



## حسگر فیبرنوری فابری-پرو برای اندازه گیری تخلیه جزئی

علی اوچاقلو<sup>۱\*</sup>، رحمان نوروزی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱

چکیده - در این مقاله، یک آشکارساز تخلیه جزئی با استفاده از حسگر فیبر نوری غیرذاتی بر پایه‌ی تداخل سنجی فابری-پرو گزارش می‌شود. دیافراگم این حسگر با استفاده از پلی تترافلئورواتیلن ساخته شده است. بر این اساس دیافراگم ساخته شده از این ماده بدلیل دارا بودن مدول یانگ کمتر در مقایسه با سیلیکا دارای حساسیت بالاتری برای آشکارسازی موج‌های فراصوتی ناشی از تخلیه جزئی است. سر حسگر فیبر نوری یک کاواک فابری-پرو متشکل از یک دیافراگم با لایه نشانی نانوذرات نقره می‌باشد که در یک انتهای فیبرنوری تک مد قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حسگر مبتنی بر دیافراگم پلی تترافلئورواتیلن داری حساسیت  $5/4 \text{ [}\mu\text{m/kPa]}$  می‌باشد، که یکصد مرتبه بهتر از حسگرهای مبتنی بر دیافراگم سیلیکایی است.

کلید واژه- تخلیه جزئی، پلی تترافلئورواتیلن، تداخل سنج فابری-پرو، فیبرنوری تک مد.

## Fiber Fabry- Perot sensors for detection of partial discharge

Ali Ojaghloo<sup>1\*</sup>, Rahman Nouroozi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, PO Box 45195-1159, Zanjan, Iran

**Abstract** – In this paper an extrinsic Fabry-Perot based optical fiber sensor for partial discharge detection is reported. The diaphragm of sensor is fabricated using polytetrafluoroethylene. Due to the lower Young's modulus of the polytetrafluoroethylene in comparison with the silica, polytetrafluoroethylene-based diaphragm has high sensitivity for ultrasound detection caused by partial discharge. The sensor head is a Fabry-Perot cavity including polytetrafluoroethylene-based diaphragm coated with nano silver particles and is placed in one end facet of a single fiber. The results show that the polytetrafluoroethylene based sensor has a sensitivity of  $\sim 5.4 \text{ [}\mu\text{m/kPa]}$  which is  $\sim 100$  times higher than the silica-based sensor.

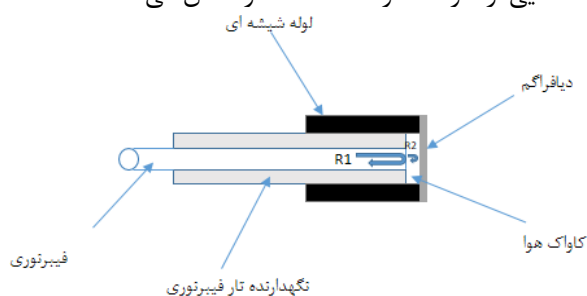
**Keywords:** Partial discharge, polytetrafluoroethylene, Fabry-perot (FP) interferometry, Single mode fiber.

## ۱- مقدمه

پرو قابلیت اندازه‌گیری فشار ناشی از صوت ایجاد شده در محیط را دارا می‌باشد. با وجود اینکه روش‌های مختلفی با استفاده از پلیمر، سیلیکا، سلیکون، گرافین و... در ساختن دیافراگم این نوع حسگرها استفاده شده است [۷و۶]، دیافراگم ساخته شده برای حسگر گزارش شده در این مقاله حساسیت و پاسخ بسامدی به مراتب مناسب‌تری نسبت به سایر حسگرهای مشابه داراست.

## ۲- مبانی نظری

سر حسگر فیبرنوری مبتنی بر تداخل سنجی فابری-پرو، شامل فیبرنوری تک مد، کاواک هوا و دیافراگم می‌باشد. شکل ۱ شمایی از سر حسگر ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: طرح کلی سر حسگر تداخل سنجی فابری-پرو مبتنی بر دیافراگم پلی تترافلورواتیلن (ورقه نازک تفلون).

نور خارج شده از فیبر نوری بعد از بازتابش از دیافراگم می‌تواند دوباره به فیبر نوری برگردد. حاصل جمع میدان الکتریکی این نور و مد برگشتی بواسطه بازتاب از انتهای فیبر تشکیل تداخل بین نور برگشتی از دیافراگم و مد انتشاری برگشتی در فیبر را می‌دهد. حال اگر دیافراگم بواسطه عوامل محیطی دچار تغییر شود میزان نور برگشتی از آن به فیبر و در نتیجه تداخل شکل گرفته دچار اختلال خواهد شد. بدین وسیله می‌توان عوامل محیطی مؤثر بر دیافراگم را با استفاده از تغییرات شدت ثبت شده اندازه‌گیری نمود. شدت بازتاب شده و قابل ثبت در آشکارساز با معادله زیر بیان می‌شود [۳]:

$$I_r(\lambda) = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} I_i(\lambda) \quad (1)$$

که در آن  $I_i$  و  $I_r$  به ترتیب شدت نور فرودی و بازتابی،  $R_1$  بازتاب از انتهای فیبرنوری،  $R_2$  بازتاب از دیافراگم لایه نشانی شده با نانوذرات نقره و  $\lambda$  طول موج مرکزی نور فرودی هستند.  $\varphi$  فاز نسبی مابین نور بازتابی از دیافراگم و مد بازتابی از انتهای فیبر نوری می‌باشد. این فاز در کاواکی از هوا به طول  $l$  به صورت زیر بیان شود.

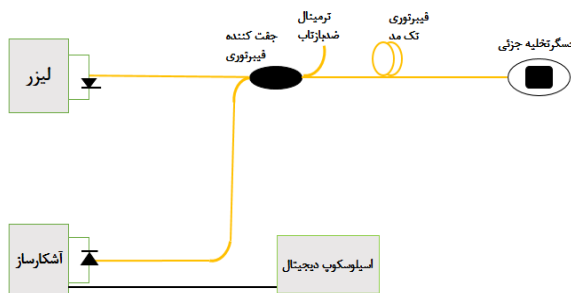
ترانسفورماتورهای قدرت از اساسی‌ترین و گران‌قیمت‌ترین تجهیزات صنعت برق قدرت می‌باشند. وجود تخلیه جزئی نشانگر احتمال وقوع شکست عایقی است که به نوبه خود باعث بروز خسارات جبران‌ناپذیری به شبکه برق می‌شود. بواسطه ایجاد هر تخلیه‌ی جزئی طیف گسترده‌ای از امواج الکترومغناطیسی و صوتی تولید می‌شود. همچنین تخلیه‌ی جزئی باعث تولید گازهای شیمیایی در اثر اندرکنش (اکسایش) با محیط اطراف خود می‌شود. برای اندازه‌گیری این پدیده مطالعات گسترده‌ای انجام گرفته‌است و استفاده از روش‌های اندازه‌گیری شیمیایی، الکتریکی و آکوستیکی مرسوم‌اند، که هرکدام از آنها دارای معایبی هستند [۱]. حسگرهای الکتریکی ممکن است که در شرایط آزمایشگاهی نسبت به اندازه‌گیری‌های شیمیایی و آکوستیکی دقیق‌تر باشند اما به دلیل وجود تداخل‌های الکترومغناطیسی شدید در ترانسفورماتورها و تجهیزات مرتبط، کالیبراسیون دقیق و قابل اعتماد برای اینگونه حسگرها دشوار است [۲].

حسگرهای پیزوالکتریک با وجود حساسیت بالا توانایی دریافت کامل طیف صوتی ناشی از پدیده تخلیه جزئی را دارا نمی‌باشند. همچنین روش‌های شیمیایی موجود که برای اندازه‌گیری این پدیده مورد استفاده قرار می‌گیرند به دلیل زمان بر بودن برای اندازه‌گیری گازهای آزاد شده از تخلیه جزئی تا زمانی که قابل آشکارسازی در آنالیز روغن باشند کارای چندانی را نخواهند داشت. برای حل تمام این عیب‌ها و حل مشکل تعیین محل دقیق وقوع تخلیه جزئی در این مقاله حسگر فیبرنوری بر پایه تداخل سنجی فابری-پرو پیشنهاد شده است. این حسگر علاوه بر مصونیت از تداخل‌های الکترومغناطیسی، دارای مزایایی شامل برخط بودن و تشخیص سریع محل وقوع تخلیه را دارا می‌باشد.

حسگر فیبرنوری برپایه‌ی میکرو کاواک تداخل سنجی فابری-پرو استفاده گسترده‌ای در اندازه‌گیری فشار و امواج فرا صوت دارد. در مقایسه با حسگرهای الکتریکی و شیمیایی مرسوم، حسگرهای فیبرنوری دارای مزیت‌هایی مانند اندازه کوچک، عدم بروز تداخل ناشی از امواج الکترومغناطیسی، حساسیت بالا، پاسخ بسامدی مناسب در گستره وسیعی از طیف تخلیه جزئی هستند [۳و۵].

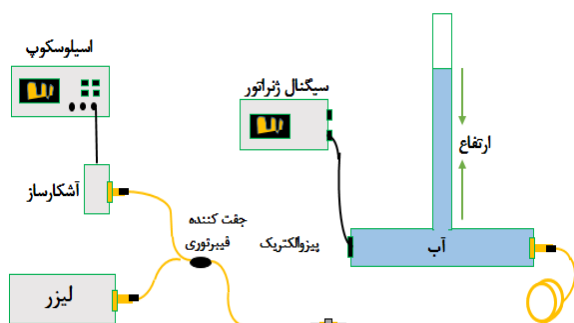
حسگر گزارش شده در این مقاله از نوع حسگرهای غیرذاتی فیبری است. دیافراگم ساخته شده بر اساس تشدیدگر فابری-

حس کننده می شود. نور از انتهای فیبرنوری و دیافراگم ساخته شده با لایه نشانی نانو ذرات نقره بازتاب می شود. نورهای بازتابی از تداخل سنج فابری-پرو در مسیر برگشت از طریق جفت کننده فیبرنوری به آشکارساز رسیده و در آنجا شدت بازتابی بر حسب زمان توسط اسیلوسکوپ ۱۰۰ مگاهرتزی ثبت می شود. سیگنال های ثبت شده برای آنالیز وارد رایانه می شود.



شکل ۳: شمای کلی چیدمان حسگر غیرذاتی فیبر نوری با استفاده از تداخل سنجی فابری-پرو؛ لیزر، آشکارساز نوری، اسیلوسکوپ، جفت کننده فیبرنوری، فیبرنوری تک مد و سر حسگر که دیافراگم در آن قرار دارد.

قبل از آزمایش اندازه گیری تخلیه جزئی، حسگر ساخته شده در چیدمانی که شمایی از آن در شکل ۴ آمده است مورد آزمایش قرار می گیرد تا بدین وسیله از عملکرد دقیق آن در بسامدهای مختلف اطمینان حاصل گردد. در این آزمایش بسامدهای مختلف موج صوتی با استفاده از یک تولید کننده سیگنال و یک ارتعاش گر پیرو تولید می شوند. به منظور شبیه سازی شرایط ترانسفورماتور حسگر و منبع صوتی در داخل مخزن آب غوطه ور هستند. نتایج حاصل از این آزمایش برای بسامدهای گوناگون در شکل ۵ آمده است.



شکل ۴: نمایی از چیدمان آزمایشگاهی حسگر برای تست عملکرد آن. شامل: لیزر، آشکارساز نوری، اسیلوسکوپ، جفت کننده فیبرنوری، فیبرنوری تک مد، تولید کننده سیگنال، ارتعاش گر پیرو و مخزن آب.

$$\varphi = \frac{4\pi l}{\lambda} \quad (2)$$

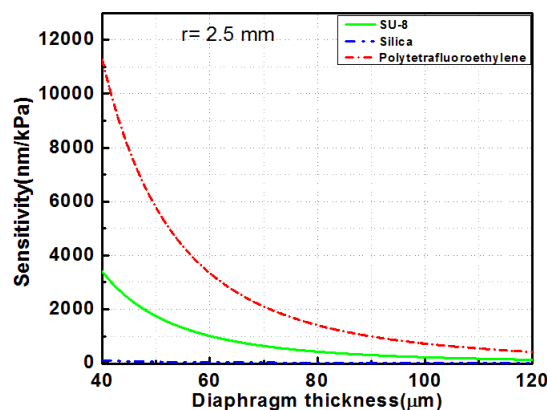
فشار ناشی از موج صوتی روی دیافراگم باعث تعدیل طول کاواک فابری-پرو می شود. بنابراین فاز نسبی معرفی شده در رابطه (۲) تغییر کرده و در نهایت شدت ثبت شده دچار تغییر می شود. با اعمال تبدیل فوریه از شدت ثبت شده در واحد زمان اطلاعاتی از بسامد صوت برخوردی به دیافراگم بدست می آید.

برای حسگرهای فیبر نوری غیرذاتی با استفاده از تداخل سنجی فابری-پرو حساسیت دیافراگم بر واحد فشار از رابطه زیر بدست می آید [۴].

$$\eta = \frac{dl}{dp} = \frac{3(1-\nu^2)r^4}{16Et^3} \quad (3)$$

در این رابطه  $p$  فشار،  $\nu$  آهنگ پواسون،  $E$  مدول یانگ،  $r$  شعاع موثر دیافراگم،  $t$  ضخامت دیافراگم می باشند. با جاگذاری مقادیر مربوط به دیافراگم مورد استفاده در این پژوهش  $\eta = 273 \times 10^6 \frac{r^4}{t^3} (nm/kPa)$  بدست می آید. این مقدار برای

فوتورزیست SU-8 و سیلیکا در مقالات قبلی به ترتیب  $89.2 \times 10^6 \frac{r^4}{t^3} (nm/kPa)$  و  $2.5 \times 10^6 \frac{r^4}{t^3} (nm/kPa)$  گزارش شده است [۲۱]. در شکل ۳، حساسیت سه دیافراگم ذکر شده بر حسب ضخامت آنها رسم شده است.



شکل ۲: نمودار حساسیت محاسبه شده دیافراگم به شعاع ۲/۵ میلی متر بر حسب ضخامت آن برای سه دیافراگم ساخته شده از سیلیکا (نمودار آبی)، فوتورزیست SU-8 (نمودار سبز) و پلی تترافلورواتیلن (نمودار قرمز).

### ۳- شرح آزمایش و نتایج

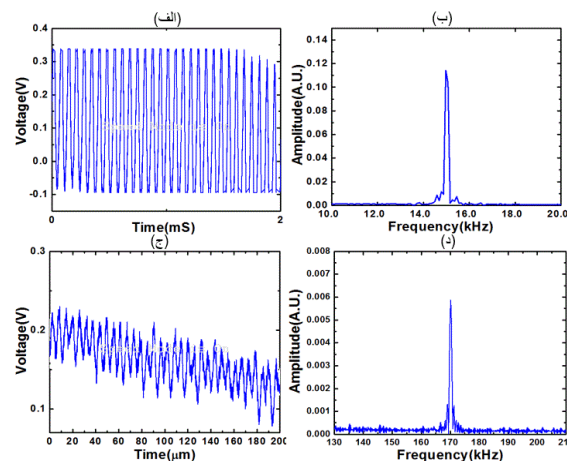
شکل ۳، شمای کلی از چیدمان آزمایش را نمایش می دهد. نور لیزر نامرئی با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر پس از گذر از جفت کننده فیبرنوری، از طریق فیبرنوری تک مد وارد قسمت

#### ۴- نتیجه‌گیری

گزارشی از ساخت و آزمایش یک حسگر غیرذاتی فیبر نوری با استفاده از روش تداخل‌سنجی فابری- پرو ارائه شده است. ساخت دیافراگم حسگر فیبر نوری با استفاده از فیلم نازک پلی‌تترافلئورواتیلن و لایه‌نشانی نانو ذرات نقره صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد حساسیت حسگر ساخته شده تقریباً  $3/5$  برابر بهتر از نمونه‌های گزارش شده‌ی قبلی است [۲]. همچنین این حسگر توانایی کارکرد در پهنای بسامدی تا  $475 \text{ kHz}$  را داراست. نتایج اندازه‌گیری موج صوتی ناشی از تخلیه جزئی با استفاده از حسگر ساخته شده در این مقاله آمده است.

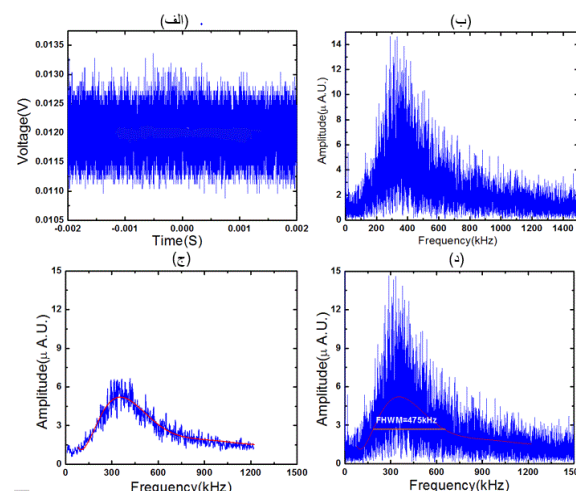
#### مراجع

- [1] Bing Yu et al. App. Opt., 3241–3250, 2003.
- [2] Shang Ya-na, et al. Opt., Vol.11 No.1, 1 January 2015.
- [3] Heavens O. S., Optical Properties of Thin Solid Films, Courier Dover Publications, 1991.
- [4] Giovanni D., Flat and Corrugated Diaphragm Design, Handbook, CRC Press, 1982.
- [5] H. Bae and M. Yu, Optics Express 20, 14573, (2012).
- [6] Qiaoyun Wang, et al, Sensors and Actuators B: Chemical 153, 214(2011).
- [7] WANG Wei, WANG Zan, WU Yankun, DU Jiazhen and, LI Fuping, High Voltage Engineering 40, 814(2014).



شکل ۵: (الف)، سیگنال ثبت شده توسط اسیلوسکوپ با فرکانس  $15 \text{ kHz}$ ، طیف فوریه‌ی مربوط به سیگنال دریافتی حسگر از فرکانس  $15 \text{ kHz}$ ، (ب)، سیگنال ثبت شده توسط اسیلوسکوپ با فرکانس  $170 \text{ kHz}$ ، (ج)، طیف فوریه‌ی مربوط به سیگنال دریافتی حسگر از فرکانس  $170 \text{ kHz}$ .

سیس حسگر ساخته شده به منظور اندازه‌گیری موج صوتی ناشی از تخلیه جزئی استفاده شد که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶-الف، سیگنال موج صوتی تخلیه جزئی ثبت شده توسط حسگر فیبر نوری را نشان می‌دهد. شکل ۶-ب طیف بسامد ناشی از تبدیل فوریه‌ی مربوط به سیگنال صوتی تخلیه جزئی، ۶-ج میانگین داده‌ها جهت برازش و ۶-د پهنای باند موجود در تخلیه جزئی ثبت شده توسط حسگر را نشان می‌دهند.



شکل ۶: الف: موج صوتی ناشی از تخلیه جزئی ثبت شده توسط حسگر فیبر نوری فابری- پرو، ب: طیف بسامد بدست آمده از تبدیل فوریه‌ی مربوط به الف، ج: میانگین‌گیری روی داده‌ها بمنظور برازش محلی، د: پهنای باند موجود در تخلیه جزئی.