

Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi Tekniğinin Eğitimsel Tanımı: Çalışma Prensibi ve Uygulama Alanları

Educational Description of the Fiber Loop Ringdown Spectroscopy Technique: Working Principle and Application Areas

Burak Malik KAYA ¹ 

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, 26480, Eskişehir, Türkiye

Öz

Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi (Fiber Loop Ringdown Spectroscopy (FLRDS)) (FHDSS) tekniği, bir fiber halkayı optik boşluk olarak kullanarak bir sistem içindeki soğurma ve saçılma kayıplarını ölçen ileri düzeyde hassas bir optik algılama tekniğidir. Bu teknik, fiber tabanlı konfigürasyonlara uyarlanmış Kavite Döngü Sönümlleme Spektroskopisi (Cavity Ringdown Spectroscopy (CRDS)) (KDSS) tekniğinden türetilmiştir ve kompakt boyut, mekanik dayanıklılık ve maliyet etkinliği gibi birçok avantaj sunmaktadır. FHDSS'nin temel çalışma prensibi, tek bir ışık sinyalinin fiber halka içerisine hapsedilmesi ve bu sinyalin fiber optik içerisinde tam iç yansıma yaparak fiber halka içinde birden fazla tur yapmasından dolayı ölçümlenecek numune ile birden çok kez etkileşimi sayesinde yüksek hassasiyetli ve hızlı ölçüm timeline'ine dayanır. Işık sinyalinin yoğunluğunun üstel olarak azalması analiz edilerek içsel optik kayıplar yüksek hassasiyetle belirlenebilir. FHDSS, optik ve fotonik alanlarında önemli bir eğitim değeri taşımaktadır. Tam iç yansıma, optik boşluk rezonansı ve üstel sönüm dinamikleri gibi temel optik fenomenlerin pratik olarak gösterilmesini sağlar. Ayrıca, öğrencilere ve araştırmacılara ileri düzeyde optik ölçüm teknikleri konusunda uygulamalı deneyim kazandırarak fiber tabanlı algılama sistemlerini daha iyi anlamalarına yardımcı olur. Eğitimsel öneminin ötesinde, FHDSS birçok farklı alanda geniş uygulama imkanına sahiptir. Çevresel algılama alanında, gaz izi takibi ve kirlenici izleme için yüksek hassasiyeti sayesinde çok düşük konsantrasyon değişimlerini bile belirleyebilir. Biyomedikal araştırmalarda, biyomoleküler etkileşimleri ve doku soğurma özelliklerini tespit ederek invaziv olmayan tanı süreçlerine katkı sağlar. Ayrıca, endüstriyel kalite kontrol alanında, optik bileşenlerin bütünlüğünü izlemek ve sıvı ile gazlardaki kirlenicileri tespit etmek için de kullanılır.

Anahtar Kelimeler: Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi, FHDSS, Optik algılama, Fiber optik sensörler

Abstract

Fiber Loop Ringdown Spectroscopy (FLRDS) is a highly sensitive optical sensing technique that measures absorption and scattering losses within a system by employing an optical fiber loop as the cavity. Derived from Cavity Ringdown Spectroscopy (CRDS)—a well-established method in optical detection—FLRDS adapts the principles of CRDS into a fiber-based configuration, offering numerous advantages such as compactness, mechanical robustness, and cost-effectiveness. The core operating principle of FLRDS is based on trapping a single optical pulse within a fiber loop, allowing the light to undergo multiple internal reflections due to total internal reflection. As the light pulse circulates within the loop, it interacts repeatedly with the sample under investigation, thereby enhancing measurement sensitivity and temporal resolution. By analyzing the exponential decay of the light intensity, intrinsic optical losses can be determined with high precision. FLRDS holds significant pedagogical value in the fields of optics and photonics. It provides a practical platform for demonstrating fundamental optical phenomena such as total internal reflection, optical cavity resonance, and exponential decay dynamics. Furthermore, it equips students and researchers with hands-on experience in advanced optical measurement techniques, thereby fostering a deeper understanding of fiber-based sensing systems. Beyond its educational significance, FLRDS offers a wide range of applications across multiple disciplines. In environmental sensing, it enables the detection of trace gases and monitoring of pollutants with high sensitivity, even at very low concentration levels. In biomedical research, it facilitates non-invasive diagnostics by detecting biomolecular interactions and tissue absorption characteristics. Additionally, in industrial quality control, it is employed for monitoring the integrity of optical components and detecting contaminants in liquids and gases.

Keywords: Fiber Loop Ringdown Spectroscopy, FLRDS, Optical sensing, Fiber optic sensors

I. GİRİŞ

Optik algılama teknikleri çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda son derece önemli olup fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin hassas bir şekilde tespit edilmesini ve analiz edilmesini sağlar. Bu teknikler arasında Fiber Halka Döngü Sönümleme Spektroskopisi (FHDSS), optik sistemlerdeki absorpsiyon ve saçılma kayıplarını ölçmek için son derece hassas ve verimli bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. FHDSS tekniği geleneksel olarak serbest uzay optik boşluklarında kullanılan Kavite Döngü Sönümleme Spektroskopisi (KDSS) tekniğinden [1-3] türetilmiş ve fiber tabanlı konfigürasyonlara uyarlanmıştır. Bu adaptasyon, kompaktlık, taşınabilirlik, mekanik dayanıklılık ve maliyet etkinliği gibi çeşitli avantajlar sunarak FHDSS tekniğini geleneksel optik algılama yöntemlerine cazip bir alternatif haline getirmektedir.

FHDSS tekniğinin temel prensibi, bir ışık darbesinin bir fiber halka içerisine enjekte edilmesi ve tam iç yansıma nedeniyle halka içerisinde birçok tur yaparak yayılması, bu nedenle ölçülmesi istenen parametreyi içeren numune ile birden fazla etkileşimi sonucu yüksek doğruluk ve hızlı ölçüm ile analizinin gerçekleşmesi temeline dayanır. Işık sinyali fiber halkada ilerledikçe, soğurma, saçılma ve birleştirici (kuplör) kayıpları gibi iç optik kayıplar nedeniyle yoğunluğu üstel olarak azalır. Bu azalma oranı analiz edilerek fiber halkadaki ortamın optik özellikleri yüksek hassasiyetle belirlenebilir. FHDSS tekniğinin bu çok geçişli yapısı, Foruer Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Foruer Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)) veya Ultraviyole ve Görünür Işık Spektroskopisi (Ultraviolet and visible light spectroscopy (UV-VIS)) [4-7] gibi tek geçişli analiz tekniklerine kıyasla ölçüm doğruluğunu ve hassasiyetini artırmaktadır.

Teknik avantajlarının ötesinde, FHDSS tekniği optik ve fotonik alanında önemli bir eğitim aracı olarak da görülmektedir. Bu teknik, optik boşluk rezonansı, tam iç yansıma ve üstel sönüm dinamikleri gibi temel optik prensipleri pratik olarak göstermek için kullanılır. İleri düzeyde optik ölçüm deneyimi sağlayarak fiber tabanlı algılama sistemlerine dair anlayışı geliştirir [8-12].

Ayrıca, FHDSS tekniği geniş bir bilimsel ve endüstriyel uygulama yelpazesinde çok yönlülüğünü kanıtlamıştır. Çevresel izleme alanında, yapısal sağlık izleme için çatlak, basınç ve sıcaklık algılama [13-16], gaz izi tespiti ve kirlenici analizinde [17-21] FHDSS tekniğinin yüksek hassasiyetinden faydalanılarak küçük konsantrasyon değişikliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır. Biyomedikal araştırmalar alanında,

FHDSS biyomoleküler etkileşimleri, türleri, miktarları ve doku soğurma özelliklerini ölçerek invaziv olmayan tanımlara olanak sağlar [22-25]. Örneğin, FHDSS tekniğinin kullanıldığı bir fiber optik sensör, beton küp içerisine gömülerek beton blok içerisindeki su sızıntısının takibi için kullanılmış ve 0.12 ml system algılama hassasiyeti elde edilmiştir [26]. Başka bir FHDSS sensörü, laboratuvar ortamında üretilen beton çubuklar içerisine gömülmüş ve bu çubuklar üzerinde kontrollü çatlaklar oluşturularak, teorik yüzey çatlak genişliği 0.5 mm olan beton çubuklarda çatlak sensörü olarak kullanılmıştır [27]. Başka bir çalışmada, azot gazı referans olarak kullanılmış ve 0.1% tespit limiti ile asetilen ölçümü için hassas bir FHDSS sensörü dizayn edilmiştir [28]. Biyosensör uygulamaları olarak yukarıda verilen referanslar analiz edildiğinde; çalışmalardan birinde [22] üç farklı DNA türü ve bir bakteri için kütle kırılma indisi bazlı ve DNA için yüzey kırılma indisi bazlı tespit yapan bir FHDSS biyosensörü kullanılmıştır. Diğer bir çalışmada [23], glikoz oksidazın aşındırılmış fiber üzerine immobilizasyonu ile evanescent alan-FHDSS sensörü kullanarak 10 mg/dl olarak tahmin edilen teorik tespit limitiyle glikoz tespitine odaklanmıştır. Başka bir FHDSS sensörü çalışmasında [25], Alzheimer tespiti için beta-amiloid izlenmesine yönelik bir uygulama olmuştur. Farklı bir çalışmada ise, tüberküloz biyobelirteci olan lipoarabinomannanın tespiti için bir fiber rezonans halkası biyosensörü kullanılmış ve 10 pg/mL tespit limiti elde edilmiştir [29]. Ayrıca, bu teknik optik bileşenlerin bütünlüğünü izleme ve sıvılar ile gazlardaki kirlenici tespiti etme amacıyla endüstriyel kalite kontrol süreçlerinde de önemli bir rol oynamaktadır. FHDSS tekniğinin uyarlanabilirliği, optik fiberlerin ve konnektörlerin mutlak kayıplarını ölçme ile makrobükülme ve fiber yanlış hizalamalarından kaynaklanan kayıpları tespit etme uygulamalarıyla daha da pekiştirilmektedir. FHDSS tekniği ve uygulamaları hakkında daha detaylı bilgi edinmek isteyenler yukarıda verilen referanslardan yararlanabilirler [2,8,20].

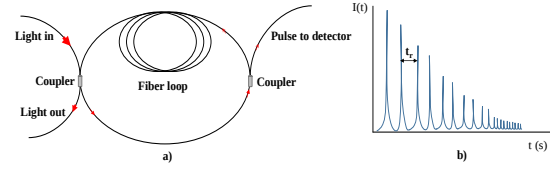
FHDSS tekniği gelişmeye devam ettikçe, optik algılama teknolojilerini ilerletme potansiyeli giderek daha önemli hale gelmektedir. Teknoloji olgunlaştıkça, sensör tasarımı, sistem entegrasyonu ve veri analizindeki ilerlemeler, uygulama alanlarını genişleterek optik algılama cihazlarının hem hassasiyetini hem de çok yönlülüğünü artıracaktır. Bu makale, FHDSS'nin çalışma prensibini, optik eğitim üzerindeki etkisini ve çeşitli uygulama alanlarını inceleyerek, bu tekniğin modern bilimsel araştırmalar ve endüstriyel uygulamalardaki artan önemini vurgulamaktadır.

II. ÇALIŞMA PRENSİBİ

FHDSS tekniği, KDSS tekniğinden türetilmiş, özellikle fiber tabanlı konfigürasyonlara uyarlanmış, gelişmiş bir optik algılama tekniğidir. Bu yöntem, optik soğurma ve saçılma kayıplarını yüksek hassasiyetle ölçmek için rezonans boşluğu olarak bir optik fiber halkası kullanır [30]. Teknik, ışık zayıflaması ve üstel bozunum ilkelerinden yararlanarak incelenen numune hakkında kritik bilgileri çıkarır.

FHDSS tekniği, bir optik fiber halkası içindeki ışığın bozunum süresini ölçerek bir ortamın absorpsiyon ve saçılma özelliklerini nicelleştiren bir optik algılama tekniğidir. FHDSS'nin temel prensibi, fiber optik halkaya enjekte edilen ışığın, fiber boyunca yayılırken zamanla nasıl bozulduğunu ölçen "ringdown" süresine dayanır. Işık fiber halkasına girdiğinde, fiber içinde dolaşır ve fiberin içindeki ya da çevresindeki ortamla etkileşime girerek birçok tur atar. Ortam içinde meydana gelen herhangi bir absorpsiyon veya saçılma olayı, ışık şiddetinin zamanla azalmasına neden olur. Bu bozunum oranı (ringdown süresi) hassas bir şekilde ölçülerek, FHDSS çok küçük konsantrasyonlardaki absorplayıcı veya saçıcı türleri yüksek hassasiyetle tespit edebilir. Bu teknik, ışık şiddetindeki küçük değişimlere karşı olağanüstü hassasiyeti nedeniyle iz miktardaki gazları, sıvıları veya biyomolekülleri tespit etmek için son derece etkilidir. FHDSS tekniği, çevresel izleme, kimyasal analiz ve biyomedikal uygulamalar gibi hassas ve non-invaziv ölçümlerin kritik olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

FHDSS tekniğinde, bir lazer kaynağından gelen ışık sinyali bir fiber halkasına bağlanır. Işık kaynağı hızlıca kapatıldığında, halka içerisine hapsedilen ışık sinyali halkada birçok tur yaparak ilerler (Şekil 1.a). Her bir turda, fotodetektör fiber kuplör (coupler) aracılığıyla ışığın küçük bir kısmını alır ve zayıflayan ışık sinyali fibred iç iletim kayıplarına uğrayarak halkada ilerlemeye devam eder. Dedektörde gözlemlenen sinyal, zamanla üstel olarak azalan bir dizi darbe şeklindedir. Azalma sabiti, ringdown süresi olarak adlandırılır ve bu süre FHDSS tekniğinin algılama parametresidir. Bir zaman-döngü algılama tekniği olarak FHDSS, herhangi bir parametreyi veya miktarı algılamak için ringdown sürelerini ölçer. Şekil 1.b ise bu dönüşten elde edilmiş bir sönümlenme grafiğidir. Her bir darbe arası ringdown süresine (t_r) eşittir.

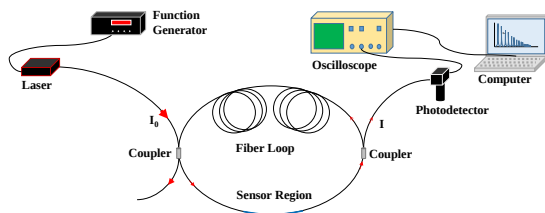


Şekil 1. a) Fiber halkasının şematik gösterimi ve b) bir fiber halkasından elde edilen ringdown verisi

2.1. Temel Mekanizma

Bir FHDSS sistemi, bir ışık kaynağı, bir fonksiyon jeneratörü, aynı kuplörlerle sahip bir fiber halkası, bir fotodetektör, bir osiloskop ve FHDSS yazılımına sahip bir bilgisayardan oluşur. Bir FHDSS sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.'de verilmiştir. Fiber tipi, ışık kaynağına göre uygun şekilde seçilmelidir. Kuplörler, çalışma alanına göre 50:50, 90:10 veya 99.9:0.1 gibi farklı oranlarda seçilebilir. Fiber halkası uzunluğunu seçerken önemli nokta, minimum halkası uzunluğunun bağlı ışık darbesinin halkada bir tur atma süresinden uzun olması gerektiğidir.

FHDSS tekniğinde, kısa bir lazer ışık sinyali kapalı bir fiber halkasına (yüksek hassasiyet ve duyarlılık için genellikle tek modlu optik fiberden yapılmış ve kuplör oranı düşük olan fiber halkalar tercih edilir) içine verilir. Işık, toplam iç yansıma nedeniyle halkada ilerler ve birden fazla tur yapar. Her bir turda, ışığın bir kısmı dışarıya kuplör aracılığıyla çıkarılır ve bir fotodetektör tarafından tespit edilir. Halkadaki dolaşan darbenin şiddeti, optik kayıplar nedeniyle üstel olarak azalır; bu kayıplar arasında iç fiber zayıflaması, saçılma ve sisteme tanıtılan örnek nedeniyle meydana gelen absorpsiyon yer alır.



Şekil 2. Bir FHDSS sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 2'deki görselde, fiber halkasına hapsedilen ışık darbesi (I_0) halka içerisinde birçok tur attığı için, fotodetektör tarafından toplanan çıkış sinyali (I) bir azalma gösterir. Bu davranış şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{IAc}{nL} \quad (1)$$

Işığın yoğunluğunun I , zaman t 'ye bağlı olarak azalması üstel bir ilişkiyi takip eder. Denklem 1'in çözümü, ışık yoğunluğunun davranışını şöyle verir:

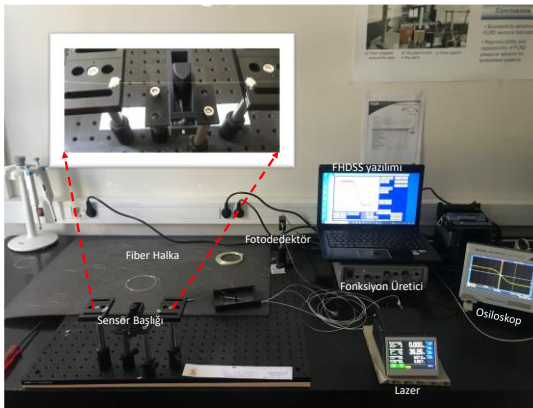
$$I = I_0 e^{\left(-\frac{c}{nL}At\right)} \quad (2)$$

Burada I_0 başlangıç ışık şiddetini, c m/s cinsinden vakum altındaki ışık hızını, n fiberin kırılma indisini, L fiber halkasının metre cinsinden uzunluğunu ve A her bir turda ışığın fiberdeki toplam iletim kaybını temsil eder. Bu denklemdeki ışık şiddeti genellikle dedetörde ölçülen optik güç olup birimi watt (W) veya miliwatt (mW) olarak verilir. Denklem (2), FHDSS tekniğindeki ışık yoğunluğunun azalma hızını ölçtüğünü, mutlak yoğunluk değişikliği ΔI 'yi ölçmediğini gösterir. Bu nedenle, A 'nın ölçümü, yani gelen ışık (I_0) yoğunluğundaki dalgalanmalara duyarlı olduğunu söyler. Toplam iletim kaybı, fiberin soğurma kaybı, fiber birleştiricilerinin yerleştirme kayıpları ve fiber saçılma kaybindan oluşur ve şu şekilde verilir:

$$A = \alpha L + E + \gamma \quad (3)$$

Burada α fiber çekirdek malzemesinin cm^{-1} biriminden dalgaboyuna bağlı soğurma katsayısı, E fiber birleştiricilerin toplam iletim kaybı ve γ toplam fiber saçılma kaybıdır. Bu parametrelerin tümü optik kayıp ile ilişkili olduğu için decibel (dB) cinsinden alınır ve toplam iletim kaybı A dB birimi olarak düşünülür. Eşitliklerin birbirleri ile nasıl ilişkilendirildiği ve FHDSS sistemi için nasıl kullanılabileceği üzerine detaylar Ref. (20)'de sunulmuştur. Işık şiddetinin (I) başlangıç ışık şiddeti (I_0) değerinin $1/e$ 'sine düşmesi için fotodedektörde gözlenen gerekli zaman sönümlenme zamanı (τ_0) olarak isimlendirilir. Birimi sistem hassasiyetin bağlı olarak ms, μ s veya ns olarak alınır ve şu şekilde verilir:

$$\tau_0 = \frac{nL}{cA} \quad (4)$$



Şekil 3. Laboratuvar ortamında dizayn edilmiş bir FHDSS sistemi görseli. (ESOGÜ Sağlık Hizmetleri MYO, Optik & Fotonik Laboratuvarı)

Şekil 3'te Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Optik ve Fotonik Laboratuvarında dizayn edilmiş bir FHDSS sistemi gösterilmektedir. Bu sistem gerilme ölçümlerini dizayn etmek için özellikle tasarlanmıştır. 120 m uzunluğunda bir fiber halka, 1.5 m uzunlukta fiber halkaya giren ve fiber halkadan çıkan iki adet fiber kol, bu kolların fiber halkaya bağlanmasını sağlayan 99.9:0.1 birleştirici oranlarına sahip, özdeş iki kuplör, 1550 nm sürekli dalga lazer ışık kaynağı ve ışık kaynağını stabilize eden ve çalışmasını sağlayan sürücüsü, fiber bağlantılı 5 GHz InGaAs fotodedektör, fonksiyon üretici ve verilerin daha hızlı toplanıp işlenebilmesi için özel dizayn edilmiş FHDSS yazılımını içeren bilgisayardan oluşmuştur. Bu çalışmada uzunluğu yaklaşık 15 cm sensör bölgesi gerdirilerek sistemdeki sönümlenme süreleri ölçülerek optik kayıplar hesaplandı. Böylece köprü, baraj, bina gibi gerçek yaşam alanlarında kullanılacak fiber optik sensörlerin erken teşhis ile önlem alınabilmesi amaçlandı. Bu çalışma Ref. (16)'da verilmiştir.

2.2. Matematiksel Gösterim

Belirli bir FHDSS sensörü (basınç, sıcaklık veya gerilim vb.) için toplam iletim kaybı, A , sensörün fiziksel parametreleriyle belirlenen sabit bir değerdir. Bu parametreler arasında fiber soğurma kaybı, kuplörlerin yerleştirme kayıpları, kırılma indisi ve fiber uzunluğu bulunur. Açıkça görülmektedir ki, fiberdeki ışık kayıpları ne kadar düşük olursa, sönümlenme zaman sabitleri (τ_0) o kadar uzun olur. Fiber halkasının bir bölümünde (sensör başlığı) absorpsiyon gibi harici bir etki ya da basınç, sıcaklık veya gerilme gibi herhangi bir ölçüm büyüklüğünde bir değişim meydana geldiğinde, bu durum fiber halkasında ışık darbesine ek bir optik kayıp, B , olarak yansır ve bu da ringdown (sönümlenme) süresinde, τ , bir değişime yol açar. Bu değişim Denklem (5) ile verilmektedir.

$$\tau = \frac{nL}{c(A+B)} \quad (5)$$

Burada n fiberin kırılma indisi, L fiber halkanın uzunluğu, c vakum ortamında ışık hızı, A ışığın fiber halka içerisindeki toplam iletim kaybı ve B sensör bölgesinde oluşturulan ekstra kayıp olarak verilir. Bu ek kayıptan dolayı, sistemin referans ringdown süresi (τ_0) olarak alınan süre (Denklem 4) değişir ve Denklem 5'teki yeni ringdown süresi ortaya çıkar. Bu ringdown süreleri osiloskopta okunabilir. Denklem 4 ve 5 kullanılarak sensör bölgesine uygulanan dış etkenden dolayı fiber halkada oluşturulan ek optik kayıp B , şu şekilde elde edilir.

$$B = \frac{nL}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (6)$$

Burada B FHDSS sisteminde, ölçümlemeden dolayı oluşan ek optik kaybı verir. n , L ve c daha önce tanımlanan niceliklerdir. τ_0 sensör bölgesinde hiç bir dış etken (basınç, gerilme, sıcaklık değişimi, vs) yokken sistemin sönümlenme süresini verirken, τ sensör bölgesinde ekstra bir değişim olduğu zamanki sönümlenme süresini verir. Denklem (6), yani FHDSS ilkesine göre, belirli bir fiber ringdown sensörü için bir algılama aktivitesindeki değişim (örneğin gaz emilimi, fiberin mekanik deformasyonu, termal genleşme vb.), τ_0 algılama aktivitesi olmadan ölçülen ringdown süresi ve τ aktivite sırasında ölçülen ringdown süresi ölçülerek belirlenir. Ayrıca, $(1/\tau - 1/\tau_0)$ terimi ile aktivite kaynaklı optik kayıp B arasında doğrusal bir ilişki vardır.

Algılama hassasiyeti genellikle minimum algılanabilir optik kayıp ile tanımlanır. Denklem (6), şu şekilde değiştirilerek ifade edilebilir:

$$B = \frac{t_r \Delta\tau}{\tau_0 \tau} = \frac{1}{m} \frac{\Delta\tau}{\tau} \quad (7)$$

Burada $\Delta\tau = \tau_0 - \tau$, t_r ışık sinyalinin fiber halkadaki bir tur dönmesi için geçen süre ve m dönme sayısıdır. Bu yüzden, $1-\sigma$ ölçüm limiti olarak tanımlanan minimum ölçülebilir optik kayıp (B_{min}) şu şekilde verilir:

$$B_{min} = \frac{1}{m} \frac{\Delta\sigma_\tau}{\tau} \quad (8)$$

Burada $\Delta\sigma_\tau$ sönümlenme zamanının $1-\sigma$ standart sapmasıdır. $\Delta\sigma_\tau/\tau$ deneysel olarak $\sim 10^{-3}$ mertebesinde elde edilebilir.

2.3. FHDSS Tekniğinin Avantajları, Dezavantajları ve Uygulamaları

FHDSS, çevresel izleme, kimyasal algılama ve temel fizik gibi çeşitli alanlarda yüksek hassasiyetli ölçümler için güçlü bir araç haline getiren birçok avantaja sahiptir. Bu teknik, fiber halkası içindeki uzun etkileşim yolu sayesinde son derece yüksek hassasiyet sunabilir. Bu da düşük konsantrasyondaki iz miktarlardaki analizleri tespit etmeyi mümkün kılar. Ayrıca sistem kompakt yapıda olup uzaktan ya da taşınabilir kurulumlara kolayca entegre edilebilir, bu da gerçek zamanlı saha ölçümleri için uygunluk sağlar. Optik fiberlerin kullanılması, tekniğin yüksek esneklik ve uyarlanabilirlik göstermesini sağlar; farklı dalga boyları ve ortamlar üzerinde ölçüm yapmaya olanak tanır. FHDSS aynı zamanda yüksek spektral çözünürlük ve hızlı yanıt süresi sunar; bu özellikler, hassas zamansal ve mekânsal analiz gerektiren uygulamalarda kritiktir. Ayrıca, düşük enerji tüketimi ile çalışması, özellikle batarya ile çalışan sistemlerde ya

da kesintisiz çalışması gereken sistemlerde büyük avantaj sağlar.

FHDSS ve KDSS tekniklerinin hassasiyet, sinyal-gürültü oranı, algılama limiti gibi önemli parametreleri kullanılarak karşılaştırılması Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. FHDSS ve KDSS sistemlerinin karşılaştırılması.

Parametre	KRDS TEKNİĞİ	FHDSS TEKNİĞİ
Optik yol	Yüksek yansıtıcılı ($R > \%99.99$) ayna içeren boşluk (cavity)	Optik fiber döngüsü (loop); ayna gerekmez
Sinyal sönümlenme süresi (τ)	$\sim 1-10 \mu s$ (tipik)	$\sim 10-100 \mu s$ (fiber boyuna bağlı olarak)
Algılama limiti (LoD)	$\sim ppb$ seviyelerinde (gaz tespiti)	nW/mV/mm seviyelerinde (kayıp tespiti, çevresel değişkenler için)
Hassasiyet	Yüksek; ancak aynaların kalite ve hizalanmasına bağlı	Yüksek; sistem kararlılığı ve fiber kalitesine bağlı
Sinyal-Gürültü Oranı (SNR)	Yüksek; spektral saflığı yüksek lazerlerle daha iyi	Orta-Yüksek; optik fiber kaynaklı saçılmalar SNR’yi etkileyebilir
Mekanik stabilite	Hassas hizalama gerektirir, çevresel titreşimlere duyarlı	Daha kompakt ve sağlam; taşınabilir sistemlerde avantajlı
Spektral esneklik	Lazer dalga boyuna ve ayna kaplamalarına bağlı	Geniş dalga boyu aralıklarında uygulanabilir (farklı fiber türleriyle)
Kurulum maliyeti	Yüksek; özel ayna ve hizalama düzeneği gerektirir	Düşük; ticari fiber ve komponentlerle kurulabilir
Gerçek zamanlı ölçüm	Karmaşık; hızlı veri işleme sistemleri gerekebilir	Görece basit; hızlı elektronik devrelerle entegre edilebilir
Optik yol	Yüksek yansıtıcılı ($R > \%99.99$) ayna içeren boşluk (cavity)	Optik fiber döngüsü (loop); ayna gerekmez

Avantajlarına rağmen, FHDSS performansını ve uygulanabilirliğini etkileyebilecek bazı sınırlamalara da sahiptir. En büyük dezavantajlardan biri, fiber halkası ve dedektör sistemi için gereken nispeten karmaşık kurulum ve hizalamadır. Bu yapı, sıcaklık dalgalanmaları ve mekanik titreşimler gibi çevresel faktörlere karşı hassas olabilir. Bu hassasiyet, bazı uygulamalarda ölçüm hatalarına veya kararlılıkta azalmaya yol açabilir. Ayrıca, FHDSS’nin hassasiyeti,

fiber kalitesi ve kayıplar gibi faktörlerden etkilenebilir; bu durum özellikle uzun fiber halkalarında sinyal-gürültü oranını ve doğruluğu olumsuz etkileyebilir. Teknik, arka plan gürültüsü ve diğer ışık kaynaklarından gelebilecek girişimlere karşı dikkatli kalibrasyon gerektirir; bu da bazı kurulumlar için zaman alıcı ve kaynak açısından yoğun olabilir. Optik fiber kullanımı, sınırlı dalga boyu aralığı ve fiberde oluşabilecek doğrusal olmayan etkiler gibi zorlukları da beraberinde getirebilir; bu durum, geniş bir madde yelpazesi veya ölçüm koşullarının incelenmesini sınırlandırabilir. Son olarak, FHDSS genellikle yüksek hassasiyetli dedektör ekipmanları gerektirir; bu da sistemin maliyetini ve karmaşıklığını artırabilir.

Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda karşılaşılan sistematik hata kaynaklarına, çevresel etmenlere bağlı sapmalara ve sistem kararlılığına ilişkin birkaç dezavantajı göz önünde bulundurmamak gerekir. Öncelikle, FHDSS sistemlerinde kullanılan optik fiberlerin zamanla yaşlanması (fiber aging) sonucu ortaya çıkan sinyal zayıflaması, saçılma katsayısında değişim ve termomekanik özelliklerdeki bozulmalar, uzun vadeli ölçümlerde önemli sapmalara yol açabilmektedir. Bu durum özellikle kalibrasyon doğruluğunu ve sistemin uzun dönemli güvenilirliğini olumsuz etkiler. İkinci olarak, sistemde kullanılan lazer kaynaklarının dalga boyu ve güç kararlılığı, ölçüm hassasiyetini doğrudan etkileyen unsurlar arasındadır. Lazerin kısa süreli kararsızlıkları (intensity noise, frequency jitter) veya uzun vadede yaşanan spektral kaymalar, yankı sinyalinin genliğinde ve zamanlamasında değişikliklere neden olabilir. Bu da özellikle zaman tabanlı ölçüm tekniklerinde sistematik hata kaynaklarından biridir. Ayrıca, sistem mimarisine bağlı olarak parazitik yansımalar, konektör ve splice noktalarındaki mikroskobik kusurlar, girişim sinyalleri ve polarizasyonla ilgili kararsızlıklar, ölçüm doğruluğunu düşürebilir. Bu tip optik pasif bileşenlerden kaynaklanan hataların modellenmesi ve giderilmesi kritik öneme sahiptir. Gerçek zamanlı uygulamalarda ise, veri işleme hızının sınırlı olması, dijital sinyal işleyicilerinin (DSP) tepki süreleri, algoritma optimizasyon gereklilikleri gibi faktörler sistemin pratik uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Ayrıca, sahada değişken çevresel koşullar altında (sıcaklık, nem, titreşim) sistemin tepkisel performansı genellikle ideal laboratuvar koşullarındaki performansla örtüşmemektedir. Sonuç olarak, FHDSS'nin potansiyelinin gerçekçi bir şekilde değerlendirilebilmesi için yukarıda belirtilen teknik zorlukların detaylı şekilde ele alınması gereklidir. Bu durum, sistemin güvenilirliği, sürdürülebilirliği ve endüstriyel uygulanabilirliği açısından kritik bir değerlendirme eksenidir.

FHDSS tekniğinin performansını ve etkinliğini etkileyen birkaç temel faktör aşağıda belirtilmiştir.

- ❖ **Fiber Kalitesi ve Uzunluğu:** FHDSS'de kullanılan optik fiberin kalitesi, sinyal gücü ve sönümleme (ringdown) süresini belirlemede kritik rol oynar. Düşük kayıplı ve kusursuz yüksek kaliteli fiberler, daha iyi hassasiyet ve daha uzun bozulma süreleri sağlar, bu da daha doğru ölçümlere yol açar. Fiber uzunluğu da etkileşim yolunu etkiler; genellikle daha uzun fiberler daha yüksek hassasiyet sunar.
- ❖ **Lazer Kaynağı:** Işık kaynağının dalga boyu, gücü ve kararlılığı önemli faktörlerdir. Düşük koherens uzunluğuna sahip, kararlı ve ayarlanabilir bir lazer tercih edilir, çünkü bu, söndürme olayları sırasında hassas ve tutarlı ölçümler sağlar.
- ❖ **Dedektör Hassasiyeti:** Dedektörün hassasiyeti ve gürültü özellikleri, ışığın sönümünü doğru bir şekilde ölçmede önemlidir. Yüksek hassasiyetli bir dedektör, ışık yoğunluğundaki küçük değişimleri algılamayı mümkün kılar; bu, iz miktardaki maddelerin analizinde kritik öneme sahiptir.
- ❖ **Fiber Döngü (Loop) Yapılandırması:** Fiber döngüsünün kurulumu – geometri, hizalama ve kuplör veya ayna gibi optik bileşenler – ringdown sinyalinin kalitesini etkiler. Doğru hizalama, kayıpları minimize eder ve fiber etkileşim yolunu maksimize eder.
- ❖ **Çevresel Stabilité:** Sıcaklık, nem ve mekanik titreşim gibi dış etkenler FHDSS sisteminin performansını etkileyebilir. Bu faktörler fiber özelliklerinde dalgalanmalara ya da hizalama bozulmalarına yol açarak ölçüm hatalarına neden olabilir.
- ❖ **Ringdown Süresi:** Işık yoğunluğunun sönmesi için geçen süre olan ringdown süresi, fiberin uzunluğu, malzemesi ve ölçülen maddeye bağlıdır. Daha uzun ringdown süreleri genellikle daha yüksek hassasiyetle ilişkilidir; ancak bu durum gürültü ve ölçüm hızı açısından zorluklar yaratabilir.
- ❖ **Örnek Özellikleri:** Analiz edilen örneğin absorpsiyon ve saçılma özellikleri, ışığın sönme oranını etkiler. Analit konsantrasyonu ve türü, ringdown süresini etkileyerek maddenin yoğunluğu veya diğer özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır.

- ❖ **Sinyal İşleme ve Kalibrasyon:** Doğru veri analizi, sistemin kalibrasyonu ve arka plan gürültüsünün düzeltilmesi güvenilir sonuçlar elde etmek için gereklidir. Sinyal işleme teknikleri, ringdown süresinin çıkarılması ve analiz konsantrasyonunun doğru şekilde nicelendirilmesinde kullanılır.

Bu faktörler, fiber loop ringdown spektroskopisinin çeşitli uygulamalarda hassasiyet, doğruluk ve güvenilirliğini belirlemede birlikte rol oynar.

FHDSS yüksek hassasiyet ve doğruluğu sayesinde birçok bilimsel ve endüstriyel alanda geniş uygulama alanı bulmuştur. Çevresel izleme alanında, karbon dioksit, metan ve kirleticiler gibi iz gazların tespiti için kullanılır ve numune hazırlığı gerektirmeden, gerçek zamanlı ve yerinde ölçümler sağlar. Kimyasal algılamada, belirli moleküllerin ya da kimyasal reaksiyonların tespiti mümkün olduğundan, endüstriyel süreçlerde, kalite kontrolünde ve güvenlik izleme alanlarında değerlidir. FHDSS aynı zamanda biyomedikal araştırmalarda, özellikle sıvıların biyobelirteçlerin tespiti için yaygın olarak kullanılır; bu teknik, non-invaziv (girişimsel olmayan) ve yüksek hassasiyetli ölçümler yapmayı mümkün kılar. Temel fizikte ise, moleküler ve atomik özelliklerin keşfedilmesine yardımcı olarak ayrıntılı spektroskopik veriler sağlar. Ayrıca, atmosfer biliminde aerosol ve diğer partiküllerin incelenmesinde, yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğü sayesinde aerosol yoğunlukları ve boyutlarının hassas ölçümünü mümkün kılar. FHDSS'nin taşınabilir ve fiber tabanlı kurulumlarla kullanılabilmesi, uzaktan algılama uygulamaları için de uygun olmasını sağlar; bu, uzay keşfi ya da erişimi zor kara bölgelerinde geleneksel ölçüm yöntemlerinin zor olduğu durumlar için idealdir.

2.4. FHDSS Tekniğinin Eğitimsel Önemi

FHDSS çeşitli bilimsel disiplinlerde önemli bir eğitsel değere sahiptir ve hem öğrenciler hem de araştırmacılar için uygulamalı bir öğrenme deneyimi sunar. Bu yöntem, özellikle yüksek hassasiyetli ölçüm teknikleri bağlamında, optik, spektroskopi ve fotonun temel ilkelerini öğretmek için mükemmel bir platform sağlar. FHDSS aracılığıyla öğrenciler, ışık-madde etkileşimleri, optik boşluk kavramı ve fiber halkada ışık yoğunluğunun sönümlenmesinin malzeme özellikleriyle nasıl ilişkili olduğu konusunda pratik bilgiler edinebilirler. Bu teknik aynı zamanda sinyal işleme ve bilimsel ölçümlerde gürültü azaltımının önemi konusunda daha derin bir anlayış geliştirir. Ayrıca, FHDSS öğrencileri çevre bilimi, kimya ve biyoloji gibi ileri düzey uygulamalarla tanıştırmak için kullanılabilir ve sofistike cihazların kirletici tespiti

veya kimyasal algılama gibi gerçek dünya problemlerinde nasıl uygulandığını gösterir. Bunun yanı sıra, FHDSS'nin kompakt ve çok yönlü doğası, onu eğitim ortamlarında deneysel gösterimler ve projeler için ideal bir araç haline getirir; bu sayede öğrenciler kendi deneylerini tasarlayabilir ve çeşitli faktörlerin ölçüm doğruluğu ve hassasiyeti üzerindeki etkilerini keşfedebilirler. Sonuç olarak, FHDSS öğrencilerin modern araştırma metodolojileriyle etkileşim kurma yeteneklerini artırır ve onları ileri bilimsel alanlardaki kariyerlere hazırlar.

FHDSS öğrencilere ve araştırmacılara yüksek hassasiyetli optik ölçüm tekniklerine yönelik uygulamalı bir yaklaşım sunarak çeşitli bilimsel disiplinlerde önemli bir eğitsel değer sağlar. Bu yöntem, optik, spektroskopi ve fotonun temel ilkelerini, özellikle optik boşluklar içinde ışık ve madde arasındaki etkileşimlere odaklanarak öğretmek için mükemmel bir platformdur. Örneğin, FHDSS bir fiber halkadaki ışık yoğunluğunun üstel sönümlenmesini incelemek için kullanılabilir; bu da öğrencilere absorpsiyon ve saçılma gibi farklı malzeme özelliklerinin ışık-madde etkileşimlerini nasıl etkilediğini anlamada yardımcı olur. Buna bir örnek olarak, çevresel izleme kapsamında metan veya karbondioksit gibi iz gazların tespiti verilebilir. Bu gazlara karşı ringdown süresini gözlemleyerek, öğrenciler bu tekniğin iz konsantrasyonları gerçek zamanlı olarak nasıl ölçtüğüne dair pratik bilgiler edinebilirler.

FHDSS ayrıca, özellikle zaman alanındaki ölçümler ve gürültü azaltımı bağlamında, öğrencilerin sinyal işlemlerini derinlemesine anlamaları için değerli bir araçtır. Örneğin, biyomedikal araştırmalarda FHDSS, moleküler etkileşimleri incelemek veya biyolojik örneklerde belirli biyobelirteçleri tespit etmek için kullanılabilir. Bu tekniğin ışık yoğunluğundaki küçük değişimlere olan hassasiyeti, kan veya idrar gibi karmaşık biyolojik sıvılarda düşük konsantrasyonlardaki biyobelirteçlerin tespit edilmesini mümkün kılar; bu durum erken hastalık teşhisi için kritik olabilir. Bu, sofistike cihazların kirletici tespiti veya kimyasal algılama gibi gerçek dünya zorluklarında nasıl uygulandığını göstermektedir.

Ayrıca FHDSS, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlük gerektiren uygulamalarda özellikle faydalıdır. Örneğin, malzeme biliminde FHDSS, bu malzemelerin absorpsiyon spektrumlarını analiz ederek ince filmlerin veya nanomalzemelerin karakterizasyonunda kullanılabilir. Optik özelliklerdeki çok küçük değişimleri çözümleme

yeteneği, FHDSS'yi yarı iletken üretimi ve fotonik gibi alanlarda kritik olan nanoyapıların incelenmesi için ideal bir araç haline getirir.

FHDSS'nin kompakt ve uyarlanabilir yapısı, onu laboratuvar çalışmaları ve deneysel gösterimlere entegre edilebilir kılar; burada öğrenciler kendi deneylerini tasarlayıp uygulayabilirler. Örneğin, öğrenciler fiber kalitesi, ışık kaynağının kararlılığı veya dedektör duyarlılığı gibi faktörlerin ringdown sürelerini nasıl etkilediğini araştırarak deney tasarımı ve sorun giderme konularında deneyim kazanabilirler. Bu uygulamalı çalışmalar, ayrıca, sıcaklık ve titreşim gibi çevresel faktörlerin ölçüm doğruluğu üzerindeki etkilerini keşfetmelerini sağlar; bu durum, gerçek dünya uygulamalarındaki zorlukların anlaşılması açısından önemlidir.

FHDSS ile çalışarak öğrenciler, güncel araştırma metodolojileriyle tanışır ve ileri düzey bilimsel alanlarda kariyer yapmaya hazırlanırlar. Örneğin, nanoteknoloji veya çevre bilimi alanındaki araştırmacılar, FHDSS'yi kentsel ortamlarda hava kalitesini izleyen sensörlerin geliştirilmesi ya da uzay araştırmalarında kimyasal reaksiyonların incelenmesi için kullanabilirler. Ayrıca, FHDSS, astrofizik, çevresel izleme ve kimya gibi alanlarda yaygın olarak uygulanan lazer spektroskopisi tekniklerinin anlaşılması ve geliştirilmesinde değerli bir araçtır. Sonuç olarak FHDSS, öğrencilerin optik fiziği anlayışlarını derinleştirmekle kalmaz; aynı zamanda onları bilimsel keşifler ve teknolojik yeniliklerde katkı sağlayabilecek becerilerle donatır.

FHDSS, optik mühendisliği ve fotonik laboratuvarlarında önemli bir eğitsel araçtır. Öğrencilere şunları sağlar:

- Fiberlerdeki optik kayıp mekanizmalarını anlama.
- Üstel sönümlemeyi ve bunun spektroskopi ile ilişkisini öğrenme.
- Optik bileşenler ve sinyal işleme konularında uygulamalı deneyim kazanma.
- Spektroskopinin çevresel ve biyomedikal algılama gibi gerçek dünya uygulamalarını keşfetme.

III. SONUÇ

Fiber Loop Ringdown Spektroskopisi (FHDSS), birçok bilimsel ve endüstriyel alanda önemli potansiyele sahip, son derece çok yönlü ve hassas bir optik algılama

teknikini temsil etmektedir. Optik fiber halkalar içinde üstel sönümleme ilkelerinden yararlanan FHDSS, absorpsiyon ve saçılma kayıplarının hassas şekilde ölçülmesine olanak tanır; bu da onu çevresel izleme, kimyasal algılama ve biyomedikal tanı gibi alanlarda vazgeçilmez bir araç haline getirir. İz miktarlardaki maddeleri yüksek hassasiyetle tespit etme yeteneği, kompakt, taşınabilir ve maliyet etkin yapısıyla birleştiğinde, FHDSS'yi geleneksel optik algılama yöntemlerine üstün bir alternatif konumuna getirir. Ayrıca, FHDSS'nin eğitsel önemi de göz ardı edilemez; bu yöntem, temel optik ilkelerin öğretilmesi ve ileri düzey ölçüm teknolojileriyle uygulamalı deneyim kazandırılması açısından etkili bir platform sağlar. FHDSS aracılığıyla öğrenciler, ışık-madde etkileşimleri, sinyal işleme ve kirlenici tespiti veya kimyasal algılama gibi gerçek dünya problemlerinde sofistike cihazların kullanımı hakkında pratik bilgiler edinirler. Ancak, fiber kalitesi, çevresel istikrar ve sistem hizalaması gibi faktörler tekniğin performansını etkileyebileceğinden, dikkatli kalibrasyon ve sistem optimizasyonunun önemi büyüktür. Bu zorluklara rağmen FHDSS, gelişimini sürdürmekte ve uygulama alanını genişletmektedir; bu durum, optik algılama teknolojilerinin ilerletilmesi ve çeşitli alanlarda bilimsel araştırmaların zenginleştirilmesi açısından büyük bir vaat taşımaktadır. Teknolojinin olgunlaşmasıyla birlikte, hem akademik hem de endüstriyel uygulamalara entegrasyonunun devam etmesi, hassas ölçüm ve çevresel izleme alanlarında yeni yenilikleri kaçınılmaz olarak beraberinde getirecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Ai, Y., Li, J., Li, Q., Sun, M., Li, Y., & Wang, C. (2020). Cavity ringdown spectroscopy of nitric oxide in the ultraviolet region for human breath test. *Journal of Breath Research*, 14(3), 037101.
- [2] Gagliardi, G., & Loock, H.-P. (Eds.). (2014). *Cavity-enhanced spectroscopy and sensing* (Springer Series in Optical Sciences). Springer.
- [3] Maity, A., Maithani, S., & Pradhan, M. (2020). Cavity ring-down spectroscopy: Recent technological advancements, techniques, and applications. *Analytical Chemistry*, 93(1), 388–416.
- [4] Ferraro, J. R., & Nakamoto, K. (1994). *Introductory Raman spectroscopy*. Academic Press.
- [5] Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- [6] Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

- [7] Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2014). *Introduction to spectroscopy* (5th ed.). Cengage Learning.
- [8] Wang, C. (2009). Fiber loop ringdown—a time-domain sensing technique for multi-function fiber optic sensor platforms: Current status and design perspectives. *Sensors*, 9(10), 7595–7621.
- [9] Kaya, B. M., Esenturk, O., Asici, C., Sarac, U., Dindis, G., & Baykul, M. C. (2024). Coating effects of a strain sensor on durability and sensitivity using the fiber loop ringdown spectroscopy technique *Phys. Scr.* 99, 055511.
- [10] Loock, H.-P., & Waechtler, T. (2003). Fiber-loop ring-down spectroscopy: A sensitive absorption technique for small liquid samples. *Review of Scientific Instruments*, 74(11), 4818–4826.
- [11] Wang, Y., Ma, G. M., Zheng, D., Jiang, J., & Yan, C. (2021). Gas concentration sensing based on fiber loop ring-down spectroscopy: a review. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-16.
- [12] Yan, W., Han, Q., Chen, Y., Song, H., Tang, X., & Liu, T. (2018). Fiber-loop ring-down interrogated refractive index sensor based on an SNS fiber structure. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255.
- [13] Wang, C., & Scherrer, S. T. (2004). Fiber loop ringdown for physical sensor development: pressure sensor. *Applied Optics*, 43(35), 6458-6464.
- [14] Kaya, M., & Esenturk, O. (2020). Highly sensitive fiber optic pressure sensors for wind turbine applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 28(5), 2789–2796.
- [15] Kaya, B. M. (2024). A novel single mode fiber optic temperature sensor combined with the FLRDS technique. *Phys. Scr.* 99(9), 095405.
- [16] Kaya, M., & Esenturk, O. (2020). Study of strain measurement by fiber optic sensors with a sensitive fiber loop ringdown spectrometer. *Optical Fiber Technology*, 54, 102070.
- [17] Tong, Z., Jakubinek, M., Wright, A., Gillies, A., & Loock, H. P. (2003). Fiber-loop ring-down spectroscopy: a sensitive absorption technique for small liquid samples. *Review of scientific instruments*, 74(11), 4818–4826.
- [18] Qian, X., Zhao, Y., Zhang, Y. N., & Wang, Q. (2016). Theoretical research of gas sensing method based on photonic crystal cavity and fiber loop ring-down technique. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 228, 665-672.
- [19] Kaya, M., & Wang, C. (2017). Detection of trace elements in DI water and comparison of several water solutions by using EF-FLRD chemical sensors. *AIP Conference Proceedings*, 1809(1), 020017.
- [20] Waechter, H., Litman, J., Cheung, A. H., Barnes, J. A., & Loock, H.-P. (2010). Chemical sensing using fiber cavity ring-down spectroscopy. *Sensors*, 10(3), 1716–1742.
- [21] Cengiz, B. (2013). *Fiber loop ring-down spectroscopy for trace chemical detection* (Master's thesis). Middle East Technical University, Turkey.
- [22] Herath, C., Wang, C., Kaya, M., & Chevalier, D. (2011). Fiber loop ringdown DNA and bacteria sensors. *Journal of Biomedical Optics*, 16(5), 050501.
- [23] Wang, C., Kaya, M., & Wang, C. (2012). Evanescent field-fiber loop ringdown glucose sensor. *Journal of Biomedical Optics*, 17(3), 037004.
- [24] Kaya, M., & Wang, C. (2014). Fiber loop ringdown glucose sensors: Initial tests in human diabetic urines. *Fiber Optic Sensors and Applications XI*, 9098, 120–123.
- [25] Kaya, B. M., Oz, S., & Esenturk, O. (2024). Application of fiber loop ringdown spectroscopy technique for a new approach to beta-amyloid monitoring for Alzheimer's disease's early detection. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 10(3), 035037.
- [26] Kaya, M., Sahay, P., & Wang, C. (2013). Reproducibly reversible fiber loop ringdown water sensor embedded in concrete and grout for water monitoring. *Sensors and Actuators B: Chem.* 176, 803–810.
- [27] Sahay, P., Kaya, M., & Wang, C. (2012). Fiber loop ringdown sensor for potential real-time monitoring of cracks in concrete structures: An exploratory study. *Sensors*, 13(1), 39–57.
- [28] Yolalmaz, A., Sadroui, F. H., Danişman, M. F., & Esenturk, O. (2017). Intracavity gas detection with fiber loop ring down spectroscopy. *Optics Communications*, 396, 141–145.
- [29] Loock, H.-P., & Wentzell, P. D. (2012). Detection limits of chemical sensors: Applications and misapplications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 173, 157–163.
- [30] Brown, R. S., Tong, Z., Oleschuk, R. D., & Loock, H.-P. (2002). Fiber-loop ring-down spectroscopy. *The Journal of Chemical Physics*, 117(23), 10444–10447.