

طراحی و بهینه‌سازی نانوحسگرهای دما و کرنش توری براگ فیبری با استفاده از ناخالصی BaO و فیبرهای بسپاری

مهدی طاهرپور انارکی، * زهرا اعلایی

دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

چکیده

در این مقاله، به طراحی نانوحسگرهای دما و کرنش با استفاده از توری‌های براگ فیبری پرداخته‌ایم. طول موج‌های براگ برای نانو حسگرهای دما و کرنش به ترتیب ۱۵۵۵ و ۱۵۴۹ نانومتر در نظر گرفته شده است. با استفاده از ناخالصی باریوم و تزریق آن به هسته‌ی فیبر سیلیکا و همچنین با استفاده از فیبر بسپاری متیل متاکریلات به طراحی حسگرهای کرنش و دما پرداخته شده است. تغییرات دما در نانو حسگرهای توری براگ باعث تغییر عمق مدولاسیون ضریب شکست شده و در نتیجه تغییر طول موج براگ می‌شود. در این مقاله، با استفاده از فیبر بسپاری و تزریق ناخالصی از جمله بنزوفنون به هسته فیبر بسپاری، پارامترهای حرارتی - اپتیکی را افزایش داده و در نتیجه حساسیت دمایی نانوحسگر طراحی شده به شدت ارتقاء می‌یابد. حساسیت به دست آمده برای نانو حسگر دمایی با استفاده از فیبر بسپاری $-0.3223\text{nm}/^\circ\text{C}$ به دست آمده است. همچنین، تغییرات کرنش در توری‌های براگ علاوه بر تغییر عمق مدولاسیون ضریب شکست، باعث تغییر در دوره تناوب توری نیز می‌شود. با تزریق ناخالصی باریوم به هسته فیبر سیلیکا، پارامترهای کرنش - اپتیکی زیاد شد و با توجه به رابطه کرنش با تغییرات طول موج براگ، حساسیت کرنش حسگر طراحی شده دچار افزایش می‌شود. حساسیت به دست آمده برای نانوحسگر کرنش طراحی شده $0.0019\text{nm}/\mu\epsilon$ به دست آمد. همچنین، با توجه به انتخاب مناسب پارامترهای توری، شدت بازتاب در طول موج براگ نانو حسگرهای طراحی شده تقریباً برابر صد در صد است و شدت انتقال توری در طول موج براگ کاهش یافته است که در نتیجه کاهش این شدت، اتلاف نانو حسگرهای طراحی شده به طرز قابل قبولی کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: ناخالصی باریوم، نانو حسگرهای توری براگ، حساسیت دمایی و کرنش، تلفات، طول موج براگ.

ایمیل نویسنده مسئول: alaie.zahra@yahoo.com

۱- مقدمه

ضرورت نیاز به مخابرات با بهره‌وری بالا، باعث پیشرفت و ارتقاء وسایل اپتیکی و فیبرهای نوری شده است. به موازات این پیشرفت‌ها، تکنولوژی حسگر فیبر نوری به عنوان یک تکنولوژی کاربردی وابسته به اپتوالکترونیک و صنایع مخابرات نوری مورد توجه قرار گرفت. با پیشرفت قطعات و ترکیبات وابسته به حسگرهای فیبر نوری، این فناوری همیشه در جهت بهبود کیفیت حرکت کرده است [۱-۳].

فناوری FOS، به عنوان سیستم نظارت، دارای ویژگی‌هایی از جمله دقت، سود، فشردگی (سایز کوچک)، دوام بالا (ماندگار) و عملکرد آسان است و به درستی چنین ویژگی‌هایی را برآورده می‌کند. در نتیجه از فیبر نوری به عنوان عنصر سنجش یا به عنوان وسیله‌ای برای حسگر انتقال سیگنال از راه دور به

دستگاه‌های الکترونیکی که سیگنال را پردازش می‌کنند، استفاده می‌شود [۳، ۴].

حسگرهای FBG نسبت به سیستم‌های سنجش مرسوم، مزایای متعددی از جمله ایمنی در برابر میدان‌های الکترومغناطیسی و تداخل، مقاومت در برابر محیط خشن و پایداری‌های بلند مدت، قابلیت مالتی‌پلکس کردن تعداد بسیاری از حسگرها، اندازه کوچک و عدم نفوذ پذیری دارند. کلیه ویژگی‌های بالا باعث می‌شود که فن‌آوری FBG برای سازه‌های هوشمند با یکپارچه‌سازی یک سیستم سنجش نوری فیبر توزیع شده در یک ساختار بزرگ مناسب باشد [۵، ۶].

در جدول ۱-۱، مقایسه‌ای بین حسگر FBG و چند نمونه دیگر از حسگرهای فیبر نوری انجام شده است.

50dB و ضریب حساسیت دمایی $0.01536\text{nm}/^\circ\text{C}$ از خود نشان داد[۱۰].

ژینگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ با استفاده از فیبرهای حفظ قطبش و فیبرهای چند مد به طراحی حسگر کرنش و دما پرداختند. حساسیت کرنش در بازه $0\mu\text{E}$ تا $2000\mu\text{E}$ برابر $0.00127\text{nm}/\mu\text{E}$ به دست آمد. همچنین حساسیت دمایی حسگر در بازه دمایی 30 تا 70 درجه سانتی‌گراد، $0.049\text{nm}/^\circ\text{C}$ به دست آمد[۱۱].

در سال ۲۰۱۹ کارلو و همکارانش با تزریق نانو ذرات MgO به هسته فیبر سیلیکا، به طراحی حسگر دمای توری براگ پرداختند. حساسیت به دست آمده برای این حسگر برابر $0.01145\text{nm}/^\circ\text{C}$ و همچنین شدت بازتاب حسگر برابر 0.997 هستند[۱۲].

در این مقاله با استفاده از تزریق ناخالصی به هسته فیبر سیلیکا و همچنین با استفاده از فیبرهای بسیاری، به طراحی نانو حسگرهای توری براگ فیبری پرداخته می‌شود. در بخش دوم تئوری حسگرهای توری براگ و همچنین پارامترهای مؤثر بر حساسیت‌های دما و کرنش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه به طراحی حسگرها پرداخته و حساسیت‌های آن‌ها بررسی می‌شود و در انتها ویژگی‌های این نوع حسگرها بیان می‌شود.

۲- تئوری حسگرهای توری براگ فیبری

توری براگ یک ساختار متناوب (پریودیک) است که توسط قرار گرفتن در فیبر حساس به نور فرابنفش ساخته می‌شود. چندین توری می‌تواند در امتداد یک فیبر نوری قرار گیرد. هنگامی که نور از یک منبع باند وسیع با توری اثر متقابل دارد، یک طول موج که به عنوان طول موج براگ شناخته می‌شود، به عقب بازتاب شده، در حالی که بقیه سیگنال انتقال می‌یابد. کرنش مکانیکی خارجی در فیبر (محرک)، طول موج براگ (پاسخ فیبر) را از طریق انبساط و انقباض دوره تناوب توری تغییر می‌دهد. به طور مشابه، تغییرات دما (محرک) باعث انقباض و انبساط حرارتی دوره تناوب توری می‌شود و همچنین ضریب شکست (پاسخ‌ها) را تغییر می‌دهد[۳].

طول موج براگ λ_B (رابطه (۱)) به ویژگی‌های فیزیکی و هندسی توری بستگی دارد.

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

n_{eff} ضریب شکست موثر مد انتشار در امتداد فیبر و Λ دوره تناوب FBG است. هر دو ضریب شکست موثر و دوره تناوب توری با تغییرات کرنش $\Delta\epsilon$ و تغییرات دما ΔT اعمال شده بر فیبر تغییر می‌کند. کرنش و دمای اعمالی، طول موج براگ را از طریق انبساط یا انقباض دوره تناوب توری و اثر فوتو الاستیک تغییر خواهد داد[۱].

جدول ۱: مقایسه حسگرهای فیبر نوری[۷].

حسگر فیبر قطبشی ^۱ (PM)	حسگر فیبر دو مدی ^۲ (TM)	حسگر فابری پروت ^۳ (FP)	حسگر فیبر توری براگ (FBG)	پاسخ خطی
✓*	✓*	✓*	✓	✓
✓*	✓*	✓*	✓	اندازه‌گیری محض
پایین	پایین	بالا	بالا	بازه اندازه‌گیری
بلند	بلند	کوتاه	کوتاه	طول گنج حسگر
بالا	بالا	پایین*	بالا	قدرت مکانیکی
✓*	✓*	✓*	✓	توانایی مالتی‌پلکس شدن
✓*	✓*	✓*	✓	تولید تجاری
پایین*	پایین*	پایین*	پایین	هزینه تولید

مواردی که با علامت * مشخص شده‌اند تحت شرایط خاصی برقرارند. جدول ۱ نشان می‌دهد که حسگرهای FBG در مقایسه با سایر حسگرهای فیبر نوری دارای قابلیت‌های بیشتری هستند.

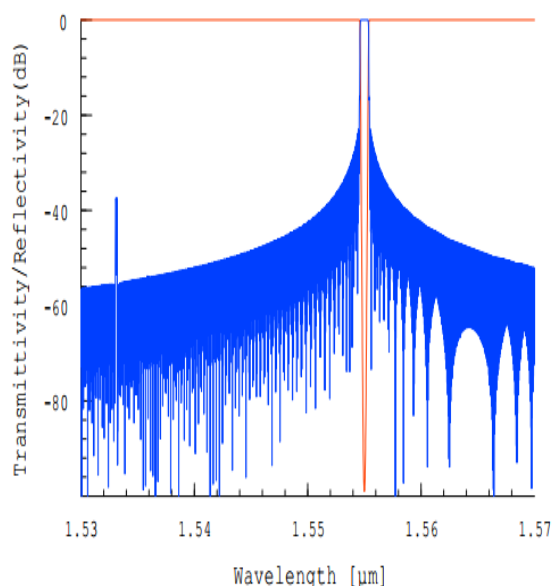
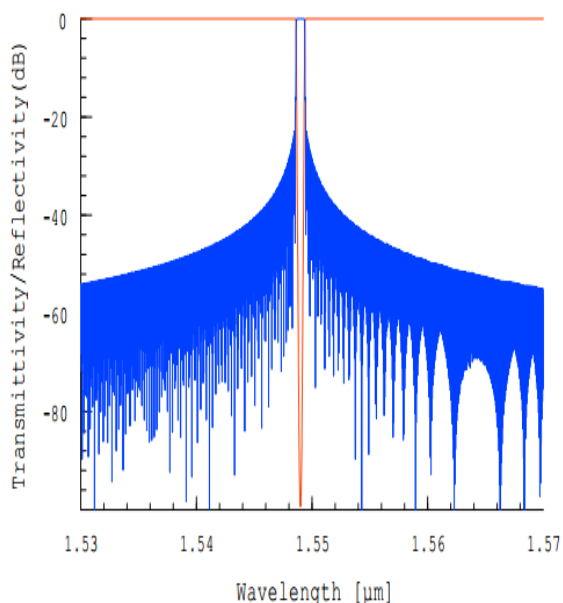
در سال ۲۰۱۰، ژائو و همکارانش با استفاده از لیزر CO_2 به طراحی حسگر کرنش و دمای توری براگ با دوره تناوب بلند پرداختند. حسگر طراحی شده بر اساس طول‌موج‌های تشدید کار می‌کند. حساسیت کرنش و دمای به دست آمده بر اساس مد کوپلینگ LP(0,6) به ترتیب برابر $0.00076\text{nm}/\mu\text{E}$ و $0.0978\text{nm}/^\circ\text{C}$ به دست آمد[۸].

در سال ۲۰۱۸، وانگ و همکارانش حسگر دما بر اساس توری-های براگ و با استفاده از فیبر کریستال فوتونی هسته جامد سیلیکای شیشه‌ای با یک حفره هوا در مرکز آن را طراحی کردند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که حسگر می‌تواند برای عملکرد به مدت یک روز کامل در دمای 1100°C کار کند. حساسیت به دست آمده برای این حسگر $0.01561\text{nm}/^\circ\text{C}$ به دست آمد[۹]. در همین سال ژانگ و همکارانش با استفاده از فیبر توری براگ بازسازی شده و ترکیب لیزر فیبر خطی با کاواک خطی و فیبر جاذب اشباع شدنی، حسگری برای سنجش دما طراحی کردند. حسگر طراحی شده نسبت نوری سیگنال به نویز

¹.Polarimetric fiber optic sensor

².Two-mode fiber optic sensor

³.Fabry-prot interferometric sensor



شکل ۱: شدت بازتابی و انتقالی حسگرهای طراحی شده با طول موج براگ (الف) ۱۵۴۹ (ب) ۱۵۵۵ نانومتر.

۳-۱- طراحی نانو حسگر کرنش توری براگ فیبری

در این قسمت با استفاده از تزریق ناخالصی BaO به هسته فیبر سیلیکا به طراحی نانوحسگر کرنش پرداخته می‌شود. تغییرات طول موج براگ نسبت به کرنش اعمالی در بازه ۰ تا ۲۰۰۰ με و با گام ۲۰۰ με در شکل ۲ نشان داده شده است.

با فرض اینکه تأثیرات خارجی کرنش طولی و دما بر روی توری وجود داشته باشد، داریم [۱]:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \varepsilon + (\alpha_{TE} + \alpha_{TO}) \Delta T \quad (2)$$

در رابطه فوق ε کرنش طولی، ΔT تغییرات دمایی، P_e ضریب فوتو الاستیک، α_{TE} ضریب انبساط حرارتی و α_{TO} ضریب ترمو - اپتیکی می‌باشند.

۳- طراحی نانو حسگر توری براگ فیبری

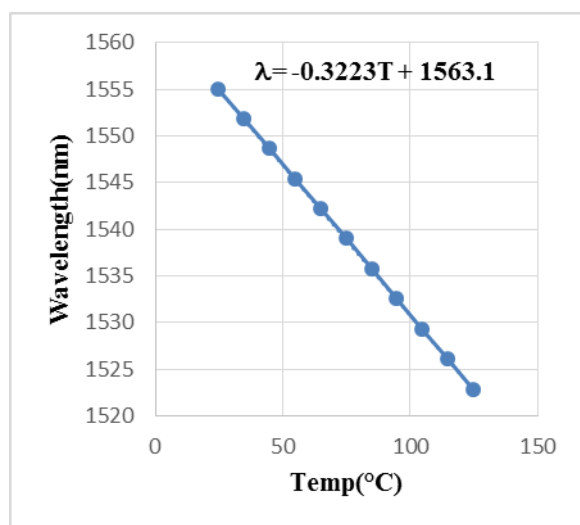
حسگرهای کرنش و دما به ترتیب دارای طول موج براگ ۱۵۴۹ و ۱۵۵۵ نانومتر هستند. سایر مشخصات حسگر در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات حسگرهای کرنش و دمای توری براگ فیبری طراحی شده.

طول موج براگ	تابع پیرایش	مدولاسیون ضریب شکست	طول توری	دوره تناوب توری	نوع حسگر
1549 nm	Gaussian	0.0008	1.5 mm	0.531 μm	کرنش
1555 nm	Gaussian	0.0008	1.5 mm	0.533 μm	دما

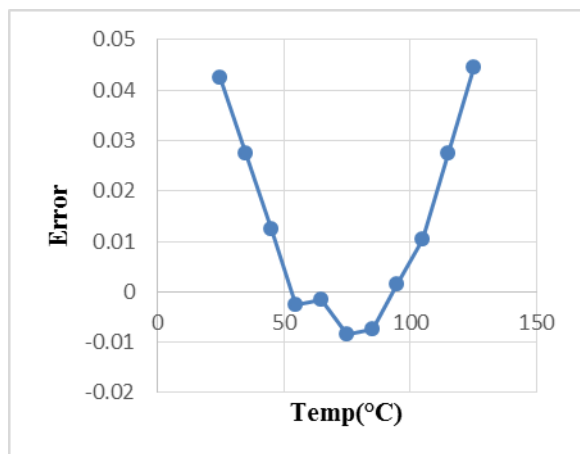
در نانو حسگر طراحی شده از تابع پیرایش گوسی جهت حذف پیک‌های جانبی اطراف پیک اصلی استفاده شده است تا دقت تشخیص طول موج براگ افزایش یافته و خطای اندازه‌گیری کاهش یابد. شکل ۱، شدت بازتابی و انتقالی نانو حسگر طراحی شده در حالت تعادل دمایی و کرنش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طول موج براگ شدت بازتاب تقریباً نزدیک به صد درصد است و شدت انتقالی در این طول موج تقریباً صفر است، که کم بودن شدت انتقالی باعث کاهش اتلاف در حسگر می‌شود.

این حسگر برابر $-0.3223\text{nm}/^\circ\text{C}$ است.



شکل ۴: تغییرات طول موج براگ نسبت به دمای اعمالی بر حسگر دمای توری براگ طراحی شده با استفاده از فیبر PMMA.

تلفات حسگر طراحی شده نسبت به تغییرات دمایی در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مقدار این اتلاف بسیار ناچیز است.



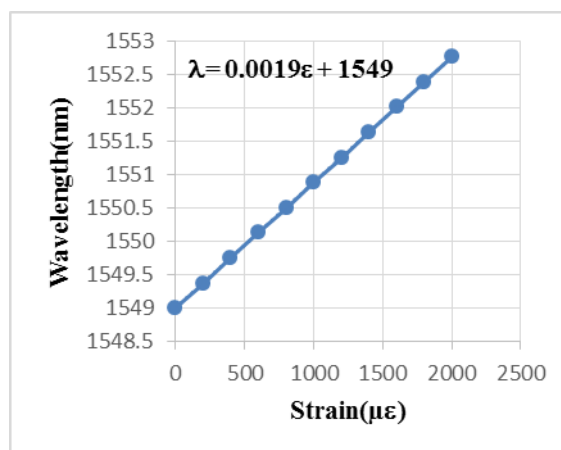
شکل ۵: تلفات حسگر طراحی شده نسبت به تغییرات دمایی.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

جدول ۳، نتایج به دست آمده از حسگرهای طراحی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج به دست آمده حسگرهای کرنش و دمای طراحی شده.

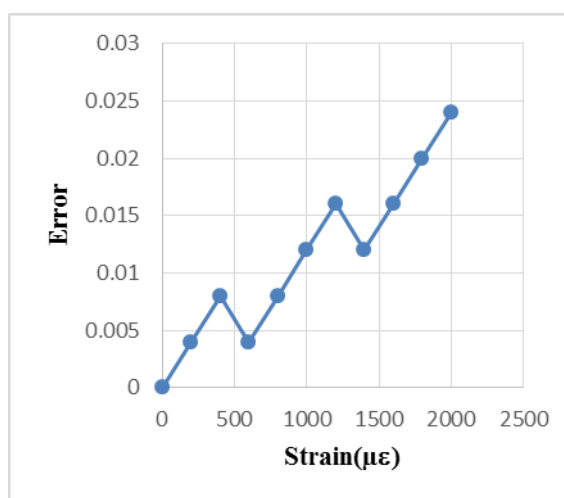
نوع حسگر	حساسیت تئوری	حساسیت اندازه‌گیری شده	مجذور مربع خطاها (°C)	مجموع خطاها (°C)
کرنش	$0.001755\text{nm}/\mu\epsilon$	$0.0019\text{nm}/\mu\epsilon$	0.013266	0.124
دما	$-0.32033\text{nm}/^\circ\text{C}$	$-0.3223\text{nm}/^\circ\text{C}$	0.022773	0.1465



شکل ۲: تغییرات طول موج براگ نسبت به کرنش اعمالی بر حسگر کرنش توری براگ با تزریق ناخالصی باریوم به فیبر سیلیکا.

حساسیت به دست آمده برای این حسگر نسبت به اعمال کرنش برابر $0.0019\text{nm}/\mu\epsilon$ است.

شکل ۳، تلفات حسگر طراحی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تلفات حسگر بسیار پایین است.



شکل ۳: تلفات حسگر طراحی شده نسبت به کرنش اعمالی.

۳-۲- طراحی نانوحسگر دمای توری براگ فیبری

برای طراحی نانوحسگر دما از فیبر بسپاری متیل متاکریلات (PMMA) استفاده می‌شود. در این نوع فیبرها با استفاده از روش هم‌بسپارش تکپار متیل متاکریلات می‌توان ضریب شکست فیبر نوری بسپاری تعدیل کرد. حساسیت نوری UV مواد هسته در فیبر بسپاری متیل متاکریلات مورد استفاده را با افزودن ناخالصی‌های فعال از جمله بنزوفنون و یا غلظت کوتکپارهای حساس به نور افزایش می‌دهیم. تغییرات طول موج براگ نسبت به دمای اعمالی با بازهی 25°C تا 125°C و با گام 10°C در شکل ۴ نشان داده شده است. حساسیت به دست آمده برای

- [2] V. G. M. Annamdas, Y. Yang, and H. Liu, International Society for Optics and Photonics. 6932, 69320-69328, (2008).
- [3] K. K. K. Annamdas and V. G. M. Annamdas, International Society for Optics and Photonics. 7677, 76770-76778, (2010)
- [4] S. Sumitro, M. Tominaga, and Y. Kato, "Monitoring based maintenance for long span bridges," in *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS*, 12, 14-17, (2002)
- [5] F. Felli, A. Paolozzi, C. Vendittozzi, C. Paris, and H. Asanuma, International Society for Optics and Photonics. 2016, 9803-9813, (2016).
- [6] G. Rajan, *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications*. CRC press, 2015.
- [7] Y.-J. J. M. s. Rao and technology, "In-fibre Bragg grating sensors," 8, 355-360, (1997).
- [8] Y. Huang, Z. Zhou, Y. Zhang, G. Chen, H. J. I. T. o. I. Xiao, and Measurement, "A temperature self-compensated LPFG sensor for large strain measurements at high temperature," 59, 2997-3004, (2010).
- [9] H. Yu, Y. Wang, J. Ma, Z. Zheng, Z. Luo, and Y. J. S. Zheng, "Fabry-Perot interferometric high-temperature sensing up to 1200° C based on a silica glass photonic crystal fiber," 18, 273-280, (2018).
- [10] Y. Zhang, D. Rong, L. Zhu, M. Dong, and F. J. C. O. L. Luo, "Regenerated fiber Bragg grating for fiber laser sensing at high temperatures," 16, 040606-040616, (2018).
- [11] R. Xing, C. Dong, Z. Wang, Y. Wu, Y. Yang, and S. Jian, "Simultaneous strain and temperature sensor based on polarization maintaining fiber and multimode fiber," *Optics & Laser Technology*, 102, 17-21, (2018).
- [12] C. Molardi et al., "Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors in a High-Scattering Optical Fiber Doped with MgO Nanoparticles for Polarization-Dependent Temperature Sensing," 9, 3107-3116, (2019).

همان‌طور که مشاهده می‌شود حسگرهای دما و کرنش طراحی شده، حساسیت‌های بالایی دارند و همچنین دارای خطای اندازه‌گیری کمی هستند. همچنین نسبت به حساسیت‌های تئوری اختلاف زیادی ندارند. علت منفی بودن حساسیت دمایی حسگر دمای طراحی شده با استفاده از فیبر بسپاری، منفی بودن ضریب انبساط حرارتی این نوع فیبر است. از توابع پیرایش برای کاهش شدت پیک‌های جانبی در کنار پیک اصلی استفاده شده است که در نتیجه باعث تشخیص دقیق طول‌موج براگ می‌گردد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تابع پیرایش گوسی نسبت به سایر توابع پیرایش شدت پیک‌های اطراف پیک اصلی را کاهش می‌دهد. همچنین، بررسی‌های انجام شده بر اتلاف نشان می‌دهد که افزایش پارامترهای تیزشدگی، طول توری، المان‌های توری و عمق مدولاسیون ضریب شکست باعث کاهش اتلاف می‌گردد اما تأثیر عمق مدولاسیون ضریب شکست نسبت به سایر پارامترها بیشتر بوده و با انتخاب مقدار مناسب برای آن، اتلاف تا حد قابل قبولی کاهش یافته است.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود که تغییرات طول‌موج براگ نسبت به کمیت‌های قابل اندازه‌گیری، رابطه خطی دارند. در نتیجه با استفاده از معادلات خط و همچنین تغییرات طول‌موج براگ حسگرها امکان اندازه‌گیری پارامتر مورد نظر در محیط‌های مختلف فراهم می‌شود. همچنین به دلیل قابلیت مالتی‌پلکس شدن حسگرهای توری براگ، امکان استفاده از تعداد زیادی حسگرها به صورت شبکه در صنایع مختلف از جمله صنایع عمرانی، نفت و گاز و غیره برای مکان‌هایی از جمله خطوط راه آهن، پل‌ها و خطوط لوله نفت و گاز فراهم می‌گردد. در این مقاله T با استفاده از تزریق ناخالصی باریوم در فیبرهای سیلیکا و همچنین استفاده از فیبر بسپاری متیل متاکریلات حساسیت به طرز چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است. طول‌موج‌های براگ نسبت به دما و کرنش برای نانوحسگرهای طراحی شده به ترتیب 0.0019nm و 0.3223nm- جابه‌جا می‌گردد که نشان‌دهنده رزولوشن بالای نانوحسگرهای طراحی شده نسبت به کمیت اندازه‌گیری شده است. همچنین با توجه به رابطه اتلاف با پارامترهای توری، مقادیر این پارامترها به نحوی انتخاب شده است که تلفات به حداقل مقدار برسد.

۶. منابع

- [1] R. Kashyap, *Fiber bragg gratings*. Academic press, 2009.