki NDPD kaplamanın sensör dayanıklılığını arttırdığını ancak sensör hassasiyetini değiştirmediğini gösterdi. Diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu tür FLRDS sensörlerinin gerinim hassasiyetleri çeşitli avantajlara sahiptir, bu nedenle OSA, FPI ve FBG gibi herhangi bir ekstra optik bileşen veya herhangi bir hava/boşluk içermeyen FLRDS sensörlerinin erken tespit çalışmalarında kullanılma potansiyeli yüksektir. gerilmeyi gerçek zamanlı olarak belirlemek için yapısal sağlık izleme, arazi kayması, ulaşım, rüzgar türbini, demiryolları vb. gibi çeşitli uygulamalarda.

KAYNAKLAR

1. B. N. Mao, W. W. Chen, C. L. Zhao, Y. Shi, C. Y. Shen and S. Z. Jin. Reflective temperature sensor based on a fiber Bragg grating combined with a fiber loop ringdown technique, *Applied Optics* 59, 5693-5696, 2020.
2. X. Deng, D. Wang, L. Pan, L. Zhang, J. Zhang, X. Lu, C. Du and L. Zhang. Static ice pressure measuring system based on fiber loop ring-down spectroscopy and FPGA. *Sensors* 20, 5927, 2020.
3. W. W. Chen, C. L. Zhao, Z. K. Wang and B. N. Mao. Curvature sensor based on SMF taper in fiber loop ring down system, *Opt. Fiber Technol.* 52, 101977, 2019.
4. J. Yang, L. Yang, J. Wang, Z. Zhang, Y. Gong and K. Li. The stability of chaotic correlation fiber loop ring down system with loss compensation. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS* 31, 6, 2019.
5. Z. Chen, C. Cheng, Y. Ou, Z. Yang, J. Chen and H. Lv. Multipoint strain sensing system based on fiber loop ringdown and frequency-shifted interferometry, *Proceedings Volume 11338, AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology; 113380O* (2019).
6. C. Sun, M. Wang, Y. Dong, S. Ye and S. Jian. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on NCF cascaded with ECSF in fiber loop mirror, *Opt. Fiber Technol.* 48, 45-49, 2019.
7. S. Pevec and D. Donlagic. Miniature fiber-optic sensor for simultaneous measurement of pressure and refractive index, *Opt. Lett.* 39, 6221-6224, 2014.
8. C. Wang. Fiber loop ringdown - a time-domain sensing technique for multi-function fiber optic sensor platforms: current status and design perspectives, *Sensors*, 9, 7595-7621, 2009.
9. Y. Zhao, L. Bai, B. Han and Q. Wang. Review on advances of sensors based on fiber loop ring-down spectroscopy, *Instrumentation Science & Technology* 41, 349-364, 2013.
10. S. O. Silva, R. Magalhães, M. B. Marques, O. Frazão. New advances in fiber cavity ring-down technology, *Opt. Laser Technol.* 78, 115-119, 2016.
11. G. Gagliardi and H. Peter-Löock. *Cavity enhanced spectroscopy and sensing*, 2018 Springer, Berlin, Heidelberg.
12. G. Berden and R. Engeln, *Cavity- Ringdown spectroscopy techniques and applications*, 2009, Wiley, West Sussex, United Kingdom.
13. Kavita Sharma, *Sensitivity Enhancement in Optical Fiber-based Cavity Ring-down Sensors*, Indian Institute of Technology, PhD Thesis, 2018.
14. Betül Cengiz, *Fiber loop ring down spectroscopy for trace chemical detection*, Middle East Technical University, Master Thesis, 2013.
15. A Yolalmaz, MF Danişman, O Esenturk, Discrimination of chemicals via refractive index by EF-FLRD, *Applied Physics B* 125, 156, 2019.
16. Malik Kaya, *Time-domain fiber loop ringdown sensor and sensor network*, Mississippi State University, PhD thesis, 2013.
17. M. Kaya and O. Esenturk, Study of strain measurement by fiber optic sensors with a sensitive fiber loop, *Optical Fiber Technol.* 54, 102070, 2020.
18. M. Kaya and O. Esenturk, Highly sensitive fiber optic pressure sensors for wind turbine applications, *Turk J Elec Eng & Comp Sci.* 28, 2789-2796, 2020.
19. M. Kaya, Fiber optic chemical sensors for water testing by using fiber loop ringdown spectroscopy technique. *Turk J Elec Eng & Comp Sci.* 28, 2375-2384, 2020.

20. Q. Wang, X. Liu, Y. Zhao, R. Lv, H. Hu, J. Li. Magnetic field sensing based on fiber loop ring-down spectroscopy and etched fiber interacting with magnetic fluid. *Optic Commun.* 356, 628-633, 2015.
21. C. Wang and S. T. Scherrer. Fiber ringdown pressure sensors. *Opt. Lett.* 29, 352–354, 2004.
22. C. Wang and S. T. Scherrer. Fiber loop ringdown for physical sensor development: pressure sensor. *Appl. Opt.* 43, 2004, 6458-6464.
23. R. Li, C. Tian, Y. Zhang, J. Zhang, X. Chen and S. Liu. Simultaneous Measurement of Force and Temperature by a Multi-Position Fiber Loop Ringdown Sensor Array, *Journal of Lightwave Technology*, 33,3607-3612, 2015.
24. L. Chen, W. Zhang, Y. Liu, L. Wang, J. Sieg, B. Wang, Q. Zhou, L. Zhang and T. Yan. Real time and simultaneous measurement of displacement and temperature using fiber loop with polymer coating and fiber Bragg grating, *Review of Scientific Instruments* 85, 075002, 2014.
25. Hocker, G.B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Opt.* 1979, 18 1445–1448.
26. Kaya, M.; Wang, C. Detection of trace elements in DI water and comparison of several water solutions by using EF-FLRD chemical sensors. *AIP Conf. Proc.* 2017, 1809, 020027.
27. Yolalmaz, A.; Sadroud, F.H.; Danişman, M.F.; Esenturk, O. Intracavity gas detection with fiber loop ring down spectroscopy. *Opt. Commun.* 2017, 396, 141–145.
28. Wang, C.; Kaya, M.; Wang, C. Evanescent field-fiber loop ringdown glucose sensor. *J. Biomed. Opt.* 2012, 17, 037004.
29. Herath, C.; Wang, C.; Kaya, M.; Chevalier, D. Fiber loop ringdown DNA and bacteria sensors. *J. Biomed. Opt.* 2011, 16, 050501/1-3.
30. Kaya, M.; Wang. C. Fiber loop ringdown glucose sensors: initial tests in human diabetic urines. *Fiber Optic Sensors and Applications XI* 2014, 9098, 90980O.
31. Sahay, P.; Kaya, M.; Wang, C. Fiber loop ringdown sensor for potential real-time monitoring of cracks in concrete structures: an exploratory study. *Sensors* 2013, 13, 39–57.
32. Kaya, M.; Sahay, P.; Wang. C. Reproducibly reversible fiber loop ringdown water sensor embedded in concrete and grout for water monitoring. *Sens. Actuators B: Chem.* 2013, 176, 803–810.
33. Wang, C.; Kaya, M.; Sahay, P.; Alali, H.; Reese, R. Fiber optic sensors and sensor networks using a time-domain sensing scheme. *Optics and Photonics Journal* 2013, 3, 236–239.
34. Qiu, H.; Qiu, Y.; Chen, Z.; Fu, B.; Li, G. Strain measurement by fiber-loop ring-down spectroscopy and fiber mode converter. *IEEE Sensors J.* 2008, 8, 1180–1183.
35. Greenwood, J.; Dobre, G. Optical pressure sensor for an aeronautical application using white light interferometry, *Proc. SPIE* 2000, 4075, 94–100.
36. Seridevi, S.; Vasu, K.S.; Asokan, S.; Sood, A.K. Enhanced strain and temperature sensing by reduced graphene oxide coated etched fiber Bragg gratings. *Opt. Lett.* 2016, 41, 2604–2607.
37. Lydon, M.; Taylor, S.E.; Robinson, D.; Callender, P.; Doherty, C.; Grattan, S.K.T.; O'Brien, E.J. Development of a bridge weigh-in-motion sensor: Performance comparison using fiber optic and electric resistance strain sensor systems. *IEEE Sensors J.* 2014, 14, 4284–4296.
38. Wang, Y.P.; Xiao, L.; Wang, D.N.; Jin, W. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity. *Opt. Lett.* 2006, 31, 3414–3416.

39. Liu, S.; Yang, K.; Wang, Y.; Qu, J.; Liao, C.; He, J.; Li, Z.; Yi, G.; Sun, B.; Zhou, J.; Wang, G.; Tang, J.; Zhao, J. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber rectangular air bubble. *Sci. Rep.* 2015, 5, 7624.
40. Li, C.; Zhang, Y.; Liu, H.; Wu, S.; Huang, C. Distributed fiber-optic bi-directional strain displacement sensor modulated by fiber bending loss. *Sens. Actuators A: Phys.* 2004, 111, 236–239.
41. T. C. K. Aaron, I. J. Davis, and M. Chitra. CdS coated clad-modified fiber optic sensor for detection of NO₂ gas, *Mater. Res. Express* 6, 2019, 1050-1058.
42. Cortina H, Alonso C.M., Ortega M.C, and Hu H. Celulose acetat fibers covered by CdS nanoparticles for hybrid solar cell applications. *Mat. Sci. Eng. B*, 177, 2012, 1491-1496.
43. P. Samarasekara and P.A.S. Madushan. Structural and electrical properties of cds thin films spin coated on glass substrates. *Condens. Matter. Mat. Sci.* 2016, 9 pg.
44. Koç K., Tepehan F.Z., Tepehan G.G. Characterization of mps capped cds quantumdots and formation selfassembled quantumdots thin films on a glass substrate. *CHALCOGENIDELETTERS*, 8, 2011, 239-247.
45. Tarsa, P.B.; Brzozowski, D.M.; Rabinowitz, P.; Lehmann, K.K. Cavity ringdown strain gauge. *Opt. Lett.* 2004, 29, 1339–1341.
46. Zhou, W.; Wong, W.C.; Chan, C.C.; Shao, L.Y.; Dong, X. Highly sensitive fiber loop ringdown strain sensor using photonic crystal fiber interferometer. *Appl. Opt.* 2011, 50, 3087–3092.
47. Wang, H.; Jiang, L. Xiang, P. Improving the durability of the optical fiber sensor based on strain transfer analysis. *Opt. Fiber Technol.* 2018, 42, 97–104.
48. Coelho, L.; Queirós, R.B.; Santos, J.L.; Martins, M.C.L.; Viegas, D.; Jorge, P.A.S. DNA-Aptamer optical biosensors based on a LPG-SPR optical fiber platform for point-of-care diagnostic. In *Proceedings of the Plasmonics in Biology and Medicine XI. International Society for Optics and Photonics* 2014, 8957, 89570K.
49. Gu, Z.; Lan, J.; Gao, K. Characteristics of plasmon coupling mode in SPR based LPFG. *Opt. Quantum Electron.* 2016, 48, 171.
50. Hu, H.F.; Deng, Z.Q.; Zhao, Y.; Li, J.; Wang, Q. Sensing Properties of Long Period Fiber Grating Coated by Silver Film. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2015, 27, 46–49.
51. Wang, W.; Wu, W.; Huang, J.; Tian, X.; Fei, X. Modeling of a long-period fiber-optic grating-assisted surface plasmon resonance refractive index sensor. In *Proceedings of the Advanced Sensor Systems and Applications VII* 2016.
52. Lee, Y.K.; Lee, K.S.; Kim, W.M.; Sohn, Y.S. Detection of Amyloid-b42 Using a Waveguide-Coupled Bimetallic Surface Plasmon Resonance Sensor Chip in the Intensity Measurement Mode. *PLoS One* 2014, 9, e98992.
53. Frost, S.; Kanagasigam, Y.; Sohrabi, H.; Vignarajan, J.; Bourgeat, P.; Salvado, O.; Villemagne, V.; Rowe, C.C.; Macaulay, S.C.; Szoek, C.; Ellis, K.A.; Ames, D.; Masters, C.L.; Rainey-Smith, S.; Martins, R.N. Retinal vascular biomarkers for early detection and monitoring of Alzheimer's disease. *Transl. Psychiatry* 2013, 3, e233.
54. Nair, R.V.; Yi, P.J.; Padmanabhan, P.; Gulyas, B.; Murukeshan, V.M. Au nano-urchins enabled localized surface plasmon resonance sensing of beta amyloid fibrillation. *Nanoscale Adv.* 2020, 2, 2693–2698.
55. Wang, H.; Xiang, P.; Jiang, L. Optical fiber sensor based in-field structural performance monitoring of multilayered asphalt pavement. *J. Lightwave Technol.* 2018, 36, 3624–3632.
56. Maiman, T. H. Stimulated optical radiation in ruby, *Nature* 1960, 187, 493–494.

57. Armstrong, J. A.; Bloembergen, N.; Ducuing, J.; Pershan, P. S. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric, *Phys. Rev.* 1962, 127, 1918–1939.
58. Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics, fifth Edition, Elsevier Academic Press, 2013.
59. Van, C.L. Propagation technique for ultrashort pulses, *Reviews on Advanced Materials Science* 2010, 23(1), 8-20.
60. Lin C.; Stolen, R. H. Self-phase-modulation in silica optical fibers, *Physical Review A* 1978, 17, 1448.
61. Stolen, R. H.; Bjorkholm, J. E.; Ashkin, A. Phase-matched three-wave mixing in silica fiber optical waveguides, *Applied Physics Letters* 1974, 24, 308.
62. Stolen, R. Phase-matched-stimulated four-photon mixing in silica-fiber waveguides, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 1975, 11, 100.
63. Dudley J. M.; et al., Supercontinuum generation in photonic crystal fiber, *Reviews of Modern Physics* 2006, 78, 1135.
64. Husakou, A. V.; Herrmann, J. Supercontinuum Generation of Higher-Order Solitons by Fission in Photonic Crystal Fibers, *Physical Review Letters* 2001, 87, 203901.
65. Gordon, J. P. Theory of the soliton self-frequency shift, *Optics Letters* 1986, 11, 662.
66. Knight, J. C.; Birks, T. A.; Russell, P. St. J.; Atkin, D. M. All-silica single- mode optical fiber with photonic crystal cladding, *Opt. Lett.* 1996, 21(19), 1547-1549.
67. Gagliardi, G.; Loock, H-P. Cavity-enhanced spectroscopy and sensing. Springer Series in Optical Sciences, 179, 2014.
68. Wang, Q.; Farrel, G.; Yan, W. Investigation on Single-Mode-Multimode-Single-Mode fiber structure. *Lightwave Technol.* 2008, 26, 512-519.
69. Gupta, M. C.; Ballato, J. The Handbook of Photonics. 2006 CRC Press 2nd Ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, USA.
70. Yolalmaz A. Utilization of fiber loop ring down technique for sensing applications. MSc, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2017.
71. <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1463-AEN.pdf>
72. Mitschke, F. Fiber Optics: Physics and Technology. (Springer, Berlin, 2009).
73. https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2284
74. <https://www.edmundoptics.com/f/optical-grade-fiber-optics/11460/>
75. <https://guidingphotonics.com/hollow-fibers-optics-solutions-for-uv-and-visible-nir/#visible-nir>
76. Amanu, A. A. Macro bending losses in single-mode step index fiber. *Adv. Appl. Sci.* 2016, 1, 1-6.
77. Habel, W.R.; Bismarck, A. Optimization of the adhesion of fiber-optic strain sensors embedded in cement matrices; a study into long-term fiber strength. *J. Struct. Control* 2000, 7, 51–76.