

طراحی سنسوری ترکیبی فایبر نوری نازک‌شده و FBG_{Taper} برای اندازه‌گیری هم‌زمان درجه حرارت و فشار

پوهنیار حمیدالله ذهین

دیپارتمنت فزیک، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون ارزگان، ارزگان، افغانستان

ایمیل: zhameedullah12@gamil.com

چکیده

سنسور پنجره‌ی براگ در فایبر نازک‌شده (FBG in tapered fiber) FBG_{Taper} امروزه به دلایلی از جمله حساسیت بالا، عدم تأثیرپذیری از ساحه‌های الکترومغناطیسی، خطی بودن و سبک، کاربردهای زیادی در صنعت برای تشخیص سلامت ساختمان‌های میخانیکي پیدا کرده است. محدودیتی که در استفاده از FBG_{Taper} وجود دارد این است که پاسخ سنسور به درجه حرارت (temperature) و فشار (Pressure) به صورت هم‌زمان می‌تواند باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری فشار در ساختمان‌های مختلف گردد. به این منظور باید بطریقه‌ی اثر درجه حرارت را از اثر فشار تفکیک کنیم. در این مقاله، با طراحی سنسوری ترکیبی فایبر نوری نازک‌شده و FBG_{Taper} راه‌کاری برای حل این مشکل ارائه داده ایم. بررسی‌های انجام‌شده روی سنسوری ترکیبی طراحی‌شده نشان می‌دهد که تداخل حساسیت در سنسور مذکور ایجاد نخواهد شد. در سنسور ترکیبی مذکور، سنسور فایبر نوری نازک‌شده با حساسیت درجه حرارتی $(1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m})$ $-932.8 \frac{\text{pm}}{\text{C}}$ و سنسور FBG_{Taper} با حساسیت درجه حرارتی و فشار به ترتیب $8.62 \frac{\text{pm}}{\text{C}}$ و $5.77 \frac{\text{pm}}{\text{Mpa}}$ به کار گرفته شده اند.

اصطلاحات کلیدی: فایبرنوری نازک‌شده غیر ادیاباتیک؛ سنسور پنجره براگ در فایبرنوری نازک‌شده؛ سنسور فشار؛ درجه حرارت؛ تداخل حساسیت

Discrimination between the Pressure and temperature effects of a FBG_{Taper} sensor using a tapered fiber sensor

Jr. Teaching Asstt. Hameedullah Zahin

Department of Physic, Faculty of Education, Urozgan University, Urozgan, Afghanistan

Email: zhameedullah12@gamil.com

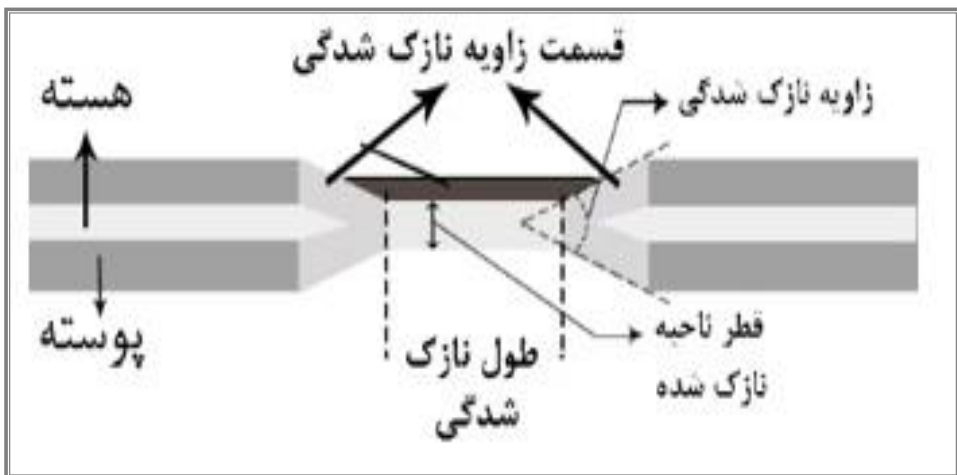
Abstract

FBG_{Taper} (Fiber Bragg Grating in tapered fiber) Sensors have found more usages in the industry to diagnose the safety of mechanical structures due to their high sensitivity, non-exposure to the electromagnetic field, linearity, and lightness. A limitation of the application of FBG_{Taper} sensors is the inability to distinguish the effects of temperature and Pressure in the simultaneous measurement. For this purpose, we must somehow discriminate the effect of temperature from the Pressure. In this Article, by designing a tapered fiber-FBG composite sensor we have provided a solution for this problem. Studies performed on the designed composite sensor show that no sensitivity interference will occur in the sensor. In the composite sensor, a tapered fiber optic sensor with a temperature sensitivity of $-932.8 \frac{\text{pm}}{\text{C}}$ and a FBG_{Taper} sensor with the temperature and Pressure sensitivity of $8.62 \frac{\text{pm}}{\text{C}}$ and $5.77 \frac{\text{pm}}{\text{Mpa}}$, respectively, are used.

Keywords: Non-Adiabatic Tapered Fiber; FBG_{Taper} Sensors; Pressure Sensor Temperature; Sensitivity Interference

مقدمه

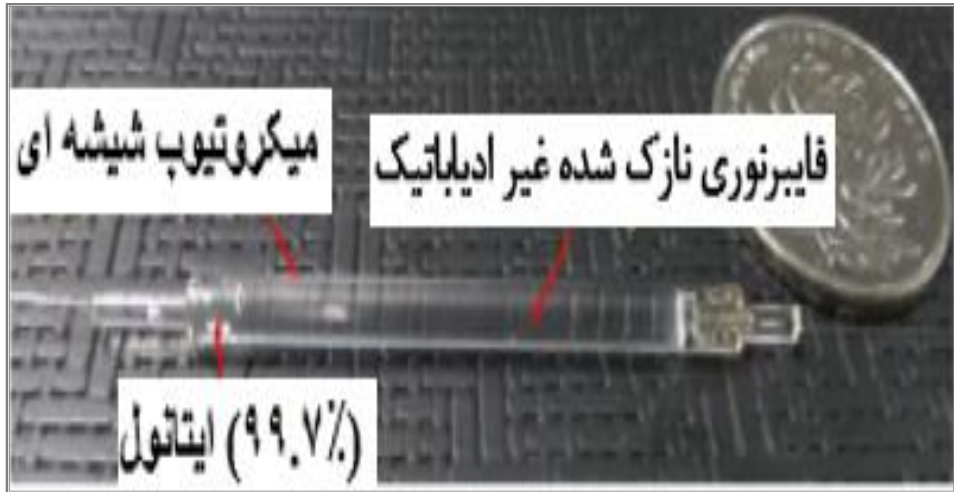
انواع مختلفی از سنسورهای (Sensors) فایبر نوری وجود دارد که سنسور فایبر نوری نازک شده یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. سنسور فایبر نوری نازک شده با استفاده از فایبرهای یک مد و یا چند مد، فایبرهای با ضریب انکسار تناوبی، فایبرهای میکروساختار و یا انواع دیگر فایبر نوری ساخته می‌شود. در فایبر نوری استاندارد، شدت ساحه‌ی موج در سطح خارجی تقریباً صفر است. بنابراین، انتشار نور در این گونه فایبرها به محیط اطراف حساسیت چندانی ندارد. برای ایجاد حساسیت فایبر نوری به محیط بیرونی، آن را به صورت نازک شده در می‌آورند. با نازک کردن فایبر نوری به دلیل کاهش قطر فایبر نوری و افزایش گشودگی عددی (Numerical aperture)، مقدار عمق نفوذ و شدت ساحه موج میرا می‌تواند به طور قابل توجهی زیاد شود (۱،۲). این امر موجب می‌شود که خروجی به تغییرات ضریب انکسار محیط اطراف حساسیت قابل توجهی نشان دهد. قسمت‌های مختلف فایبر نوری نازک شده در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: طراحی فایبر نوری نازک شده و نواحی مختلف آن (۳)

عملکرد یک سنسور درجه حرارتی مبتنی بر فایبر نوری نازک به پوشش حساس لایه‌ی نشانی شده (لایه جاذب) بر روی سطح فایبر نوری متکی است. در این شرایط هنگامی که درجه حرارت محیط اطراف تغییر کند، ویژگی‌های فزیک و کیمیاوی فایبر نوری نازک شده تغییر کرده و این تغییرات ویژگی‌های نور درون فایبر را تغییر می‌دهد. تغییرات ویژگی شعاع نوری داخل فایبر نوری شامل تغییر در شدت، طول موج و یا فاز نور عبوری است. بنابراین، با اندازه‌گیری پارامترهای نور عبوری، می‌توان مقدار درجه حرارت را محاسبه کرد. در سنسور فایبر نوری نازک شده برای تشخیص درجه حرارت از محلول ایتانول استفاده شده (۴) که در شکل (۲) نشان داده شده است. ایتانول به عنوان یک

واکنش دهنده‌ی با درجه حرارت دارای خواص ویژه‌ی است. هنگامی که درجه حرارت محیط اطراف تغییر کند، باعث تغییر طول موج نوری عبوری می‌شود که با آشکارسازی (Detector) این طول موج، در هر نقطه مورد نظر می‌توانیم درجه حرارت را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۲: تصویر واقعی از سنسور درجه حرارتی مبتنی بر فایبر نوری نازک شده (۴)

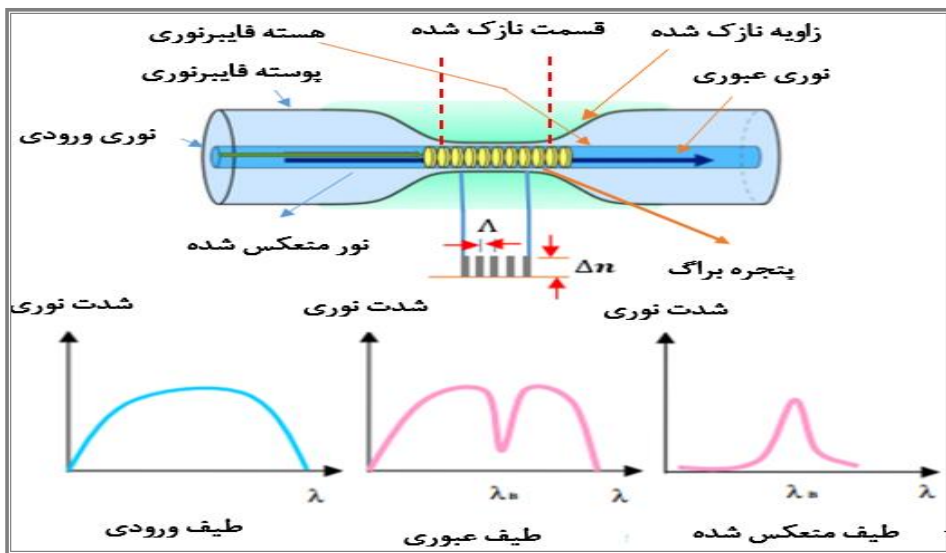
از طرف دیگر با کشف حساسیت نوری (Photosensitivity) در فایبرهای نوری بخش جدیدی از مؤلفه‌های درون فایبر نوری بنام پنجره‌های براگ فایبر نوری (Fiber Bragg gratings) به وجود آمد. این افزاره در فایبر نوری عملیاتی مانند انعکاس و فلتر کردن را با بازدهی بالا و اتلاف کم انجام می‌داد. پنجره‌های براگ فایبر نوری انقلابی در زمینه‌ی مخابرات و سنسورهای فایبر نوری به وجود آوردند. پنجره‌های براگ فایبر نوری به‌طور ساده شامل مودولوشن تناوبی از ضریب انکسار در داخل مغزی فایبر نوری هستند. ساختارهای پنجره؛ مانند در اپتیک موج‌برها دارای اهمیت فراوانی هستند. ساختارهای پنجره برجسته سطحی در اپتیک موج‌برهای مستوی برای پالایه کردن و کوپلاژ نور بکار می‌روند (۵). پنجره‌های براگ فایبر نوری به‌عنوان یک سنسور خوب برای اندازه‌گیری میدان‌های دینامیک و استاتیک از جمله درجه حرارت و فشار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین مزایای سنسورهایی که با استفاده از پنجره‌های براگ فایبر نوری ساخته می‌شوند، می‌توان به ماهیت کدگذاری طول موجی (کمیت مطلق) آن اشاره کرد. این خاصیت موجب می‌شود که سنسورهای پنجره براگ به‌صورت خود مرجع عمل کرده، مستقل از افت و خیزهای سطح نور بوده و نسبت به تغییرات شدت نور منبع و تلفات ناشی از اتصال‌گرها، غیرحساس باشد. با توجه به تلفات جایگزینی کم و طول موج

انعكاسی با پهنای باند نازک این نوع سنسورها، آن‌ها را به راحتی در طول یک فایبر نوری یک مد می‌توان به صورت طول موجی مالتی پلکس کرد (۵).

تداخلات ضریب انکسار منجر به انعکاس نور (منتشر شده در طول فایبر نوری) در گستره‌ی بسیار کمی از طول موج می‌شود که این طول موج، طول موج انعکاسی پنجره برآگ یا λ_B نامیده می‌شود. شکل (۳) طول موج انعکاسی برآگ علاوه بر دوره‌ی تناوب پنجره برآگ به درجه حرارت، فشار و با دیگر عوامل محیطی وابسته است و با اعمال کوچک‌ترین تغییر در عوامل گفته شده تغییر مکان در طول موج انعکاسی خواهیم داشت (۶). از مهم‌ترین مشخصه‌ی FBG_{Taper} ها، این است که در آن‌ها طول موج‌های تشدید شده به سمت منبع منعکس شده و بقیه‌ی طول موج‌ها بدون تغییر و تضعیف از داخل قطعه عبور می‌کنند. این پنجره‌ها شامل تغییرات طولی منظم در ضریب انکسار است. طول موج انعکاسی یک پنجره برآگ فایبر نوری به صورت زیر داده می‌شود:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$$

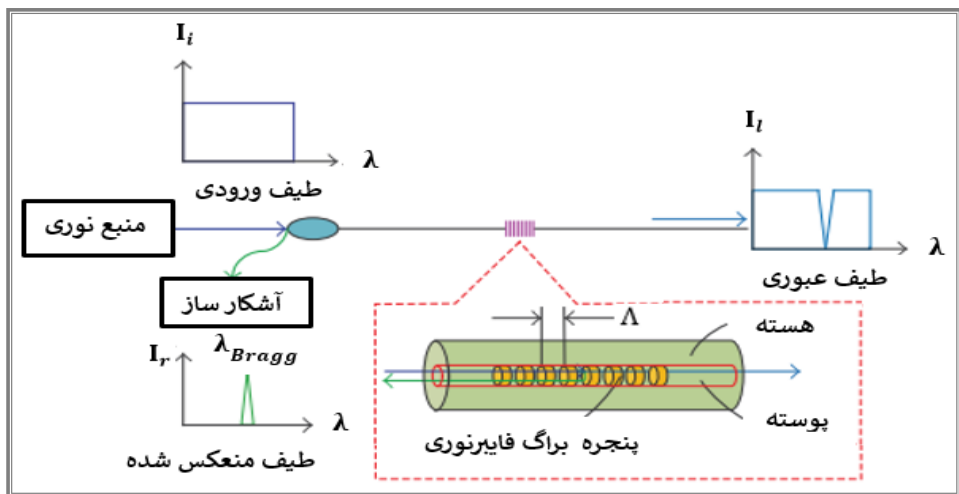
که در آن n_{eff} ، λ_B و Λ به ترتیب طول موج برآگ (طول موج انعکاسی)، ضریب انکسار مؤثر و دوره‌ی تناوب پنجره می‌باشد.



شکل ۳: شمای کلی ساختار پنجره برآگ روی فایبر نوری نازک شده (۷)

اساس کار این سنسورها بر مبنای شبکه‌ی پنجره‌ی برآگ است. شبکه‌ی پنجره برآگ شامل اختلالات تناوبی ضریب انکسار در هسته‌ی فایبر نوری است. این تناوب در چند میلی‌متر یا چند سانتی‌متر است. دوره تناوب معمولاً از مرتبه چند صد نانومتر یا بیشتر است. قطر پوسته معمولاً ۱۲۵ میکرومتر و قطر

هسته ۸ تا ۱۰ میکرون متر است. در این سنسورها شعاع لیزر وارد فایبر نوری شده و بعد از برخورد با این پنجره‌هایی که در مسیر شعاع قرار دارند، طول موج خاص از هر پنجره منعکس می‌شود شکل (۴). به طوری که در طیف انعکاسی نهایی چندین قله انعکاس با طول موج‌های مختلف وجود خواهد داشت (۸). طول موج انعکاسی براگ از هر پنجره به ضریب انکسار فایبر نوری و ناحیه‌ی نازک شده بسیار وابسته است. در شرایط که (درجه حرارت، فشار، رطوبت و...) پایدار، انتظار می‌رود که طول موج معینی از هر پنجره توری منعکس شود ولی وقتی شرایط فیزیکی حاکم بر اطراف فایبر نوری تغییر کند. به دلیل حساسیت بسیار زیاد ضریب انکسار فایبر نوری به تغییرات محیطی، طول موج انعکاسی و طرح تداخلی در قسمت نازک شده از هر پنجره نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین، با آشکارسازی تغییر طول موج انعکاسی براگ می‌توان به میزان و نوع تغییرات فیزیکی در اطراف فایبر نوری پی برد (۹).

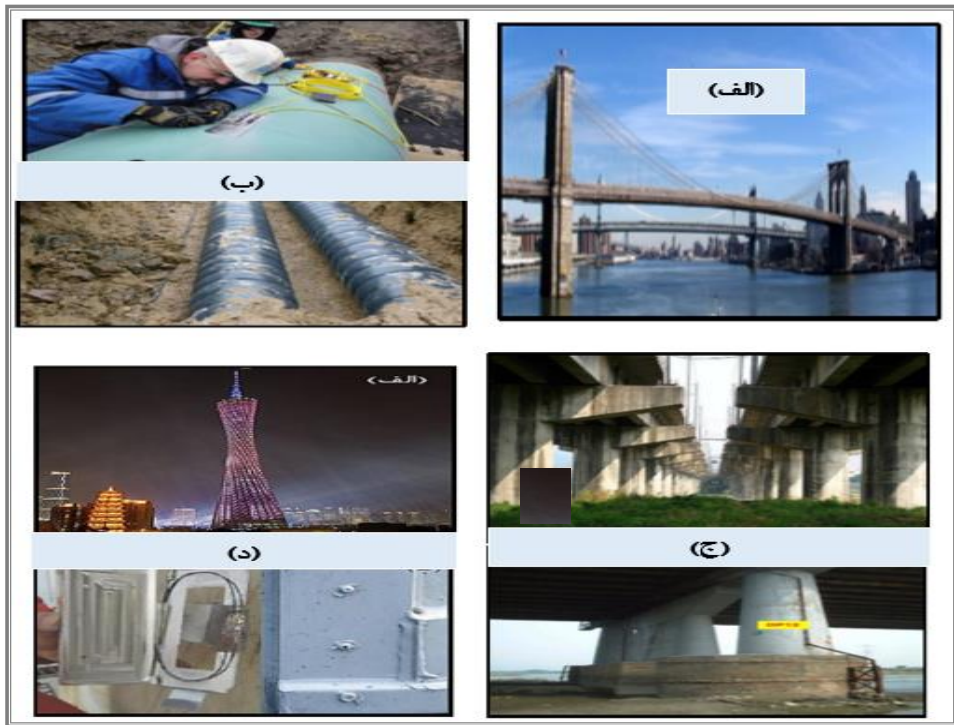


شکل ۴: نحوه عمل کرد سنسور پنجره براگ فایبر نوری (۱۰)

بیان مسأله

سنسور (Sensor) اختصاص شده از کلمه Sen's به معنی حس گر گرفته شده و می‌تواند کمیت‌های مانند فشار، درجه حرارت، کشش و دیگر کمیت‌های فیزیکی بر کمیت‌های برقی متمادی (آنالوگ) و غیر متمادی (دیجیتال) تبدیل کند، سنسورها از انواع دستگاه‌های اندازه‌گیری سیستم‌های کنترل آنالوگ و دیجیتال مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمل کرد سنسورها و قابلیت اتصال آن‌ها به دستگاه‌های مختلف باعث شده است که سنسورها بخشی از اجزای جدانشدنی دستگاه کنترل اتوماتیک باشد، سنسورها بر اساس نوع وظیفه‌ی که برای آن‌ها تعریف شده اطلاعات را به سیستم کنترل کننده می‌فرستند و سیستم طبق برنامه‌ی تعریف شده عمل می‌کنند. پنجره‌های براگ فایبر نوری به عنوان یک سنسور خوب برای

اندازه‌گیری میدان‌های دینامیک و استاتیک از جمله درجه حرارت، فشار، کشش... مورد توجه قرار گرفته‌اند که تعداد از نمونه‌های آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: (الف) پل مشهور بروکلین در نیویارک که در آن برای نمایش تغییرات درجه حرارت و فشار از سنسور پنجره براگ استفاده شده. (ب) استفاده از سنسور فایبر نوری در لوله‌های انرژی. (ج) استفاده از سنسورهای پنجره براگ در پایه‌های پل در تایوان. (د) استفاده از سنسور پنجره براگ در برج کانتون گوانژو چین (۱۴).

محدودیتی که در استفاده از سنسورهای پنجره براگ وجود دارد این است که پاسخ سنسور به درجه حرارت و فشار به صورت هم‌زمان می‌تواند باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری فشار در ساختمان‌های مختلف گردد. لذا ما در جستجو طرح سنسور ترکیبی هستیم که این محدودیت را برطرف نمایند.

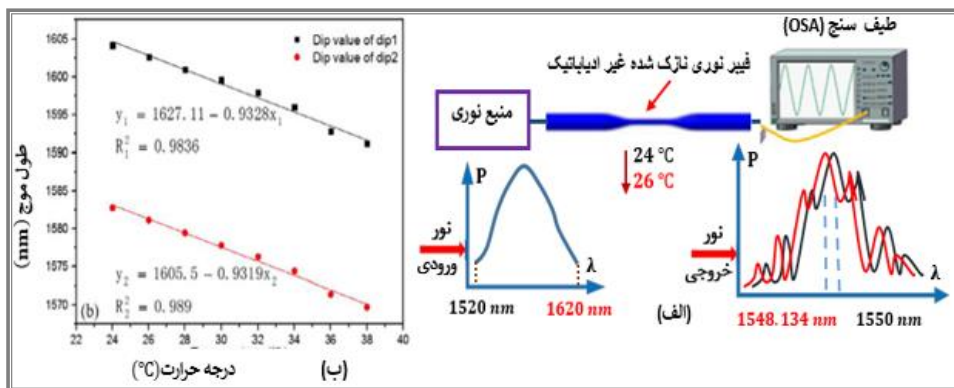
روش تحقیق

در این تحقیق برای رفع تداخل درجه حرارت و فشار از سنسورهای ترکیبی FBG_{Taper} (حساس به درجه حرارت و فشار) و فایبر نوری نازک‌شده (حساس به درجه حرارت) برای اندازه‌گیری درجه حرارت و فشار به صورت هم‌زمان، برای جدا کردن اثر درجه حرارت و فشار به بررسی گرفته شده است. محدودیتی که در استفاده از سنسورهای پنجره براگ بر روی فایبر نوری نازک وجود دارد، این است که پاسخ سنسور به درجه حرارت و فشار به صورت هم‌زمان می‌تواند باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری

فشار در ساختمان‌های مختلف می‌گردد. با استفاده از رابطه‌های تغییرات طول موج با فشار و درجه حرارت و هم چنین اندازه‌گیری مقدار طول موج تغییر یافته به وسیله‌ی هر یک از فایبر نوری نازک شده و پنجره‌ی براگ بر وری فایبر نوری نازک شده، می‌توان مقدار درجه حرارت و فشار را در نقطه مورد هدف تعیین نمود.

برای سنسور فایبر نوری نازک شده: تغییرات درجه حرارت را از ۲۴ درجه سانتی‌گراد تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد با گام ۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. محدوده‌ی طول موج از ۱۵۲۰ نانومتر تا ۱۶۲۰ نانومتر، قطر ناحیه نازک شده حدود ۸ میکرومتر و طول آن حدود ۲۰ ملی متر است، ضریب شکست حدود ۱,۳۶ در نظر گرفته شده، مقدار طول موج با افزایش درجه حرارت تقریباً به‌طور خطی کاهش می‌یابد و حساسیت درجه حرارت $pm/^\circ C$ $-932/8$ در نظر گرفته شده است (۴). برای سنسور پنجره براگ با ضریب شکست مضاعف: طول موج براگ ۱۵۳۰ نانومتر، ضریب انکسار مؤثر $1/45$ و حساسیت درجه حرارت و فشار را به ترتیب $pm/^\circ C$ 8.62 و pm/MPa 5.77 $\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T}$ و $\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta \epsilon}$ درجه حرارت پیرامون پنجره براگ فایبر نوری را از صفر درجه سانتی‌گراد تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد با گام ۲۰ درجه سانتی‌گراد تغییر داده و جایگاه قله انعکاسی اندازه‌گیری می‌گردد و برای اندازه‌گیری فشار مقدار فشار را از صفر تا ۱۰۰۰ MPa با گام ۱۰۰ MPa در نظر گرفته شده (۱۵).

با استفاده از داده‌های بالا گراف رابطه درجه حرارت با تغییرات طول موج برای سنسور درجه حرارتی مبتنی بر فایبر نوری نازک شده در شکل (۶). با استفاده از رابطه ذیل $(\Delta\lambda_{taper} = K_{T taper} \times \Delta T)$ رسم گردیده است.



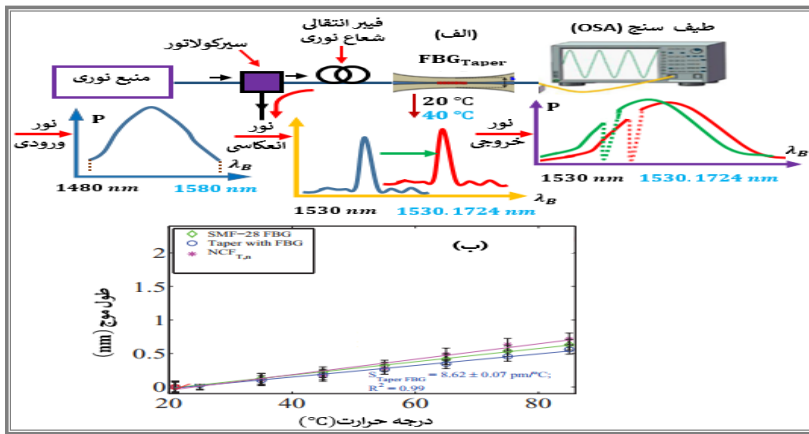
شکل ۶: (الف) گراف شیماتیک چیدمان سنسور درجه حرارت مبتنی بر فایبر نوری نازک شده (نویسنده) و (ب) تغییر

طول موج در سنسور مبتنی بر فایبر نوری نازک شده بر اثر تغییرات درجه حرارت (۴)

با استفاده از شرایط تعیین شده‌ی بالا، تغییرات طول موج بر حسب تغییرات درجه حرارت با استفاده از تابع به دست آمده پایین از گراف تغییرات درجه حرارت برای پنجره براگ مبتنی فایبر نوری نازک شده در شکل (۷) نشان داد شده است.

$$\Delta\lambda_{B_{Taper}} = K_{PB_{Taper}} \times \Delta P + K_{TB_{Taper}} \times \Delta T$$

$$\Delta\lambda_{B_{Taper}} = 0 + 0.00862 \text{ nm}/^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C} = 0.1724 \text{ nm}$$

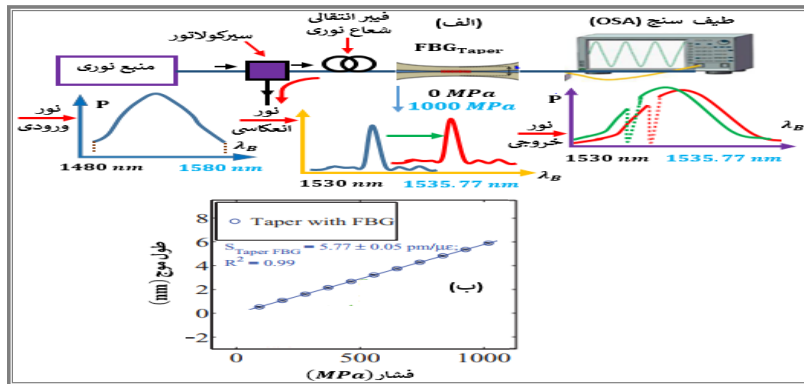


شکل ۷: (الف) گراف شیماتیک چیدمان سنسور پنجره براگ مبتنی بر فایبر نوری نازک‌شده برای اندازه‌گیری تغییر درجه حرارت (نویسنده) و (ب) تغییر طول‌موج در قله طیف انعکاسی از FBG_{Taper} بر اثر تغییرات درجه حرارت (۱۵)

برای اندازه‌گیری فشار، مقدار فشار از صفر تا 1000MPa با 100MPa تغییر داده شده است (۱۵). تغییرات طول‌موج بر حسب تغییر فشار برای پنجره‌ی براگ مبتنی فایبر نوری نازک‌شده با استفاده از رابطه پایین در شکل (۸) نشان داده شده است.

$$\Delta\lambda_{B_{Taper}} = K_{PB_{Taper}} \times \Delta P + K_{TB_{Taper}} \times \Delta T \Rightarrow$$

$$\Delta\lambda_{B_{Taper}} = 0.0058 \text{ nm}/\text{MPa} \times 1000\text{MPa} + 0 = 5.77 \text{ nm}$$

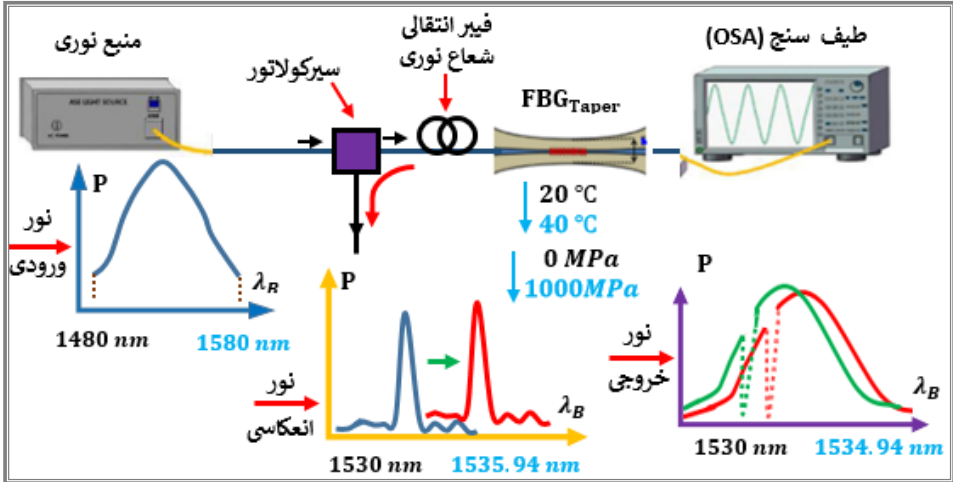


شکل ۸: (الف) گراف شیماتیک سنسور FBG_{Taper} بر اثر تغییر فشار، طراحی توسط خود نویسنده و (ب) تغییر طول‌موج FBG_{Taper} بر اثر تغییرات فشار (۱۵)

حال، سنسور پنجره برآگ مبتنی بر فایبر نوری نازک شده تحت تأثیر هم زمان درجه حرارت و فشار را مورد بررسی قرار می دهیم. این موضوع به صورت شیماتیک با استفاده از رابطه ی پایین در شکل (۹) نشان داده شده است.

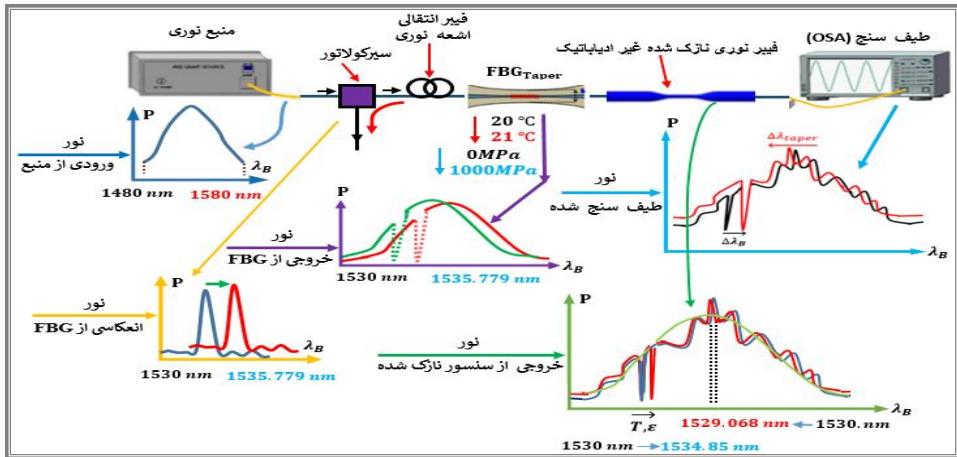
$$\lambda_{B_{Taper}} = K_{P_{Taper}} \times \Delta P + K_{T_{Taper}} \times \Delta T$$

$$\Delta \lambda_{B_{Taper}} = 0.0058 \text{ nm/MPa} \times 1000 \text{ MPa} + 0.00862 \text{ nm/}^\circ\text{C} \times 20 \text{ }^\circ\text{C} = 5.94 \text{ nm}$$



شکل ۹: گراف شیماتیک چیدمان سنسور پنجره برآگ مبتنی بر فایبر نوری نازک شده در اثر تغییر هم زمان درجه حرارت و فشار (نویسنده)

همان طور که در شکل (۹) هم مشخص است استفاده از سنسور FBG_Taper برای اندازه گیری درجه حرارت و فشار به صورت هم زمان، تداخل حساسیت ایجاد خواهد شد و به طور هم زمان با استفاده از این سنسور نمی توانیم فشار و درجه حرارت را اندازه گیری کنیم.



شکل ۱۰: گراف شیماتیک چیدمان سنسور ترکیبی فایبر نوری نازک شده و FBG_(Taper) بر اثر تغییر درجه حرارت و فشار (نویسنده)

به خاطر رفع تداخل درجه حرارت و فشار، طراحی سنسور ترکیبی فایبر نوری نازک شده و FBG_{Taper} برای اندازه گیری درجه حرارت و فشار به صورت هم زمان را مورد بررسی قرار می دهیم. سنسور پیشنهادی و تغییر مکان مورد انتظار در طیف به صورت شیماتیک با استفاده از رابطه های پایین در شکل (۱۰) رسم گردیده است.

$$\{\Delta\lambda_{B_{Taper}} = 0.0058 \text{ nm}/MPa \times 1000MPa + 0.00862 \text{ nm}/^{\circ}C \times 1^{\circ}C = 5.7786 \text{ nm}\}$$

$$\{\Delta\lambda_{taper} = K_{T \text{ taper}} \times \Delta T = -0.9328 \text{ nm}/^{\circ}C \times 1^{\circ}C = -0.9328 \text{ nm}\}$$

برای سنسور ترکیبی درجه حرارت و فشار داریم که:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\lambda_{B_{Taper}} + \Delta\lambda_{taper} = (K_{PB_{Taper}} \times \Delta P + K_{TB_{Taper}} \times \Delta T) (K_{T \text{ taper}} \times \Delta T) = \\ 0.0058 \text{ nm}/MPa \times 1000MPa + 0.00862 \text{ nm}/^{\circ}C \times 1^{\circ}C \pm 0.9328 \text{ nm}/^{\circ}C \times 1^{\circ}C \\ = 4.846 \text{ nm} \end{array} \right\}$$

مناقشه

حساسیت نسبت به درجه حرارت

از معادل $\lambda_{B_{Taper}} = 2n_{eff} \cdot \Lambda$ داریم:

$$n_{eff} = \frac{\lambda_{B_{Taper}}}{2\Lambda} \quad , \quad \Lambda = \frac{\lambda_{B_{Taper}}}{2n_{eff}}$$

از معادله فوق نسبت به تغییرات دما مشتق می گیریم:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_{Taper}}}{\Delta T} = 2n_{eff} \cdot \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + 2\Lambda \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$$

با جای گذاری روابط بالا:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_{Taper}}}{\lambda_{B_{Taper}}} = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (1)$$

از معادله (۱) حساسیت نسبت به درجه حرارت برای پنجره براگ مبتنی بر فایبر نازک شده عبارت از معادله زیر است:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_{Taper}}}{\lambda_{B_{Taper}}} = (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (2)$$

که $\xi = \left(\frac{1}{\Lambda}\right) \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)$ ضریب انبساط حرارتی و $\alpha = \left(\frac{1}{n_{eff}}\right) \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)$ ضریب ترمووپتیکی می باشد. برای سلیکان، (α) و (ξ) به ترتیب $0.55 \times 10^6 \text{ }^{\circ}C^{-1}$ و $8.6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}C^{-1}$ هستند.

حساسیت نسبت فشار:

این بار از معادل $\lambda_{B_{Taper}} = 2n_{eff} \cdot \Lambda$ نسبت به تغییرات مکان و جابجایی مشتق می گیریم.

$$n_{eff} = \frac{\lambda_{B_{Taper}}}{2\Lambda} \quad , \quad \Lambda = \frac{\lambda_{B_{Taper}}}{2n_{eff}}$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B_{Taper}}}{\Delta L} = 2n_{eff} \cdot \frac{\partial\Lambda}{\partial L} + 2\Lambda \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial L}$$

با جایگذاری روابط بالا:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_{Taper}}}{\lambda_{B_{Taper}}} = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial\Lambda}{\partial L} \cdot \Delta L + \frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \cdot \Delta L \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B_{Taper}}}{\lambda_{B_{Taper}}} = (1 - P_e) \cdot P \quad (4)$$

که در آن P فشار وارده روی توری براگ مبتنی بر فایبر نوری نازک شده و P_e ضریب فتوا لاستیک می باشد.

حساسیت به درجه حرارت و فشار در سنسور FBG_{Taper} و سنسور فایبر نوری نازک شده به صورت همزمان با ترکیب رابطه های (۱) و (۴) حساسیت کلی نسبت به درجه حرارت و فشار را باهم خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_{Taper}}}{\lambda_{B_{Taper}}} = (1 - P_e) \cdot P + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (5)$$

معادله (۵) نشان می دهد که تغییر مکان FBG_{Taper} ناشی از دو عامل فشار و درجه حرارت است. برای تشخیص این که تغییر مکان مربوط به کدام عامل است، می توان از سنسور ترکیبی فایبر نوری نازک شده و FBG_{Taper} استفاده کرد. سنسور فایبر نوری نازک شده مخصوص درجه حرارت و سنسور FBG_{Taper} هر دو عامل را بررسی می کند که با مقایسه پاسخ درجه حرارتی سنسورهای فایبر نازک شده و سنسور پنجره ی براگ مبتنی بر فایبر نوری نازک شده و در نهایت کم کردن نتیجه هر دو سنسور از هم، مقدار تغییرات فشار به دست می آید.

در رابطه (۵) برای FBG_{Taper} چون به هر دو عامل حساس است؛ معادله تغییر طول موج برای سنسور FBG_{Taper} قرار ذیل است:

$$\Delta\lambda_{B_{Taper}} = K_{PB_{Taper}} \times \Delta P + K_{TB_{Taper}} \times \Delta T \quad (6)$$

هم چنین برای سنسور فایبر نوری نازک شده که نسبت به درجه حرارت حساس است داریم:

$$\Delta\lambda_{taper} = K_T taper \times \Delta T \quad (7)$$

مقادیر $\Delta\lambda_{taper}$ و $\Delta\lambda_{B_{Taper}}$ در شکل (۱۰) قابل مشاهده می باشد که می توان آن ها را در آزمایشگاه

تعیین کرد. حال یک نمونه از محاسبات را برای سنسور پیشنهادی انجام می‌دهیم. مثلاً؛ فرض کنید در آزمایشگاه تغییرات طول موج برای فایبر نوری نازک‌شده ($\Delta\lambda_{taper}$) و تغییرات طول موج برای FBG_{Taper} ($\Delta\lambda_{B_{Taper}}$) را جداگانه اندازه‌گیری کرده‌ایم و می‌خواهیم مقدار درجه حرارت و فشار را تعیین کنیم. فرض کنید مقادیری که برای تغییر طول موج به روش آزمایشگاهی به دست آمده برای سنسور فایبر نوری نازک‌شده و FBG_{Taper} به ترتیب $\Delta\lambda_{taper} = -0.907 \text{ nm}$ و $\Delta\lambda_{B_{Taper}} = 0.823 \text{ nm}$ باشد. حال می‌خواهیم با استفاده از این مقادیر درجه حرارت و فشار (ΔT و ΔP) را به دست بیاوریم.

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_{taper}}{K_{T_{taper}}} = \frac{-0.907 \text{ nm}}{-0.9328 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}} = 0.973 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta P = \frac{\Delta\lambda_{B_{Tape}} - K_{TB_{Taper}} \times \Delta T}{K_{PB_{Taper}}} = \frac{0.823 \text{ nm} - 0.0086 \text{ nm}/^{\circ}\text{C} \times 0.973 \text{ }^{\circ}\text{C}}{0.0058 \text{ nm}/\text{MPa}} = 140.5 \text{ MPa}$$

$$\Delta T = 0.973 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad , \quad \Delta P = 140.5 \text{ MPa}$$

این نشان می‌دهد که با استفاده از سنسور فایبر نوری نازک‌شده غیر ادیاباتیکی و FBG_{Taper} به شکل ترکیبی، تداخل حساسیت در سنسور مذکور ایجاد نخواهد شد و به طور هم‌زمان در هر نقطه مورد نظر می‌توان فشار و درجه حرارت را اندازه‌گیری کرد. با استفاده از رابطه‌ی تغییرات طول موج با فشار و درجه حرارت و هم‌چنین اندازه‌گیری مقدار طول موج تغییر یافته و به وسیله فایبر نوری نازک‌شده و پنجره‌ی براگ فایبر نوری، می‌توان مقدار درجه حرارت و فشار را در هر نقطه مورد نظر استفاده نمود. باتوجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در منابع مورد استفاده در این مقاله (۴، ۱۵)، حساسیت برای سنسور ترکیبی مذکور به درجه حرارت، $0.973 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ و به فشار، $140.5 \text{ pm}/\text{MPa}$ حاصل گردید.

نتیجه‌گیری

محدودیت که در استفاده از سنسورهای پنجره براگ مبتنی بر فایبر نوری نازک وجود دارد، این است که پاسخ سنسور برای اندازه‌گیری درجه حرارت و فشار به صورت هم‌زمان می‌تواند باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری فشار در ساختمان‌های مختلف گردد. به این منظور باید به طریقی اثر درجه حرارت را از اثر فشار تفکیک کنیم که روش‌های مختلفی برای این کار پیشنهاد شده است. در این مقاله، از طراحی سنسور ترکیبی فایبر نوری نازک‌شده (حساس به درجه حرارت) و سنسور پنجره براگ مبتنی بر فایبر نوری نازک (حساس به درجه حرارت و فشار)، برای جدا کردن اثر درجه حرارت و فشار مورد بحث و تحقیق قرار گرفت. بررسی‌های انجام‌شده بر روی سنسور ترکیبی طراحی شده نشان داد که تداخل حساسیت در سنسور ترکیبی مذکور ایجاد نخواهد شد. با توجه به سنسورهای استفاده شده به عنوان نمونه در این مقاله، حساسیت برای سنسور ترکیبی به درجه حرارت، $0.973 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ و به فشار، $140.5 \text{ pm}/\text{MPa}$ حاصل گردید.

- (1) Valadez, A, Lana S, Morgan M, Bunya, A. Evanescent wave fiber optic biosensor for Salmonella detection in food, *Sensors*, 2009; vol(9): 5810–5824.
- (2) Love, J. D. and Henry W. M. Quantifying loss minimization in single-mode fiber tapers, *Electronics Letters*, 1986; vol(21): 912–914.
- (3) Zibaii, M. I. et al. Non-adiabatic tapered optical fiber sensor for measuring the interaction between α -amino acids in aqueous carbohydrate solution, *Measurement Science and Technology*, 2010; 81: 105-108.
- (4) Zhou, T et al. Low cost non-adiabatic tapered fiber for high-sensitive temperature sensing, *Optical Fiber Technology*, 2018; 45: 53-57.
- (5) Othonos, A. and Kyriako's K. *Fiber Bragg Grating: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*, Artech House, Boston, 1999; 13: 99-103.
- (6) Yu, F. T. S. *In-Fiber Grating Optic Sensors*. Fiber Optic Sensors, New York, M. Dekker, 2002; 69: 123-171.
- (7) Ling, Hang-yin, et al. Embedded fiber Bragg grating sensors for non-uniform Pressure sensing in composite structures, *Measurement science and technology*. 2005; 16: 2415.
- (8) Liu, Qiang, et al. High-sensitivity plasmonic temperature sensor based on photonic crystal fiber coated with nanoscale gold film. *Applied Physics Express*. 2015; 84: 46701.
- (9) Drusová, Sandra, E.T al. Possibilities for Groundwater Flow Sensing with Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*. 2019; 19,7: 1730.
- (10) Ye, X.W. and Han, J.P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology. a comprehensive review. *Scientific World Journal*. 2014; 11: 652329.
- (11) Fischer, C. et al. Fiber Optic Monitoring of the Masonry Arch Approach Spans in the Brooklyn Bridge. *Structural Materials Technology*. 2010; 63: 218.
- (12) In Audi, D. and Branko G. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing. *Journal of pressure vessel technology*. 2010; vol (132): 011701, 2010.
- (13) Lin, Yung Bin, et al. Flood scour monitoring system using fiber Bragg grating sensors. *Smart materials and Structures*. 2006; vol (15): 1950.
- (14) Lai, C. C. Au, K. M. Chung, W. H. Chung, Shun Yee Michael Liu, H. Y. Tam, and Y. Q. Optical sensor networks for structural health monitoring of canton tower. a comprehensive review. *Scientific World Journal*. 2011; 71: 670.
- (15) Oliveira, K. Ricardo, E.T. Simultaneous measurement of Pressure, temperature and refractive index based on multimode interference, fiber tapering and fiber Bragg gratings. *Measurement Science and Technology*. 2016; 27/7: 75104.
- (16) Hill, D. Kenneth O. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of Light wave technology*. 1997; 15/8: 1263-1276.