

سنسور اندازه‌گیری خمش مبتنی بر توری براگ فیبری بر اساس مدهای TE/TM

سامان جعفری^(۱) - آیدا اسماعیلیان مارنانی^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۲

خلاصه: با ظهور فیبرنوری و ارزان شدن قطعات مربوطه، گرایش به سمت استفاده از سنسورهای فیبر نوری به وجود آمد. خمیدگی یکی از پارامترهای مطلوب است که با اندازه‌گیری آن توسط سنسورهای فیبر نوری می‌توان حالت سیستم‌های مکانیکی را تعیین کرد. چون سنسورهای خمش مبتنی بر فیبر نوری و به خصوص توری براگ فیبری، فارغ از بسیاری از مشکلات سنسورهای مقاومتی می‌باشد، تحقیقات به سمت این نوع سنسورها رفته است. لیکن افزایش دقت چالش مهم تحقیقات پیش رو است. در این مقاله، هدف شبیه‌سازی یک نمونه از این سنسورها است به طوری که تا حد ممکن دقت اندازه‌گیری افزایش یابد. در این راستا با شبیه‌سازی و بررسی خمیدگی توری براگ فیبری، تغییرات مشخصه انعکاسی و انتقالی آن نسبت به خمش در مدهای TE و TM رصد می‌گردد. برای این منظور با به دست آوردن تعداد قله‌های تشدید و فاصله بین آن‌ها در مدهای TE و TM، می‌توان شعاع انحنای خمش در فیبر نوری را تعیین کرد. این روش نسبت به روش‌های قبلی که با اندازه‌گیری طول موج برگشتی، مقدار خمش را اندازه‌گیری کرده‌اند، دقت بهتری دارد. زیرا تغییرات تعداد قله‌های تشدید و فاصله بین آن‌ها به ازای تغییرات خمش ثابت، بیشتر از تغییرات طول موج برگشتی در توری براگ فیبری است.

کلمات کلیدی: سنسور توری براگ فیبری، سنسور خمش، شرط براگ، تزویج

Improved Fiber Bragg Grating Bending-Sensor Using TE/TM Modes

Saman Jafari⁽¹⁾ – Aida Esmaeilian Marnani⁽²⁾

(1) MSc – Department of Electrical & Computer Engineering, Islamic Azad University, Mobarakeh Branch, Isfahan, Iran

Saman_communication@yahoo.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical & Computer Engineering, Islamic Azad University, Mobarakeh Branch, Isfahan, Iran

ai_esmailian@yahoo.com

After the advent of optical fibers and cheap respective parts, using fiber optic sensors flourished. Bending is one of the significant parameters by measuring which, using optical fiber sensors, mechanical system mode can be set. Advantages of the fiber optic sensors, especially fiber Bragg grating sensors, that are free from many of resistive sensor problems, attracted researchers to focus on bending sensors based on optical fibers. However, uncertainty is still a major challenge for developing such sensors. In this article, one fiber optic bending sensor is simulated attempting to increase accuracy. First, bending in fiber Bragg grating is simulated, observing characteristic changes of reflection and transmission in TE and TM modes according to bending. Then, the number of resonance peaks and related distance, in TE and TM modes, is employed to determine the radius of curvature. This method in comparison to previous methods based on the return wavelength measurement, is more accurate, because the number of resonance peak and related distance changes versus bending changes is more than those of return wavelength changes.

Index Terms: Fiber Bragg grating sensore, Bending sensor, Bragg condition, Coupling.

نویسنده مسئول: آیدا اسماعیلیان مارنانی، استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران،
ai_esmailian@yahoo.com

۱- مقدمه

در این مقاله سنسور اندازه‌گیری خمش بر مبنای FBG پیشنهاد می‌گردد. تغییرات در شعاع انحنا فیبر نوری باعث تغییر در تعداد و فاصله قله‌های تشدید در دو مد TE و TM می‌شود. در نتیجه با بررسی و اندازه‌گیری TE و TM می‌توان میزان خمش در فیبر نوری را بدست آورد. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار مدسولوشن^۲ استفاده می‌شود. در نهایت دقت اندازه‌گیری به دست آمده با روش‌های مشابه قبلی مقایسه می‌شود.

۲- بررسی مدها و خمش در فیبر نوری

دو مد اصلی عرضی در یک موجبر شامل مد الکتریکی عرضی (TE) و مد مغناطیسی عرضی (TM) است. در مد TE میدان الکتریکی در راستای انتشار وجود ندارد و تنها میدان مغناطیسی در این راستا است. از این جهت به این مد، مد H هم گفته می‌شود. لیکن در مد TM میدان مغناطیسی در راستای انتشار وجود ندارد که به آن مد E نیز گفته می‌شود. در اثر خمش فیبر نوری این مدها دستخوش تغییرات می‌شوند.

در این بخش نحوه مدل‌سازی فیبرهای نوری در نرم افزار مدسولوشن به روش تفاضل محدود حوزه زمان بررسی شده است. برای این کار با مقایسه شبیه‌سازی‌های انجام شده با روابط تحلیلی موجود، از صحت نتایج بدست آمده از روش تفاضل محدود حوزه زمان اطمینان حاصل شده است. سپس با بررسی برخی ساختارهای فیبر نوری، شرایط مرزی ویژه‌ای به کار گرفته شده که برای یافتن مدهای انتشاری زمان شبیه‌سازی به شدت کاهش یافته و در عین حال دقت را تا سطح قابل قبولی حفظ کرده است. برای شروع کار از یک فیبر ساده استفاده می‌شود تا بتوان نتایج شبیه‌سازی را با روابط تحلیلی مقایسه کرد. ابتدا یک فیبر ساده SMF-28 برای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود تا مهارت لازم برای طراحی موجبرهای فیبر نوری کسب شود. در مرحله بعد دو فیبر که یکی دارای ضریب شکست پله‌ای و دیگری دارای ضریب شکست تدریجی است، شبیه‌سازی و بررسی می‌شود. به این دلیل که برای مدهای فیبر با ضریب شکست پله‌ای، روابط تحلیلی وجود دارد بنابراین ضریب شکست موثر شبیه‌سازی برای فیبر با ضریب شکست پله‌ای با کد متلب مقایسه شده و مشاهده می‌شود که تطابق مطلوبی حاصل می‌شود [۵]. سپس یک پروفایل با ضریب شکست تدریجی به نرم‌افزار معرفی می‌شود و نتایج حاصل از این دو فیبر با یکدیگر مقایسه می‌شود. در مرحله آخر فیبر توری براگ شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تکنیک‌های مختلف شبیه‌سازی به آن اعمال می‌شود تا بتوان زمان شبیه‌سازی و حافظه مورد نیاز را کاهش داد و مشخصات تلفات و پاشندگی برای مد اصلی این فیبر بررسی می‌شود.

در این راستا از دو ساختار مختلف برای شبیه‌سازی سنسور خمش مبتنی بر فیبر توری براگ استفاده شده و با توجه به روابط تحلیلی موجود [۶]، مدهای انتشاری در فیبر به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در طول موج مخابراتی $1.55\mu\text{m}$ واقع شوند. پس از بررسی این دو

سنسور دستگامی است که کمیت فیزیکی مورد نظر را اندازه‌گیری کرده و آن را به شکل قابل فهمی برای کاربر نشان می‌دهد. سنسورهای اندازه‌گیری دما، فشار، رطوبت و میزان ماده مورد نظر در محیط، تنها نمونه‌هایی از سنسورهای مورد استفاده در صنعت و دیگر زمینه‌های زندگی روزمره انسان‌ها می‌باشد. سنسورهای مختلفی با ساختار و اصول عملکرد متفاوت در حوزه سنسورهای نوری جای دارند. یکی از انواع سنسورها، سنسورهای نوری مبتنی بر فیبر نوری هستند که به علت ویژگی‌های خاص خود، بیش از انواع دیگر سنسورهای نوری مورد توجه بوده‌اند. مهم‌ترین این سنسورها، سنسورهای مبتنی بر توری براگ فیبری (FBG)^۱ است. از مزایای FBG نسبت به بقیه انواع سنسورها می‌توان به: عملکرد بر اساس سیگنال نوری و مقاومت در برابر تداخل‌های فرکانسی و امواج الکترومغناطیسی، وزن کم و ابعاد کوچک اشاره کرد که منجر به کاربردهای ویژه این سنسورها می‌شوند. همچنین این سنسورها دارای مقاومت فیزیکی در برابر شرایط نامناسب و نیز سازگاری با سیستم‌های انتقال اطلاعات نوری هستند. این محاسن باعث شده که محققان عرصه سنسور به تلاش در جهت تحقق سنسور مبتنی بر FBG با مزایای منحصر به فرد خود دست زنند [۱].

خمش یکی از پارامترهای مطلوب اندازه‌گیری در بسیاری از موارد می‌باشد. اندازه‌گیری خمش با استفاده از سنسور خمش، در تعیین حالت سیستم‌های مکانیکی نقش اساسی ایفا می‌کند. مشخص نمودن وضعیت اندام یک ورزشکار در حین ورزش، تعیین وضعیت قسمت‌های مختلف روبات‌ها و مشخص کردن وضعیت انگشتان دست برای ساخت دستکش‌های هوشمند به عنوان دریافت اطلاعات از نحوه حرکت انگشتان، دریافت اطلاعات از نحوه و میزان اتساع رگ آنورت در عمل جراحی اندووسکولار، نمونه‌هایی از کاربردها و اهمیت طراحی سنسورهای اندازه‌گیری خمش می‌باشد [۱].

در تحقیقات اولیه در سال ۱۹۹۸، پاتریک و همکاران توانستند با تشخیص شیفت طول موج ناشی از خمش میزان انحنا را اندازه‌گیری کنند که این روش دارای عیب تداخل الکترومغناطیسی و حساسیت نسبتاً بالا به تغییرات دما بود [۲]. در سال ۲۰۰۸ دیپترو و همکاران با اندازه‌گیری تضعیف نور ناشی از تفاوت در ویژگی‌های مکانیکی فیبر و زیر لایه آن که از فشار القا شده‌ی ناشی از باز و بسته شدن انگشتان در دستکش‌های هوشمند حاصل می‌شود، توانستند میزان خمش را محاسبه کنند که دارای عیب تلفات بالا بود [۳].

در سال ۲۰۱۴ رامیر و همکاران با پیاده‌سازی فیلترهای سیگنال به فرم بلادرنگ به روش الگوریتم کوچکترین مجذور، موفق به ساخت سنسورهای خمش شدند که دارای عیب خطای اندازه‌گیری نسبتاً بالا بود [۴].

امروزه چالش یافتن سنسور خمش با دقت بالاتر و مبتنی بر فیبر نوری، به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فردش، همچنان مورد توجه محققان است.

مربوطه برای محاسبه ضریب شکست موثر مدهای انتشاری استفاده می‌شود. برای بهبود سرعت شبیه‌سازی لازم است که از شرایط مرزی هادی ایده‌آل^۴ در مرزهای شبیه‌سازی استفاده کرد و به خاطر این که هدف بررسی مدهای انتشاری در فیبر است، در اینجا نیز ابعاد شبیه‌سازی دو بعدی انتخاب می‌شود.

پس از اجرای کد، ضریب شکست موثر محاسبه شده به صورت زیر خواهد بود:

$$1/430.935571617281$$

$$1/4210.51706513016$$

$$1/4080.37579398113$$

با اجرای کد اسکریپت لازم برای محاسبه خطای ضریب شکست موثر محاسبه شده در نرم‌افزار مدسولوشن و همچنین بررسی روابط تحلیلی، خطای محاسبه شده برای سه مد TM_{01} ، TM_{02} و TM_{03} برحسب تعداد گره‌ها حاصل می‌شود. در حقیقت با افزایش تعداد گره‌های شبیه‌سازی، میزان خطا کاهش می‌یابد و برای مد TM_{01} کمترین میزان خطا وجود دارد. بنابراین، این نتیجه حاصل می‌شود که اگر در این فیبر از شرط مرزی هادی ایده‌آل استفاده شود (به شرط این که تعداد گره‌های شبیه‌سازی به اندازه کافی بالا باشد) می‌توان به نتایج قابل قبولی رسید.

۲-۳- مدهای انتشاری در فیبر نوری با ضریب شکست تدریجی
در این قسمت یک فیبر نوری با ضریب شکست تدریجی در طول موج $1 \mu m$ میکرومتر بررسی می‌شود. ضمناً مقدار ضریب شکست به گونه‌ای است که در این طول موج، طراحی فیبر نوری مناسب‌تر است. در اینجا نیز برای کاهش زمان شبیه‌سازی، از شرایط مرزی هادی ایده‌آل^۳ ساختار دوبعدی شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

در این مرحله نیز صحت استفاده از شرایط مرزی هادی ایده‌آل بررسی می‌شود. برای این منظور خطای بین مدهای محاسبه شده از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی بررسی می‌شود. برای بررسی خطا، از مدها با قطبش TE استفاده می‌شود. برای یک فیبر نوری با ضریب شکست تدریجی، معادلات تحلیلی توصیف کننده مدهای قطبش TE عبارتند از [۷]:

$$N_{nm} = n_0 \sqrt{1 - \frac{\alpha}{hk_0}} \quad (1)$$

که m و n اندیس مد را مشخص می‌کنند و پارامترهای α و k_0 عبارتند از: $\alpha = 2 + 2(m+n)$ و $k_0 = 2\pi n_0 / \lambda$. با اجرای کد مربوطه، میزان خطای ناشی از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی (در محیط مدسولوشن) مربوط به فیبر نوری با ضریب شکست تدریجی برای دو مد اول آن یعنی TE_{01} و TE_{11} بررسی می‌شود که مشاهده می‌شود پروفایل میدان الکتریکی در این حالت نسبت به فیبر با ضریب شکست پله‌ای، از تحدیدشدگی بیشتری برخوردار است.

ساختار، دریافت می‌شود که ساختار تغییرات متناوب با ضریب شکست طولی، امکان شبیه‌سازی سنسور خمش را فراهم می‌آورد چرا که در این فیبر از مد هسته استفاده می‌شود. انجام این کار سبب شد که بر خلاف روش‌های قبلی، بازدهی بهتری کسب شود چرا که در ساختارهای قبلی معمولاً از تزویج دو فیبر نوری و مدهای پوششی به عنوان سنسور خمش استفاده می‌شده که سبب می‌شد به خاطر عدم تطبیق مدها در مرز بین دو فیبر، تلفات پراکندگی قابل ملاحظه‌ای ایجاد شود و همچنین به خاطر این که مدهای پوششی معمولاً دارای مدهای مرتبه بالاتری نسبت به مدهای هسته هستند آشکارسازی آن‌ها به سیستم‌های اندازه‌گیری پیچیده‌تری نیاز داشت. برای تعریف خمیدگی در نرم‌افزار، از تبدیل دستگاه مختصات استفاده شد تا بتوان میزان خمش در فیبر توری براگ را در نرم‌افزار تعریف کرد. مواد مورد استفاده برای طراحی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که اولاً طول موج فیبر توری براگ غیرخمیده در طول موج مخابراتی $1.55 \mu m$ واقع شود. ثانیاً بتوان از طول موج انعکاسی براگ برای سنجش خمش استفاده کرد.

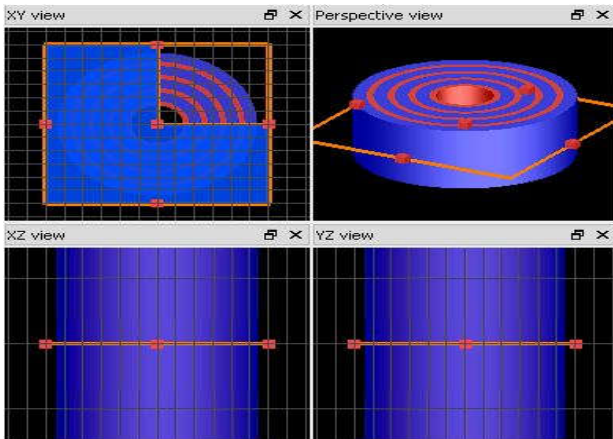
۲-۱- فیبر نوری SMF-28

در این بخش یک فیبر نوری ساده SMF-28 بررسی می‌شود. این فیبر متشکل از هسته‌ای به شعاع $4/1 \mu m$ و با ضریب شکست $1/44$ و پوسته‌ای به شعاع $50 \mu m$ و با ضریب شکست $1/43482$ می‌باشد. طول موج کاری برابر با طول موج مخابراتی $1/55 \mu m$ انتخاب می‌شود و فیبر در جهت Z امتداد می‌یابد و سطح مقطع آن در صفحه X و Y قرار می‌گیرد. به خاطر این که هدف این است که مدهای انتشاری ممکن در فیبر بررسی شود به صورت دوبعدی یعنی در صفحه X-Y این مطالعه انجام می‌شود. اگر از شرایط مرزی جاذب ایده‌آل^۳ در جهت‌های X و Y استفاده شود با توجه به شعاع هسته و پوسته و همچنین ضریب شکست آن‌ها، در طول موج $1/55 \mu m$ دو مد اصلی برای این فیبر وجود خواهد داشت.

در مرحله بعد فرکانسی که در آن، فیبر نوری شروع به مالتی‌مد شدن کند شناسایی می‌شود. برای این منظور لازم است که ابتدا شرایط مرزی متقارن حذف شود. در مرحله بعد، طول موج نور ورودی کاهش داده می‌شود تا به جایی که فیبر نوری مالتی‌مد شود. در طول موج $1 \mu m$ این اتفاق می‌افتد و این طول موج، آستانه مالتی‌مد شدن فیبر را نشان می‌دهد.

۲-۲- مطالعه مدهای انتشاری مختلف در فیبر نوری با ضریب شکست پله‌ای

در این قسمت یک فیبر نوری با ضریب شکست پله‌ای در طول موج برابر $1/55$ میکرومتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد برای اینکه بتوان مقایسه‌ای را بین روابط تحلیلی موجود برای فیبر نوری با ضریب شکست پله‌ای و نتایج شبیه‌سازی انجام داد از کد متلب



شکل (۲) ساختار شبیه‌سازی فیبر توری براگ با لایه‌های حلقوی در نرم‌افزار مدسولوشن

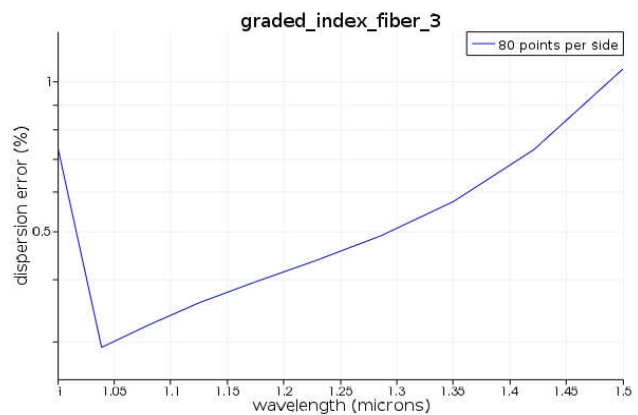
Fig. (2): Simulated FBG structure with External layers in Mode Solutions Software

در مرحله بعد تلفات مربوط به این ساختار محاسبه می‌شود. اما باید یک تغییر اساسی در ساختار انجام گیرد. همانطور که قبلاً اشاره شد استفاده از شرایط مرزی هادی ایده‌آل برای مطالعه مدهای انتشاری، در یک صفحه دو بعدی از ساختار موجب انجام می‌شود. اما برای مطالعه تلفات و کمیت‌هایی که در راستای انتشار موجب محاسبه شوند لازم است که شرایط مرزی جاذب ایده‌آل استفاده شود. اگر از شرایط مرزی جاذب ایده‌آل استفاده می‌شد به ناچار باید تعداد دوره تناوب فیبر توری براگ افزایش می‌یافت و از طرفی زمان بیشتری برای شبیه‌سازی ساختار صرف می‌شد. بنابراین برای مطالعه تلفات، همچنان شرایط مرزی متقارن را در X_{min} و Y_{min} حفظ کرده و شرایط مرزی جاذب ایده‌آل در X_{max} و Y_{max} انتخاب می‌شود. ضریب شکست موثر $0.1549412 + j0.2203224$ به دست می‌آید که تفاوت چندانی با نتایج قبل ندارد اما تلفات آن به میزان $20.4/55$ dB/mm می‌باشد که مقدار بسیار بالایی است.

در فیبرهای توری براگ به لحاظ تشدیدی بودن ساختار، انتظار می‌رود که مشخصات سیستم نسبت به طول موج حساس بوده و برخلاف فیبرهای تک‌مد و مالتی‌مد که قبلاً بررسی شدند، این مشخصات تغییرات شدیدتری را از خود نشان می‌دهند. به همین خاطر تنها تغییرات بسیار کمی به طول موج شبیه‌سازی اعمال می‌شود تا مشخصات پاشندگی فیبر توری براگ با لایه‌های حلقوی مورد بررسی قرار گیرد که مشاهده می‌شود میزان تلفات مربوط به مد اصلی با افزایش طول موج افزایش می‌یابد. علاوه بر اینکه مد اصلی دارای تلفات زیادی است میزان تغییرات تلفات در پهنای باند شبیه‌سازی هم بسیار بالاست.

یکی از مشخصه‌های مهم هر موجبر، مشخصه پاشندگی آن است چرا که این پارامتر حداکثر پهنای باند را محدود می‌کند و مقدار بالای آن می‌تواند طول موجبر را هم با محدودیت مواجه کند.

با بررسی میزان خطای ناشی از محاسبه مدها با قطبش TE فیبر نوری با ضریب شکست تدریجی نسبت به روابط تحلیلی بر حسب تعداد گره‌های شبیه‌سازی در طول موج $1 \mu\text{m}$ میکرومتر، مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین روابط تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی برای وقتی که تعداد گره‌ها برابر با ۸۰ باشد به دست آمده است و با افزایش تعداد گره‌ها، این میزان خطا کاهش می‌یابد. در شکل (۱) منحنی خطای پاشندگی مد TE_{01} در فیبر نوری با ضریب شکست تدریجی براساس مقایسه بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی در محیط نرم افزار مدسولوشن در طول موج‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود از طول موج ۱ تا $1.05 \mu\text{m}$ ، حداکثر خطای ۱ درصد حاصل شده است و حاکی از تطابق بسیار خوب نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی می‌باشد.



شکل (۱) محاسبه خطای پاشندگی مد TE_{01}
Fig. (1): Calculating the mode dispersion error TE_{01}

۴-۲- بررسی مدهای توری براگ

در این قسمت با استفاده از لایه‌های متناوب حلقوی، یک فیبر توری براگ طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به مطالبی که قبلاً گفته شد می‌توان از شرط مرزی هادی ایده‌آل برای بدست آوردن مدهای انتشاری استفاده کرد. به خاطر اینکه از شرایط مرزی هادی ایده‌آل استفاده شده می‌توان از دوره تناوب کمتری استفاده کرد. همچنین تعداد مش‌ها ۲۰۰ در ۲۰۰ انتخاب شده است. به همین منظور از چهار دوره تناوب برای پیاده‌سازی فیبر توری براگ بهره گرفته شده است. شکل (۲) ساختار شبیه‌سازی فیبر توری براگ با لایه‌های حلقوی در حالتی که از شرایط مرزی متقارن در X_{min} و Y_{min} بهره گرفته شده باشد و دو شرط مرزی دیگر بر اساس هادی ایده‌آل تنظیم شده باشد را نشان می‌دهد. در چنین شرایطی، ناحیه شبیه‌سازی به یک چهارم کاهش می‌یابد. این تقارن سبب می‌شود که بتوان به شبیه‌سازی سرعت بیشتری داد چرا که مطابق با این شکل تنها یک چهارم شبیه‌سازی کل ساختار مورد نیاز است. برای این منظور، شرایط مرزی مربوط به X_{min} و Y_{min} متقارن انتخاب می‌شود. با بررسی پروفایل میدان الکتریکی مد اصلی در این شرایط مشاهده می‌شود که نتایج یکسانی نسبت به قبل حاصل شده است.

زمان خالص این مساله را شبیه‌سازی کرد، زمان شبیه‌سازی و حافظه مورد نیاز به شدت بالا می‌رفت.

در این حالت مشاهده می‌شود طراحی اولیه فیبر توری براگ در طول موج مخابراتی $1/55 \mu\text{m}$ قرار ندارد. بنابراین برای انجام این کار لازم است به پارامترهایی که در طراحی فیبر توری براگ نقش دارند دقت کرد. این پارامترها عبارتند از: طول موج براگ، ضریب شکست موثر هسته و دوره تناوب توری. به نظر می‌رسد ساده‌ترین راه، تغییر ضریب شکست موثر هسته برای رسیدن به طول موج $1/55 \mu\text{m}$ میکرومتر است. به همین دلیل با تغییر ضریب شکست موثر فیبر به قسمی که اختلاف ضریب شکست همچنان $0/01$ باقی بماند این نتیجه حاصل می‌شود (فیبر توری براگ بهینه‌سازی شده) یعنی اگر ضریب شکست موثر بالایی هسته $1/5$ انتخاب شود به طول موج $1/55$ نزدیک‌تر می‌شود.

۳- تغییر طول موج در توری براگ فیبری خمیده

در این بخش خمیده شدن فیبر نوری بررسی می‌شود. واضح است که اگر فیبر نوری خمیده شود، پروفایل مدهای انتشاری در فیبر نوری تغییر می‌کند و به تبع آن، بین قسمت‌های خمیده و غیرخمیده عدم همپوشانی کامل به وجود می‌آید و این مسأله تلفات فیبر را به شدت بالا می‌برد. مساله دیگر نشت قسمتی از انرژی متمرکز در هسته به پوسته فیبر است که این عامل نه تنها باعث تلفات بیشتر فیبر نوری می‌شود، بلکه توزیع مدها در هسته را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این بخش ابتدا مبانی تئوری یک فیبر توری براگ خمیده بیان می‌شود و سپس به شبیه‌سازی پدیده عدم همپوشانی مدهای انتشاری در فیبر نوری در قسمت خمیده و غیر خمیده پرداخته می‌شود.

یک فیبر توری براگ خمیده شده مانند یک فیبر توری براگ غیرخمیده، دارای دوره تناوب توری است، اما این دوره تناوب با دوره تناوب یک فیبر توری غیرخمیده متفاوت است. در شکل (۳) تناوب دوره تناوب یک فیبر توری براگ خمیده و یک فیبر توری براگ غیرخمیده نشان داده شده است. شکل (۴) بردارهای موج تزویج‌کننده در فیبر توری براگ را نشان می‌دهد. طبق این شکل‌ها، یک زاویه کجی مشخصی بین صفحه توری و سطح مقطع فیبر وجود دارد که فرآیند تزویج مد در این ساختار را پیچیده‌تر می‌کند. به خاطر خمیده شدن یک فیبر توری براگ، علاوه بر تزویج بین مدهای انتشاری مستقیم و معکوس در هسته (که این تزویج در فیبر توری براگ غیرخمیده نیز وجود دارد) ممکن است تزویج بین مدهای هسته و پوشش نیز اتفاق بیفتد که این تزویج شامل تزویج بین مد انتشاری مستقیم در هسته و مد انتشاری معکوس در پوشش و همچنین تزویج بین مد انتشاری مستقیم در هسته با مد تشعشعی (زمانی که قطر فیبر بی‌نهایت فرض می‌شود) می‌باشد. این عوامل موجب می‌شوند که طیف انتقال یک فیبر توری براگ خمیده دارای قله‌های تشدید متعددی باشد.

تزویج بین این فیبر توری براگ با یک فیبر نوری براگ ساده $3 \mu\text{m}$ بررسی می‌شود. برای این کار فایل مربوط به فیبر توری براگ شبیه‌سازی می‌شود و نتایج آن ذخیره می‌شود و با استفاده از کد مربوطه تزویج بین این دو فیبر بررسی می‌شود که مشاهده می‌شود تزویج بین آن‌ها بسیار کم است چرا که پروفایل مد در این دو سیستم با یک دیگر کاملاً متفاوت است.

در نهایت یک آزمایش همگرایی انجام می‌شود. برای این منظور اطلاعات مربوط به مد اصلی فیبر توری براگ که در اینجا شبیه‌سازی شده ذخیره می‌شود. سپس با انجام یک جاروب پارامتری روی ابعاد گره‌ها، شبیه‌سازی انجام می‌شود و پس از هر شبیه‌سازی اطلاعات مربوط به مدها استخراج می‌شود و هر مدی که بیشترین همپوشانی را با مد اصلی‌ای که قبلاً بدست آمد داشته باشد، به عنوان مد اصلی در نظر گرفته می‌شود و سپس ضریب شکست و تلفات مربوط به مد اصلی پس از اتمام هر شبیه‌سازی ثبت می‌شود. ضریب شکست موثر زمانی که ابعاد شبیه‌سازی به مقدار 500 در 500 گره می‌رسد همگرا می‌شود و به مقدار $0,18$ می‌رسد اما در این حالت به تعداد گره‌های بیشتری برای رسیدن به دقت موردنظر نیاز است. این در حالی است که تلفات مد اصلی چندان وابسته به تعداد گره‌های شبیه‌سازی نیست.

در این مرحله یک پورت در ابتدا و یک پورت در انتهای ساختار فیبر توری براگ (تکنیک سلول واحد در ساختارهای متناوب) استفاده می‌شود تا بتوان طیف انتقال و انعکاس را برای این ساختار محاسبه کرد. در این شبیه‌سازی از دو گروه برای پوشش دو ناحیه تشکیل دهنده فیبر توری براگ یعنی ناحیه با ضریب شکست بزرگ و ناحیه با ضریب شکست کوچک استفاده می‌شود.

از آن جایی که شبیه‌سازی هسته که در اینجا انجام می‌شود براساس حوزه فرکانس کار می‌کند، باید یک جاروب پارامتری روی فرکانس قرار گیرد تا بتوان طیف انتقال و انعکاس را بدست آورد. به ازای هر شبیه‌سازی پارامتر S استخراج می‌شود تا از روی آن، پارامترهای انتقال و انعکاس استخراج شود. پس از اینکه جاروب پارامتری تمام شد می‌توان پارامترهای S را رسم کرد. ابتدا باید توجه داشت که چون از دو پورت استفاده شده و هر پورت دارای یک مد است بنابراین طیف‌های S_{11} و S_{21} به ترتیب طیف‌های انعکاس و انتقال را نشان می‌دهند.

تکنیکی که در آن از سلول واحد و حل‌کننده بسط مد ویژه^۵ برای شبیه‌سازی ساختارهای فیبر توری براگ استفاده می‌شود، بسیار کارآمدتر از زمانی است که از روش تفاضل محدود حوزه زمان خالص استفاده می‌شود، چرا که در روش حل‌کننده بسط مد ویژه می‌توان هر تعداد به دوره تناوب فیبر توری براگ اضافه کرد به طوری که تغییری در زمان شبیه‌سازی حاصل نشود. در این جا از تعداد $20,000$ دوره تناوب برای فیبر توری براگ استفاده شده که معادل با این است که طول ساختار 1cm باشد و اگر قرار بود با روش تفاضل محدود حوزه

با جایگذاری معادله (۳) در معادله (۲)، شرط تشدید براگ برای یک FBG خمیده به صورت زیر بیان می‌شود [۹]:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff,core}} \frac{\Lambda}{\cos \zeta} \quad (4)$$

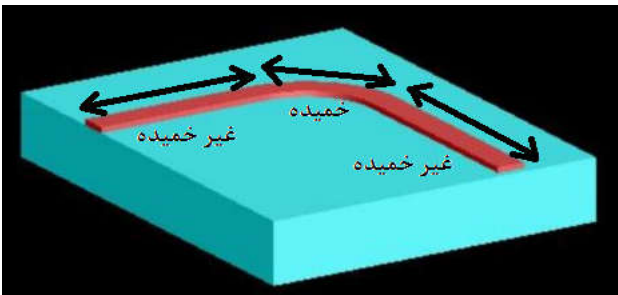
به خاطر وجود زاویه کجی، بخشی از مد انتشاری مستقیم در هسته به مد انتشاری معکوس در پوشش، تزویج می‌شود و طول موج تشدید مد پوشش به صورت زیر حاصل می‌شود [۹]:

$$\lambda_{\text{cl},i} = \left(n_{\text{eff,core}} + n_{\text{eff,cladding}}^i \right) \frac{\Lambda_g}{\cos \zeta} \quad (5)$$

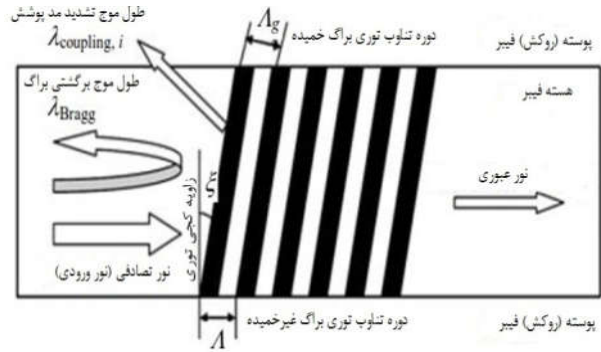
که $n_{\text{eff,cladding}}^i$ ضریب شکست موثر مد i ام پوشش است. تشابه بین شرایط تشدید فیبرهای توری براگ خمیده و غیرخمیده، تعیین می‌کند که مد هسته فیبرهای توری براگ خمیده خصوصیات تشخیص مشابه با همتای غیرخمیده خود برای اندازه‌گیری فشار، خمش، دما و غیره را دارد. نکته بسیار مهم در مورد فیبرهای توری براگ خمیده این است که به خاطر وجود همزمان مدهای هسته و پوشش در این فیبرها، علاوه بر طول موج براگ، قله‌های تشدید بسیاری در مشخصه انتقال فیبرهای توری براگ خمیده مشاهده می‌شود که برخی از آن‌ها به قله‌های تشدید پوشش فیبر مربوط می‌شوند که در طول موج‌های کوتاه‌تر ظاهر می‌شوند [۹].

۴- محاسبه تلفات در فیبر خمیده

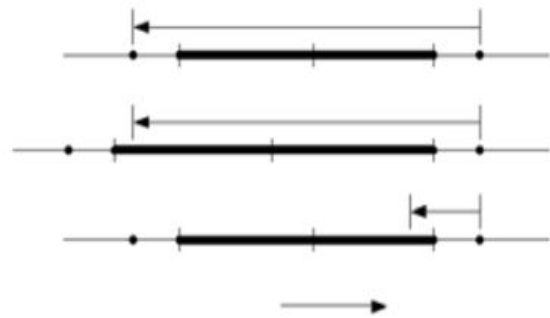
در مرحله بعد هدف بررسی تلفات یک موجبر در محلی که فیبر خمیده می‌شود، می‌باشد. در شکل (۵) ساختار هندسی موجبر در نرم‌افزار مدسولوشن نشان داده شده است. این موجبر مشابه فیبر نوری از یک هسته و یک بستر تشکیل شده است و موج ورودی که در قسمت موجبر قرار گرفته، روی بستر متمرکز می‌شود و علت آن اختلاف ضریب شکست هسته و بستر است یعنی همان اتفاقی که در فیبر نوری رخ می‌دهد. این موجبر از دو قسمت غیرخمیده (که توسط قسمت خمیده به هم متصل می‌شوند) و خمیده تشکیل شده است. در اینجا تلفات ناشی از خم‌شدگی موجبر محاسبه می‌شود. این موجبر اصطلاحاً سیلیکون روی عایق نام دارد و از جمله موجبرهای متداول در حوزه اپتیکی است.



شکل (۵): ساختار هندسی موجبر خمیده در محیط نرم افزار مدسولوشن
Fig. (5): Geometrical structure of a bent Waveguide in Mode Solutions Software



شکل (۳): ساختار هندسی یک فیبر توری براگ خمیده [۸]
Fig. (3): Geometrical structure of a bent FBG [9]



شکل (۴): تشریح بردارهای موج برای فرآیند تزویج بین مدها در یک فیبر توری براگ خمیده [۸]

Fig. (4): The wave vectors description for The process of coupling between modes in the bent FBG [9]

برای بیان کمی مشخصه انتقال یک فیبر توری براگ خمیده، ضروری است که معادله‌ای را برای طول موج تشدید مد پوشش، بدست آورد. طول موج تشدید به پارامترهای توری در فیبر توری براگ خمیده بستگی دارد و می‌تواند با حل معادلات تزویج شده بدست آید. با این حال، مرسوم‌تر این است این مسأله مشابه شرایط تشدید بین فیبرهای توری براگ خمیده و غیرخمیده در نظر گرفته شود. برای فیبرهای توری براگ غیرخمیده، رابطه طول موج تشدید را که باید شرط براگ را اکتفا کند به صورت زیر بازنویسی می‌شود [۹]:

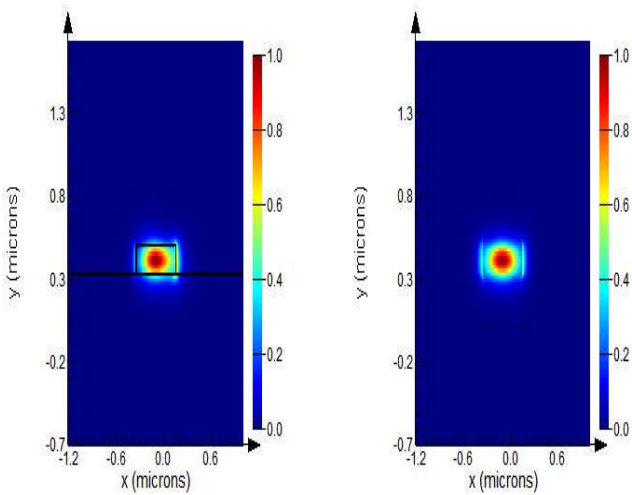
$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff,core}} \Lambda_g \quad (2)$$

که در آن λ_{Bragg} طول موج بازتابی است که طول موج براگ نامیده می‌شود. $n_{\text{eff,core}}$ ضریب شکست موثر هسته فیبر Λ و دوره تناوب توری در امتداد محور فیبر است. شرط تشدید براگ که در رابطه (۱) به آن اشاره شد از تزویج مد بین مد انتشاری مستقیم و مد انتشاری معکوس در هسته حاصل می‌شود. در یک FBG خمیده، به خاطر مورب بودن زاویه صفحه توری نسبت به محور فیبر، دوره تناوب توری در امتداد محور فیبر به صورت زیر اصلاح می‌شود [۹]:

$$\Lambda_g = \frac{\Lambda}{\cos \zeta} \quad (3)$$

که در آن Λ_g دوره تناوب توری در FBG خمیده است و ζ زاویه خمشی FBG است.

مختصات دکارتی به دستگاه استوانه ای، انحنایی به شعاع $1/5 \mu\text{m}$ میکرومتر به موجبر اضافه می شود تا یک موجبر خمیده حاصل شود. در شکل ۷ (سمت چپ) پروفایل میدان الکتریکی موجبر خمیده نشان داده شده است و ضریب شکست موثر آن: $2/269562 + 2/312675e-5i$ بوده و تلفات به میزان $8/4143 \text{ dB/cm}$ است. از این دو شبیه سازی دو نتیجه مهم حاصل می شود. اول این که تلفات تشعشی در موجبر خمیده به مراتب بالاتر از موجبر غیرخمیده است. دوم، پروفایل میدان الکتریکی موجبر خمیده به میزان کمی تقارن خود را از دست داده و به سمت راست منحرف شده است.



شکل (۷): پروفایل میدان الکتریکی مد اصلی در ساختار خمیده (سمت چپ) و غیرخمیده (سمت راست) برای ساختار موجبر سیلیکون روی بستر عایق به منظور محاسبه میزان همپوشانی بین این دو مد

Fig. (7): The electric field profile of the basic mode in the structure of bent (Left side) & non bent (right side) silicon waveguide structure on the insulating substrate in order to calculate of overlap between the two modes

بنابراین تلفات کل موجبر که با اضافه کردن تلفات ناشی از عدم همپوشانی کامل بین موجبر خمیده و غیر خمیده در دو مرز در شکل (۷) نشان داده شده و همچنین تلفات انتشاری در موجبر خمیده به شرح زیر است که بخش عمده تلفات مربوط به عدم تطابق کامل مدها در موجبرهای خمیده و غیرخمیده است [۸]:

$$\text{Loss} = 2_{\text{interface}} \times 10 \log(0.988723) [\text{dB}] + \left(1.5[\mu\text{m}] \times \frac{\pi}{2}\right) (0.009 [\text{dB} / \mu\text{m}]) = 0.126 \text{ dB} \quad (6)$$

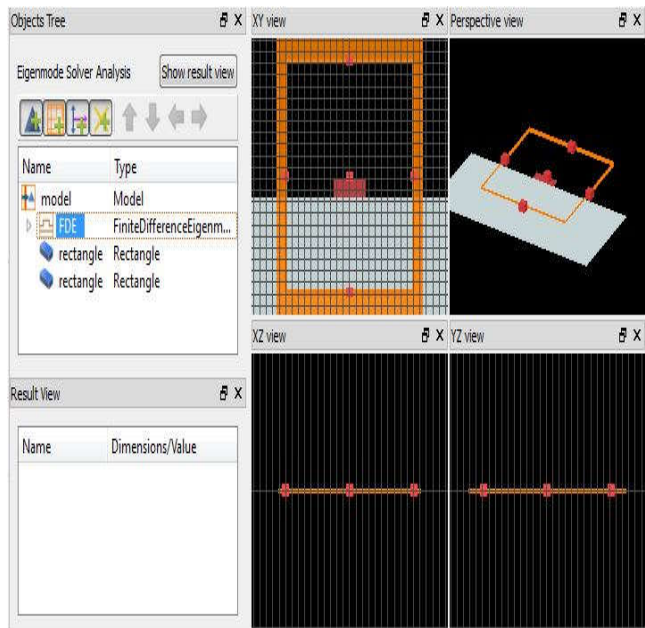
۵- پیکربندی لازم برای فیبرتوری براگ به منظور بررسی تغییرات خمش در آن

در این قسمت شبیه سازی های لازم برای بررسی طیف انتقال و انعکاس در اثر خمیده شدن فیبرتوری براگ که در بخش های قبل برای طول موج مخابراتی 1550 nm نانومتر بهینه سازی شد، انجام می شود. همچنین منبع تابشی برای دو حالت قطبش TE و TM در نظر گرفته

برای این منظور در چند مرحله شبیه سازی انجام می شود. مرحله اول انتشار موج در قسمت غیرخمیده است و سپس پروفایل مد حاصل از آن ذخیره می شود. مرحله دوم به این صورت است که انتشار موج در موجبر خمیده بررسی می شود و در نهایت همپوشانی بین این دو مد را محاسبه کرده و به عنوان بخشی از این تلفات گزارش می شود.

در یک موجبر سیلیکون روی عایق، تلفات ناشی از موجبر مستقیم ناچیز است و تنها دو نوع تلفات در موجبر نشان داده شده است (شکل ۵) که از اهمیت برخوردار هستند: (۱) تلفات تشعشی در موجبر خمیده و غیر خمیده. تلفات مورد شماره ۲) در دو قسمت موجبر نشان داده شده در شکل ۵ رخ می دهد. یکی هنگام ورود موج از قسمت غیرخمیده به قسمت خمیده و سپس عبور از قسمت خمیده و ورود آن به قسمت غیرخمیده است.

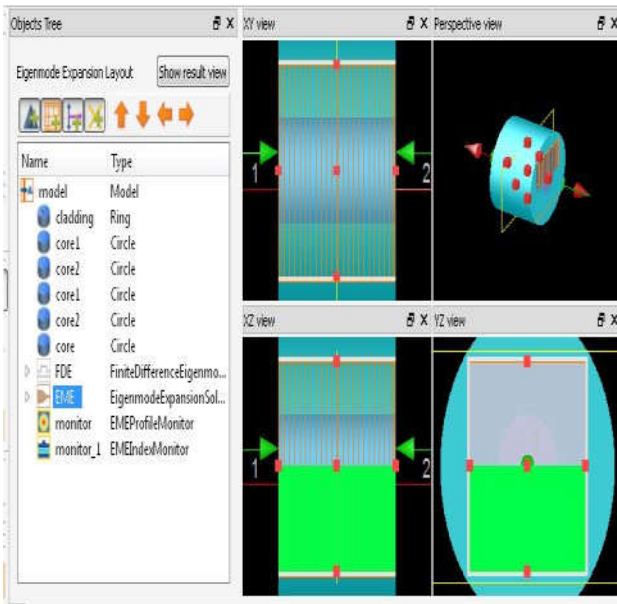
شکل (۶) پیکربندی شبیه سازی برای ساختار موجبر سیلیکون روی بستر عایق را نشان می دهد. برای ایجاد خمیدگی در موجبر، با استفاده از تبدیل دستگاه مختصات دکارتی به دستگاه استوانه ای، انحنایی به شعاع دلخواه به موجبر اضافه می شود.



شکل (۶): پیکربندی شبیه سازی برای ساختار موجبر سیلیکون روی بستر عایق در محیط نرم افزار مدسولوشن

Fig. (6): Configuration simulation for silicon waveguide structure on the insulating substrate in the Mode Solutions Software

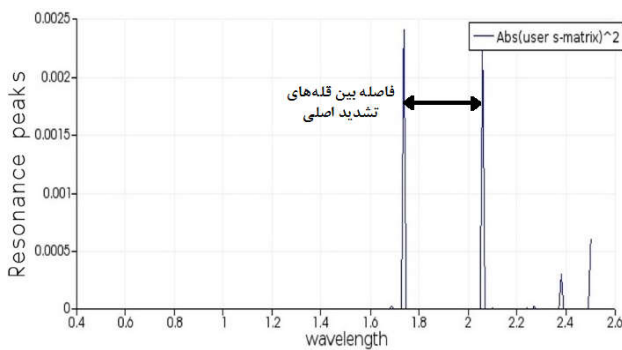
شکل (۷) (سمت راست) پروفایل میدان الکتریکی مد اصلی موجبر غیرخمیده حاصل از شبیه سازی در نرم افزار مدسولوشن را نشان می دهد. این مد انتشاری دارای قطبش TE بوده و ضریب شکست موثر آن $2/266036 + 4/721035e-8i$ می باشد و تلفات آن برابر با مقدار 0.17177 dB/cm شد. در مرحله بعد با استفاده از تبدیل دستگاه



شکل (۹) پیکربندی شبیه‌سازی فیبر توری براگ خمیده در نرم‌افزار مدسولوشن برای بررسی طیف انتقال و انعکاس با شعاع انحنا مختلف

Fig. (9): The simulation configuration of bent FBG in Mode Solutions Software in order to analyze of the transmission and reflection Spectrum for Different radius of curvature

با شبیه‌سازی و پیاده‌سازی این ساختار در نرم‌افزار مدسولوشن، طیف‌های انتقال و انعکاس مربوطه حاصل می‌شود که البته در شکل‌های ۱۰ الی ۱۳، طیف انتقال و انعکاس را برای قطبش TM و TE به ازای شعاع انحنا ۲۰۰ میکرومتر نشان داده شده است. طول موج از $0.5 \mu\text{m}$ تا $2.5 \mu\text{m}$ جاروب می‌شود تا بتوان جایجایی طیف انتقال و انعکاس را برای شعاع‌های مختلف بهتر مشاهده کرد.



شکل (۱۰) منحنی طیف انعکاس فیبر توری براگ خمیده با شعاع انحنا ۲۰۰ میکرومتر با قطبش TM پورت ورودی و خروجی

Fig. (10): The reflection spectrum curve of the curved fiber Bragg grating with the curvature radius of 200 micrometers with the TM polarization of the input and output ports

می‌شود و شعاع انحنا فیبر توری براگ تغییر داده می‌شود و طیف انتقال و انعکاس آن ثبت می‌شود. با توجه به این که کاربردهای عملی خمش، مقادیر بزرگی را برای شعاع خمش می‌طلبد، انتظار تلفات بالا در خمش‌های بزرگ قابل پیش‌بینی است و همچنین انتظار می‌رود به خاطر خمیده شدن فیبر توری براگ، قله‌های بسیاری در طیف انتقالی آن مشاهده شود.

شکل (۸) پیکربندی آزمایشگاهی برای یک FBG خمیده شده را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی مقاله از این ساختار استفاده شده است.

در این ساختار نور حاصل از منبع تغذیه وارد اسیلاتور شده برای دریافت نوسان لازم، سپس باریکه نور حاصله وارد اپتیکال کوپلر شده و توسط آن به درون یک فیبر مالتی‌مد تزویج می‌گردد. سپس با توجه به انحنای مختلف فیبر توری براگ متناسب با قطبش پورت ورودی و خروجی، خمش توسط سنسور اندازه‌گیری خمش ارزیابی و آشکارسازی می‌شود.

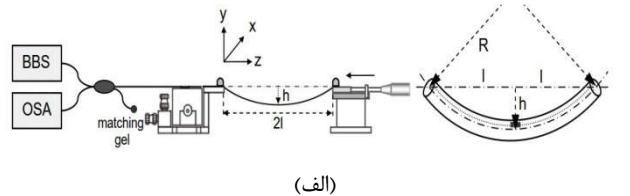
مشخصه خمیدگی فیبر توری براگ در صفحه Y-Z است. شعاع خمش فیبر (R)، از معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$R = \frac{h^2 + l^2}{2h} \quad (7)$$

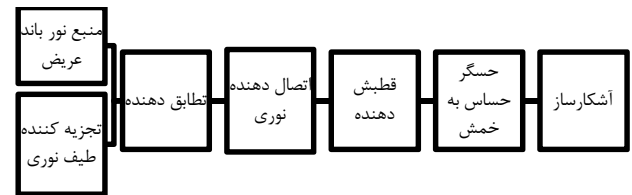
شعاع انحنای فیبر (C) به صورت زیر بدست می‌آید. [۱۱]:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2h}{h^2 + l^2} \quad (8)$$

که h فاصله در صفحه Y-Z نسبت به موقعیت غیرخمیده است و l نصف طول بخش خمش فیبر است.



(الف)



(ب)

شکل (۸): الف) ساختار شبیه‌سازی ب) بلوک دیاگرام ساختار مورد نیاز برای بررسی مشخصات طیف انتقال و انعکاس یک FBG خمیده که خمیدگی فیبر در صفحه Y-Z واقع شده است

Fig. (8): a) Simulation structure, b) Block diagram of the required structure for analyzing the specifications of transmission and reflection spectra of a curved FBG that the fiber curvature is located in the y-z plane

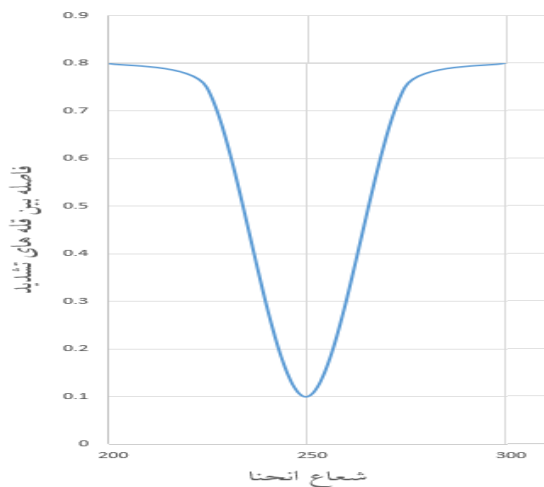
۲ و فاصله قلهها $0.5 \mu\text{m}$ به دست می‌آید ولی در طیف انتقال نشان داده شده در شکل (۱۳) تعداد قلهها ۳۶ و فاصله $0.4 \mu\text{m}$ است.

۵-۱- مقایسه طیف انعکاس و انتقال در مد TM

با ایجاد خمیدگی در یک فیبر توری براگ، علاوه بر تزویج بین مدهای انتشاری مستقیم و معکوس در هسته، ممکن است موجب تزویج بین مدهای هسته و پوشش نیز بشود که این تزویج شامل تزویج بین مد انتشاری مستقیم در هسته و مد انتشاری معکوس در پوشش و همچنین تزویج بین مد انتشاری مستقیم در هسته با مد تشعشعی، زمانی که قطر فیبر بی‌نهایت فرض می‌شود، می‌باشد. این عوامل موجب می‌شوند که طیف انتقال یک فیبر توری براگ خمیده دارای قله‌های تشدید متعددی باشد. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی، شعاع انحنا بین $200 \mu\text{m}$ تا $300 \mu\text{m}$ انتخاب می‌شود، زیرا در بازه غیر از این،

تغییرات در قله‌های تشدید نامحسوس و تقریباً ثابت است.

در طیف انعکاس با افزایش شعاع انحنا (بین ۲۰۰ تا ۳۰۰)، قله‌های تشدید به هم نزدیک می‌شوند به طوری که به ازای شعاع انحنای ۲۵۰ حول طول موج $1.7 \mu\text{m}$ ، این قله‌ها تقریباً بر هم منطبق می‌شوند اما با افزایش شعاع انحنا، این قله‌ها مجدداً از هم دور می‌شوند و در عین حال، این قله‌ها به سمت طول موج‌های کمتر میل می‌کنند.

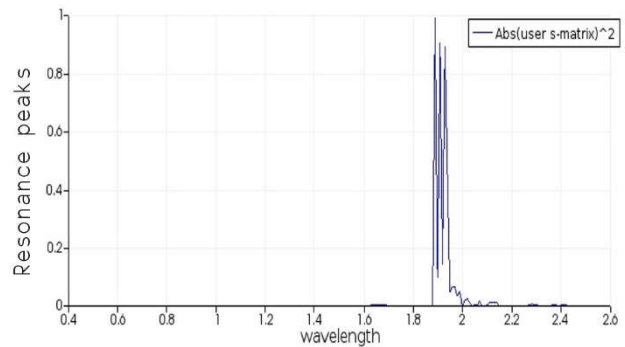


شکل (۱۴): منحنی تغییرات فاصله بین قله‌های تشدید به ازای تغییرات شعاع

انحنا در طیف انعکاس فیبر توری براگ خمیده در مد TM

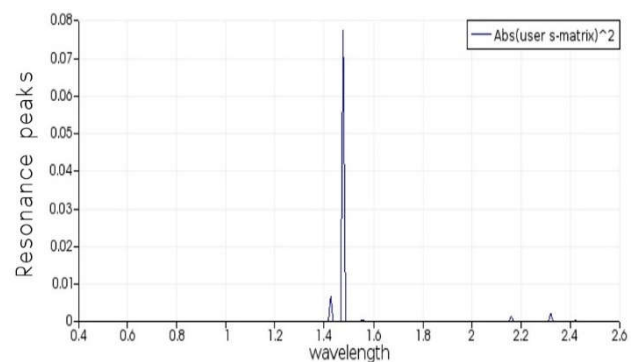
Fig. (14): The curve of distance changes between the resonance peaks per the curvature radius changes in the reflection spectrum curve of the curved fiber Bragg grating in the TM mode

در طیف انتقال با افزایش شعاع انحنا (بین ۲۰۰ تا ۳۰۰)، تعداد قله‌های تشدید افزایش می‌یابد و در شعاع ۲۵۰ به حداکثر می‌رسند و با افزایش شعاع انحنا مشاهده می‌شود تعداد قله‌های تشدید کاهش می‌یابد تا اینکه به ازای شعاع ۲۷۵ به بعد، تعداد قله‌ها تقریباً ثابت می‌ماند. در اینجا نیز این قله‌ها به سمت طول موج‌های کمتر میل می‌کنند.



شکل (۱۱) منحنی طیف انتقال فیبر توری براگ خمیده با شعاع انحنا ۲۰۰ میکرومتر با قطبش TM پورت ورودی و خروجی

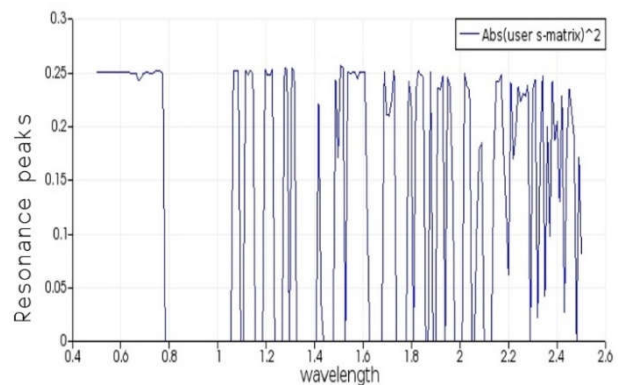
Fig. (11): The transmission spectrum curve of the curved fiber Bragg grating with the curvature radius of 200 micrometers with the TM polarization of the input and output ports



شکل (۱۲): منحنی طیف انعکاس فیبر توری براگ خمیده با شعاع انحنا ۲۰۰

میکرومتر با قطبش TE پورت ورودی و خروجی

Fig. (12): The reflection spectrum curve of the curved fiber Bragg grating with the curvature radius of 200 micrometers with the TE polarization of the input and output ports



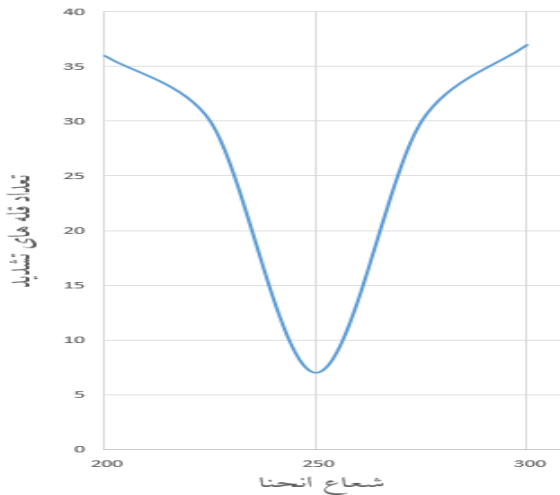
شکل (۱۳): منحنی طیف انتقال فیبر توری براگ خمیده با شعاع انحنا ۲۰۰

میکرومتر با قطبش TE پورت ورودی و خروجی

Fig. (13): The transmission spectrum curve of the curved fiber Bragg grating with the curvature radius of 200 micrometers with the TE polarization of the input and output ports

در شکل (۱۰) تعداد قله‌های اصلی در طیف انعکاس TM برابر $2 \mu\text{m}$ و فاصله قلهها $0.8 \mu\text{m}$ حاصل شده است ولی در طیف انتقال نشان داده شده در شکل (۱۱) تعداد قلهها ۳ و فاصله $0.3 \mu\text{m}$ است. همچنین در شکل (۱۲) تعداد قله‌های اصلی در طیف انعکاس TE برابر

با مقایسه و بررسی منحنی‌ها در طیف انتقال، مشاهده می‌شود با افزایش شعاع انحنا، تعداد قله‌های تشدید طبق یک الگوی هرمی کم و زیاد می‌شود.



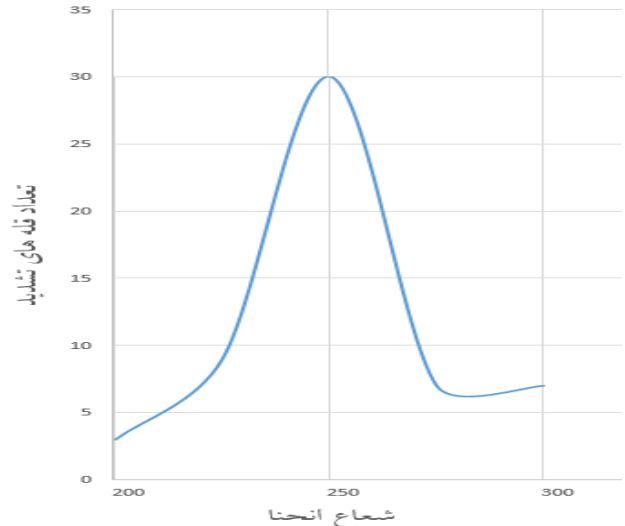
شکل (۱۷): منحنی تغییرات تعداد قله‌های تشدید به ازای تغییرات شعاع انحنا در طیف انتقال فیبر توری براگ خمیده در مد TE

Fig. (17): The curve of changes in the number of resonance peaks per the curvature radius changes in the transmission spectrum curve of the curved fiber Bragg grating in the TE mode

Table (1): Comparison of the transmission and reflection spectrums

جدول (۱) مقایسه طیف انعکاس و انتقال

مد	طیف	شعاع انحنا μm	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰
			انعکاس	فاصله بین قله‌های تشدید μm	۰,۸	۰,۷۱	۰,۱
مد	طیف	شعاع انحنا μm	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰
			انتقال	تعداد قله‌های تشدید	۳	۷	۳۰
مد	طیف	شعاع انحنا μm	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰
			انعکاس	تعداد قله‌های تشدید	۲	۵	۲
مد	طیف	شعاع انحنا μm	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰
			انتقال	تعداد قله‌های تشدید	۳۶	۳۲	۷

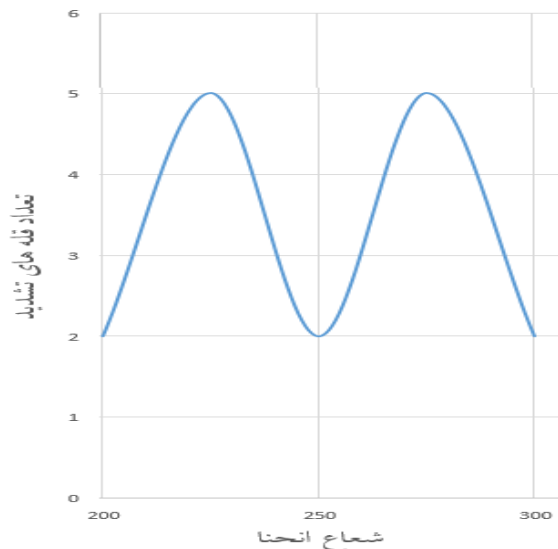


شکل (۱۵): منحنی تغییرات تعداد قله‌های تشدید به ازای تغییرات شعاع انحنا در طیف انتقال فیبر توری براگ خمیده در مد TM

Fig. (15): The curve of changes in the number of resonance peaks per the curvature radius changes in the transmission spectrum curve of the curved fiber Bragg grating in the TM mode

۲-۵- مقایسه طیف انعکاس و انتقال در مد TE

با مقایسه و بررسی منحنی‌ها در طیف انعکاس، مشاهده می‌شود با افزایش شعاع انحنا (بین ۲۰۰ تا ۳۰۰)، تعداد قله‌های تشدید طبق یک الگوی دندانه‌اره‌ای زیاد و کم می‌شود.



شکل (۱۶): منحنی تغییرات تعداد قله‌های تشدید به ازای تغییرات شعاع انحنا در طیف انعکاس فیبر توری براگ خمیده در مد TE

Fig. (16): The curve of changes in the number of resonance peaks per the curvature radius changes in the reflection spectrum curve of the curved fiber Bragg grating in the TE mode

قله‌ها نیز اندکی افزایش می‌یابد به طوری که تعداد قله‌ها در شعاع انحنای $300 \mu\text{m}$ مقدار ۸ است.

در مد TE تعداد قله‌های تشدید در طیف انتقالی به ازای شعاع انحنای $200 \mu\text{m}$ ، ۳۶ است که با افزایش شعاع انحنای، برای وقتی که شعاع به $225 \mu\text{m}$ می‌رسد، این مقدار به تعداد ۳۲ عدد می‌رسد و با افزایش شعاع انحنای به ازای شعاع انحنای $250 \mu\text{m}$ به حداقل تعداد یعنی مقدار ۷ می‌رسد. با افزایش شعاع انحنای در بازه $250 \mu\text{m}$ تا $275 \mu\text{m}$ ، تعداد قله‌ها به مقدار ۳۳ می‌رسد و سپس با افزایش شعاع انحنای، تعداد قله‌ها نیز افزایش می‌یابد به طوری که تعداد قله‌ها در شعاع انحنای $300 \mu\text{m}$ مقدار ۳۸ است.

در نتیجه با به دست آوردن تعداد قله‌های تشدید و فاصله بین آن‌ها در مدهای TE و TM می‌توان شعاع انحنای خمش در فیبرنوری را تعیین کرد. این روش نسبت به روش‌های قبلی که با اندازه‌گیری طول موج برگشتی مقدار خمش را اندازه‌گیری می‌کرد، مزیت دارد. از آنجایی که تغییرات در تعداد قله‌های تشدید و فاصله بین آنها در مد TE و TM به ازای تغییرات خمش ثابت بیشتر از تغییرات طول موج برگشتی در LPFG یا FBG است، این روش دارای دقت محاسباتی بیشتری است. یکی از مزایای مهم روش‌های اندازه‌گیری با استفاده از فیبرنوری نسبت به دیگر روش‌ها، بهره‌گیری از سیستم تمام نوری است که باعث افزایش سرعت اندازه‌گیری و کاهش اختلال بر روی مدار می‌شود. در ضمن برای مکان‌هایی که دسترسی به فیبر نیست با توجه به اطلاعات به دست آمده در خروجی، می‌توان میزان خمش را اندازه‌گیری کرد. مثلاً در عمل جراحی اندوسکوپار یا تشخیص اتساع رگ آئورت، که امکان پردازش تصویر وجود ندارد، با توجه به داده دریافتی می‌توان TE و TM را تعیین و خمش را سنجش کرد.

پی‌نوشت:

1. Fiber Bragg Grating
2. Mode Solutions
3. Perfect matched layer (PML)
4. Perfect electrical conductor (PEC)
5. Eigenmode expansion solver

همچنین لازم به ذکر است که با مشاهده و مقایسه منحنی‌ها، این نتیجه حاصل می‌شود که طیف انعکاس تصویر بهتری را نسبت به طیف انتقال فیبرتوری براگ خمیده نتیجه می‌دهد. زیرا همانطور که قبلاً بیان شد، طیف انتقال فیبرهای توری براگ خمیده، مملو از قله‌های تشدید ناشی از سازوکارهای مختلف تزویج است. همچنین طیف انتقال در قطبش TE دارای قله‌های بیشتری نسبت به قطبش TM است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از توری براگ فیبری، میزان تغییرات خمش در طول موج انعکاسی و انتقالی به ازای مدهای TE و TM رصد گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد:

در مد TM فاصله بین قله‌های تشدید در طیف انعکاسی به ازای شعاع انحنای $200 \mu\text{m}$ ، $0.08 \mu\text{m}$ است که با افزایش شعاع انحنای، برای وقتی که شعاع به $225 \mu\text{m}$ می‌رسد، این مقدار به $0.71 \mu\text{m}$ کاهش می‌یابد و در نهایت به ازای شعاع انحنای $250 \mu\text{m}$ فاصله بین قله‌های تشدید به کمترین مقدار یعنی $0.1 \mu\text{m}$ میکرومتر می‌رسد. مجدداً با افزایش شعاع انحنای، به صورت متقارن، فاصله بین قله‌های تشدید افزایش می‌یابد. در مد TE تعداد قله‌های تشدید در طیف انعکاسی به ازای شعاع انحنای $200 \mu\text{m}$ ، ۲ تا است که با افزایش شعاع انحنای، برای وقتی که شعاع به $225 \mu\text{m}$ می‌رسد، این مقدار به حداکثر تعداد یعنی ۵ عدد افزایش می‌یابد و با افزایش شعاع انحنای به ازای شعاع انحنای $250 \mu\text{m}$ به همان تعداد ۲ می‌رسد. مجدداً با افزایش شعاع انحنای در بازه $250 \mu\text{m}$ تا $300 \mu\text{m}$ ، تعداد قله‌ها مانند بازه بین $200 \mu\text{m}$ تا $250 \mu\text{m}$ و به همان صورت تغییر می‌کند.

در مد TM تعداد قله‌های تشدید در طیف انتقالی به ازای شعاع انحنای $200 \mu\text{m}$ ، ۳ است که با افزایش شعاع انحنای، برای وقتی که شعاع به $225 \mu\text{m}$ می‌رسد، این مقدار به تعداد ۷ عدد می‌رسد و با افزایش شعاع انحنای به ازای شعاع انحنای $250 \mu\text{m}$ به حداکثر تعداد یعنی مقدار ۳۰ می‌رسد. با افزایش شعاع انحنای در بازه $250 \mu\text{m}$ تا $275 \mu\text{m}$ ، تعداد قله‌ها به مقدار ۶ می‌رسد و سپس با افزایش شعاع انحنای، تعداد

References

- [1] A. Rostami, A. Taghipour, M. Bahrami, H. Baghban, H. Rasooli, M. Dolatyari, F. Janabi-Sharifi, X. Gu, "Grating-based fiber bending sensors with wide bending range", Proceeding of the IEEE/ISOT, Paris, France, Jan. 2013.
- [2] H. J. Patrick, C.C. Chang, S.T. Vohra, "Long-period fiber gratings for structure bend sensing", Electronics Letters, Vol. 34, No. 18, pp.1773-1775, Sep. 1998.
- [3] C.-S. Chua, H. Guan, and Y.-K. Ho, "Model-based 3D hand posture estimation from a single 2D image", Image and Vision Computing, Vol. 20, No. 3, pp. 191-202, March 2002.
- [4] C. A. Perez-Ramirez, D.L. Almanza-Ojeda, J.N. Guerrero-Tavares, F.J. Mendoza-Galindo, J.M. Estudillo-Ayala, M.A. Ibarra-Manzano, "An Architecture for Measuring Joint Angles Using a Long Period Fiber Grating-Based Sensor", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 38, pp. 563-584, Sep. 2014.
- [5] A. Yariv, P. Yeh, Photonics: Optical electronics in modern communications, 6d Edition, Oxford University Press, New York, 2007.
- [6] B.E. A. Saleh, M.C. Teich, Fundamentals of photonics, 2d Edition, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.

- [7] L. Dipietro, A.M. Sabatini, P. Dario, "A survey of glove-based systems and their applications", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.38, Vol. 4, pp. 461-482, July 2008.
- [8] A. Sakai, G. Hara, T. Baba, "Sharply bent optical waveguide on silicon-on-insulator substrate", Proceedings of the Physics and Simulation of Optoelectronic Devices, July 2001.
- [9] X. Dong, H. Zhang, B. Liu, and Y. Miao, "Tilted fiber bragg gratings: Principle and sensing applications", Photonic Sensors, Vol. 1, No. 1, pp. 6-30, March 2011.
- [10] L. Dipietro, A. M. Sabatini, P. Dario, "A survey of glovebased systems and their applications", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Vol. 38, No. 4, pp. 461-482, July 2008.
- [11] L. Zhang, Y. Liu, J. A. R. Williams and I. Bennion, "Enhanced FBG strain sensing multiplexing capacity using combination of intensity and wavelength dual-coding technique", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 12, pp. 1638-1640, Dec. 1999.