نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، (پیاپی ۳۹): صص ۲۴-۱۵

حسگر توری براگ فیبری مؤثرترین حسگر فیبر نوری توزیعی در کاربردهای پدافندی سازه‌های عمرانی

عبداله ملک‌زاده[1*]، محسن منصورسمائی[2]، رسول پاشایی[3]، محمد دیدار[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

چکیده

حفاظت از ابرسازه‌های عمرانی همچون برج‌ها، پل‌ها، سدها، پالایشگاه‌ها و سایر سازه‌های بزرگ در برابر بلایای طبیعی و غیرطبیعی از جمله مواردی است که می‌بایست در پدافند غیرعامل مورد توجه قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین اصولی که باید در این زمینه رعایت شود، نظارت بر وضعیت استحکام این سازه‌ها بعد از فرآیند ساخت است. ترک‌ها و شکستگی‌های ایجادشده ناشی از نشست و قدمت سازه، رطوبت، سرما و گرمای هوا، خوردگی و پوسیدگی و ... از جمله مشکلاتی هستند که بعد از ساخت این ابرسازه‌ها می‌توانند به مرور زمان ایمنی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. از این‌رو بسیاری از ابرسازه‌ها در دنیا علاوه بر اینکه در هنگام ساخت تحت نظارت دقیق قرار می‌گیرند، بعد از ساخت نیز توسط سامانه‌های مختلف کنترل می‌شوند. یکی از پرکاربردترین و محبوب‌ترین انواع این سامانه‌ها، حسگرهای فیبر نوری توزیعی می‌باشد. در این مقاله ابتدا انواع این حسگرها را معرفی کرده و سپس به مقایسه آن‌ها در زمینه پدافند سازه‌های عمرانی خواهیم پرداخت. با بیان مزایا و معایب هر یک از این حسگرهای توزیعی و معرفی نمونه‌های استفاده‌شده از آن‌ها در سازه‌های مختلف دنیا خواهیم دید که حسگر توری براگ فیبری نسبت به سایر حسگرهای توزیعی فیبر نوری کاربرد بیشتری در پایش وضعیت استحکام سازه‌های عمرانی دارد. دقت بالا، راحتی در ساخت، نصب آسان و مقرون به صرفه بودن از اصلی‌ترین دلایل گرایش به استفاده از حسگرهای توری براگ فیبری در این سازه‌ها بوده است.

کلید واژه‌ها: پدافند غیرعامل، حفاظت از ابرسازه‌ها، حسگرهای فیبر نوری توزیعی، توری براگ فیبری

۱- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، (amalakzadeh@ihu.ac.ir)- نویسنده مسئول
۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین(ع)
۳ - دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران
۴ - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۱- مقدمه

پدافند غیرعامل، نوعی دفاع است که به جنگ‌افزار نیاز ندارد و به کمک آن می‌توان از خسارات مالی و تلفات انسانی در برابر حوادث طبیعی و غیرطبیعی جلوگیری کرد و یا میزان آن را به حداقل ممکن کاهش داد. بدیهی است که نرخ آسیب‌پذیری و خسارات ناشی از بلایای مختلف، رابطه مستقیمی با رعایت اصول پیش‌بینی و پیشگیری در حوزه پدافند غیرعامل دارد. از جمله تأسیساتی که رعایت اصول پدافندی در آن‌ها بسیار حائز اهمیت است و تخریب آن‌ها مشکلات بسیاری را به وجود خواهد آورد می‌توان به ابرسازه‌های عمرانی همچون پل‌ها، برج‌ها، سدها، پالایشگاه‌ها و سازه‌های این چنینی اشاره کرد که تخریب آن‌ها می‌تواند تلفات جانی و مالی فراوانی را به همراه داشته باشد.

قوانین و مقررات بسیاری برای ایمنی و استحکام سازه‌های عمرانی بزرگ وجود دارد که رعایت آن‌ها به‌منظور ساخت سازه‌ای ایمن و محکم الزامی است. این سازه‌ها به دلیل اهمیت‌های نمادین، فرهنگی و هنری، تاریخی و ملی، صنعتی، سیاسی و ... و نیز هزینه بسیار زیادی که برای ساخت آن‌ها شده است، معمولاً بعد از ساخت نیز باید تحت پایش دقیق قرار بگیرند تا احتمال آسیب‌دیدگی و تخریب آن‌ها به حداقل ممکن برسد. حسگر پایش و سلامت سازه‌ها را می‌توان همانند سیستم مغز اعصاب بدن در نظر گرفت، به نحوی که سازه بدون پایش سلامت، همانند بدن بدون سیستم عصبی است. در بدن فاقد سیستم عصبی ممکن است عضو یا اعضایی دچار فرسودگی و آسیب شوند، در حالی که صاحب آن بدن این مسئله را نمی‌داند و قاعدتاً هیچ اقدامی در جهت بهبود آن انجام نخواهد داد. این مورد در نهایت می‌تواند منجر به تخریب آن عضو و حتی مرگ فرد گردد. به همین ترتیب عدم اطلاع از وضعیت استحکام سازه‌ها نیز می‌تواند نتایج مخربی در پی داشته باشد. درست است که انجام اقدامات پیشگیرانه در سازه‌ها ممکن است هزینه‌هایی دربرداشته باشد ولی باید بدانیم در صورت عدم انجام این اقدامات و وقوع حوادث، خساراتی چندین برابر را باید متحمل شد.

می‌توان تصور کرد که شکسته شدن یک سد یا پل و یا فروریختن یک برج مسکونی یا تجاری و یا تخریب یک پالایشگاه نفتی چه تلفات جانی و مالی و تبعات امنیتی و روانی فراوانی را در پی خواهد داشت. بنابراین، حتی اگر بتوان چند دقیقه یا حتی چند ثانیه قبل از آسیب رسیدن به این سازه‌ها از وضعیت آن‌ها اطلاع پیدا کرد می‌توان با اقداماتی پیشگیرانه نظیر خروج مردم از مکان حادثه، باز کردن دریچه‌های سد برای کاهش فشار وارده بر دیواره آن و سایر اقدامات از بیشتر شدن خسارات و تلفات ناشی از این بلایا تا حد زیادی جلوگیری کرد. . برای مثال همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود عدم استفاده از سامانه‌های کنترل‌کننده مناسب در سد اوریل کالیفرنیا باعث تخریب بخشی از این سد شده است، با وجود اینکه دقایقی قبل از تخریب، علائم آن به وضوح قابل رؤیت بود.

شکل (۱): تخریب قسمتی از سد اورویل، بزرگ‌ترین سد آمریکا در کالیفرنیا به دلیل عدم توجه به آسیب‌دیدگی‌های جزئی اولیه. آسیب اولیه در سد در شکل سمت چپ با علامت بیضی مشخص‌شده که بی‌توجهی به آن سبب تخریب بزرگی در سد شده است [۱].

در بسیاری از سازه‌هایی که در کشورمان ساخته می‌شود، تنها اصولی ایمنی که رعایت آن‌ها الزامی است، یک سری از قوانین و مقرراتی است که در مسیر ساخت این بناها اجرا می‌شود و بعد از ساخت، روش‌های نظارتی و کنترلی چندان دقیقی برای آن‌ها وجود ندارد [۲]. این در حالی است که خیلی از سازه‌های مهم دنیا پس از ساخته‌شدن همواره به کمک حسگرهای مختلف از جمله حسگرهای نوری، شتاب‌سنج‌ها[1] و لرزه‌سنج‌ها[2] در برابر لرزش‌ها، ترک‌ها و اختلالات احتمالی کنترل می‌شوند. شتاب‌سنج‌ها و یا لرزه‌سنج‌ها حسگرهایی هستند که شتاب مکانیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل کرده و از آن به‌منظور تشخیص و اندازه‌گیری لرزش، شوک و ضربه اعمالی بر سازه‌ها استفاده می‌کنند. استفاده از این حسگرها محدودیت‌هایی همچون نیاز به ذخیره‌سازی حجم بالایی از داده‌ها و نیاز به حذف نویز از داده‌های دریافتی و همچنین افت حساسیت سنجش با افزایش زمان و افزایش نوسانات و نهایتاً کالیبراسیون پیچیده را در پی خواهد داشت [۳]. امروزه حسگرهای استفاده‌شده در این زمینه‌ها

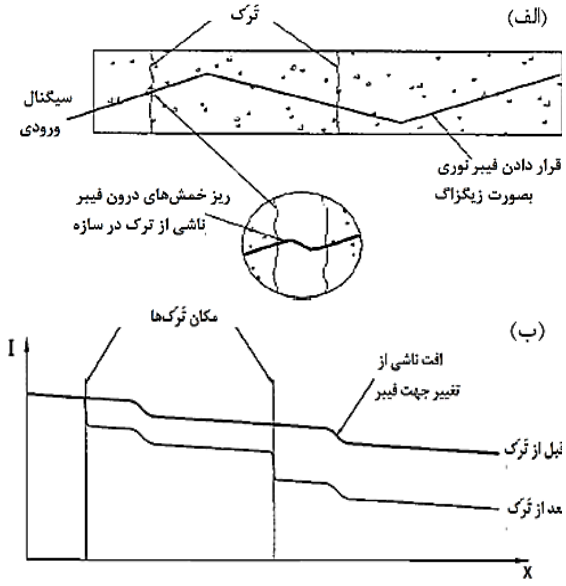
[1] Accelerometers
[2] seismometers

به مرور زمان به تکامل رسیده و از سامانه‌های عمدتاً مکانیکی و الکتریکی کند و کم‌دقت به حسگرهای پایش اپتیکی دقیق با حساسیت بالا رشد نموده‌اند. یکی از پرکاربردترین نوع این حسگرهای نوری در پایش سازه‌های عمرانی حسگرهای فیبر نوری توزیعی هستند [۶-۴].

اساس کار حسگرهای فیبر نوری توزیعی بر انتشار نور در فیبر و استفاده از خواص ذاتی موجود در فیبرهای نوری بنا شده است. نداشتن امواج مضر، مقاوم در برابر دما، فشار و رطوبت بالا، طول عمر زیاد، ایمنی لازم در برابر حک شدن، سهولت در نصب و انعطاف‌پذیر بودن این حسگرها ازجمله عواملی هستند که کشورهای پیشرفته دنیا استفاده از این فناوری را به بسیاری از روش‌های دیگر ترجیح داده‌اند. برخی از این حسگرها در مراحل ساخت و برخی بعد از ساخته‌شدن بنا به شکل‌های مختلف در داخل سازه‌های بتنی و فلزی تعبیه می‌شوند. از آنجایی که تغییرات زیاد و نامتعارف دما، فشار و رطوبت به مرور زمان باعث کاهش استحکام سازه‌های فلزی و بتنی و درنتیجه ترک‌خوردگی، پوسیدگی و شکستگی آن‌ها می‌شود، حسگرهای فیبر نوری توزیعی کاندیدای مناسبی برای نظارت بر سلامتی این سازه‌ها هستند، زیرا علاوه بر اینکه قادرند میزان این تغییرات محیطی نامتعارف را با دقت بالا تشخیص داده و قبل از ترک‌خوردگی سازه به کاربر هشدار لازم را دهند، همچنین می‌توانند پس از ترک‌خوردگی نیز مکان دقیق لرزش‌ها و ترک‌های کوچک ایجادشده در این سازه‌ها را مشخص کرده و با اطلاع به کاربر از پیشروی آن‌ها جلوگیری کنند [۷]. هر یک از انواع حسگرهای فیبری توزیعی به راحتی نمی‌توانند تمام پارامترهای محیطی از جمله فشار، دما، تنش، کرنش، رطوبت و ... را به‌طور جداگانه اندازه‌گیری کنند بلکه با توجه به خواص و ویژگی‌هایی که دارند هر یک در کاربردی خاص به‌کار گرفته می‌شوند. حسگرهای فیبر توزیعی نوری بسیار متنوع هستند که معمولاً آن‌ها را بر حسب نوع پراکندگی نور درون فیبر به سه دسته کلی، حسگرهای بر مبنای پراکندگی رایلی، رامان و بریلوئن تقسیم می‌کنند.

۲- حسگرهای فیبر نوری توزیعی

هر موج نوری هنگام عبور از یک محیط مادی مانند فیبر نوری به‌صورت ذاتی دچار پراکندگی می‌شود که این پراکندگی‌ها انواع مختلفی دارند. پراکندگی رایلی که بیشترین سهم پراکندگی‌ها را شامل می‌شود در اثر برخورد نور با ذراتی با ابعاد کوچک‌تر از طول موج آن نور ظاهر می‌شود. پراکندگی‌های رامان و بریلوئن که به ترتیب ناشی از نوسانات مولکولی و چگالی هستند و درصد بسیار کمی از پراکندگی‌ها را در بر می‌گیرند و نیز ممکن است در محیط انتشار نور رخ دهند که برخلاف پراکندگی رایلی باعث جابجایی طول‌موج نور بازگشتی می‌شوند. این پراکندگی‌ها به‌شدت به ویژگی‌های محیط اطراف فیبر نوری نظیر دما، فشار، رطوبت و ... حساس‌اند و با تغییر این عوامل تغییر می‌کنند. همین حساسیت بسیار زیاد فیبر به عوامل خارجی منجر شده تا از آن به‌عنوان حسگر در سازه‌ها استفاده شود و به شکل‌های مختلف در سازه‌ها جاگذاری شوند (شکل ۲). از این‌رو حسگرهای فیبر نوری توزیعی را با توجه به نوع پراکندگی به سه دسته کلی، حسگرهای بر مبنای پراکندگی رایلی، رامان و بریلوئن تقسیم می‌کنند. اکثر حسگرهای فیبری می‌توانند تنها یک نوع از این پراکندگی‌ها را تشخیص داده و با توجه به تغییرات ایجادشده در آن متوجه بروز اختلال و یا تغییر در اطراف فیبر شوند [۸].



شکل (۲): قرار گرفتن فیبر در داخل بتن به‌صورت زیگزاگ و الف) ریز خمش‌های درون فیبر ناشی از ترک سازه ب) مقایسه طیف خروجی قبل و بعد از ترک‌خوردگی

حسگرهای توزیعی با توجه به نوع پراکندگی که از آن بهره می‌گیرند، کاربردهای مختلفی را از خود نشان می‌دهند. برای مثال حسگر Φ–OTDR تنها به پراکندگی رایلی حساس است و قادر است تغییرات فیزیکی در قالب تنش و ارتعاش و ... را با دقت چندین متر به‌خوبی تشخیص دهد، به همین دلیل در پایش مرزها و لوله‌های انرژی با مسافت‌های بالا که به دقت بالایی نیاز ندارند، به‌کار گرفته می‌شوند (شکل ۳) [۱۱-۹]. حسگرهایی که بر اساس پراکندگی رامان فعالیت می‌کنند تنها در تشخیص تغییرات دما کاربرد دارند [۱۲] و یا حسگرهای بر مبنای بریلوئن که به تغییرات فشار و کرنش حساس می‌باشند در فواصل کمتری نسبت به Φ–OTDR و با دقت بالاتری نسبت به آن به‌کار گرفته می‌شوند [۱۳].

شکل (۳): استفاده از حسگرهای فیبری بر پایه رایلی در لوله‌های انرژی [۱۴]

در این میان برخی از این حسگرها مانند حسگرهای توری براگ فیبری (FBG[1]) به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که به تمام این پراکندگی‌ها حساس بوده و کوچک‌ترین تغییرات در هر یک از آن‌ها را تشخیص می‌دهند که این مسئله توجه محققان و مسئولین جوامع مختلف را به‌ویژه به‌منظور اقدامات پدافندی غیرعامل به خود جلب کرده است [۴].

۲-۱- روش تحقیق

با توجه به ویژگی‌های ظاهری و فیزیکی ابرسازه‌های عمرانی می‌توان دریافت که چه پارامترهایی باید معیار سنجش و انتخاب حسگرهای فیبر نوری توزیعی برای استفاده در این سازه‌ها به‌منظور اقدامات و اهداف پدافندی باشند. برای مثال از آنجا که طول سازه‌هایی همچون برج‌ها و سدها نهایتاً به چند صد متر می‌رسد و برای به‌دست آوردن محل دقیق ترک و شکستگی در آن‌ها حداقل دقت اندازه‌گیری در محدوده سانتی‌متر مورد نیاز است بنابراین، باید استفاده از حسگرهایی با چنین خصوصیاتی را در دستور کار قرار داد. همچنین برای کنترل ایمنی و استحکام سطح پل‌ها و یا نظارت بر اطراف نیروگاه‌ها که طول حدوداً چند کیلومتری با دقت فضایی چندین سانتی‌متر لازم است باید از حسگرهایی مطابق با این ویژگی‌ها استفاده کرد. از دیگر پارامترهای مهم در اقدامات پدافندی، زمان اطلاع از وقوع اختلال است که هر چه این زمان کمتر و سریع‌تر باشد، می‌توان اقدامات بیشتری برای کاهش تلفات و خسارات انجام داد، بنابراین، زمان پاسخ‌دهی حسگرهای فیبری باید یکی از مهم‌ترین پارامترها و معیارهای سنجش در اقدامات پدافندی باشد. همچنین در تمام پروژه‌های عمرانی استفاده از مصالح و سامانه‌هایی با صرفه اقتصادی بالا و البته کیفیت مناسب یک بحث مهم و بنیادی است. بنابراین، قیمت تمام‌شده برای یک حسگر که قرار است در این سازه‌ها استفاده شود باید معقول و مناسب باشد. در مجموع می‌توان گفت برای رسیدن به بهترین حسگر توزیعی فیبری مورد استفاده در سازه‌های عمرانی به‌منظور اقدامات پدافندی لازم است تا پارامترهایی همچون دقت اندازه‌گیری، طول‌سنجش، زمان پاسخ‌دهی و صرفه اقتصادی معیار سنجش و انتخاب این حسگرها قرار گیرد.

۲-۲- دقت اندازه‌گیری

برای تشخیص مکان دقیق اختلال در سازه‌های عمرانی باید از حسگرهایی استفاده شود که دارای دقت اندازه‌گیری زیر ۱۰ سانتی‌متر باشند تا با اطمینان بتوان تشخیص داد که اختلال ایجادشده مربوط به کدام بخش از اسکلت ساختمان و یا سازه بتنی است زیرا در بسیاری از سازه‌ها از نماهای کاذب و یا پوشش‌هایی استفاده می‌شود که در صورت وقوع ترک و یا شکستگی در اسکلت سازه، در ظاهر آن تغییری ایجاد نمی‌شود. همچنین ممکن است اسکلت داخلی سازه دچار آسیب‌های پنهانی چون پوسیدگی و خوردگی شده باشد و در ظاهر سازه نتوان چیزی را تشخیص داد. در چنین شرایطی اگر دقت فضایی حسگر زیاد نباشد، برای تعمیر و یا تقویت بخش آسیب‌دیده نمی‌توان با دقت عمل کرد و امکان خطا و یا هدر رفت بیش از حد مصالح وجود دارد.

در بین حسگرهای توزیعی، حسگرهایی که بر مبنای پراکندگی رایلی عمل می‌کنند معمولاً دارای دقت فضایی چند ده متر در ده‌ها کیلومتر از فیبر سنجش هستند [۹]. بهترین دقت فضایی گزارش‌شده برای این حسگرها قدرت تفکیک فضایی کمتر از یک متر برای یک کیلومتر از فیبر سنجش بوده است [۱۵]. با توجه به اینکه برای کنترل ایمنی و استحکام سازه‌های عمرانی به‌منظور اقدامات پدافندی نیاز به حسگرهایی با دقت فضایی در محدوده سانتی‌متر است، بنابراین، حسگرهای بر مبنای رایلی از نظر دقت فضایی، حسگرهای چندان مناسبی به‌منظور کاربردهای پدافندی در این سازه‌ها نیستند. حسگرهای توزیعی بر مبنای پراکندگی رامان که معمولاً به‌عنوان حسگرهای دمایی از آن‌ها استفاده می‌شود حدوداً دارای دقت فضایی چندین متر در ده‌ها کیلومتر از فیبر سنجش هستند. در جدیدترین گزارش اعلام‌شده از این حسگرها به ترتیب دقت دمایی و فضایی ۴ میلی‌کلوین و ۲ متر برای طول سنجش ۹ کیلومتر به‌دست آمده است [۱۶].

[1] Fiber Bragg Grating

بنابراین، این حسگرها شاید حسگرهای بسیار خوبی برای تشخیص تغییرات دما در سازه‌های عمرانی باشند ولی دقت فضایی نه چندان مناسب می‌تواند یک نقص و عیب در آن‌ها برای کاربردهای پدافندی در این سازه‌ها به شمار آید.

امروزه حسگرهای توزیعی فیبری که بر مبنای پراکندگی بریلوئن کار می‌کنند در بین محققان و دانشمندان فیبر نوری طرفداران زیادی پیدا کرده‌اند. دقت فضایی در حد چند سانتی‌متر برای چندین کیلومتر از فیبر سنجش به مراتب در مقالات این محققان گزارش شده است. بهترین دقت فضایی به‌دست‌آمده از حسگرهای فیبری بر مبنای پراکندگی بریلوئن مربوط به حسگرهای توری دینامیکی بریلوئن است که دارای دقت فضایی حدود ۱ سانتی‌متر برای ۱۷ کیلومتر از فیبر سنجش هستند [۱۷]. بنابراین، حسگرهای فیبری که مبنای آن‌ها پراکندگی بریلوئن است از نظر دقت فضایی برای کاربردهای پدافندی در سازه‌های عمرانی قابل قبول هستند.

حسگرهای توری براگ فیبری نیز از جمله حسگرهایی هستند که مقبولیت زیادی در سازه‌های عمرانی از جمله پل‌ها و سدها دارند (شکل ۴).

شکل (۴): پل مشهور بروکلین در نیویورک که در آن برای نمایش تغییرات دما و فشار از حسگر توری براگ فیبری استفاده می‌شود [۲۰]

پارامترهای سنجش در این حسگرها با نحوه ساخت توری‌های براگ در ارتباط است. قدرت تفکیک فضایی در این حسگرها برابر با فاصله بین دو توری متوالی خواهد بود بنابراین، در فرآیند ساخت این حسگرها هر چه فاصله بین توری‌های براگ از هم کمتر باشد دقت فضایی بالاتری به‌دست خواهد آمد [۱۸]. در این حسگرها حتی دقت فضایی چند میکرون در طول سنجش چندین سانتی‌متر هم گزارش شده است که بیشتر در علوم زیستی کاربرد دارد [۱۹]. در نتیجه می‌توان گفت دقت فضایی در حسگرهای توری براگ فیبری یک پارامتر کاملاً انعطاف‌پذیر است که می‌تواند با توجه به نوع کاربرد و میزان نیاز طراحی شود. این خصوصیت برای کاربردهای پدافندی در سازه‌های عمرانی بسیار مناسب است زیرا می‌توان با توجه به اندازه سازه‌های مختلف حسگری مناسب با آن طراحی کرد. بنابراین، اگر کسی بخواهد تنها از منظر دقت فضایی، حسگری مناسب برای اقدامات پدافندی در سازه‌های عمرانی انتخاب کند، ما می‌توانیم با توجه به مطالب بالا حسگرهای توزیعی بر مبنای پراکندگی بریلوئن و همچنین حسگرهای توری براگ فیبری را به او پیشنهاد دهیم.

۲-۳- طول سنجش

پارامتر دیگری که در بین حسگرهای فیبر نوری توزیعی و همچنین سازه‌های عمرانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است طول سنجش است. با توجه به اندازه و ابعاد سازه‌های عمرانی می‌توان گفت طول اندازه‌گیری سنجش مورد نیاز برای انجام اقدامات پدافندی در این سازه‌ها در حد چند صد متر و نهایتاً چندین کیلومتر است. بنابراین، اگر حسگری قادر به پوشش چنین طول سنجشی باشد، می‌تواند حسگری مناسب در این زمینه به حساب آید.

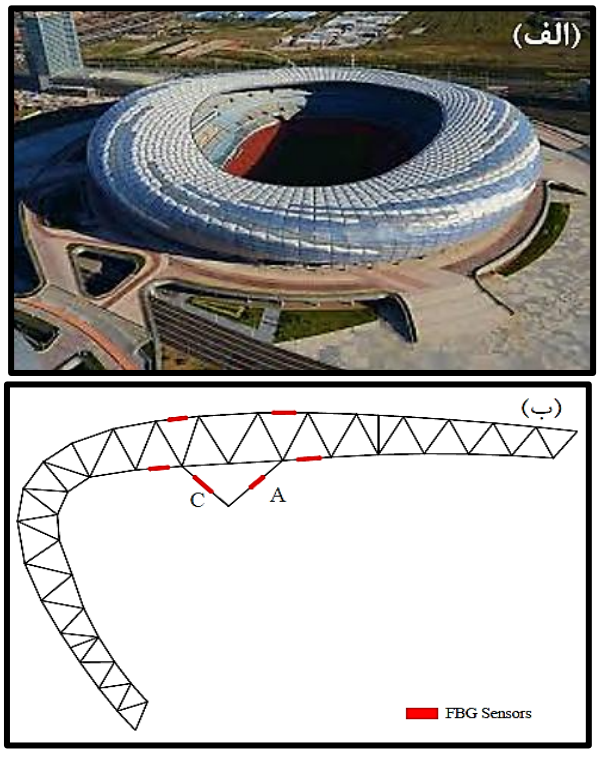
حسگرهای توزیعی که بر مبنای پراکندگی رایلی عمل می‌کنند همواره به‌عنوان حسگرهایی با طول سنجش زیاد شناخته می‌شوند به‌طوری که استفاده از آن‌ها در مرزهای بین‌المللی کشورها و خطوط راه آهن رایج شده است. طول سنجش ۳۰۰ کیلومتر بیشترین طول گزارش‌شده برای این حسگرها بوده که در لوله‌های انتقال انرژی از آن استفاده شده است [۲۱]. حسگرهای بر مبنای پراکندگی رامان و بریلوئن نیز دارای طول سنجش در حد چند ده کیلومتر هستند که با این طول برای استفاده در سازه‌های عمرانی هیچ محدودیتی ندارند [۸]. طول سنجش در حسگرهای توری براگ فیبری نیز همان‌طور که در مورد دقت فضایی آن‌ها گفته شد به نحوه ساخت و قرار دادن توری‌ها درون فیبر بستگی دارد و پارامتری انعطاف‌پذیر است. هرچه فاصله بین توری اول و آخر بیشتر و همچنین هرچه پهنای فرکانسی نور منبع بیشتر باشد طول سنجش هم بیشتر خواهد شد به‌طوری که برای این حسگرها طول‌های سنجش چند صد کیلومتری نیز گزارش شده است [۲۲]. بنابراین، اگر بخواهیم فقط از منظر طول سنجش، حسگری مناسب برای اقدامات پدافندی در سازه‌های عمرانی انتخاب کنیم می‌توانیم تمام حسگرهای توزیعی فیبری را برای این کار به‌درستی پیشنهاد کنیم.

۲-۴- زمان پاسخ‌دهی

سرعت عمل در اقدامات پدافندی یکی از اصولی است که همواره باید مورد توجه قرار بگیرد. اگر بتوان چند دقیقه و یا حتی چند ثانیه زودتر از تخریب یک سازه باخبر شد می‌توان با اقدامات

بسیاری از میزان تلفات و خسارات ناشی از آن کاست، از این‌رو زمان پاسخ‌دهی برای حسگرهایی که می‌خواهند نامزد استفاده در اقدامات پدافندی باشند باید یکی از اولویت‌ها باشد. زمان پاسخ‌دهی در حسگرهای توزیعی که بر مبنای پراکندگی رایلی و رامان کار می‌کنند در محدوده ۱ تا ۱۰ دقیقه است [۸]. این پارامتر در اکثر حسگرهای بر مبنای پراکندگی بریلوئن نیز در محدوده چندین دقیقه است ولی در حسگر توری دینامیکی بریلوئن که چیدمانی پیچیده و البته دقت بالایی دارد در حدود چند ثانیه گزارش شده است [۲۳]. زمان پاسخ‌دهی در حسگر توری براگ فیبری نیز بسیار کوتاه و در محدوده میلی‌ثانیه است. البته باید توجه کرد که هرچه طول فیبر سنجش در حسگرهای توزیعی بیشتر شود به همان نسبت زمان پاسخ‌دهی حسگر نیز افزایش می‌یابد [۲۴].

بنابراین، تقریباً تمام این حسگرها از نظر زمان پاسخ‌دهی می‌توانند گزینه مناسبی برای اقدامات پدافندی در سازه‌های عمرانی باشند ولی اگر بخواهیم بهترین حسگر را از این منظر انتخاب کنیم می‌توانیم حسگرهای توری براگ فیبری و توری دینامیکی بریلوئن را در رأس آن‌ها پیشنهاد دهیم. از همین رو استفاده از حسگرهای FBG در سازه‌های مهم دنیا به ویژه در منطقه جنوب شرق آسیا بسیار گسترش یافته است (شکل ۵ و ۶).



شکل (۵): استفاده از حسگر توری براگ فیبری برای پایش مقاومت و استحکام سازه الف) در استادیوم دالیان چین، ب) نحوه جاگذاری حسگر در این سازه [۲۵]

شکل (۶): استفاده از حسگر FBG برای کنترل ایمنی الف) در برج کانتون گوانژو چین. ب) جاگذاری حسگر در سازه برج [۲۷]

۲-۵- صرفه اقتصادی

در تمام پروژه‌های مربوط به ساخت، یکی از مباحث اصلی که بین صاحب و مسئول پروژه مطرح می‌شود بحث مالی آن است. در ساخت یک سازه عمرانی نیز علاوه بر توجه به کیفیت مصالح، همواره استفاده از ابزارآلات و مصالح با قیمت مناسب نیز در دستور کار قرار دارد و یکی از اولویت‌های مهندسان و معماران این سازه‌ها پایین آمدن قیمت تمام‌شده سازه برای رسیدن به بهره مالی بیشتر است. بنابراین، اگر قرار باشد برای رعایت اصول پدافندی در سازه‌ای از حسگرهای توزیعی استفاده شود یکی از موضوعات مورد بحث، صرفه اقتصادی آن حسگر خواهد بود.

با توجه به اینکه چیدمان حسگرهای توزیعی فیبری برای چه دقت فضایی و طول سنجشی طراحی شده است، قیمت این حسگرها کم و یا زیاد می‌شود. حسگرهای بر مبنای پراکندگی رایلی برای طول‌های سنجش در حد چندین کیلومتر به دلیل چیدمان تقریباً ساده‌ای که دارند دارای قیمت بین ۱۰ تا ۲۰ هزار دلار هستند ولی اگر بخواهیم چیدمان این حسگرها را برای طول‌های چند صد کیلومتری طراحی کنیم به دلیل نیاز به تقویت‌کننده‌های مختلف، قیمت این حسگرها تا چند صد هزار دلار نیز بالا خواهد رفت. حسگرهای توزیعی بر مبنای پراکندگی رامان نیز با توجه به کارایی مورد نیاز و میزان پیچیدگی چیدمان آن‌ها قیمتی بالای ۳۰ هزار دلار دارند.

گران‌قیمت‌ترین حسگرهای توزیعی فیبری، حسگرهای بر مبنای پراکندگی بریلوئن هستند که به دلیل داشتن چیدمانی پیچیده و گهگاه مدولاتورهای متعدد، محدوده قیمتی چند صد هزار دلاری دارند. در مقابل حسگرهای توری براگ فیبری که به حسگرهای فیبری ارزان معروف‌اند محدوده قیمتی زیر ۱۰ هزار دلار دارند و به همین دلیل بسیار پرکاربرد هستند [۲۶]. با این اوصاف می‌توان گفت که اگر تنها از منظر قیمت و صرفه اقتصادی بخواهیم حسگری مناسب برای اقدامات پدافندی در سازه‌های عمرانی پیدا کنیم باید حسگرهای توری براگ فیبری را به‌عنوان ارزان‌ترین حسگرها انتخاب کنیم.

۲-۶- نتایج و بحث

حال اگر بخواهیم با در نظر گرفتن تمام این پارامترهای بررسی‌شده در بالا یک حسگر مناسب برای اقدامات پدافندی در سازه‌های عمرانی انتخاب کنیم کار چندان دشواری نخواهیم داشت زیرا بعضی از این حسگرها نمی‌توانند پارامترهای اولیه مورد نیاز در سازه‌های عمرانی را برآورده کنند. به‌عنوان مثال، حسگرهای توزیعی بر مبنای پراکندگی رایلی دقت فضایی لازم برای استفاده در این سازه‌ها را ندارند. همچنین حسگرهای بر مبنای پراکندگی رامان با وجود دقت دمایی بسیار عالی اما دقت فضایی مورد نیاز در سازه‌های عمرانی را پوشش نمی‌دهند. بنابراین، از بین حسگرهای بر مبنای پراکندگی بریلوئن و حسگر توری براگ که هر دو دارای قدرت تفکیک فضایی در محدوده سانتی‌متر هستند باید یکی را انتخاب کرد. از آنجایی که حسگرهای بر مبنای پراکندگی بریلوئن نسبت به حسگر توری براگ، زمان پاسخ‌دهی بالاتری دارند می‌توان حسگر توری براگ را به‌عنوان بهترین حسگر برای اقدامات پدافندی در سازه‌های عمرانی انتخاب کرد. حتی اگر از تفاوت چند دقیقه‌ای زمان پاسخ‌دهی بین این دو حسگر چشم‌پوشی کنیم، گذشت از تفاوت قیمت بسیار زیاد این دو اجتناب‌ناپذیر است.

بنابراین، با اطمینان می‌توان گفت که حسگر توری براگ بهترین حسگر توزیعی فیبری برای استفاده در سازه‌های عمرانی به‌منظور انجام اقدامات پدافندی است. در ادامه برای آشنایی بیشتر با حسگر توری براگ به بررسی دقیق‌تری از تئوری و نحوه کارکرد این حسگر خواهیم پرداخت.

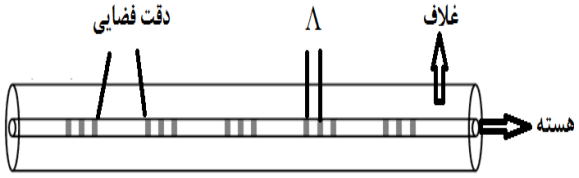
۳- حسگر توری براگ فیبری

نحوه ساخت و چیدمان توری‌های براگ درون فیبر می‌تواند حساسیت، طول سنجش و دقت اندازه‌گیری این حسگرها را تعیین کند. در حسگرهای FBG با توجه به کاربردی که برای آن‌ها تعریف می‌شود ممکن است از یک تا هزاران توری براگ در یک رشته فیبر نوری وجود داشته باشد [۴]. برای ساخت توری‌های براگ معمولاً از لیزرهای فرابنفش و همچنین فیبرهایی با هسته‌های حساس به نور فرابنفش استفاده می‌کنند [۲۸].

با توجه به فاصله بین هر یک از شیارهای توری براگ (دوره توری) و ضریب شکست فیبر، یک طول موج مشخصی از توری بازتاب می‌شود. طول‌موج بازتابی از هر توری براگ (λ_B) با توجه به ضریب شکست مؤثر فیبر (n_{eff}) و دوره آن توری (Λ) بدین‌صورت تعیین می‌شود [۲۹]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \qquad (۱)$$

مطابق شکل (۷) هرچه فاصله بین شیارهای یک توری کمتر باشد حساسیت حسگر FBG بیشتر خواهد شد و هر چه فاصله بین دو توری مختلف از هم، درون فیبر نوری کمتر باشد، حسگر FBG دارای دقت فضایی بالاتری خواهد بود زیرا قدرت تفکیک فضایی در این حسگرها برابر با فاصله بین هر یک از توری‌های براگ است [۱۸].

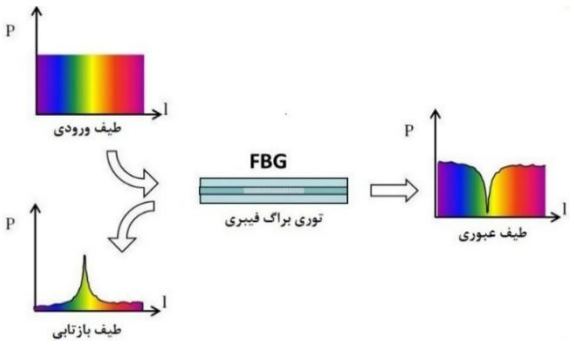


شکل (۷): نمایش دوره توری (Λ) و دقت فضایی حسگر FBG درون فیبری با چندین توری براگ

در این حسگرها پرتو لیزر وارد فیبر نوری شده و بعد از برخورد با این توری‌ها که در مسیر پرتو قرار دارند، طول‌موج خاص هر توری بازتاب می‌شود (شکل ۸) به‌طوری که در طیف بازتابی نهایی چندین پیک بازتاب با طول‌موج‌های مختلف وجود خواهد داشت. طول‌موج بازتابی از هر توری به ضریب شکست فیبر بسیار وابسته است. در شرایط فیزیکی (دما، فشار، رطوبت و...) پایدار، انتظار می‌رود که طول‌موج معینی از هر توری بازتاب شود ولی وقتی شرایط فیزیکی حاکم بر اطراف فیبر تغییر کند به دلیل حساسیت بسیار زیاد ضریب شکست فیبر به تغییرات محیطی، طول‌موج بازتابی از هر توری نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین، با توجه به میزان تغییر طول‌موج بازتابی و شدت آن می‌توان به میزان و نوع تغییرات فیزیکی در اطراف فیبر نوری پی برد [۲۹].

همان‌طور که اشاره شد حسگرهای FBG به تغییرات دما، فشار و رطوبت بسیار حساس بوده و ابزار مناسبی برای سنجش این پارامترهای محیطی هستند. از آنجایی که ترک‌ها و شکستگی‌های هرچند کوچک در سازه‌های عمرانی به نوسان فشار

و درنتیجه لرزش و ارتعاش در آن نقطه از سازه منجر می‌شوند بنابراین، قبل از اینکه ترک و یا شکستگی موجود گسترش یافته و به حالت بحرانی برسد، به کمک این حسگرها می‌توان به وجود آن پی برده و اقدامات لازم را انجام داد.



شکل (۸): نحوه عملکرد توری براگ فیبر نوری

علاوه بر این قبل از اینکه ترک و یا شکستگی در قسمتی از سازه رخ دهد مطمئناً میزان فشار واردشده بر آن بخش از سازه متفاوت و البته بیش‌تر از نقاط دیگر خواهد بود که این تفاوت فشار توسط حسگرهای FBG قابل شناسایی است، بنابراین، حتی قبل از بروز ترک‌ها و شکستگی‌های کوچک نیز می‌توان به احتمال وقوع آن در سازه پی برد.

با توجه به اینکه این تغییر فشار و نهایتاً ترک‌ها و لرزش‌ها در سازه‌های عمرانی به دلایل مختلف ازجمله نشست، قدمت سازه، رطوبت، سرما و گرمای هوا، خوردگی و... ایجاد می‌شوند، می‌توان به کمک حسگرهای FBG که حساس به فشار، دما و رطوبت هستند، از تغییرات محیطی نامتعارف در نقطه‌ای از سازه نیز اطلاع یافت و با اقدامات مناسب از آن جلوگیری کرد. به‌عنوان مثال تماس و اصطکاک بیش از حد دو نقطه در سازه‌های فلزی می‌تواند باعث بالا رفتن دما در آن نقطه شده و قبل از اینکه صدمه‌ای به سازه وارد شود از آن جلوگیری کرد و یا رطوبت بیش از حد در یک بخش از سازه بتنی یا فلزی که در نزدیکی آب قرار دارد (شکل ۹) و می‌تواند زمینه‌ساز پوسیدگی آن بخش از سازه شود را شناسایی و پیش‌گیری کرد. از آنجایی که اساس تشخیص اختلال در حسگرهای FBG بر پایه تغییر در طول موج براگ است بنابراین، برای تشخیص میزان و محل دقیق اختلال (شکستگی، ترک‌خوردگی، لرزش و ارتعاش بیش از حد و ...) در سازه‌های عمرانی باید به تحلیل طیف بازتابی از حسگر توری براگ بپردازیم. در تحلیل این طیف، با کالیبره کردن تغییرات شدت و طول موج براگ بازتابی نسبت به عوامل محیطی مورد نظر، می‌توان به میزان این تغییرات محیطی پی برد. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد حسگرهای توری براگ فیبری و مزایای آن‌ها نسبت به سایر حسگرهایی فیبری و غیر فیبری که در بخش‌های مختلف صنعت استفاده می‌شوند و همچنین توجه به این نکته که حسگرهای FBG آزمایش خود را در بسیاری از کشورهای دنیا پس داده‌اند، می‌توان با اطمینان کامل، از آن‌ها در زمینه‌های مختلف استفاده کرد و میزان امنیت و ایمنی شهروندان در سطح شهر را افزایش داد.

شکل (۹): استفاده از حسگرهای FBG در پایه‌های پل دادو در تایوان [۳۰]

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه حسگرهای فیبر نوری توزیعی ابزاری مناسب برای سنجش عوامل محیطی از جمله فشار، دما، رطوبت و ... هستند معمولاً از این حسگرها برای پایش مستمر مقاومت و استحکام ابرسازه‌های عمرانی پس از ساخت آن‌ها استفاده می‌شود. نوسانات شدید فشار، دما و رطوبت در سطح یک ابرسازه برای ایمنی آن بسیار خطرناک است و منجر به ترک‌خوردگی و پوسیدگی آن خواهد شد و عمر مفید سازه را کاهش می‌دهد. تمام این پارامترهای محیطی به راحتی توسط انواع مختلف حسگرهای فیبر نوری توزیعی قابل شناسایی هستند اما در پایش سازه‌های عمرانی با ویژگی‌های فیزیکی و ظاهری مشخص، حسگر توری براگ فیبری بیشترین کارایی را دارد. این حسگر به دلیل دقت بالا، طول سنجش مناسب، زمان پاسخ‌دهی اندک و مقرون به صرفه بودن، انتخاب اول مهندسان و معماران این سازه‌ها در بین سایر حسگرهای توزیعی دیگر است. حسگرهای توری براگ

فیبری در نقاط مختلف دنیا به‌عنوان یک ابزار دقیق و توانمند برای اندازه‌گیری فشار، لرزش، دما، رطوبت و ... شناخته می‌شوند و هر روز بر مقبولیت آن‌ها افزوده می‌شود. با توجه به کاربردهای فراوان این حسگرها در سازه‌ها و صنایع مختلف و استفاده عملی از آن‌ها در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا به نظر می‌رسد سرمایه‌گذاری و ساخت این حسگرها، نه تنها یک تجارت اقتصادی مطمئن و پر سود خواهد بود بلکه اقدامی لازم و ضروری جهت پیشگیری از تلفات و خسارات ناشی از حوادث مختلف در سازه‌های عمرانی نیز می‌باشد.

۵- منابع

1. F. Vahedifard, A. AghaKouchak, E. Ragno, S. Shahrokhabadi, and I. Mallakpour, "Lessons from the Oroville dam," Science, pp. 1139-1140, 2017.

۲. رحیمی، صابر، صحرایی، روح الله، کنترل ایمنی سازه های بتنی با حسگر فیبر نوری، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، رشت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لشت نشا، ۱۳۹۰.

3. P. J. Lynch, et al, "Design of piezoresistive MEMS-based accelerometer for integration with wireless sensing unit for structural monitoring," Journal of Aerospace Engineering, vol. 16, no. 3, pp. 108-114, 2003.

۴. ملک‌زاده، عبداله، منصورسمائی، محسن، نوری جویباری، سودابه، حسگرهای توزیعی فیبرنوری روشی نوین برای کاهش خسارات ناشی از حوادث و بلایای مختلف در سازه‌های شهری تهران، دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره ۷، شماره ۴، صص. ۳۳۱-۳۲۰، ۱۳۹۶.

۵. منصورسمائی، محسن، ملک‌زاده، عبداله، نوری جویباری، سودابه، پاشایی، رسول، رسیدن به قدرت تفکیک فضایی درحد میلی‌متر برای ۱۷،۵ کیلومتر از فیبر سنجش در حسگرهای توزیعی فیبر نوری برپایه پراکندگی بریلوئن، اولین همایش ملی فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، تیرماه ۱۳۹۵.

۶. منصورسمائی، محسن، ملک‌زاده، عبداله، نوری جویباری، سودابه، پاشایی، رسول، بهبود قدرت تفکیک فضایی در حسگرهای توزیعی فیبر نوری برپایه همبستگی، با استفاده از روش همبستگی فازی، اولین همایش ملی فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، تیرماه ۱۳۹۵.

7. H.-E. Joe, et al, "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.

8. Ding, Zhenyang, et al, "Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry," A review Sensors, vol. 18, no. 4, p. 1072, 2018.

۹. ملک‌زاده، عبد الله، پاشایی، رسول، منصور سمایی، محسن، حسگر توزیعی فیبر نوری حساس به فاز در اقدامات پدافند غیرعامل، مجله پدافند غیر عامل، دوره ۹ شماره ۴، ۱۳۹۷.

۱۰. ملک‌زاده، عبداله، پاشایی، رسول، منصور سمایی، محسن، افزایش بهره و کاهش عدد نویز حسگرهای توزیعی فیبر نوری با ترکیب تقویت کننده های اربیوم و رامان، هفتمین همایش سراسری پدافند جنگ های نوین، تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، ۱۳۹۶.

۱۱. پاشایی، رسول، ملک‌زاده، عبداله، طراحی و شبیه‌سازی حسگر توزیعی فیبر نوری حساس به فاز برمبنای پراکندگی رایلی به منظور پایش مرزها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین(ع)، ۱۳۹۶.

12. M. K. Saxena, et al, "Raman optical fiber distributed temperature sensor using wavelet transform based simplified signal processing of Raman backscattered signals," Optics & Laser Technology, vol. 65, pp. 14-24, 2015.

13. P. Dragic and J. Ballato, "A brief review of specialty optical fibers for Brillouin-scattering-based distributed sensors," Applied Sciences, vol. 8, no. 10, pp. 1996, 2018.

14. D. Inaudi and G. Branko, "Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing," Journal of pressure vessel technology, vol. 132, no. 1, pp. 011701, 2010.

15. Z. Qin, C. Liang, and B. Xiaoyi, "Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 5, p. 542, 2012.

16. A. M. Soto, A. J. Ramírez, and L. Thévenaz, "Reaching millikelvin resolution in Raman distributed temperature sensing using image processing," Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors, vol. 9916, pp. 99162A, International Society for Optics and Photonics, 2016.

17. A. Malakzadeh and 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.

18. C. Campanella, et al, "Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications," Sensors, vol. 18, no. 9, p. 3115, 2018.

19. J. Ahmad, et al, "High temporal and spatial resolution distributed fiber Bragg grating sensors using time-stretch frequency-domain reflectometry," Journal of Lightwave Technology, vol. 35, no. 16, pp. 3289-3295, 2017.

20. C. Fischer, et al, "Fiber Optic Monitoring of the Masonry Arch Approach Spans in the Brooklyn Bridge," Structural Materials Technology, 2010.

21. D. Inaudi and B. Glisic, "Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing," Journal of pressure vessel technology, vol. 132, no. 1, p. 011701, 2010.

22. F. Vallejo, Montserrat, S. Rota-Rodrigo, and M. Lopez-Amo, "Remote (250 km) fiber Bragg grating multiplexing system," Sensors, vol. 11, no. 9, pp. 8711-8720, 2011.

23. A. Denisov, "Brillouin Dynamic Gratings in Optical Fibres for Distributed Sensing and Advanced Optical Signal Processing," Ph.D. Thesis, École Polytechnique Federale de Lausanne, 2015.

24. Y. Pan, et al, "Note: Response time characterization of fiber Bragg grating temperature sensor in water medium," Review of Scientific Instruments, vol. 87, no. 11, p. 116102, 2016.

25. L. Ren, et al, "Structural health monitoring system developed for Dalian stadium," International Journal of Structural Stability and Dynamics, vol. 16, no. 4, p. 1640018, 2016.

26. https://www.thorlabs.com/search/thorsearch.cfm?search=card, 2017.

27. C. C. Lai, H. Y. Au, K. M. Chung, W. H. Chung, Shun Yee Michael Liu, H. Y. Tam, and Y. Q. Ni, "Optical sensor networks for structural health monitoring of canton tower," 2011.

28. J. Bonefacino, T. S. Glen, X. Cheng, S. T. Boles, and H. Y. Tam, "Ultrafast fiber Bragg grating inscription in DPDS-core doped POF using 325 nm laser," In Micro-structured and Specialty Optical Fibres VI, vol. 11029, p. 110290C. International Society for Optics and Photonics, 2019.

29. S. Drusová, et al, "Possibilities for Groundwater Flow Sensing with Fiber Bragg Grating Sensors," Sensors, vol. 19, no. 7, pp. 1730, 2019.

30. Lin, Yung Bin, et al, "Flood scour monitoring system using fiber Bragg grating sensors," Smart materials and Structures, vol. 15, no. 6, pp. 1950, 2006.

Fiber Bragg Grating Sensor as the Most Effective Distributed Optical Fiber Sensor in Defense Applications of Civil Structures

A. Malakzadeh[*], M. Mansoursamaei, R. Pashaei, M. Didar

Abstract

Protection of civil structures such as towers, bridges, dams, refineries and other large structures against natural and unnatural disasters is one of the topics which should be addressed in the field of passive defense. One of the most important issues which should be regarded for massive structures is monitoring the status of their strength after the construction process. Cracks and fractures caused by subsidence, structural age, humidity, cold and warm air, corrosion, decay, as well as various disasters, are the problems that may occur after construction and can affect structure safety over time. Hence, many of structures in the world, besides being carefully monitored when constructed, are controlled by different systems after construction. One of the most popular types of these systems is distributed optical fiber sensors system. In this article, we first introduce and then compare different types of these sensors in the field of structural defense. After **e**xplaining the advantages and disadvantages of each of these distributed sensors and introducing their samples in different structures of the world, we will see that Fiber Bragg Grating sensor is more widely used than any other optical fiber distributed sensor, for monitoring the strength of civil structures.The main reason for the tendency to use Fiber Bragg Grating sensors is cost-effectiveness as they have high spatial resolution and are easy to construct and install.

Key Words: *Passive defense, Protection of constructional structures, Distributed Optical Fiber Sensors (DOFSs), Fiber Bragg Grating (FBG)*

[*] Imam Hossein Comprehensive University - (amalakzadeh@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge