

Designing and manufacturing of the laboratory optical fiber sensor for detection of the gas pressure by Fabry-Perot method and the investigation of the effect of the polymer material on its sensitivity.

A. Riahi,^{*} F. Bashiri, H. Moradi

Ph.D. Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 29/03/2023 revised: 01/09/2023 Accepted: 23/09/2023 published: 07/11/2023)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.2.11.4>

In this paper, design and fabrication of Fabry-Perot optical fiber sensors with a coating of polyurethane, Soft PVC and Rigid PVC with the same thickness of 300 μm and a cavity length of 0.1 mm was introduced for the pressure gas and the effect of these three polymeric materials on the sensitivity of gas pressure sensors was investigated. The above sensors have been tested at a constant laboratory temperature and have been compared with each other. To perform gas pressure tests, two gases of oxygen and nitrogen in the pressure range of 10 to 50 mbar have been used. The sensitivity of the sensor with the coated polyurethane for oxygen and nitrogen gas is 0.438 and 0.392 nm/bar, respectively, the sensor coated with soft PVC has the sensitivity of 0.311 and 0.224 nm/bar, for oxygen and nitrogen gas respectively, and the sensors with rigid PVC coated for oxygen and nitrogen gas has the sensitivities of 0.298 and 0.186 nm/mm, respectively. The results show that the sensor made with polyurethane coating is more sensitive than the other sensors.

Keywords: Optical Fiber, Optical Fiber Sensor, Fabry-Perot Sensor, Gas Pressure, Polymeric Materials

* Corresponding author E-mail: areyahi@ihu.ac.ir

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

علمی - پژوهشی

طراحی و ساخت حسگر فیبر نوری آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری فشار گازها به روش فابری - پرو و بررسی تأثیر جنس پلیمری بر حساسیت آن

فرزاد بشیری^۱، علی ریاحی^{۲*} ID، حامد مرادی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- مربی، ۳- دکترای تخصصی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱، انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.2.11.4>

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در این مقاله، طراحی و ساخت حسگر فیبر نوری فابری-پرو با لایه‌ای از مواد پلیمری پلی‌یورتان، پی‌وی‌سی نرم و پی‌وی‌سی سخت با ضخامت‌های یکسان ۳۰۰ میکرومتر و طول کاواک ۰/۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری فشار گاز معرفی شده و تأثیر این سه ماده پلیمری بر حساسیت حسگری فشار گاز مورد بررسی قرار گرفته است. حسگرهای فوق در دمای ثابت آزمایشگاهی تست شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای انجام تست‌های فشار گاز از دو گاز اکسیژن و نیتروژن در بازه فشاری ۱۰ تا ۵۰ میلی‌بار استفاده شده است. حسگر با لایه پلی‌یورتان برای گاز اکسیژن و نیتروژن به ترتیب دارای حساسیت ۰/۴۳۸ و ۰/۳۹۲ نانومتر بر میلی‌بار، حسگر با لایه پی‌وی‌سی نرم برای گاز اکسیژن و نیتروژن به ترتیب دارای حساسیت ۰/۳۱۱ و ۰/۲۲۴ نانومتر بر میلی‌بار و حسگر با لایه پی‌وی‌سی سخت برای گاز اکسیژن و نیتروژن به ترتیب دارای حساسیت ۰/۲۹۸ و ۰/۱۸۶ نانومتر بر میلی‌بار می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که حسگر ساخته شده با لایه نشانی پلی‌یورتان حساسیت بیشتری نسبت به حسگرهای ساخته شده برای هر دو گاز دارد.

کلیدواژه‌ها: فیبر نوری، حسگر فیبر نوری، حسگر فابری-پرو، فشار گاز، مواد پلیمری

۱- مقدمه

بسیار گسترده شود. از انواع این اندازه‌گیری‌ها می‌توان به تغییر شکل‌های ساختاری، فرکانس، ارتعاش، مد فضایی، فشار، دما، کرنش، شتاب، میدان مغناطیسی و سرعت سیال اشاره کرد که تعدادی از آنها از مرحله تحقیقاتی خارج شده و نمونه‌های تجاری آنها نیز ساخته شده است [۱]. بسته به اینکه کدام خصوصیت نور در فرایند حسگری تغییر می‌کند؛ حسگرهای فیبر نوری به چهار دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. این چهار دسته، حسگرهای مبتنی بر شدت نور، حسگرهای مبتنی بر فاز نور (حسگرهای تداخلی)، حسگرهای مبتنی بر قطبش نور (حسگرهای قطبشی) و حسگرهای مبتنی بر طول‌موج نور (حسگرهای طیفی) هستند [۵-۸]. یکی از انواع حسگرهای فیبر نوری مبتنی بر فاز نور، حسگرهای فیبر نوری فابری-پرو هستند. این حسگرها به صورت نقطه‌ای و آرایه‌ای قابل پیاده‌سازی هستند [۹-۱۱]. این حسگرهای با ابعاد بسیار کوچک، دارای حساسیت خیلی زیاد هستند. اگر یکی از بازتابنده‌های فابری-پرو در این حسگرها به حالت دیافراگم باشد، می‌تواند برای فشارسنجی استفاده شود. مواد مختلفی را می‌توان به

در دنیای امروز حسگرها نقش اساسی در زندگی بشر ایفا کرده‌اند. مقوله اندازه‌گیری و ابزار اندازه‌گیری به‌ویژه توسعه حسگرها یکی از موضوعاتی است که در چند سال اخیر به طور خیلی سریع توسعه یافته است. امروزه با تنوع گسترده در انواع حسگرها، ارائه حسگری که از نظر سرعت و دقت حسگری نسبت به روش‌های پیش از خود دارای برتری‌هایی باشد، دارای اهمیت فراوانی است. از دهه ۱۹۷۰ به بعد استفاده از فیبرهای نوری گسترده‌تر شد، به‌عنوان نمونه می‌توان به استفاده در صنعت مخابرات، پزشکی، حسگری و... اشاره کرد. استفاده از حسگر فیبر نوری جهت سنجش پارامترهای فیزیکی و شیمیایی، رؤیایی بود که پس از سال ۱۹۷۰ محقق شد [۴-۱]، و تاکنون موارد مختلفی از آنها ساخته و مورد آزمایش و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. تنوع اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط حسگرهای فیبر نوری باعث شده که کاربرد این حسگرها

هر کدام از این پلیمرها، مناسب‌ترین ماده پلیمری به‌عنوان حسگر با حساسیت بالا پیشنهاد می‌گردد.

۲- مبانی نظری

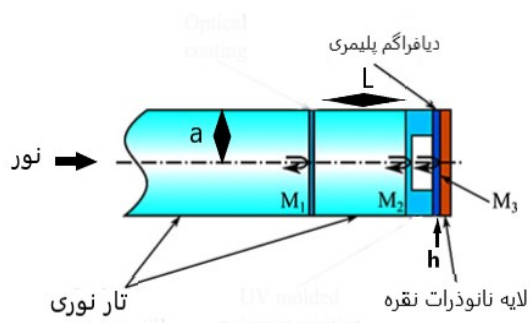
تداخل‌سنجی دانش ترکیب دو یا چند موج است، به نحوی که با بررسی موج حاصل از این ترکیب بتوان اطلاعاتی در مورد موج‌های ورودی به دست آورد. اساس کار تداخل‌سنج‌ها بر پایه اصول تداخل نور می‌باشد. در سال ۱۸۹۶ تداخل‌سنج فابری- پرو یا تداخل‌سنج چند باریکه‌ای و یا اتالون توسط چارلز فابری^۱ و آلفرد پرو^۲ ساخته شد. این تداخل‌سنج در نورشناسی جدید از اهمیت خاصی برخوردار است. این تداخل‌سنج از یک تیغه شفاف با دو سطح بازتابنده یا از دو آینه موازی با بازتابندگی زیاد ساخته می‌شود. (از نظر فنی باید تیغه اول را اتالون و دو آینه را تداخل‌سنج نامید، ولی معمولاً این دو اصطلاح را به‌جای هم به کار می‌برند). طیف عبوری تابعی از طول موج است که قله‌هایی بزرگ از تشدیدهای عبوری از اتالون را نشان می‌دهد [۲۱]. در مواقعی که این دستگاه به عنوان تداخل‌سنج به کار می‌رود، طول هوای مسدود از چندین میلی‌متر تا چندین سانتی‌متر تغییر می‌کند و وقتی که به‌عنوان کاواک تشدید لیزر به کار می‌رود؛ غالباً این طول به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. مهم‌ترین مزیت تداخل‌سنج فابری- پرو، تیز و ظریف بودن فریزهای آن است که باعث بالارفتن توان تفکیک دو طول موج می‌شود. با افزایش ضریب بازتاب آینه‌ها، ظرافت فریزها نیز افزایش می‌یابد.

حسگرهای فیبر نوری بر پایه میکروکاواک تداخل‌سنجی فابری- پرو استفاده گسترده‌ای در اندازه‌گیری فشار دارند. حسگرهای فابری- پرو فیبر نوری عموماً نیز به دو دسته درونی و بیرونی طبقه‌بندی می‌شوند. در هر نوع از حسگرهای درونی و بیرونی اغلب از یک فیبر تک‌مد برای انتقال نور از یک منبع ساطع‌کننده به تداخل‌سنج و از تداخل‌سنج به آشکارساز استفاده می‌شود. در حسگرهای فیبر نوری بیرونی، حسگری در خارج از فیبر نوری انجام می‌شود. فیبر نوری تنها مجرای برای انتقال نور بود که به این حسگرها، حسگرهای فیبر نوری بیرونی (غیرذاتی^۳) می‌گویند. در این حالت، فیبرها به طور فعال در عمل حسگری شرکت ندارند و فقط وظیفه هدایت و انتقال باریکه نور را بر عهده دارند. در این حسگرها، حسگر بیرون از فیبر نوری قرار دارد. فیبر نوری به‌عنوان محیط انتقال‌دهنده نور به آشکارساز و پردازشگر عمل می‌کند. حسگری باید متناسب با تغییرات عوامل محیطی انتخاب شود تا برای مدوله کردن خواص نور در پاسخ به اغتشاش محیطی مورد نظر قابل طراحی باشد. بنابراین در این پیکربندی

عنوان دیافراگم مورد استفاده قرار داد [۱۲]. روش‌های مختلفی با استفاده از پلیمر [۱۳]، گرافین [۱۴]، سیلیکون [۱۵]، طلا [۱۶]، نقره [۱۷] و... در ساختن دیافراگم این نوع حسگرها استفاده شده است. شیائو و همکاران (۲۰۰۴) جزء اولین گروه‌هایی بودند که درباره حسگرهای فیبر نوری فابری- پرو برای اندازه‌گیری فشار گاز به پژوهش پرداختند. گاز مورد استفاده آن‌ها نیتروژن بود. در نتایج به دست آمده حساسیت فشار ۰/۳۵ پوند بر اینچ مربع است، که این نشان می‌دهد این حسگرها حساسیت بالایی برای فشار دارند [۱۰]. هیونگدبانه و همکاران (۲۰۱۴) یک حسگر فیبر نوری فابری- پرو برای اندازه‌گیری فشار گاز ساختند، که دیافراگم آن از جنس کامپوزیت پلیمری بود در نتیجه حساسیت حسگر آن‌ها ۰/۰۱۲ میکرومتر بر کیلوپاسکال به دست آمد [۱۸]. جونگه‌یون و همکاران در سال (۲۰۱۵) یک حسگر فیبر نوری فابری- پرو ساختند که دیافراگم آن‌ها از جنس پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، پارلین و طلا بود که در نهایت حساسیت حسگر آن‌ها در اندازه‌گیری فشار گاز ۱/۴۱ میکرومتر بر کیلوپاسکال به دست آمد [۱۹]. ژانگ و همکاران در سال (۲۰۱۷) یک حسگر فیبر نوری مبتنی بر فناوری فابری- پرو با استفاده از دیافراگم پلی‌وینیل‌کلراید برای اندازه‌گیری فشار گاز با حساسیت فوق‌العاده بالا ارائه کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که حساسیت فشار ۶۵/۵ نانومتر بر مگاپاسکال در ۱۵۶۵ نانومتر و اختلاف حساسیت در دمای پایین ۵/۵ کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱۲]. شیوه‌چان‌هر و همکاران (۲۰۲۱) سه عدد حسگر فیبر نوری فابری- پرو با ضخامت‌های مختلف ۰/۵، ۰/۷ و ۱ میلی‌متر ساختند. دیافراگم آن‌ها از جنس اپوکسی بود و در نتیجه بهترین حساسیت حسگرهای آن‌ها ۱۷۵/۵ پیکومتر بر کیلوپاسکال برای حسگر با ضخامت ۰/۵ پیکومتر بر میلی‌متر بود [۲۰]. حسن شاهی و همکاران (۲۰۲۲) سه عدد حسگر فیبر نوری فابری- پرو با ضخامت‌های مختلف ۴۲، ۵۶ و ۷۰ میکرومتر و طول کاواک یکسان ۱/۲۵ میلی‌متر ساختند. دیافراگم آن‌ها از جنس پی‌وی‌سی بود. تأثیر فشار گاز آرگون و همچنین ضخامت دیافراگم به‌عنوان مؤلفه مهم بر حساسیت حسگری فشار گاز مورد بررسی قرار گرفت. در نتیجه بهترین حساسیت حسگرهای آن‌ها ۰/۰۳۵ نانومتر بر میلی بار برای حسگر با ضخامت ۴۲ میکرومتر بود [۸].

در این تحقیق، حسگرهای فیبر نوری ارزان‌قیمت، دارای ابعاد کم و در عین حال با حساسیت بالا مبتنی بر کاواک فابری- پرو مورد بررسی قرار گرفته است. هدف بررسی تأثیر جنس مواد پلیمری مختلف با ضخامت و طول کاواک یکسان بر حسگر فیبر نوری فابری- پرو برای اندازه‌گیری فشار گاز اکسیژن و نیتروژن می‌باشد. در این راستا از مواد پلیمری مختلف با نام‌های پلی‌یورتان، پی‌وی‌سی نرم و پی‌وی‌سی سخت برای لایه نشانی حسگرها استفاده می‌شود و در نهایت با در نظر داشتن مدول یانگ

1 - Charles Fabry
2 - Alfred Perot
3 - Extrinsic



شکل (۱). طرح‌واره حسگر فیبر نوری فابری-پرو دیافراگمی

در این شکل، باریکه نور از گاف هوای موجود بین فیبر نوری و پلیمر بازتاب شده و داخل فیبر نوری ترویج می‌شوند. سه موج منعکس شده یکی از انتهای فیبر نوری یعنی سطح M_1 و دو موج دیگری از سطوح داخلی و بیرونی کلاهک پلیمری یعنی سطح M_2 و سطح M_3 به فیبر نوری منتقل می‌شوند. بخش اصلی حسگرها، همان کاواک فابری-پرو است. این کاواک از دو وجه فیبر نوری بریده شده و یک دیافراگم حساس به فشار تشکیل شده است که بین آن‌ها، لایه هوا می‌باشند. حساسیت دیافراگم به تغییرات فشار ΔP بصورت تغییر در طول کاواک ΔL مشخص می‌شود. رابطه بین تغییر فشار ایجاد شده و تغییر طول کاواک بصورت رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۴]:

$$\Delta L = \frac{3(1-\nu^2)D^4}{256Et^3} \Delta P \quad (3)$$

در رابطه (۳)، D و t به ترتیب، قطر و ضخامت دیافراگم هستند. همچنین E و ν به ترتیب نسبت پواسون و مدول یانگ دیافراگم هستند.

۳- فعالیت‌های آزمایشگاهی

به منظور ساخت پروب حسگر فابری-پرو با استفاده از دیافراگم‌هایی با طول کاواک و ضخامت یکسان و مدول یانگ پایین مانند مواد پلیمری خاص و همچنین تست حسگری به تجهیزات اپتیکی، ابزارها و وسایل مکانیکی نیاز می‌باشد. این تجهیزات عبارتند از: دستگاه تحلیل‌گر طیف نوری^۳ (OSA)، لیزر پهن‌بند کوک‌پذیر^۴، پیچ‌کورد فیبر نوری^۵ (FC)، کوپلر فیبر نوری، محفظه خلاء^۶، گیج خلاء، دستگاه پمپ خلاء، کپسول گاز اکسیژن و نیتروژن، کولیس دیجیتال، آداپتور فیبر نوری، فرول سرامیکی، اپوکسی، قطعه آلومینیومی توخالی هم اندازه محفظه خلاء، پلی‌یورتان^۷ (PU)،

نخست فیبر نوری انرژئی نورانی را به سر دیگر آن که حسگر است منتقل می‌کند و در آنجا تغییرات محیطی روی نوری که از حسگر عبور می‌کند تأثیر گذاشته و سپس توسط همان فیبر (و یا یک فیبر نوری دیگر) به آشکارساز منتقل می‌شود. ساختار حسگرهای غیرذاتی تداخل سنجی فابری-پرو به گونه‌ای است که به طور کلی با استفاده از یک فیبر نوری با یک سطح بازتابنده (لایه نشانی شده) یا بریده شده به صورت عمود و قطعه اپتیکی غیر فیبر با یک سطح بازتابنده ساخته می‌شود مانند دیافراگم ثابت شده در یک دیواره توخالی و یک نگهدارنده با دیواره تخت و... دیافراگم در زیر فشار تغییر حالت داده و طول کاواک دچار تغییر می‌شود و سیگنال‌های اعمالی بر حسگر از تداخل باریکه‌های بازتابی نیز تولید می‌شود. بیشینه جابجایی دیافراگم بر اثر فشار بصورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\omega_{\max} = \frac{3(1-\mu^2)pa^4}{16Eh^3}$$

که در این رابطه، a شعاع مؤثر دیافراگم، P فشار، h ضخامت دیافراگم، E مدول یانگ^۱ مربوط به جنس دیافراگم و μ ضریب پواسون^۲ است. همچنین از جمله پارامترهای مؤثر در حساسیت حسگرهای فیبر نوری فابری-پرو، مدول یانگ ماده‌ای است که به عنوان دیافراگم استفاده می‌شود. حساسیت حسگر به میزان مدول یانگ نیز بستگی دارد. ما به دنبال آن هستیم که با استفاده از دیافراگم‌هایی با مدول یانگ پایین مانند مواد پلیمری خاص، حساسیت حسگر را بیشتر کنیم. در نتیجه برای بدست آوردن رابطه حساسیت دیافراگم (مقدار تغییرات جابجایی دیافراگم نسبت به فشار اعمالی روی آن) از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۲۲]:

$$\omega_c = \frac{d\omega_{\max}}{dp} = \frac{3a^4(1-\mu^2)}{16Eh^3} \quad (2)$$

حساسیت دیافراگم با افزایش نسبت پواسون و شعاع و همچنین با کاهش ضخامت دیافراگم و مدول یانگ، افزایش می‌یابد. شکل (۱)، طرح‌واره حسگر فیبر نوری فابری-پرو را نمایش می‌دهد که در انتهای فیبر نوری، دیافراگم پلیمری قرار دارد:

3-Optical Spectrum Analyzer
4-Tunable Laser Wide Source
5-Fixed Connector
6-Vacuum chamber
7-Poly Urethane

1-Young Modulus
2-Poisons Ratio



شکل (۲). سمت راست: نمونه‌ای از لایه ساخته شده، سمت چپ: لایه قرار گرفته روی فیبر نوری

برای لایه‌نشانی Soft PVC بر روی فیبر نوری، ۱۰ لایه Soft PVC را که ضخامت هر لایه آن ۳۰ میکرومتر است، برش داده و روی کاواک هوا بصورت جدا از هم طوری که بین آن‌ها هوا قرار نگیرد، لایه‌نشانی می‌گردد. سپس لایه‌های Soft PVC با چسب و واشر در جای خود ثابت نگه داشته می‌شود.

پس از قراردادن لایه پلیمر بر روی فیبر نوری، حسگر ساخته شده برای قرارگیری در محفظه خلاء آماده می‌شود. در این کار سعی شده است که تست‌ها در خلاء مناسب انجام شود لذا حسگر ساخته شده باید به گونه‌ای در محفظه قرار گیرد که گسیج خلاء فشار کمتر از ۱۰ میلی‌بار را نشان دهد (که در این آزمایش فشار تا ۶ میلی‌بار رسانده شد که عدد قابل قبولی است). برای این کار قطعه آلومینیومی توخالی هم اندازه با محفظه خلاء درست شده و حسگر درون محفظه قرار داده می‌شود. سپس درون آن با رزین اپوکسی پر شده و بعد از یک روز به خوبی خشک شده و درون محفظه خلاء قرار داده می‌شود به گونه‌ای که فضایی برای خروج هوا نداشته باشد.

طریقه درست کردن اپوکسی برای قالب‌گیری قطعه آلومینیومی به این صورت است که یک قاشق غذاخوری از اپوکسی را درون ظرفی ریخته و چهار تا پنج درصد از هاردنر همراه آن را با سرنگ درون ظرف ریخته و مواد به خوبی مخلوط می‌گردد. (این ماده که به آن اضافه شد، باعث می‌شود که اپوکسی حالت چسبندگی به خود بگیرد و درون قالب خشک شود). در آخر هم اپوکسی را درون قطعه آلومینیومی ریخته و یک روز صبر کرده تا قالب آن را به خود بگیرد و به خوبی خشک شود. در شکل (۳) قطعه آلومینیومی و اپوکسی نشان داده شده است.

پی‌وی‌سی نرم (Soft PVC) و پی‌وی‌سی سخت (Rigid PVC)، لایه نانو ذرات نقره.

۳-۱- ساخت حسگر فابری-پرو

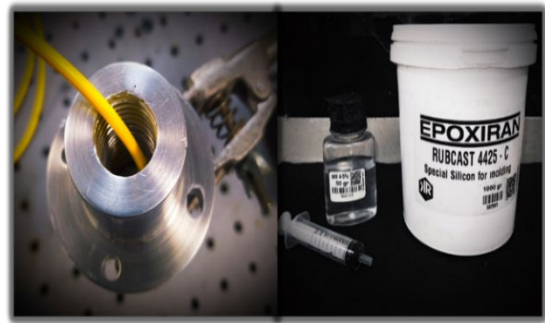
برای ساخت حسگر فیبر نوری فابری-پرو، دو مرحله لازم است. مرحله اول ایجاد کاواک هوا با طول مشخص و مرحله دوم ایجاد لایه‌ای از مواد پلیمری مختلف با ضخامت یکسان بر روی فیبر نوری است. سپس حسگر برای قرارگیری در محفظه خلاء آماده می‌شود. اولین مرحله در ساخت حسگر فیبر نوری فابری-پرو ایجاد کاواک هوا با طول مشخص می‌باشد. برای این کار از یک پچ‌کورد فیبر نوری FC با ضخامت ۱۲۵ میکرومتر استفاده کرده و بر روی یک سر آن فرول سرامیکی قرار داده و با قرار دادن انتهای کولیس دیجیتال در درون فرول سرامیکی به راحتی کاواک هوایی با طول مشخص ایجاد می‌گردد. در این آزمایش برای تمامی حسگرها کاواک هوایی با طول ۰/۱ میلی‌متر ایجاد شد. مهمترین قدم در ساخت حسگر، ایجاد لایه (ایجاد دیافراگم) بر روی فیبر نوری می‌باشد. در این آزمایش پلیمرهایی اعم از پلی‌یورتان (PU)، پی‌وی‌سی سخت (Rigid PVC)، پی‌وی‌سی نرم (Soft PVC) به عنوان لایه دیافراگم استفاده شد. لایه‌های پلی‌یورتان و پی‌وی‌سی سخت با ضخامت‌های ۳۰۰ میکرومتر تهیه و برای کامل کردن مراحل ایجاد لایه (ایجاد دیافراگم)، لایه‌ای از نانو ذرات نقره به اندازه ۵۰ نانومتر بر روی دیافراگم‌ها انجام شد. استفاده از این لایه سبب افزایش میزان بازتاب در این حسگرها بوده و فقط بر روی پلیمرهای پلی‌یورتان و پی‌وی‌سی سخت قابل لایه‌نشانی شدن است. در نهایت لایه تهیه شده بر روی نوک فیبر نوری قرار داده و با چسب در جای خود ثابت نگه داشته می‌شود. نحوه کار به این صورت است که در ابتدا قالبی به اندازه ۳۰۰ میکرومتر آماده شده و بعد از تهیه ماده پلیمری، هاردنر (ماده سفت‌کننده) مخصوص به آن ماده با (حدود پنج درصد) به آن اضافه می‌شود. بعد از مخلوط کردن خوب آنها با یکدیگر، درون قالب ساخته شده ریخته شده و سپس فیبر نوری درون مرکز قالب گذاشته می‌شود. جهت خشک شدن، قالب آماده شده درون مایکروفر به مدت حدود ۹۰ دقیقه قرار داده می‌شود. در نهایت فیبر نوری از قالب جدا شده و فیبر نوری اصلی (همان فیبری که بر روی نوک آن فرول سرامیکی قرار می‌گیرد و توسط کولیس دیجیتال کاواک هوایی با طول ۰/۱ میلی‌متر ایجاد می‌شود) در مرکز قالب قرار داده شده و لایه ایجاد شده را با چسب محکم در جای خود ثابت نگه می‌شود.

۲-۳- آمادگی‌سازی چیدمان اپتیکی جهت تست

حسگرها

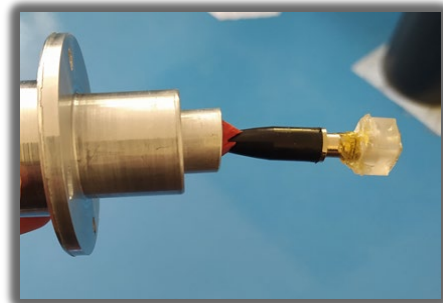
پس از اتمام فرایند ساخت، حسگرها برای انجام تست آماده می‌شوند. در این آزمایش مطابق چیدمان شکل (۷) نور از منبع با طول‌موج مرکزی ۱۵۴۷ نانومتر و پهنای باند ۷۹/۶ نانومتر از طریق فیبر نوری تک‌مد به یک کوپلر می‌رسد. نور بازتابیده از کوپلر ۲*۲ از طریق پورت ورودی استفاده نشده به OSA می‌رسد و طیف بازتابی و اندازه‌گیری‌های مربوطه قابل مشاهده خواهند بود. فشار گاز وارد شده به محفظه برحسب میلی‌بار و در بازه فشاری ۱۰ تا ۵۰ میلی‌بار اندازه‌گیری شده و باعث ایجاد شیفت طول‌موجی در تحلیل‌گر طیف نوری (OSA) می‌گردد. بعد از برپایی چیدمان حسگر، طیف بازتابی از پروب حسگری (شامل بازتابی‌ها از نواحی با ضریب شکست متفاوت) منجر به تشکیل یک طیف تداخلی در بازه وسیعی از طول‌موج‌ها در طیف‌سنج می‌شود. بعد از اعمال گاز در فشار مشخص و تحت تأثیر قرار گرفتن طول و ضریب شکست مؤثر کاواک، تغییر الگوی تداخلی با شاخصه تغییر طول‌موج در طیف‌سنج مشاهده می‌شود. میزان جابجایی طول‌موجی به ازای یک طول‌موج شاخص پایش و ثبت می‌شود که در آن طول‌موج شاخص، به ازای یکی از طول‌موج‌های قله در ابتدای اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. در واقع اعمال فشار گاز سبب انحراف دیافراگم و به تبع آن تأثیر بر طول کاواک خواهد داشت که تغییرات شدتی و طول‌موجی ناشی از آن در طیف‌سنج نوری قابل مشاهده است.

قابل ذکر است یکی از خروجی‌های کوپلر ۲*۲ مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و بدلیل عدم نیاز به این پورت، رها می‌گردد. در واقع در اینجا کوپلر استفاده شده نقش سیرکولاتور را بازی می‌کند که بدلیل نبودن سیرکولاتور، از کوپلر استفاده شده که یکی از خروجی‌های آن رها شده است. همچنین در ادامه تست‌ها گنج خلاء آنالوگ مستقیماً به محفظه خلاء متصل شده و فشار را بر حسب میلی‌بار اندازه‌گیری می‌کند. سپس توسط سیلندر گاز، فشاری به محفظه وارد شده که توسط گنج خلاء آنالوگ اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت میزان تغییرات طول‌موج در دستگاه تحلیل‌گر طیف نوری قابل مشاهده است.



شکل (۳). قرارگیری حسگر در قطعه آلومینیومی و ریختن اپوکسی درون آن

حسگرهای فیبر نوری ساخته شده در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده‌اند:



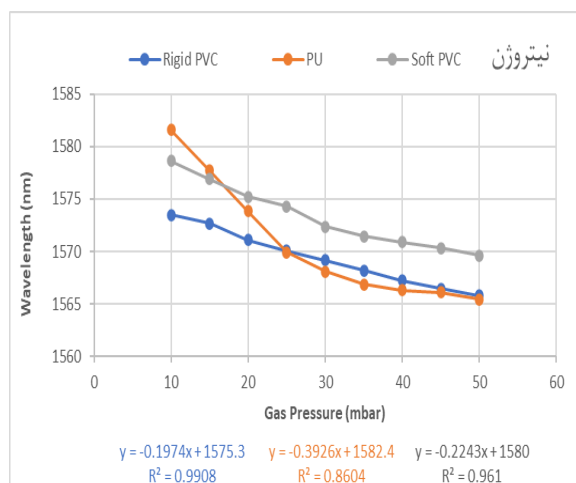
شکل (۴). حسگر فیبر نوری فابری-پرو با لایه PU



شکل (۵). حسگر فیبر نوری فابری-پرو با لایه Rigid PVC



شکل (۶). حسگر فیبر نوری فابری-پرو با لایه Soft PVC



شکل (۹). نمودار تغییرات طول موج بر حسب فشار گاز نیتروژن برای تمامی حسگرها

با توجه به رابطه (۲)، مدول یانگ ماده به عنوان مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر میزان حساسیت حسگر است و با ثابت در نظر گرفتن بقیه پارامترها مانند طول کاواک، ضخامت دیافراگم و... می‌توان نتایج را مورد بررسی قرار داد. با توجه به اینکه پلی‌یورتان نسبت به بقیه پلیمرها از مدول یانگ کمتری برخوردار است، لذا این پلیمر نسبت به پلیمرهای دیگر دارای حساسیت بیشتری است. نتایج ناشی از اترگذاری جنس پلیمر بر حساسیت حسگر از جداول (۱) و (۲) نیز قابل مشاهده است.

جدول (۱). حساسیت حسگرها نسبت به گاز اکسیژن

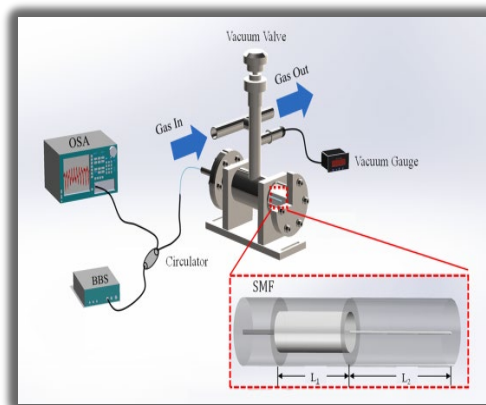
حساسیت حسگر با لایه Rigid PVC (نانومتر بر میلی‌بار)	حساسیت حسگر با لایه Soft PVC (نانومتر بر میلی‌بار)	حساسیت حسگر با لایه PU (نانومتر بر میلی‌بار)
۰/۱۹۷	۰/۲۲۴	۰/۳۹۲

جدول (۲). حساسیت حسگرها نسبت به گاز نیتروژن

حساسیت حسگر با لایه Rigid PVC (نانومتر بر میلی‌بار)	حساسیت حسگر با لایه Soft PVC (نانومتر بر میلی‌بار)	حساسیت حسگر با لایه PU (نانومتر بر میلی‌بار)
۰/۲۹۸	۰/۳۱۱	۰/۴۳۸

۵- نتیجه‌گیری

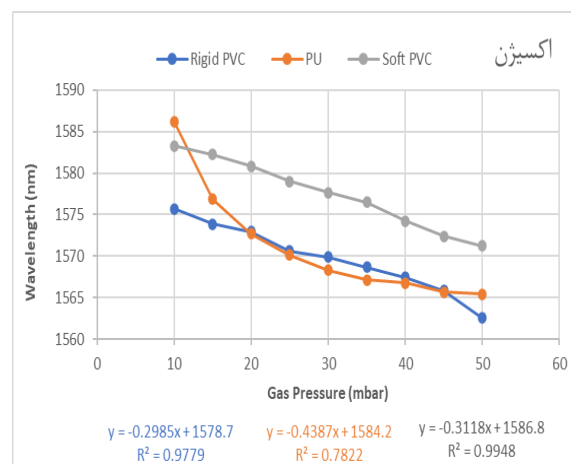
در این مقاله، طراحی و ساخت سه عدد حسگر فیبر نوری فابری پرو با لایه‌نشانی مواد پلیمری با مدول یانگ متفاوت اعم از پلی‌یورتان، پی‌وی‌سی نرم و پی‌وی‌سی سخت با ضخامت‌های یکسان ۳۰۰ میکرومتر و طول کاواک ۰/۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری فشار گاز معرفی شده و تأثیر این سه مواد پلیمری بر حساسیت حسگری فشار گاز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به



شکل (۷). چیدمان تجربی حسگر فیبر نوری فابری-پرو برای اندازه‌گیری

۴- نتایج و بحث

پس از انجام تست حسگرها به کمک دستگاه تحلیل‌گر طیف نوری و با استخراج اطلاعات مهم طیف خروجی از دستگاه تحلیل‌گر طیف نوری تحلیل طیف‌ها مدنظر قرار گرفت. نمودار تغییرات طول موج بر حسب فشار رسم شده به کمک نرم‌افزار اکسل در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است با تحلیل نمودار هر کدام از این حسگرها و قیاس آن‌ها با یکدیگر، می‌توان حساسیت حسگرها را با یکدیگر مقایسه کرد. در شکل (۸) و (۹) شیب تغییرات طول موجی حسگری نسبت به هم مشاهده می‌شود که تغییرات طول موج نسبت به فشار کاهشی است. از آنجایی که شیب نمودار معیاری برای حساسیت حسگر است، می‌توان مقایسه‌ای میان حساسیت حسگرهای با لایه‌های پلیمری مختلف به عمل آورد. بررسی حسگرها در دمای ثابت آزمایشگاهی انجام و از دو گاز اکسیژن و نیتروژن در بازه فشاری ۱۰ تا ۵۰ میلی‌بار به منظور بررسی تست‌های فشار استفاده شده و دستگاه برای این دو گاز کالیبره است.



شکل (۸). نمودار تغییرات طول موج بر حسب فشار گاز اکسیژن برای تمامی حسگرها

- [14] J. Ma, H. Xuan, H. Ho, and W. Jin, "Fiber-optic Fabry-perot Acoustic Sensor with Multilayer Graphene Diaphragm," *IEEE Photonics Technology Letters* 25(10), 932-935, 2013.
- [15] C. Pang, H. Bae, A. Gupta, k. Bryden, M. Yu "MEMS Fabry-Pérot Sensor Interrogated by Optical System-on-a-Chip for Simultaneous Pressure and Temperature Sensing," *Opt. Express* 21, 21829-21839, 2013.
- [16] W. Zhang, P. Lu, W. Ni, W. Xiong, J. Zhang, "Gold-Diaphragm Based Fabry-Perot Ultrasonic Sensor for Partial Discharge Detection and localization," *IEEE Photonics J.* 15, 4256-4167, 2020.
- [17] F. Xu, et al. "Fiber-Optic Acoustic Pressure Sensor Based on large-Area Nanolayer Silver Diaphragm," *Opt. Lett.* 39, 2838-2840, 2014.
- [18] B. Hyungdae, et al. "Hybrid Miniature Fabry-Perot Sensor with Dual Optical Cavities for Simultaneous Pressure and Temperature Measurements," *Journal of Lightwave Technology* 32.8 . 1585-1593, 2014.
- [19] E. Jonghyun, et al. "Fiber optic Fabry-Perot Pressure Sensor Based on lensed Fiber and polymeric Diaphragm," *Sensors and Actuators A: Physical* 225 . 25-32, 2015
- [20] H. Shiuh-Chuan, Sh. Zhong Weng, "Fiber Bragg Grating Pressure Sensor Integrated with Epoxy Diaphragm," *Sensors* 21.9 . 3199, 2021.
- [21] C. Fabry, A. Perot, "Theorie et Applications d'une Nouvelle Methode de Spectroscopie Interferentielle," *Ann. Chim. ser.* 16, 115-144, 1899.
- [22] S. Muzalifah Mohd, et al. "A new Diaphragm Material for Optical Fibre Fabry-Perot Pressure Sensor," 2009 Fifth International Conference on Mems of Nano, and Smart Systems. IEEE, 2009.

شیب نمودار (تغییرات طول موج بر حسب فشار) مشاهده می‌شود که حسگر لایه‌نشانی شده با پلی‌یورتان برای گاز اکسیژن و نیتروژن به ترتیب دارای حساسیت ۰/۴۳۸ و ۰/۳۹۲ نانومتر بر میلی‌بار، حسگر لایه‌نشانی شده با پی‌وی‌سی نرم برای گاز اکسیژن و نیتروژن به ترتیب دارای حساسیت ۰/۳۱۱ و ۰/۲۲۴ نانومتر بر میلی‌بار و حسگر لایه‌نشانی شده با پی‌وی‌سی سخت برای گاز اکسیژن و نیتروژن به ترتیب دارای حساسیت ۰/۲۹۸ و ۰/۱۹۷ نانومتر بر میلی‌بار می‌باشند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حسگر ساخته شده با لایه‌نشانی پلی‌یورتان حساسیت بیشتری نسبت به حسگرهای ساخته شده برای هر دو گاز دارد.

۶- مراجع

- [1] Udd. Eric, William B. Spillman Jr, et al. "Fiber Optic Sensors: an Introduction for Engineers and Scientists," *John Wiley & Sons*, 2011.
- [2] N. Rasouli, et al. "Design and Simulation of a Novel Surface Plasmon Based Bio-Nanosensor for Detection of DNA Hybridization," *Journal of Passive Defence Science and T* 11. 275-278, 2020.
- [3] A. Riahi, et al. "Simulation and Fabrication of Tapered Fiber Optics Hydrogen Sensor," *Journal of Applied Electromagnetic* 6. 15-21 in Persian, 2018.
- [4] A. Riahi, et al. "Investigation of the Effect of the Taper Geometry on the Sensitivity of Tapered-fibre gas Sensors," *Journal of Modern Optics* 67.14 . 1259-1266, 2020.
- [5] G. Rajen, "Optical Fiber Sensors," *CRC Press* 1, 8-15, 2015.
- [6] K. Grattan, and B. Meggitt Wolfoes, "Optical Fiber Sensor Technology," *Springer Press* 1, 120-130, 2000.
- [7] Z. Gong, K. Chen, X. Zhou, and Z. Zhao, "High Sensitivity Fabry-Perot Interferometric Acoustic Sensor for low Frequency Acoustic Pressure Detection," *Journal of Lightwave Technology* 35(24), 5276-5279, 2017.
- [8] J. Khalilzadeh et al. "Experimental study of Diaphragm Thickness Effect on the Sensitivity of the Gas Pressure Sensor Based on Fabry-Perot Optical fiber," *Scientific Journal of Applied Electromagnetics* 10.1 2022.
- [9] J. Xu, X. Wang, and A. Wang, "Miniature all-silica Fiber optic Pressure and Acoustic Sensor," *Optics Letters* 37(2), 3269-3271, 2005.
- [10] G Z. Xiao et all. "Fiber optic Fabry Perot Gas pressure Sensors Embedded in Pressure Fitting," *Microwave and Optical Technology Letters*, 42(6), 486-489, 2004.
- [11] H. Moradi, et al. "Fiber optic Fabry-Pérot Acoustic Sensor using PVC and GO Diaphragms," *OSA Continuum*, 3.4: 943-951, 2020.
- [12] Z. Zhang et all, "High Sensitivity Gas Pressure Sensor Based on Fiber tip PVC Diaphragm Fabry Perot Interferometer," *Journal of lightwave Technology*, 35(18), 4067-4071, 2017.
- [13] Q. Y. Wang, Q. X. Yu, "Polymer Diaphragm Based Sensitive Fiber Optic Fabry-Perot Acoustic Sensor," *Chin. Opt. Lett.* 8, 266-269, 2010.