

اندازه‌گیری هم‌زمان پارامترهای محیطی دما و کرنش با یک توری براگ فیبری یکنواخت

محسن منصورسمائی^۱، عبدالله ملک‌زاده^{۲*}، رسول پاشایی^۳

۱- دانشجوی دکترا، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۳- دانشجوی دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶)

چکیده

امروزه روش‌های بسیار متنوعی برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش به کمک حسگرهای FBG پیشنهاد شده است که همه آن‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. روش‌هایی که از دو یا چند FBG یکنواخت یا غیریکنواخت برای اندازه‌گیری هم‌زمان استفاده می‌کنند و روش‌هایی که تنها از یک FBG غیریکنواخت به این منظور بهره می‌برند. در این مقاله، برخلاف تمام روش‌هایی که تاکنون مطرح شده، برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش تنها استفاده از یک FBG یکنواخت پیشنهاد شده است که کمترین مقدار از بازه طیفی منبع پهن‌بند را اشغال می‌کند. در این روش از یک ابزار مکانیکی به نام تیر افقی یک سر بسته (طره) برای تبدیل کرنش یکنواخت به کرنش غیریکنواخت در طول FBG استفاده می‌شود. به کمک این طره علاوه بر طول موج، توان پیک بازتابی از توری براگ نیز به تغییرات کرنش حساس خواهد شد درحالی‌که این توان بازتابی نسبت به تغییرات دما هیچ واکنشی از خود نشان نمی‌دهد. در نتیجه، کرنش اعمالی به سازه توسط تغییرات توان پیک بازتابی، و دما توسط جابه‌جایی طول موج بازتابی از توری براگ تعیین می‌شوند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، حساسیت این حسگر نسبت به تغییرات دما $14/21 \text{ pm}/\mu\text{e}$ و نسبت به تغییرات کرنش $0/68136 \text{ pm}/\mu\text{e}$ به دست آمده است.

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

۱- مقدمه

اندازه‌گیری کنند. از آنجایی که تمام پارامترهای محیطی منجر به تغییر در ضریب شکست فیبر نوری می‌شوند و معیار سنجش در این حسگرها نیز همین تغییرات ایجاد شده در ضریب شکست فیبر نوری است، بنابراین برطرف کردن همپوشانی ایجاد شده بین این تغییرات و اندازه‌گیری مستقل هر یک از این پارامترهای محیطی از جمله مهم‌ترین دغدغه‌های محققان و کاربران این حسگرها به حساب می‌آید. از آنجاکه امکان تغییر هم‌زمان دما و کرنش در اکثر کاربردها وجود دارد، بنابراین بیشتر تحقیقات در این زمینه از جمله همین مقاله به اندازه‌گیری هم‌زمان این دو پارامتر محیطی معطوف شده است [۱۷].

در بین حسگرهای توزیعی فیبر نوری، حسگر توری براگ فیبری موفق‌ترین حسگر در زمینه اندازه‌گیری هم‌زمان چند پارامتر است. روش‌های بسیار متنوعی برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش توسط این حسگر مطرح شده است که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از دو FBG یکنواخت در فیبرهایی با قطرهای متفاوت [۱۸]، ترکیب یک FBG و یک توری براگ با دوره تناوب بلند (LPG^۱) [۱۹]، استفاده از یک توری چیرپ شده [۲۰]، توری سوپرساختار [۲۱]، توری لایه‌نشانی شده [۲۲] و ... نام برد. تمام این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. دسته‌ای از آن‌ها نیاز به بیش از یک FBG یکنواخت دارند و دسته دیگر تنها از یک FBG غیریکنواخت برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش استفاده می‌کنند. اما یکی از اساسی‌ترین

حساسیت بسیار زیاد موجبرهای فیبر نوری به تغییرات محیطی همچون تغییرات دما، کرنش، تنش، غلظت، خمش و رطوبت منجر شده تا از آن‌ها به‌عنوان حسگرهای محیطی در کاربردهای مختلف استفاده شود. در این بین، حسگرهای توزیعی فیبر نوری به دلیل کاربردهای متنوع در صنایع پزشکی، نظامی، عمران و مکانیک بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳-۱۱]. حسگرهای توزیعی بر مبنای پراکندگی رابلی به دلیل طول سنجش بسیار زیاد [۷-۴] و حسگرهای توزیعی بر مبنای پراکندگی بریلوئن به دلیل توان تفکیک فضایی بالا [۸-۱۱]، هر یک طیف خاصی از کاربردها را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین حسگرهای توزیعی بر مبنای پراکندگی رامان نیز که دقت بالایی در اندازه‌گیری دما دارند به‌عنوان حسگرهای دمایی در کاربردهای مختلف استفاده می‌شوند [۱۴-۱۲]. یکی از پرکاربردترین حسگرهای توزیعی فیبر نوری، حسگر توری براگ فیبری (FBG) است. حسگر FBG در عین حال که نسبت به سایر حسگرهای فیبری بسیار مقرون به‌صرفه‌تر است، دقت و حساسیت مناسبی نیز نسبت به دما، کرنش، خمش، رطوبت و در واقع تمام پارامترهای محیطی دارد [۱۶-۱۵].

اکثر حسگرهای توزیعی فیبر نوری از جمله حسگرهای رابلی، بریلوئن و رامان قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش را ندارند و تنها می‌توانند یکی از این دو پارامتر محیطی را با دقت بالا

¹ Long-period grating

نهایتاً می‌توان نتیجه گرفت که برای اندازه‌گیری هم‌زمان چند پارامتر توسط حسگرهای FBG، نیاز به همان تعداد شاخص فیزیکی در طیف خروجی از آن حسگر داریم که پاسخ و رفتار آن‌ها نسبت به تغییرات محیطی مورد نظر متفاوت از هم باشند. از آنجاکه در طیف خروجی از یک تک FBG یکنواخت تنها یک شاخص فیزیکی، یعنی همان $\Delta\lambda$ ، وجود دارد که دارای حساسیت متفاوت به دما و کرنش باشد بنابراین تنها به کمک یک FBG یکنواخت نمی‌توان اندازه‌گیری هم‌زمان این دو پارامتر محیطی را انجام داد، مگر اینکه یک شاخص فیزیکی دیگری را خودمان در طیف آن ایجاد کنیم.

در این مقاله برای ایجاد یک شاخص فیزیکی دیگر در طیف خروجی از حسگر FBG یکنواخت از یک سطح شیب‌دار یک سر بسته، مشابه یک طره کوچک مورب، که با زاویه θ بر روی یک سازه فرضی نصب شده است استفاده می‌شود. طره مورب که FBG یکنواخت بر روی آن چسبیده شده است منجر می‌شود تا کرنش یکنواخت اعمالی به سازه، به‌صورت غیریکنواخت در طول طره و توری توزیع شود. از آنجاکه اعمال کرنش غیریکنواخت در طول یک FBG یکنواخت منجر به افزایش پهنای پیک و کاهش توان پیک بازتابی از توری می‌شود [۲۵] بنابراین در این روش در کنار شیفت طول موج براگ به‌عنوان شاخص فیزیکی اول، از توان پیک بازتابی به‌عنوان شاخص دوم برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش استفاده شده است. نهایتاً در این طرح پیشنهادی، تغییرات دما به کمک شیفت طول موج براگ تشخیص داده می‌شوند و تغییرات کرنش با تغییر توان پیک بازتابی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- نحوه عملکرد حسگر دما و حسگر کرنش

مطابق با تئوری جفت‌شدگی مدی، طول موج بازتابی از توری براگ (λ_B) را می‌توان به این صورت نشان داد:

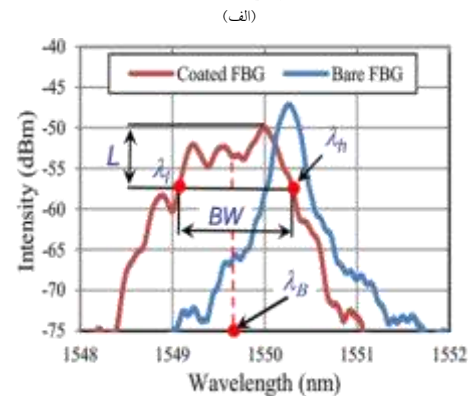
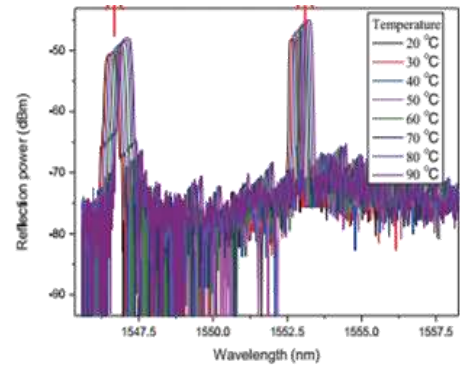
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

که n_{eff} ضریب شکست مؤثر فیبر و Λ دوره توری براگ است. وقتی دما و کرنش در اطراف فیبر نوری تغییر کنند، طول موج بازتابی از حسگر FBG نیز دستخوش تغییر خواهد شد [۲۶]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P)\Delta\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (2)$$

که در آن $\Delta\varepsilon$ و ΔT به ترتیب تغییرات کرنش و تغییرات دما در طول فیبر نوری، $\alpha_n = 1/6 \times 10^{-6}/\square$ ضریب ترمو اپتیکی سیلیکا، $\alpha_\Lambda = 0.155 \times 10^{-6}/\square$ ضریب انبساط حرارتی سیلیکا و P ضریب فشار مؤثر در سیلیکا و برابر 0.22 است. نهایتاً معادله طیف بازتابی از حسگر FBG بدین صورت تبدیل خواهد شد [۲۵]:

معایب هر دو دسته از این روش‌ها، نیاز به بازه وسیعی از طیف منبع پهن‌بند ورودی است. علاوه بر این، پیچیدگی در چیدمان برخی از این حسگرها و عدم دسترسی آسان به بعضی از این توری‌های غیریکنواخت، از دیگر مشکلات این روش‌ها به شمار می‌رود.



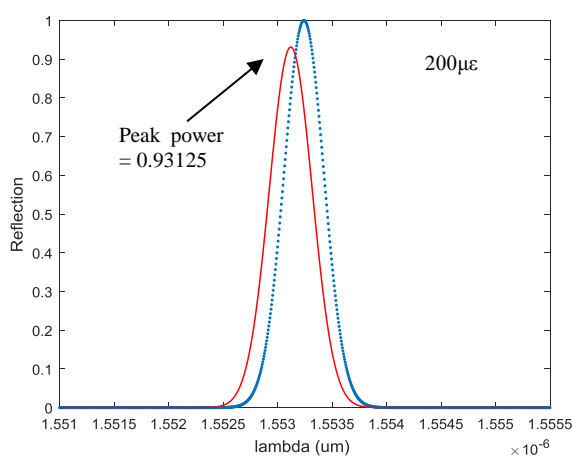
شکل (۱). طیف بازتابی از حسگر FBG به‌منظور اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش با روش الف) ترکیب یک FBG یکنواخت و یک LPG [۱۷] ب) یک FBG لایه‌نشانی شده [۲۴]

همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش، طیف خروجی از حسگر FBG باید دارای دو شاخص فیزیکی مختلف باشد که نسبت به دما و کرنش حساسیت متفاوتی را از خود نشان دهند. برای مثال در شکل (۱) الف) که از دو توری براگ مختلف استفاده شده است، در طیف بازتابی از حسگر FBG دو پیک متمایز یا همان دو شاخص فیزیکی مختلف وجود دارد که میزان جابه‌جایی طول موج ($\Delta\lambda$) این دو پیک نسبت به دما و کرنش از یکدیگر متفاوت است [۲۳] و یا در شکل (۱) ب) که ماده لوفین^۱ بر روی FBG یکنواخت لایه‌نشانی شده است، پارامترهای $\Delta\lambda$ و پهنای در نصف مقدار بیشینه ($FWHM^2$) به‌عنوان دو شاخص فیزیکی هستند که نسبت به دما و کرنش رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۲۴].

¹ Lophin

² Full width at half maximum

همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشخص است، وقتی دما و یا کرنش یکنواخت به یک FBG یکنواخت وارد می‌شود، این عوامل تنها منجر به جابه‌جایی طول‌موج براگ خواهند شد و تغییر دیگری در طیف بازتابی از توری ایجاد نخواهند کرد. اما وقتی هر نقطه از یک FBG یکنواخت، دما و یا کرنش متفاوتی را تجربه کند و یا به عبارتی یک تغییر محیطی غیریکنواخت در طول FBG یکنواخت توزیع شود، در طیف بازتابی از این توری، علاوه بر شیفت طول‌موج براگ، توان پیک بازتابی نیز تغییر خواهد کرد [۲۵]. شکل (۳) طیف بازتابی از یک FBG یکنواخت را نشان می‌دهد که کرنش غیریکنواخت $200\mu\epsilon$ از ابتدا (۲۰۰) تا انتهای (۰) آن توزیع شده است.



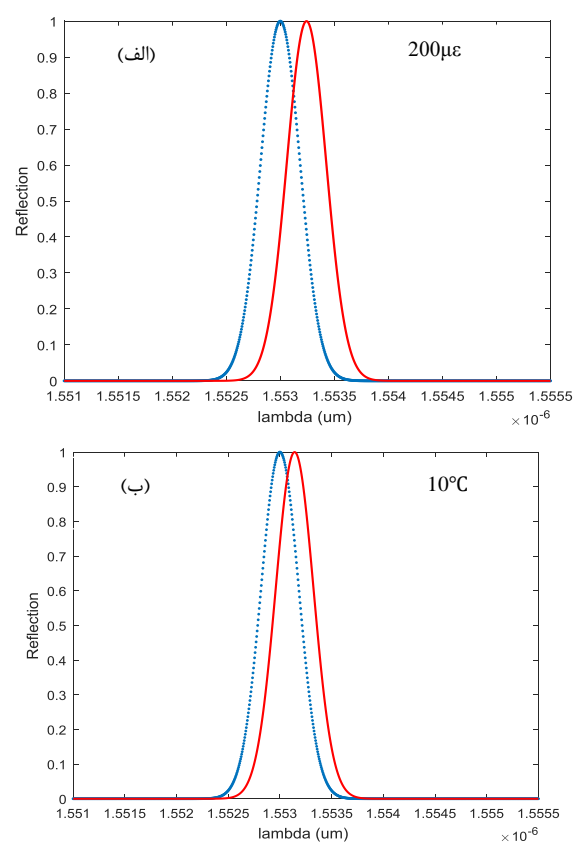
شکل (۳). طیف بازتابی از توری براگ فیبری یکنواخت بر اثر اعمال کرنش یکنواخت ۲۰۰ میکروکرنش (نقطه) و غیریکنواخت ۲۰۰ میکروکرنش (خط)

در این مقاله، برای ایجاد کرنش غیریکنواخت در امتداد توری براگ فیبری، از یک قطعه مکانیکی به نام طره یا همان تیر افقی یک سر بسته استفاده شده است. طره یک قطعه صلب است که وقتی کرنشی به سر بسته آن وارد می‌شود، این کرنش در طول این قطعه به صورت خطی توزیع شده و در انتهای باز آن به صفر می‌رسد [۲۵]. وقتی FBG یکنواخت بر روی طره چسبیده شود، این توزیع غیریکنواخت کرنش به توری نیز منتقل خواهد شد. بنابراین همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشاهده شد، توزیع کرنش غیریکنواخت در طول یک FBG یکنواخت منجر به حساسیت توان پیک بازتابی از توری به این کرنش اعمالی خواهد شد.

در این مقاله مطابق شکل (۴) یک FBG یکنواخت به طول ۳ سانتی‌متر در نیمه ابتدایی یک طره مورب ۶ سانتی‌متری که با زاویه ۳۰ درجه بر روی یک سازه فرضی قرار دارد، چسبیده شده است. در این طرح پیشنهادی، بر اثر اعمال کرنش P به سازه فرضی، کرنشی برابر با $P \cdot \cos 30$ به ابتدای توری وارد شده و

$$R(\lambda) = \exp \left[-\frac{4 \ln 2 [\lambda - \{(1-P)\Delta\epsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T + 1\} \lambda_B]^2}{c^2} \right] \quad (3)$$

که در آن C سرعت نور در خلأ است. حال اگر هیچ تغییر دمایی در محیط وجود نداشته باشد ($\Delta T=0$) و تنها کرنش اعمالی به FBG یکنواخت به اندازه $200\mu\epsilon$ تغییر کند، طول‌موج طیف بازتابی از حسگر FBG به صورت شکل (۲) (الف) جابه‌جا خواهد شد و اگر کرنش ثابت باشد و تنها دما به اندازه ۱۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کند طول‌موج طیف بازتابی از حسگر FBG به صورت شکل (۲) (ب) جابه‌جا خواهد شد.

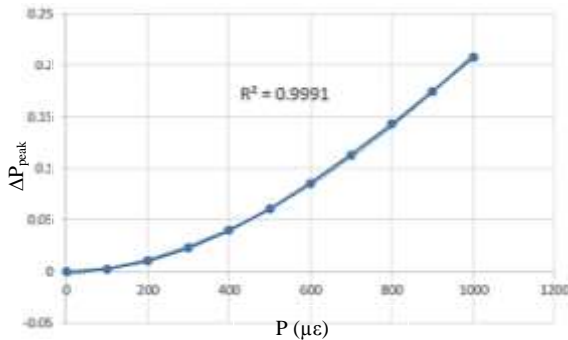


شکل (۲). طیف بازتابی از توری براگ فیبری نوری یکنواخت در طول‌موج ۱۵۵۳ نانومتر بدون تغییرات محیطی (نقطه) و همچنین با تغییر کرنش برابر با ۲۰۰ میکروکرنش (خط) و (ب) تغییر دما ۱۰ درجه سانتی‌گراد (خط)

مطابق شکل (۲) حساسیت حسگر FBG یکنواخت به تغییرات دمایی برابر $0.1421 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ و حساسیت آن نسبت به تغییرات کرنش یکنواخت برابر با $0.00121 \text{ nm}/\mu\epsilon$ خواهد بود که این مقادیر با حساسیت‌های استاندارد برای یک FBG یکنواخت مطابقت دارد [۲۷].

۳- ارتباط کرنش غیریکنواخت و توان پیک بازتابی

ستون دوم جدول (۱) مشخص است میزان حساسیت طول موج براگ به کرنش اعمالی به سازه برابر است با $nm/\mu\epsilon$ 0.00068136 و همچنین در نمودار شکل (۵) رابطه بین میزان کرنش اعمالی به سازه و تغییرات توان پیک بازتابی که در ستون سوم جدول (۱) مشخص است، به صورت یک رابطه درجه دوم نشان داده شده است.



شکل (۵). رابطه بین کرنش اعمالی به سازه و تغییرات توان پیک بازتابی از FBG یکنواخت

معادله (۴) رابطه حاکم بر نمودار شکل (۵) را نشان می‌دهد:

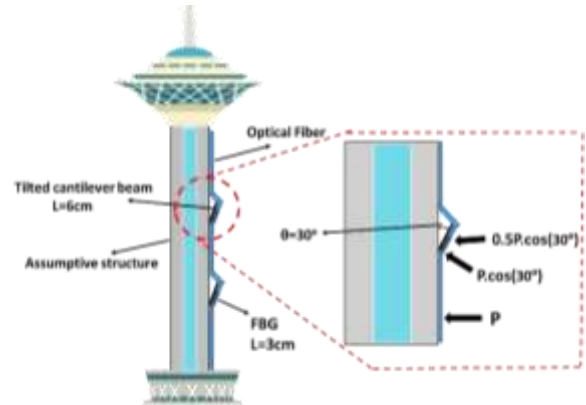
$$\Delta P_{peak} = 2P^2 \times 10^{-7} + 4P \times 10^{-5} - 0.003 \quad (4)$$

بنابراین با داشتن تغییرات توان پیک بازتابی از FBG یکنواخت می‌توان میزان کرنش اعمالی به سازه (P) را به دست آورد. البته باید توجه داشت که رابطه (۴) مختص این مثال و سازه فرضی ما در این مقاله است و اگر شرایط مسئله ما تغییر کند (طول توری و طره، زاویه، جنس و ضخامت طره) ضرایب این رابطه نیز دستخوش تغییراتی خواهد شد.

۴- اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش

همان‌طور که تاکنون بررسی کردیم، تغییرات دما و کرنش یکنواخت تنها منجر به تغییر در طول موج بازتابی از FBG یکنواخت می‌شوند ولی اگر هر یک از این تغییرات به صورت غیریکنواخت به توری اعمال شوند علاوه بر شیفت طول موج، توان پیک بازتابی را نیز دچار تغییر خواهند کرد. در این مقاله که از یک FBG یکنواخت بر روی یک طره مورب نصب شده بر روی یک سازه فرضی استفاده شده است، توزیع دمای اعمال شده به توری به صورت یکنواخت است در حالی که کرنش اعمالی به سازه به صورت غیریکنواخت به توری منتقل می‌شود. بنابراین در این نمونه مورد نظر، دما تنها منجر به شیفت طول موج براگ شده $(0.01421 \text{ nm}/^\circ\text{C})$ در حالی که کرنش، هر دو عامل طول موج $(0.00068136 \text{ nm}/\mu\epsilon)$ و توان پیک بازتابی (رابطه (۴)) را تغییر خواهد داد. در چنین محیطی که هر دو پارامتر دما و کرنش بطور هم‌زمان در حال تغییر هستند می‌توان این

هرچه به سمت انتهای توری حرکت کنیم به صورت خطی از این مقدار کاسته خواهد شد. به طوری که وقتی به انتهای توری که در مرکز طره قرار دارد می‌رسیم، کرنش اعمالی به آن برابر $0.5P \cdot \cos 30$ خواهد شد. به عبارتی می‌توان گفت توزیع کرنشی غیریکنواخت و برابر با $0.5P \cdot \cos 30$ در طول FBG یکنواخت توزیع خواهد شد.



شکل (۴). نحوه قراردادن توری براگ فیبری بر روی سازه فرضی

البته با توجه به ویژگی‌های فیزیکی طره همچون ضخامت و جنس آن ممکن است رابطه بین کرنش اعمالی به سازه و کرنش انتقالی به طره و توری دچار تغییر شود که ما در این مقاله فرض کردیم ویژگی‌های طره به گونه‌ای است که تمام کرنش اعمالی به سازه مستقیماً به ابتدای طره منتقل می‌شود و اتلافی در این فرایند وجود ندارد.

جدول (۱). بیشترین تغییرات طول موج و توان پیک بازتابی از FBG یکنواخت به ازای کرنش اعمال شده به سازه فرضی

| Strain in structure, P ($\mu\epsilon$) | Maximum wavelength shift, 1553nm | Maximum $\Delta P_{peak} = P_0 - P_{peak}$ $P_0=1$ |
|--|----------------------------------|--|
| 100 | 0.068136 | 0.0025729385 |
| 200 | 0.136272 | 0.0102194145 |
| 300 | 0.204408 | 0.0227298805 |
| 400 | 0.272544 | 0.0397677314 |
| 500 | 0.34068 | 0.0608871488 |
| 600 | 0.408816 | 0.0855560384 |
| 700 | 0.476952 | 0.1131822575 |
| 800 | 0.545088 | 0.14314120075 |
| 900 | 0.613224 | 0.1748028127 |
| 1000 | 0.68136 | 0.2075563256 |

در جدول (۱) میزان تغییر توان پیک بازتابی از FBG یکنواخت، با توجه کرنش وارد شده به سازه فرضی شکل (۴) به طور دقیق محاسبه شده است. مطابق داده‌های جدول می‌توان ارتباط بین کرنش اعمالی به سازه و تغییرات طول موج و توان پیک بازتابی از توری براگ را به دست آورد. همان‌طور که از

شده است که دیگر معایب روش‌های گذشته را نخواهد داشت. در این روش با قرار دادن یک طره مورب بر روی سازه مورد نظر می‌توان کرنش یکنواخت اعمالی به سازه را به کرنشی غیریکنواخت تبدیل کرده و آن را به توری براگ منتقل کرد. اعمال کرنش غیریکنواخت به FBG یکنواخت منجر می‌شود تا طیف بازتابی از این توری علاوه بر شیفت طول موج براگ دچار تغییر در توان پیک بازتابی نیز شود. بنابراین به کمک این روش می‌توان تغییرات کرنش اعمالی به سازه را از طریق توان پیک بازتابی از توری و تغییرات دما را از طریق شیفت طول موج براگ به دست آورد. مطابق نتایج شبیه‌سازی، حساسیت دمایی این حسگر FBG برابر با $14/21 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ و مستقل از تغییرات توان پیک بازتابی خواهد بود، در حالی که حساسیت کرنشی این حسگر برابر با $0/68136 \text{ pm}/\mu\epsilon$ است و با یک رابطه غیرخطی درجه دوم با تغییرات توان پیک بازتابی مرتبط خواهد شد.

۶- مراجع

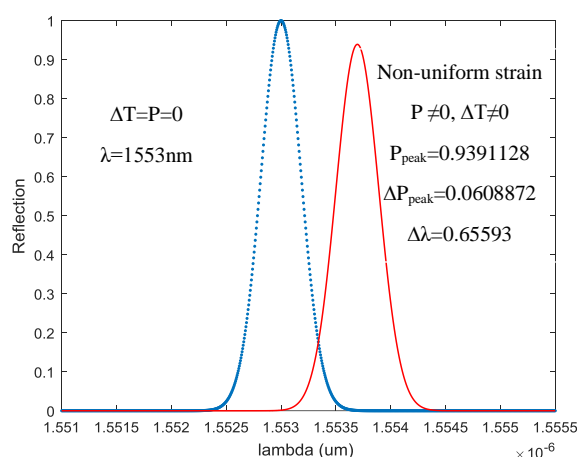
- [1] Bao, Xiaoyi, and Liang Chen, "Recent progress in distributed fiber optic sensors," sensors, vol. 12, no. 7, pp. 8601-8639, 2012.
- [2] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, S. Nouri Jouybari, "Distributional fiber optic sensors a new method to reduce damages caused by various disasters and incidents in Tehran's urban constructions," disaster prevention and management knowledge quarterly, Vol.7, No. 4, pp.320-331, 2018. (In Persian).
- [3] 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).
- [4] Malakzadeh, Abdollah, Rasoul Pashaie, and Mohsen 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. 75, 2020.
- [5] Rao, Yunjiang, et al, "Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR)," Photonic Sensors, vol. 11, no. 1, pp. 1-30, 2021.
- [6] 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.
- [7] Wang, Yu, et al, "Real-time distributed vibration monitoring system using Phi-OTDR," IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 5, pp. 1333-1341, 2016.
- [8] A. Malakzadeh, Mohsen Mansoursamaei, and Rasoul 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.

پارامترهای محیطی را به کمک رابطه (۵) بدست آورد:

$$\Delta P_{peak} = 2P^2 \times 10^{-7} + 4P \times 10^{-5} - 0.003 \quad (5)$$

$$\Delta \lambda = 0.00068136P + 0.01421\Delta T$$

برای درک بهتر این موضوع که چگونه می‌توان دما و کرنش را به طور هم‌زمان به کمک تنها یک FBG یکنواخت به دست آورد باید به تحلیل طیف بازتابی از این حسگر بپردازیم. برای مثال شکل (۶) یک شرایط محیطی نامعلوم برای سازه مورد نظر ما را نشان می‌دهد و ما می‌خواهیم با توجه به این نمودار که طیف خروجی از حسگر FBG را نشان می‌دهد، تغییرات دما و کرنش اعمالی به سازه فرضی را به دست آوریم.



شکل (۶). طیف خروجی از حسگر FBG، در شرایطی که تغییر دما و کرنش وجود ندارد (نقطه) و همچنین در شرایطی که تغییر دما یکنواخت و تغییر کرنش غیریکنواخت به توری اعمال شده است (خط)

همان‌طور که در شکل (۶) نیز مشخص است، شیفت طول موج براگ برای یک شرایط محیطی نامعلوم در سازه مورد نظر ما برابر است با $0/685593$ نانومتر و تغییرات توان پیک بازتابی برابر است با $0/0608872$ که با توجه به رابطه (۵) می‌توان تغییرات دما و کرنش در این سازه را برابر با $26/2 \mu\epsilon$ و $474 \mu\epsilon$ میکروکرنش به دست آورد.

۵- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش در بسیاری از کاربردهای صنعتی، نظامی و عمرانی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. حسگرهای توری براگ فیبری با روش‌های مختلف توانسته‌اند این مهم را تحقق بخشند ولی برخی از معایب این روش‌ها از جمله صرف بازه وسیعی از منبع پهن‌بند و پیچیدگی در چیدمان آن‌ها منجر شده تا همواره تلاش‌های گسترده‌ای برای بهبود عملکرد این حسگرها صورت گیرد. در این مقاله برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش تنها از یک توری براگ فیبری یکنواخت استفاده

- simultaneously monitoring remote temperature and stress," *Sensors and Materials*, Vol. 30, no. 1, pp. 23-32, 2018.
- [24] Singh, Abhay Kumar. *Fiber Bragg grating (FBG) sensors for the simultaneous measurement of strain and temperature*. Diss. 2016.
- [25] Mizutani, Y., and R. M. Groves, "Multi-functional measurement using a single FBG sensor," *Experimental mechanics*, vol. 51, no. 9, pp. 1489-1498, 2011.
- [26] Ramalingam, Rajini Kumar, et al, "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.
- [27] Du, Jiangbing, and Zuyuan He, "Sensitivity enhanced strain and temperature measurements based on FBG and frequency chirp magnification," *Optics express*, vol. 21, no. 22, pp. 27111-27118, 2013.
- [9] Bao, Xiaoyi, and Liang Chen, "Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors," *Sensors*, vol. 11, no. 4, pp. 4152-4187, 2011.
- [10] Lanciano, Chiara, and Riccardo Salvini, "Monitoring of strain and temperature in an open pit using Brillouin distributed optical fiber sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 7, pp. 1924, 2020.
- [11] Malakzadeh, Abdollah, and Mohsen 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.
- [12] Lu, Ping, et al, "Distributed optical fiber sensing: Review and perspective," *Applied Physics Reviews*, vol. 6, no. 4, pp. 041302, 2019.
- [13] [13] Yang, Xuan, et al, "Portable fiber sensors based on surface-enhanced Raman scattering," *Review of Scientific Instruments*, vol. 81, no. 12, pp. 123103, 2010.
- [14] Malakzadeh, Abdollah, Mohammad Didar, and Mohsen Mansoursamaei, "SNR enhancement of a Raman distributed temperature sensor using partial window-based non local means method," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, no. 3, pp. 147, 2021.
- [15] Campanella, Carlo Edoardo, et al, "Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications," *Sensors*, vol. 18, no. 9, pp. 3115, 2018.
- [16] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, R. Pashaei, 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, 2019. (In Persian).
- [17] Ferreira, Luis A., et al, "Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors," *Optical Engineering*, Vol. 39, 2000.
- [18] Song, Minho, et al, "Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings," *Optics letters*, vol. 22, no. 11, pp. 790-792, 1997.
- [19] Patrick, H. J., et al, "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 9, pp. 1223-1225, 1996.
- [20] Bieda, Marcin S., Piotr Sobotka, and Tomasz 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.
- [21] Sengupta, Somnath, Swapan Kumar Ghorai, and Palas 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.
- [22] Sampath, Umesh, et al, "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.
- [23] Chang, Hung-Ying, et al, "In-fiber long-period grating and fiber Bragg grating-based sensor for

