

Fiber Optik Sensörler ile Sıvılarda Kırılma İndisi Ölçüm Yöntemlerinin Analizi

A Comparative Study of Optical Fiber Sensors for Refractive Index Measurement

Cansu İde, Kıvılcım Yüksel

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

cansuide@iyte.edu.tr, kivilcimyuksel@iyte.edu.tr

Özet

Kırılma indisi, maddenin kaynama noktası, erime noktası, öz kütle, genleşme, esneklik gibi fiziksel özelliklerinden biridir. Malzemenin ayırt edici özelliklerinden olan kırılma indisinin ölçümü, günümüzde gıdadan, yağ ve petrol endüstrisine, biyomedikalden çevresel analizlere kadar birçok farklı alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alanda kullanılan diğer yöntemlere kıyasla sağladığı avantajlar ile fiber optik tabanlı refraktometreler hızla ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada fiber optik tabanlı iki farklı kırılma indisi sensörü incelenmiştir: bunlardan ilki Fresnel yansıma tabanlı fiber optik refraktometre iken diğeri rezonans dalgaboyunda meydana gelen değişimleri inceleyerek algılama yapan uzun periyotlu fiber ızgara tabanlı (Long Period Fiber Grating, LPFG) refraktometredir. Tasarlanan sensörler ile farklı konsantrasyon değerlerinde hazırlanmış olan glikoz-su ve gliserin-su çözeltilerinin kırılma indisi değerleri ölçüldükten sonra referans ölçümler ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Fresnel yansıma tabanlı sensör ile $1,7 \times 10^{-4}$ keskinlik elde edilirken LPFG tabanlı sensör ile maksimum $193,42 \text{ nm/RIU}$ duyarlılıktaki ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Abstract

Refractive index (RI) is one of the physical properties of material, such as boiling/ melting point, density, and elasticity. As one of the distinctive features of the material, measurement of the RI is nowadays used in many areas including the food, oil and petroleum industry, biomedical applications, and environmental analysis. In recent years, fiber optic based refractometers become highly popular thanks to the advantages they provide compared to other methods used in the above mentioned fields. Two fiber optic refractive index sensors were investigated in this study: Fresnel reflection based- and long-period fiber grating (LPFG) based-refractometers. The former uses SMF fiber tip as sensing point interrogated by an OTDR from a distant location, where the latter examines the changes in the resonance wavelength. Experimental work realised on different concentrations of glucose-water and glycerol-water solutions successfully demonstrated the capability of the proposed sensor in measuring RI of liquid chemicals with a precision of 1.7×10^{-4} (Fresnel-based sensor) and maximum sensitivity of 193.42 nm/RIU (LPFG based sensor).

1. Giriş

Erime noktası, kaynama noktası, öz kütle gibi fiziksel özellikler arasında yer alan kırılma indisi maddenin ayırt edici özelliklerindedir. Kırılma indisi değeri ölçülerek, içerisinde çözünmüş olan madde miktarının yüzdesi bilinmeyen bir çözeltinin karışım oranlarını tespit etmek mümkündür. Kırılma indisinin hassas bir şekilde tayini başta gıda endüstrisinde kalite standartlarının belirlenmesinde, konsantrasyon ve taşıyıcı miktarlarının hesaplanmasında, içme suyu, arıtma suyu, deniz suyu ve benzerlerinde çevresel kirlilik miktarlarının ölçümünde, çeşitli medikal teşhislerde ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır. Gün geçtikçe daha güvenilir, daha hızlı, otomatik, uzaktan ve/veya taşınabilir, çoklu ölçüm alabilme kapasiteli sensör ve izleme sistemlerine duyulan talep artmaktadır. Fiber optik tabanlı kırılma indisi sensörleri elektromanyetik alandan etkilenmeme, düşük tepki süresi, anlık ölçüm imkânı ve yüksek hassasiyet sağlama gibi özellikleri sayesinde bu alanda çok cazip çözümler sunmaktadır [1].

Bu çalışmada fiber optik tabanlı iki farklı kırılma indisi sensörü tasarlanmış ve çeşitli kimyasalların farklı zaman dilimlerinde kırılma indisi değerleri ölçülmüştür. Ele alınan kırılma indisi sensörlerinden biri Fresnel yansıma tabanlı fiber optik refraktometre iken diğeri rezonans dalgaboyunda meydana gelen değişimleri inceleyerek algılama yapan uzun periyotlu fiber ızgara tabanlı (LPFG) refraktometredir.

LPFG'ler sıcaklık, bükülme, gerilme, kırılma indisi gibi birçok fiziksel parametre ölçümünde kullanılmaktadırlar [2]. Kırılma indisi ölçümünde LPFG'lerin tercih edilmesinin nedenlerinden biri; FBG (fiber Bragg grating), CFBG (chirped fiber Bragg grating) gibi ızgara çeşitleri ile hibrid sensör olarak tasarlanarak birden çok parametre ölçümüne imkân tanımlarıdır [3-5]. Ayrıca inceltme, aşındırma, ince film kaplama gibi bazı üretim tekniklerini kullanarak [6], veya özel yapıllı fiberlere LPFG yazarak [7-8] alana yönelik yüksek hassasiyetli uzun periyotlu fiber ızgara tabanlı kırılma indisi sensörleri tasarlamak da mümkündür.

Kırılma indisi sensörleri arasında Fresnel yansıma prensibine dayalı sistemler, basit ve ucuz seçenekler sundukları için son yıllarda ilgi odağı olmuştur [9-14]. Çalışma prensibi, optik fiber ile sıvı ara yüzeyindeki (sensör ucu) Fresnel yansıma

katsayısının ölçülmesi olarak ifade edilebilir. Literatürde günümüze kadar önerilmiş olan Fresnel yansıma tabanlı sensör sistemleri birbirinden temel olarak sorgulama yöntemindeki (*interrogator*) farklılıklar ile ayrılmakla birlikte, söz konusu yaklaşımlar arasında standartlaşmış ve genel geçer kabul görenek öne çıkmış bir yöntem mevcut değildir.

Çalışmanın 2. Bölüm'ünde sensörlerin karakteristik özellikleri ve çalışma prensipleri açıklanmıştır. 3. Bölüm'de; deneysel düzenekler tarif edilmiş ve deney sonuçları raporlanmıştır. 4. Bölüm'de ise incelenen sensörlerin dış ortamın kırılma indisinde meydana gelen değişimlere duyarlılığı ve elde edilen deneysel sonuçların yapılan simülasyonlarla olan uyumluluğu değerlendirilmiştir.

2. Sensörlerin Çalışma Prensibi

2.1. Uzun Periyotlu Fiber Izgara (Long Period Fiber Grating, LPFG) Sensör

Fiber ızgaralar, fiber optik çekirdek (*core*) kırılma indisinin çeşitli yöntemlerle periyodik olarak ve kalıcı bir şekilde değiştirilmesiyle elde edilirler. Uzun periyotlu fiber ızgaraların ızgara periyodu, genellikle 100 μm ile 1 mm arasındadır. Izgara fiberlerin uzunluğu ise 1 – 5 cm aralıktadır.

LPFG'lerin çalışma prensibi, fiberin temel çekirdek modu ile onunla aynı yönde (ileri doğru) yayılan kılıf (kaplama, *cladding*) modları arasında bağlaşım (*mode coupling*) oluşumu esasına dayanır. Bu bağlaşım nedeniyle LPFG'nin iletim spektrumu, merkezi dalga boyları faz uyum koşulunu (*phase matching condition*) sağlayan değerlerde bulunan (rezonans dalga boyu) bir dizi kesikli zayıflama bandından oluşur. Her bir zayıflama bandı temel modun farklı bir kılıf moduna bağlaşımına karşılık gelir. Faz eşleşim koşulu aşağıdaki bağlantıyla verilir [15]:

$$\lambda_{res}^m = (n_{eff_co}^m - n_{eff_clad}^m) \Lambda \quad (1)$$

λ_{res}^m rezonans dalgaboyu olmak üzere, $n_{eff_co}^m$ çekirdeğin etkin kırılma indisini, $n_{eff_clad}^m$ m. kılıf modunun etkin kırılma indisini, Λ ise ızgara periyodudur. Çekirdeğin etkin kırılma indisini, sadece çekirdeğin (n_{core}) ve kılıfın (n_{clad}) kırılma indislerine bağlıdır. Bu nedenle dış ortamda meydana gelen değişimlerden etkilenmez. Kılıfın etkin kırılma indisini ise; kılıfın ve dış ortamın kırılma indislerine (n_{medium}) bağlıdır.

Dış ortamın kırılma indisinde meydana gelen herhangi bir değişim etkin kılıf indislerini değiştirerek rezonans dalga boylarının başlangıçtaki konumlarına göre daha düşük veya daha yüksek dalgaboylarında oluşmasına neden olur. Bu özellik LPFG'nin sensör olarak kullanılmasına olanak sağlar. Rezonans dalgaboyunda meydana gelen kaymalara bağlı olarak dış ortamın kırılma indisindeki değişimleri ölçmek mümkündür. Dış ortamın kırılma indisini değişiminin rezonans dalga boyuna etkisi aşağıdaki bağlantı ile verilir [15]:

$$\frac{d\lambda_{res}^m}{dn_{medium}^m} = \frac{d\lambda_{res}^m}{dn_{eff_clad}^m} \left[\frac{dn_{eff_clad}^m}{dn_{medium}^m} \right] \quad (2)$$

$\left[\frac{dn_{eff_clad}^m}{dn_{medium}^m} \right]$ terimi her bir kılıf modu için farklıdır. Yüksek

mertebe kılıf modları fiberden dış ortama doğru, düşük mertebeli modlara kıyasla daha fazla yayıldığı için dış ortamdaki değişimlerden daha fazla etkilenirler [16].

LPFG'lerde iletim spektrumu dış ortamın kırılma indisinden 3 farklı bölgede değişik şekillerde etkilenir:

- $n_{medium} < n_{clad}$: Eğer dış ortamın kırılma indisini kılıfın kırılma indisinden küçük ise, mod yayılımı toplam iç yansıma kuralına göre tanımlanır ve rezonans dalgaboyları referans spektrumuna göre daha küçük dalgaboylarında oluşur. Dış ortamın kırılma indisini değeri kılıfın kırılma indisini değerine yaklaştıkça dalgaboyu kayması daha fazla olur ve sensörün hassasiyeti artar.
- $n_{medium} \cong n_{clad}$: Dış ortamın kırılma indisini kılıfın kırılma indisine yaklaşık olarak eşit olduğu zaman kılıf sonsuz bölge gibi davranır ve hiç ayrık kılıf modu oluşmaz ve iletim spektrumunda hiç kesikli zayıflama bandı oluşmaz [17].
- $n_{medium} \geq n_{clad}$: Dış ortamın kırılma indisini kılıfın kırılma indisinden büyük olduğu zaman ise; fiberin içinde meydana gelen olaylar toplam iç yansıma yerine Fresnel yansıma ile açıklanır. Bu durumda iletim spektrumunda yeniden oluşan kesikli zayıflama bantları fiberin havadaki durumuna göre daha yüksek dalgaboylarında oluşur. Her bir kesikli zayıflama bandının derinliği artan dış ortam kırılma indisiniyle birlikte daha yüksek Fresnel yansıma katsayılarına bağlı olarak artar [18]. Dış ortamın kırılma indisini kılıfın kırılma indisinden daha yüksek olduğu durumlarda, rezonans dalga boylarının genliklerindeki değişimlere bağlı olarak da kırılma indisini ölçümü yapmak mümkündür.

2.2. Fresnel Yansıma Sensörü

Bilindiği üzere dielektrik bir ortamda ilerleyen ışık, kırılma indis geçişi olan yüzeylerle karşılaştığında, ilerleyen ışığın bir kısmı söz konusu yüzeyden geriye yansır. Havadaki bir optik fiber için (fibere dik olarak kesilmiş fiber ucu) güç yansıma katsayısı denklem (3) ile hesaplanmaktadır:

$$R_{end} = \left(\frac{n_f - n_a}{n_f + n_a} \right)^2 \quad (3)$$

Burada n_f ve n_a sırasıyla tek modlu fiberin ve havanın kırılma indis değerleridir ($n_a = 1.0002739$ [19]).

Fiber sensör ucundan yansıyan ışığın Fresnel yansıma katsayısı farklı şekillerde ölçülebilir. Diyod lazer ve fotodetektör kullanılması [9] veya genişbant lazer kaynağı ve OSA ile ölçümler [12] literatürde önerilen yöntemlerdir. Bu çalışmada, Fresnel yansıma katsayısı zaman bölgesinde optik yansıtıcı (*Optical Time domain Reflectometer*, OTDR) ile ölçülmüştür.

3. Deneysel Sonuçları

3.1. LPFG Tabanlı Deneysel Düzenek ve Ölçümler

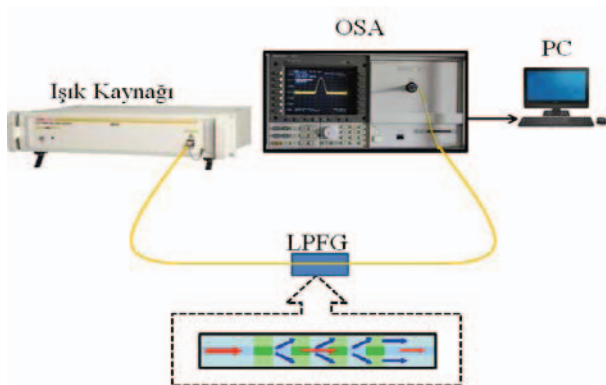
Şekil 1’de gösterildiği gibi deneysel geniş-bant bir lazer kaynağı, algılayıcı ünite olarak ise optik spektrum analizör (OSA) kullanılmıştır. Corning marka konvansiyonel tek modlu bir SMF-28’e Çizelge 1’de verilen fiziksel özellikler ile yazılmış olan uzun periyotlu fiber ızgaranın bir ucu lazer kaynağına diğer ucu ise OSA’ya bağlanmıştır.

Çizelge 1: Kullanılan LPFG sensör parametreleri

Parametre	Değer
Çekirdek yarıçapı	4,1 μm
Kılıf yarıçapı	62,5 μm
Izgara periyodu	550 μm
Izgara uzunluğu	30 mm
Çekirdek kırılma indisi değişimi	10^{-4}

LPFG’nin iletim spektrumuna ait veriler OSA’ya bağlanmış olan bilgisayara kurulan arayüz programı (Keysight VEE Pro 9.32) yardımı ile alınmıştır. Elde edilen spektrum verileri MATLAB kullanılarak grafiğe aktarılmış ve rezonans dalgalıboyları tespit edilmiştir.

Referans dalgalıboyu olarak LPFG’nin havadaki ($n_{\text{medium}} = 1$) iletim spektrumunun rezonans dalga boyu alınmıştır. %10 adım aralığı ile hazırlanan gliserin-saf su çözeltileri sırasıyla LPFG’nin yazılı olduğu (üzerindeki koruyucu kılıfı sıyrılmış olan) bölgeye damlalık yardımıyla damlatılmak suretiyle farklı dış ortamlarda meydana gelen dalgalıboyu kaymaları ölçülmüştür. Her bir ölçümden sonra sensör kısmı saf su damlatılarak temizlenmiştir. LPFG’nin iletim spektrumunun başlangıçtaki (havadaki) referans konumuna dönmesiyle bir sonraki ölçüme geçilmiştir.



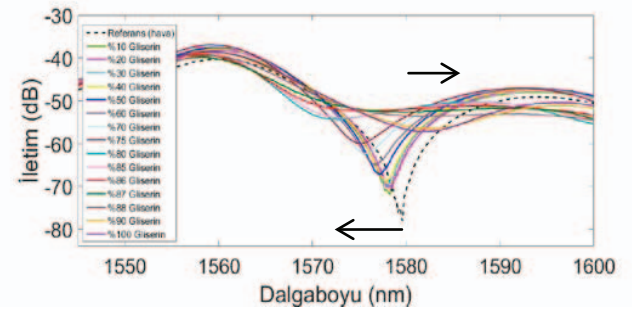
Şekil 1: LPFG tabanlı sensör deneysel düzenek

Gliserin-saf su çözeltileri ile yapılan deneyler farklı bir tarihte (3 ay ara ile) tekrarlanmış ve sonuçların uzun süreli kararlılığı tespit edilmiştir. Tekrarlanan deney setinde %50’lik gliserin-saf su çözeltisi hariç, aynı çözeltiler kullanılmıştır. Deneyler gliserin-saf su çözeltilerinin yanı sıra glikoz-saf su çözeltileri ile de yapılmıştır. Glikoz-saf su çözeltileri %10 ile % 50 değer aralığında %10 adımlar ile hazırlanmıştır. Hazırlanan bütün çözeltilerin referans kırılma indisi değerleri RE50 dijital refraktometre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen değerler Çizelge 2’deki gibidir:

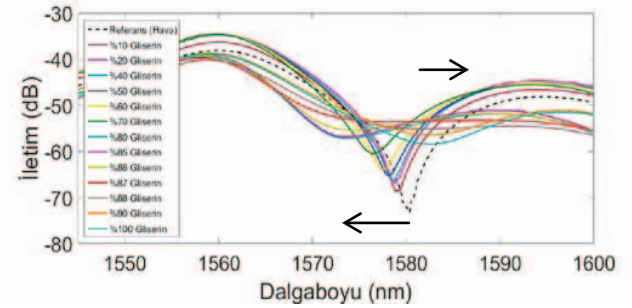
Çizelge 2: RE50 dijital refraktometre ile ölçülen kırılma indisi değerleri

Kimyasal	Kırılma indisi	Kimyasal	Kırılma indisi
Saf su	1,33300	%86 Gliserin	1,45502
%10 Gliserin	1,34703	%87 Gliserin	1,45758
%20 Gliserin	1,36587	%88 Gliserin	1,45969
%30 Gliserin	1,37943	%90 Gliserin	1,46777
%40 Gliserin	1,39341	%100 Gliserin	1,47332
%50 Gliserin	1,40163	%10 Glikoz	1,34719
%60 Gliserin	1,42228	%20 Glikoz	1,35972
%70 Gliserin	1,43612	%30 Glikoz	1,37060
%75 Gliserin	1,44291	%40 Glikoz	1,38034
%80 Gliserin	1,45441	%50 Glikoz	1,38677
%85 Gliserin	1,45462		

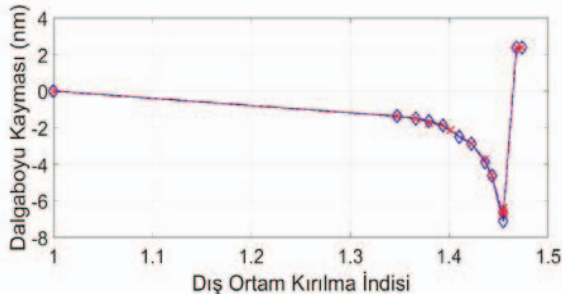
Ölçümlerde elde edilen LPFG iletim spektrumları Şekil 2, 3 ve 5’te gösterilmiştir.



Şekil 2: Farklı oranlarda hazırlanmış gliserin-saf su çözeltileri için LPFG’nin iletim spektrumu (Deney 1: ilk deney grubu)

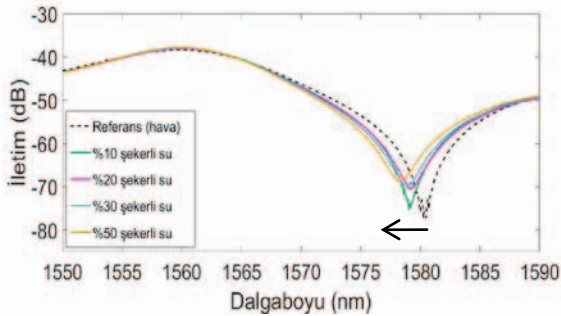


Şekil 3: Farklı oranlarda hazırlanmış gliserin-saf su çözeltileri için LPFG’nin iletim spektrumu (Deney 2: üç ay arayla yapılan ikinci deney grubu)

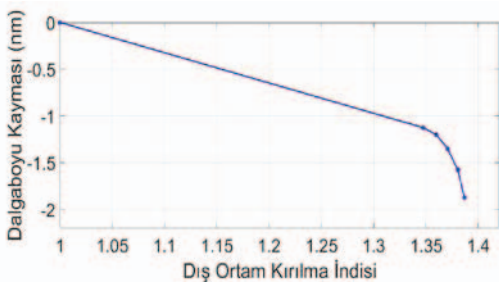


Şekil 4: Farklı dış ortam kırılma indislerinde referans rezonans dalgaboyuna göre dalgaboyu kaymaları

Deneylerde, beklendiği gibi çözeltilerin kırılma indisi değerlerinin kılıfın kırılma indisinden küçük olduğu durumlarda, rezonans dalgaboyları havadaki durumuna göre daha küçük dalgaboylarına doğru kaymıştır. Dış ortamın kırılma indisi değeri kılıfın kırılma indisi değerine yaklaştıkça rezonans dalgalarının genlikleri giderek azalmıştır. Kırılma indisleri, kılıfın kırılma indisinden daha büyük olan gliserin çözeltilerinde (%90 ve %100 için) rezonans dalgalarının dipleri yeniden belirginleşmiştir. Bu çözeltiler için rezonans dalgaboyu değerleri referansa göre daha büyük dalga boylarındadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi farklı zamanlarda yapılan Deney 1 ve Deney 2 için elde edilen sonuçlar birbirlerine oldukça yakındır. Şekerli su (glukoz-saf su) çözeltileri için elde edilen LPFG iletim spektrumları ve referansa göre dalgaboyu kaymaları ise Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5: Farklı oranlarda hazırlanmış glukoz-saf su çözeltileri için LPFG'nin iletim spektrumu

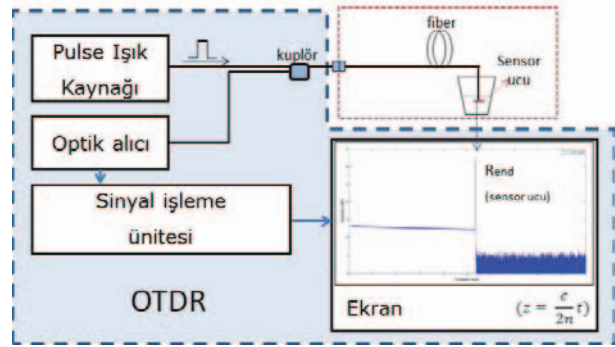


Şekil 6: Glukoz-saf su çözeltilerinde referans rezonans dalgaboyuna göre dalgaboyu kaymaları

%10'luk derişim aralıklarıyla hazırlanmış olan glukoz-saf su çözeltileri belirli bir miktardan sonra oda sıcaklığında doyuma ulaşacağı için %50 yoğunluğuna kadar hazırlanmışlardır. Hazırlanan çözeltilerin kırılma indisi değerleri 1,34719 ile 1,38677 arasındadır ve kılıfın kırılma indisinden küçüktürler. Bu nedenle dalgaboyu kaymaları sadece küçük dalgaboylarına doğru olmuştur.

3.2. Fresnel Yansıma Deney Düzenegi ve Ölçümler

Zaman bölgesinde optik yansıtıcı (*Optical Time domain Reflectometer, OTDR*) tabanlı sensör sorgulama tekniğinin çalışma prensibi Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu düzenekte, ışık kaynağı fibere optik darbeler gönderir. Fiber boyunca *Rayleigh* saçılması nedeniyle ve sensör ucundan geriye yansıyan ışık, optik kuplör vasıtasıyla optik alıcıya yönlendirilir. Yansıyan sinyal burada zamanın fonksiyonu olarak elektriksel sinyale çevrilir. Fiber boyunca meydana gelen zayıflama ve yansımaların gücü mesafeye bağlı olarak OTDR ekranına aktarılır.



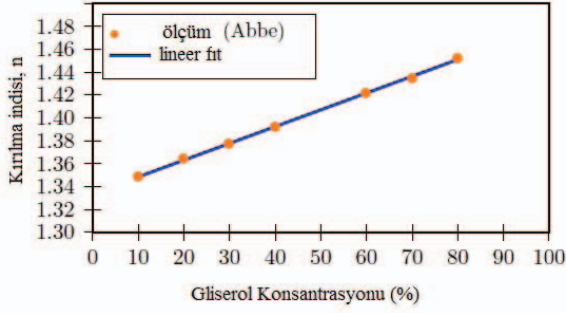
Şekil 7: Fresnel yansıma tabanlı deneysel düzenek

Sensör ucu, kırılma indisi ölçülecek sıvıya daldırıldığı zaman sensör-sıvı yüzeyinden yansıyan ışığın Fresnel yansıma katsayısı (R_{end} , dB cinsinden) ve fiberin etkin kırılma indisi (n_f) değerleri kullanılarak sıvının kırılma indisi (n_x) hesaplanabilir.

$$n_x = n_f \left[\frac{1 - 10^{R_{end}/20}}{1 + 10^{R_{end}/20}} \right], n_f > n_x \quad (4-a)$$

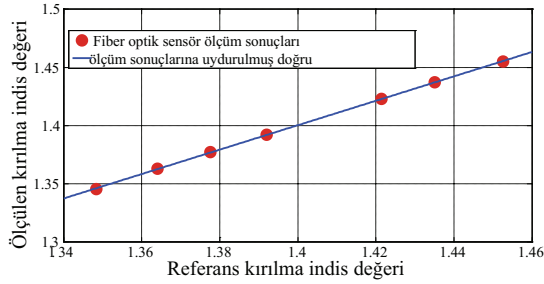
$$n_x = n_f \left[\frac{1 + 10^{R_{end}/20}}{1 - 10^{R_{end}/20}} \right], n_f < n_x \quad (4-b)$$

Deneysel çalışmada, kırılma indisi ölçülecek sıvının kalibrasyon karakteristiklerinin elde edilmesi için %10 ile %90 değer aralığında %10'luk adımlar ile gliserin-saf su çözeltileri hazırlanmış ve kırılma indisleri ticari Abbe refraktometresi (Abbe 2WAJ) ile ölçülmüştür. Referans kırılma indisi değerlerinin çözelti konsantrasyonuna bağımlı değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu şekil üzerinde ölçüm sonuçlarına uydurulmuş doğrunun eğimi $\frac{\partial n}{\partial C} = 0.00147$ olarak hesaplanmıştır (kalibrasyon karakteristikleri, sabit sıcaklıktaki laboratuvar şartlarında gerçekleştirildiği için ortam sıcaklığının kırılma indisine etkisi ihmal edilebilir düzeydedir).



Şekil 8: Gliserin-saf su çözeltisinin Abbe refraktometresi ile ölçülen kırılma indis değeri ile çözelti konsantrasyonuna bağlı değişimi

Yukarıda bahsedildiği gibi deneysel çalışmalar, laboratuvar tipi OTDR cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sensör ucu olarak sorgulama ünitesine bağlı 5,3 km uzunluğundaki fiber bobinin ucuna bağlanmış FC/PC konnektör kullanılmıştır (2,5 mm çapındaki seramik ferül). OTDR ölçüm parametreleri; darbe genişliği 10 ns, ölçüm mesafesi 10 km, ve ortalama alma süresi 30 saniye olarak seçilmiştir. Şekil 9’da sunulan ölçüm sonuçları önerilen yöntemin ortam sıvısındaki kırılma indisi ölçme kabiliyetini göstermektedir. Bu şekil üzerinde ölçüm sonuçlarına uydurulmuş doğrunun eğimi 1,0485 olarak tespit edilmiştir.



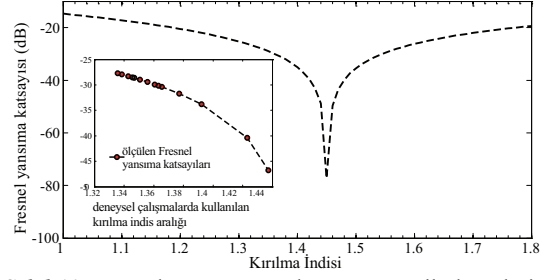
Şekil 9: Önerilen yöntemle (Fresnel yansımaya tabanlı fiber sensör) elde edilen kırılma indis değerleri. Yatay eksen Abbe refraktometresi ile ölçülmüş referans değerleri göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile teorik hesaplamalar karşılaştırılmıştır.

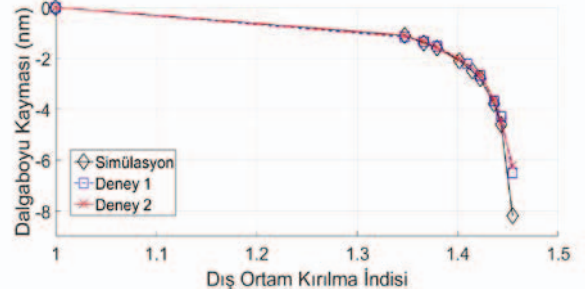
Fresnel tabanlı sensör için yansımaya katsayısının teorik değerleri kırılma indisine bağlı olarak Şekil 10’da gösterilmiştir (teorik yansımaya katsayısı değerleri deklm (4) kullanılarak hesaplanmıştır). Aynı şekil üzerinde (iç şekilde) görüldüğü üzere, 1,33 ile 1,44 arası kırılma indis değerleri için elde edilen deneysel sonuçlar teori ile örtüşmektedir. Bütün gliserin konsantrasyon değerleri için tekrarlanabilirlik testleri uygulanmış ve ölçülen kırılma indis değeri üzerindeki standart sapma $1,7 \times 10^{-4}$ olarak tespit edilmiştir.

LPFG’lerde fiziksel değişimleri rezonans dalgaboyunun kaymasına bağlı olarak ölçmenin yanı sıra genlik değişimine bağlı olarak ölçmek de mümkündür. Bu çalışmada dalgaboyu



Şekil 10: Fresnel güç yansımaya katsayısı teorik değerlerinin kırılma indisine bağlı değişimi. İç şekil: 1,33 ile 1,44 aralığında elde edilen deneysel sonuçların (kırmızı halka) teori (kesikli çizgi) ile uyumu

kaymasına bağlı ölçümler yapılmıştır. Dalgaboyu kaymasına bağlı ölçüm alan sensörlerin en büyük avantajı fiziksel etkilerin anlık olarak dalgaboyuna etkisinin görülebilmesidir. Aynı şekilde Fresnel yansımaya tipli sensörlerde de fiziksel değişikliklerin oluşturduğu etkiler anlık olarak ölçülebilmektedir. Farklı oranlarda hazırlanmış olan gliserin çözeltileri ile yapılan ölçümler üç aylık süre sonunda tekrarlanmış ve birbirlerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu da deneylerin uzun vadede tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 11: LP04 modu için simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Referansa göre elde edilen maksimum dalgaboyu değişimi $6,51 \text{ nm}^{\circ}$ ’lik kayma ile 1,45441 kırılma indisi değerine sahip %80’lik gliserin-saf su çözeltisinde gözlenmiştir. Glikoz çözeltisinde elde edilen referansa göre maksimum dalgaboyu kayması ise $1,875 \text{ nm}^{\circ}$ ’lik dalgaboyu kayması ile %50’lik glikoz-saf su çözeltisinde elde edilmiştir. Kırılma indisi kılıfın kırılma indisinden daha küçük olan gliserin çözeltileri için LPFG sensör ile elde edilen en yüksek hassasiyet %75 ile %80’lik çözelti arasında (193,42 nm/RIU).

LPFG tabanlı sensörde simülasyonlar, dış ortamın kırılma indis değerinin kılıfın kırılma indis değerinden daha küçük olduğu durumlar için yapılmıştır. Simülasyon ile elde edilen (LP04 modu için) farklı kırılma indis değerlerindeki dalgaboyu kaymaları ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 11’de gösterilmiştir.

Bu çalışmada, iki çeşit kırılma indisi sensörü tasarlanmış ve çeşitli kimyasalların telekomünikasyon dalgaboyu aralığındaki kalibrasyon eğrileri çıkartılarak önceki çalışmalara katkı sağlanmıştır.

Genel olarak, Fresnel tabanlı sensörün LPFG tabanlı sensöre kıyasla kullanımı daha kolay ve pratiktir. LPFG tabanlı sensördeki gibi spektrum ölçümlerine gerek yoktur. Sorgulayıcı ünite olarak OTDR kullanılması ve özel üretim bir fibere ihtiyaç duyulmaması bu sensörün LPFG tabanlı sensöre göre daha uygun maliyetli ve kolay ulaşılabilir olmasını sağlamıştır. Bunların yanı sıra, bu düzenek uzaktan ölçüm almayı gerektiren uygulamalara daha kolay uyarlanabilmekte, böylece sorgulama sensör ucundan kilometrelerce uzakta da yapılabilmektedir. Ayrıca deneysel düzenek birden çok sensör ucu kullanılarak da tasarlanabilir. Sensor uçları arasındaki mesafeyi kısıtlayan OTDR çözünürlük sorunu farklı dalgaboylarına sahip OTDR (lamda-OTDR) kullanılarak çözülebilir ve böylece sensör uçları arasındaki mesafe üzerinde herhangi bir kısıtlama olmadan pek çok uygulamanın ihtiyaçlarına cevap verebilir.

LPFG tabanlı sensör ise Fresnel tabanlı sensöre kıyasla daha yüksek hassasiyet sağlaması ve sensör hassasiyetinin kılıfın inceltilmesi ve/veya ince film kaplanması gibi işlemler ile rahatlıkla artırılabilmesi bakımından daha gelişmiş ve geliştirilmeye açık bir sensör tasarımıdır.

5. Kaynaklar

- [1] Udd, E., Spillman, W. B., *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2011.
- [2] Ye, C., James, S., Tatam, R., "Simultaneous temperature and bend sensing with long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, 25, 1007-1009, 2000.
- [3] Sun, A., Wu, Z. "A Hybrid LPG/CFBG for Highly Sensitive Refractive Index Measurements", *J. of Sensors*, 12, 7318-7325, 2012.
- [4] Jesus, C. , Caldas, P. , Frazão, O. , Santos, J. L., Jorge, P. A. S. and Baptista, J. M., "Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Using a Hybrid Fiber Bragg Grating/Long-Period Fiber Grating Configuration", *Fiber and Integrated Optics*, 28(6), 440-449, 2009.
- [5] Enriquez, D., Cruz, A., Giraldo, M., "Hybrid FBG-LPG sensor for surrounding refractive index and temperature simultaneous discrimination", *Optics&Laser Technology*, 44, 981-986, 2012.
- [6] Xue, L., Liang, H., Yang L., "Single wavelength interrogated refractive index sensors based on leaky mode couplings" *Proc. SPIE 7853, Advanced Sensor Systems and Applications IV*, 78530F, 2010.
- [7] Fan, Y., Zhu, T., Shi, L., Rao, Y., "Highly sensitive refractive index sensor based on two cascaded special long-period fiber gratings with rotary refractive index modulation," *Appl. Opt.*, 50, 4604-4610, 2011.
- [8] Chen, X., Zhou, K., Zhang, L., Bennion, I., "Optical chemsensors utilizing long-period fiber gratings UV-inscribed in D-fiber with enhanced sensitivity through cladding etching", *IEEE, Photonics Technology Letters*, 16(5),1352-1354, 2004.
- [9] Kim, C., Su, C. "Measurement of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fibre optic Fresnel ratio meter", *Measurement Science and Technology*, 15, 1683-1686, 2004.
- [10] Basgumus, A., Durak, F. E., Altuncu, A., Yilmaz, G., "A universal and stable all-fiber refractive index sensor system", *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(2), 171-174, 2016.
- [11] Xu, W., Huang, X., Pan, J., "A simple fiber-optic refractive index sensor based on Fresnel reflection and optical switch", *IEEE Sensors Journal*, 13, 1571-1574, 2013.
- [12] Zhao, C., Li, J., Zhang, S., Zhang, Z., Jin, S., "Simple Fresnel reflection-based optical fiber sensor for multipoint refractive index measurement using an AWG", *Photonics Technology Letters*, 25, 606-608, 2013.
- [13] Yeh, C.-H., Chow, C.-W., Sung, J.-Y., Wu, P.-C., Whang, W.-T., Tseng, F.-G., "Measurement of Organic Chemical Refractive Indexes Using an Optical Time-Domain Reflectometer", *Sensors*, 12, 481-488, 2012.
- [14] Yuan, J.-Y., Zhao, C.-L., Ye, M., Kang, J., Zhang, Z., Jin S., "A Fresnel reflection-based optical fiber sensor system for remote refractive index measurement using OTDR", *Photonic Sensors*, 4, 48-52, 2014.
- [15] Vengsarkar, M., Lemaire, P. J., Judkins, J. B., Bhatia, V., Erdogan, T., Sipe, J. E., "Long-period fiber gratings as band-rejection filters", *IEEE J. Lightw. Tech.*, vol. 14(1), 58-65, 1996.
- [16] Patrick H. J., Kersey A. D., Bucholtz F., "Analysis of the Response of Long Period Fiber Gratings to External Index of Refraction," *IEEE J. Lightwave Technol.* 16, 1606, 1998.
- [17] Koyamada Y., "Numerical analysis of core-mode to radiation-mode coupling in long-period fiber gratings", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 13, 308-310, 2001.
- [18] Stegall, D. B., ve Erdogan T., "Leaky cladding mode propagation in long-period fiber grating devices," *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(3), 343-345, 1999.
- [19] Weast R.C., Selby S.M. (ed), *Handbook of Chemistry and Physics*, (48. Ed.), Chemical Rubber, Cleveland, Ohio, E-160, 1968.