



Yüksek Güç Transformatörlerindeki Kısmi Deşarj Tespitinde Diyafram Tabanlı Fabry-Perot İnterferometrik Basınç Sensörlerinin Performans İyileştirilmesi için Diyafram Analizi*

Timuçin Emre Tabaru^{1**}, Şekip Esat Hayber²

¹ Erciyes Üniversitesi, Klinik Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi, Kayseri, Türkiye (ORCID: 0000-0002-1373-3620)

² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, Kırşehir, Türkiye (ORCID: 0000-0003-0062-3817)

(Konferans Tarihi: 5-7 Mart 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.araconf29)

ATIF/REFERENCE: Tabaru, T. E. & Hayber, Ş. E. (2020). Yüksek Güç Transformatörlerindeki Kısmi Deşarj Tespitinde Diyafram Tabanlı Fabry-Perot İnterferometrik Basınç Sensörlerinin Performans İyileştirilmesi için Diyafram Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 231-238.

Öz

Bu çalışmada, yüksek güç transformatörlerinde oluşan kısmi deşarjın (partial discharge, PD) tespiti için diyafram tabanlı Fabry-Perot interferometrik fiber optik basınç sensör (DTFP-FOBS) için boyutlarının küçültülerek algılama parametrelerinin (frekans, hassasiyet) optimizasyonu araştırılmıştır. DTFP-FOBS'ların boyutları ve algılama parametreleri sensörde kullanılan diyafram tarafından belirlenir. Diyaframın yapıldığı malzeme, yarıçap ve kalınlık bu parametreleri belirleyen faktörlerdir. PD algılamak için DTFP-FOBS'larda büyük bir çoğunlukla diyafram malzemesi olarak silikadan (SiO₂) faydalanılmaktadır. Fakat, SiO₂ diyaframın yarıçapının literatürde belirlenmiş olan değerlerden daha küçük seçilmesi sensörün rezonans frekansının (900 kHz-3 MHz) çok yükselmesine ve PD algılama bandı (20 kHz-200 kHz) dışına çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, çapı küçülmüş olan sensörün hassasiyetliği de azalmaktadır. Bu dezavantajların ortadan kaldırılması için alternatif bir polimer diyafram olarak selüloz triasetat (cellulose triacetate, CTA) önerilmiştir. Bu amaç ile her iki diyaframın farklı yarıçap ve kalınlıklarda sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan benzetim çalışmaları sayesinde sensör hassasiyeti ve rezonans frekans parametreleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları ışığında CTA diyaframın 20 µm kalınlıkta 225 µm yarıçapta rezonans frekansı 197 kHz olarak hesaplanırken, SiO₂'nin bu frekans değerine ulaşabildiği en küçük yarıçap değeri 530 µm olarak belirlenmiştir. Bu geometrik boyutlarda CTA'dan yapılmış olan diyaframın boyutu daha düşük olmasına rağmen hassasiyeti 2 katına çıkmıştır. Sonuç olarak, PD uygulaması özelinde DTFP-FOBS'larda, CTA'nın diyafram malzemesi olarak kullanılmasının, SiO₂ diyaframa göre sensör boyutlarının %66 oranında küçültülebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Diyafram tabanlı DEFPI akustik sensör, Kısmi boşalma, Güç transformatörleri, Sonlu elemanlar yöntemi.

Diaphragm Analysis for Performance Improvement of Diaphragm Based Fabry-Perot Interferometric Pressure Sensors in Partial Discharge Detection in High Power Transformers

Abstract

In this study, the optimization of sensing parameters (frequency, sensitivity) was investigated for the diaphragm-based Fabry-Perot interferometric fiber optic pressure sensor (DTFP-FOBS) for detection of partial discharge (partial discharge, PD) formed in high power transformers. The dimensions and detection parameters of the DTFP-FOBS are determined by the diaphragm used in the sensor. The radius and thickness values of the diaphragm used in determining the sensor dimensions are the most effective

* Bu makale *International Conference on Access to Recent Advances in Engineering and Digitalization (ARACONF 2020)* de sunulmuştur.

** Sorumlu Yazar: Erciyes Üniversitesi, Klinik Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi, Kayseri, Türkiye, ORCID: 0000-0002-1373-3620, etabaru@erciyes.edu.tr

parameters. In order to detect PD, DTFP-FOBS mostly use silica (SiO_2) as diaphragm material. However, the reduction of the radius of the SiO_2 diaphragm ensures the resonance frequency (900 kHz-3 MHz) of the sensor to rise too high and goes out of the PD detection band (20 kHz-200 kHz). In addition, the sensitivity of the sensor, whose diameter is reduced, decreases. To eliminate these disadvantages, cellulose triacetate (cellulose triacetate, CTA) has been proposed as an alternative polymer diaphragm. For this purpose, sensor sensitivity and resonance frequency parameters were compared thanks to simulation studies of both diaphragms with different radii and thicknesses using the finite element method. In the light of the simulation results obtained, the fundamental frequency of the CTA diaphragm was calculated as 197 kHz at the radius of 225 μm and the thickness of 20 μm , while the smallest radius value at which SiO_2 could reach this frequency was determined as 530 μm . Although the diaphragm made of CTA in these geometric dimensions is smaller in size, its sensitivity has doubled. As a result, it has been observed that the use of CTA as a diaphragm material in DTFP-FOBS specifically for PD application, sensor dimensions can be reduced by 66% compared to SiO_2 diaphragm.

Keywords: Diaphragm based EFPI acoustic sensor, Partial discharge, Power transformers, Finite element method.

1. Giriş

Güç transformatörleri, güç endüstrisindeki en kritik ve pahalı bileşenlerdendir. Kısmi deşarj (partial discharge, PD), bir boşlukta veya yüksek derecede homojen olmayan bir elektrik alan içinde bulunan bir gazın elektriksel bozulması nedeniyle bir yalıtıkta bulunan küçük elektrik kırılcımlarıdır (Stone, 2005). Transformatörler içinde kısmi deşarjların meydana gelmesi, yalıtımda bozulmaya ve hem güvenlik hem de finansal şartlar açısından büyük arızalara yol açabilir. Bir PD oluştuğunda ortaya çıkan ani enerji salınımı, malzemelerdeki kimyasal ve yapısal değişiklikler, elektromanyetik sinyal üretimi ve akustik emisyonlar (AE) gibi bir dizi etki üretir (Lundgaard, 1992).

PD'nin neden olduğu akustik sinyalleri doğru bir şekilde bulmak için bir transformatör içinde güvenilir bir şekilde işlev görebilen sensörlere sahip olunması arzu edilir. Güvenlik ve kolay kurulum için, bu sensörlerin kimyasal olarak inert, elektriksel olarak iletken olmayan, pasif ve küçük boyutlu olması gerekir. Optik fiber tabanlı sensörlerin, çok çeşitli fiziksel ve kimyasal parametreleri ölçen çekici cihazlar olduğu gösterilmiştir, çünkü sensörler, küçük boyut, hafiflik, yüksek hassasiyet ve EMI gürültüsüne bağımsızlık da dahil olmak üzere bir dizi doğal avantaja sahiptir. Bu avantajlar, fiber optik sensörleri PD akustik tespiti için mükemmel adaylar kılar (Wang et al., 2004). Diyafram tabanlı Fabry-Perot interferometresi prensibine dayanan fiber optik basınç sensörleri, yüksek hassasiyet, kompakt boyut, çok yönlülük ve elektromanyetik parazite karşı bağımsızlık gibi belirgin avantajları nedeniyle bu alandaki araştırmacıların merak konusu olmuştur (Huang et al., 2016). Bu sensörler akustik dalgaları, titreşimleri, sıcaklıkları, basınçları, kırılma indekslerini ve gerginliği algılamak için başarıyla uygulanmıştır (Islam et al., 2014). Diyafram, Fabry-Perot (FP) boşluğunu oluşturan yansıtıcı aynalardan biri olarak sensörün performansı ve özellikle hassasiyeti için kritik öneme sahiptir. Silika (SiO_2) (Wang et al., 2005), (Wang et al., 2006), (Wang et al., 2006), (Li et al., 2019), (Pang et al., 2013), gümüş (Liu et al., 2015), (Xu et al., 2014), polimer (Hayber et al., 2019), (Hayber et al., 2018), (Zhao et al., 2018), (Sun et al., 2015), ve grafen (Wu et al., 2017), (Ma et al., 2013) dahil oldukça duyarlı bir diyafram üretmek için farklı malzemeler kullanılmıştır.

Diyafram tabanlı Fabry-Perot interferometrik fiber optik basınç sensör (DTFP-FOBS) hassasiyeti ve dinamik frekans bandgenişliği, endüstriyel uygulamalardaki değişken basınç ölçüm gereksinimlerini karşılamak için diyaframın çapı, kalınlığı ve/veya malzemesi değiştirilerek ayarlanabilir (Hayber et al., 2019).

Çoğu zaman algılayıcı kafası elektriksel alan yoğunluğunun çok güçlü olmadığı transformatör tank duvarlarının yakınında konumlandırılır. Fakat bazen algılayıcı kafası, sarımlardaki yalıtım malzemeleri içerisinde bulunan boşluklarda oluşan küçük boşalmaları algılayabilmek için yüksek elektriksel alana sahip sargıların yakınına yerleştirilir. Bu boşluklara DTFP-FOBS'ların yerleştirilebilmesi için mümkün olan en küçük boyutlara indirgenbilmesi gerekmektedir. Ayrıca sensor kafası küçüldükçe, hassasiyetini kaybetmemesi gerekmektedir ki bu sayede μPa seviyedeki basınç değişiklikleri algılanabilsin.

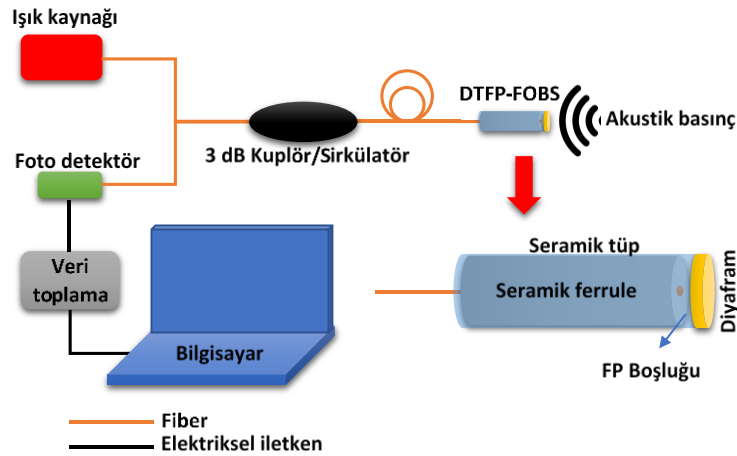
Literatürde PD uygulamalarında kullanılan DTFP-FOBS'larda diyafram malzemesi olarak, sıcaklık değişiminden az etkilenmesi, yüksek hassasiyeti (Qingxu et al., 2011), geniş bandgenişlikleri ve kolay temin edilebilmesi sebebi ile SiO_2 'dir. Fakat sensor boyutlarının giderek minimize edilerek kompakt yapının oluşturulmasının istendiği PD uygulamalarında SiO_2 diyafram yarıçapının küçültülmesi bazı sınırlar içermektedir. Bir PD akustik detektörünün tepki frekansı için evrensel bir standart yoktur. IEEE Std C57.127, PD'dan üretilen akustiklerin 20 kHz ila 500 kHz arasında bir geniş bant frekansına sahip olduğunu göstermektedir (American National Standard, 2007). Ayrıca yapılan çalışmalar, akustik PD sensörlerinin yanıt frekansının 20-200 kHz (Yu et al., 2003) aralığında olması ve bir sensörün tepki frekansının PD akustik tespiti için 200 kHz'den az olması gerektiğini göstermiştir (Lundgaard, 1992). Yukarıda belirtilen bandgenişlikleri içerisinde rezonans frekansına sahip PD uygulamalarında kullanılacak bir SiO_2 diyaframın kalınlıkları değişmek üzere yarıçapları 0,9 mm ile 1,25 mm arasında değişmektedirler (Yu et al., 2003), (Dond et al., 2012). Bu boyutlar trafo sarımlardaki yalıtım malzemeleri içerisinde bulunan boşluklara girebilmesi için büyük sayılmaktadır. Yarıçaplarının küçültülerek 125 ile 500 μm arasına getirilmesi halinde ise rezonans frekansları 900 kHz ile 3MHz arasına çıkmaktadır ki bu durum PD'ın oluştuğu frekans bandının oldukça dışındadır. SiO_2 diyaframın aynı zamanda yarıçapının küçültülmesi ile kalınlığının da küçültülmesi bu sorunu aşmaya yardımcı olmaktadır. Fakat SiO_2 diyaframın boyutlarının küçülmesi sensör hassasiyetini de çok büyük oranda azaltmaktadır. Ayrıca SiO_2 diyaframın 20 μm kalınlığın altına indirilmesi çok karmaşık üretim yöntemleri ve yüksek maliyetleri ortaya çıkarmaktadır (Xu et al., 2012). Bu sınırlamalar polimer tabanlı diyaframlar ile giderilebilmektedir. Bunlar arasında, bir selüloz asetat türü olan selüloz triasetat (cellulose triacetate, CTA), endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılır çünkü ısı ve nem gibi çevresel koşullara karşı daha bağımsızdır. Bu malzemenin yapılan film şeritleri, yıllarca bozulmadan düzgün çalışabilir. Bu özellikler sayesinde 60 yılı aşkın bir süredir, bir polarizasyon plakası üzerinde sıvı kristal ekranlar (LCD) için optik bir dengeleme filmi olarak kullanılmaktadır (Wang et al., 2016). CTA film yüzeyi pürüzsüzdür ve tatmin

edici optik özelliklere sahiptir. Dahası, suya ve yağa ve hatta aseton gibi çözücülere karşı dayanıklıdır. Bu sıvı ortamlarda rahatça kullanılmasını sağlar (Hayber et al., 2018). Bu istisnai özellikler nedeniyle CTA, PD uygulamaları için önemli bir diyafram adaydır. Her kalınlıkta ve yarıçapta üretilebilmesi mümkündür ve küçülen yarıçap ile oluşacak rezonans frekans değerleri PD algılama bandı içerisinde kalmakta ve küçülen boyutla oluşan hassasiyet değerleri aynı yarıçaptaki SiO₂ diyaframa göre en az 50 kat daha yüksek çıkmaktadır. Bu sayede çok düşük genlikteki basınç genlikleri ölçülebilmektedir.

Bu çalışmada yukarıda belirtilen SiO₂ diyaframın boyutlarının küçültülmesine ait PD uygulamalarındaki sınırlamalarını ortadan kaldırmak ve akustik basınç hassasiyetliğini artırmak amacı ile CTA diyafram önerilmektedir. Bu amaç ile her iki diyaframa ait farklı yarıçaplar ve kalınlıklarda sonlu elemanlar yöntemine (finite element method, FEM) dayanan benzetim analizleri, yapısal ve modal olmak üzere gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak verilmiştir. SiO₂ diyaframa ait mekanik özellikler (Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluk) literatürden elde edilmiştir (Ma, 2014). CTA'ya ait özelliklerin elde edilebilmesi için öncelikle çekme testi uygulanmış ve hem enlemesine hem de boylamasına uzama miktarları bulunmuştur. Bu değerler literatürde verilmiş formüllerde (Hayber et al., 2019) yerlerine yazılarak CTA'nın mekanik özelliklerine ait parametreler elde edilmiştir. PD uygulaması özelinde DTFP-FOBS'larda, CTA diyafram malzemesi olarak kullanılmasının, SiO₂ diyaframa göre sensor boyutlarının %66 oranında küçülebileceği ve küçültülen boyutlarda hassasiyetliğin SiO₂ diyaframa göre yaklaşık 2 kat arttığı belirlenmiştir. Bu sayede çok küçük boyutlu ve yüksek hassasiyete sahip sensörler elde edilerek başta kısmi deşarj olmak üzere biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmasının avantajlı olacağı değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Şekil 1'de, genel bir DTFP-FOBS sisteminin blok şemasını gösterilmektedir. Sistem bir algılayıcı uç, 1310 veya 1550 nm bir ışık kaynağı, 3 dB fiber optik kuplör veya sirkülötör, düşük gürültülü bir optik alıcı (fotodedektör) ve bu bileşenleri birbirlerine bağlayan tek modlu (9/125 µm) fiberlerden oluşmaktadır. Fotodedektör çıkışında veri toplama birimi ve bu birimden alınan sinyalleri işlemek için bir bilgisayardan oluşmaktadır.



Şekil 1. Genel bir DTFP-FOBS sisteminin blok şeması.

Sistemin çalışması, ışık kaynağından çıkan ışık ışını kuplör/sirkülötör yardımıyla algılayıcı uca ulaşır. Fiber-hava ve hava-diyafram ara-yüzeylerinden oluşan algılayıcı uçta, ışığın çok küçük bir kısmı ilk ara-yüzeyden yansıyor geri gelir. Geriye kalan büyük kısım hava boşluğunu geçerek diyafram yüzeyine ulaşır. Diyafram yüzeyi yansıtıcılığı yüksek malzemeler ile çok ince bir tabaka ile kaplandığı için tamamına yakını geri yansıyor birinci ara-yüzeyden geçip fiber özüne geri girer. Bu olay birçok kez tekrar ederek çoklu yansımaları oluşturur. Çoklu yansımalara uğrayan modüle olmuş ışık ışını kuplör üzerinden fotodedektöre gelerek buradan elektriksel sinyale dönüştürülmüş olur. Elektriksel sinyale dönüştürülmüş olan veriler veri toplama ünitesi aracılığıyla dijital sinyallere dönüştürülüp işlenmek üzere bilgisayar birimine aktarılır. Böylece, sürekli çoklu yansımalar devam ederken diyafram akustik basınca maruz kaldığında, diyaframın titreşimi nedeniyle FP boşluğunda değişim meydana gelir. FP boşluğundaki bu değişim, ışığın fazında bir değişikliğe neden olur ve fazdaki değişiklik, interferometre yoluyla çıkıştaki optik yoğunluğu etkiler. Böylelikle, çıkıştaki optik yoğunluk, diyafram yüzeyine etki eden akustik basınç ile ilişkilendirilerek algılama işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Diyafram malzemesinin mekanik özellikleri ve geometrik boyutları, sensör sisteminin akustik basınca duyarlılığını ve frekans tepkisini belirler. Sensörün hassasiyeti ve frekans tepkisi ölçülen sinyalin rezonans frekansı ile eşleşmelidir. Bu durum, akustik basıncın yoğunluğuna ve frekansına duyarlı bir diyafram tasarlandığı taktirde mümkündür. Kenarlarından sabitlenmiş bir dairesel diyaframa uygulanan basınca karşılık merkezindeki esneme miktarı (d) Eşitlik (1) (Wang et al., 2006) tarafından verilir:

$$d = \frac{3(1-\nu^2)P}{16Et^3} r^4 \quad (1)$$

Burada, ν Poisson oranı, P uygulanan basınç, E Young modülü, r ve t sırasıyla diyaframın yarıçapı ve kalınlığıdır. Diyaframın ortasındaki esneme miktarı, diyafram malzemesinin mekanik özelliklerine (E , ν) ve geometrik boyutlara (r , t) bağlıdır. Birim basınç altındaki esneme miktarı duyarlılık (S) (Wang et al., 2016) ile tanımlanmıştır:

$$S = \frac{d}{P} \quad (2)$$

Hassasiyet artan yarıçap miktarı ile artar ve artan kalınlık ile azalır. Dairesel ve kenarlarından sabitlenmiş bir diyaframın temel doğal frekansı (Ma et al., 2013):

$$f = \frac{10.21t}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

Burada ρ , diyaframın yoğunluğudur. Hassasiyet ve frekans yanıtı, malzeme özelliklerine ve geometrik boyutlara bağlıdır. Yarıçap ve kalınlığın frekans üzerindeki etkisi, duyarlılık üzerindeki etkinin tam tersidir. Yani, artan yarıçap miktarı frekansı azaltırken, artan kalınlık miktarı frekansı artırır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

SiO₂ ve CTA diyafram malzemelerinin farklı kalınlık ve yarıçapları için FEM tabanlı benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Diyaframın esnemesi üzerindeki etkilerini incelemek için yapısal analizler kullanılmış, frekans yanıtı için ise modal analizler kullanılmıştır. SiO₂'ye ait değerler literatürden elde edilmiş olup, CTA malzemesinin mekanik parametrelerini (Young modülü ve Poisson oranı) tanımlamak için çekme testleri Shimadzu AG-X Plus çekme testi sistemi ile Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (TAUM) gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde, kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerine ait değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. SiO₂ ve CTA mekanik özellikleri

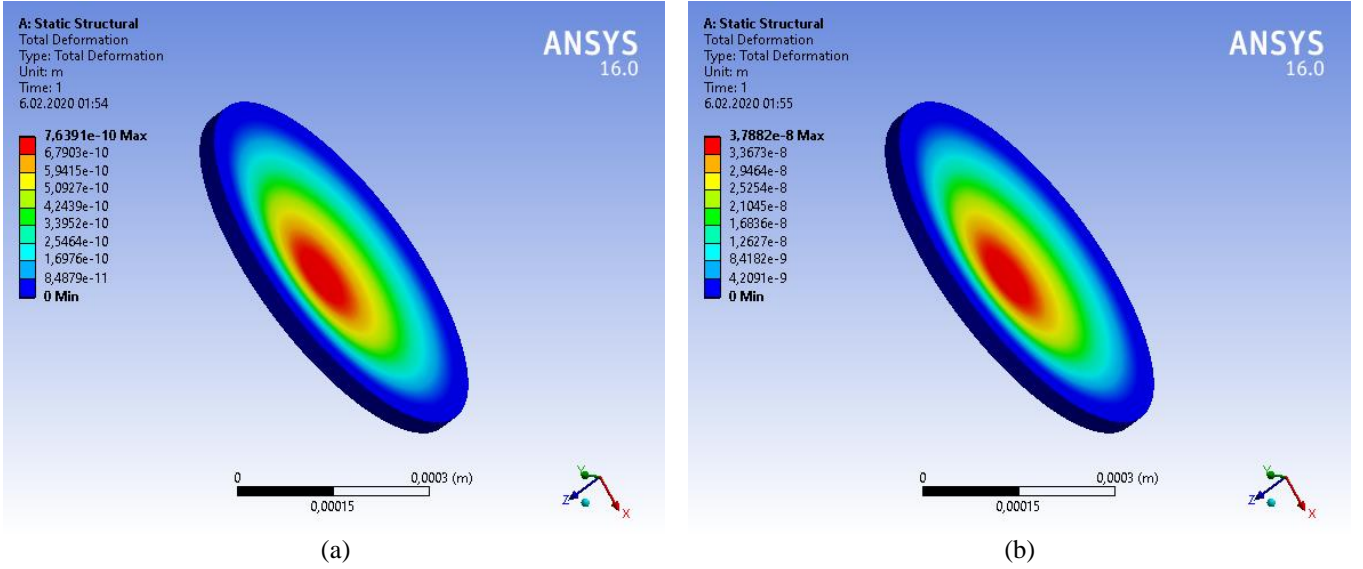
Malzeme	Young modülü (MPa)	Young modülü (MPa)	Yoğunluk (kg/m ³)
SiO ₂	73000	0,17	2200
CTA	1278	0,36	1300

SiO₂ ve CTA malzemeleri ile oluşturulmuş diyaframların farklı yarıçap ve kalınlık değerlerindeki örnekleri benzetimlerde kullanılarak esneme ve rezonans frekans değerleri elde edilmiştir. Benzetimlerde diyafram kalınlıkları 10, 20, 30, 40 ve 50 μ m, yarıçap değerleri ise 250-1500 μ m olarak belirlenmiştir.

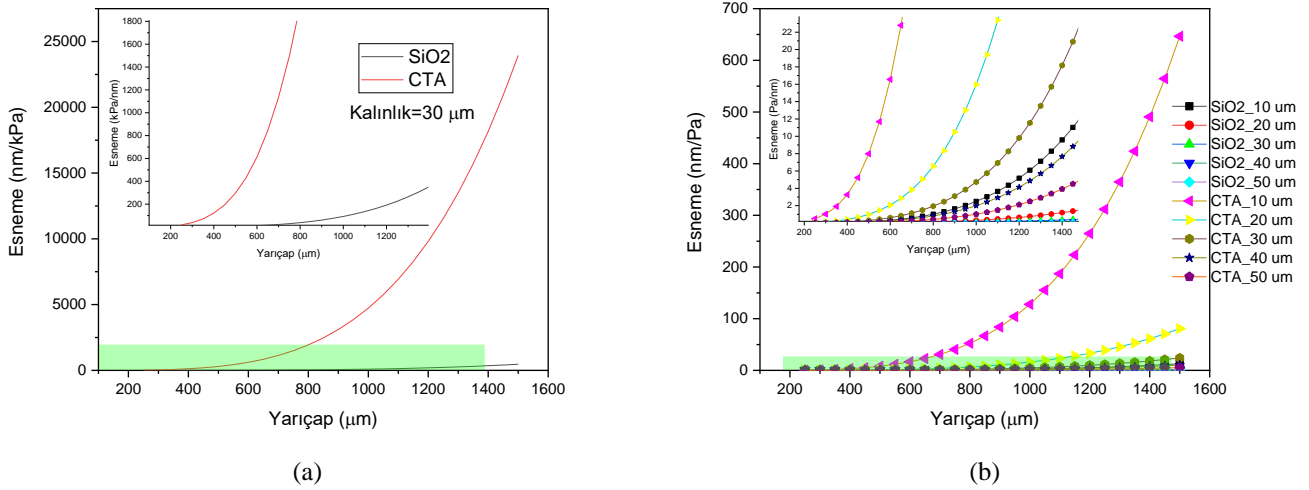
Bir PD tarafından üretilen akustik dalgalar, algılayıcı uçta esneme oluştur ve FP boşluk uzunluğunun değişimi ile optik dalgayı modüle eder. Bir FP sensörün en önemli özellikleri merkez esnemesi ve rezonans frekansıdır. Merkez esnemesi bir FP sensörünün hassasiyetini etkilerken ve rezonans frekansı sensörün dar veya geniş bant mod seçimini etkilemektedir.

3.1. Diyaframın Statik Basınç Tepkisi

Şekil 2'den de görüldüğü gibi aynı geometrik ölçülere sahip olan diyaframlar 1 kPa basınç altında iken SiO₂'den yapılmış olan diyaframdaki esneme miktarı 0,76 nm olurken CTA'dan yapılmış olan diyaframda bu değer 37,88 nm değerine yükselmektedir. Başka bir ifade ile $r=300$ μ m ve $t=30$ μ m geometrik ölçülerine sahip olan diyaframlardan CTA'nın hassasiyetliği SiO₂'ye göre yaklaşık 50 kat daha fazladır. Bu da çok düşük basınç değerlerinde bile (μ Pa) ölçüm yapılabileceği anlamına gelmektedir. 30 μ m kalınlığa sahip diyaframların farklı yarıçap değerlerindeki esneme grafikleri Şekil 3(a) da verilmektedir. Ayrıca, farklı kalınlık değerlerindeki her iki malzemeden oluşturulmuş diyaframların farklı yarıçap değerlerindeki esneme grafiği Şekil 3(b) de gösterilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi SiO₂ den yapılmış bir diyaframın CTA'dan yapılmış olana göre aynı yarıçap değerinde benzer hassasiyetliği yakalayabilmesi için kalınlığının ancak dörtte biri kadar daha az olması gerekmektedir. Yani birbirlerine yakın kalınlık değerlerinde iki malzemeden yapılmış olan diyaframların hassasiyetlikleri arasında çok ciddi bir oran vardır. Şekil 3(b)'de yine SiO₂ diyaframın esnemesinin 1 nm üzerine çıktığı en küçük yarıçap değerinin 800 μ m civarı olduğu görülmektedir ki bu değer için kalınlık 10 μ m'dir. CTA bu esneme değerini 10 μ m kalınlıkta, yaklaşık 300 μ m yarıçapta sağlayabilmektedir. Aynı değerlerde CTA'nın esnemesi ise 50 nm değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere boyutlar küçültüldükçe SiO₂'nin hassasiyetinin CTA ile kıyaslanamaz derece düşük olduğu açıktır.



Şekil 2. Yapısal analiz sonucunda 1 kPa basınç altında diyaframlardaki esneme miktarları (a) SiO₂ (b) CTA.

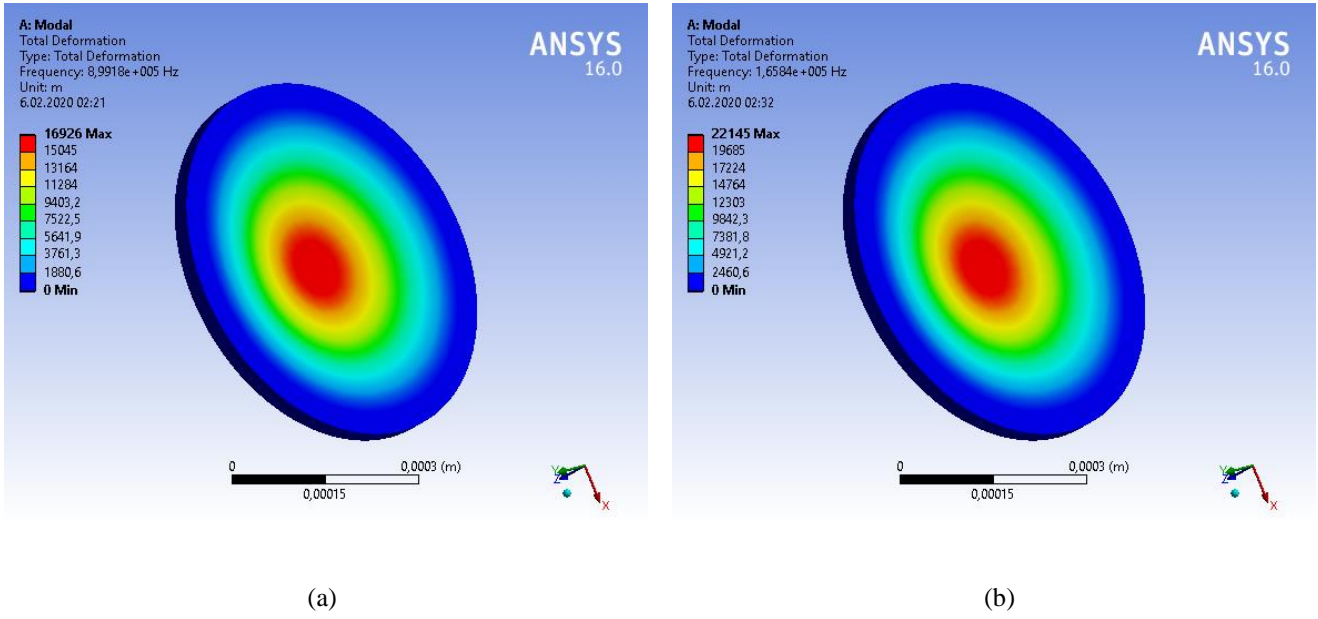


Şekil 3. (a) 30 µm Kalınlıkta, farklı yarıçap değerlerinde SiO₂ ve CTA esneme miktarları. (b) Farklı kalınlıklarda ve farklı yarıçap değerlerinde SiO₂ ve CTA esneme miktarları.

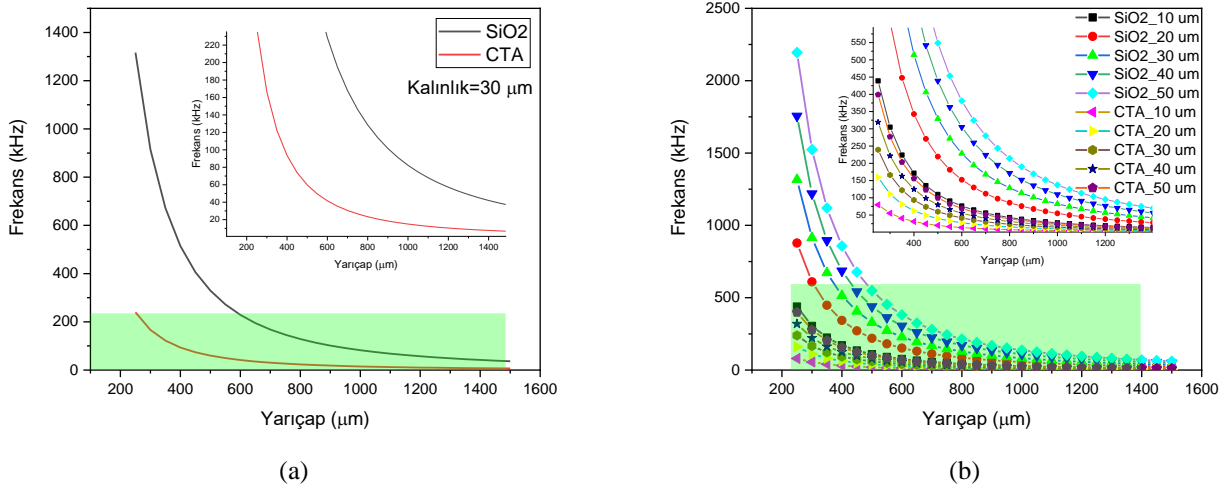
3.2. Diyaframın Dinamik Alan Tepkisi

Diyaframların trafolar içerisinde oluşan PD uyarımlarını algılayabilmeleri için hassasiyetleri kadar frekans cevapları da oldukça önemlidir. Bu bağlamda Şekil 4'e bakacak olursak, aynı geometrik ölçülere ($r=300 \mu\text{m}$, $t=30 \mu\text{m}$) sahip olan diyaframlardan SiO₂, PD bandının çok dışarısında kalırken ($\sim 900 \text{ kHz}$), CTA PD bandının içerisinde ($\sim 166 \text{ kHz}$) kalmaktadır.

Şekil 5(a)'da 30 µm kalınlıkta farklı yarıçaplarda SiO₂ ve CTA'nın frekans tepkisi verilmiştir. Şekil 5(a)'da 30 µm kalınlıkta farklı yarıçaplarda SiO₂ ve CTA'nın frekans tepkisi verilmiştir. Şekil içerisinde yeşil ile belirtilmiş alan PD gerçekleştiği frekans bandını belirtmektedir. Belirtilen bant içerisinde CTA'nın yarıçap aralığı 250 µm ile 600 µm arasında değişirken, SiO₂'nin aralığı ise 600 µm ile 1500 µm arasında değişmektedir. Esneme değerlerinde olduğu gibi frekans bandında da CTA, SiO₂'ye göre yarıçapın küçültülmesi noktasında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şekil 5(b)'de ise farklı kalınlık ve yarıçap değerlerinde SiO₂ ve CTA rezonans frekans değerleri verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi CTA'nın bütün kalınlık değerlerinde PD bandı içerisindeki yarıçap değerleri 350 µm'nin altındadır.



Şekil 4. Modal analiz sonucunda $r=300 \mu\text{m}$ ve $t=30 \mu\text{m}$ geometrik ölçülere sahip diyaframların rezonans frekansları (a) SiO_2 (b) CTA.



Şekil 5. (a) $30 \mu\text{m}$ Kalınlıkta, farklı yarıçap değerlerinde SiO_2 ve CTA rezonans frekans değerleri. (b) Farklı kalınlık ve yarıçap değerlerinde SiO_2 ve CTA rezonans frekans değerleri.

Elde edilen benzetim sonuçları ışığında CTA diyaframın $20 \mu\text{m}$ kalınlıkta $225 \mu\text{m}$ yarıçapta rezonans frekansı 197 kHz olarak hesaplanırken, SiO_2 'nin $20 \mu\text{m}$ kalınlıkta aynı frekans değerini ancak $530 \mu\text{m}$ yarıçapta verebilmiştir. Yarıçapı daha da küçültüldüğünde PD bandının üst sınırının dışına çıktığı görülmüştür. Sonuç olarak, PD uygulaması özelinde DTFP-FOBS'larda, CTA'nın diyafram malzemesi olarak kullanılmasının, SiO_2 diyaframa göre sensor boyutlarının yaklaşık %66 oranında küçültülebileceği ve küçültülen boyutlarda SiO_2 diyaframa göre hassasiyetinin yaklaşık 2 kat arttığı belirlenmiştir. Diyaframların kalınlıkları $10 \mu\text{m}$ seçildiğinde bu fark %72 değerine yaklaşmaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, yüksek güç transformatörlerinde oluşan PD'nin tespiti için DTFP-FOBS için boyutlarının küçültülerek algılama parametrelerinin (frekans, hassasiyet) optimizasyonu araştırılmıştır. Literatürde PD algılama uygulamalarında diyafram olarak önerilen tek diyafram SiO_2 'dir. Fakat SiO_2 diyaframın yarıçapı küçüldükçe sensörün hassasiyetinin düştüğü ve PD etkilerinin oluştuğu bandın dışında bir frekans bandına çıktığı görülmüştür. Bu sıkıntının önüne geçilebilmesi için alternatif bir diyafram olarak CTA önerilmiştir ve CTA ve SiO_2 'nin farklı yarıçap ve kalınlıklarda esneklik ve rezonans frekans değerleri FEM tabanlı benzetim analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda aynı geometrik ölçülere sahip olan diyaframlardan SiO_2 , PD bandının çok dışarısında kalırken

(~900 kHz) CTA, PD bandının içerisinde (~166 kHz) kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca PD algılama bandı içerisinde CTA'nın yarıçap aralığı 225 µm ile 600 µm arasında değişirken, SiO₂'nin aralığı ise 600 µm ile 1500 µm arasında değişmektedir. Sonuç olarak, PD uygulaması özelinde DTFP-FOBS'larda, CTA'nın diyafram malzemesi olarak kullanılmasının, SiO₂ diyaframa göre sensor boyutlarının yaklaşık %66 oranında küçültülebileceği ve küçültülen boyutlarda SiO₂ diyaframa göre hassasiyetinin yaklaşık 2 kat arttığı belirlenmiştir. Yapılan analizler ile elde edilen veriler, CTA diyaframın başta PD olmak üzere biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Teşekkür

Yazarlar, Erciyes Üniversitesi Klinik Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne, araştırma faaliyetlerine destekleri için teşekkür eder. Ayrıca, bu çalışma Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimince KMY.A4.19.001 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- American National Standard. (2007) IEEE guide for the detection and location of acoustic emissions from partial discharges in oil-immersed power transformers and reactors, in IEEE Power Engineering Society. IEEE Std C57. 127-2007, pp. 9–18, Transformers Committee, New York, USA.
- Dong, B. Han, M. & Wang, A. (2012) Two-wavelength quadrature multipoint detection of partial discharge in power transformers using fiber Fabry-Perot acoustic sensors. Proc. SPIE 8370, Fiber Optic Sensors and Applications IX, 83700K.
- Hayber, Ş.E. Aydemir, U. Tabaru, T.E. & Saraçoğlu, Ö.G. (2019) The Experimental Validation of Designed Fiber Optic Pressure Sensors With EPDM Diaphragm. IEEE Sensors Journal, 19(14), 5680-5685.
- Hayber, Ş.E. Tabaru, T.E. & Saraçoğlu, Ö.G. A novel approach based on simulation of tunable MEMS diaphragm for extrinsic Fabry-Perot sensors. Optics Communications, 430, 14-23.
- Hayber, Ş.E. Tabaru, T.E. Keser, S. & Saraçoğlu, Ö.G. (2018) A Simple, High Sensitive Fiber Optic Microphone Based on Cellulose Triacetate Diaphragm. Journal of Lightwave Technology, 36(23), 5650-5655.
- Huang, Y. W. Tao, J. & Huang, X. G. (2016) Research progress on FP interference-based fiber-optic sensors. Sensors, 16(9), 1424.
- Islam, M. Ali, M.M. Lai, M.H. Lim, K.S. & Ahmad, H. (2014) Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review. Sensors, 14(4), 7451-7488.
- Li, H. Li, D. Xiong, C. Si, W. Fu, C. Yuan, P. & Yu, Y. (2019) Low-cost, high-performance fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasonic wave detection. Sensors 19(2), 406.
- Liu, B. Lin, J. Wang, J. Ye, C. & Jin, P. (2015) MEMS-based high-sensitivity Fabry-Perot acoustic sensor with a 45° angled fiber. IEEE Photonics Technology Letters, 28(5) 581-584, 2015.
- Lundgaard, L. E. (1992) Partial discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine 8(4), 25-31.
- Lundgaard, L.E. (1992) Partial discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine, 8(4), pp. 25-31.
- Ma, J. (2014) Miniature Fiber-Tip Fabry-Perot Interferometric Sensors for Pressure and Acoustic Detection (Doctoral thesis). The Hong Kong Polytechnic University.
- Ma, J. Xuan, H. Ho, H.L. Jin, W. Yang, Y. & Fan, S. (2013) Fiber-optic Fabry-Pérot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm. IEEE Photonics Technology Letters, 2(10), 932-935.
- Pang, C. Bae, H. Gupta, A. Bryden, K. & Yu, M. (2013) MEMS Fabry-Perot sensor interrogated by optical system-on-a-chip for simultaneous pressure and temperature sensing. Optics Express, 21(19), 21829-21839.
- Qingxu, Y. & Zhou, X. (2011) Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer. Photonic Sensors, 1(1), 72-83.
- Stone, C.G. (2005) Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 12(5), 891-904.
- Sun, B. Wang, Y. Qu, J. Liao, C. Yin, G. He, J. & Liu, Y. (2015) Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet. Optics Express, 23(3), 1906-1911.
- Wang, S. Lu, P. Liu, L. Liao, H. Sun, Y. Ni, W. & Xu, H. (2016) An infrasound sensor based on extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer structure. IEEE Photonics Technology Letters, 28(11), 1264-1267.
- Wang, X. Li, B. Xiao, Z. Lee, S.H. Roman, H. Russo, O. L. & Farmer, K.R. (2004) An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection. Journal of micromechanics and microengineering, 15(3), 521.
- Wang, X. Xu, J. Zhu, Y. Cooper, K.L. & Wang, A. (2006) All-fused-silica miniature optical fiber tip pressure sensor. Optics letters, 31(7), 885-887.
- Wang, X. Xu, J. Zhu, Y. Yu, B. Han, M. Wang, Z. & Ng, W. (2005) Verifying an all fused silica miniature optical fiber tip pressure sensor performance with turbine engine field test. Proc. SPIE 5998, Sensors for Harsh Environments II, 59980L, 2005.
- Wu, Y. Yu, C. Wu, F. Li, C. Zhou, J. Gong, Y. & Chen, Y. (2017) A highly sensitive fiber-optic microphone based on graphene oxide membrane. Journal of Lightwave Technology, 35(19), 4344-4349.
- Xu, F. Ren, D. Shi, X. Li, C. Lu, W. Lu, L. & Yu, B. (2012). High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm. Optics letters, 37(2), 133-135.
- Xu, F. Shi, J.K. Li, Gong, H. Hui, R. & Yu, B. (2014) Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm. Optics letters, 39(10), 2838-2840.

- Yu, B. Kim, D.W. Deng, J. Xiao, H. & Wang, A. (2003) Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers. *Applied Optics*, 42(16), 3241-3250.
- Zhao, Y. Chen, M.Q. Xia, F. & Lv, R.Q. (2018) Small in-fiber Fabry-Perot low-frequency acoustic pressure sensor with PDMS diaphragm embedded in hollow-core fiber. *Sensors and Actuators A: Physical*, 270, 162-169.