

A Review on Novel Road Structural Health Monitoring Methods that are Used inside the Pavement

Pooyan Ayar*, Mohammad Khabbazi Alavi

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
ayar@iust.ac.ir

Abstract

In recent decades, the pavement health monitoring issue has attracted the attention of many researchers and has led to new advances and technologies. In this study, while examining the monitoring concept, the existing methods for monitoring the structural health of pavements have been categorized. To date, two general monitoring approaches from surface and inside the pavement have been used to assess their structural health. The new monitoring method using embedded equipment inside the pavement seeks to provide solutions aimed at continuous monitoring of structural health. These solutions rely on pavement instrumentation. This means that sensors are embedded inside the road during the road construction process. Utilizing monitoring methods inside the pavement can bring many technical and economic benefits to road networks. Compared to the pavement monitoring method from its surface, it can facilitate monitoring all pavement layers separately, continuously, and remotely without interfering with traffic flow. This approach is in line with the realization of smart roads and, unlike most of the old methods, it is a non-destructive method. For this purpose, in this study, a review of recent research on monitoring methods inside the pavement has been conducted. To this end, electromagnetic, fiber optic and wireless monitoring sensors have been evaluated. Finally, some suggestions have been proposed to utilize these monitoring techniques for Iranian road infrastructures.

Keywords: Pavement, Structural Health, In-depth Monitoring, Embedded Sensors, Optical Fiber.

مروری بر روش‌های جدید پایش سلامت سازه‌ای راه‌ها از درون روسازی

پویان ایار^{*}، محمد خبازی علوی

گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*ayar@iust.ac.ir

چکیده

در چند دهه‌ی اخیر، مسئله‌ی پایش سلامت روسازی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده و باعث پیشرفت‌ها و فناوری‌های جدیدی شده است. در این پژوهش، ضمن بررسی مفهوم پایش، روش‌های موجود به‌منظور انجام پایش سلامت سازه‌ای روسازی‌ها دسته‌بندی شده است. تا به امروز دو رویکرد کلی پایش از سطح روسازی و پایش از درون روسازی برای ارزیابی سلامت راه‌ها استفاده شده است. روش جدید پایش از درون روسازی به دنبال ارائه راهکارهایی با هدف پایش مستمر سلامت راه است. این راهکارها متکی به تجهیز روسازی هستند؛ به این معنا که در طی فرایند راه‌سازی حسگرهایی در درون راه مدفون می‌شوند. بهره‌گیری از روش جدید پایش از درون روسازی، می‌تواند مزایای زیادی از لحاظ فنی و اقتصادی برای شبکه راه‌ها به ارمغان آورد؛ چرا که در مقایسه با روش پایش از سطح روسازی، امکان نظارت بر تمام لایه‌های روسازی را به طور مجزا، به صورت مستمر و از راه دور و بدون ایجاد تداخل در جریان ترافیک ممکن می‌سازد. این رویکرد در راستای تحقق راه‌های هوشمند بوده و برخلاف اکثر روش‌های قدیمی، غیرمخرب است. به این منظور، در این پژوهش مروری بر پژوهش‌های اخیر پیرامون روش پایش از درون روسازی به‌صورت دسته‌بندی شده به تفکیک حسگرهای مورد استفاده (حسگرهای الکترومغناطیس، فیبر نوری و بی‌سیم) به‌منظور انجام این شیوه از پایش صورت گرفته است. در نهایت، پیشنهادهایی به‌منظور اجرای شیوه‌ی پایش از درون روسازی در ایران ارائه شده است.

کلمات کلیدی: روسازی، سلامت سازه‌ای، پایش از درون روسازی، حسگرهای مدفون، فیبر نوری.

۱- مقدمه

شبکه‌ی راه‌ها، شریان‌های حیاتی هر کشوری هستند. این راه‌ها پس از مدتی برابر بسیاری از عوامل نظیر عبور وسایل نقلیه و تغییرات متناوب شرایط آب و هوایی در هر منطقه، نیازمند بازرسی، تعمیر و نگهداری هستند؛ چرا که بسیاری از آن‌ها با گذشت زمان دچار خرابی‌های مختلفی می‌شوند. کاربران راه‌ها انتظار دارند سفری ایمن، راحت، سریع و کارآمد داشته باشند؛ درحالی که یک راه خراب نمی‌تواند پاسخگوی این نیاز باشد. از طرفی با افزایش هزینه‌ها و محدودیت‌هایی در میزان درآمد دولت‌ها، اولویت اول مدیران راه‌ها احداث راه‌های جدید نمی‌باشد؛ بلکه ترجیح می‌دهند زیرساخت‌های موجود به نحوی کارآمد مورد استفاده قرارگیرد. بنابراین لازمی این رویکرد بهره‌گیری از فنون مدیریت تعمیر و

نگهداری راه‌ها است. سیستم مدیریت روسازی به مدیران کمک می‌کند تا از وضعیت فعلی راه‌ها اطلاع پیدا کرده و نسبت به عملیات نگهداری، تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی کنند.

در سال‌های اخیر، سیستم مدیریت روسازی مزایای بسیاری را برای شبکه‌ی حمل و نقل به ارمغان آورده است. سیاست‌ها و تصمیم‌هایی که براساس این سیستم گرفته می‌شود، بر مبنای مجموعه‌ای از بازرسی‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که با مفهوم پایش سلامت روسازی به عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم مدیریت روسازی مطرح شده است [۱]. زمان‌بندی تعمیر و نگهداری به‌هنگام، موجب ارتقای ایمنی راه‌ها و کیفیت خدمت‌دهی روسازی راه می‌شود. این مهم جز به واسطه‌ی پایش مستمر و دقیق شرایط روسازی حاصل

به‌طور کلی نتایج نظری ساده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای ترکیب‌های پیچیده‌ی مخلوط‌های آسفالتی صرفاً می‌توانند یک دستورالعمل تقریبی برای تجزیه و تحلیل سازه‌ای ارائه دهند [۵،۶،۷]. با بهره‌برداری از روسازی-های چندلایه، پس از مدتی خرابی‌هایی با مقادیر مختلف در آن‌ها ایجاد می‌شود که می‌توان این خرابی‌ها را براساس شاخص‌های فیزیکی (نظیر کرنش‌های استاتیکی و دینامیکی، مورفولوژی سطحی و شکل) تقسیم‌بندی کرد [۸]. گاهی اوقات خرابی‌های اولیه، ریزترک‌هایی هستند که در طی فرایند ساخت، بارگذاری یا عوامل زیست‌محیطی گسترش می‌یابند؛ چنانچه شناسایی یا تعمیر این ریزترک‌ها به‌موقع انجام نشود، می‌توانند خرابی‌های گسترده در ساختار روسازی ایجاد کنند. بنابراین توسعه‌ی فناوری حسگرهای هوشمند به‌منظور پایش تمام‌مقیاس عملکرد سازه‌ای لایه‌های روسازی، شناسایی خرابی‌های موضعی و کلی و ساز و کار گسترش آن‌ها، ارزیابی ایمنی سازه‌ای و عمر بهره‌برداری باقی‌مانده روسازی، اجتناب ناپذیر است [۹].

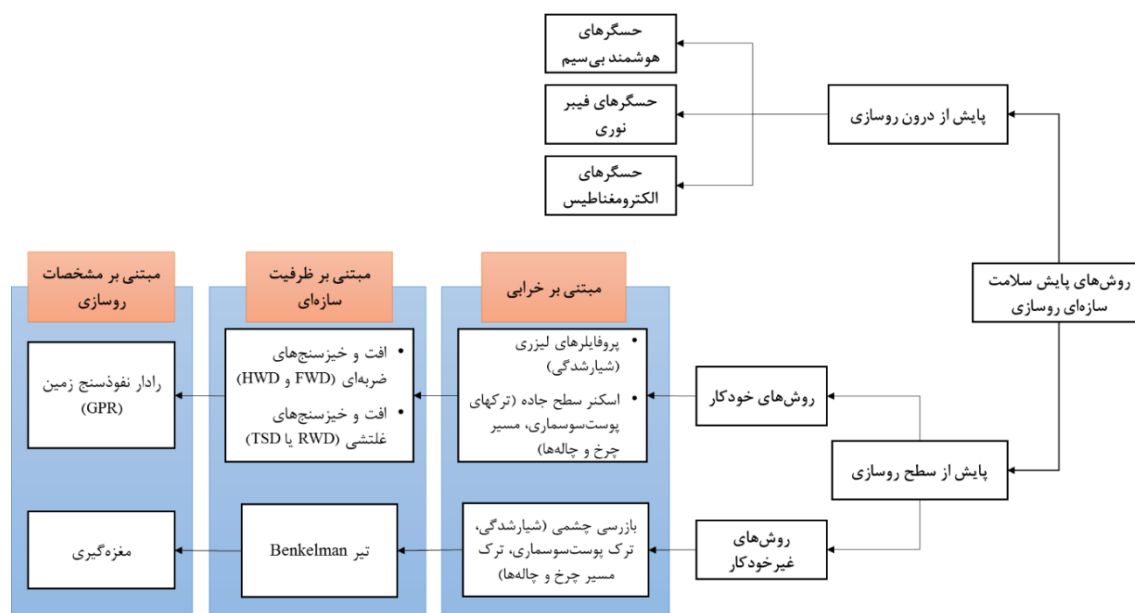
در چند دهه‌ی اخیر، مسئله‌ی پایش سلامت روسازی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده و باعث پیشرفت‌ها و فناوری‌های جدیدی شده است. در پژوهش حاضر انواع روش‌های پایش سلامت سازه‌ای روسازی راه‌ها به‌صورت دسته‌بندی شده ارائه شده است. مطابق شکل ۱ روش‌های پایش سلامت سازه‌ای روسازی-ها شامل پایش از سطح روسازی و پایش از درون روسازی می‌باشد. تا به امروز در ایران از روش‌های پایش از سطح روسازی نظیر دستگاه FWD^۱، اسکنر پروفایل روسازی و... به منظور پایش عملکرد روسازی‌ها استفاده شده است. در حالی که بهره‌گیری از فنون جدید پایش از درون روسازی، می‌تواند مزایای زیادی از لحاظ فنی، علمی، اقتصادی و اجرایی برای ایران به ارمغان آورد. تمرکز این پژوهش بر معرفی روش پایش از درون روسازی و حسگرهای مدفون مورد نیاز آن است. به این منظور در ادامه ضمن معرفی اجمالی روش‌های رایج پایش سلامت روسازی، به پایش سلامت سازه‌ای روسازی از درون آن پرداخته شده است.

نمی‌شود. اندازه‌گیری دقیق توزیع تنش و کرنش، پایه‌ی اصلی فهم رفتار روسازی و مدلسازی خرابی آن است [۲].

روسازی از لایه‌های آسفالتی و سنگدانه‌ای تشکیل می‌شود. تنش‌ها و کرنش‌هایی که در این لایه‌ها ایجاد می‌شود، باید به حد تحمل آن‌ها باشد. هدف از طراحی روسازی، ایجاد یک سازه‌ی مهندسی است که بارهای ترافیکی را به طور مؤثری در لایه‌های روسازی توزیع کند؛ به گونه‌ای که هزینه‌های کار اعم از مصالح، ساخت و نگهداری و نیز هزینه‌های کاربری و اثرات منفی زیست‌محیطی کاهش یابد [۳]. می‌توان گفت اندازه-گیری میزان تغییر شکل روسازی، بیانگر شمای کلی از وضعیت آن است؛ چرا که بسیاری از مشخصات یک روسازی انعطاف‌پذیر با اندازه‌گیری مقدار تغییر شکل در برابر مقدار بارگذاری مشخص، قابل تعیین است. برای مثال از این مقدار می‌توان برای محاسبه‌ی سختی لایه-های روسازی و مدول الاستیسیته‌ی بستر استفاده کرد [۴].

سختی یک پارامتر بسیار مهم است که در انتخاب مصالح باید کاملاً به آن توجه نمود. معمولاً لایه‌های رویی، سختی بیشتر و ضخامت کمتری دارند؛ درحالی که لایه‌های اساس و زیراساس ضخامت بیشتر و سختی کمتر دارند تا در برابر تنش یکسان مقاومت کنند. بنابراین با افزایش سختی لایه‌ها می‌توان ضخامت آن‌ها را کاهش داد. یکی از مسائل مهمی که در رفتار مصالح تأثیر می‌گذارد، مسئله‌ی تماس با رطوبت است؛ چنانچه لایه‌های روسازی رطوبت جذب کنند یا در تماس با آب اشباع شوند، سختی آن‌ها کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از این مسئله، نصب زهکش‌ها می‌تواند مفید واقع شده و از رسیدن سطح آب زیرزمینی به لایه‌های روسازی جلوگیری کند. مسئله‌ی دیگر پایش دما در روسازی می‌باشد. چرا که دما بر لایه‌ی آسفالتی اثرگذار است. ضروری است که در فرایند طراحی روسازی شرایط اقلیمی و آب و هوایی را هم در نظر گرفت. همچنین کیفیت تراکم روسازی مسئله‌ی بسیار مهمی است [۳]. علاوه بر این‌ها، انواع خرابی‌هایی که در سطح روسازی ایجاد می‌شود، نظیر ترک‌خوردگی و گسترش آن، شیارشدگی، ساییدگی، نشست، خستگی و سایر خرابی‌ها شاخص مهمی از عملکرد روسازی هستند [۱].

¹ Falling Weight Deflectometer



شکل ۱- روندنمای تقسیم‌بندی روش‌های پایش سلامت سازه‌ای روسازی‌ها

۲- معرفی روش‌های پایش روسازی و تاریخچه آن

در بخش قبل به بررسی اهمیت ارزیابی وضعیت روسازی راه‌ها پرداخته شد و اشاره شد یکی از ارکان یک سیستم مدیریت روسازی مناسب، بهره‌گیری از روش‌های پایش سلامت روسازی است. کشور آمریکا در برنامه عملکرد بلند مدت روسازی (LTTP)^۱ انواع خرابی‌های سطحی روسازی و سایر شاخص‌های عملکردی آن را برای بسیاری از راه‌ها جمع‌آوری و تهیه کرده و در سال‌های اخیر بسیاری از سازمان‌های ایالتی حمل و نقل این کشور داده‌های خرابی روسازی را برای مدیریت روسازی جمع‌آوری کرده‌اند [۱]. با توجه به مطالب ذکر شده تا به امروز دو رویکرد کلی برای ارزیابی سلامت راه‌ها استفاده شده است. این دو رویکرد عبارتند از: پایش از سطح روسازی و پایش از درون روسازی.

۲-۱- پایش از سطح روسازی

به‌طور کلی داده‌های مربوط به شرایط سطحی راه برای اهدافی نظیر ارزیابی کیفیت راه ساخته شده، ارزیابی کیفیت کنونی، ارزیابی تغییر عملکرد در طی زمان، پیش‌بینی وضعیت سطحی راه در آینده، کمی کردن عملکرد شبکه‌ی راه‌ها، سنجش عملکرد شرکت‌های راهسازی و تسهیل برنامه‌ریزی بهینه‌ی تعمیر و نگهداری راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰].

پایش از سطح روسازی معمولاً به صورت غیرخودکار (دستی) از طریق بازرسی‌های دیداری یا به‌صورت خودکار با استفاده از خودروهای ویژه نظیر اسکنر پروفایل روسازی انجام می‌شود [۱۱]. ظرفیت باربری روسازی با اندازه‌گیری میزان تغییر شکل قائم، توسط دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای [۱۲] و بهره‌گیری از نرم‌افزار حاصل می‌شود. اگرچه این راهکارها شمای کلی از وضعیت رویه‌ی شبکه‌ی راه‌ها ارائه می‌کنند؛ اما بسیار زمان‌بر بوده و زمانی خرابی‌ها را شناسایی می‌کنند که ایجاد شده باشند. همچنین ضمن تحمیل هزینه‌های بالا و ایجاد اختلال در جریان ترافیک، اطلاعاتی از نقاط خاصی از روسازی و در بهترین شرایط در یک بازه‌ی یک تا پنج ساله ارائه می‌کنند [۴]. از طرفی استفاده از روش‌هایی نظیر آزمون انتشار امواج صوتی، رادار نفوذی در زمین (GPR)^۲، فراصوت، تصویربرداری گرمایی با مادون قرمز^۳ و فناوری لیزر اگرچه برای یکپارچگی با سیستم‌های GIS به‌منظور جمع‌آوری خودکار داده‌ها و تحلیل آن‌ها مناسب هستند [۱۳]؛ اما به نیروی انسانی قابل توجه، زمان و هزینه‌ی بالا برای تأمین تجهیزات نیازمند هستند؛ در حالی که امکان تشخیص ریزترک‌ها و گسترش آن‌ها را ندارند [۱۷-۱۴]. از آنجایی که روش‌های پایش از سطح روسازی در مطالعات بسیاری

² ground-penetrating radar

³ infrared thermal imaging

¹ Long-Term Pavement Performance program

بار واقعی وسایل نقلیه‌ی سنگین آزمایش کرد [۲۲]. در سال ۱۹۹۵، سبالی و همکاران، کرنش کششی را در روسازی انعطاف‌پذیر توسط حسگر Hall effect با پیکربندی به شکل حسگر H شکل اندازه‌گیری کرد [۲۳]. در سال ۲۰۰۱، سلول‌های تنش از نوع دیافراگم در خاک بستر دفن شدند تا عملکرد دو مقطع آزمایشی از روسازی‌های تجهیز شده تحت شبیه‌سازی خطی ترافیک مقایسه شود [۲۴]. در سال ۲۰۰۵، هاف و همکاران، از حسگرهای محوری پیزوالکتریک برای کسب داده‌های تغییر شکل دینامیکی روسازی استفاده کرد [۲۵]. در سال ۲۰۱۱، شوی و ویور، اثر تایرهای پهن بر میزان کرنش روسازی براساس داده‌های جمع‌آوری شده در جاده‌ی آزمایشی شماره‌ی ۲۳ اوهایو در سال ۱۹۹۷ بررسی کرد [۲۶]. در همان سال حسگر بی‌سیم جدیدی که برق خود را جدای از برق صنعتی تأمین می‌کند ساخته شد. این حسگر دارای تراگذر پیزوالکتریک بوده و قادر به اندازه‌گیری کرنش و دما به طور همزمان است [۲۷]. خلاصه‌ی تحقیقات اخیر پیرامون پایش سلامت سازه‌ی روسازی تا قبل از بکارگیری فناوری فیبر نوری در جدول ۱ ارائه شده است.

۴- حسگرهای فیبر نوری

یک سیستم پایش سلامت رایج، از شبکه‌ای از حسگرهای فیبر نوری تشکیل شده است که قادر به اندازه‌گیری مشخصات مربوط به وضعیت سازه و محیط پیرامون آن نظیر موقعیت، تغییر شکل، دما، کرنش، نیرو، فشار و تنش براساس تراگذرهای مکانیکی یا الکتریکی هستند. در سال‌های گذشته، حسگرهای فیبر نوری به‌طور قابل توجهی در حوزه‌ی حسگرها وارد شده‌اند؛ چراکه عملکرد مطلوب‌تری نسبت به حسگرهای رایج دارند. امتیاز حسگرهای فیبر نوری می‌تواند شامل بهبود کیفیت اندازه‌گیری‌ها، قابلیت اطمینان بهتر، امکان جایگزینی قرائت دستی و قضاوت اپراتور با اندازه‌گیری‌های خودکار، نصب و نگهداری آسان‌تر یا هزینه پایین‌تر طول عمر آن‌ها باشد. [۲۸].

فیبر نوری حاوی یک فیبر استوانه‌ای نازک از جنس شیشه است. از آن جایی که شیشه ماده‌ای بی‌اثر بوده و در محیط‌های شیمیایی حتی در دماهای بالا بسیار

مورد توجه واقع شده است و هدف از این پژوهش بررسی روش‌های پایش از درون روسازی است، در ادامه به معرفی این شیوه از پایش و کاربرد حسگرهای مدفون پرداخته شده است.

۲-۲- پایش از درون روسازی

پایش از درون روسازی به دنبال ارائه‌ی راهکارهایی با هدف پایش مستمر سلامت راه است. این راهکارها متکی به تجهیز روسازی هستند؛ به این معنا که در طی فرایند راهسازی حسگرهایی در درون راه کار گذاشته می‌شوند [۱۸]. هدف از آن امکان اندازه‌گیری دقیق پاسخ روسازی (در قالب تنش، کرنش، میزان تغییر شکل، دما و غیره) در هرکدام از لایه‌های روسازی است. چنین داده‌هایی همراه با چارچوب مفسر آن، به‌منظور ارزیابی وضعیت مکانیکی (ساز و کار) حقیقی روسازی بسیار حیاتی بوده و امکان برنامه‌ریزی‌های مقرون‌به‌صرفه‌ی مدیریت راه‌ها را فراهم می‌کند [۱۹]. در مقایسه با روش‌های پایش از سطح روسازی، رویکرد استفاده از حسگرهای دفنی^۴، امکان نظارت بر تمام لایه‌های روسازی را به طور مجزا به صورت مستمر و از راه دور و بدون ایجاد تداخل (مداخلت) در جریان ترافیک ممکن می‌سازد. این رویکرد در راستای تحقق راه‌های هوشمند بوده [۵] و برخلاف اکثر روش‌های قدیمی، غیرمخرب هستند [۳].

بعد از چند دهه تحقیق و آزمایش، طیف گسترده‌ای از انواع حسگرها برای چنین منظوری ساخته شده است. این حسگرها به چند گروه قابل تقسیم‌بندی هستند: حسگرهای الکترومغناطیس، حسگرهای فیبر نوری [۱] و حسگرهای بی‌سیم [۲۰].

۳- حسگرهای الکترومغناطیس

استفاده از حسگرهای الکترومغناطیس در پایش روسازی به دهه ۱۹۶۰ میلادی برمی‌گردد [۲۱]. در سال ۱۹۹۱، سبالی و همکاران، بسیاری از انواع ابزارهای سنجش روسازی را نظیر فشارسنج، افت‌سنج، کرنش‌سنج، ترموکوپل، رطوبت‌سنج (حسگر رطوبت) و حسگر موقعیت عرضی وسایل نقلیه برای ارزیابی میدانی تحت

⁴ embedded sensors

جدول ۱- خلاصه‌ی تحقیقات اخیر پیرامون پایش سلامت سازه‌ای روسازی تا قبل از بکارگیری فناوری فیبر نوری

سال	نویسندگان	نوع حسگر	پارامتر اندازه‌گیری شده
۱۹۹۱	سبالی و همکاران [۲۲]	فشارسنج، افت‌سنج، کرنش‌سنج، ترموکوپل، رطوبت‌سنج (حسگر رطوبت) و حسگر موقعیت عرضی وسایل نقلیه	تنش، افت، کرنش، دما، رطوبت، موقعیت عرضی وسایل نقلیه
۱۹۹۵	سبالی و همکاران [۲۳]	کرنش‌سنج	کرنش
۱۹۹۷	جاده‌ی آزمایشی شماره‌ی ۲۳ اوهایو [۲۶]	کرنش‌سنج	کرنش
۲۰۰۱	گنکالوز [۲۴]	سلول تنش از نوع دیافراگم	تنش
۲۰۰۵	هاف و همکاران [۲۵]	حسگر محوری پیزوالکتریک	جریان دیجیتالی شده
۲۰۱۱	لاؤنف و همکاران [۲۷]	تراگذر پیزوالکتریک	کرنش و دما

حسگرهای فیبر نوری را کوچک بودن آن‌ها دانست؛ معمولاً قطر این حسگرها بین ۱۲۵ تا ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد. قابلیت دیگر این حسگرها، اندازه‌گیری مسافت-های چند ده کیلومتری بدون نیاز به هیچ جزء فعال الکتریکی نیز مزیتی است که از ویژگی‌های صنعت مخابرات فیبر نوری می‌باشد. این حسگرها امکان اندازه-گیری پارامترهای متنوعی را دارند؛ به گونه‌ای که می-توان چند پارامتر مختلف را با استفاده از یک شبکه از حسگرها اندازه‌گیری کرد. در مقایسه با حسگرهای الکتریکی رایج، امکان آرایش حسگرهای فیبر نوری به شیوه‌های مختلف وجود دارد؛ از جمله آرایش متوالی در یک خط^۴ و سنجش کاملاً یکپارچه^۵ [۲۸]. همچنین دقت بالا در اندازه‌گیری، حساسیت بالا نسبت به کمترین تغییرات در پارامتر مورد سنجش، وزن کم و انعطاف‌پذیری را می‌توان از دیگر مزایای این حسگرها دانست [۲۹].

رایج‌ترین حسگرهای فیبر نوری مورد استفاده در پژوهش‌های انجام‌شده در روسازی آسفالتی شامل FBG^۶، تداخل‌سنج (F-P interferometer) و حسگر یکپارچه می‌باشد که در ادامه کاربرد این حسگرها در روسازی آسفالتی آورده شده است.

مقاوم است و نیز دچار خوردگی نمی‌شود، امکان پایش بلندمدت سلامت سازه‌ای را ممکن می‌سازد [۲۸]. امروزه حسگرهای مختلف فیبر نوری در بسیاری از زمینه‌ها به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به-خصوص در سال ۱۹۷۸، هیل و همکاران و نیز کاوازاکی و همکاران، قابلیت سنجش فیبر نوری را کشف کردند و اولین فیلتر فیبر نوری^۱ را در جهان ساختند که باعث انقلاب جدیدی در زمینه‌ی سنجش با فیبر نوری می-شود [۲۹]. یکی از بهترین مزایای این حسگرها این است که فیبر نوری می‌تواند نقش رابط بین منبع نور (تأمین‌کننده‌ی سیگنال) و حسگر را داشته باشد یا همانند حسگرهای بلند^۲ و یکپارچه^۳ به عنوان حسگر عمل کند. از آنجایی که نوری که در هسته‌ی فیبر نوری برای اهداف اندازه‌گیری محصور است تحت تأثیر میدان-های الکترومغناطیسی اطراف قرار نمی‌گیرد، بنابراین حسگرهای فیبر نوری در برابر تداخل‌های الکترومغناطیسی به‌طور ذاتی ایمن هستند که می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی نسبت به حسگرهای الکتریکی باشند. به‌عنوان مثال، حسگرهای فیبر نوری تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی تولیدشده در اثر برخورد صاعقه به پل یا سد قرار نمی‌گیرند، مگر اینکه فیبر از نظر حرارتی آسیب ببیند. شاید بتوان بهترین مزیت

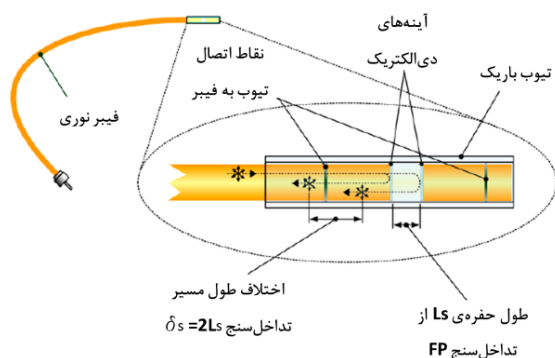
^۴ in-line multiplexing^۵ fully distributed sensing^۶ fiber bragg grating^۱ fiber grating^۲ long-gauge sensors^۳ distributed sensors

استفاده از حسگرهای فیبر نوری در آسفالت نیازمند ملاحظات است تا حسگرها در شرایطی نظیر درجه حرارت بالا، وجود رطوبت، نیروی تراکمی بالا، بارگذاری مکرر و... دوام بیاورند [۱].

مطالعات اولیه در این حوزه به منظور استفاده از حسگرهای فیبر نوری در روسازی آسفالتی از سال ۱۹۹۴ آغاز شده است. در آن سال، ناوارت و برنابو، سیستم تداخل سنجی را معرفی کردند که می تواند تغییرات مقدار فشار وارد بر فیبر و سایر محرک های خارجی را به طور همزمان اندازه گیری کند [۳۱]. در سال ۱۹۹۵، سیگنور و روزلر، از حسگر فیبر نوری برای مطالعه ی کرنش جانبی ایجاد شده در یک نمونه آسفالت سرد که به طور محوری بارگذاری شده بود، استفاده کردند و نسبت پواسون آن را به دست آوردند [۳۲]. در سال ۱۹۹۶، فیبر چند حالتی پلی آمید برای افزایش حساسیت حسگر استفاده شد. در سال ۲۰۰۵ وانگ و تانگ، فیلتر نوری براگ با رزولوشن بالا متشکل از یک فیبر FBG مرجع با یک جفت فیبر نوری ساختند که قابلیت اندازه گیری دما و کرنش درون روسازی را به طور همزمان داشت [۳۳]. در ادامه خلاصه ای از مهم ترین پژوهش های دو دهه ی گذشته در این حوزه آورده شده است.

۴-۲- کرنش سنج فیبر نوری (دانشگاه لاول، کانادا)

در این پژوهش یک مغزه ی آسفالتی به منظور اندازه گیری کرنش های افقی در کف لایه های آسفالتی به حسگرهایی تجهیز شده و این حسگر در بدنه ی مقاومی از جنس پلیمر کار گذاشته شدند. در شکل ۲ طرح شماتیکی از حسگر کرنش سنج فیبر نوری بر مبنای تداخل سنج FP مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.



شکل ۲- حسگر کرنش سنج فیبر نوری بر اساس تداخل- سنج FP [۳۴]

۴-۱- کاربرد حسگرهای فیبر نوری در روسازی آسفالتی

تا به امروز به منظور شناسایی رفتار روسازی و پایش سلامت سازه های آن، از انواع مختلفی از حسگرهای فیبر نوری استفاده شده است. FBG یک بخش کوچکی از فیبر نوری با چند میلی متر طول است که از طریق تابش پرتوی فرابنفش در فیبر ایجاد می شود. ویژگی این فیلتر نوری، بازتاب یک پرتوی نوری باریک (با طول موجی به نام طول موج براگ^۱) از پرتوی ورودی است. FBG به طور ذاتی نسبت به تغییرات دمایی و مکانیکی بسیار حساس است. از آنجایی که این حسگر بسیار شکننده است، نیاز به بسته بندی^۲ دارد. به طور خاص، حسگرهای FBG در حوزه های مختلف سنجش به عنوان حسگرهای دما و کرنش برای تشخیص تغییر شکل، شاخص شیارشدگی، رفتار بتن آسفالتی و توزین-حین-حرکت^۳ به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. حسگرهای FBG، جایگزین مناسب کرنش سنج های رایج به منظور پایش لحظه ای و بلندمدت در محیط های سخت نظیر روسازی راه می باشند.

حسگر فیبر نوری تداخل سنج Fabry-Perot^۴ یا (FP) یک حفره ی نوری است که توسط دو آینه ی موازی نیمه بازتابنده^۵ تعریف می شود. این نوع حسگر که پارامترهای خارجی را از طریق تغییر طول حفره ی نوری اندازه گیری می کند، دارای مزایایی نظیر طراحی انعطاف پذیر، ابعاد کوچک و حساسیت بالا نسبت به پارامتر مورد سنجش می باشد [۲۹].

امکان اندازه گیری موضعی کرنش با فناوری های FBG و FP همانند کرنش سنج های الکتریکی وجود دارد؛ اما برخلاف دقت و حساسیت بالای آن ها، امکان تشخیص ترک خوردگی یا خرابی را ندارند. از آنجایی که نسبت به ساختار یک روسازی، ابعاد کوچکی دارند تنها زمانی ترک ها تشخیص داده می شوند که راستای گسترش آن ها در امتداد حسگر باشد (با کمک فناوری سنجش فیبر نوری بر اساس پراکندگی بریلوئین یا ریلی) [۳۰].

¹ Bragg wavelength

² packaging

³ weigh-in-motion

⁴ Fabry-Perot interferometer fiber optic sensor

⁵ semi-reflecting mirror

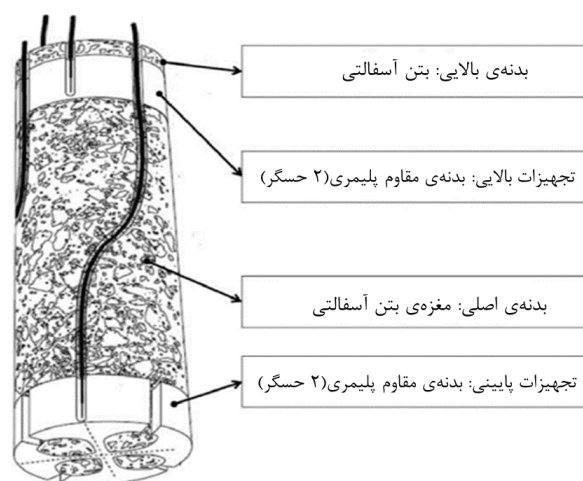
گیری کرنش ها در راستای عرضی و طولی در کف لایه-ها ممکن شود. حسگر و بدنه‌های مقاوم در آزمایشگاه در محل خرابی‌های بحرانی بر روی نمونه‌های از پیش-حفاری شده نصب شدند. حسگر با قرارگیری در روسازی و چسباندن در نقاط دلخواه از حفره‌ی از پیش حفاری-شده نصب شد [۳۷]. به‌طور خلاصه می‌توان گفت اگرچه کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده تحت بارگذاری FWD با مقادیر نظیر محاسبه‌شده برابر نبودند، اما براساس خروجی‌های حسگر فیبر نوری ثابت شد که کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده در مواد بازیافتی پایین‌تر از حد انتظار مطابق تحلیل المان محدود است [۳۸].

۴-۴- کابل فیبر نوری مخابراتی به عنوان حسگر یکپارچه

یک روش جدید غیرمخرب برای تشخیص ترک خوردگی در روسازی‌های آسفالتی تمام مقیاس (واقعی) با استفاده از تجهیزات آزمایش تسریع‌شده‌ی روسازی (APT) مؤسسه‌ی IFSTTAR^۷ فرانسه انجام شد. این کار براساس استفاده از کابل فیبر نوری مخابراتی از نوع حسگر یکپارچه بود که در روسازی تعبیه شد. مزیت اصلی این روش امکان اندازه‌گیری کرنش با رزولوشن فضایی بالا (کمتر از ۱ سانتی‌متر) در طول زیادی از فیبر نوری می‌باشد که موجب تشخیص خرابی قبل از ایجاد آن می‌شود. در این پژوهش سعی شد با مقایسه‌ی پروفیل‌های کرنش مختلف، ارتباطی بین آشکارشدن ترک در روسازی و تغییرات کرنش برقرار شود. در شکل ۴ نمایشی از تجهیزات آزمایش تسریع‌شده‌ی روسازی و نیز لحظه‌ی نصب کابل‌های فیبر نوری در آسفالت ارائه شده است.

لازم است اشاره شود که عیب اصلی استفاده از فیبرهای نوری مخابراتی، محدودیت آن‌ها در فرکانس نمونه‌گیری است. با استفاده از حسگرهای FBG می‌توان فرکانس نمونه‌گیری را برای ارزیابی اثرات بلندمدت (نظیر خزش، تغییر شکل دائمی و...) افزایش داد. حسگرهای مخابراتی استاندارد، بسیار شکننده بوده و مناسب تعبیه‌ی مستقیم در آسفالت نیستند. قطر این کابل‌ها با توجه به اهمیت

این حسگر از دو فیبر نوری تشکیل شده که با ظرافت بالایی درون تیوب باریکی به یکدیگر متصل می‌شوند تا حسگر فیبر نوری تداخل‌سنج FP را ایجاد کنند. این ساختار موجب می‌شود حسگر نسبت به تداخل الکترومغناطیس کاملاً ایمن شده و برخلاف حسگرهای FBG هیچگونه حساسیتی در برابر کرنش عرضی و دما نداشته باشد. شکل ۳ تصویر شماتیکی از مغزه‌ی مجهز شده‌ی را نشان می‌دهد که در دو تراز قابلیت سنجش دارد. درون هر کدام از بدنه‌های پلیمری، دو حسگر فیبر نوری متعامد جایگذاری شده‌اند تا کرنش را در راستای طولی و عرضی از راه اندازه‌گیری کنند (خط چین‌های متعامد در شکل ۳). بدنه‌ی مقاوم پلیمری از جنس کامپوزیت پلاستیکی بوده و مدول الاستیسیته و ضریب انقباض حرارتی آن همانند بتن آسفالتی می‌باشد تا از لحاظ مکانیکی هر دو ماده سازگار باشند. [۳۴، ۳۵].



شکل ۳- کرنش‌سنج فیبر نوری دانشگاه لاوال [۳۶]

۴-۳- کرنش‌سنج فیبر نوری (دانشگاه فنی ملی آتن، یونان)

این مطالعه با هدف بررسی جنبه‌های مربوط به ارزیابی کرنش‌ها در روسازی آسفالتی بازیافتی سرد درجا انجام شد. این سیستم براساس نوعی حسگر FP می‌باشد که از دو آینه‌ی نیمه‌بازتابنده تشکیل شده است. هوای موجود در بین این آینه‌ها نقش حفره‌ی FP را دارد تا میزان دست‌خوردگی میدان‌های تنش اطراف حسگر را در زمانی که تحت اثر بار ترافیکی سنگین قرار می‌گیرد، حداقل کند. همچنین این حسگر به گونه‌ای طراحی شده است تا نصب دو کرنش‌سنج متعامد برای اندازه-

⁶ Accelerated Pavement Testing facility

⁷ French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks



شکل ۴- الف) تجهیزات آزمایش تسریع شده‌ی روسازی (APT) در موسسه‌ی IFSTTAR ب) نصب کابل‌های فیبر نوری در آسفالت [۳۰]

پژوهش با اندازه‌گیری مقادیر کرنش‌های قائم و افقی در لایه‌های آسفالتی با ضخامت‌های مختلف بر اثر اعمال بار توسط دستگاه HWD^۱، امکان استفاده از حسگرهای فیبر نوری برای اندازه‌گیری کرنش نشان داده شد [۴۰]. مطابق جدول ۲ مشاهده می‌شود که فیبر نوری با دقت بالایی میزان افت را در لایه‌های آسفالتی اندازه می‌گیرد.

جدول ۲- خلاصه‌ای از نتایج تست HWD [۴۰]

ضخامت لایه (اینچ)	متوسط افت اندازه‌گیری شده توسط HWD (میلی متر)	متوسط افت اندازه‌گیری شده توسط فیبر نوری (میلی متر)
۱۵	۱۲/۰۶	۱۱/۸۹
۲۲	۱۶/۱۹	۱۶/۶۱
۱۰	۲۱/۵۵	۲۲/۹۲
۸	۲۷/۸۳	۲۷/۹۵

بالای طراحی آن‌ها و نیز به منظور انتقال مناسب کرنش و نفوذ در مصالح، بیش از ۲ میلی‌متر می‌باشد. در این پژوهش از دو روش استفاده شد. روش اول شامل مقایسه اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در تعداد چرخه‌ی بار یکسان، تحت اثر یک بار استاتیکی چرخ و بدون بار (اندازه‌گیری مرجع) است. بنابراین، مشخصات کرنش بدست‌آمده با این روش نشان‌دهنده‌ی تغییر کرنش نسبی بین حالت بارگذاری و باربرداری است. روش دوم فقط با اندازه‌گیری‌های سیگنال ریلی بدون اعمال بار در مقدار چرخه‌های مختلف بار انجام می‌شود که با اندازه‌گیری‌های مرجع انجام‌شده در ابتدای آزمایش مقایسه شدند. این پژوهش نشان می‌دهد که با نظارت بر پروفیل‌های کرنش در لایه‌های آسفالتی، می‌توان از حسگرهای فیبر نوری یکپارچه براساس پراکندگی ریلی برای تشخیص شروع و انتشار ترک در روسازی‌ها استفاده کرد. [۳۰، ۳۹].

۴-۶- پایش سلامت سازه‌ای روسازی آسفالتی توسط حسگرهای FBG (چین)

پایش سه محوری کرنش و میزان تراکم از درون روسازی آسفالتی به‌منظور ارزیابی عملکرد و پاسخ روسازی توسط فناوری حسگرهای FBG در یک لایه‌ی آسفالتی از یک بزرگراه در چین در سال ۲۰۱۴ صورت گرفت. شکل ۵ حسگرهای مذکور را نشان می‌دهد که در سه راستا توسط اتصال FRP^۲ مونتاژ شده‌اند. یک حسگر کوتاه به منظور پایش کرنش قائم و دو حسگر بلند به

۴-۵- صفحه‌ی کرنش فیبر نوری (اداره‌ی هوانوردی فدرال، آمریکا)

به‌منظور اندازه‌گیری کرنش تحت بار ترافیک، چهار مقطع از روسازی با استفاده از صفحه‌های پلیمری در تجهیزات تست روسازی فرودگاهی اداره هوانوردی فدرال تجهیز شد. در هر مقطع آزمایشی یک صفحه به طور عمود بر جهت ترافیک قرار داده شد. در هر صفحه ۲۴ کرنش‌سنج فیبر نوری از نوع FP کارگذاشته شده و با اپوکسی پوشیده شده است. سه عدد دستگاه تنظیم سیگنال که دارای ۸ کانال هستند، به منظور جمع‌آوری داده‌های حسگرهای هر صفحه استفاده می‌شود. در این

^۱ Heavy Weight Deflectometer

^۲ fiber reinforced polymer connection

از حسگرهای FBG مدفون در روسازی آسفالتی می‌توان برای پایش بلندمدت رفتار سازه‌ای روسازی بهره گرفت تا داده‌های اساسی لازم را برای نگهداری به‌هنگام از روسازی آسفالتی تامین کند [۴۲].

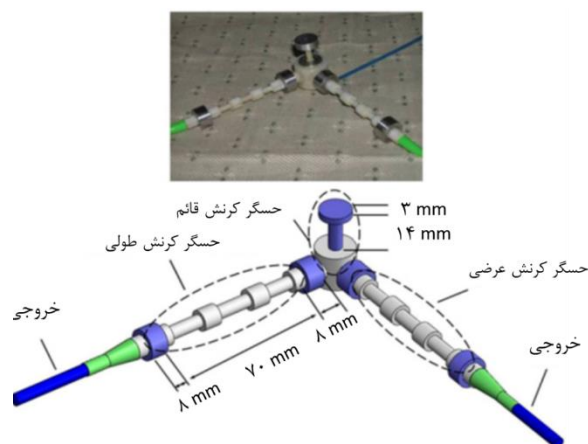
۷-۴- نصب حسگرهای FBG در آسفالت (پروژهی ASPARi، هلند)

در پروژهی ASPARi چندین برنامه‌ی آزمایشی به‌منظور استفاده از حسگرهای FBG در روسازی آسفالتی اجرا شد. بعضی از مواردی که در این پروژه مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند، شامل موارد زیر هستند: بررسی یک روش عملی به‌منظور نصب حسگرها و محافظت از آنها، شناسایی پارامترهای اثرگذار بر مقادیر حسگرها، بررسی نتایج مقادیر حرارتی با اعداد ترموکوپل‌ها، بررسی خروجی حسگرهای FBG به‌منظور ایجاد ارزش افزوده برای پیمانکاران (نظیر عملکرد بلندمدت، میزان انرژی مصرفی در حین فرایند ساخت راه و...). نتیجه گرفته شد که امکان نصب حسگرها در نقاط دلخواه از روسازی وجود دارد. لازم به ذکر است به‌علت خاصیت شکنندگی حسگرها، محافظت از آنها امر پیچیده‌ای می‌باشد. مقادیر حسگرهای دما از مقادیر نظیر در ترموکوپل‌ها انحراف داشتند؛ چراکه بعضی از حسگرها داخل تیوب‌های فلزی قرار داده می‌شدند تا محافظت شوند. در نهایت نتیجه‌گیری شد که حسگرهای FBG فناوری امیدبخشی هستند؛ اگرچه فقدان دانش مشخص نصب و استقرار حسگرها در مراحل ابتدایی اجرای آسفالت احساس می‌شود. بنابراین لازم است سازگاری این فناوری با صنعت راهسازی بیشتر بررسی شود [۴۳].

۸-۴- سیستم پایش FBG (دانشگاه Antwerp، بلژیک)

برای اولین بار دو رویکرد جدید برای نصب حسگرهای FBG در تمام لایه‌های یک مسیر دوچرخه‌ی آسفالتی در سپتامبر ۲۰۱۷ در بلژیک به کار گرفته شد. الف) نصب حسگرهای FBG در نمونه‌های پیش‌ساخته آسفالتی به ابعاد $500 \times 15 \times 50$ میلی‌متر همراه با یک شیار به عمق ۲ میلی‌متر در کف نمونه در لایه‌ی اساس (ب) نصب حسگرهای FBG در سطح همان لایه‌ی آسفالتی درون شیارهای ۲ میلی‌متری. این سیستم

منظور پایش کرنش‌های افقی در این اتصال به کار گرفته شده است. سیگنال‌های FBG دریافتی از هر سه کرنش‌سنج، به‌طور لحظه‌ای توسط یک دستگاه تحلیلگر سیگنال نوری^۳ پایش شده و بوسیله‌ی رایانه‌هایی به‌منظور پردازش‌های آتی ثبت شدند.



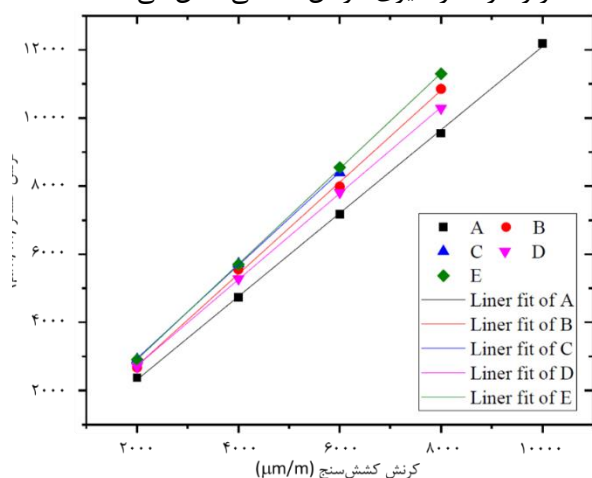
شکل ۵- کرنش‌سنج فیبر نوری مونتاژ شده به‌منظور پایش سه‌بعدی کرنش در روسازی [۴۲]

هدف از این پروژه اندازه‌گیری کرنش فشاری قائم در بالای لایه‌ی بستر، کرنش کششی عرضی در کف لایه‌ی آسفالتی و کرنش فشاری قائم در میانه‌ی لایه‌ی آسفالتی در روسازی آسفالتی بود. به‌منظور حفاظت از حسگرها در برابر بارگذاری سنگین، از روش تراکم استاتیکی بدون اعمال لرزش استفاده شد.

حسگرهای FBG در نزدیکی لبه‌های روسازی که معمولاً تراکم آنها آسان نیست، مدفون شدند. میزان کرنش و تراکم برای تشخیص تعداد دفعات عبور لازم به‌منظور حصول تراکم کافی مورد آزمایش و محاسبه قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی کیفیت تراکم، چگالی مصالح روسازی از طریق مغزه‌گیری از روسازی به‌فواصل ۳۰ متر از نقاط پایش آزمایش شد. نتایج نشان داد تراکم بیشتر، موجب تغییر شکل کمتر تحت بارگذاری دینامیکی می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که بازگشت الاستیک مصالح به وضوح در منحنی تغییر شکل دیده می‌شود و این تأیید می‌کند که فناوری سنجش با حسگرهای FBG از دقت کافی برای پایش تغییر شکل روسازی آسفالتی برخوردار است. این پژوهش نشان داد

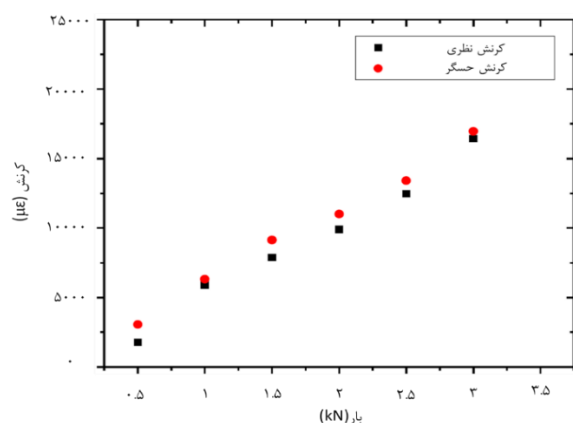
³ optical signal analyzer

۰/۹۹ مشاهده می‌شود که این مطلب دقت بالای این حسگر را در اندازه‌گیری کرنش کششی نشان می‌دهد.



شکل ۷- داده‌های کرنش برآمده از آزمایش اندازه‌گیری کرنش [۴۵]

علاوه بر این، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بر روی یک نمونه تیر بتن آسفالتی که در کف آن حسگر فیبر نوری کار گذاشته شده بود، صورت گرفت. با اعمال بار به میزان $0.5-3.5$ kN و اندازه‌گیری کرنش در وسط تیر توسط حسگر و نیز محاسبه کرنش نظری از روابط مربوطه، نتایج در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸- کرنش نظری و کرنش اندازه‌گیری شده توسط حسگر [۴۵]

نتایج تحلیل المان محدود و نیز اسکن میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که اندازه‌گیری دقیق کرنش وابسته به پیوستگی موثر بین حسگر فیبر نوری و ساختار بسته‌بندی آن می‌باشد. این شیوه از بسته‌بندی حسگر که در این پژوهش ارائه شد، امکان حفاظت کامل از فیبر را میسر می‌کند [45].

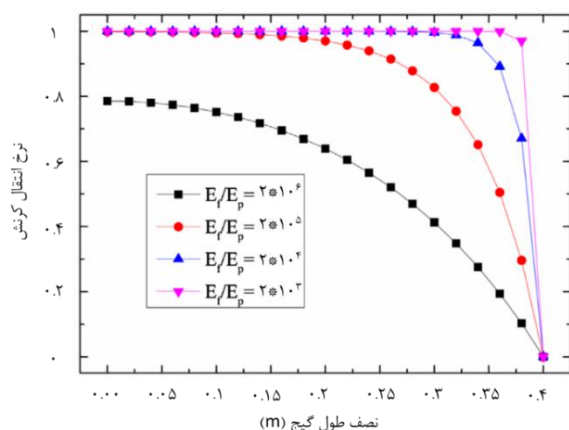
شامل زنجیره‌ای از حسگرهای FBG به این شرح بود: ۸ کابل فیبر نوری متصل به یک دستگاه رادار نوری ۸ کاناله شامل ۲ کابل فیبر (فاصله ی ۱۰ سانتی‌متر بین حسگرها) و ۴ کابل فیبر (فاصله ی ۸۰ سانتی‌متر بین حسگرها) و ۲ حسگر دما که در هر سه لایه مدفون شده بودند (شکل ۶). در نهایت نتایج نشان داد حسگر FBG برای اندازه‌گیری دما و کرنش تحت بار واقعی ترافیک مناسب است. همچنین ثابت شد که این حسگر برای پایش بلندمدت مناسب است [44].



شکل ۶- سیستم پایش حسگرهای FBG پروژه ی Uantwerp [44]

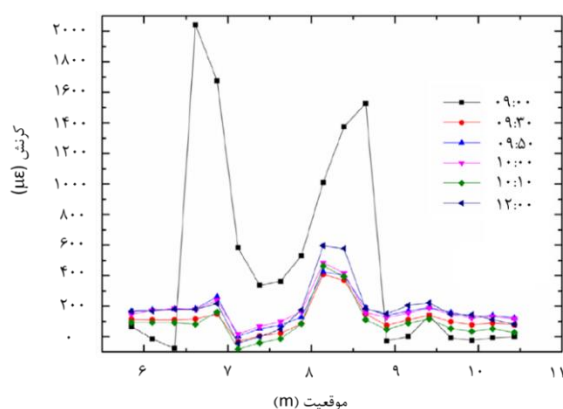
۴-۹- کرنش سنج فیبر نوری با مدول الاستیسیته کم

در این پژوهش با هدف بهبود سازگاری مکانیکی حسگر فیبر نوری و روسازی آسفالتی، یک حسگر فیبر نوری یکپارچه با سختی کم طراحی و ساخته شد. به این منظور از یک نوار لاستیک سیلیکونی به همراه چسب سیلیکونی استفاده شد. این لاستیک در بازه دمایی -55 تا 180 درجه سانتی‌گراد مقاوم است که کاملاً برای عملیات راهسازی مناسب است. به منظور انجام تست کشش بر روی حسگر از دستگاه WDW-200D universal test machine استفاده شده و نتایج این تست در شکل ۷ آورده شده است. با اعمال نیروی کششی به حسگر و اندازه‌گیری میزان کرنش توسط حسگر فیبر نوری و نیز حسگر کشش‌سنج و ترسیم نتایج آن در شکل ۱۲ رابطه خطی با میزان R^2 بیش از



شکل ۱۰- نرخ انتقال کرنش همراه با تغییرات مدول یانگ [۴۶]

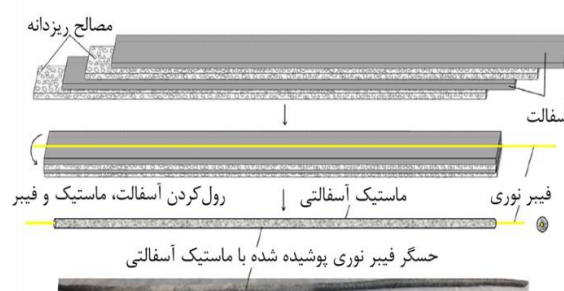
در یک روسازی آسفالتی شهری با رویه دو لایه یک آزمایش درجا به منظور پایش کرنش صورت گرفت. بعد از احداث لایه آستر آسفالتی دو حسگر فیبر نوری یکپارچه برای پایش کرنش عرضی و طولی با استفاده از میله FRP برای ایجاد شیار در این لایه مدفون شد؛ اما یکی از آنها بر اثر عبور غلتک آسیب دیده و دیگری سالم ماند. لازم به ذکر است نرخ انتقال کرنش در این آزمایش طبق تئوری انتقال کرنش یادشده، ۹۲ درصد بود. با توجه به شکل ۱۱ بیشترین میزان کرنش در ساعت ۹ صبح بر اثر عبور وسایل نقلیه سنگین ایجاد شد که به شکل حرف "M" می‌باشد. با مقایسه میزان کرنش در ساعات و روزهای مختلف، این مفهوم که میزان تغییر شکل‌های عرضی لایه آسفالتی متأثر از دو عامل تغییرات بارهای ترافیکی و تغییرات دمایی می‌باشد، به‌وضوح روشن است [46].



شکل ۱۱- کرنش عرضی بتن آسفالتی در ۲۹م آگوست [46]

۱۰-۴- کرنش سنج یکپارچه فیبر نوری

هدف از این پژوهش ارائه حسگر فیبرنوری انعطاف پذیر پوشیده شده از ماستیک آسفالتی به‌منظور پایش یکپارچه کرنش در روسازی آسفالتی می‌باشد. آنالیز انتقال کرنش^۴ به طور نظری بر روی یک مدل اندازه‌گیری سه لایه توسعه داده شد تا خطای انتقال کرنش^۵ حذف شود. آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی تیرهای مدفون شده بتن آسفالتی به همراه حسگرهای یاد شده تحت بارگذاری یکنواخت ثقلی انجام شد تا عملکرد حسگرها و میزان کارآمدی فرمول انتقال کرنش استخراج شده در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین بر مبنای این مطالعات مقدماتی، حسگرها به‌منظور پایش یکپارچه کرنش در روسازی آسفالتی شهری مدفون شده و آزمایش شدند. در شکل ۹ ساختار فیبر نوری مورد استفاده آورده شده است.



شکل ۹- ساختار حسگر فیبر نوری [۴۶]

با استخراج معادله انتقال کرنش نتایج زیر استخراج می‌شود: (۱) مصالح و مشخصات هندسی لایه محافظ ماستیک آسفالتی بر انتقال کرنش اثر می‌گذارد. (۲) نسبت پواسون تاثیر کمی بر نرخ انتقال کرنش دارد. (۳) با بررسی تاثیر مدول یانگ و شعاع لایه محافظ مطابق شکل ۱۰ مشخص شد که با تغییر نسبت E_f/E_p از 2×10^6 تا 2×10^5 ، نرخ انتقال کرنش به شدت افزایش می‌یابد و با کاهش E_f/E_p از 2×10^5 تا 2×10^3 ، نرخ افزایش آن کند می‌شود. بنابراین مدول یانگ لایه محافظ فیبر نوری بهتر است از $3/6 \times 10^5$ Pa بیشتر باشد E_f مدول الاستیسیته فیبر نوری و E_p مدول الاستیسیته لایه محافظ می‌باشد).

⁴ Strain Transfer Analysis

⁵ Strain Transfer Error

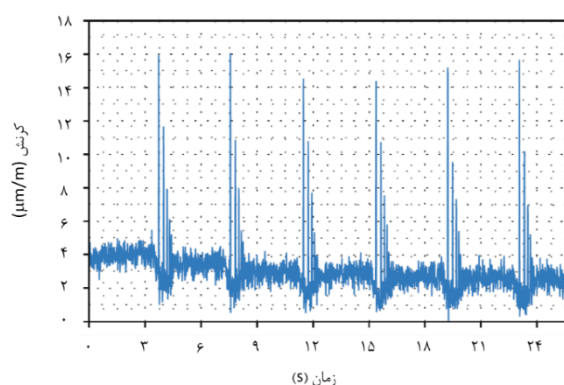
۱۱-۴- پایش سلامت سازه‌ای روسازی با

حسگرهای FBG

در این پژوهش از حسگرهای فیبر نوری FBG برای انجام دو آزمایش در سال ۲۰۱۹ استفاده شده است. در آزمایش اول، حسگرهای FBG بین یک لایه آسفالت ماستیک سنگی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر و یک لایه‌ی بتن آسفالتی به ضخامت ۶۰ میلی‌متر و در آزمایش دوم در یک لایه‌ی بتن آسفالتی همگن به ضخامت ۷۰ میلی‌متر دفن شدند. به‌منظور حفاظت از حسگرها و عملکرد مناسب آن‌ها، کرنش‌سنج FBG با کامپوزیت (مخلوط) شیشه/اپوکسی و حسگرهای دما با تیوب سرامیکی پوشانده شدند. هر دو نوع حسگر در عرض راه در عمق ۲۵ میلی‌متری در کف لایه‌ی آسفالت ماستیک سنگی قرار داده شد.

در آزمایش اول عملکرد حسگرها تحت بارگذاری دستگاه FWD در تابستان مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش از این دستگاه به‌منظور اعمال میزان بار ثابت و کالیبره‌شده توسط صفحه‌ی بارگذاری دایروی استفاده شد.

شکل ۱۲ نمودار کرنش-زمان را که از کرنش‌سنج FBG بدست آمده است، نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این نمودار مربوط به حالتی است که مرکز صفحه‌ی بارگذاری در فاصله‌ی ۹۰۰ میلی‌متری از حسگر قرار داشته است و شش پیک موجود در نمودار مربوط به شش مرتبه بارگذاری است.



شکل ۱۲- نمودار کرنش-زمان اندازه‌گیری‌شده توسط حسگر FBG [۴۷]

جدول ۳ نشان می‌دهد که می‌توان مقادیر کرنش را با دقت بالا (پراکندگی بین ۴/۸-۱۲/۸ درصد) به‌منظور ارزیابی عملکرد روسازی تحت بارگذاری بدست آورد.

جدول ۳- مقادیر کرنش اندازه‌گیری‌شده ($\mu\text{m/m}$) توسط حسگر FBG مدفون در عمق ۲۵ میلی‌متری تحت ۶ مرتبه بارگذاری

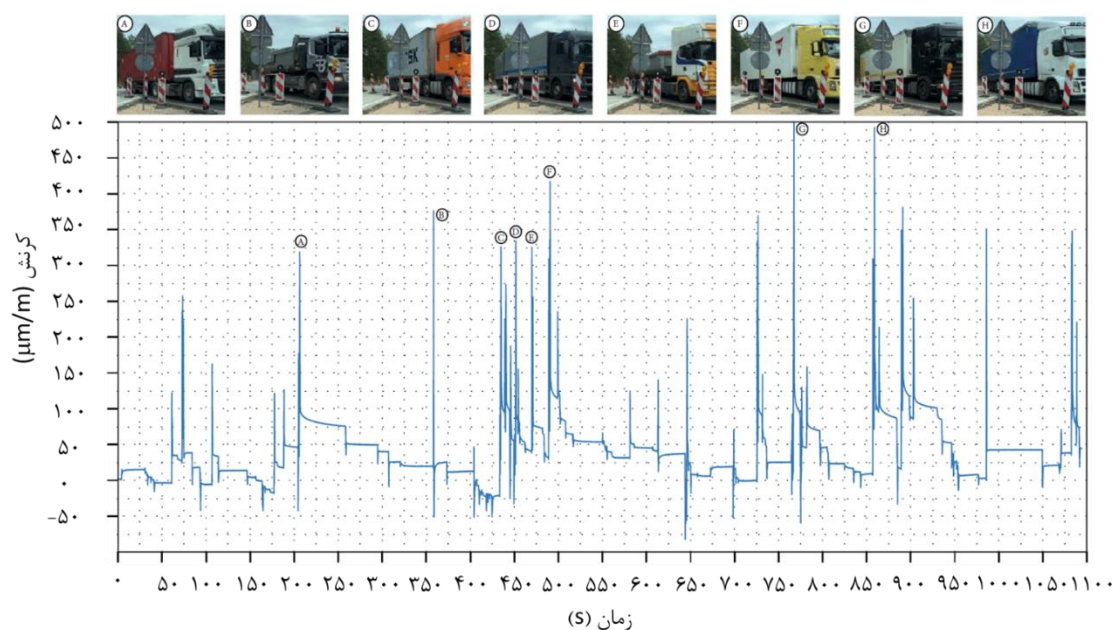
تعداد ضربات FWD	موقعیت مرکز صفحه بارگذاری نسبت به حسگر FBG (میلی‌متر)			
	900	600	300	0
1	۱۲/۵	۲۴/۶	۹۱/۵	۱۶۲/۵
2	۱۳/۱	27	۷۷/۶	۱۴۵/۹
3	۱۲/۲	۲۴/۲	۸۰/۵	۱۴۲/۷
4	۱۲/۱	۲۸/۳	۷۳/۴	۱۴۹/۵
5	۱۳/۲	۲۵/۷	۸۵/۸	۱۶۱/۶
6	۱۳/۲	۲۵/۱	۷۱/۲	۱۴۸/۵
متوسط مقدار کرنش ($\mu\text{m/m}$)	$\pm ۱۲/۷$	$\pm ۲۵/۵$	± 80	$۱۵۱/۸$
	۰/۶	۲/۱	۱۰/۲	$۹/۹ \pm$

به‌منظور ارزیابی اثر دما، مجدداً آزمایش در پاییز تکرار شد. دمای متوسط اندازه‌گیری‌شده توسط دماسنج‌های FBG در تابستان ۲۰/۵ درجه سانتی‌گراد و در پاییز ۶/۹ درجه سانتی‌گراد بود. با مقایسه‌ی مقادیر کرنش در این دو فصل، نتایج نشان داد مقادیر کرنش در فصل گرم به علت کاهش سختی مصالح، بیشتر از کرنش در فصل سرد است.

در آزمایش دوم این حسگرها در یک قطعه موقت از یک راه با میزان AADT^۶ و AADTT^۷ بالا کار گذاشته شدند. پس از اندازه‌گیری کرنش در این مقطع نتایج نشان داد که بیشترین کرنش در روسازی توسط وسایل نقلیه سنگین ایجاد می‌شود. با توجه به عملیات فیلم‌برداری صورت گرفته از تردد وسایل نقلیه در حین انجام آزمایش، وسایل نقلیه سنگین از A تا H گروه‌بندی شدند. مطابق شکل ۱۲ نتایج نشان داد کامیون گروه G با پنج محور بیشترین کرنش یا تغییر شکل نسبی را معادل $۳۷۵/۶ \mu\text{m/m}$ تولید می‌کند.

^۶ Annual Average Daily Traffic

^۷ Annual Average Daily Truck Traffic



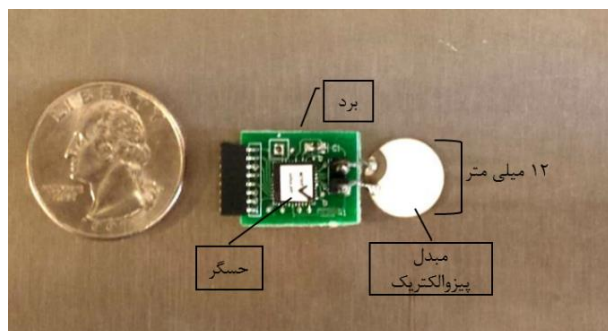
شکل ۱۲- گراف کرنش لحظه‌ای اندازه‌گیری‌شده توسط حسگرهای FBG مدفون [47]

جدول ۴- مهم‌ترین پژوهش‌های اخیر حسگرهای فیبر نوری

سال پژوهش	موقعیت سنجش	پارامتر مورد سنجش	دیتای خروجی	نوع حسگر	مرجع
۱۹۹۴	—	فشار	فشار وارد بر حسگر	تداخل سنج	۳۱
۱۹۹۵	نمونه آسفالت سرد	کرنش جانبی	نسبت پواسون	کرنش سنج فیبر نوری	۳۲
۲۰۰۵	—	دما و کرنش	دما و کرنش	کرنش سنج و دماسنج FBG	۳۳
۲۰۰۷, ۲۰۱۲	کف لایه آسفالتی	کرنش افقی	کرنش طولی و عرضی	تداخل سنج FP	۳۵, ۳۴
۲۰۱۴	لایه‌های آسفالتی با ضخامت‌های مختلف	کرنش‌های قائم و افقی	کرنش‌های قائم و افقی	تداخل سنج FP	۴۰
۲۰۱۴	کرنش فشاری قائم در بالای لایه بستر، کرنش کششی عرضی در کف لایه‌ی آسفالتی و کرنش فشاری قائم در میانه‌ی لایه‌ی آسفالتی	کرنش کششی و فشاری	کرنش کششی و فشاری	کرنش سنج FBG	۴۲
۲۰۱۴	در لایه‌های اساس، آستر و رویه بدنه‌ی آسفالتی سد	کرنش و تغییر شکل	کرنش و تغییر شکل	زنجیره‌ای از FBG	۴۱
۲۰۱۳, ۲۰۱۶	کف لایه‌های روسازی	کرنش افقی	کرنش طولی و عرضی	تداخل سنج FP	۳۸, ۳۷
۲۰۱۴, ۲۰۱۷	روسازی APT	ترک‌خوردگی	کرنش	حسگر یکپارچه FBG + مخبراتی	۳۹, ۳۰
۲۰۱۶	لایه آسفالتی	دما و کرنش حرارتی	دما و کرنش حرارتی	کرنش سنج و دماسنج FBG	۴۳
۲۰۱۷	خود حسگر و تیر آسفالتی	کرنش	کرنش کششی محوری، کرنش وسط تیر آسفالتی	حسگر یکپارچه	۴۵
۲۰۱۸	روسازی آسفالتی سه لایه	دما و کرنش	دما و کرنش در سه لایه	زنجیره‌ای از FBG	۴۴
۲۰۱۸	روسازی آسفالتی	کرنش	کرنش طولی و عرضی	حسگر یکپارچه	۴۶
۲۰۲۱	لایه آسفالتی	دما و کرنش	نمودارهای کرنش-زمان	کرنش سنج و دماسنج FBG	۴۷

به‌طور چشمگیری [۵۳] با امکان تشخیص زودهنگام خرابی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵۱].

علوی و همکاران در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی با عنوان «پایش مستمر سلامت سیستم‌های روسازی با استفاده از فناوری حسگرهای هوشمند» یک رویکرد جدید برای پایش مستمر سلامت روسازی‌های آسفالتی بر مبنای فناوری حسگرهای هوشمند ارائه کردند. در این پژوهش به‌منظور تامین انرژی مورد نیاز حسگرها، از انرژی استحصال‌شده ناشی از بار ترافیک توسط تراگذرهای پیزوالکتریک استفاده شده است. مطالعات عددی و آزمایشی به‌منظور ارزیابی عملکرد تشخیص خرابی سیستم یادشده انجام شده است. یک آنالیز المان محدود سه‌بعدی تحت بار تایر متحرک به‌منظور کسب پاسخ‌های روسازی انجام شده است. ترک‌های خستگی در کف لایه‌ی آسفالتی به‌عنوان خرابی تعریف شدند. سپس مشخصات برگرفته از داده‌های کرنش داینامیک توسط تعدادی از حسگرها به‌منظور تشخیص گسترش خرابی مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی یک نمونه بتن آسفالتی در حالت خمش سه نقطه‌ای انجام شدند. برای محافظت از حسگرهای مدفون‌شده، یک سیستم بسته-بندی کروی مینیاتوری طراحی و آزمایش شد. بر مبنای نتایج مطالعه‌ی عددی، حسگرهای مدفون در طول مسیر بارگذاری، قادر به تشخیص گسترش خرابی‌ها هستند. همچنین مطالعه‌ی آزمایشی نشان داد، روش پیشنهادشده نسبت به شناسایی حالت‌های مختلف خرابی از جمله گسترش ترک‌ها کارآمد می‌باشد. در نهایت امکان موقعیت-یابی خرابی و کمی‌سازی شدت آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۵۴]. در شکل ۱۳، نمایی از نمونه اولیه حسگر بی‌سیم هوشمند ارائه شده است.



شکل ۱۳- نمونه اولیه حسگر هوشمند بی‌سیم [۵۴]

با توجه به آمار کرنش، وسایل نقلیه سنگین به‌طور متوسط $282 \mu\text{m/m}$ کرنش ایجاد می‌کنند [47]. در جدول ۴ مهم‌ترین پژوهش‌های اخیر پیرامون پایش سلامت سازه‌های روسازی‌های آسفالتی با استفاده از حسگرهای فیبر نوری مرور شده است.

۵- حسگرهای هوشمند بی‌سیم

یکی از روش‌های دیگر پایش از درون روسازی بهره‌گیری از حسگرهای هوشمند بی‌سیم است. تحقیق در حوزه‌ی پایش سلامت سازه‌های روسازی‌ها به سمت استفاده از حسگرهای بی‌سیم self-powered مدفون در روسازی حرکت کرده است که قادر به اندازه‌گیری خودکار مشخصات مکانیکی روسازی بوده و به صورت بی‌سیم به انتقال اطلاعات می‌پردازند.

یک شبکه‌ی حسگر هوشمند، شبکه‌ای از حسگرهای بی-سیم مدفون است که متشکل از مجموعه‌ای از حسگرها به‌عنوان گره‌های این شبکه بوده و در موقعیت‌های از پیش تعیین شده برای پایش مستمر و لحظه‌ای رویداد مشخصی نظیر گسترش ترک‌ها یا پارامترهای خاصی شامل دما، فشار و... به صورت ارتباط بی‌سیم با حداقل یک گره اصلی دفن می‌شود [۴۸]. این گره اصلی به منظور انتقال اطلاعات به آنتن‌هایی مجهز است که امکان پایش از راه دور را میسر می‌کند. هر شبکه‌ای از حسگرهای هوشمند به‌گونه‌ای طراحی می‌شود تا برای تامین انرژی مورد نیاز اصطلاحاً self-powered باشند.

در پژوهش‌ها، کاربرد این حسگرها برای پایش سلامت سازه‌های زیر ساخت‌های عمرانی به‌طور مفصل بررسی شده است [۴۹-۵۲]؛ اما بررسی کاربرد آن‌ها در حوزه‌ی پایش روسازی، همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است. چراکه کمبود منابع علمی و پژوهش‌هایی به‌منظور ارائه مزایا و محدودیت‌های استفاده از این فناوری جدید احساس می‌شود.

بسیاری از سیستم‌های پایش سلامت سازه‌های زیرساخت‌های عمرانی با استفاده از مجموعه‌ای از سیم‌ها، اگر چه امکان انتقال اطلاعات را بین شبکه‌ی حسگرها و مرکز به صورت پایدار و مطمئن برقرار می‌کنند؛ اما نصب تجهیزات آن‌ها نیاز به هزینه و نیروی انسانی بالایی دارد [50]. به همین دلیل شبکه حسگرهای بی‌سیم از ابتدای قرن جدید

مانع اصلی به کارگیری گسترده‌ی این سیستم‌ها، مسئله‌ی تأمین انرژی آن‌ها است. حسگرهای تجاری موجود، نیاز به استفاده از باتری یا سیستم‌های خورشیدی دارند که پایش مستمر و بلندمدت را غیرممکن می‌کند. تعویض دوره‌ای باتری‌ها بر اثر اتمام طول عمر آن‌ها همانند سیستم‌های خورشیدی همچنان مقرون به صرفه نبوده و غیرعملی است [55, 56]. یک راهکار عملی برای غلبه بر این محدودیت می‌تواند به کارگیری تکنیک‌های استحصال انرژی باشد. استحصال انرژی در واقع فرایند تبدیل انرژی‌های مکانیکی نظیر لرزش و کرنش به انرژی الکتریکی است تا حسگر از این طریق تغذیه شود [57].

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضمن بررسی مفهوم پایش، روش‌های موجود به منظور انجام پایش سلامت سازه‌ای روسازی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. روش پایش از درون روسازی به عنوان یک روش جدید انجام پایش معرفی شد و مزایا و معایب روش پایش از سطح با روش پایش از درون روسازی مقایسه شد. همچنین حسگرهای موجود برای هر کدام از روش‌ها دسته‌بندی شده و با توجه به تمرکز این پژوهش بر روش پایش از درون روسازی، پژوهش‌های مرتبط با این روش به تفکیک حسگرهای رایج آن به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت.

حسگرهای الکترومغناطیس به منظور انجام آزمایش‌های درجا مناسب هستند؛ اما امکان پایش از راه دور را نداشته و جزو روش‌های پایش مخرب دسته‌بندی می‌شوند. همچنین استفاده از آن‌ها با اهداف پایش مستمر و بلندمدت سلامت سازه‌ای ممکن نیست.

حسگرهای فیبر نوری ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای نظیر قطر کوچک، دوام بالا، و امکان اندازه‌گیری پارامترهای مختلف را دارند که به کارگیری این حسگرها را در محیط سختی نظیر روسازی آسفالتی ممکن می‌کند. مهم‌ترین پژوهش‌های دو دهه‌ی گذشته برای انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشی با فیبر نوری در روسازی‌های آسفالتی در این مقاله آورده شد. بعضی از مهم‌ترین نتایج به شرح زیر خلاصه می‌شود: پژوهش‌های موجود بیشتر به توصیف تلاش‌های انجام‌شده برای نصب حسگرهای فیبر نوری در روسازی پرداخته است. تنها در چند مطالعه جزئیات فنی

در مورد نصب آن‌ها ارائه شده است. همچنین، تعداد محدودی از پژوهش‌ها به پایش بلندمدت پرداخته و بیشتر آن‌ها به جای بررسی عمیق پایش روسازی به اندازه‌گیری‌های آزمایشی پارامترها محدود شده‌اند. در نهایت نتیجه گرفته می‌شود که: الف) حسگرهای فیبر نوری در روسازی آسفالتی به عنوان یک ابزار مفید و امیدبخش به منظور اندازه‌گیری درجای کرنش در کف لایه‌های آسفالتی تحت اثر بار ترافیکی واقعی کارایی دارند. ب) طرح تجهیز روسازی و نصب حسگرهای فیبر نوری، به اختلاف بین مقادیر کرنش‌های کششی محاسبه‌شده در طرح روسازی و کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده در محل، مربوط است. ج) بر اثر اختلاف بین کرنش‌های محاسبه‌شده (در طرح روسازی، تحلیل داده‌های FWD) و سیگنال‌های حسگر فیبر نوری (کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده)، انجام پژوهش‌های بیشتر به منظور تعیین ضریب کالیبراسیون لازم می‌باشد. در پژوهش‌های آینده می‌توان به تهیه‌ی دستورالعمل نصب حسگرهای فیبر نوری در انواع روسازی‌های آسفالتی، بررسی انواع آرایش‌های ممکن و نیز بررسی عمیق‌تر امکان و شیوه‌ی پایش بلندمدت و از راه دور و مستمر روسازی توسط این حسگرها پرداخت.

پیرامون حسگرهای هوشمند بی‌سیم نیز می‌توان گفت در حال حاضر بخش زیادی از پژوهش‌ها بر طراحی حسگر متمرکز هستند؛ درحالی که طراحی شبکه‌ای از این حسگرها که می‌تواند مصرف انرژی این سیستم‌ها را بهینه کند، بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین عدم به کارگیری بلندمدت این حسگرها در مقیاس واقعی، امکان بررسی تاثیر مدفون‌سازی آن‌ها بر عملکرد روسازی و نیز ارزیابی طول عمر این حسگرها در به کارگیری بلندمدت آن‌ها را میسر نمی‌سازد.

علاوه بر این‌ها، فقدان مطالعات لازم در زمینه تاثیر شرایط محیطی بر طول عمر حسگرها احساس می‌شود. از آن جایی که این حسگرها پهن و گسترش ترک‌ها را با استفاده از اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم (نظیر انتشار موج صوتی، دگرگونی کرنش^۱ و...) انجام می‌دهند، مطالعات بیشتری به منظور امکان‌سنجی استفاده از داده‌های این سیستم برای تخمین تنش و مدول الاستیسیته باید انجام گیرد تا امکان ارزیابی عملکرد روسازی در طی زمان فراهم شود.

¹ strain alteration

کالیبراسیون و بومی‌سازی روش‌های طراحی روسازی متناسب با شرایط ایران اقدام کرد.

با بهره‌گیری از سیستم‌های پایش از درون روسازی برای مقاطع خاصی از راه‌ها نظیر پل‌ها، روسازی‌های خاص و صنعتی نظیر روسازی بنادر و فرودگاه‌ها می‌توان نسبت به عملیات تعمیر و نگهداری آن‌ها به طور مؤثرتری تصمیم‌گیری نمود.

نکته‌ی حائز اهمیت دیگر این است که فقدان تجهیزات APT در ایران احساس می‌شود. با استفاده از این تجهیزات می‌توان عملکرد بلندمدت روسازی‌ها را در مدت زمان کوتاهی نظیر چند هفته یا چند روز مورد ارزیابی قرار داد. درحالی که در نبود چنین تجهیزاتی در ایران امکان بهره‌گیری از تکنولوژی‌های جدید در روسازی‌ها وجود ندارد. همچنین به‌منظور استفاده از APT، به-کارگیری سیستم‌های پایش از درون روسازی مورد احتیاج است؛ چراکه در غیر این صورت امکان بهره‌گیری از تجهیزات APT وجود ندارد.

در نهایت به‌منظور بهره‌گیری و اجرای سیستم‌های پایش از درون روسازی در ایران، بهره‌گیری از متخصصین رشته-های مختلف نظیر مخابرات، فیزیک، اپتیک و لیزر توصیه می‌شود. چراکه یک فناوری بین رشته‌ای می‌باشد.

۸- مراجع

- [1] Xue, W., Wang, D., & Wang, L. (2012). A review and perspective about pavement monitoring. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 5(5), 295-302.
- [2] Alavi, A. H., Hasni, H., Lajnef, N., & Chatti, K. (2016). Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology. *Construction and Building Materials*, 114, 719-736.
- [3] Kara De Maeijer, P., Luyckx, G., Vuye, C., Voet, E., Vanlanduit, S., Braspeninckx, J., ... & De Wolf, J. (2019). Fiber optics sensors in asphalt pavement: state-of-the-art review. *Infrastructures*, 4(2), 36.
- [4] Barriera, M., Pouget, S., Lebental, B., & Rompu, J. V. (2020). In Situ Pavement Monitoring: A Review. *Infrastructures*, 5(2), 18.
- [5] Sun, L., Zhao, H., Tu, H., & Tian, Y. (2018). The smart road: practice and concept. *Engineering*, 4(4), 436-437.
- [6] Yin, X., Huang, N., & Wang, Z. (2017). A numerical investigation into sand grain/slope bed collision. *Powder technology*, 314, 28-38.
- [7] Xiong, H., Zhu, X., & Zhang, R. (2018). Energy recovery strategy numerical simulation for dual axle drive pure electric vehicle based on motor loss model and big data calculation. *Complexity*, 2018.
- [8] Zhu, H. P., Yu, J., & Zhang, J. B. (2011). A summary review and advantages of vibration-based damage

تقریباً تمامی مطالعات مربوط به حسگرهای هوشمند بی-سیم به پایش ترک‌های درون ساختار روسازی پرداخته‌اند؛ درحالی که این حسگرها امکان شناسایی انواع مختلفی از خرابی‌ها نظیر تغییر شکل‌های دائمی، چاله‌ها، وصله‌کاری و عیوب سطحی را دارند که بر عملکرد روسازی و ایمنی حمل و نقل تأثیرگذارند [۲۰].

۷- پیشنهادهایی به‌منظور اجرای شیوه‌ی پایش از درون روسازی در ایران

احداث یک روسازی با هزینه‌ی بالایی همراه است. چنانچه ضخامت روسازی در طول و عرض راه ضرب شود، مشاهده می‌شود که حجم زیادی از مصالح برای اجرای یک روسازی مورد نیاز است. از طرف دیگر، در طی زمان بر اثر عوامل متعددی این روسازی دچار خرابی‌هایی می‌شود. برای پیشگیری، تعویق یا تعمیر این خرابی‌ها لازم است سلامت سازه‌ای روسازی‌ها مورد پایش قرار گیرد. برای انجام پایش، نیاز به سیستم پایش سلامت سازه‌ای روسازی وجود دارد. به این منظور، سیستم‌های مدیریت روسازی با عنوان PMS^۱ وجود دارد که عملیات پایش را از سطح روسازی انجام می‌دهد. به‌منظور بهره‌گیری از سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ای روسازی‌ها در ایران، اجرای سیستم-های پایش از درون روسازی با توجه به مزایای آن‌ها و معایب سیستم‌های پایش از سطح روسازی، توصیه می‌شود. غیرمخرب‌بودن، پایش مستمر و بلندمدت سلامت روسازی و شناسایی ترک‌خوردگی قبل از ایجاد آن مشروط به تأمین رزولوشن کافی برای این سیستم‌ها، از ویژگی‌های این نوع سیستم‌ها بود که اشاره شد. بنابراین در ایران نیاز به یک تغییر نگرش به سمت استفاده از سیستم‌های پایش از درون روسازی با توجه به امتیازات بالای این نوع سیستم‌ها، وجود دارد.

در زمینه طراحی روسازی‌ها، در ایران از روش‌های غیر-بومی نظیر آیین‌نامه آشتو یا روش‌های طراحی مکانیکی-تجربی استفاده می‌شود. درحالی که در ایران نوع ناوگان، نوع مصالح و شرایط آب و هوایی متفاوتی نسبت به کشورهای مبدا این روش‌ها وجود دارد. با به‌کارگیری سیستم‌های پایش از درون روسازی و بهره‌گیری از دیتای تولیدشده توسط آن در بلندمدت، می‌توان نسبت به

¹ Pavement Management System

- instrumentation. *Journal of testing and evaluation*, 23 (3), 189-195.
- [24] Gonçalves, P. F., Ceratti, J. A. P., & Bica, A. D. (2003). The use of embedded stress cells for monitoring pavement performance. *Geotechnical testing journal*, 26 (4), 363-372.
- [25] Huff, R., Berthelot, C., & Daku, B. (2005). Continuous primary dynamic pavement response system using piezoelectric axle sensors. *Canadian journal of civil engineering*, 32(1), 260-269.
- [26] Xue, W., & Weaver, E. (2011). Pavement shear strain response to dual and wide-base tires. *Transportation research record*, 2225(1), 155-164.
- [27] Lajnef, N., Rhimi, M., Chatti, K., Mhamdi, L., & Faridazar, F. (2011). Toward an integrated smart sensing system and data interpretation techniques for pavement fatigue monitoring. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(7), 513-523.
- [28] Glisic, B., & Inaudi, D. (2008). *Fibre optic methods for structural health monitoring*. John Wiley & Sons.
- [29] Du, Y., Sun, B., Li, J., & Zhang, W. (2019). *Optical Fiber Sensing and Structural Health Monitoring Technology*. Springer.
- [30] Chapeleau, X., Blanc, J., Hornych, P., Gautier, J. L., & Carroget, J. J. O. C. S. H. M. (2017). Assessment of cracks detection in pavement by a distributed fiber optic sensing technology. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(4), 459-470.
- [31] Navarrete, M. C., & Bernabeu, E. (1994). Fibre-optic weigh-in-motion sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 41(1-3), 110-113.
- [32] Signore, J. M., & Roesler, J. R. (1995). Using fiber-optic sensing techniques to monitor behavior of transportation materials. *Transportation research record*, (1478), 37-43.
- [33] Wang, J. N., & Tang, J. L. (2005). Using fiber Bragg grating sensors to monitor pavement structures. *Transportation research record*, 1913(1), 165-176.
- [34] Doré, G., Duplain, G., & Pierre, P. (2007, June). Monitoring mechanical response of in service pavements using retrofitted fiber optic sensors. In *Proc of the Intern. Conf. on the Advanced Charact. of Pavement and Soil Eng. Materials, Athens, Greece* (pp. 883-891).
- [35] Grellet, D., Doré, G., & Bilodeau, J. P. (2012). Comparative study on the impact of wide base tires and dual tires on the strains occurring within flexible pavements asphalt concrete surface course. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(5), 526-535.
- [36] Bilodeau, J. P., & Doré, G. (2012). Estimation of tensile strains at the bottom of asphalt concrete layers under wheel loading using deflection basins from falling weight deflectometer tests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(7), 771-778.
- [37] Loizos, A., Plati, C., & Papavasiliou, V. (2013). Fiber optic sensors for assessing strains in cold in-place recycled pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 125-133.
- [38] Loizos, A., Papavasiliou, V., & Plati, C. (2016). Effectiveness of FWD to simulate traffic loading in recycled pavements. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(1), 04014193.
- [39] Chapeleau, X., Blanc, J., Hornych, P., Gautier, J. L., & Carroget, J. (2014). Use of distributed fiber optic sensors to detect damage in a pavement. *Introduction to Unmanned Aircraft Systems*, 449-457.
- [40] Garg, N., Bilodeau, J. P., & Doré, G. (2014). *Experimental study of asphalt concrete strain distribution* identification methods in structural health monitoring. *Engineering mechanics*, 28(2), 1-11.
- [9] Wang, H. P., Xiang, P., & Jiang, L. Z. (2020). Optical fiber sensing technology for full-scale condition monitoring of pavement layers. *Road Materials and Pavement Design*, 21(5), 1258-1273.
- [10] Ganji, M. R., Ghelmani, A., Golroo, A., & Sheikhzadeh, H. (2020). A Brief Review on the Application of Sound in Pavement Monitoring and Comparison of Tire/Road Noise Processing Methods for Pavement Macrotexture Assessment. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-24.
- [11] Li, X., & Goldberg, D. W. (2018). Toward a mobile crowdsensing system for road surface assessment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 69, 51-62.
- [12] Elbagalati, O., Elseifi, M., Gaspard, K., & Zhang, Z. (2018). Development of the pavement structural health index based on falling weight deflectometer testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(1), 1-8.
- [13] Fakhri, M., Dezfoulian, R. S., Golroo, A., & Makkiabadi, B. (2019). Developing an approach for measuring the intensity of cracking based on geospatial analysis using GIS and automated data collection system. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-15.
- [14] Ji, X., Chen, Y., Hou, Y., & Zhen, Y. (2019). Detecting concealed damage in asphalt pavement based on a composite lead zirconate titanate/polyvinylidene fluoride aggregate. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(11), e2452.
- [15] Ji, X., Hou, Y., Chen, Y., & Zhen, Y. (2019). Fabrication and performance of a self-powered damage-detection aggregate for asphalt pavement. *Materials & Design*, 179, 107890.
- [16] Ji, X., Hou, Y., Chen, Y., & Zhen, Y. (2019). Attenuation of acoustic wave excited by piezoelectric aggregate in asphalt pavement and its application to monitor concealed cracks. *Construction and Building Materials*, 216, 58-67.
- [17] Rhimi, M., Lajnef, N., Chatti, K., & Faridazar, F. (2012). A Self-powered Sensing System for Continuous Fatigue Monitoring of In-service Pavements. *International Journal of Pavement Research & Technology*, 5(5).
- [18] Weinmann, T. L., Lewis, A. E., & Tayabji, S. D. (2004, September). Pavement sensors used at accelerated pavement test facilities. In *Proceedings of the second international conference on accelerated pavement testing*.
- [19] Tabatabaee, N., & Sebaaly, P. (1990). State-of-the-art pavement instrumentation. *Transportation Research Record*, 1260, 246-255.
- [20] Di Graziano, A., Marchetta, V., & Cafiso, S. (2020). Structural health monitoring of asphalt pavements using smart sensor networks: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.
- [21] Potter, J. F., Mayhew, H. C., & Mayo, A. P. (1969). Instrumentation of the Full-scale Experiment on A1 Trunk Road at Conington, Huntingdonshire. *Rrl Reports, Road Research Lab/UK/*.
- [22] Sebaaly, P. E., Tabatabaee, N., Kulakowski, B., & Scullion, T. (1991). Instrumentation for flexible pavements-field performance of selected sensors. *Federal Highway Administration, Washington, DC*.
- [23] Sebaaly, P. E., Tabatabaee, N., & Kulakowski, B. (1995). Evaluation of the Hall Effect sensor for pavement

- [50] Lynch, J. P., & Loh, K. J. (2006). A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91-130.
- [51] Noel, A. B., Abdaoui, A., Elfouly, T., Ahmed, M. H., Badawy, A., & Shehata, M. S. (2017). Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3), 1403-1423.
- [52] Yun, C. B., & Min, J. (2011). Smart sensing, monitoring, and damage detection for civil infrastructures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15 (1), 1-14.
- [53] Bennett, R., Hayes-Gill, B., Crowe, J. A., Armitage, R., Rodgers, D., & Hendroff, A. (1999, May). Wireless monitoring of highways. In *Smart Structures and Materials 1999: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways* (Vol. 3671, pp. 173-182). International Society for Optics and Photonics.
- [54] Alavi AH, Hasni H, Lajnef N, Chatti K. Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology. *Construction and Building Materials* 2016;114:719-36.
- [55] Fedele, R., Merenda, M., & Giammaria, F. (2018). Energy harvesting for IoT road monitoring systems. *Instrumentation, Measure, Metrologie*, 17(4), 605.
- [56] Long, H., Liu, Y., Wang, Y., Dick, R. P., & Yang, H. (2009, November). Battery allocation for wireless sensor network lifetime maximization under cost constraints. In *2009 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design-Digest of Technical Papers* (pp. 705-712). IEEE.
- [57] Lajnef, N., Chatti, K., Chakrabarty, S., Rhimi, M., & Sarkar, P. (2013). *Smart pavement monitoring system* (No. FHWA-HRT-12-072). United States. Federal Highway Administration.
- in flexible pavements at the national airport pavement test facility* (No. P10095).
- [41] Imai, M., Igarashi, Y., Shibata, M., & Miura, S. (2014). Experimental study on strain and deformation monitoring of asphalt structures using embedded fiber optic sensor. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 4(3), 209-220.
- [42] Zhou, Z., Liu, W., Huang, Y., Wang, H., Jianping, H., Huang, M., & Jinping, O. (2012). Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 36-49.
- [43] Vegt, G. J. (2016). *Verlicht asfalteren. Over de haalbaarheid van Fiber Bragg Grating sensoren in het asfaltverwerkingsproces* (Bachelor's thesis, University of Twente).
- [44] Kara De Maeijer, P., & Vuye, C. (2018). Fiber Bragg Grating Sensors in Three Asphalt Pavement Layers. *Infrastructures*, 3(2), 16.
- [45] Meng, L., Wang, L., Hou, Y., & Yan, G. (2017). A research on low modulus distributed fiber optical sensor for pavement material strain monitoring. *Sensors*, 17 (10), 2386.
- [46] Xiang, P., & Wang, H. (2018). Optical fibre-based sensors for distributed strain monitoring of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(9), 842-850.
- [47] Braunfelds, J., Senkans, U., Skels, P., Janeliukstis, R., Salgals, T., Redka, D., ... & Bobrovs, V. (2021). FBG-based sensing for structural health monitoring of road infrastructure. *Journal of Sensors*, 2021.
- [48] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4), 393-422.
- [49] Alavi, A. H., Hasni, H., Lajnef, N., Chatti, K., & Faridazar, F. (2016). An intelligent structural damage detection approach based on self-powered wireless sensor data. *Automation in Construction*, 62, 24-44.