

A new simulation method for calculating of temperature and strain at the same time by fiber Bragg grating sensor

M. Mansoursamaei , A. Malekzadeh *

* Assistant Professor, Department of Photonics, Faculty and Research Institute of Basic Sciences, Imam Hossein University (AS), Tehran, Iran.

(Received: 07/03/2021; Accepted: 25/04/2021)

Abstract

Excessive sensitivity of light waves emitted within optical fiber to environmental changes has led to the widespread use of optical fibers as sensors of environmental parameters such as temperature, strain, stress, humidity, density, and so on. Among the fiber optic sensors, the fiber Bragg grating (FBG) sensor has found many applications in various civil and industrial fields due to its high accuracy, reasonable sensing length and low price, but some limitations of this sensor has led to a significant reduction in performance. One of the most important of these limitations is the problems in measuring several environmental parameters at the same time, especially temperature and strain. This limitation has led to the suggestion of many methods for measuring temperature and strain at the same time, using the FBG sensor. Most of these methods have require more than one uniform FBG, and other methods use one special FBG to measure temperature and strain at the same time. Each of these methods have disadvantages such as requiring more than one uniform FBG, complexity in setup and overused of spectral sources. Our purpose in this paper is to numerical simulation as well as design a suitable setup for calculating temperature and strain changes at the same time, by a single uniform FBG. Based on the simulation results obtained from MATLAB software, the sensitivity of this sensor is 14 pm/°C for temperature and 0.678 pm/με for strain.

Keywords: Fiber Bragg Grating, Strain Sensor, Temperature Sensor, FBG sensor, Measurement at the same time.

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

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



* Corresponding author E-mail: Afard77@gmail.com

یک روش شبیه‌سازی جدید برای محاسبه هم‌زمان دما و کرنش با حسگر توری براگ فیبر نوری

محسن منصورسمائی^۱، عبدالله ملک‌زاده^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، نهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵)

چکیده

حساسیت بسیار زیاد امواج نوری منتشرشده درون موج‌بر فیبر نوری به تغییرات محیطی، منجر شده تا از فیبرهای نوری به‌عنوان حسگر پارامترهای محیطی همچون دما، کرنش، تنش، رطوبت، غلظت و... به‌طور گسترده استفاده شود. در بین حسگرهای فیبری، حسگر توری براگ فیبر نوری (FBG) به دلیل دقت بالا و طول سنجش مناسب و البته مقرون‌به‌صرفه بودن، کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف عمرانی و صنعتی پیدا کرده است ولی برخی محدودیت‌های این حسگر منجر به کاهش چشمگیر عملکرد آن شده است. یکی از مهم‌ترین این محدودیت‌ها، مشکلات موجود در اندازه‌گیری چند پارامتر محیطی، به‌خصوص دما و کرنش به‌طور هم‌زمان است. این محدودیت منجر شده تا روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش به کمک حسگر FBG پیشنهاد شود. اکثر این روش‌ها نیاز به بیش از یک توری براگ فیبری یکنواخت دارند و برخی دیگر نیز از یک تک توری براگ فیبری خاص، و نه یکنواخت، برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش استفاده می‌کنند. هر یک از این روش‌ها معایبی همچون نیاز به بیش از یک توری براگ، پیچیدگی در چیدمان و صرف‌بازة وسیعی از منبع پهن‌بند را دارند. هدف ما در این مقاله، شبیه‌سازی عددی و همچنین طراحی یک چیدمان مناسب برای محاسبه هم‌زمان تغییرات دما و کرنش محیطی توسط تنها یک توری براگ فیبری یکنواخت است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار متلب، حساسیت این حسگر نسبت به دما $14 \text{ pm}/\mu\text{e}$ و نسبت به کرنش $0.678 \text{ pm}/\mu\text{e}$ به‌دست‌آمده است.

کلیدواژه‌ها: حسگر فیبر نوری، توری براگ فیبری، حسگر کرنش، حسگر دما، اندازه‌گیری هم‌زمان.

۱- مقدمه

به‌خوبی می‌توانند تغییرات دما، کرنش، رطوبت، غلظت، خمش و ... را شناسایی کنند اما تشخیص هم‌زمان این پارامترها یکی از محدودیت‌های مهم این حسگرها به‌حساب می‌آید زیرا پاسخ توری براگ به تمام این تغییرات محیطی، مشابه یکدیگر است و تنها منجر به شیفت طول موج براگ می‌شود [۱۸-۱۶]. حساسیت توری براگ فیبری به عوامل محیطی به‌خصوص دو پارامتر کرنش و دما، همچنین اهمیت اندازه‌گیری هم‌زمان این دو پارامتر حیاتی در کاربردهای مختلف همچون سازه‌های عمرانی و صنعتی [۹ و ۱۵]، منجر شده تا تلاش‌های زیادی برای اندازه‌گیری هم‌زمان و مستقل این دو پارامتر به کمک حسگرهای FBG انجام شود [۲۰-۱۹]. این اقدامات و تحقیقات را می‌توان از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه و دسته‌بندی قرار داد. اگر چنانچه آن‌ها را با توجه به تعداد توری‌های استفاده شده در چیدمان این حسگرها بررسی کرد، می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی تقسیم نمود: ۱- تحقیقاتی که در آن‌ها، بیش از یک توری براگ فیبری استفاده شده است و ۲- تحقیقاتی که تنها از یک توری براگ فیبری استفاده کرده‌اند.

یکی از رایج‌ترین و البته ساده‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش توسط حسگرهای FBG، استفاده از بیش از یک توری براگ فیبری یکنواخت است. در این روش‌ها، می‌توان با حذف یک عامل محیطی از روی یکی از توری‌ها به راحتی هر دو

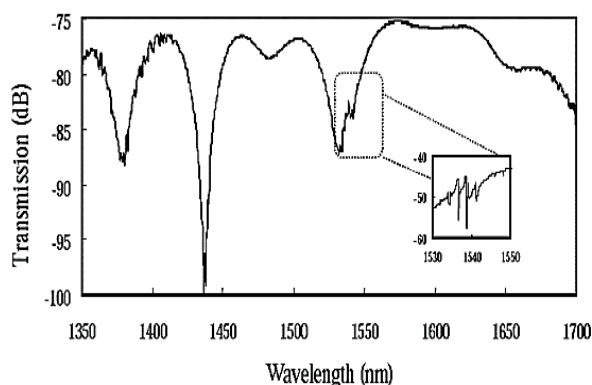
پس از ساخت فیبرهای نوری به‌عنوان موج‌برهای کم اتلاف برای امواج نوری الکترومغناطیس، استفاده از آن‌ها به‌سرعت در تمام علوم گسترش یافت. در ادامه با مشاهده حساسیت بالای این فیبرها به تغییرات محیطی از جمله تغییرات دما، کرنش، خمش، رطوبت و ... ایده استفاده از فیبرهای نوری به‌عنوان حسگرهای محیطی مورد توجه قرار گرفت [۱۰-۱]. در این میان، حسگرهای توری براگ فیبر نوری (FBG) به دلیل دقت فضایی بالا، طول سنجش مناسب، مقرون‌به‌صرفه بودن و سهولت در راه‌اندازی مقبولیت بیشتری در بین صنعتگران پیدا کردند و در بسیاری از صنایع از جمله صنایع پزشکی، عمرانی، مکانیک، هوافضا و ... به‌سرعت گسترش یافتند [۱۳-۱۱].

توری براگ فیبری که اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط کن هیل طراحی شد [۱۴]، نوعی فیلتر طیفی است که در هسته فیبر نوری حک می‌شود. این توری با ایجاد تغییرات متناوب در ضریب شکست هسته فیبر، طول موج خاصی از نور ورودی را بازتاب کرده و بقیه طول موج‌ها را عبور می‌دهد. طول موج بازتابی، به تغییرات محیطی ایجادشده در اطراف فیبر نوری بسیار حساس بوده و به همین دلیل از این توری‌ها به‌عنوان حسگرهای محیطی به‌طور گسترده استفاده شده است [۱۵]. اگرچه حسگرهای FBG

* رایانامه نویسنده مسئول: Afard77@gmail.com



روش دیگری که برای اندازه‌گیری هم‌زمان دو یا چند پارامتر محیطی در حسگرهای FBG به کار گرفته می‌شود، استفاده از تنها یک توری براگ فیبری غیریکنواخت است. در صورت استفاده از فقط یک توری براگ، باید علاوه بر شیفت طول موجی، یک شاخص فیزیکی دیگری نیز در طیف خروجی از حسگر FBG یافت شود که نسبت به تغییرات محیطی حساس باشد. روش‌های مختلفی نیز برای اندازه‌گیری هم‌زمان دو پارامتر محیطی با یک توری براگ فیبری مطرح شده است که از آن‌ها می‌توان به استفاده از توری‌های براگ سوپرساختار [۲۵]، توری‌های با دوره تناوب بلند (LPG) [۲۶]، توری‌های چرپ شده [۲۷] و همچنین لایه نشانی مواد مختلف بر روی یک توری براگ اشاره کرد [۲۸]. ساختار ویژه‌ی این توری‌ها به گونه‌ای است که به طور هم‌زمان دارای چندین پیک بازتابی در طیف خروجی می‌باشند (شکل (۲)). برخی از این پیک‌های طیفی نسبت به تغییرات محیطی از جمله دما و کرنش رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند که می‌توان از هر یک از این پیک‌ها به عنوان شاخص‌های فیزیکی مجزا استفاده کرد. اما عدم دسترسی آسان به این نوع توری‌ها، هزینه بالای ساخت آن‌ها و از همه مهم‌تر نیاز به منابعی با پهنای باند وسیع از جمله محدودیت‌های استفاده از این توری‌ها به حساب می‌آیند.

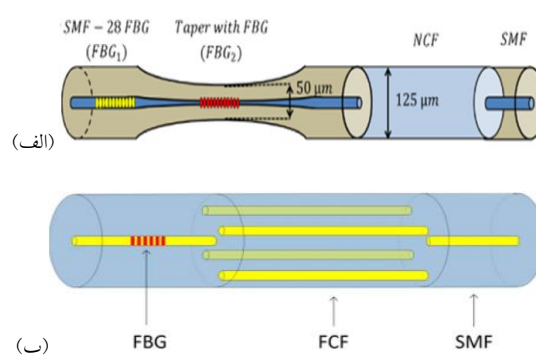


شکل (۲). طیف عبوری از توری براگ فیبری سوپرساختار [۲۶]

اگرچه تمام روش‌هایی که تاکنون ذکر شده‌اند هر یک به تنهایی می‌توانند مشکل اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش را حل کنند، اما پیچیدگی‌های طراحی و ساخت آن‌ها همچون لزوم استفاده از چندین توری براگ فیبری مختلف و یا استفاده از یک نوع توری براگ فیبری خاص و یا لایه‌نشانی مواد مختلف بر روی یک توری، منجر شده تا مشکلات عمده‌ای در سر راه ساخت و عملیاتی کردن این طرح‌های پیشنهادی ایجاد شود.

در این مقاله سعی شده است تا به کمک روشی جدید و بدون نیاز به فیبرها و توری‌های مختلف و لایه‌نشانی مواد، تغییرات دما و کرنش محیطی به طور هم‌زمان توسط تنها یک توری براگ

عامل را با آنالیز طیف بازتابی از دو توری، تشخیص داده و محاسبه کرد. برای مثال وقتی از دو FBG یکنواخت مشابه استفاده می‌شود، می‌توان با قراردادن یک لایه محافظ فلزی متخلخل بر روی توری اول، تأثیر کرنش را از روی آن توری حذف نمود، درحالی‌که تأثیر دما همچنان بر روی آن باقی است. با آنالیز طیف خروجی از توری اول و همچنین توری دوم که هر دو عامل دما و کرنش بر آن تأثیرگذار است، می‌توان هر دو پارامتر محیطی را به طور هم‌زمان محاسبه کرد [۲۱]. برای مثال در روشی دیگر از دسته‌بندی اول، مطابق شکل ۱ از سه نوع فیبر مختلف برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما، کرنش و ضریب شکست استفاده شده است که هر یک از فیبرها، نسبت به دما و کرنش رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند که در ویژگی‌های طیف خروجی از آن‌ها به وضوح نمایان می‌شود [۲۲-۲۳]. در روشی دیگر می‌توان از دو FBG یکنواخت با فاصله طول موجی بسیار زیاد استفاده کرد. در این روش بر اثر اعمال تغییرات محیطی، هر یک از توری‌ها شیفت طول موجی مختص خود را بازتاب کرده و پاسخ متفاوتی نسبت به شرایط محیطی نشان می‌دهند [۲۴].



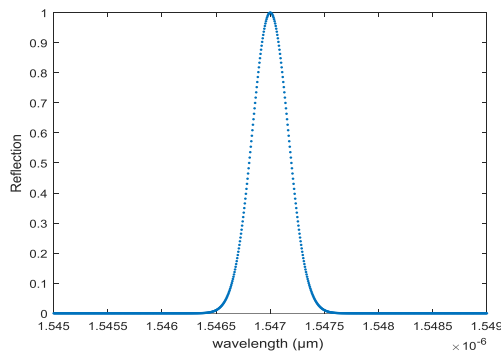
شکل (۱). چیدمان حسگر FBG برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما، کرنش و ضریب شکست با استفاده از الف) ترکیب فیبر بدون هسته، FBG نازک شده و فیبر تک‌مد، ب) FBG یکنواخت، فیبر تک‌مد و فیبر چهار هسته‌ای [۲۲-۲۳]

نهایتاً می‌توان نتیجه گرفت که برای اندازه‌گیری هم‌زمان چند پارامتر توسط حسگرهای FBG، به همان تعداد شاخص فیزیکی در طیف خروجی از آن حسگر نیاز است که پاسخ و رفتار آن‌ها نسبت به تغییرات محیطی موردنظر متفاوت از هم باشند. به عبارتی برای اندازه‌گیری هم‌زمان دو پارامتر دما و کرنش، باید در طیف خروجی از حسگر FBG دو شاخص فیزیکی وجود داشته باشد که نسبت به دما و کرنش رفتار متفاوتی از خود نشان دهند. در تمام مثال‌های گذشته، طیف خروجی از این حسگر شامل تعدادی پیک بازتابی به تعداد توری‌های استفاده شده در آن روش‌ها بوده که به طور خاص، شیفت طول موج براگ هر توری متفاوت از سایر توری‌ها است.

$$M_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L_i) - i \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) & -\frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) \\ i \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) & \cosh(\gamma L_i) + i \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در این رابطه L_i طول هر بخش کوچک از توری براگ، β ثابت انتشار هسته فیبر، Δn_{eff} تغییرات ضریب شکست در توری براگ که مقداری ثابت است، $k = \frac{\pi \Delta n_{eff}}{\lambda}$ ضریب جفت‌شدگی و $\gamma = \sqrt{k^2 - \Delta\beta^2}$ است. با ضرب این ماتریس‌ها در هم، یک ماتریس کلی 2×2 به صورت $M_t = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$ بدست می‌آید که به‌عنوان ماتریس انتقال کل توری شناخته می‌شود. برای به‌دست‌آوردن طیف بازتابی از یک توری براگ فیبری به طول L از رابطه (۳) استفاده می‌شود که در نتیجه نموداری مطابق شکل ۳ به دست خواهد آمد [۳۲].

$$R = \frac{T_{21}}{T_{11}} = \frac{k^2 \sinh^2(\gamma L)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(\gamma L) + k^2 \cosh^2(\gamma L)} \quad (3)$$



شکل (۳). طیف بازتابی از توری براگ فیبری در طول موج ۱۵۴۷ نانومتر و در شرایط پایدار محیطی [۳۲]

در رابطه (۴) میزان تغییر طول موج براگ ناشی از اعمال کرنش و دمای خارجی بر فیبر نوری نشان داده شده است که برای سایر عوامل محیطی همچون خمش، رطوبت و غلظت و ... نیز روابطی این‌چنینی وجود خواهد داشت [۳۳].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P)\Delta\varepsilon + (\alpha_\lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (4)$$

که در آن $\Delta\varepsilon$ و ΔT به ترتیب تغییرات کرنش و تغییرات دما در طول فیبر نوری، $\alpha_n = 1/6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ضریب ترمواپتیکی سیلیکا، $\alpha_\lambda = 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ضریب انبساط حرارتی سیلیکا و P ضریب فشار مؤثر است که مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$P = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \quad (5)$$

که در آن μ ضریب پواسون فیبر و p_{11} و p_{12} مؤلفه‌های فشار

فیبری یکنواخت به دست آید. از آنجایی که در این ایده پیشنهادی تنها یک پیک بازتابی در طیف خروجی از حسگر FBG وجود دارد، بنابراین در کنار شیفت طول موج براگ به‌عنوان شاخص فیزیکی اول، باید شاخص فیزیکی دومی ایجاد کرد که حساسیت متفاوتی نسبت به دما و کرنش داشته باشد. اما اگر در طیف بازتابی از FBG چنین شاخصی دومی وجود نداشته باشد باید با روش‌های مختلف آن را ایجاد کرد.

در این مقاله برای محاسبه هم‌زمان دما و کرنش در یک سازه مشخص، از یک توری براگ فیبری یکنواخت که بر روی یک سطح شیب‌دار یک سر گیردار که با زاویه θ بر روی این سازه نصب شده است استفاده می‌شود. این سطح شیب‌دار یک سر گیردار یا به عبارتی طره مورب که یک سر آن به سازه متصل شده و سر دیگر آن آزاد است، منجر می‌شود تا کرنش یکنواخت اعمالی به سازه تحت آزمایش به‌صورت کرنشی غیریکنواخت و خطی در طول طره توزیع شود [۲۹]. از آنجایی که FBG بر روی طره چسبیده شده است، این توزیع غیریکنواخت کرنش، به طور مستقیم به FBG نیز منتقل خواهد شد. اعمال توزیع غیریکنواخت کرنش بر روی یک FBG یکنواخت، پهنای پیک بازتابی (FWHM) از آن توری را دستخوش تغییر خواهد کرد [۲۹]. نهایتاً در این طرح پیشنهادی، تغییرات دما به کمک شیفت طول موج براگ تشخیص داده می‌شوند و تغییرات کرنش با تغییر FWHM مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- شبیه‌سازی حسگر دما و حسگر کرنش FBG

طول موج بازتابی از توری براگ (λ_B)، باتوجه به ضریب شکست مؤثر فیبر (n_{eff}) و دوره توری (Λ) مطابق رابطه (۱) تعیین می‌شود [۳۰].

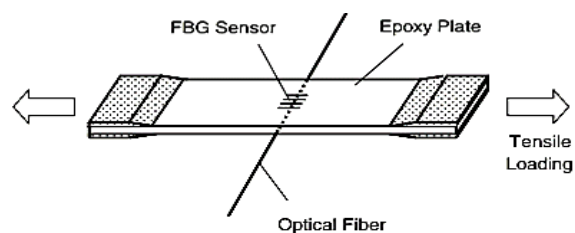
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

از آنجایی که اساس تشخیص اختلال در حسگرهای FBG بر پایه تغییر در طول موج توری‌های براگ است بنابراین برای تشخیص تغییرات محیطی باید به تحلیل طیف بازتابی از حسگر توری براگ پردازیم. یکی از بهترین روش‌ها برای بررسی دقیق طیف بازتابی از حسگر FBG و درک درست از نحوه جابه‌جایی پیک‌های آن، به‌دست‌آوردن این طیف بازتابی به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است. بنابراین اولین گام برای این هدف، شبیه‌سازی یک توری براگ فیبری ساده در شرایط محیطی ثابت است. برای شبیه‌سازی حسگرهای FBG معمولاً از روش مرسوم ماتریس انتقال در نرم‌افزار متلب (MATLAB) استفاده می‌شود. در این روش توری به بخش‌های کوچک تقسیم شده و برای هر بخش یک ماتریس 2×2 مطابق با رابطه (۲) تعریف می‌شود [۳۱].

۳- تعیین میزان کرنش با FWHM طیف بازتابی

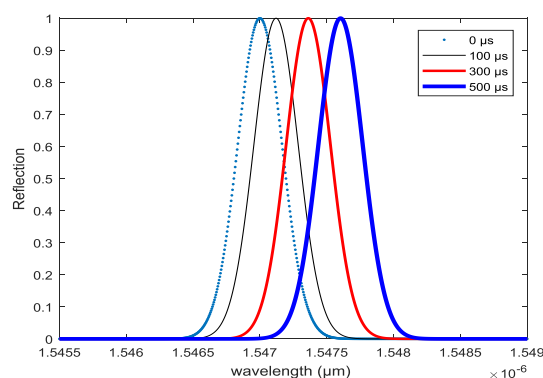
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد یکی از مشکلات و محدودیت‌های حسگرهای توری براگ فیبری یکنواخت عدم توانایی آن‌ها در اندازه‌گیری چند پارامتر محیطی به طور هم‌زمان است، زیرا تمام پارامترهای محیطی تأثیر مشابهی بر روی طیف خروجی از حسگر FBG خواهند گذاشت و همگی منجر به شیفت طول موج براگ می‌شوند. بنابراین برای اندازه‌گیری هم‌زمان دو پارامتر در این حسگرها، نیاز به دو شاخص فیزیکی متفاوت در طیف خروجی از FBG است که به تغییرات محیطی حساسیت متفاوتی داشته باشند. شیفت طول موج براگ به دلیل حساسیت بالا به تغییرات محیطی، معمولاً در تمام روش‌های اندازه‌گیری هم‌زمان، از جمله روش پیشنهادی در این مقاله به‌عنوان شاخص اصلی و اول به حساب می‌آید و در این مقاله نیز برای تشخیص تغییرات دمایی از این پارامتر استفاده شده است. حال باید در ویژگی‌های طیف بازتابی از این تک توری براگ یکنواخت به دنبال شاخص دومی گشت که این شاخص، رفتاری متفاوت با تغییرات محیطی نسبت به رفتار شاخص اول یعنی شیفت طول موج براگ داشته باشد. بنابراین وظیفه ما در این مسیر بررسی جامع هر یک از پارامترها و ویژگی‌های طیف خروجی از توری براگ فیبری یکنواخت و پیدا کردن ارتباط آن‌ها با تغییرات محیطی است.

در بعضی مواقع ممکن است برخی پارامترهای طیف خروجی از توری براگ در حالت عادی هیچ ارتباطی با تغییرات محیطی نداشته باشند و با تغییر شرایط محیطی تغییری نکنند ولی هنگامی که نحوه نصب و قراردادن توری بر روی قطعه موردنظر تغییر کند، همان پارامتری که به‌هیچ‌عنوان به تغییرات محیطی حساس نبوده، نسبت به این تغییرات واکنش نشان دهد. برای مثال در کامپوزیت‌ها، اگر FBG را مطابق شکل ۶ در جهت عمود بر راستای کشش قطعه قرار دهیم، طیف خروجی از توری براگ علاوه بر شیفت طول موجی دچار پهن‌شدگی در FWHM نیز می‌شود، این در حالی است که اگر همین FBG در راستای کشش قطعه کامپوزیتی قرار گیرد هیچ تغییری در FWHM طیف بازتابی از توری مشاهده نمی‌شود و تنها شیفت طول موجی ایجاد خواهد شد [۳۴].



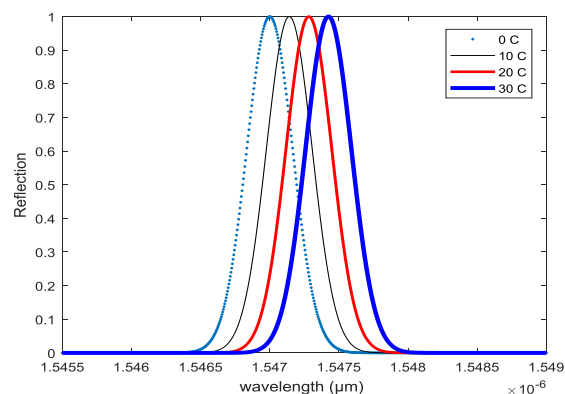
شکل (۶). نصب FBG در جهت عمود بر راستای کرنش [۳۴]

هستند که برای یک فیبر سیلیکاتی معمولی برابرند با: $\mu = 0.17$ و $p_{11} = 0.113$ و $p_{12} = 0.252$ [۳۳]. حال با وارد کردن شیفت طول موج براگ نشان داده شده در رابطه (۴) در برنامه شبیه‌سازی، می‌توان تأثیر کرنش و دمای اعمالی بر فیبر را در طیف بازتابی از توری براگ مشاهده کرد. از آنجاکه اعمال هر فشار خارجی به فیبر نوری به صورت فشار محوری یا همان کرنش (تغییر طول محوری $(\Delta L/L)$) در فیبر ظاهر می‌شود، برای اندازه‌گیری فشار خارجی اعمالی به فیبرهای نوری، معمولاً کرنش وارد شده بر آن‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند. شکل (۴) رفتار طول موج براگ ناشی از اعمال کرنش‌های مختلف به فیبر نوری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود هرچه کرنش اعمالی به فیبر نوری بیشتر باشد تغییر در طول موج براگ نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۴). طیف خروجی از توری براگ در طول موج ۱۵۴۷ نانومتر در شرایط پایدار و بدون اعمال کرنش (نقطه‌چین) و در شرایط ناپایدار و با اعمال کرنش‌های برابر با ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکروکرنش [۳۲]

از آنجاکه تغییرات دما نیز مطابق شکل (۵) همانند کرنش، ولی با نسبتی متفاوت، منجر به شیفت طول موج بازتابی از توری براگ می‌شوند، بنابراین در محیطی که هر دو پارامتر کرنش و دما به طور هم‌زمان در حال تغییر هستند، محاسبه دقیق این تغییرات با مشکل مواجه خواهد شد.



شکل (۵). طیف خروجی از توری براگ فیبر نوری در طول موج

۱۵۴۷ نانومتر در شرایط پایدار (نقطه‌چین) و در شرایط ناپایدار و با اعمال تغییر دمای مثبت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد

توری‌های براگ بر روی سطوح مکانیکی که دارای این ویژگی هستند، حساسیت پارامتر FWHM آن‌ها را به تغییرات کرنش افزایش داد. از آنجایی که هدف ما در این مقاله محاسبه هم‌زمان کرنش و دما با یک توری براگ یکنواخت است، می‌توان با قرار دادن یک سطح شیب‌دار صلب، مشابه یک طره کوچک، بر روی قطعه موردنظر و نصب یک توری براگ یکنواخت بر روی آن، هر دو پارامتر دما و کرنش را به طور هم‌زمان اندازه‌گیری کرد. در این طرح پیشنهادی که به صورت طرح‌واره در شکل ۸ نمایش داده شده است، تغییرات دما به کمک شیفت طول‌موج براگ و تغییرات کرنش با تغییر FWHM تشخیص داده می‌شوند.

۴- شبیه‌سازی حسگر FBG به منظور تعیین هم‌زمان دما و کرنش

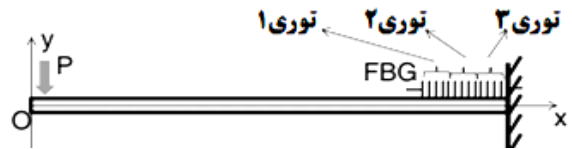
باتوجه به شکل ۸ تمام کرنش وارد شده به سازه فرضی تحت آزمایش، به توری براگ فیبری یکنواخت وارد نمی‌شود و مقداری از آن توسط طره خنثی خواهد شد. بنابراین در گام اول باید نسبت کرنش وارد شده به ابتدا و انتهای توری را به کرنش وارد شده بر قطعه تحت آزمایش به دست آوریم. این نسبت کاملاً به اندازه طره و توری براگ و به عبارتی به هندسه چیدمان ما بستگی دارد.

فرض می‌کنیم در این چیدمان، با در نظر گرفتن روابط حاکم بر اتلاف ناشی از خمش و آستانه شعاع خمش در فیبرهای استاندارد تک مد [۳۵]، از یک توری براگ فیبری به طول ۱ سانتی‌متر و طره‌ای به طول ۲ سانتی‌متر و با زاویه شیب ۳۰ درجه نسبت به سطح استفاده شود (شکل ۸). اگر کرنش وارد شده به سازه برابر با P باشد، باتوجه به اینکه طره با زاویه ۳۰ درجه به سازه چسبیده است می‌توان گفت کرنش اعمالی به ابتدای طره برابر $P \cos 30$ خواهد بود. از آنجاکه به انتهای طره همواره هیچ کرنشی اعمال نمی‌شود [۲۹]، بنابراین کرنش به صورت خطی در راستای طره توزیع شده و در انتهای آن به صفر خواهد رسید. البته اگر سازه نمونه و طره از جنس‌های مختلفی باشند و تمام کرنش اعمالی به سازه به طره منتقل نشود، باید یک ضریب تجربی بین صفر تا یک در این عدد ضرب شود. اما در این شبیه‌سازی هر دو قطعه از یک جنس در نظر گرفته شده و این ضریب برابر با یک است.

باتوجه به شکل ۸ و موقعیت فیزیکی توری و طره می‌توان نتیجه گرفت که کرنش اعمالی به ابتدای توری براگ که در نزدیکی محل اتصال طره و سازه نمونه قرار دارد برابر است با $P \cos 30$ و کرنش اعمالی به انتهای توری براگ که در مرکز طره قرار دارد برابر با $0.5 \cdot P \cos 30$ است. بنابراین از ابتدا تا انتهای

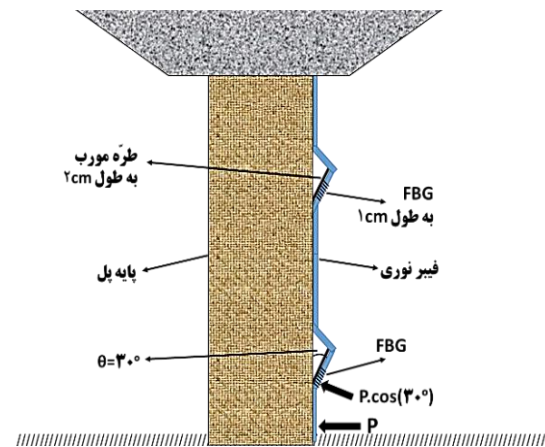
بنابراین تنها نباید به قراردادن توری براگ با یک شکل مرسوم بر روی سازه موردنظر بسنده کرد بلکه باید تمام راه‌های ممکن جهت افزایش حساسیت توری براگ به پارامترهای محیطی را امتحان نمود.

همچنین باتوجه به شکل ۷ که سه FBG یکنواخت در امتداد یک طره نصب شده‌اند و فشار P به سر آزاد طره وارد می‌شود، به دلیل توزیع کرنش غیریکنواخت بر روی این قطعه خاص، توری‌هایی که به سر بسته طره نزدیک‌تر هستند کرنش بیشتری را تجربه کرده و پهنای FWHM طیف بازتابی از آن‌ها نیز بیشتر خواهد بود. یعنی باتوجه به این شکل، توری سوم نسبت به دو توری دیگر شیفت طول‌موجی و پهنای FWHM بیشتری را تجربه خواهد کرد [۲۹].



شکل (۷). سه FBG مشابه که بر روی یک طره نصب شده‌اند [۲۹]

بنابراین در مقیاس کوچک‌تر می‌توان گفت هر بخش از یک توری براگ نیز هرچه به سمت سر گیردار طره نزدیک‌تر شود، کرنش بیشتری را تحمل خواهد کرد یعنی تمام بخش‌های هر یک از این توری‌ها، کرنش یکسانی را تجربه نمی‌کنند و کرنش به صورت غیریکنواخت در آن‌ها توزیع خواهد شد. توزیع غیریکنواخت کرنش در طول یک FBG یکنواخت منجر به پهن شدن طیف بازتابی از آن توری شده و هرچه کرنش اعمالی بیشتر باشد، FWHM طیف بازتابی نیز افزایش خواهد یافت [۲۹]. بنابراین در این طراحی ویژه، پارامتر FWHM نسبت به تغییرات کرنش عکس‌العمل نشان داده و به آن حساس خواهد بود.



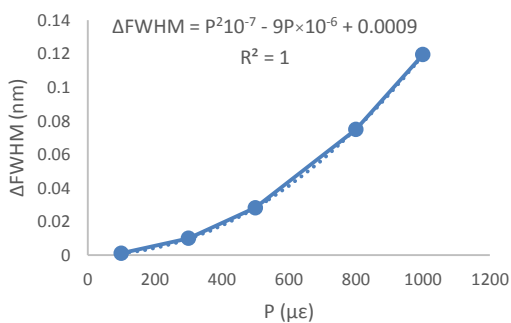
شکل (۸). شمایی از طرح پیشنهادی حسگر FBG بر روی پل فرضی

همان‌طور که در نمونه فوق مشاهده شد، می‌توان با نصب

به صورت یکنواخت به توری اعمال می‌شوند و تمام قسمت‌های FBG یک دمای یکسان را مشاهده می‌کنند. بنابراین با توجه به میزان پهنای پیک بازتابی می‌توان میزان کرنش وارد شده بر سازه نمونه را بدست آورد. در شکل (۱۰) تغییرات پیک بازتابی از توری براگ به‌ازای توزیع کرنش‌های غیریکنواخت و مختلف در همین مسئله نشان داده شده است.

برای بدست آوردن هم‌زمان تغییرات دما و کرنش در این روش، مطابق تمام روش‌های گذشته [۲۸-۲۱] ابتدا یکی از پارامترها را ثابت در نظر گرفته و پارامتر دیگر را تغییر می‌دهیم تا حساسیت طول موج بازتابی و FWHM را نسبت به آن پارامتر متغیر به دست آوریم، در ادامه همین کار را برای پارامتر دیگر انجام می‌دهیم. در این شبیه‌سازی ابتدا تغییرات کرنش را صفر در نظر گرفته و دمای اعمالی به قطعه تحت آزمایش را تغییر دادیم.

به این ترتیب به راحتی میزان حساسیت شیفت طول موج براگ و FWHM را به دما به دست آوردیم که برای شیفت طول موج براگ برابر با $14 \text{ pm}/\mu\epsilon$ و برای ΔFWHM برابر صفر بوده است. در ادامه با ثابت نگه داشتن دما، کرنش اعمالی به سازه نمونه را تغییر داده و به دست می‌آوریم که میزان حساسیت شیفت طول موج براگ به کرنش اعمالی به سازه تحت آزمایش برابر با $0.678 \text{ pm}/\mu\epsilon$ است. نکته حائز اهمیت در این روش این است که با رسم تغییرات FWHM نسبت به کرنش مطابق شکل (۱۰) می‌بینیم که میزان حساسیت ΔFWHM به کرنش برخلاف سایر ضرایب، خطی نیست و به صورت تابعی درجه دو تغییر می‌کند.



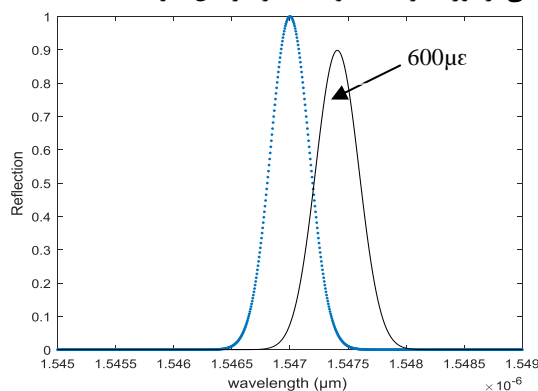
شکل (۱۰). تغییرات FWHM نسبت به کرنش اعمالی به سازه نمونه

نهایتاً می‌توان دو معادله نهایی برای بدست آوردن هم‌زمان تغییرات دما و کرنش برای این سازه نمونه با ویژگی‌های هندسی ذکر شده را مطابق رابطه (۶) به دست آورد:

$$\begin{aligned} a) \quad \Delta\text{FWHM} &= P^2 10^{-7} - 9P 10^{-6} + 0.0009 \\ b) \quad \Delta\lambda &= 0.000678P + 0.014\Delta T \end{aligned} \quad (6)$$

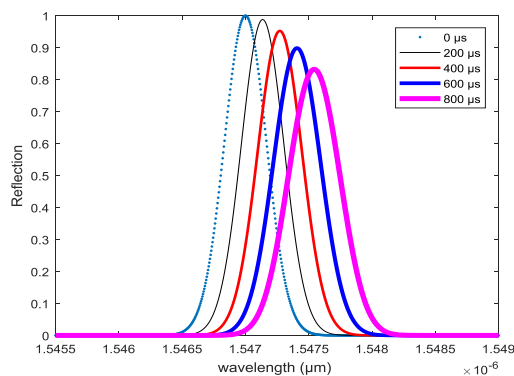
توری براگ، توزیع کرنشی برابر با $0.5.P.\cos 30$ وجود خواهد داشت. نکته‌ای که نباید از آن غافل شد این است که، این اعداد و ضرایب تنها برای این مثال خاص استفاده می‌شوند و اگر ویژگی‌های هندسی چیدمان ما (طول توری و طره و زاویه طره با سطح) تغییر کند، این ضرایب نیز تغییر خواهند کرد.

حال برای مثال اگر کرنشی برابر با $600 \mu\epsilon$ به سازه موردنظر ما وارد شود، کرنش اعمالی به ابتدای توری تقریباً $520 \mu\epsilon$ و انتهای توری حدوداً $260 \mu\epsilon$ خواهد بود که توزیع کرنشی برابر با $260 \mu\epsilon$ را در طول توری نشان خواهد داد. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است، با اعمال این توزیع کرنش در شرایط دمایی ثابت در شبیه‌سازی، علاوه بر شیفت طول موج براگ، پهنای طیف بازتابی از توری براگ یکنواخت نیز افزایش خواهد یافت.



شکل (۹). طیف خروجی از توری براگ فیبری یکنواخت نصب شده بر روی طره در طول موج 1547 نانومتر در شرایط پایدار و بدون اعمال کرنش (نقطه چین) و در شرایط ناپایدار و با اعمال کرنش برابر با 600 میکروکرنش به سازه نمونه (خط چین)

از آنجاکه علت افزایش FWHM، توزیع غیریکنواخت کرنش در طول FBG یکنواخت بوده است، می‌توان با قطعیت گفت که تغییرات دما هیچ تأثیری بر کاهش و یا افزایش FWHM ندارند و تنها منجر به شیفت طول موج براگ خواهد شد زیرا تغییرات دما



شکل (۱۰). طیف خروجی از FBG نصب شده بر روی طره (مطابق با مسئله قبل) در مواجهه با کرنش‌های غیریکنواخت و مختلف

- sensor using partial window-based non local means method,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, no. 3, pp. 1-14, 2021.
- [8] H. E. Joe, H. Yun, S. H. Jo, M. B. Jun, B. K. Min, “A review on optical fiber sensors for environmental monitoring,” *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, vol. 5, no. 1, pp. 173-191, 2018.
- [9] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, S. Nouri Jouybari, “Distributional fiber optic sensors a new method to reduce damages caused by various disasters and incidents in Tehran’s urban constructions”, *disaster prevention and management knowledge quarterly*, vol.7, no. 4, pp.320-331, 2018. (In Persian)
- [10] A. Malakzadeh, R. Pashaie, M. Mansoursamaei, “150 km ϕ -OTDR sensor based on erbium and Raman amplifiers,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 6, pp. 1-8, 2020.
- [11] C. E. Campanella, A. Cuccovillo, C. Campanella, A. Yurt, V. M. Passaro, “Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, pp. 3115-3142, 2018.
- [12] Z. Liu, H. Y. Tam, “Industrial and medical applications of fiber Bragg gratings,” *Chinese Optics Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 120007-27, 2016.
- [13] G. C. Kahandawa, J. Epaarachchi, H. Wang, K. Lau, “Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures,” *Photonic Sensors*, vol. 2, no. 3, pp. 203-214, 2012.
- [14] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication,” *Applied physics letters*, vol. 32, no. 10, pp. 647-649, 1978.
- [15] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, R. Pashaie, M. Didar, “Fiber Bragg grating sensor as the most effective distributed optical fiber sensor in defense applications of civil structures”, *Passive Defense Quarterly*, vol. 10, no. 3, pp. 15-24, 2019. (In Persian)
- [16] L. A. A. Ferreira, F. M. Araujo, J. L. Santos, F. Farahi, “Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors,” *Optical Engineering*, vol. 39, no. 8, pp. 2226-2234 2000.
- [17] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, R. Pashaie, “Simultaneous measurement of temperature and strain based on peak power changes and wavelength shift using only one uniform fiber Bragg grating,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1-8, 2021.
- [18] M. Mansoursamaei, A. Malakzadeh, “Simultaneous measurement of temperature and strain using a single fiber bragg grating on a tilted cantilever beam,” *Optical Review*, vol. 28, no. 2, pp. 1-6, 2021.
- [19] K. Guo, J. He, L. Shao, G. Xu, Y. Wang, “Simultaneous Measurement of Strain and Temperature by a Sawtooth Stressor-Assisted Highly Birefringent Fiber Bragg Grating,” *Journal of*

بنابراین با داشتن تغییرات FWHM و شیف طول موج براگ به‌راحتی می‌توان میزان کرنش وارد شده به سازه را بدون دخالت دما توسط رابطه a محاسبه کرد و در ادامه با قرار دادن این کرنش در رابطه b تغییرات دما را نیز به دست آورد.

۵- نتیجه‌گیری

اگرچه تاکنون روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش توسط حسگرهای توری براگ فیبری پیشنهاد شده است اما هیچ‌یک از این روش‌ها قادر نیستند تنها با استفاده از یک تک توری براگ فیبری یکنواخت این مهم را انجام دهند. در این مقاله به کمک یک ایده مکانیکی جدید نشان داده شده است که می‌توان این کار را با دقت بسیار بالایی انجام داد. در این طرح پیشنهادی، که از یک طره مورب استفاده شده است، تغییرات دما به کمک شیف طول موج براگ و تغییرات کرنش با تغییر FWHM تشخیص داده می‌شوند. مطابق نتایج شبیه‌سازی، حساسیت دمایی حسگر FBG نسبت به جابه‌جایی طول موج براگ برابر $14 \text{ pm}/\mu\text{E}$ و مستقل از تغییرات FWHM خواهد بود، درحالی‌که حساسیت کرنشی این حسگر نسبت به جابه‌جایی طول موج براگ برابر با $0.1678 \text{ pm}/\mu\text{E}$ است و با یک رابطه غیرخطی درجه دوم با تغییرات FWHM مرتبط خواهد شد.

۶- مراجع

- [1] X. Bao, L. Chen, “Recent progress in distributed fiber optic sensors,” *sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 8601-8639, 2012.
- [2] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, “New matrix solution of the phase-correlation technique in a Brillouin dynamic grating sensor,” *Journal of Optical Technology*, vol. 85, no. 10, pp. 644-647, 2018.
- [3] P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B. T. Chorpeneing, M. P. Buric, P. R. Ohodnicki, “Distributed optical fiber sensing: Review and perspective,” *Applied Physics Reviews*, vol. 6, no. 4, pp. 041302-38, 2019.
- [4] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, R. Pashaie, “A novel technique in BDG sensors: combination of phase and frequency correlation techniques,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 9, pp. 1-10, 2020.
- [5] M. Karimi, “Analysis of photonic crystal fibers using finite difference frequency domain method”, *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 6, no. 2, pp. 33-42, 2019. (In Persian)
- [6] A. Malakzadeh, R. Pashaie, M. Mansoursamaei, “Gain and noise figure performance of an EDFA pumped at 980 nm or 1480 nm for DOFSs,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 1-16, 2020.
- [7] A. Malakzadeh, M. Didar, M. Mansoursamaei, “SNR enhancement of a Raman distributed temperature

- [27] M. S. Bieda, P. Sobotka, T. R. Woliński, "Chirped fiber Bragg grating written in highly birefringent fiber in simultaneous strain and temperature monitoring," *Applied optics*, vol. 56, no. 6, pp. 1625-1630, 2017.
- [28] U. Sampath, D. Kim, H. Kim, M. Song, "Polymer-coated FBG sensor for simultaneous temperature and strain monitoring in composite materials under cryogenic conditions," *Applied optics*, vol. 57, no. 3, pp. 492-497, 2018.
- [29] Y. Mizutani, R. M. Groves, "Multi-functional measurement using a single FBG sensor," *Experimental mechanics*, vol. 51, no. 9, pp. 1489-1498, 2011.
- [30] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *Journal of lightwave technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, 1997.
- [31] M. Toba, F. M. Mustafa, T. M. Barakat, "New simulation and analysis fiber Bragg grating: narrow bandwidth without side lobes," *Journal of Physics Communications*, vol. 4, no. 7, pp. 075018-31, 2020.
- [32] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, R. Pashaei, "fiber Bragg grating sensor's passive defense applications to decrease vulnerability of dams, bridges and buildings", 5th National Conference on Defense Science and Engineering, 2019. (In Persian)
- [33] R. K. Ramalingam, M. Kläser, T. Schneider, H. Neumann, "Fiber Bragg grating sensors for strain measurement at multiple points in an NbTi superconducting sample coil" *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 873-881, 2014.
- [34] N. Tanaka, Y. Okabe, N. Takeda, "Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates," *Smart materials and structures*, vol. 12, no. 6, pp. 940-946, 2003.
- [35] A. Zendehtnam, M. Mirzaei, A. Farashiani, L. Horabadi Farahani, "Investigation of bending loss in a single-mode optical fibre," *Pramana*, vol. 74, no. 4, pp. 591-603, 2010.
- Lightwave Technology, vol. 38, no. 7, pp. 2060-2066, 2020.
- [20] J. Tian, Y. Jiao, S. Ji, X. Dong, Y. Yao, "Cascaded-cavity Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of temperature and strain with cross-sensitivity compensation," *Optics Communications*, vol. 412, pp. 121-126, 2018.
- [21] M. Liang, X. Fang, Y. Ning, "Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm," *Photonic Sensors*, vol. 8, no. 2, pp. 157-167, 2018.
- [22] R. Oliveira, J. H. Osório, S. Aristilde, L. Bilro, R. N. Nogueira, C. M. Cordeiro, "Simultaneous measurement of strain, temperature and refractive index based on multimode interference, fiber tapering and fiber Bragg gratings," *Measurement Science and Technology*, vol. 27, no. 7, pp. 075107-13, 2016.
- [23] C. Li, T. Ning, J. Li, L. Pei, C. Zhang, H. Lin, X. Wen, "Simultaneous measurement of refractive index, strain, and temperature based on a four-core fiber combined with a fiber Bragg grating," *Optics & Laser Technology*, vol. 90, pp. 179-184, 2017.
- [24] M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie, J. P. Dakin, "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors," *Electronics letters*, vol. 30, no. 13, pp. 1085-1087, 1994.
- [25] S. Sengupta, S. K. Ghorai, P. Biswas, "Design of superstructure fiber Bragg grating with efficient mode coupling for simultaneous strain and temperature measurement with low cross-sensitivity," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 22, pp. 7941-7949, 2016.
- [26] F. Esposito, A. Srivastava, A. Iadicicco, S. Campopiano, "Multi-parameter sensor based on single Long Period Grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain," *Optics & Laser Technology*, vol. 113, pp. 198-203, 2019.