فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران/ دورهٔ هفتم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۳۹۶
Disaster Prevention and Management Knowledge (DPMK)
Quarterly, Vol. 7, No. 4 (Winter 2018)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰

حسگرهای توزیعی فیبرنوری روشی نوین برای کاهش خسارات ناشی از حوادث و بلایای مختلف در سازه‌های شهری تهران

عبداله ملک‌زاده[۱]، محسن منصورسمائی[۲] و سودابه نوری جویباری[۳]

۱. استادیار دانشگاه جامع امام حسین(ع)، مرکز لیزر و اپتیک. تهران. ایران (نویسنده مسئول)Afard77@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده علوم پایه. تهران. ایرانmohsem.m.samae@gmail.com

۳. استادیار دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه– گروه فیزیک. بابلسر. مازندران. ایرانs.nouri@umz.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: بلایای طبیعی و غیرطبیعی همچون زلزله، سیل، طوفان، جنگ، اقدامات تروریستی و خرابکارانه و غیره همواره خسارات جانی و مالی فراوانی را به کشور تحمیل می‌کنند. احتمال بروز این بلایا در کلان شهر تهران، یکی از چالش‌ها و دغدغه‌های مهم پیش روی مردم و مسئولان شهری و کشوری است. تراکم بالای جمعیت و نبود ایمنی مناسب در بسیاری از سازه‌های مسکونی و تجاری و همچنین توسعه روز افزون سازه‌های شهری در پایتخت کشور، ما را بر آن داشت که در این مقاله به بررسی روش‌های مطمئن‌تر برای جلوگیری از خسارات احتمالی ناشی از این وقایع پرداخته و نمونه‌های استفاده شده از این روش‌ها را ارائه کنیم. سازه‌هایی همچون پل، برج، مترو، سد ذخیره کننده آب، لوله‌های انتقال انرژی، مراکز حساس تجاری، سیاسی، امنیتی، نظامی و غیره از جمله مکان‌هایی در شهر تهران هستند که خسارات وارد بر آن‌ها زیان‌بارتر و خطرناک‌تر از خسارات وارد بر اماکن عادی است. ازجمله مهم‌ترین کارها در حوزه مدیریت بحران و پدافند غیرعامل، انجام اقدامات مناسب و هشدار دهنده قبل از وقوع چنین حوادثی می‌باشد تا از وسعت تلفات بیشتر پیشگیری نماید. یکی از فناوری‌های نوین در زمینه کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی و غیرطبیعی که در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا به روش‌های دیگر ترجیح داده‌شده است، استفاده از حسگرهای توزیعی فیبر نوری می‌باشد.

روش: در این حسگرها پرتو لیزر وارد فیبر می‌شود و به دلیل وجود مواضع و موانع ذاتی درون فیبر، نور ورودی دچار پراکندگی شده و مقداری از آن بازتاب می‌شود. وجود اختلالاتی در سر راه فیبر، نور بازتابی از آن مکان مشخص را افزایش می‌دهد و بروز اختلال در آن مکان را آشکار می‌کند. کاربرد فراوان این حسگرها در زمینه‌های پدافندی موجب شده تا در این مقاله به بررسی برخی از انواع پرکاربرد آن‌ها بپردازیم.

یافته‌ها: در حسگرهای توزیعی فیبر نوری با اندازه‌گیری تغییرات استاتیکی و یا دینامیکی ایجاد شده در امتداد یک فیبر می‌توان یک سنسور توزیعی فیبری برای تغییرات دما، فشار، تنش، کرنش و لرزش‌های مکانی برای بیش از ده‌ها یا صدها کیلومتر ساخت.

نتیجه‌گیری: کنترل سازه‌های بزرگ در برابر لرزش، ترک و شکستگی‌های ایجاد شده ناشی از قدمت سازه‌ها، نشست، رطوبت، سرما و گرمای هوا، خوردگی و همچنین بلایای مختلف و هشدار وقوع حادثه از قبل به مراکز تعیین شده، ازجمله کاربردهای بسیار موثر این سیستم‌ها می‌باشد که می‌توان در سازه‌های تهران از آن‌ها استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت بحران شهر تهران، پدافند غیر عامل، حسگرهای فیبر نوری، حفاظت از سازه‌های شهری

◀ **استناد فارسی (شیوه APA، ویرایش ششم ۲۰۱۰):** ملک‌زاده، عبدالله؛ منصور سلمانی، محسن؛ نوری جویباری، سودابه (زمستان، ۱۳۹۶). حسگرهای توزیعی فیبرنوری روشی نوین برای کاهش خسارات ناشی از حوادث و بلایای مختلف در سازه‌های شهری تهران. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۷* (۴)، ۳۲۰-۳۳۱ .

Distributional Fiber Optic Sensors a New Method to Reduce Damages Caused by Various Disasters and Incidents in Tehran's Urban Constructions

A. Malakzadeh[1], M. Mansoursamaei[2], S. Nouri Jouybari[3]

1- Assistant professor, Imam Hossein Comprehensive University, Laser and Optic Center, Tehran, Iran (responsible autor)

2- PhD candidate, Imam Hossein Comprehensive University, Faculty of Basic Science, Tehran, Iran

3- Assistant professor of Mazandaran, Faculty of Basic Science, Department of Physic, Babolsar, Mazandaran, Iran

ABSTRACT

Background and objective: Natural and abnormal disasters such as earthquake, flood, storm, War, terroristic and subversive acts etc. always cause many vital and economical losses in any country. The occurrence probability of these incidents and/or disasters in the metropolis of Tehran is one of the main challenges and concerns of people and the government. High population density and lack of safety in many residential and commercial buildings as well as the increasing development of urban constructions in the capital, lead us to study more assured ways to prevent probable damages due to the disasters. Damages in some structures such as bridges, towers, subways, water storage dams, energy transmission pipelines, commercial, political, security and military centers etc. in Tehran have more risks than other structures. One of the most important actions in the crisis management and passive defense is doing appropriate and precautionary actions before happening of such incidents. One of the recent technologies to decrease damages caused by natural and abnormal disasters is optical fiber distributional sensors which preferred to any other methods in developed countries.

Method: The laser beam in distributional fiber optic sensors enters the fiber and due to the inherent barriers inside the fiber, the incoming light is dispersed and some of it reflects. The disorder in fiber increases the reflected light of definite points and shows the disturbance. The wide application of these sensors in defensive fields leads us to study some of the most functional ones in this essay.

Findings: By measuring the static and/or dynamic changes in the length of a fiber in distributional fiber optic sensors may be created more than hundred kilometers of distributional fiber sensor for changes such as temperature, pressure, stress, strain and quakes.

Results: Control the large structures against quakes, cracks and breakages due to the antiquity and subsides of the constructions, humidity, extreme weather conditions, corrosion as well as various disasters and also prediction of some disasters to definite centers are more effective functions of these systems which may use in Tehran's Structures.

Keywords: Tehran Crisis Management, Inactive Defense, Fiber Optic Sensors, Protecting Urban Structures.

▶**Citation (APA 6th ed.):** Malakzadeh A, Mansoursamaei M, Nouri Jouybari S. (2018, Winter). 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 (DPMK), 7*(4), 320-331.

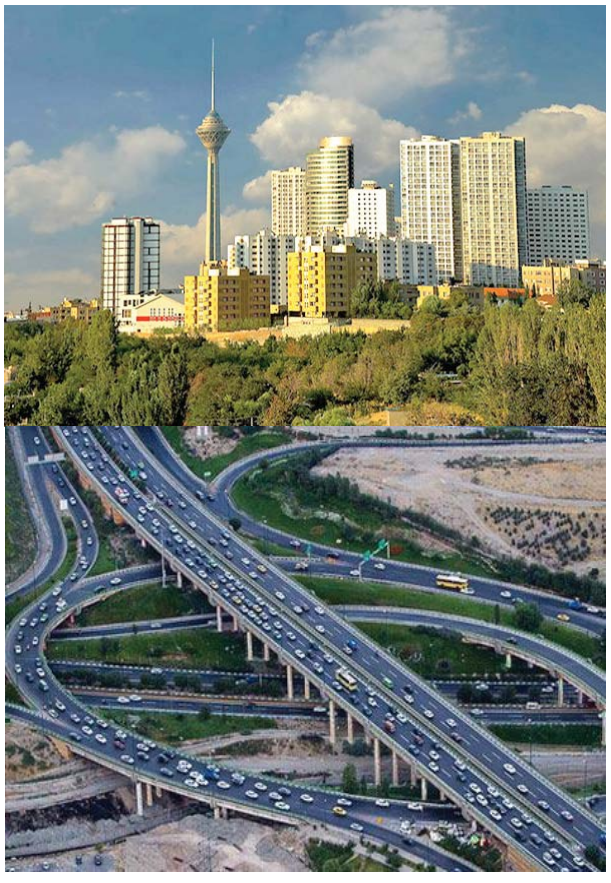
مقدمه

استفاده از فناوری‌های نوین برای پیشگیری و یا کاهش خسارات جانی و مالی ناشی ازحوادث و بلایای طبیعی و غیرطبیعی در محیط شهری از جمله اقداماتی است که باید در مدیریت و پدافند شهری مورد توجه قرار گیرد. پدافند، نوعی دفاع است که به کمک آن می‌توان از وارد آمدن خسارات مالی به اماکن و تأسیسات حیاتی، و تلفات انسانی ناشی از آن‌ها جلوگیری کرد یا میزان آن را به حداقل کاهش داد. همچنین می‌توان گفت پدافند به اقداماتی گفته می‌شود که منجر به کاهش آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات یا ایجاد امنیت در برابر آن‌ها می‌شود.

با توجه به موقعیت جغرافیایی و سیاسی شهر تهران و احتمال وقوع حوادثی همچون زلزله،سیل و طوفان در آن و همچنین امکان وقوع حوادث تروریستی و خرابکاری‌های این چنینی به نظر می‌رسد ایمن‌سازی سازه‌های شهری و مراکز مهم سیاسی و نظامی و تلاش برای کاهش خسارات و تلفات ناشی از این حوادث و بلایا، باید یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های پیش روی مسئولان این شهر و کشور باشد. نرخ آسیب پذیری و خسارات ناشی از بلایای طبیعی و غیرطبیعی، رابطه عکسی با رعایت اصول پیش‌بینی و پیشگیری در حوزه پدافند دارد. درست است که اقدامات پیشگیرانه در این حوزه ممکن است هزینه‌هایی دربرداشته باشد ولی باید بدانیم درصورت عدم انجام این اقدامات و وقوع حوادث، خساراتی چندین برابر را باید متحمل شویم.

باتوجه به وجود پل‌ها، برج‌ها و سازه‌های بسیار زیادی که در شهر تهران ساخته شده است و همچنین چند صد کیلومتر خطوط مترو و خطوط انتقال انرژی، سدهای ذخیره کننده آب و مراکز امنیتی و سیاسی فراوان در این شهر، می‌توان تصور کرد که شکسته شدن یک سد آب یا پل و یا فروریختن یک برج مسکونی یا تجاری، منحرف شدن قطار مترو از ریلی که شکسته شده و یا تخریب و انفجار یک مخزن ذخیره‌کننده نفت یا بنزین چه خسارات و تبعات مالی، امنیتی و روانی فراوانی را در پی خواهد داشت.

بنابراین حتی اگر بتوان چند دقیقه یا حتی چند ثانیه قبل از تخریب این سازه‌ها از وضعیت آن‌ها اطلاع پیدا کرد می‌توان با اقداماتی پیشگیرانه نظیر خروج مردم از مکان حادثه، متوقف کردن قطار مترو، باز کردن دریچه‌های سدها برای کاهش فشار وارده بر دیواره آن و یا متوقف کردن و تخلیه جریان انتقال انرژی از لوله‌های مربوطه و سایر اقدام دیگر از بیشتر شدن خسارات و تلفات ناشی از این بلایا تا حد زیادی جلوگیری کرد. اینجاست که اقدامات پیشگیرانه مدیریت بحران شهری نقش پررنگ‌تری را به خود می‌گیرد و بیشتر به اهمیت آن‌ها پی می‌بریم.



شکل ۱. لزوم استفاده از سیستم‌های حفاظتی آنلاین در پل‌ها و برج‌های تهران برای کنترل پیوسته وضعیت این سازه‌ها

برای ایمنی این سازه‌ها و اماکن روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از جدیدترین آن‌ها استفاده از حسگرهای توزیعی فیبر نوری است (جوارز، مایر، چویی و تیلور[1]، ۲۰۰۵ و بائو و چن[2]، ۲۰۱۱). ایمنی بسیار زیاد در برابر حک شدن سیستم، نداشتن امواج مضر، نصب آسان، دقت فضایی فوق‌العاده بالا و طول اندازه‌گیری مناسب ازجمله عواملی هستند که حتی کشورهای پیشرفته دنیا استفاده از این فناوری را به بسیاری از روش‌های دیگر ترجیح داده‌اند (تام و همکاران[3]، ۲۰۰۴ ، اینائودی و گلیسیک[4]، ۲۰۱۰ و کاساس و کروز[5]، ۲۰۰۳ ، تام و همکاران[6] ، ۲۰۰۷).

1. Juarez et al.
2. Bao & chen
3. Tam et al.
4. Inaudi & Glisic
5. Casas & Cruz
6. Tam et al.

شکل۲: پل مشهور بروکلین در نیویورک که در آن برای نمایش تغییرات دما و جابجایی پل از حسگر فیبر نوری استفاده می‌شود (فیشر، طالبی‌نژاد، انصاری و وانو ، ۲۰۱۰)

برای آشنایی بیشتر با حسگرهای توزیعی فیبر نوری و نحوه کار آن‌ها لازم است ابتدا در مورد پراکندگی‌در فیبرهای نوری و انواع آن و نیز چگونگی استفاده از فیبرها به عنوان حسگر،بیشتر بدانیم اما قبل از این کار، برای درک بهتر مطالب، در ادامه به معرفی برخی اصطلاحات و حسگرها، به همراه معادل لاتین آن‌ها، می‌پردازیم.

۱. OTDR- Φ(Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry): حسگر فیبر نوری (بازتاب‌گر نوری در حوزه‌ی زمان بر اساس فاز).

۲. BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry): حسگر فیبر نوری (بازتاب‌گر نوری در حوزه‌ی زمان بر اساس پراکندگی بریلوئن (خودبخودی)).

۳. BOTDA (Brillouin Optical Time-Domain Analysis): حسگر فیبر نوری (بازتاب‌گر نوری در حوزه‌ی زمان بر اساس پراکندگی بریلوئن (القایی)).

۴. BOCDR (Brillouin Optical Correlation-Domain Reflectometry): حسگر فیبر نوری (بازتاب‌گر نوری در حوزه‌ی همبستگی بر اساس پراکندگی بریلوئن (خودبخودی)).

۵. BOCDA (Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis): حسگر فیبر نوری (بازتاب‌گر نوری در حوزه‌ی همبستگی بر اساس پراکندگی بریلوئن (القایی)).

۶. PMF (Polarization Maintaining Fiber): فیبر نوری نگهدارنده قطبش که دارای دو راستای قطبش x و y است و قطبش نور وارد شده را بدون تغییر تا پایان حفظ می‌کند.

۷. CBTC (Communications Based Train Control): برقراری ارتباط جهت کنترل قطار.

۸. BDG (Brillouin Dynamic Grating): توری دینامیکی بریلوئن

۹. PCB (Printed Circuit Board): صفحه مدار چاپی، مجموعه‌ای از مدارهای الکتریکی است که قطعات الکترونیکی مانند مقاومت، خازن، آی سی و غیره بر روی آن مونتاژ شده و جهت استفاده در تجهیزات الکترونیکی به‌کار می‌رود.

۱۰. PD (Partial Discharge): تخلیه کننده‌های جزئی شارژ، دارای جرقه‌های الکتریکی کوچکی هستند که درون محیط عایق و با ولتاژ الکتریکی بالا رخ می‌دهند.

پراکندگی نور

هر موج نوری هنگام عبور از یک محیط مادی مانند فیبر دچار پراکندگی می‌شود. این پراکندگی‌ها انواع مختلفی دارند. پراکندگی‌رایلی[1] در اثر برخورد نور با ذرات کوچک‌تر و پراکندگی Mie در اثر برخورد نور با ذرات هم‌مرتبه و بزرگ‌تر از طول موج آن نور ظاهر می‌شوند. پراکندگی‌های دیگری نیز در محیط انتشار نور ممکن است روی دهد که برخلاف پراکندگی‌های فوق کشسان نبوده و باعث جابجایی طول موج نور بازگشتی می‌شوند، نظیر پراکندگی‌های رامان و بریلوئن. این جابجایی طول موج در پراکندگی رامان بیشتر از بریلوئن بوده (سه مرتبه بزرگتر) و برخلاف پراکندگی بریلوئن به زاویه فرودی نور نیز بستگی ندارد. همچنین آستانه توان موج پمپ نیز برای ایجاد پراکندگی بریلوئن نسبت به رامان به اندازه

1. Rayleigh

سه مرتبه کوچک‌تر می‌باشد. این دلایل نشان می‌دهد که میزان حساسیت پراکندگی بریلوئن نسبت به سایر پراکندگی‌ها بیشتر است (آگراوال[1]، ۲۰۰۷).

به‌دلیل حساسیت ساختار فیبر به پارامترهای خارجی نظیر دما، فشار، تنش، کرنش و غیره می‌توان از آن‌ها به عنوان حسگر نیز استفاده کرد. حسگرهای فیبری به سه دسته نقطه‌ای، تسهیمی و توزیعی تقسیم می‌شوند. حسگرهای نقطه‌ای و تسهیمی به ترتیب برای بررسی یک و چند نقطه در طول فیبر استفاده می‌شوند در حالی که حسگرهای توزیعی توانایی بررسی تمام نقاط در طول فیبر را دارند (زورنوزا و همکاران[2]، ۲۰۱۰). در این مقاله به بررسی حسگرهای توزیعی پرداخته خواهد شد.

حسگر OTDR-Φ معروف‌ترین حسگر توزیعی فیبر نوری است که بر اساس پراکندگی رایلی کار می‌کند. ویژگی بارز این حسگر طول سنجش آن است که به حدود ۲۰۰ کیلومتر با دقت چندین متر می‌رسد (جوارز و تیلور[3]، ۲۰۰۵ ، جوارز و تیلور، ۲۰۰۷ و ویلیام و همکاران[4]، ۲۰۰۸). حسگرهای BOTDR (ماوقان، کی و نیوسون[5]، ۲۰۰۱ ، الاهبدی، چو و نیوسون[6]، ۲۰۰۵ و الاهبدی، چو، نیوسون، وایت و هارتوگ[7]، ۲۰۰۴) و BOTDA (کوراشیما، هوریگوچی و تاتدا[8]، ۱۹۹۰ ، بائو و جکسون[9]، ۱۹۹۳، بائو، دهلیوایو، هرون، وب و جکسون[10]، ۱۹۹۵، فوآلنگ، بیوگنوت و توناز[11]، ۲۰۰۹ و جویباری، لطیفی، احمدلو و کریمی[12]، ۲۰۰۹) نیز از پرکاربردترین حسگرهای در حوزه زمان هستند که بر اساس پراکندگی بریلوئن کار می‌کنند. معمولاً در مواردی که دقت فضایی خیلی مهم باشد به سراغ حسگرهای برپایه پراکندگی بریلوئن خواهند رفت. طولانی‌ترین طول سنجش گزارش شده از حسگر BOTDR برابر ۱۵۰ کیلومتر با دقت فضایی ۵۰ متر است (الاهبدی و همکاران، ۲۰۰۵) همچنین برای حسگر BOTDA قدرت تفکیک فضایی ۰/۶متر و ۲ متر به ترتیب برای ۷۵ کیلومتر و ۱۰۰ کیلومتر گزارش شده است (دانگ، چن و بائو [13]، ۲۰۱۱). بهترین دقت حسگر BOTDA برای دقت فضایی ۵ سانتی‌متر بوده که در ۵ کیلومتر از طول سنجش به‌دست آمده است (فوآلنگ، تور، بیوگنوت و تونار[14]، ۲۰۱۰).

زمان اندازه‌گیری نسبتاً زیاد و دقت فضایی اندک در حسگرهای حوزه زمانی دو عیب بزرگی است که استفاده از این حسگرها را کمی محدود کرده است. حسگرهای در حوزه همبستگی مانند BOCDA و BOCDR که بر پایه همبستگی بین دو موج پمپ بنا شده‌اند، دارای دقت و سرعت آشکارسازی بالاتری هستند که همین امر باعث مقبولیت آنها شده است. این حسگرها باتوجه به نوع مدولاسیون امواج پمپ به دو دسته فازی و فرکانسی تقسیم می‌شوند. در روش فرکانسی بهترین وضوح فضایی به‌دست آمده برای حسگر BOCDA برابر ۲۰ و ۱ سانتی‌متر به ترتیب برای ۳۰۰ و ۴۰ متر از طول سنجش بوده است (سانگ و هوتات[15]، ۲۰۰۶) و در روش فازی نیز دقت فضایی ۱۴ و ۹ میلی‌متر به ترتیب برای ۴۶۰ و ۲۹۵ متر از فیبر سنجش بدست آمده است (پریمروف و تونار[16]، ۲۰۱۳).

حسگر توری دینامیکی بریلوئن یک روش تقریباً نوظهوری است که اولین بار سانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۸، آن را در فیبرهای نگهدارنده قطبش (PMF) گزارش دادند (سانگ، زو، هی و هوتات[17]، ۲۰۰۸). در این حسگرها علاوه بر کم بودن زمان پاسخ‌دهی، قدرت تفکیک فضایی نیز بسیار مناسب است. در چند سال اخیر با تکیه بر روش همبستگی فازی برای حسگر توری دینامیکی بریلوئن (دنیسوف[18]، ۲۰۱۵)، دقت فضایی در حد چند میلی‌متر برای چند ده کیلومتر از فیبر سنجش بدست آمده است. ازجمله این نتایج، به‌دست آمدن دقت فضایی ۸/۳ میلی‌متر برای ۱۷/۵ کیلومتر از فیبر سنجش بوده است (دنیسوف، سوتو و تونار[19]، ۲۰۱۶) که از آن می‌توان به عنوان بالاترین دقت فضایی

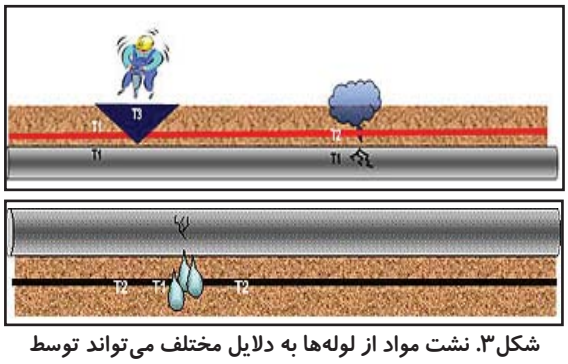
1. Agrawal, G. P.
2. Zornoza et al.
3. Juarez & Taylor.
4. William et al.
5. Maughan et al.
6. Alahbabi et al.
7. Alahbabi et al.
8. Kurashima et al.
9. Bao & Jackson.
10. Bao et al.
11. Foaleng-Mafang et al.
12. Jouybari et al.
13. Dong et al.
14. Foaleng et al.
15. Song & Hotate.
16. Primerov, & Thévenaz.
17. Song et al.
18. Denisov.
19. Denisov et al.

به‌دست آمده در چنین طول سنجشی نام برد.

مطالب بالا توضیحات مختصری بود درمورد برخی از حسگرهای توزیعی فیبری نوری که بیش‌ترین کاربرد را در زمینه مدیریت شهری دارند. در ادامه به بررسی ایمنی برخی از سازه‌ها در شهر تهران می‌پردازیم و از آنجا که ساختمان‌ها و برج‌ها، مترو، پل‌ها، مراکز مهم و حساس تجاری و امنیتی از جمله نقاطی در شهر تهران هستند که حفظ امنیت و ایمنی آن‌ها بسیار حائز اهمیت است، نشان می‌دهیم که استفاده از حسگرهای توزیعی فیبر نوری چگونه می‌تواند منجر به افزایش ایمنی این سازه‌ها شود.

روش

یکی از کاربردهای مهم حسگرهای توزیعی فیبری در فضای شهری تهران، استفاده از آن‌ها در لوله‌های انتقال نفت، گاز و شاه‌لوله‌های انتقال آب است. این لوله‌ها به دلایل مختلف ممکن است دچار آسیب، ترک‌خوردگی، پوسیدگی و یا شکستگی شده و نشت مواد از آن‌ها صورت گیرد. در صورت عدم تشخیص دقیق و به موقع، نشت این مواد از لوله‌ها می‌تواند بسیار خطرآفرین باشد و فضای شهری را با مشکلات جدی روبه‌رو کند ولی اگر در کمترین زمان ممکن، مکان دقیق نشت این مواد مشخص شود، می‌توان به راحتی و قبل از اینکه کار تعمیر خیلی سخت شود این نقایص را برطرف کرد. در این روش، در کنار لوله‌ها یک یا چند فیبر نوری کاشته و یا دفن می‌شود تا نشت مواد از آن‌ها را آشکار کرده و مکان دقیق نشت را به ما بگوید (اینائودی و گلیسیک، ۲۰۱۰ و فرینگس[1]، ۲۰۱۱).



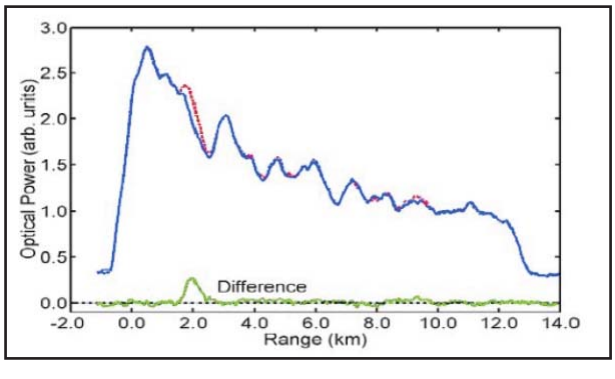
شکل۳. نشت مواد از لوله‌ها به دلایل مختلف می‌تواند توسط حسگرهای فیبری شناسایی شود

پالس‌های نوری حاصل از یک لیزر کاملاً همدوس و با پهنای خط باریک به داخل فیبر نوری وارد شده و با استفاده از اختلاف فاز بین پرتو تابشی و بازتابی، دستگاه Φ -OTDR اطلاعات لازم برای مکان نشت و یا آسیب را به ما می‌دهد. نشت مواد از لوله‌ها باعث لرزش محیط و ایجاد تغییرات فازی در پرتو بازتابی شده و در نتیجه اختلال و مکان آن در طول فیبر، با مقایسه پالس‌های متوالی تشخیص داده می‌شود (پنگ و همکاران[2]، ۲۰۱۴ و واو و همکاران[3]، ۲۰۱۵).

اساس Φ -OTDR بر پراکندگی امواج رایلی است و پرتوهای بازگشتی ناشی از این پراکندگی به بازپراکندگی رایلی معروف‌اند. برای به‌دست آوردن مکان اختلال، با توجه به سرعت نور در فیبر و بازه زمانی پالس‌های متوالی و اینکه نور، دو بار این مسیر را طی می‌کند، می‌توان از معادله روبه رو استفاده کرد (جوارز و تیلور، ۲۰۰۷ و ویلیام و همکاران، ۲۰۰۸):

$$d=vt/2 \qquad (۱)$$

در این رابطه v سرعت نور در فیبر و t زمان رفت و برگشت نور است. همانطور که در شکل۴ می‌بینیم، در ۱۴ کیلومتر از یک فیبر آزمایشگاهی، مکان ایجاد اختلال توسط دستگاه Φ -OTDR به خوبی نشان داده شده است:



شکل۴. دو پالس متوالی و تفاوت بین آن‌ها (ویلیام و همکاران، ۲۰۰۸)

در شکل۴ منحنی‌های آبی و قرمز دو پالس متوالی هستند که پالس آبی قبل از وقوع اختلال و پالس قرمز بعد از آن را نمایش می‌دهند. همانطور که مشخص است ایجاد تغییر در منحنی قرمز نسبت به آبی نشان‌دهنده وقوع یک اختلال در آن نقطه است. با پردازش و آنالیز اطلاعات به‌دست آمده از این دو منحنی و بررسی

1. Frings.

2. Peng et al.

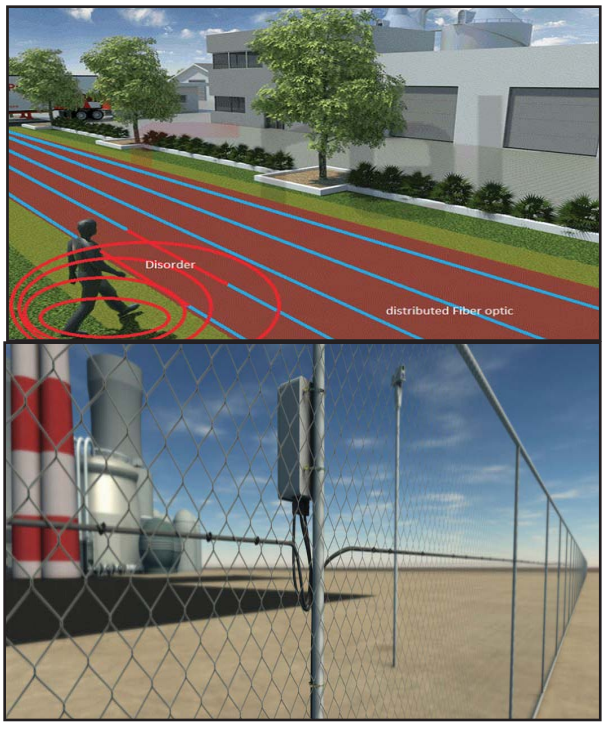
3. Wu et al.

میزان اختلاف آن‌ها درمی‌یابیم که در منحنی پایینی (سبز)، میزان شدت اختلال و مکان آن دقیقاً مشخص شده است. منحنی پایینی، منحنی است که دستگاه پس از پردازش تمام اطلاعات به ما می‌دهد.

یک فیبر نوری مناسب، به کمک یک سری از تقویت‌کننده‌ها، می‌تواند تا حدود ۲۰۰ کیلومتر از این لوله‌ها را بررسی کند. یکی از نکات مهم درمورد این روش این است که اگر فیبر مدفون شده به هر دلیلی پاره شود، این طور نیست که نظارت ما بر تمام طول فیبر از بین برود، بلکه تا آنجایی که هنوز فیبر سالم است دستگاه به کار خود ادامه می‌دهد. مزیت‌های فراوان این روش نسبت به روش‌های دیگر موجب شده تا از این فناوری به عنوان یکی از اولویت‌های اصلی برای کنترل ایمنی در لوله‌های انتقال انرژی استفاده شود (ویلیام و همکاران، ۲۰۰۸، راجیو، کودیکارا، چیو و کوین[1]، ۲۰۱۳ و چوی، جوارز و تیلور[2]، ۲۰۰۳).

شکل۵. استفاده از حسگر فیبر نوری در لوله‌های انتقال انرژی برای شناسایی محل شکستگی یا ترک خوردگی (اینائودی و گلیسیک، ۲۰۱۰)

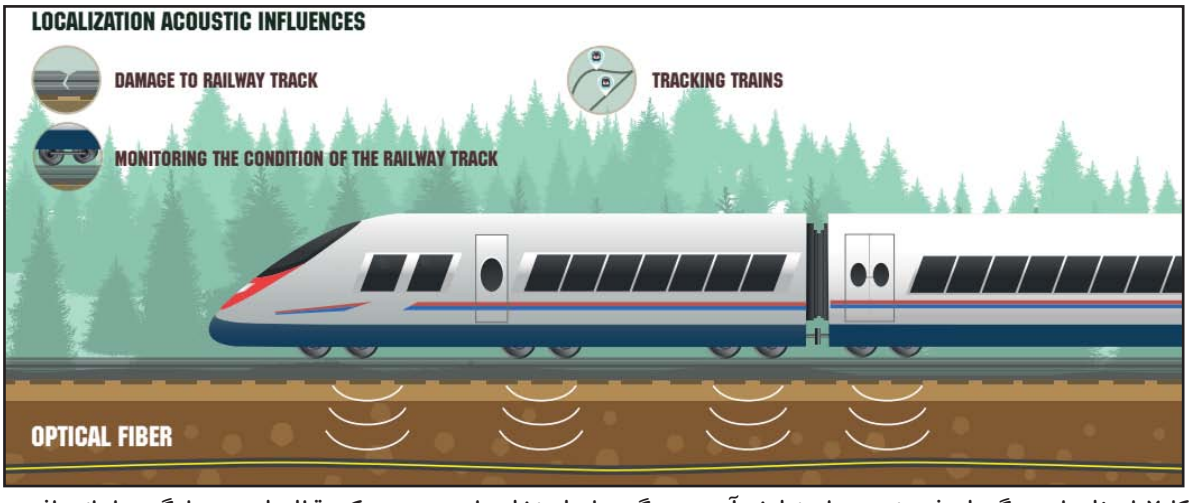
از این حسگرها می‌توان برای ایمنی و حفاظت از مراکز حساس تجاری، سیاسی، امنیتی و نظامی که تعداد آن‌ها در شهر تهران بسیار زیاد است، نیز استفاده کرد. حفاظت از یک نیروگاه مهم هسته‌ای در برابر ورود افراد متجاوز و خرابکار و یا حفاظت از یک پادگان نظامی، محل سکونت اشخاص مهم سیاسی و امنیتی، کنترل دقیق ورود و و خروج افراد از یک محوطه تحت نظر مثل پالایشگاه یا باند فرودگاه و مناطقی که ورود افراد به آن‌ها می‌تواند خطرآفرین باشد و بسیاری از این اقدامات می‌تواند به کمک این حسگرها کنترل شود.



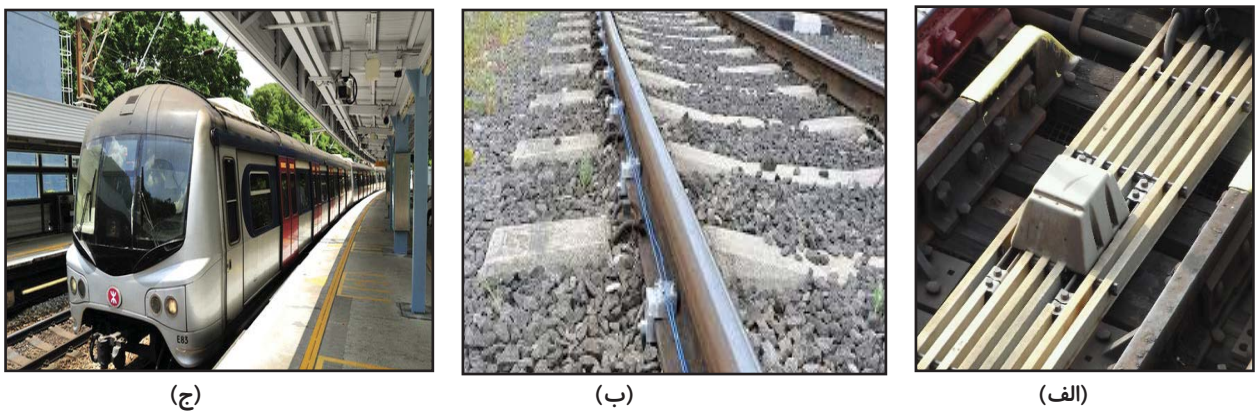
شکل۶. استفاده از حسگرهای فیبری برای حفاظت از مناطق حساس و مهم (زاستاکوفسکی و زیسکوفسکی[3]، ۲۰۰۵)

استفاده از این حسگرها در مرز بین کشورها، برای کنترل ورود و خروج قاچاقچیان و افراد خرابکار معمولاً در زیر خاک و دور از چشم آن‌ها دفن می‌شود (اوون، داک وورث و ورسلی و[4]، ۲۰۱۲). علاوه بر این روش، گاهی برای کنترل مراکز مهم، این حسگرها را بر روی فنس‌ها نیز نصب می‌کنند تا درصورت ورود افراد و بالا رفتن از فنس، متوجه شده و هشدار دهد (زاستاکوفسکی و زیسکوفسکی، ۲۰۰۵). حسگرهای برپایه پراکندگی رایلی، به دلیل مقرون به صرفه بودن و همچنین طول سنجش بسیار زیاد، معمولاً برای پایش مرزها و لوله‌های انرژی و یا کنترل خطوط راه آهن که نیاز به طول بالایی دارند استفاده می‌شوند. این حسگرها دقت فضایی

1. Rajeev et al.
2. Choi et al.
3. Szustakowski & Zyczkowski.
4. Owen et al.



شکل۷: استفاده از حسگرهای فیبر نوری برای نمایش آسیب‌دیدگی ریل‌ها و نشان دادن مسیر حرکت قطارها جهت جلوگیری از انحراف و برخورد آن‌ها با یکدیگر (تام و همکاران ، ۲۰۰۷)



(ج) (ب) (الف)

شکل۸. خطوط ریلی در هنگ‌کنگ (الف) که از حسگرهای فیبری (ب) بجای سیستم CBTC (ج) استفاده می‌کنند (تام و همکاران، ۲۰۰۴ و هارتونگ و همکاران، ۲۰۰۶)

خیلی خوبی ندارند و معمولاً در چند صد کیلومتر از فیبر سنجش دارای دقت فضایی چند ده متر هستند که البته برای این کاربردها مناسب است.

از دیگر حسگرهای توزیعی فیبر نوری که به دلیل دقت فضایی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، حسگرهای بر پایه پراکندگی بریلوئن می‌باشند. مفهوم استفاده از پراکندگی بریلوئن در حسگرهای فیبر نوری برای اولین بار در سال ۱۹۸۹ پیشنهاد شد (هوریگوچی و تاتدا[1]، ۱۹۸۹). این حسگرها به مراتب نسبت به حسگرهای رایلی دارای دقت فضایی بیشتری هستند تا جایی که برای کمتر از ۲۰ کیلومتر به دقت فضایی در حد میلی‌متر نیز رسیده‌اند (دنیسوف و همکاران، ۲۰۱۶). به دلیل افزایش روزافزون جمعیت و ساخت سازه‌های عظیم در شهرها و اینکه در صورت آسیب و تخریب هر یک از این سازه‌ها ممکن است چه خسارات جبران ناپذیری به بار بیاید، معمولاً در سازه‌های شهری از حسگرهایی استفاده می‌شود که دارای بیشترین دقت در اندازه‌گیری هستند. به همین دلیل حسگرهای در حوزه پراکندگی بریلوئن، بیشترین کاربرد را نسبت به سایر حسگرها در فضاهای شهری دارند.

یکی دیگر از کاربردهای حسگرهای توزیعی فیبر نوری، استفاده از آن‌ها در خطوط ریلی برای کنترل ترافیک و اعلام هشدار در هنگام خطر است (تام و همکاران، ۲۰۰۴). برای مثال در مترو تهران و بسیاری از شهرهای جهان از سیستم CBTC[2] برای کنترل ترافیک در بین قطارها استفاده می‌شود (شکل ۷).

این سیستم ظرفیت قطارها را با کاهش فاصله زمانی بین آن‌ها افزایش می‌دهند. در این سیستم، حسگرهای CBTC بر روی ریل‌ها

1. Horiguchi, & Tateda.

2. Communications Based Train Control

نصب شده و در فواصل مشخصی از هم قرار می‌گیرند، با رسیدن و برخورد قطار به این حسگرها، می‌توان مکان دقیق و سرعت قطار را به‌دست آورد. اطلاعات به‌دست آمده از این حسگرها، به کمک آنتن‌ها و کابل‌هایی که تعبیه شده است، توسط امواج وای‌فای، به سیستم مرکزی و اتاق کنترل می‌رسد. به کمک سیستم CBTC قطارها نمی‌توانند از یک فاصله‌ی مشخصی به یکدیگر نزدیک‌تر شوند (هارتونگ، گویل و ویجسکرا[1]، ۲۰۰۶ و مرادی، علمایی و فاضلی، ۱۳۹۱).

اما موضوعی که همواره باعث نگرانی سازندگان سیستم هوشمند CBTC بوده است، حک شدن آسان و ایجاد اختلال در این داده‌ها، به دلیل انتقال آن‌ها به کمک امواج وای فای است. از دیگر معایب این سیستم این است که اگر یکی از حسگرها از کار بیفتد، ارتباط بین حسگرهای قبل و بعد از آن قطع خواهد شد. با توجه به سرعت بالای قطارها و لزوم برخورد آن‌ها با این حسگرها، امکان آسیب دیدن و حتی تخریب این حسگرها چندان دور از ذهن نخواهد بود(شکل ۸) .

اما استفاده از حسگرهای فیبری، هیچ‌یک از این معایب را نخواهد داشت زیرا در این حسگرها امواج ارسالی، در فضای آزاد منتقل نخواهند شد که امکان حک شدن آن‌ها وجود داشته باشد، همچنین این فیبرها در کنار یا زیر ریل قرار می‌گیرند و به‌هیچ وجه با قطارها در تماس نیستند که احتمال قطع شدن ارتباط وجود داشته باشد. این اعتماد به حسگرهای فیبری باعث شده که حتی بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا برای کنترل ترافیک ریلی در مسیرهای بین شهری، که سرعت قطارهای بسیار بیشتر از قطارهای شهری است و احتمال شکستگی ریل‌ها بخاطر قرار داشتن در محیط‌های باز و بدون کنترل بیشتر است، از آن‌ها استفاده کنند (تام و همکاران، ۲۰۰۷ و فیلوگرانو و همکاران[2]،۲۰۱۲).

از دیگر مواردی که رعایت آن در شهر تهران بسیار لازم و ضروری است، کنترل ساختمان‌ها و برج‌های مسکونی و تجاری در برابر خطرات احتمالی است. برج‌ها و ساختمان‌های مسکونی یا تجاری در تهران همانند برج میلاد، علاءالدین، بین‌الملل، کاسپین وغیره ازجمله سازه‌هایی هستند که کنترل وضعیت و حفظ ایمنی آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. تنها اصولی که در ساخت این بناها رعایت می‌شود، یک سری از قوانین و مقررات است که باید در مسیر ساخت آن‌ها اجرا شود و بعد از ساخت، دیگر هیچ روش نظارتی و کنترلی دقیق بر آن‌ها وجود ندارد (عباس زاده، ۱۳۸۹). این درحالی است که خیلی از ساختمان‌های مهم دنیا بعد از ساخته شدن، همواره به کمک این حسگرها در برابر لرزش‌ها و ترک‌های احتمالی کنترل می‌شوند. برخی از این حسگرها در مراحل ساخت و برخی بعد از ساخته شدن بنا بر روی آن نصب می‌شوند (برمر و همکاران[3]، ۲۰۱۶). نیاز به کنترل ایمنی، تعمیر و بهبود سازه‌های بتنی هر ساله با زیاد شدن عمر آن‌ها بیشتر می‌شود. استفاده از حسگرهای فیبر نوری در تشخیص خوردگی فولاد و یا میزان کرنش و ترک در بتن‌ها به دلیل قدرت تفکیک فضایی بالا و کم‌هزینه بودن این حسگرها امری مفید است. زیرا این حسگرها به آسانی در داخل بتن تعبیه و برای اندازه‌گیری مستقیم میزان تغییرات در سازه‌های بتنی به‌کار می‌روند و بروز تغییرات ساختاری در آن‌ها را تشخیص می‌دهند (رحیمی و صحرایی، ۱۳۹۰).

شکل۹. استفاده از حسگرهای فیبری برای کنترل امنیت در برج‌ها (فوهر، هاستون، کاجنسکی و آمبروز[4]، ۱۹۹۲)

1. Hartong et al.
2. Filograno et al.
3. Bremer et al.
4. Fuhr et al.

از دیگر سازه‌هایی که کنترل وضعیت و حفظ امنیت آن‌ها با گذشت زمان بسیار مهم و حیاتی است، سازه‌هایی همچون پل‌ها، سدهای ذخیره کننده آب و مخازن انرژی هستند. پل‌های صدر، مدیریت، حافظ و غیره، سدهای امیرکبیر، لتیان، لار و غیره و همچنین مخازن بسیار زیادی که برای نگهداری نفت، بنزین و گاز در سرتاسر تهران استفاده می‌شوند، بسیار آسیب‌پذیر هستند. برای ایمنی این سازه‌ها نیز می‌توان از حسگرهای توزیعی فیبرنوری استفاده کرد. حسگرهای توزیعی بر مبنای توری دینامیکی بریلوئن (BDG[1]) که دارای قدرت تفکیک فضایی و سرعت پاسخ‌دهی فوق‌العاده بالایی هستند از جمله حسگرهایی به‌شمار می‌آیند که برای ایمنی سدها و پل‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (دانگ و جیانگ[2]، ۲۰۱۴).

شکل ۱۰. نمایی از ترک‌خوردگی سدها و پل‌ها که با استفاده از حسگرهای فیبری قابل شناسایی هستند (اینائودی، کاتون، فیگینی و سا[3]، ۲۰۱۳)

این نوع حسگر همچنین می‌تواند در پایش سلامت ساختارهای دیگر مثل برج‌ها و همچنین تست‌استحکام بدنه هواپیما در تونل باد نیز مورد استفاده قرار بگیرد (بائو و چن، ۲۰۱۱). حسگر توزیعی بر پایه توری دینامیکی بریلوئن علاوه بر قدرت تفکیک فضایی در حد یک سانتی‌متر، دارای زمان پاسخ‌دهی بسیار کوتاه یا به عبارتی سرعت بالا در پاسخ‌دهی نیز است که در اقدامات پدافندی بسیار حائز اهمیت است.

با نصب این حسگرها بر روی تمام سطح سدها و یا در زیر پل‌ها، هرگونه لرزش و یا ترک‌خوردگی بر روی این سطوح توسط حسگر، تشخیص داده شده و به مراکز کنترل اعلام می‌شود. در این حسگرها از دو موج پمپ برای ساختن توری و یک موج پروب برای خواندن آن استفاده می‌شود. موج پروب فقط با توری ایجاد شده که در نقطه نشت یا ترک خوردگی متمرکز شده است، برهمکنش کرده و مقداری از آن در اثر بازتاب از توری برمی‌گردد. با آنالیز موج پروب بازگشتی می‌توانیم مکان دقیق نشت را به‌دست آوریم درحالیکه در سایر حسگرهای فیبری، همواره موج پروب به زمان بیشتری برای پاسخ‌دهی نیاز دارد (بائو و چن، ۲۰۱۱ ، سانگ[4]، ۲۰۱۴ و جویباری، لطیفی و چناری[5]، ۲۰۱۲).

از دیگر کاربردهای حسگرهای توزیعی فیبر نوری حفاظت از کابل‌های فشار قوی برق در برابر داغ شدن است. با کنترل ترانسفورماتورهای برق به کمک این حسگرها، می‌توان از داغ شدن بیش از حد کابل‌های فشار قوی جلوگیری کرد (ریبیرو، ایرا، سواسا، گوئریرو و سالکدو[6]، ۲۰۰۸، بتا، پیتروسانتو و اسکاگلیون[7]، ۲۰۰۰، ساراوولاک[8]، ۱۹۹۴ ، هامون و استوکس[9]،۱۹۹۶).

به دلیل توسعه شهر تهران و افزایش منازل مسکونی و کارخانه‌های صنعتی در آن، استفاده حداکثری از منابع و لوازم ولتاژ بالا برای تأمین، انتقال و توزیع انرژی برق یکی از مسائلی است که باید به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد. همچنین گرمای هوا، رعد و برق، طوفان، گردوغبار و آلودگی هوا ازجمله مواردی هستند که منجر به کاهش عملکرد این لوازم و قطعات خواهند شد. هر یک از این عوامل به تنهایی می‌توانند باعث داغ شدن ترانسفورماتورها و درنتیجه کابل‌های فشار قوی برق شوند.

1. Brillouin Dynamic Grating
2. Dong & Jiang.
3. Inaudi et al.
4. Song.
5. NouriJouybari et al.
6. Ribeiro et al.
7. Betta et al.
8. Saravolac.
9. Hammon, & Stokes.

شکل ۱۱. استفاده از حسگرهای فیبری برای آشکارسازی و کنترل نقاط داغ در ترانسفورماتورهای برق (ریبیرو و همکاران، ۲۰۰۸)

اخیرا استفاده از روغن‌های PCB[1] در ترانسفورماتورهای با سطوح توان بالا، محدود شده و تولید آن‌ها نیز در حال ممنوع شدن می‌باشد بنابراین ترانسفورماتورهای خشک که سازگاری بیشتری با محیط دارند، امروزه بیشتر استفاده می‌شوند. این ترانس‌ها به تخلیه جزئی (PD[2]) و اضافه گرما بسیار حساس هستند. برای پیشگیری از چنین حوادثی، نگهداری ترانسفورماتورها توسط یک سیستم پایش، لازم و ضروری است اما از آنجا که تاکنون برای آن‌ها هیچ سیستم پایشی که در بازار در دسترس باشد، وجود ندارد تا قابلیت اطمینان و طول عمر دستگاه‌ها را افزایش دهد، بنابراین معمولاً ترانسفورماتورها از سرویس خارج می‌شوند و از آنجا که اثر الکترومغناطیسی ترانسفورماتور، بر روی این حسگرهای فیبری تاثیری نداشت، برای حل این مشکل، یک سیستم جدید پایش که به کمک سنسورهای فیبر نوری به‌طور لحظه‌ای، اضافه گرما و اتصال کوتاه داخل دورها را تشخیص می‌دهد، ارائه شد که به دلیل قیمت ارزان سیستم، می‌توان از آن برای اغلب ترانسفورماتورهای خشک استفاده کرد تا از وارد آمدن خسارات بیشتر جلوگیری شود (هنرمند، ۱۳۸۳).

وجود اضافه گرمای موضعی به خاطر ایجاد اتصال کوتاه داخل دورها که یک مرحله قبل از شکست عایقی به‌وجود می‌آید، است که می‌تواند با جدا ساختن ترانسفورماتور، از وارد آمدن خسارات مهم به آن جلوگیری کند .اساس عملکرد این سیستم بر پایه تغییر خواص نور منتشر شده در فیبر، به دلیل تغییر دمای محیط است. اگر دما در سطح حسگر افزایش یابد، به‌دلیل بازتابش بد نور، افت نور افزایش می‌یابد. این افزایش بیشتر دما، باعث وفقه در انتقال نور شده، بنابراین سیگنالی در طرف مقابل دریافت نمی‌گردد، یا سیگنال دریافتی بسیار ضعیفی می‌شود که در این حالت نیاز به ایجاد آلارم به دلیل اضافه گرما لازم می‌شود (هنرمند، ۱۳۸۳).

یافته‌ها

موارد بالا تنها بخش کوچکی از کاربردهای حسگرهای فیبری بود که در سازه‌های شهری به طور عملی استفاده شده‌اند. هرکدام از این حسگرها با توجه به ویژگی‌هایی که دارند، برای کاربردهای مختلفی استفاده می‌شوند. مثلاً در مواردی همچون حفاظت از صدها کیلومتر لوله انتقال انرژی که در آن، طول سنجش از اهمیت بیشتری نسبت به دقت فضایی برخوردار است، از حسگرهایی استفاده می‌شود که الزاماً طول سنجش در آن‌ها زیاد باشد. در خطوط مترو که طول آن‌ها به چند ده کیلومتر می‌رسد، باید از حسگرهایی استفاده شود که علاوه بر طول سنجشی در حد چند ده کیلومتر، دقت فضایی بالایی نیز داشته باشند. همچنین درمورد سدها و پل‌ها که چند صد متر حسگر برای آن‌ها کافی است، در اینجا رقابت بیشتر بر سر دقت فضایی خواهد بود.

با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد حسگرهای توزیعی فیبر نوری و مزیت‌های بی‌شمار آن‌ها نسبت به سایر حسگرهایی که در حال استفاده در بخش‌های مختلف صنعت و سازه‌های شهری هستند و همچنین تأمل در این نکته که این حسگرها آزمایش خود را در بسیاری از کشورهای دنیا پس داده‌اند و به صورت گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند،

1. Printed Circuit Board
2. Partial Discharge

می‌توان با اطمینان کامل، از آن‌ها در زمینه‌های مختلف به‌ویژه در اقدامات پدافندی همچون حفاظت از مراکز مهم سیاسی و نظامی و همچنین مدیریت شهری در کلان‌شهر تهران استفاده کرد و میزان امنیت و ایمنی شهروندان در سطح شهر را افزایش داد.

نتایج

باتوجه به موقعیت جغرافیایی و سیاسی شهر پرجمعیت تهران به عنوان پایتخت جمهوری اسلامی ایران و احتمال وقوع حوادث طبیعی و غیرطبیعی مختلف در آن، اهمیت پیشگیری از خسارات جانی و مالی احتمالی ناشی از بلایا، یکی از مهم‌ترین اقداماتی است که باید مورد توجه مدیران شهری قرار بگیرد. همانگونه که توضیح داده شد، یکی از فناوری‌های نوین در زمینه کاهش خسارات ناشی از بلایا که در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا به روش‌های دیگر ترجیح داده‌شده است، استفاده از حسگرهای توزیعی فیبر نوری است. کنترل سازه‌های بزرگ همچون سدها، پل‌ها، ریل‌های قطار، برج‌ها و غیره در برابر لرزش، ترک و شکستگی‌های ایجاد شده ناشی از بلایای مختلف و هشدار آن به مراکز تعیین شده، ازجمله کاربردهای بسیار مؤثر این سیستم‌ها می‌باشد. این حسگرها ثابت کردند که یک ابزار قدرتمند برای اندازه‌گیری فشار، لرزش، تنش، کرنش و غیره هستند که هر روز بر قابلیت آن‌ها افزوده می‌شود. طول سنجش بیش ۱۰۰ کیلومتر با دقت فضایی چندین متر، همچنین به‌دست آمدن دقت فضایی در حد چند میلی‌متر برای چند ده کیلومتر از فیبر سنجش، نشان از توسعه روز افزون و تمایل جهانی به این حسگرها دارد.

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 سرمایه گذاری 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 شهر تهران و یا سایر نقاط کشور می‌باشد. در جدول زیر دقت اندازه‌گیری و طول سنجش برای حسگرهای فیبری توزیعی با ذکر موارد استفاده از آن‌ها در سازه‌های مختلف شهر تهران و همچنین مزیت‌ها و معایب آن‌ها پیشنهاد شده است.

جدول ۱. ویژگی حسگرهای فیبری مختلف

حسگر فیبری	بیشترین دقت اندازه‌گیری فضایی	بیشترین طول قابل اندازه گیری	قابل استفاده در	مزیت‌ها	معایب
Φ-OTDR	چند ده متر	چند صد کیلومتر	پایش لوله‌های انتقال انرژی، حفاظت از ریل‌های قطار، مراکز و تأسیسات مهم نظامی، سیاسی و.غیره	طول سنجش زیاد و مقرون به صرفه بودن	کم بودن دقت فضایی
BOTDR و BOTDA	چند متر	چند ده کیلومتر	پایش لوله‌های انتقال انرژی، حفاظت از پل‌ها و ریل‌ها، مراکز و تأسیسات مهم نظامی، سیاسی و غیره	دقت نسبتاً خوب	طول سنجش نسبتاً پایین
BOCDR و BOCDA	چند ده سانتی‌متر	چند ده متر	سدهای آب و مواردی که در طول کم دقت خیلی بالایی نیاز نباشد	دقت نسبتاً خوب، زمان پاسخ‌دهی کوتاه	کم بودن طول سنجش و پرهزینه بودن
BDG (توری دینامیکی بریلوئن)	۱ سانتی‌متر	کمتر از ۲۰ کیلومتر	حفاظت از پل‌ها، برج‌ها و سدهای ذخیره‌کننده آب	حساسیت و دقت بالا، زمان پاسخ‌دهی کوتاه، طول سنجش مناسب	پرهزینه بودن ساخت
FBG (توری براگ فیبری)	چند سانتی‌متر	چند ده کیلومتر	حفاظت از پل‌ها، برج‌ها، ترانسفورماتورهای برق و سدهای ذخیره‌کننده آب	حساسیت، دقت و طول سنجش مناسب	سخت بودن فرآیند ساخت توری براگ

منابع

رحیمی، صابر و صحرایی،(۱۳۹۰) . "کنترل ایمنی سازه های بتنی با حسگر فیبر نوری"، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، رشت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لشت نشا، بازیابی از
https://www.civilica.com/Paper-OMRANTOSEE01-OMRANTOSEE01_270.html

عباس زاده، عبدالرضا (۱۳۸۹). "قوانین و مقررات ساخت و ساز و نظارت اصولی بر آن‌ها بازیابی از
https://shahri.ostan-khz.ir/LinkClick.aspx?fileticket=9ZGJEPij8ms

مرادی، حمید؛ علمایی، سیداحمد و فاضلی، مهدی (۱۳۹۱). "کاربرد سیستمهای CBTC در مدیریت هوشمند ترافیک ریلی"، یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران، بازیابی از
https://www.civilica.com/Paper-TTC11-TTC11_137.html

هنرمند، محمداسماعیل (۱۳۸۳). "روش حفاظت از ترانسفورماتور خشک ۱توزیع"، نهمین کنفرانس سراسری شبکه های توزیع نیروی برق، زنجان، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، دانشگاه زنجان، بازیابی از
https://www.civilica.com/Paper-EPDC09-EPDC09_041.html

Agrawal, G. P. (2007). Nonlinear fiber optics. Academic press, pp.2-3. Retrieved from: ISBN: 0-12-045143-3

Alahbabi, M. N., Cho, Y. T., Newson, T. P., Wait, P. C., & Hartog, A. H. (2004). Influence of modulation instability on distributed optical fiber sensors based on spontaneous Brillouin scattering. JOSA B, 21(6), pp. 1156-1160. Retrieved from: doi: 10.1364/JOSAB.21.001156

Alahbabi, M. N., Cho, Y. T., & Newson, T. P. (2005). 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification. JOSA B, 22(6), pp. 1321-1324. Retrieved from: doi=10.1364/JOSAB.22.001321

Bao, X., Webb, D. J., & Jackson, D. A. (1993). 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber. Optics letters, 18(7), pp. 552-554. Retrieved from: doi: 10.1364/OL.18.000552

Bao, X., Dhliwayo, J., Heron, N., Webb, D. J., & Jackson, D. A. (1995). Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering. Journal of lightwave technology, 13(7), pp. 1340-1348. Retrieved from: doi: 10.1109/50.400678

Bao, X., & Chen, L. (2011). Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors. Sensors, 11(4), pp. 4152-4187. Retrieved from: doi: 10.3390/s110404152

Betta, G., Pietrosanto, A., & Scaglione, A. (2000). An enhanced fiber optic temperature sensor system for power transformer monitoring. In Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE (Vol. 1, pp. 153-158). IEEE. Retrieved from: doi: 10.1109/IMTC.2000.846845

Bremer, K., Wollweber, M., Weigand, F., Rahlves, M., Kuhne, M., Helbig, R., & Roth, B. (2016). Fibre optic sensors for the structural health monitoring of building structures. Procedia Technology, 26, pp.524-529. Retrieved from: doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.065Casas, J. R., & Cruz, P. J. (2003). Fiber optic sensors for bridge monitoring. Journal of bridge engineering, 8(6), 362-373. Retrieved from: doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(362)

Choi, K. N., Juarez, J. C. and Taylor.H. F.,(2003). Distributed fiber optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters, in Proceedings of the SPIE, Unattended Ground Sensor Technologies and Applications V, vol. 5090, pp. 134-141, 2003. Retrieved from: doi: 10.1117/12.484911

Denisov, A. (2015). Thesis title: Brillouin dynamic gratings in optical fibres for distributed sensing and advanced optical signal processing. Retrieved from: https://infoscience.epfl.ch/record/212806

Denisov, A., Soto, M. A., & Thévenaz, L. (2016). Going beyond 1000000 resolved points in a Brillouin distributed fiber sensor: theoretical analysis and experimental demonstration. Light: Science and Applications, 5, e16074. Retrieved from: doi: 10.1038/lsa.2016.74

Dong, Y., Chen, L., & Bao, X. (2011). Time-division multiplexing-based BOTDA over 100km sensing length. Optics Letters, 36(2), pp. 277-279. Retrieved from: doi: 10.1364/OL.36.000277

Dong, Y., Jiang, T. et al.,(2014). Sub-MHz ultrahigh-resolution optical spectrometry based on Brillouin dynamic gratings," Opt. Lett., 39, 10, pp 2967–2970. 2014. Retrieved from: doi: 10.1364/OL.39.002967

Filograno, M. L., Guillén, P. C., Rodríguez-Barrios, A., Martín-López, S., Rodríguez-Plaza, M., Andrés-Alguacil, Á., & González-Herráez, M. (2012). Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors. IEEE Sensors Journal, 12(1), pp.85-92. Retrieved from: doi: 10.1109/JSEN.2011.2135848

Fischer, C., Talebinejad, I., Ansari, F., & Yanev, B. (2010, August). Fiber Optic Monitoring of the Masonry Arch Approach Spans in the Brooklyn Bridge. In Structural Materials Technology 2010. Retrieved from: https://ndtlibrary.asnt.org/2010/