

# پایش سلامت زیرساخت‌های مجهز به حسگرهای بتنی با قابلیت خودتشخیصی (مطالعه مروری)

## مقاله علمی - مروری

بهراد صباغ، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

مصطفی آدرسی\*، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [m.adresi@sru.ac.ir](mailto:m.adresi@sru.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۳۶۲-۳۲۷

### چکیده

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های خودتشخیصی، تحول چشمگیری در پایش سلامت روسازی‌ها ایجاد کرده است. مصالح نوینی مانند آسفالت‌های اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی و کامپوزیت‌های رسانا، با قابلیت ذاتی تشخیص تغییرات تنش، ترک‌های ریز و نفوذ رطوبت، از طریق اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی، داده‌های بلادرنگ از وضعیت روسازی ارائه می‌دهند. سیستم‌های هوشمند مجهز به حسگرهای فیبر نوری یا شبکه‌های اینترنت اشیا (IoT)، حتی تغییرات میکروسکوپی در لایه‌های زیرین راه را شناسایی کرده و با انتقال داده‌ها به پلتفرم‌های ابری، امکان تحلیل خودکار و تشخیص زودهنگام خرابی‌ها پیش از گسترش آسیب‌ها فراهم می‌آورند. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و نیاز به بازرسی‌های فیزیکی، دقت پایش را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. ادغام داده‌های حسگرها (مانند تنش، دما و ارتعاشات) با الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری عمیق، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر نقاط ضعف روسازی را مهیا کرده است. پیاده‌سازی این فناوری‌ها نه تنها ایمنی و دوام روسازی‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه با یکپارچه سازی داده‌ها در سیستم‌های مدیریت ترافیک هوشمند و خودروهای خودران، انتخاب مسیرهای بهینه بر اساس سلامت راه را ممکن می‌سازد. در سطح کلان، تلفیق داده‌های پایشی با استانداردهای بین‌المللی راهسازی، زمینه تدوین پروتکل‌های نوین برای طراحی روسازی‌های مقاوم‌تر و مقرون به صرفه‌تر را فراهم می‌کند. این پیشرفت‌ها گامی اساسی به سوی توسعه زیرساخت‌های پایدار و افزایش کارایی شبکه حمل و نقل است.

واژه‌های کلیدی: خودحسگری، مصالح سیمانی، پایش سلامت سازه، آزمایشات غیر مخرب، تشخیص خرابی

### ۱- مقدمه

و ارائه هشدار برای نشست و نشست نا همگون استفاده شوند. به طور خاص، موتور توسعه راه‌های هوشمند با حسگرهای مبتنی بر سیمان خود حسگر می‌توانند توسعه یابند و محقق شوند. شکل ۱ را ببینید. از این رو بررسی امکان سنجی به کارگیری این نوع حسگرها در سازه‌های بتنی به منظور پایش عملکرد سازه‌ای آن‌ها می‌تواند قدم اول در توسعه راه‌های آینده باشد. اکثر سازه‌های بتن مسلح به مرور زمان و ناشی از شرایط محیطی و یا تاثیر بارهای خارجی وارد بر آنها مانند زلزله، بار ترافیک،

زیرساخت‌های راه سرشار از سازه‌های بتنی مانند، پل‌ها، دیوارهای نگهبان، تونل‌ها و حتی رویه‌های بتنی است. زیرساخت‌های بتنی ادغام شده با حسگرهای پایه سیمانی می‌تواند به طور خودکار آسیب‌ها و ترک‌ها را تشخیص دهد و دما و رطوبت را کنترل کند تا اطلاعات وضعیت سلامت سازه را ارائه دهد و به مردم هشدار دهد که از سازه‌هایی که خطرناک شده‌اند فرار کنند. سنسورهای مبتنی بر سیمان همچنین می‌توانند در پل‌ها و تونل‌ها برای شناسایی تغییر شکل‌ها، نظارت بر ترک‌ها

انجام می‌شده ولی در برخی موارد خاص پیشرفته‌تر روش‌های غیرمخرب مانند روش‌های الکترومغناطیس، روش‌های فراصوتی و دیگر روش‌های مبتنی بر انتشار امواج نیز استفاده شده است. برای چنین بازرسی‌هایی دسترسی به محل مورد نظر از سازه برای آزمایش نیاز می‌باشد و همچنین تخصص افراد انجام دهنده آزمایش تا حد زیادی موثر می‌باشد. همچنین در اغلب این روش‌ها نیاز به کار دقیق و فشرده و پرهزینه می‌باشد. به همین دلیل روش‌های جایگزین که به صورت خودکار اطلاعات سازه را برای تعیین وضعیت آن جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل می‌کنند، توسط پژوهشگران دنبال شد. در این روش‌ها، پایش سلامت سازه‌ها مبتنی بر این ایده اساسی هستند که خصوصیات دینامیکی یک سازه تابعی از خصوصیات فیزیکی آن می‌باشد. بنابراین تغییر خصوصیات فیزیکی سازه ناشی از آسیب‌های وارد بر آن می‌تواند موجب تغییر خصوصیات دینامیکی آن شود. در نتیجه داده‌های ارتعاش سازه جمع‌آوری شده و برای شناسایی آسیب‌های سازه استفاده می‌شود.

انفجار و سایر منابعی که در سازه ارتعاش ایجاد می‌نمایند دچار زوال و آسیب می‌شوند. علاوه بر آن، عواملی همچون خوردگی میلگردها، پدیده جداشدگی مصالح و واکنش قلیایی سنگدانه‌ها از جمله سازه‌های داخلی ایجاد آسیب در سازه‌های بتن مسلح می‌باشند. به منظور شناسایی نقایصی که ممکن است به مرور، سلامت سازه را تهدید نمایند و یا منجر به خرابی آن شوند باید شرایط و سلامت سازه در طول زمان مورد پایش قرار گیرد. لفظ پایش سلامت سازه‌ها به فرآیند انجام عملیات شناسایی و تشخیص آسیب در سازه‌های مهندسی اطلاق می‌گردد. در این راستا، هرگونه تغییر در خواص مادی و یا هندسی (شامل تغییر در شرایط مرزی و اتصالات اعضا) یک سیستم سازه‌ای که اثری نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد بعنوان آسیب تعریف می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات پژوهشی زیادی جهت بهبود دقت و قابلیت اطمینان روش پایش سلامت سازه انجام شده است. بازرسی‌های سنتی سازه معمولاً شامل بازرسی‌های چشمی توسط افراد آموزش دیده و با تجربه

## ۲- مبانی پایش سلامت

لفظ پایش سلامت سازه‌ها به فرآیند انجام عملیات شناسایی و تشخیص آسیب در سازه‌های مهندسی اطلاق می‌گردد. در این راستا، هرگونه تغییر در خواص مادی و یا هندسی (شامل تغییر در شرایط مرزی و اتصالات اعضا) یک سیستم سازه‌ای که اثری نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد به عنوان آسیب تعریف می‌شود. روش‌های پایش سلامت سازه‌ها مبتنی بر این ایده اساسی هستند که خصوصیات دینامیکی یک سازه تابعی از خصوصیات فیزیکی آن می‌باشد بنابراین تغییر خصوصیات فیزیکی سازه ناشی از آسیب‌های وارد بر آن می‌تواند موجب تغییر خصوصیات دینامیکی آن شود. ارزیابی سلامت و یکپارچگی عملکرد سازه‌های عمرانی در طول زمان از طریق پایش رفتار و برداشت خصوصیات دینامیکی آنها انجام می‌شود. تشخیص وجود آسیب در سازه‌ها، بطور مستقیم و بر مبنای تغییرات شناسایی شده در خواص دینامیکی آنها صورت می‌گیرد.

### فرآیند پایش سلامت سازه

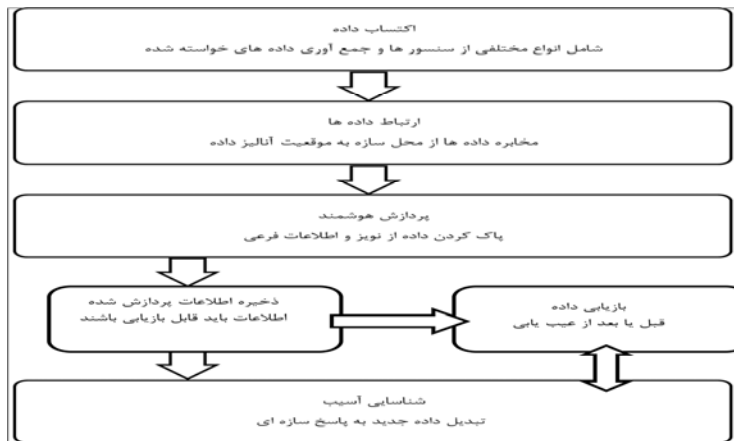
- فرآیند پایش سلامت سازه‌ها شامل چند مرحله می‌باشد:
- ۱- تحت نظر داشتن وضعیت سازه در طی زمان از طریق انجام آزمون‌های دوره‌ای و اندازه‌گیری شرایط سازه به کمک سنسورهایی که در نقاط مختلف سازه تعبیه می‌گردند.
  - ۲- انتقال داده‌ها
  - ۳- تحلیل داده‌ها
  - ۴- تشخیص نوع آسیب، محل آسیب، شدت آسیب،
  - ۵- تعیین وضعیت فعلی سلامت سازه بر پایه تحلیل و پردازش مشخصه‌های استخراج شده
  - ۶- پیش بینی عمر باقیمانده بر اساس مدل‌های عمر
  - ۷- یافتن گزینه‌های مختلف تعمیر و مقاوم سازی در زمان و مکان مناسب که عمر سازه را بیشینه کند در حالی که کمترین هزینه را تحمل می‌کند.

### عناصر سیستم پایش سلامت سازه

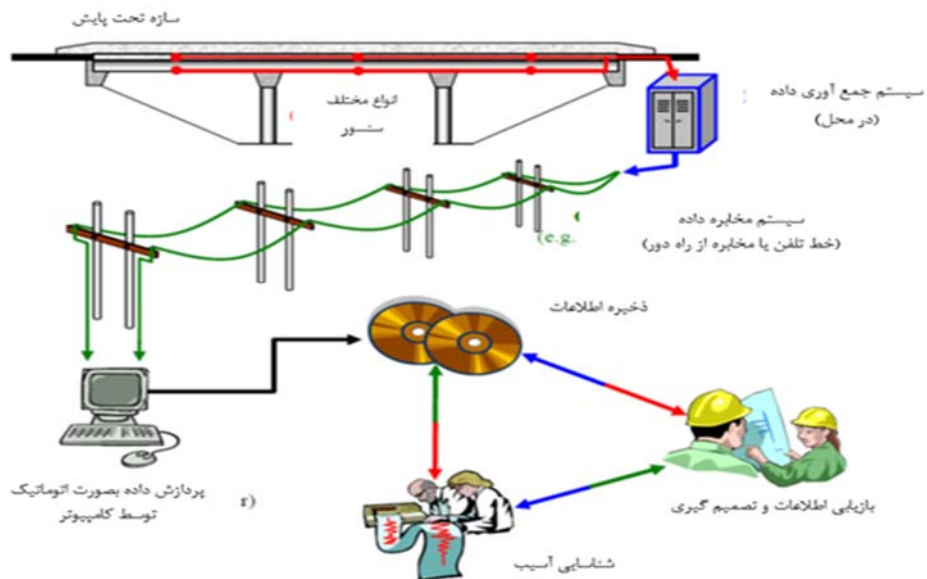
همانطور که در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده است عناصر اصلی یک سیستم پایش سلامت می‌تواند شامل اجزای زیر باشد.



شکل ۱. توسعه پایش در حوزه‌های مختلف بر پایه حسگرهای پایه سیمانی (Deng et al. 2023)



شکل ۲. عناصر تشکیل دهنده یک سیستم پایش سلامت سازه (حاجی محمد رضایی و نادرپور، ۱۳۹۷)



شکل ۳. عناصر تشکیل دهنده یک سیستم پایش سلامت سازه (حاجی محمد رضایی و نادرپور، ۱۳۹۷)

### دسته بندی پایش سلامت سازه

پایش سلامت سازه را با توجه به نوع آزمایش و روش جمع‌آوری داده‌ها و می‌توان به چهار دسته کلی که هرکدام متشکل از زیر مجموعه‌هایی‌اند، تقسیم بندی کرد ( Saafi (2009).

-تست میدانی استاتیکی

-تست میدانی دینامیکی

-پایش دوره‌ای

-پایش پیوسته

### سطوح پایش سلامت سازه

یک روش توانمند و کارآمد شناسایی آسیب باید بتواند (Parveen, Rana, and Fanguero, 2013).

۱- وجود آسیب را شناسایی نماید.

۲- محل آسیب را تعیین نماید.

۳- میزان و شدت آسیب را تعیین نماید.

۴- کارایی و عملکرد آینده سازه را بر اساس سطح آسیب فعلی آن ارزیابی نماید.

### مزایا و معایب استفاده از سیستم‌های پایش سلامت

-کم اشتباه و قابل اطمینان

-کاهش زمان از کارافتادگی سازه

-جلوگیری از خرابی‌های نابهنگام

-کاهش هزینه چرخه حیات سازه

-افزایش بهره‌وری

-افزایش ایمنی

-طولانی‌تر شدن عمر مفید سازه

و در مقابل می‌توان به مقرون به صرفه نبودن آن‌ها به خصوص در سازه‌های کوچک و یا کم اهمیت اشاره نمود.

### ۳- نظارت بر سازه با استفاده از پایش سلامت سازه

#### و روش‌های غیر مخرب

تکنیک‌های پایش سلامت سازه و آزمون‌های غیرمخرب می‌توانند برای پایش و ارزیابی مداوم سازه‌ها به کار گرفته شوند (Masri and Rakha 2020). همان‌طور

که توسط حسنی و داکرمن (Hassani and Dackermann 2023) طرح شده است، SHM شامل حسگرهای نصب‌شده دائمی و سیستم‌های برداشت داده خودکار برای فراهم کردن داده‌های در لحظه از وضعیت سازه‌ها است. در مقابل، NDT از روش‌های آزمون موضعی استفاده می‌کند که به صورت دستی یا دوره‌ای برای ارزیابی مصالح و اجزاء بدون ایجاد آسیب به کار می‌روند. هر دو راهبرد مزایایی در پایش سازه‌ها دارند SHM. داده‌های کمی مداوم را فراهم می‌کند که امکان ردیابی عملکرد سازه بر اساس زمان را میسر می‌سازد NDT. روش‌های آزمون استاندارد شده‌ای را برای دستیابی به ارزیابی‌های دقیق دوره‌ای ارائه می‌دهد. استفاده ترکیبی از SHM برای پایش کلی و NDT برای ارزیابی‌های موضعی می‌تواند باعث افزایش اثربخشی برنامه‌های پایش سازه شود (Hassani and Dackermann 2023). پیشرفت‌های فناورانه اخیر قابلیت‌های روش‌های SHM و NDT را ارتقا داده است. توسعه در فناوری نوید و استفاده از حسگرهای مختلف، تکنیک‌های تحلیل داده، استفاده از فناوری خودکار و رباتیک و همچنین استفاده از تکنیک‌های سنجش از راه دور منجر به قابلیت‌های پایش هوشمندتر، دقیق‌تر و جامع‌تر شده است (Hassani and Dackermann 2023). اگرچه تحقیقات برای بهبود تکنیک‌ها ادامه دارد، اما پیاده‌سازی راهبردهای پیشرفته SHM و NDT می‌تواند منافع قابل توجهی برای نگهداری و مدیریت سازه‌های حیاتی به همراه داشته باشد.

### ۳-۱- انواع حسگرهای مورد استفاده در سیستم‌های پایش سلامت سازه

سیستم‌های SHM معمولاً شامل شبکه‌های حسگری، سیستم‌های برداشت داده، سیستم‌های ارتباطی و روش‌های تحلیل داده‌ها هستند. اندازه‌گیری‌های حسگر مانند شتاب، کرنش، جابه‌جایی، سطح بار و شرایط محیطی برای تشخیص آسیب و ردیابی عملکرد سازه بر اساس زمان تحلیل می‌شوند. پیشرفت‌های اخیر در SHM شامل توسعه

ارزیابی و مدیریت سازه‌های حیاتی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. تحقیقات و توسعه‌های فناورانه مداوم با هدف پیشرفت بیشتر سیستم‌های SHM و گسترش کاربردهای آن در جریان است. در ادامه برخی از انواع تکنیک‌های جدید که در توسعه دقت و کارایی سیستم پایش سلامت سازه موثر بوده‌اند در جدول ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در حسگرها، سیستم‌های انتقال داده‌ها، روش‌های تحلیلی و ادغام روش‌های هوش مصنوعی است. حسگرهای فیبر نوری، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، فناوری‌های دورسنجی و الگوریتم‌های یادگیری عمیق نمونه‌هایی از نوآوری‌هایی هستند که قابلیت‌های SHM را افزایش می‌دهند. پیاده‌سازی راهبردهای SHM می‌تواند با فراهم کردن داده‌های کمی برای اطلاع از تصمیم‌گیری‌های نگهداری و تضمین ایمنی (Hassani and Dackermann 2023).

جدول ۱. بررسی کلی برخی از انواع تکنیک‌های جدید که در توسعه دقت و کارایی سیستم پایش سلامت سازه موثر بوده‌اند

نام	معایب	مزایا	کاربردها در مهندسی عمران	توضیحات
سنسورهای فیبر نوری (FOSs)	نیاز به کابل‌های فیبر نوری، وابستگی به تامین برق	از دست رفتن کم سیگنال برای نظارت در فواصل طولانی، مقاومت در برابر تداخل الکترومغناطیسی، تنوع در پارامترهای قابل اندازه‌گیری، اندازه کوچک و وزن سبک، قابلیت ادغام دائمی در سازه‌ها، مقاومت در برابر محیط‌های سخت مانند دماهای بالا (Adhreena and Hafizi 2023; Chu 2005; Foaleng and Thévenaz 2011; Peters and Inaudi 2014; Porco et al. 2013; Rajibul Islam et al. 2014; Villatoro et al. 2017)	شناسایی ترک، نظارت بر تنش، نظارت بر زنگ‌زدگی، نظارت بر ارتعاش، نظارت بر دما (Gowshikan et al. 2023)	این سنسورها از ویژگی‌های نور مدوله‌شده برای اندازه‌گیری تغییرات در پارامترهایی مانند تنش، دما، ارتعاش و غیره استفاده می‌کنند. (Adhreena and Hafizi 2023; Chu 2005; Foaleng and Thévenaz 2011; Peters and Inaudi 2014; Porco et al. 2013; Rajibul Islam et al. 2014; Villatoro et al. 2017)
شبکه‌های سنسور بی‌سیم	مصرف انرژی، ریسک از دست رفتن داده، تداخل و نویز (Fu et al. 2021)	حذف نیاز به سیم کشی، توپولوژی انعطاف‌پذیر، نصب و گسترش آسان، جمع‌آوری داده در زمان (Fu, Pan, and Shi 2021; Wang et al. 2012; Zhang et al. 2020)	نظارت بر سلامتی سازه‌ها، نظارت بر ترافیک، نظارت محیطی	شبکه‌هایی از سنسورهای مکانیکی توزیع شده که اطلاعات را به صورت بی‌سیم انتقال می‌دهند
فناوری‌های سنجش از راه دور	تداخل سیگنال، نیاز به مهارت‌های تخصصی برای عملیات و پردازش داده، هزینه‌های بالای تجهیزات (Reagan et al. 2017)	پوشش گسترده، جمع‌آوری سریع داده، دسترسی به مناطق خطرناک/نامناسب، وضوح مکانی بالا (Cho, Kim, and Kim 2016; Reagan, Sabato, and Niezrecki 2017)	بازرسی زیرساخت‌ها، نظارت بر لغزش، نظارت بر محل‌های ساخت و ساز، نظارت بر سیلاب	فناوری‌هایی که بدون تماس فیزیکی با اشیا اطلاعات جمع‌آوری می‌کنند.
الگوریتم‌های یادگیری	امکان بیش‌افزایی (اورفیتینگ) در مجموعه داده‌های کوچک، نیاز به مجموعه داده‌های آموزشی بزرگ، کمبود تفسیر پذیری (Teng et al. 2023)	تجزیه و تحلیل تطبیقی و خودکار، ترتیب دادن به مجموعه داده‌های پیچیده، پیش‌بینی قابل عمومی، ارزیابی در زمان واقعی (Dackermann et al. 2017; Dackermann, Smith, and Randall 2014; Rezazadeh, De Luca, and Perfetto 2022; Teng et al. 2023; Ye, Jin, and Yun 2019; Yuan et al. 2020)	نظارت بر سلامتی سازه‌ها، شناسایی خسارت، دسته‌بندی عیب، پیش‌بینی مدل	الگوریتم‌هایی که از داده یاد می‌گیرند و عملکرد خود را بهبود می‌بخشند

<p><b>پیزو مقاومتی</b></p>	<p>نیاز به نصب مستقیم بر روی سطح که می‌تواند به تمرکز تنش منجر شود (Lynch et al. 2003)، رزولوشن محدود و شکنندگی نسبت به سنسورهای خازنی مقایسه‌شده، تأثیرات نویز الکتریکی و تغییرات دما بر اندازه‌گیری‌ها، خروجی غیرخطی در فرکانس‌های بسیار پایین (<math>&lt;10</math> هرتز)</p>	<p>قابلیت اندازه‌گیری نیروهای استاتیک و دینامیک در یک دامنه فرکانس گسترده (Adresi, Sabagh, and Sharifi 2022; Safizadeh and Latifi 2014)، نصب آسان توسط چسباندن به سطح یا جاسازی در مواد، مستقل از تداخل الکترومغناطیسی</p>	<p>نظارت بر تنش و کرنش و ترک در اجزای سازه‌هایی مانند تیرها، ستون‌ها، تیرها و غیره. (Lynch et al. 2003; Park et al. 2006; Safizadeh and Latifi 2014)</p>	<p>سنسورهای پیزومقاومتی بر اساس اثر پیزومقاومتی عمل می‌کنند و وقتی تنش مکانیکی اعمال می‌شود، مقاومت الکتریکی مواد مانند سیلیکون یا ژرمانیوم که به عنوان عناصر حس‌کننده استفاده می‌شوند، تغییر می‌کند. این تغییر در مقاومت اندازه‌گیری می‌شود و نیروی اعمالی یا شتاب محاسبه شود.</p>
----------------------------	---	--	--	---

و می‌توان آنها را در هفت گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: امواج صوتی، الکترومغناطیسی، نوری، تصویربرداری با اشعه، الکتریکی، شیمیایی و روش‌های مکانیکی. تکنیک‌هایی مانند جریان ادی، اولتراسونیک، انتشار صوتی، ترموگرافی مادون قرمز و رادار نفوذی به طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرند. NDT ارزیابی‌های محلی فراهم می‌کند و به طور معمول به صورت دستی و دوره‌ای انجام می‌شود. پیشرفت‌های اخیر با توسعه فناوری‌های حسگرها، رباتیک، سنجش از راه دور و تحلیل داده‌ها توانایی‌های NDT را بهبود بخشیده‌اند. پیاده‌سازی NDT در کنار استراتژی‌های پیشرفته نظارت بر سلامت سازه‌ها می‌تواند ارزیابی جامعی از سازه‌های حیاتی فراهم کند. تحقیقات مستمر به اهداف بهبود فناوری‌های NDT و گسترش کاربردهای آنها ادامه می‌دهد جدول ۲ (Hassani and Dackermann 2023).

در مورد روش‌های پایش سلامت سازه (SHM) نیز با وجود مزایای فراوان، محدودیت‌هایی همچون وابستگی به حسگرهای خارجی، نیاز به تعمیر و نگهداری مداوم حسگرها، و آسیب‌پذیری حسگرها در برابر شرایط محیطی سخت، کاربرد آنها را با چالش مواجه کرده است. پژوهش و توسعه روش‌های پیشرفته‌تر SHM که بتوانند این محدودیت‌ها را برطرف کنند، ضروری به نظر می‌رسد.

### ۳-۲- روش آزمایشات غیر مخرب

آزمایش‌های غیر تخریبی (NDT) شامل روش‌های مختلفی برای ارزیابی مواد و اجزا بدون ایجاد خرابی می‌شود (Masri and Rakha 2020). همانطور که توسط حسنی و دکرمین (Hassani and Dackermann 2023) بحث شده است، تکنیک‌های NDT بر اصول فیزیکی مختلف مبتنی است

جدول ۲. بررسی کلی انواع روش‌های آزمایشات غیر مخرب

نام	معایب	مزایا	کاربردها در مهندسی عمران	توضیحات
<p>نظارت بر ارتعاش (مبتنی بر لرزش) (Carden and Fanning 2004)</p>	<p>نیاز به پایه مقدراری؛ تجزیه و تحلیل داده‌های حجیم؛ تغییرات محیطی بر نتایج تأثیر می‌گذارد (Fan and Qiao 2011)</p>	<p>رویکرد جهانی مناسب برای ساختارهای پیچیده؛ اطلاعات خسارت کمی (Carden and Fanning 2004)</p>	<p>نظارت بر لرزش پل، ساختمان، سد [و لوله‌کشی] نظارت بر سلامت ماشین‌آلات (Farrar et al. 1999; Siringoringo and Fujino 2008; Wang and Gao 2006; Yoon et al. 2005; Zhu, He, and Chen 2005)</p>	<p>اندازه‌گیری پاسخ‌های دینامیکی و استخراج پارامترهای مدال برای شناسایی تغییراتی که نشانگر خسارت می‌دهند. سنسورهای رایج شامل شتاب‌سنج‌ها و ترانس‌دیوسرهای سرعت هستند.</p>
<p>اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی (McCann and Forde 2001)</p>	<p>نیاز به تماس با ساختار؛ نیاز به تخصص دارد (Barnes, Trotter, and Forgeron 2008)</p>	<p>سازوکار ساده؛ هزینه موثر؛ امکان استفاده از سنسورهای جاسازی شده (Vélez, Matta, and Ziehl 2015)</p>	<p>شناسایی خوردگی (Song and Sarawathy 2007) و ترک‌ها (Shang, Sonebi, and Lim 2022) در بتن؛ ارزیابی خوردگی قطعات فولادی (Rivard and Ballivy 2000).</p>	<p>عبور جریان الکتریکی از ساختار ماده و اندازه‌گیری تغییرات مقاومت برای شناسایی خسارت‌هایی مانند ترک‌ها.</p>
<p>نظارت بر انتشار صدا (AE) (AE)</p>	<p>کاهش سیگنال در بتن، مداخله نویز پس‌زمینه، نیاز</p>	<p>شناسایی زودرس ترک‌ها و عیوب؛ مناسب برای</p>	<p>نظارت بر ترک‌های بتن، تنش کابل پل، آزمایش جوش، شناسایی نشتی لوله، نظارت بر وضعیت</p>	<p>شناسایی امواج صدایی که توسط رویدادهای خسارتی مانند ترک‌ها با</p>

استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک جمع آوری می‌شوند.	Koh, Park, and Choo 2009; بلبرینگ. (Meserkhani, Jafari, and Rahi 2021)	تشخیص نشستی، شناسایی منبع خسارت ( Saeedifar and Zarouchas 2020).	به شبکه ای از سنسورها است (Zhou 2011)	Saeedifar ) and Zarouchas (2020)
تجزیه و تحلیل انتشار موج‌های فراصوتی برای مشخص کردن مواد و شناسایی خسارت‌ها.	بازرسی بتن، فولاد و چوب؛ آزمایش جوش [؛ نقشه‌برداری خوردگی؛ آزمایش سلامتی پایه Chakraborty and Stolinski 2022; ) Chen et al. n.d.; Fang et al. 2017; Kumar and Patankar 2022; Nadzri and Ahmad 2022; She et al. 2021	تشخیص و مکان‌یابی نقص؛ اندازه‌گیری ضخامت؛ منعطف برای مواد متعدد Honarvar and ) Varvani-Farahani (2020).	نیاز به تکنسین‌های ماهر و آموزش‌دیده؛ مسائل آماده‌سازی سطح؛ ناهمگونی در مواد در نتیجه آزمایش تاثیر گذار است Honarvar and ) Varvani-Farahani (2020)	آزمایش فراصوتی Honarvar ) and Varvani-Farahani (2020)
نقشه‌برداری الگوهای حرارتی سطحی برای نشان دادن عیوب زیرسطحی.	شناسایی رطوبت و نشستی در پوشش‌های ساختمانی (Yang et al., 2021)؛ جداسازی پوشش (Moskovchenko et al., 2020)؛ تشخیص ترک در بتن (Swiderski, 2019)؛ خوردگی زیر عایق (Du et al., 2020)	بازرسی سریع مناطق بزرگ؛ تکنیک غیرمستقیم؛ حداقل آماده‌سازی سطح Papatsimpa and ) Linnartz, 2018	عمق محدود؛ تاثیر شرایط سطحی؛ تجزیه و تحلیل کمی نیاز به تخصص دارد (Papatsimpa and ) Linnartz, 2018.	ترموگرافی مادون‌قرمز Papatsimpa ) and Linnartz, (2018)
استفاده از تابش نفوذی برای معاینه ساختار داخلی اشیاء	بازرسی جوش (Galos et al., 2021)؛ تصویربرداری ساختار داخلی بتن (Li et al., 2022)؛ فولاد و عناصر کامپوزیت (Cho et al., 2011)؛ نقشه‌برداری خوردگی (Boaretto and Centeno 2017)	شناسایی عیوب داخلی؛ اندازه‌گیری ضخامت؛ بازرسی مناطق پنهان (Kriesz, 1979)	مسائل ایمنی؛ تحلیل کمی تنها؛ فرآیند آهسته؛ تجهیزات گرانقیمت (Kriesz, 1979)	آزمایش رادیوگرافی (Kriesz, 1979)
استفاده از موج‌های الکترومغناطیسی برای تصویر ساختارهای زیرزمینی. پالس‌های رادار به مواد پخش می‌شوند و انعکاس‌ها شیء‌ها یا رابطه‌های زیرزمینی را نشان می‌دهند.	ارزیابی ساختارهای بتنی (Tosti and Ferrante 2020)؛ شناسایی جدایی‌شدگی عرشه پل؛ شناسایی خلاء پشت لایه‌های تونل (Santos-Assunção et al. 2014)؛ برآورد ضخامت (Wai-Lok Lai, ) Dérobert, and Annan 2018)؛ دسته‌بندی خاک (Barkataki et al. 2021).	غیر تخریبی؛ قابلیت اسکن در عمق‌ها و رزولوشن‌های مختلف با تنظیم فرکانس Benedetto et al. ) (2017)	پراکندگی سیگنال در مواد همگن؛ نیاز به تخصص برای تفسیر داده (Wai-Lok Lai ) et al. 2018).	ردار نفوذی به عمق زمین (GPR) Benedetto et ) (al. 2017)
ترکیب اسکن لیزری سه‌بعدی و فوتوگرامتری دیجیتال برای نقشه‌برداری و تصویرسازی محیط استفاده می‌شود. اسکن لیزری اندازه‌گیری هندسه را انجام می‌دهد در حالی که فوتوگرامتری برد کوتاه بافت‌های سطحی را اندازه می‌گیرد.	اندازه‌گیری فرونشست تونل بتنی (Laefer et al. 2014)؛ تشخیص عدم اتصال صخره برای شیب‌های صخره‌ای (Rodríguez et al. ) 2008)؛ ارزیابی خطرات سقوط صخره (Downey et al. 2017)؛ شناسایی نقص‌های روکش آسفالت و خرابی‌های آن از روی تصاویر (Koch and Brilakis 2011).	سرعت و دقت بالا؛ بدون تماس Wang, Lynch, and ) (Sohn, 2014).	کاهش دقت به علت تداخل نور محیطی؛ سرمایه‌گذاری اولیه بالا (Wang et al., ) 2014).	فوتوگرامتری اسکن لیزری Rodríguez et ) (al., 2008)
سیگنال‌های مایکروویو با مواد به روش‌های منحصر به فرد تعامل می‌کنند که می‌توانند خصوصیات را مشخص کرده و خسارت‌ها را شناسایی کنند.	شناسایی جداشدگی و رطوبت در بتن؛ شناسایی تیر فولادی در بتن؛ نظارت بر کیفیت لایه گذاری تونل (Part and Lars, 2002)	غیر تماسی، در مواد غیرفلزی نفوذ می‌کند؛ برای اپراتورهای انسانی ایمن است (Hughes et al., 1994).	نیاز به تخصص برای عملیات و تفسیر داده؛ وضوح پایین‌تر از برخی روش‌ها (H. Zhang et al., ) 2017)	آزمایش مایکروویو Mehta et al., ) (2020)

اعمال می‌شوند و قابلیت پایش مداوم را ندارند. پژوهش‌های بیشتر برای رفع این محدودیت‌ها و ارتقای کارایی روش‌های NDT ضروری است.

در مورد روش‌های آزمون غیرمخرب می‌توان گفت که علی‌رغم مزایای متعدد این روش‌ها، محدودیت‌ها و چالش‌هایی نیز وجود دارد. از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نیاز به تخصص اپراتوری، هزینه‌های بالا، تحلیل پیچیده‌ی داده‌ها اشاره کرد. همچنین این روش‌ها غالباً بصورت دوره‌ای و موضعی

۳-۳- استفاده از روش‌های پایش سلامت سازه و آزمایشات

غیر مخرب

در سال‌های اخیر، علاقه به ترکیب روش‌های آزمون غیرمخرب با سیستم‌های نظارت بر سلامت سازه برای ارزیابی بهتر سلامت سازه‌ها رشد کرده است (Giurgiutiu 2020). تکنیک‌های NDT امکان تشخیص محلی آسیب را فراهم می‌کند، در حالی که نظارت بر سلامت سازه قابلیت نظارت لحظه‌ای را فراهم می‌کند (Mustapha et al. 2021). رویکردهای یکپارچه NDT-SHM به منظور بهره‌برداری از نقاط قوت هر دو روش به صورت هم افزاگونه هدفمند هستند (Tian, Yu, and Leckey 2022). به عنوان مثال، نظارت

بر سلامت سازه موج راهنما با یکپارچه سازی آزمون اولتراسونیک (UT) برای اندازه‌گیری بهتر خرابی قابل بهبود است (Rauscher, Sugimoto, and Liao 2021). این تکنیک‌های ترکیبی ارزیابی سازه را قوی‌تر می‌کنند و از مزایایی مانند بازرسی سریع از NDT و نظارت پیوسته از SHM بهره می‌برند (Gagar et al. 2021). NDT-SHM ترکیبی راهبردی امیدبخش است که می‌تواند منجر به ارزیابی شرایط بصورت خودکار، کمی و قابل در اعتماد سازه‌های حیاتی شود (An and Sohn 2012). با این حال، چالش‌ها در ترکیب داده‌ها از روش‌های مختلف که نیازمند تحقیقات بیشتری است، باقی می‌ماند (Roy et al. 2015). در جدول ۳ نمونه‌هایی از ترکیب این دو روش با هم ارائه شده است.

جدول ۳. بررسی روش‌های پایش سلامت سازه و روش آزمایشات غیر مخرب

نام	معایب	مزایا	کاربردها در مهندسی عمران	توضیحات
سنسورهای شبکه‌ای براگ فیبری + تفکیک بریلوان	شامل شکنندگی FBGها و نصب پیچیده سیستم‌های بریلوان (Li et al. 2016) می‌شود.	این سیستم ترکیبی شامل دقت بالای FBGها و دامنه بلند تفکیک‌های بریلوان (Zhang and Bao 2008) می‌شود.	ترکیب FBGهای جداگانه با تفکیک بریلوان توانایی اندازه‌گیری نقاط با دقت بالا را برای مقایسه با نقشه‌های کلی کرنش/دما فراهم می‌کند. این اطلاعات جامع نظارت بر سلامت سازه را فراهم می‌کند.	سنسورهای شبکه‌ای براگ فیبری (FBG) و تفکیک بریلوان می‌توانند برای نظارت توزیعی در مورد کرنش و دما در سازه‌های بزرگ ترکیب شوند (Kashyap 2010; Soto et al. 2010). FBGها کرنش و دمای محلی را در نقاط جداگانه اندازه‌گیری می‌کنند. تفکیک بریلوان اطلاعات راجع به کرنش/دما فراهم می‌کند (Soto et al. 2010).
نظارت بر انتشار صدا (AE) + موج‌های هدایت شده فراصوتی اولتراسونیک	شامل حساسیت نسبت به نویز؛ نصب مبدل‌ها ممکن است به عوامل بارگذاری انجام شود؛ حالت‌های موج پیچیده نیاز به تفسیر ماهرانه دارند (Pan et al. 2020).	این روش شامل حساسیت بالا برای شناسایی تشکیل ترک؛ توانایی نظارت بر پیشرفت خسارت به صورت لحظه‌ای؛ نیاز کم به آماده‌سازی سطحی (Pan et al. 2020)	در این تکنیک، AE برای تشخیص فعال امواج صوتی که توسط پیشرفت خرابی در ماده تولید می‌شوند به صورت غیرفعال استفاده می‌شود. امواج هدایت شده فراصوتی به صورت فعال توسط مبدل‌های پیزوالکتریک به ساختار وارد می‌شوند تا با نقص‌ها تعامل کنند (Pan et al. 2020). ترکیب AE و امواج هدایت شده فراصوتی نظارت جامعی بر آغاز و گسترش خرابی را فراهم می‌کند (Guo et al. 2022).	ترکیب AE و موج‌های هدایت شده فراصوتی اولتراسونیک یک روش آزمایش غیرمخرب پیشرفته است که برای شناسایی خسارت در مواد مرکب استفاده شده است (Wevers et al. 2000).
تطابق تصاویر دیجیتال + ترموگرافی مادون قرمز	وابستگی به دیدی مناسب به الگوهای مکانیکی نیازمند سطح مناسبی (Górszczyk et al. 2019)، نیاز به منابع تحریک کننده (ایجاد برآشفتگی)	اندازه‌گیری بی‌تماس، پویا و اندازه‌گیری سریع تغییرات مکانی و دما؛ حساسیت بالا در شناسایی خسارت‌های زیر سطحی در لایه‌های CFRP (Dehui et al. 2021).	در این تکنیک، از تصاویر DIC برای تطابق تصاویر دیجیتالی ترکیب شده با ترموگرافی مادون قرمز یک روش آزمایش غیرمخرب پیشرفته برای ارزیابی خسارت لایه‌های پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی (CFRP) استفاده می‌شود (Kriesz 1979).	در این تکنیک، از تصاویر DIC برای تطابق تصاویر دیجیتالی ترکیب شده با ترموگرافی مادون قرمز یک روش آزمایش غیرمخرب پیشرفته برای ارزیابی خسارت لایه‌های پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی (CFRP) استفاده می‌شود (Kriesz 1979).

<p>گرمایی تشخیص می‌دهد. ترکیب DIC و IRT امکان تشخیص خرابی‌های زیر سطحی را بر اساس تغییرات غیرعادی جسم و تغییرات دما تحت بارگذاری فراهم می‌کند [۱۶۱]. این ارزیابی جامعی از آسیب‌ها و مکانیسم‌های شکست میکروسکوپی ارائه می‌دهد. DIC اطلاعات جابجایی با وضوح بالا را بر روی مناطق وسیعی فراهم می‌کند، در حالی که IRT امکان تشخیص آسیب در مناطق گسترده را به سرعت فراهم می‌کند. (Kriesz 1979).</p>			<p>که کاربرد در میدان را محدود می‌کند ( Usamentiaga ) (et al. 2014)، نیاز به تخصص و قدرت محاسباتی برای تفسیر داده‌ها.</p>	
<p>سنسورهای مقاومت الکتریکی و سنسورهای کلرید می‌توانند به ترکیب برای نظارت بر خوردگی و خسارت ناشی از کلرید در سازه‌های بتنی استفاده شوند (Opoku et al. 2019). سنسورهای مقاومت الکتریکی تغییرات مقاومت الکتریکی را تشخیص داده و کرنش را اندازه‌گیری می‌کنند (Lynch 2006). سنسورهای کلرید میزان نفوذ بتن و غلظت یون کلرید را اندازه‌گیری می‌کنند (Opoku et al. 2019).</p>	<p>ترکیب این دو سنسور می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در مورد خوردگی آهن و تخریب بتن به مهندسان فراهم کند. سیستم ترکیبی همچنین می‌تواند تأثیر تنش‌های اعمالی بر نرخ خوردگی را مورد بررسی قرار دهد.</p>	<p>منافع این سیستم ترکیبی شامل هزینه پایین، نصب آسان و عملکرد بلند مدت (Lynch 2006) می‌شود.</p>	<p>محدودیت‌ها شامل حساسیت به دما و رطوبت سنسورهای مقاومت الکتریکی ( Ko and Ni ) (2005) و دامنه اندازه‌گیری کوتاه سنسورهای کلرید ( Usamentiaga ) (et al. 2014) می‌شود.</p>	<p>سنسورهای مقاومت الکتریکی + سنسورهای کلرید (Usamentia) ga et al. (2014)</p>
<p>سنسورهای فیبر نوری از فیبرهای نوری برای اندازه‌گیری کرنش، دما، لرزش و سایر پارامترهای سازه‌ای دیگر استفاده می‌کنند (Kersey et al. 1997). شتاب‌سنج‌های بی‌سیم از فناوری MEMS برای نظارت بی‌سیم بر شتاب و لرزش استفاده می‌کنند (Kersey et al. 1997)</p>	<p>پله‌ها، پیگیرنده‌های بادی، ساختمان‌های بلند، سدها (Kersey et al. 1997). ترکیب این دو سنسور امکان نظارت گسترده و محلی تنش‌ها، ترک‌ها، خوردگی و بارهای زنده در سازه‌های مهندسی معمولاً بزرگ مانند پلها و ساختمان‌ها را فراهم می‌کند. (Lynch 2012).</p>	<p>مزایای این سنسورهای فیبر نوری در مقابل تداخل الکترومغناطیسی مصونیت دارند، قابلیت حسگری گسترده و چندگانه بر روی یک فیبر و نصب آسان دارند (Kersey et al. 1997) مزایای شتاب‌سنج‌های بی‌سیم شامل حذف سیم‌کشی هزینه‌بر و امکان حسگری در مکان‌های دورافتاده (Kersey et al. 1997) است.</p>	<p>محدودیت‌ها شامل هزینه بالای سیستم‌های فیبر نوری ( Kersey et al. ) (1997) و نیاز به منابع تغذیه الکتریکی برای انتقال بی‌سیم توسط شتاب‌سنج‌ها ( Kersey et al. ) (1997) است.</p>	<p>سنسورهای فیبر نوری + شتاب‌سنج‌های بی‌سیم (Lynch et ) (al. 2003)</p>

### ۳-۴- بررسی روش‌های ترکیبی با استفاده از حسگرهای پیزومقاومتی

می‌توان بنا به دلایل زیر چنین استدلال کرد که در بین روش‌های ترکیبی پایش سلامت سازه و آزمایشات غیرمخرب، تمرکز بر روی روش‌های تلفیقی با پایه پیزو مقاومتی به دلایل اشاره شده در ادامه می‌تواند مزایای بیشتری داشته باشد.

در جدول ۳، ترکیب روش‌های SHM و NDT می‌تواند منجر به بهره‌مندی هم‌زمان از مزایای هر دو روش شود و محدودیت‌های آن‌ها را تا حد زیادی مرتفع کند. روش‌های تلفیقی با بهره‌گیری از قابلیت‌های پایش مداوم SHM و دقت بالای ارزیابی‌های موضعی NDT می‌توانند اطلاعات جامع و قابل اطمینانی از وضعیت سلامت سازه‌ها فراهم کنند. تحقیق و توسعه روش‌های تلفیقی پیشرفته‌تر می‌تواند گام موثری در جهت دستیابی به سیستم‌های بهینه پایش سلامت سازه باشد.

بنابراین، تمرکز بر روی توسعه روش‌های ترکیبی پیشرفته مبتنی بر پیرو مقاومتی، می‌تواند فواید زیادی برای پایش سلامت سازه‌ها داشته باشد. جدول ۴ به بررسی روش‌های ترکیبی حسگرهای پیرو مقاومتی با سایر حسگرها می‌پردازد. هدف از این بررسی نشان دادن مزایای ترکیب حسگرهای پیرو مقاومتی با سایر روش‌های حسگری برای کاربردهای نظارت بر سلامت سازه‌هاست. حسگرهای پیرو مقاومتی قابلیت اندازه‌گیری مستقیم تنش و کرنش را دارند. با ترکیب آن‌ها با حسگرهای الکتریکی مقاومتی، RFID بی‌سیم، فیبر نوری براگ و کرنش سنج، می‌توان سیستم‌های حسگری با کارایی و قابلیت‌های بالاتری ساخت. با وجود محدودیت‌هایی که بیان شد اما قابل مشاهده است که این روش‌ها بسیاری از محدودیت‌های روش‌های قدیمی تر خود را جبران کردند.

روش پیرو مقاومتی امکان اندازه‌گیری مستقیم و محلی تنش و کرنش را فراهم می‌کند که برای شناسایی آسیب‌های سازه‌ای مفید است.

روش پایش سلامت سازه قابلیت پایش مداوم را دارد که می‌تواند جبران‌کننده ماهیت دوره‌ای و موضعی روش‌های آزمایش غیرمخرب باشد.

ترکیب این دو روش می‌تواند منجر به بهره‌مندی همزمان از مزایای آن‌ها شود و محدودیت‌هایشان را برطرف کند.

روش‌های تلفیقی‌ای که از قابلیت‌های پایش مداوم روش پایش سلامت سازه یا آزمایشات غیر مخرب و دقت بالای ارزیابی‌های موضعی روش پیرو مقاومتی بهره می‌گیرند، می‌تواند اطلاعات جامع و قابل اطمینانی از وضعیت سلامت سازه‌ها فراهم کنند.

پیشرفت روش‌های تلفیقی پیشرفته‌تر می‌تواند گام موثری در جهت دستیابی به سیستم‌های بهینه پایش سلامت سازه باشد.

جدول ۴. بررسی روش‌های ترکیبی با روش حسگرهای پیرو مقاومتی

توضیحات	کاربردها در مهندسی عمران	مزایا	معایب	سنسورهای پیرومقاومتی + سنسورهای مقاومت الکتریکی
سنسورهای پیرومقاومتی بر مبنای اثر پیرومقاومتی در مواد پیزوالکتریک مثل سیلیکون برای اندازه‌گیری تنش‌ها و کرنش‌های دینامیکی استفاده می‌کنند (Hansen and Hansen 2004). سنسورهای مقاومت الکتریکی تغییرات مقاومت الکتریکی متناسب با کرنش‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند (Ibrahim 2017).	ساختمان‌های فولادی، سازه‌های بتنی تقویت شده، اجزاء پیش‌تنیده شده است. هر دو نوع سنسور می‌توانند به سطح نصب شوند یا به ساختار تعبیه شوند تا تنش‌ها، ترک‌ها، خوردگی و بارهای دینامیکی در سازه‌ها و پل‌های بتنی نظارت کنند (Zhao et al. 2015).	مزایا سنسورهای پیرومقاومتی شامل اندازه‌گیری مستقیم و محلی تنش‌ها می‌شود (Pham et al. 2021). مزایا سنسورهای مقاومت الکتریکی شامل سادگی و هزینه پایین می‌شود (Ibrahim 2017).	محدودیت‌ها شامل حساسیت به دما در سنسورهای پیرومقاومتی (Pham et al. 2021) و گیج فکتور کمتری برای سنسورهای مقاومت الکتریکی فلزی بعنوان استرین گیج می‌شود (Ibrahim 2017).	سنسورهای پیرومقاومتی + سنسورهای مقاومت الکتریکی
سنسورهای پیرومقاومتی تغییرات مقاومت در مواد پیرومقاومتی مانند سیلیکون تحت تنش را اندازه‌گیری می‌کنند تا نیرو و شتاب را محاسبه کنند (Zhou et al. 2020). سنسورهای RFID الکترومغناطیسی شامل آنتنی هستند که امواج رادیویی را ارسال می‌کنند تا برچسب‌های RFID را فعال کنند و داده‌های آن را برداشت کنند (Yang et al. 2007).	کاربردها شامل نظارت بی‌سیم بر تنش‌ها، ترک‌ها، خوردگی و بارهای دینامیکی در سازه‌ها و پل‌های بتنی می‌شود (Lynch et al. 2003).	مزایا شامل اندازه‌گیری مستقیم نیرو توسط سنسورهای پیرومقاومتی (Zhou et al. 2020) و عملیات بی‌سیم سنسورهای RFID (Yang et al. 2007) می‌شود.	محدودیت‌ها شامل حساسیت به دما در سنسورهای پیرومقاومتی (Zhou et al. 2020) و محدودیت در فاصله‌ی خواندن برای برچسب‌های RFID فعال (Yang et al. 2007) می‌شود.	سنسورهای پیرومقاومتی + سنسورهای RFID الکترومغناطیسی (Zhou et al. 2020)
سنسورهای پیرومقاومتی تغییرات مقاومت در سیلیکون تنشی را اندازه‌گیری می‌کنند تا نیرو و شتاب را محاسبه کنند. سنسورهای براگ فیبری دارای یک فیبر نوری با گرا دیان‌هایی هستند که بر اساس تنش و دما موج‌های خاصی از نور را بازتاب می‌دهند (Othonos, Kalli, and Kohnke 2000).	کاربردها شامل نظارت بر بارهای دینامیکی، لرزش‌ها و تنش‌ها در تیرها، پل‌ها و ساختارهای دیگر می‌شود.	مزایا شامل اندازه‌گیری نیروی استاتیکی/دینامیک توسط سنسورهای پیرومقاومتی و نظارت بر تنش/دما توزیعی با استفاده از برگ فیبری (Othonos et al. 2000) می‌شود.	محدودیت‌ها شامل اثرات دما/نیرو بر سنسورهای پیرومقاومتی و نیاز به منبع تغذیه الکتریکی برای سنسورهای فیبر براگ (Othonos et al. 2000) می‌شود.	سنسورهای پیرومقاومتی + سنسورهای شبکه فیبر (Othonos et al. 2000) براگ

<p>سنسورهای پیزومقاومتی تغییرات مقاومت را اندازه‌گیری می‌کنند تا نیرو و شتاب را محاسبه کنند (Vlachakis, Wang, and Al-Tabbaa 2023). گنج‌های تنش سنج دارای یک فویل فلزی هستند که تغییرات مقاومت را نسبت به تنش که روی یک سطح اعمال می‌شود تغییر می‌دهد (Perry and Lissner 1962).</p>	<p>شامل نظارت بر تنش‌ها در تیرها، پل‌ها، تشخیص ترک‌ها و اندازه‌گیری بارهای دینامیکی (Vlachakis et al. 2023).</p>	<p>مزایا شامل اندازه‌گیری نیروی استاتیکی/دینامیک توسط سنسورهای پیزومقاومتی (Vlachakis et al. 2023) و اندازه‌گیری تنش مستقیم روی سطوح توسط تنش‌گنج‌ها (Perry and Lissner 1962) می‌شود.</p>	<p>محدودیت‌ها شامل اثرات دما/نیروی بر سنسورهای پیزومقاومتی (Vlachakis et al. 2023) و مسائل اتصال پوششی این حسگرها دور عضو مورد نظر یک چالش برای این حسگرها است (Perry and Lissner 1962).</p>	<p>سنسورهای پیزومقاومتی + گنج اندازه‌گیر تنش (Vlachakis et al. 2023)</p>
<p>سنسورهای پیزومقاومتی تغییرات مقاومت در موادی مانند سیلیکون را اندازه‌گیری می‌کنند تا نیرو و شتاب را محاسبه کنند (Roopa, Hunashyal, and Mysore 2022). سنسورهای الکترومغناطیسی با مشاهده تغییرات میدان مغناطیسی در یک سیم پیچ، اشیاء فلزی را تشخیص می‌دهند (Roopa et al. 2022).</p>	<p>کاربردها شامل نظارت بر ترک‌ها، خوردگی، لرزش‌ها و تنش‌های ناشی از خشک شدن بتن در ساختمان‌ها مانند تیرها، کف‌ها و پل‌ها می‌شود (Feng and Feng 2017).</p>	<p>منافع شامل اندازه‌گیری نیروی استاتیکی/دینامیک توسط سنسورهای پیزومقاومتی و عملیات بی‌تماس سنسورهای الکترومغناطیسی (Vlachakis et al. 2023) می‌شود.</p>	<p>محدودیت‌ها شامل اثرات دما/نیروی بر سنسورهای پیزومقاومتی و محدودیت به مواد فرومغناطیسی برای سنسورهای الکترومغناطیسی (Vlachakis et al. 2023) می‌شود.</p>	<p>سنسورهای پیزومقاومتی + سنسورهای الکترومغناطیسی (Vlachakis et al. 2023)</p>
<p>سنسورهای نانوکامپوزیت مبتنی بر سیمان از اثر پیزومقاومتی ناشی از نانولوله‌های کربن و نانوصفحه‌های گرافن برای شناسایی خسارت در سازه‌های بتنی استفاده می‌کنند. هنگامی که تنش اعمال می‌شود، رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها به تناسب با تنش تغییر می‌کند. این تغییر در مقاومت الکتریکی می‌تواند با تنش و کرنش در ساختار هم‌ارتباط داشته باشد (Adresi et al. 2024; Adresi, Tulliani, et al. 2021; Roopa et al. 2022).</p>	<p>سنسورهای نانوکامپوزیت مبتنی بر سیمان می‌توانند در هنگام ساختمان‌سازی در ساختمان‌های بتنی جای‌گذاری شوند تا نظارت مداوم و بلادرنگ بر تنش‌ها و ترک‌ها در عناصر بتنی مانند تیرها، ستون‌ها، سقف‌ها و غیره فراهم کنند. این سنسورها می‌توانند خسارت را در مراحل ابتدایی قبل از ایجاد ترک‌های قابل رؤیت تشخیص دهند (Adresi et al. 2018; Mohammadmahdi Abedi, Mohammad Jawed Roshan, Mostafa Adresi, Mohammed Seddik Meddah, Baoguo Han, Raul Fanguero 2024; Roopa et al. 2022).</p>	<p>منافع شامل هزینه‌ای مقرون به صرفه و آسان برای تولید هستند. سنسورها می‌توانند در سازه‌های خاصی اجرا شوند. سنسورهای جاسازی‌شده نیاز به منبع تغذیه الکتریکی بیرونی و سیم‌کشی را از بین می‌برند. امکان حسگری سطحی بر روی مناطق بزرگ را فراهم می‌کنند (Roopa et al. 2022).</p>	<p>معایب شامل نیاز به تحقیقات بیشتر برای دوام و عملکرد بلندمدت هستند. اثرات عوامل محیطی بر اندازه‌گیری‌ها به طور کامل مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. تداخل الکترومغناطیسی از مسلح سازی با فولاد ممکن است بر روی اندازه‌گیری‌ها تأثیر بگذارد. تجزیه و تحلیل داده و تفسیر سیگنال‌های حسگر مشکل است (Adresi et al. 2023; Adresi and Moradi 2022; Adresi, Vamegh, and Shiraz 2021; Roopa et al. 2022).</p>	<p>سنسورهای نانوکامپوزیت مبتنی بر سیمان (Roopa et al. 2022)</p>

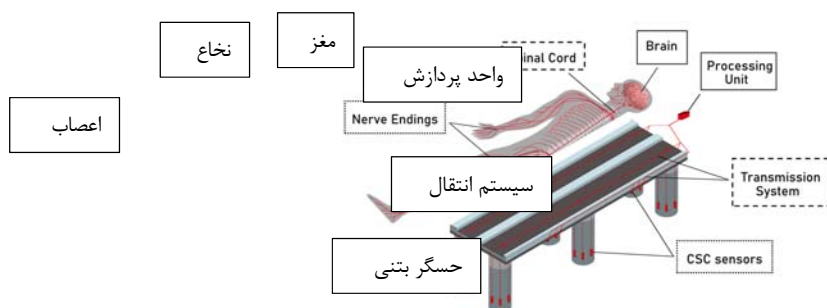
#### ۴- جایگاه حسگرها سیمانی در سیستم پایش سلامت

از پرکننده‌های رسانا در بتن، یعنی ایجاد قابلیت تغییر مقاومت الکتریکی با تغییر در اثر اعمال مکانیکی، استفاده می‌کنند. بنابراین، با اندازه‌گیری تغییر مقاومت الکتریکی، می‌توان کرنش را کنترل کرد. مواد خود حسگر برای نظارت بر سلامت سازه در مقایسه با سنسورهای خارج از پوسته ساز، امکان استفاده از یک

به دنبال پیشرفت‌های مرتبط در زمینه سنتز نانومواد، توسعه سیستم‌های نظارت بر سلامت سازه یکپارچه نوآورانه برای سازه‌های عمرانی مبتنی بر استفاده از کامپوزیت‌های هوشمند مبتنی بر سیمان (CSC) در دهه‌های گذشته، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. اساساً، CSC ها از اثر پیزومقاومتی ناشی

نانوصفحات گرافن است. با این حال، استانداردهای روش‌های ساخت، اندازه‌گیری و تحلیل داده‌ها برای کاربرد عملی این فناوری‌ها ضروری است. بررسی روش‌های پیش‌بینی و مکان‌یابی آسیب با استفاده از این مواد در بخش بعد می‌تواند اطلاعات مفیدی فراهم کند. توسعه کامپوزیت‌های سیمانی خودتشخیصی با استفاده از ویژگی‌های پیزومقاومتی یک حوزه مهم تحقیقاتی در زمینه نظارت بر سلامت سازه‌ها شده است. ادغام نانوذرات هادی مانند نانولوله‌های کربن به ماتریس سیمان، مقاومت الکتریکی کامپوزیت را تغییر می‌دهد و وقتی تحت تنش یا فشار قرار می‌گیرد. این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان به نظارت پیوسته و توزیع شده بر روی آغاز و انتشار خرابی در عناصر بتنی بپردازیم. ماهیت غیر فعال و سادگی تولید، این کامپوزیت‌های سیمانی خودتشخیصی گر را به یک راه‌حل موثر در بهینه‌سازی هزینه‌ها برای نظارت به‌صورت لحظه‌ای بر زیرساخت‌های حیاتی راهی مانند پل‌ها و ساختمان‌های این‌به‌راه تبدیل کرده است. توانایی تشخیص خرابی در مراحل ابتدایی قبل از انتشار ترک‌های قابل رؤیت، به پیشگیری از خرابی‌های ویرانگر کمک می‌کند. این تکنولوژی دارای پتانسیل عظیمی برای پیاده‌سازی آینده در ساخت و سازه‌های جدید و بهبود سازه‌های موجود است. تحقیقات اخیر بر تطابق پیزو مقاومتی این کامپوزیت‌ها با استفاده از انواع و مقادیر مختلف مواد هادی تمرکز کرده‌اند. همچنین، تکنیک‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل داده در حال توسعه هستند تا به‌صورت دقیق از سیگنال‌های سنسور برای تشخیص خرابی استفاده شود. (Roopa et al. 2022)

سری مزایای بالقوه را فراهم می‌کند: ضریب گسیج بالا (حساسیت بالای حسگر)، سازگاری مواد (با بتن سازه پایه)، اختلال کمتر در رفتار مکانیکی عضو میزبان، کاهش هزینه‌ها و پیچیدگی نصب این نوع از حسگرها در مقایسه با سنسورهای معمول، عدم نیاز به در نظر گرفتن الزامات خاص طراحی برای عضو سازه‌ای در فرایند تعبیه حسگر در عضو سازه ای و همچنین احتمال خرابی این نوع سنسور محدود است. از نقطه نظر اقتصادی، در سال‌های اخیر کاهش قابل توجهی در هزینه‌های ساخت پرکننده وجود داشته است که به موجب آن نانومواد مبتنی بر کربن در حال حاضر با هزینه‌های واحد مقرون به صرفه (از ۱۰ دلار در گرم تا ۱۵۰ دلار در گرم بسته به نوع، خلوص و ابعاد)؛ با در نظر گرفتن غلظت بسیار کم پرکننده (معمولاً ۱٪ وزنی سیمان) و حجم کمی که معمولاً سنسورهای CSC در سازه استفاده می‌شوند، امروزه می‌توان آنها را به مقدار زیاد با هزینه مقرون به صرفه ساخت. در نتیجه مزایای ذکر شده قبلی، CSCها کاندیدای ایده آل برای توسعه سیستم‌های نظارت بر سلامت سازه هستند. قیمت کم این حسگرها، راه را برای استفاده زیاد در نقاط حساس سازه فراهم می‌کند و در واقع مجموعه وسیع حسگرها یک شبکه عصبی را شبیه سازی خواهد کرد که می‌تواند فشار موضعی را که به طور مداوم توسط یک واحد مرکزی پردازش کند. شکل ۴ را ببیند. این بخش به بررسی کاربرد نانوکامپوزیت‌های خودتشخیصی گر پیزو مقاومتی در پایش سلامت سازه‌ها می‌پردازد. این مواد با تغییر مقاومت الکتریکی تحت کرنش، قابلیت پایش ترک و آسیب سازه‌ها را بدون نیاز به سنسورهای خارجی فراهم می‌کنند. از جمله افزودنی‌هایی که خاصیت پیزو مقاومتی را ایجاد می‌کنند، الیاف کربنی، نانولوله‌های کربنی و

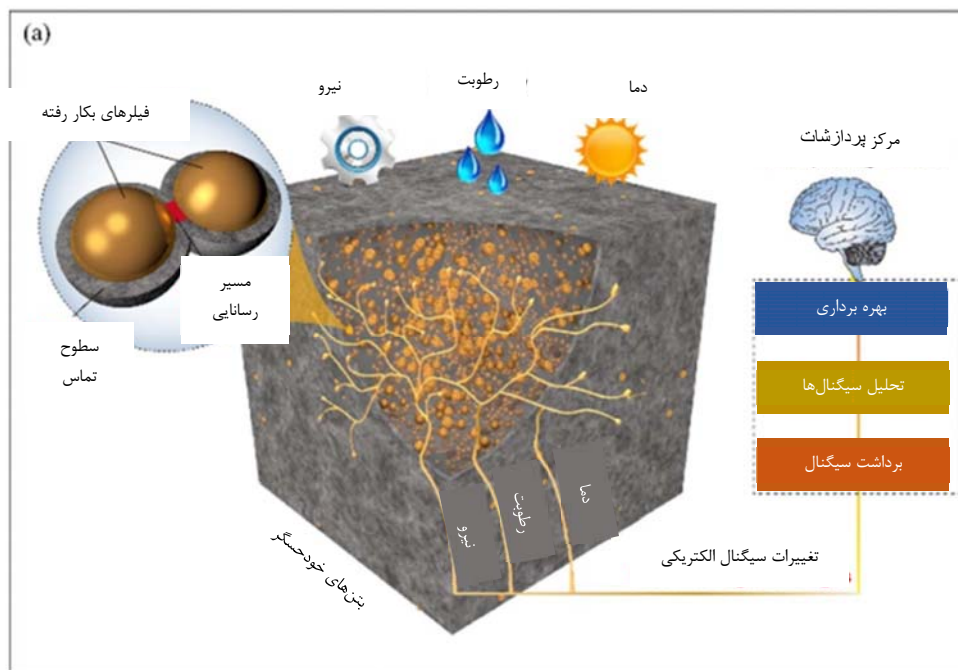


شکل ۴. تشابه ساختاری یک سیستم پایش در سازه با سیستم پایش زیستی در انسان (Cassese, Rainieri, and Occhiuzzi 2021)

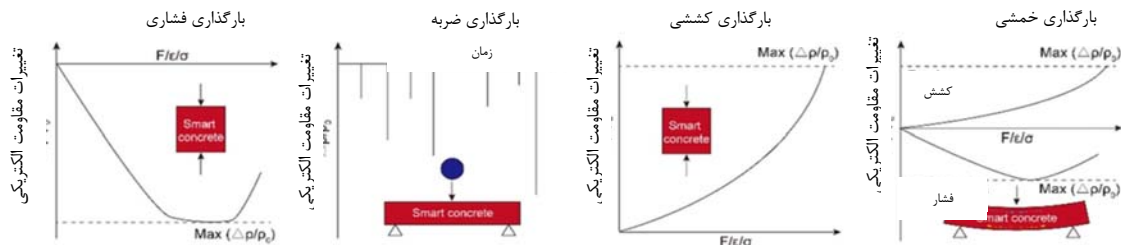
#### ۴-۱- اساس و عملکرد مصالح سیمانی خودحسگر

از جمله مهم‌ترین پارامترهایی که در این روش می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد، تغییرات در تنش، کرنش، دما، رطوبت و ترک‌های سازه است. در این میان، پیرو مقاومت یکی از ویژگی‌های کلیدی مواد نانوکامپوزیت مورد استفاده در بتن هوشمند است که به تغییرات مقاومت الکتریکی در پاسخ به تنش‌های مکانیکی وارد بر بتن اشاره دارد. این تغییرات می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی مانند ترک‌خوردگی، خمیدگی یا تغییر شکل در سازه‌های بتنی باشد. استفاده از این تکنولوژی می‌تواند باعث بهبود نظارت بر سلامت سازه‌ها و تشخیص زودهنگام مشکلات احتمالی شود که در نهایت منجر به افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر سازه‌ها می‌گردد (Li et al. 2023). در هنگام استفاده از این حسگرها تحت بارگذاری‌های مونوتونیک، روش‌های متداول برداشت داده‌ها شامل اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی و تحلیل سیگنال‌های الکتریکی است که می‌تواند به صورت همزمان با دیگر ابزارهای حسگر برای ثبت دقیق‌تر تغییرات مکانیکی و محیطی در سازه‌ها استفاده شود. نمونه‌ای از نمودارهای متداول و کاربردی در پژوهش‌های مرتبط در این زمینه در شکل ۶ آورده شده است.

بتن هوشمند یک ماده پیشرفته است که با اضافه کردن مواد رسانا یا نیمه‌رسانا مانند فیبرهای کربنی (Chung and Wang 2003)، پودرهای فلزی (Kang et al. 2024; Rooholamini et al. 2019) و نانولوله‌های کربنی (Adresi 2017; Adresi et al. 2017; Hosseini 2022) به بتن عادی، امکان حسگری و تشخیص تغییرات مکانیکی (مانند تنش، کرنش، ترک و خستگی) و عوامل محیطی (مانند دما و رطوبت) را فراهم می‌کند (Adresi and Pakhirehzan 2023). این تکنولوژی برای بهبود عملکرد سازه‌ها و افزایش طول عمر آنها بسیار مهم است (Nalon et al. 2022). بتن هوشمند با استفاده از بررسی تغییرات الکتریکی شبکه‌های مواد رساناکننده ساخته می‌شود که این مواد از مواد نانویی و مواد رسانا تشکیل شده‌اند. این شبکه‌ها قادرند تغییرات فیزیکی و شیمیایی در بتن را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل کنند. این سیگنال‌ها سپس به یک مرکز پردازش داده ارسال می‌شوند که می‌تواند تغییرات در وضعیت سازه را تحلیل کند. نمونه‌ای از این سیستم در شکل ۵ قابل مشاهده است. این روش امکان نظارت بر سلامت سازه‌ها را در زمان واقعی فراهم می‌کند و می‌تواند در پیشگیری از خرابی‌های ناگهانی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری مؤثر باشد (Nalon et al. 2022).



شکل ۵. نمای کلی از معرفی مفهوم بتن خودحسگر (Laflamme et al. 2023)

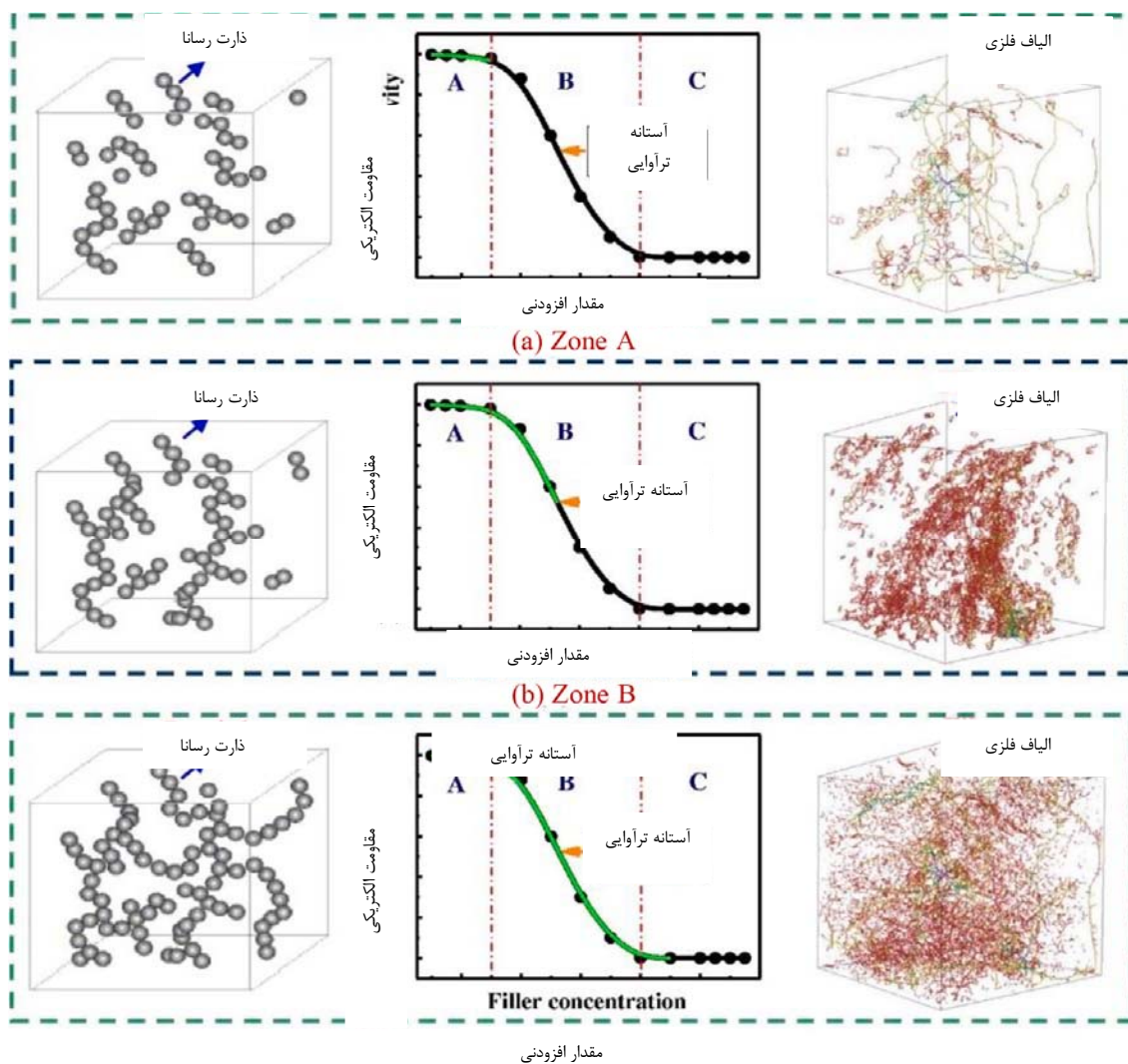


شکل ۶. نمونه‌های متداول مقایسه‌ی نتایج الکتریکی با انواع بارگذاری‌های مونوتونیک (Laflamme et al. 2023)

#### ۴-۱-۱- آستانه تراوایی

آستانه تراوایی به نقطه‌ای در سیستم‌های چندفازی گفته می‌شود که در آن مقدار مواد رسانا به اندازه‌ای می‌رسد که یک شبکه پیوسته از این مواد درون ماده اصلی شکل می‌گیرد. این نقطه باعث تغییرات چشمگیری در خواص الکتریکی، حرارتی یا مکانیکی سیستم می‌شود. در سیستم‌های بتن خودحسگر، این آستانه به میزان مواد رسانا در بتن بستگی دارد و رفتار الکتریکی بتن در سه ناحیه مشخص طبقه‌بندی می‌شود: ناحیه قبل از آستانه تراوایی، ناحیه تراوایی، و ناحیه کاملاً رسانا. در بتن‌های خودحسگر، سه ناحیه مختلف در رابطه با میزان مواد رسانا وجود دارد که بتن خودحسگر را به وضعیت‌های مختلفی از رسانایی قرار می‌دهد: ناحیه قبل از آستانه تراوایی که ناحیه عایق نام دارد، ناحیه تراوایی (یا ناحیه بهینه) و ناحیه کاملاً رسانا. در ناحیه، مقدار مواد رسانا کمتر از حد بهینه است که برای کاهش مقاومت الکتریکی لازم است. در این ناحیه، رسانایی یونی غالب است و مقاومت الکتریکی بالاست. در مقابل، ناحیه تراوایی، ناحیه‌ای است که در آن با افزایش مقدار مواد رسانا، مقاومت الکتریکی به‌طور تدریجی کاهش می‌یابد. در این ناحیه، هر دو نوع رسانایی

یونی و الکترونیکی (از طریق تماس مستقیم مواد رسانا) رخ می‌دهد و تغییرات در رسانایی الکتریکی به خوبی قابل حس هستند (Abedi et al. 2024). این ناحیه به‌عنوان ناحیه بهینه برای ساخت حسگرهای بتنی خودحسگر شناخته می‌شود، زیرا تغییرات در کرنش یا تنش به تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت الکتریکی منجر می‌شود که برای حسگرهای پیرو مقاومتی مطلوب است. در ادامه برای درک بهتر این مفهوم شکل ۷ خلاصه‌ای از این مفهوم را اشاره ارائه می‌دهد. در ناحیه کاملاً رسانا، مقدار مواد رسانا به حدی افزایش یافته که مقاومت الکتریکی به حداقل مقدار خود می‌رسد و رسانایی الکترونیکی از طریق تماس مستقیم بین مواد رسانا غالب است (Adresi and Yekrangnia 2021; Dong et al. 2019; Han, Ding, and Yu 2015; Wang and Aslani 2019). در این حالت، شبکه رسانا به اندازه‌ای کامل است که تغییرات در کرنش یا تنش تأثیر کمی بر تغییر مقاومت الکتریکی دارد و بنابراین این ناحیه برای کاربردهای خودحسگری کمتر مطلوب است (Nalon et al. 2021).

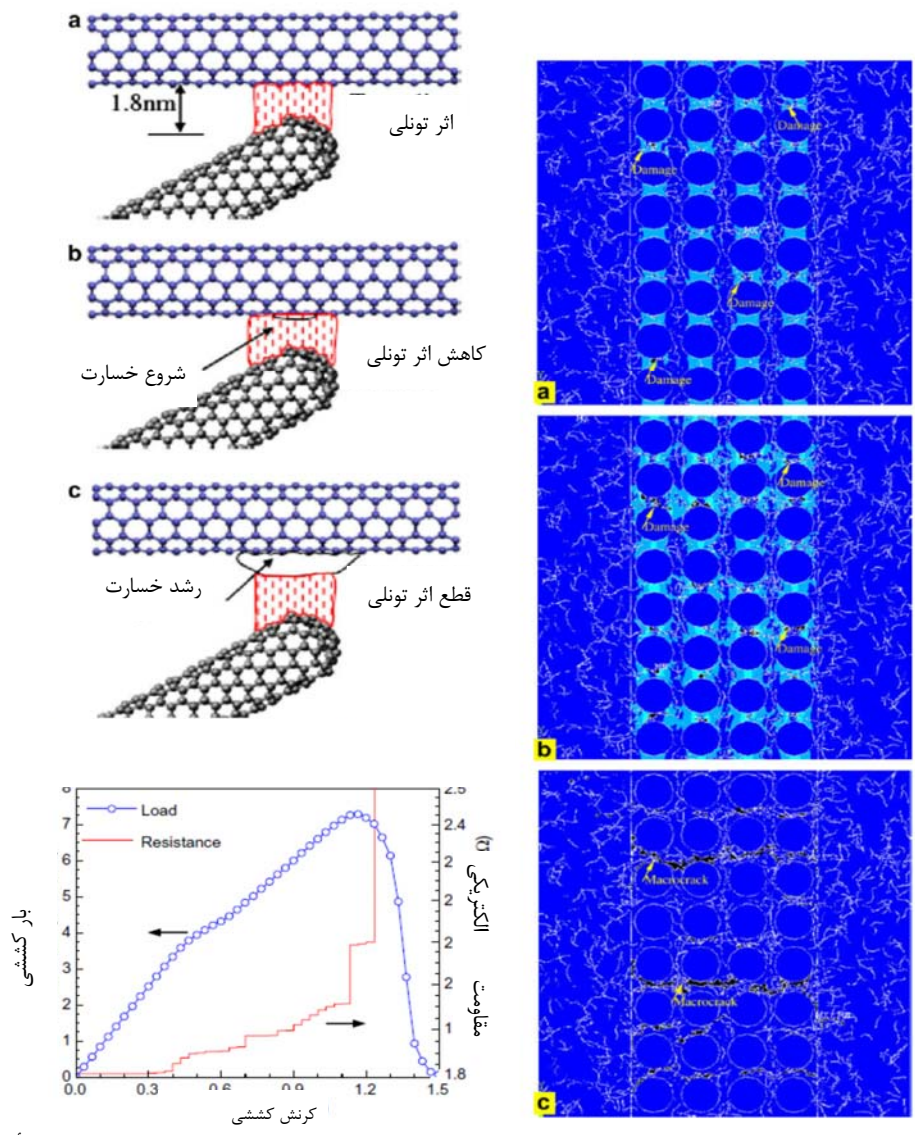


شکل ۷. شماتیک از وضعیت مختلف رسانایی مواد به ازای مقدار افزودنی‌های رسانا کننده (Nalon et al. 2022)

#### ۴-۲- ایجاد خاصیت خودتشخیصی در مصالح سیمانی حاوی نانولوله کربن

با تحلیل دوبعدی مدل اجزای محدود خود تحت بارگذاری، رفتار ماده را تا لحظه شکست مدل‌سازی کردند. در تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به تغییرات مقاومت کششی در برابر میزان کرنش رسم شده است (Li and Chou 2008).

چان یو و همکاران، در تحقیقی با استفاده از روش اجزای محدود و با استفاده از مدل کردن مقاومت جریان در نانولوله‌های کربنی، با احتساب خاصیت تونلی توانستند چگونگی ایجاد خسارت، ترک و در نهایت تخریب ماده مرکب پایه به‌وسیله تغییرات مقاومت الکتریکی در مقابل افزایش بار و کرنش در محیط شبیه‌سازی اجزای محدود را ارائه کنند. آنها



شکل ۸. در سمت راست، رشد خرابی در نانوکامپوزیت تحت کرنش‌های اعمالی متفاوت را نشان می‌دهد، در سمت چپ، تأثیر خرابی بر مقاومت و اثر کاهش تونلی و همچنین نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به تغییر تنش-کرنش را نشان می‌دهد

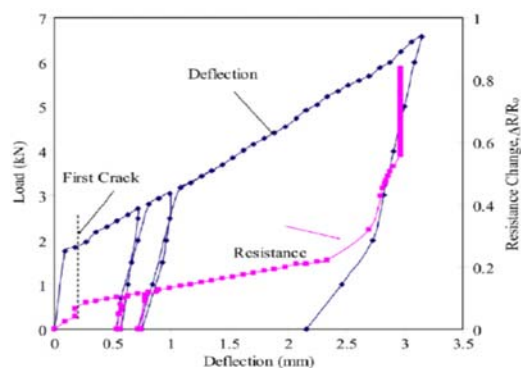
(Li and Chou 2008)



شکل ۹. حسگرهای سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های کربنی تک‌لایه‌ای (Saafi 2009)

انتشار ترک و تجمع خرابی را در مدت بارگذاری تشخیص دهند. نتایج به دست آمده از این تحقیق ثابت می‌کند که می‌توان از سازه‌ها و مصالح سیمانی هوشمند تقویت شده با نانولوله‌های کربنی برای نشان دادن درستی و سلامت سازه بتنی استفاده کرد (Saafi 2009).

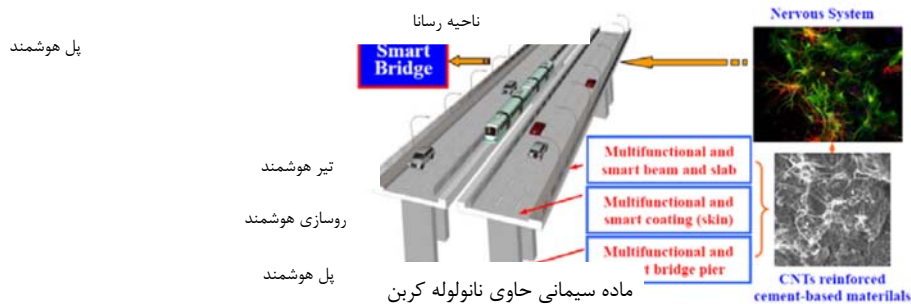
صافی، با استفاده از مصالح سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های تک‌لایه‌ای نوعی از حسگرهای بدون سیم با قابلیت جاسازی در محل را طراحی کرد. این حسگرها در تیر بتنی که در معرض سیکل بار خمشی یکنواخت قرار داشت جاسازی شده بودند. همانند  $\sigma$ ، این سازه‌ها می‌توانند بدون به کارگیری سیم و با استفاده از تغییر در مقاومت الکتریکی حسگرهای تعبیه شده،



شکل ۱۰. نمونه‌ای از پاسخ حسگر جاسازی شده در بتن تا لحظه شکست (Saafi 2009)

مصالح بتنی، سلامت سازه را بررسی کرد و همچنین سرعت، وزن محور و جریان ترافیک عبوری روی پل را نشان داد (Parveen et al. 2013).

ویدو همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با استفاده از مصالح سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های کربنی پلی را ساخت و با بهره‌گیری از خواص خودتشخیصی

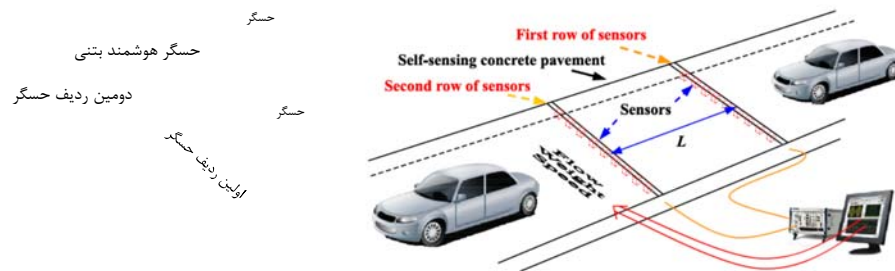


شکل ۱۱. هوشمند سازی پل از نظر سازه‌ای و ردیابی ترافیکی با استفاده از نانولوله کربن (Parveen et al. 2013)

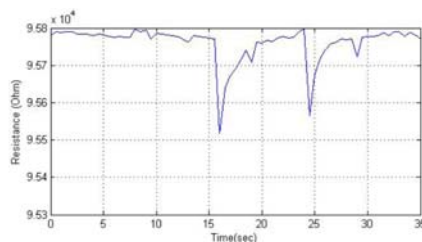
#### ۴-۳- تبدیل رویه بتنی به حسگری برای تشخیص خصوصیات ترافیک

مصالح سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های چندلایه‌ای در روسازی ایجاد گردد. این تغییرات را نشان می‌دهد. با کالیبره کردن خروجی تغییرات مقاومت، می‌توان مقادیری چون سرعت، وزن محور و جریان عبوری از هر خط را برداشت نمود (Shi and Chung 1999; Zhang et al. 2015).

هان و همکاران، همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده می‌شود، یک روسازی خود تشخیص دهنده با مصالح سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های کربنی چندلایه‌ای را ایجاد کردند و امکان استفاده از روسازی هوشمند برای نشان دادن ترافیک را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که بار ناشی از عبور وسایل نقلیه می‌تواند باعث شود که تغییر قابل توجهی در مقاومت الکتریکی

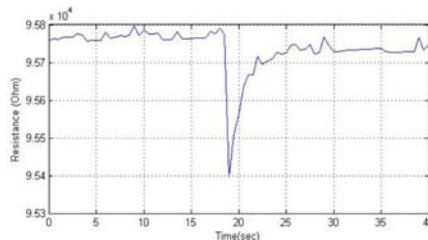


شکل ۱۲. چگونگی برداشت اطلاعات از راه به وسیله تعبیه حسگرهای خارجی در جسم راه (Klein, Mills, and Gibson 2006)



زمان

الف) عبور دو وسیله نقلیه سواری از روی دو حسگر موجود در رویه بتنی



ب) عبور یک ون از روی حسگر

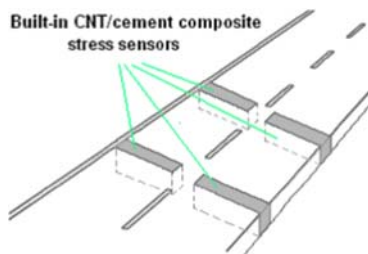
شکل ۱۳. تغییرات مقاومت الکتریکی مصالح سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های کربنی چندلایه‌ای تحت بار ناشی از عبور وسایل نقلیه مختلف

(Yu and Kwon 2012)

تشخیص داد. لذا از این مواد می‌توان به جای حسگرهای موجود مانند WIM استفاده کرد (Yu and Kwon 2012). این حسگرها هم از نظر اقتصادی و هم از نظر اجرایی به حسگرهای موجود می‌تواند ارجحیت داشته باشد.

در تحقیقی دیگر زان، با استفاده از مخلوط بتن حاوی نانولوله کربن، حسگرهای فشارسنج الکتریکی ساخت و با اجرای نواری در حدود ۱۵ سانتی‌متر نشان داده شده در ۰، در هر خط عبور وسایل نقلیه، تعداد و وزن محور عبوری را

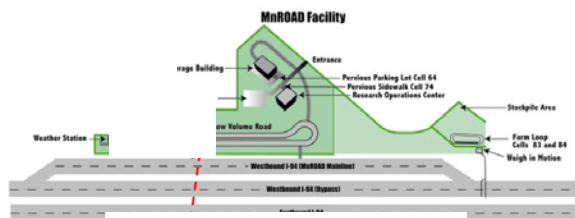
حسگر بتنی ساخته شده از CNTs



شکل ۱۴. اجرای حسگر فشارسنج الکتریکی به منظور تشخیص وسیله نقلیه و بار محور عبوری از سطح راه (Klein et al. 2006)

ساخته شده در آزمایشگاه و نصب شده در محل) به همراه کرنش‌سنج‌هایی که در محل آرماتورهای طولی قطعات بتنی نصب شده‌اند استفاده شد.

در تحقیق دیگری که در ۰ نشان داده شده است، و زیر نظر اداره تحقیقات راه مینه‌سوتا در محلی به فاصله ۴۰ کیلومتری از مینیاپولیس در مسیر آزمایش‌های میدانی انجام شد (Yu and Kwon 2012) از دو نوع حسگر بتنی (ساخته شده در محل و



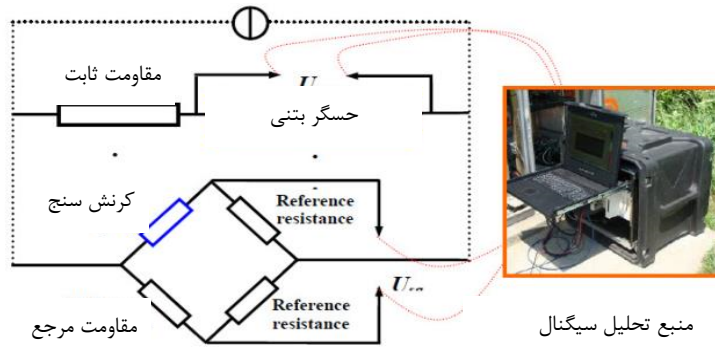
نمایی کلی از زیرساخت های آزمایش میدانی مینه سوتا



شکل ۱۵. ساخت و اجرای بتن هوشمند در محوطه مسیر آزمایشی واقع در ۴۰ کیلومتری مینیاپولیس (Yu and Kwon 2012)

سیمان به کاررفته در این نوع حسگرها از نوع سیمان تپ یک است و در این حسگرها از نانولوله‌های کربنی چند دیواره استفاده شد. به منظور کمک به پخش مناسب نانولوله‌های کربنی در مخلوط از افزودنی استفاده شد و به منظور کاهش حباب هوای ایجاد شده به دلیل استفاده از این نوع افزودنی از ضدکفی بنام تری بیوتیل فسفات استفاده شد. به منظور برداشت اطلاعات و ردیابی وسیله نقلیه عبوری بر روی حسگرها، ولتاژ دو سر هر حسگر همانند ۰ اندازه‌گیری شد. نرخ فرکانس ولتاژ تولید شده توسط منبع تغذیه جریان متناوب ۱۰۰۰ هرتز انتخاب شد. همچنین به منظور کاهش نرخ پراکندگی داده‌ها از فیلتر استفاده شد (Yu and Kwon 2012) پاسخ حسگرها در برابر عبور تریلر در دو حالت کم سرعت ۰، و پرسرعت شکل ۱۸، و خودروی ون با سرعت کم ۰ برای حسگر بتنی و کرنش‌سنج الکترو مکانیکی استفاده شده در روسازی به دست آمد. در اشکال ذیل با عبور هر چرخ وسایل نقلیه بر روی حسگرها، یک نقطه اوج در نمودار ظاهر شد که در وضعیت‌های مختلف اعم از سرعت کم یا زیاد و بار کم یا زیاد برای هر دو نوع حسگر قابل مقایسه است. با مقایسه نمودارهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت که حسگرهای بتنی درست شده

با نانولوله‌های کربنی دارای دقت بیشتری در تشخیص عبور وسیله نقلیه نسبت به کرنش‌سنج‌های الکترو مکانیکی است. با مقایسه نتایج به دست آمده از تریلر و خودروی ون می‌توان مشاهده کرد که با افزایش بار عبوری از روی حسگر نسبت تغییرات ولتاژ به ولتاژ اولیه نیز افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که حسگرهای بتنی نسبت به کرنش‌سنج‌ها دارای قابلیت تشخیص بهتری می‌باشند. در بارهای کم اصولاً نیروی ایجاد شده در میلگردها بسیار اندک بوده و لذا کرنش‌سنج‌ها زیاد کارایی ندارند (Yu and Kwon 2012). از دیگر موارد مشاهده شده در پاسخ برداشت شده از حسگرهای بتنی می‌توان اثر پلاریزاسیون میدان‌های خارجی و اثر عوامل طبیعی مانند دما و رطوبت بر روی حسگرهای بتنی را با اهمیت دانست. ولی این اثرات تأثیر قابل توجهی بر تشخیص عبور وسایل عبوری نخواهد گذاشت. اثر عوامل طبیعی و پلاریزاسیون عموماً تدریجی است و می‌توان آن را پالایش کرد درحالی‌که اثر عبور وسیله نقلیه بر روی حسگر ناگهانی است. لذا این عوامل بر روی دقت تشخیص این نوع حسگرها اثری نخواهند گذاشت (Yu and Kwon 2012).

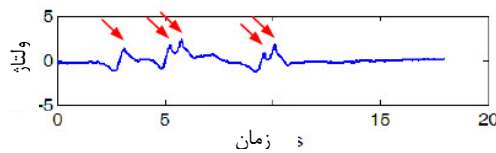


شکل ۱۶. مدار اندازه‌گیری پاسخ حسگرها در برابر عبور وسیله نقلیه (Yu and Kwon 2012)

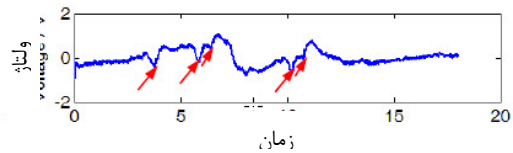
#### ۴-۴- بتن خودحسگر و تشخیص آسیب در سازه

شکست‌های کامپوزیت‌های سیمانی را می‌توان به دو دسته شکست‌های ماکرو و میکرو تقسیم کرد. شکست‌های ماکرو شامل ترک‌های قابل رویت با چشم غیرمسلح است، در حالی که شکست‌های میکرو به آسیب‌های در مقیاس میکروسکوپی اشاره دارد که خواص مکانیکی ماده را تغییر می‌دهد (Tziviloglou et al. 2022). روش‌های پیزومقاومتی می‌توانند برای پیش‌بینی و تمرکز آسیب‌ها در

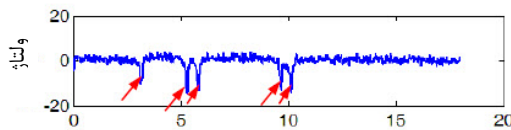
کامپوزیت‌های سیمانی استفاده شوند. این تکنیک‌ها بر اساس تغییرات در مقاومت الکتریکی ناشی از آسیب‌ها بنا شده‌اند (Keddad et al. 1997). پارامترهای مختلفی مانند خواص مکانیکی، هندسه و شرایط محیطی بر روی شروع و گسترش ترک‌ها تأثیر می‌گذارند. روش‌هایی برای محاسبه این پارامترها پیشنهاد شده است (Tziviloglou et al. 2022).



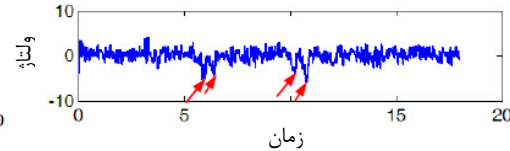
حسگر بتنی ساخته شده در محل مرحله اول بارگذاری



حسگر بتنی پیش ساخته

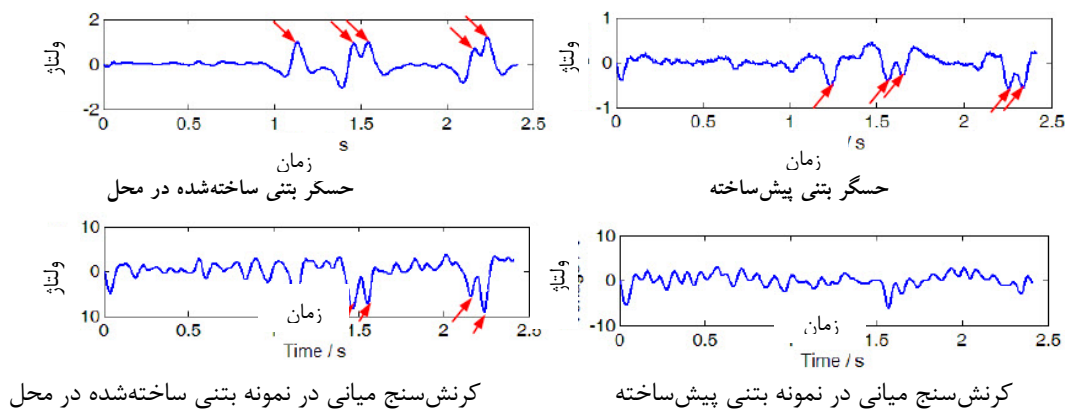


کرش سنج و نه بتنی ساخته شده در محل



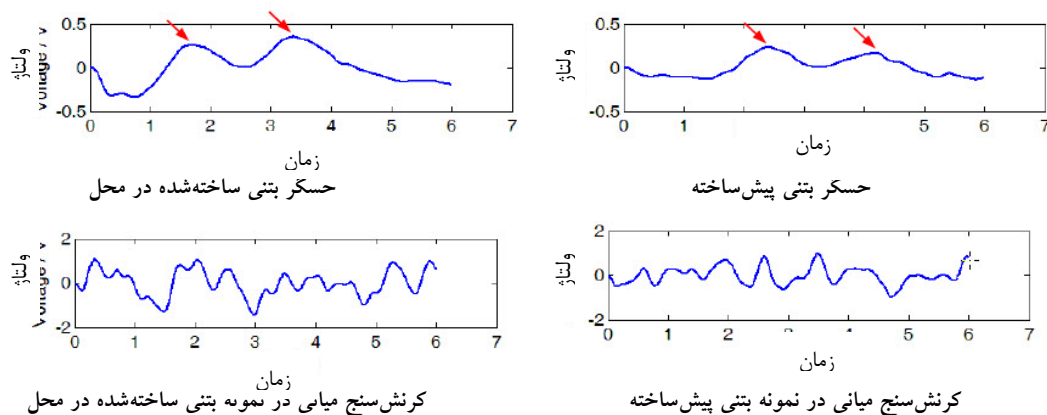
کرش سنج میانی در نمونه بتنی پیش ساخته

شکل ۱۷. شناسایی عبور تریلر با سرعت کم از روی نمونه‌های بتنی هوشمند شده با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی (Yu and Kwon 2012)



شکل ۱۸. شناسایی عبور تریلر با سرعت زیاد از روی نمونه‌های بتنی هوشمند شده با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی (Yu and Kwon 2012)

با توجه به ۰ مشاهده می‌شود که حسگر بتنی با تکرار بارگذاری جواب یکسانی را ارائه کرده است لذا آنها ادعا کردند که حسگر بتنی دارای قابلیت تکرارپذیری مناسبی است.



شکل ۱۹. شناسایی عبور ون با سرعت کم از روی نمونه‌های بتنی هوشمند شده با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی (Yu and Kwon 2012)

### ارزیابی خسارت در رویه های بتنی بر اساس خاصیت خودحسگر

وجود دارد (Pujadas, Blanco, et al. 2014). درصد حجمی الیاف و خواص پیوندی بر مکانیزم‌های غالب تاثیر می‌گذارند (Pujadas, Blanco, et al. 2014). نقص‌ها و حفره‌های بین‌فازی به عنوان محل‌های آغاز ترک عمل می‌کنند (Wen and Chung 2006). تصویربرداری سه بعدی بینشی را در مورد بهینه‌سازی ریزساختار کامپوزیت و پوشش‌های الیاف برای افزایش شکل‌پذیری و سختی فراهم می‌کند (Pujadas, Blanco, et al. 2014). مدل‌سازی محاسباتی بیشتر مبتنی بر الگوهای ترک مشاهده شده می‌تواند در طراحی کامپوزیت‌های سیمانی مقاوم به خستگی، ضربه و رویدادهای

فرایند شکست در کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با الیاف شامل مکانیزم‌های پیچیده انتشار ترک و پل زنی الیاف است (Pujadas, Blanco, et al. 2014). آزمایش‌ها از تکنیک‌های غیرمخرب مانند میکروتوموگرافی اشعه ایکس و همبستگی تصویر دیجیتال برای مشاهده پیشرفت آسیب در سه بعد استفاده کرده‌اند (J. P. B. Leite, Slowik, and Mihashi 2004). نتایج نشان می‌دهند چندین حالت شکست که در ایجاد روند شکست باهم رقابت می‌کنند، از جمله ترک خوردگی در امتداد رابطه ملات-الیاف، گسیختگی الیاف، بیرون کشیده شدن الیاف و ترک خوردگی ماتریس در نمونه‌ها

دهد (Chen and Liu 2004). محدوده محلی شدن ترک ماکروی منجر به نرم شدن و شکست سازه می‌شود. بهینه‌سازی نسبت حجم الیاف و استفاده از الیاف ترکیبی، جذب انرژی و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد (Chen and Liu 2004). تصویربرداری و تحلیل الگوهای ترک در حال رشد، می‌تواند راهنمایی برای بهبود میکروساختار و رابطه‌ها باشد تا از توسعه ترک‌های ماکروی جلوگیری کند و کامپوزیت‌های مقاوم در برابر آسیب را تولید کند. میکروتُرک‌ها به آسیب‌هایی در ترکیبات سیمانی اشاره دارند که در سطح میکروسکوپی رخ می‌دهند و با چشم غیر مسلح قابل رؤیت نیستند (Wen and Chung 2000). در سطح میکرو، فرآیند شکست در ترکیبات سیمانی با شکل گرفتن میکروتُرک‌ها در ماتریس سیمانی و در ناحیه تماس فیبر-ماتریس آغاز می‌شود (Hearn 1999). عواملی مانند انقباض، انقباض حرارتی، واکنش‌های هیدراسیون و موارد مشابه می‌توانند تنش‌ها را در مواد ایجاد کرده و منجر به ایجاد میکروتُرک‌ها شوند (Downey et al. 2017). با وجود عدم قابلیت دیده شدن، تجمع میکروتُرک‌ها به طور قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارد و منجر به کاهش سختی و مقاومت می‌شود (Mehta and Monteiro 2006). تشکیل میکروتُرک‌ها به دلیل تجمع تنش‌ها در اطراف عیوب و حفره‌ها در ساختار میکروی ماده رخ می‌دهد (Bentur 1947). میکروتُرک‌ها مرحله ابتدایی آسیب در بتن هستند که می‌توانند به تخریب مقاومت و سختی منجر شوند (Kan et al. 2010). آنها در رابط سیمانی و ماسه شروع به شکل گرفتن می‌کنند و سپس به ماتریس منتقل می‌شوند (Mehta and Monteiro 2006). میکروتُرک‌ها به مراتب قبل از ظهور ترک‌های ماکروی قابل رؤیت شکل می‌گیرند (Nijssen and Lekou 2016). روش‌های پیشرفته مانند میکروسکوپی الکترونیکی روبشی، پراش پرتو ایکس و پراش نوترون برای مشخص کردن میکروتُرک‌ها در ماتریس سیمان استفاده شده است (Bisschop and Van Mier 2002). درک مکانیسم‌های تکامل میکروتُرک برای توسعه استراتژی‌های پیشگیری و روش‌های افزایش عملکرد مواد سیمانی بسیار حیاتی است. طراحی مناسب مواد و فرآیند عمل‌آوری می‌تواند به کاهش گسترش میکروتُرک‌ها در عناصر بتن کمک کند (Wen and Chung 2000). تکنیک‌های آزمایشی مانند تصویربرداری آزمایشگاهی پرتو ایکس اجازه داده است تا تکامل میکروتُرک‌های داخلی به صورت سه‌بعدی مشاهده شود (Keddam et al. 1997). میکروتُرک‌ها با افزایش بار تجمع

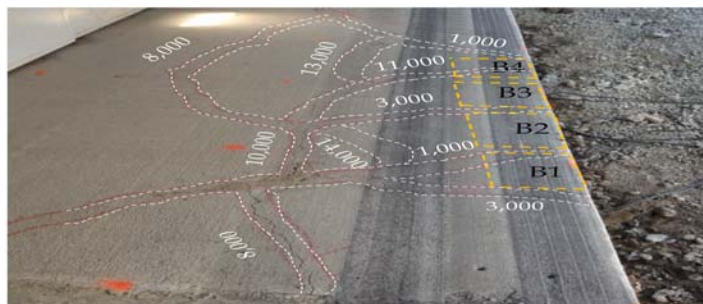
بارگذاری شدید کمک کند (Wang and Chung 2006). انواع مختلفی از آسیب‌ها ممکن است در ترکیبات مبتنی بر سیمان رخ دهند، از جمله ترک‌خوردگی، زنگ زدگی، جدایی و شکست الیاف (J. P. B. Leite et al. 2004). ترک‌خوردگی میکروسکوپی یک نوع آسیب زودرس است و به صورت بصری بسختی قابل تشخیص است (Wang and Chung 2006). ترک‌های گسترده و جدایی ممکن است به کاهش سختی و از دست دادن مقاومت منجر شوند (Mehta and Monteiro 2006). زنگ‌زدگی مسلح‌کننده‌ها نیز باعث ترک‌خوردگی تورمی و پوسیدگی می‌شود (Hillemeier and Scheel 1977). شکست الیاف در ترکیبات سیمانی مهندسی منجر به ایجاد چندین میکروتُرک به جای ترک‌های ماکروی محلی می‌شود (Ožbolt, Li, and Kožar 2001). انواع مختلفی از روش‌های حسگری برای شناسایی آسیب در ترکیبات سیمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مانند پیزومقاومتی (Gupta, Y. A. Lin, et al. 2021)، تصویربرداری مقاومت الکتریکی (Torres-Acosta and Martnez-Madrid 2003) و مدل مش مقاومتی که در ادامه بررسی می‌شود. ادغام چندین روش حسگری می‌تواند منجر به پایش سلامت سازه‌های مبتنی بر سیمان در برابر مکانیسم‌های آسیب پیچیده‌تر شود. بمنظور درک بهتر از شرایط و بیان دقیق‌تر درباره خرابی‌ها و خسارت در ادامه به بررسی خرابی‌ها که می‌توان آن‌ها را در دو دسته بندی خرابی‌های ماکرو و خرابی‌های میکرو دسته بندی کرد، می‌پردازیم. روش‌های پیشرفته غیرمخرب مانند همبستگی تصویر دیجیتال و ترموگرافی برای تشخیص ترک‌های ماکرو در سازه‌های بتنی استفاده شده‌اند (Loh and et al. 2006). همچنین میتوان از تکنیک غیر مخرب پایش انتشار صوت نیز برای تشخیص لحظه‌ای ترک‌های ماکرو در حال گسترش استفاده کرد (Loh and et al. 2006). شناسایی زودهنگام و رفع آسیب‌های ماکرو در کامپوزیت‌های سیمانی می‌تواند از وقوع شکست‌های فاجعه‌بار جلوگیری کند و ایمنی سازه را بهبود بخشد. تکنیک‌های آزمایشگاهی مانند همبستگی تصویر دیجیتال، به تصویربرداری دقیق از تشکیل یک ناحیه ترک ماکروی محلی کمک کرده‌اند (Pujadas, Blanco, Á., Cavalaro, et al. 2014). حضور الیاف تأخیر در بازگشایی ترک را با فراهم کردن تنش‌های پل‌زنی ایجاد می‌کند. با این حال، شکست خمشی و برشی هنوز می‌تواند به دلیل شکست الیاف یا جدا شدن آنها پس از افزایش طول دهانه ترک به طول مشخص، رخ

پیزومقاومتی نوآورانه با استفاده از تصویربرداری مقاومت الکتریکی (ERT) برای تشخیص آسیب سه بعدی در سازه‌های بتن ارائه دادند. بتن هوشمند با تغییر رابط سیمان و ماسه با فیلم‌های نانولوله کربنی ساخته شدند تا ویژگی‌های پیزومقاومتی حساس به آسیب را انتقال دهد (شکل ۲۰ را ببینید). گوپتا و همکاران در یک روسازی چند حسگر پیزومقاومتی را تعبیه کردند و روسازی تحت آزمایش تسریع شونده قرار گرفت تا محل مورد نظر حاوی حسگرها ترک بخورد (شکل ۲۱). آنها با استفاده از تکنیک ERT ترک‌های زیرسطحی را نقشه‌برداری کردند. آزمایشات روی نمونه‌های کوچک نشان دادند که ERT می‌تواند مکان، شکل، اندازه و شدت آسیب را مشخص کند. آزمایشات بزرگ‌مقیاس بیشتر تأیید کردند که پایش ترک فضایی به صورت لحظه‌ای در طول بارگذاری چرخه‌ای ممکن است و اجازه می‌دهد تا قبل از ظهور سطحی آسیب، آسیب‌یابی زودرس انجام شود. این استراتژی تشخیص آسیب پیزو مقاومتی را بدون تماس محدودیت‌های روش‌های سنتی برطرف می‌کند و قابلیت‌های نظارت بر سلامت سازه را بهبود می‌بخشد (شکل ۲۲).

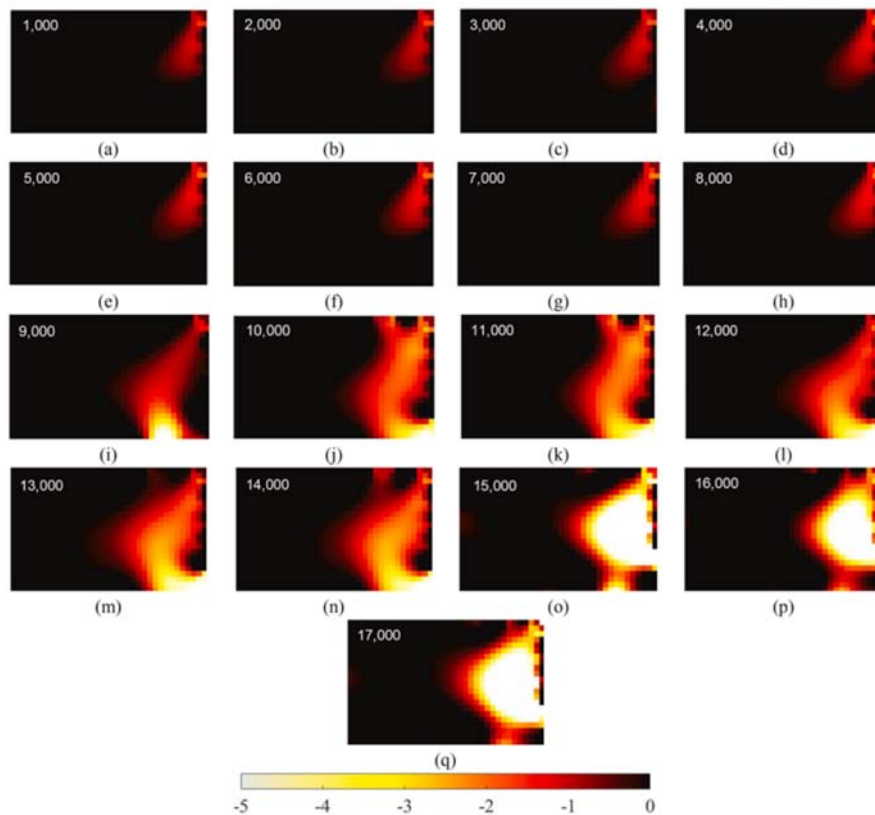
می‌کنند و به ترک‌های ماکروی ادغام می‌شوند، که منجر به توزیع مجدد تنش و افزایش میکروترک‌ها می‌شود (Hearn 1999). حضور فیبرها از طریق پل زدگی ترک و خروج اصطکاکی از توسعه ترک‌ها جلوگیری میکند. با این حال، جدایی و شکست فیبرها هنوز هم در سطح میکرو رخ می‌دهد (Bentur 1947). بهینه‌سازی ویژگی‌های اتصال فیبر-ماتریس و کاهش عیوب می‌تواند آغاز میکروترک‌ها را کاهش دهد. تصویربرداری سه‌بعدی پیشرفته به همراه مدلسازی محاسباتی، درکی از تغییر ساختار میکرو را فراهم می‌کند تا آغاز و گسترش میکروترک‌ها را متناسب با نیازها مدیریت کند (Keddam et al. 1997). در آزمایشات انجام شده روی نمونه‌های کوچک خود-حسگر بتن در آزمایشگاه، با استفاده از تکنیک امپدانس الکتریکی بر اساس نتایج الکتریکی حسگرهای بتنی با موفقیت مکان‌یابی، شکل، اندازه و شدت آسیب‌های مختلفی که به صورت مصنوعی ایجاد شده بودند، شامل شناسایی حفره‌های دریل کاری شده (Tian et al. 2019) و برش‌های قطری مشابه ترک‌ها (Tian et al. 2019) را مشخص کرد. گوپتا و همکاران (Gupta, Y. A. Lin, et al. 2021) یک تکنیک



شکل ۲۰. الف) نحوه ساخت و قالب بندی نمونه‌ی بتن خودحسگر (ب) بعد از بتن ریزی و عمل‌آوری (ج) بارگذاری دال (Gupta, Y.-A. Lin, et al. 2021)



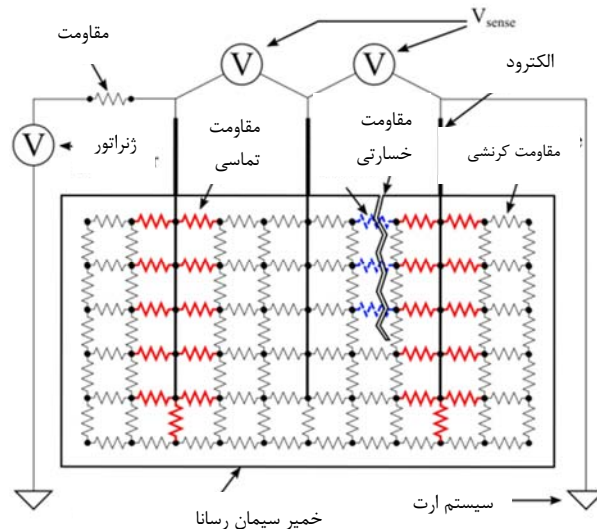
شکل ۲۱. تصویر روسازی بتنی آسیب‌دیده پس از ۱۷,۰۰۰ چرخه بارگذاری تسریع شونده توسط دستگاه HVS (Gupta, Y. A. Lin, et al. 2021)



شکل ۲۲. مراحل تشخیص ترک و رشد آن در بتن روسازی با استفاده از تکنیک توموگرافی امپدانس الکتریکی و بر اساس خروجی حسگرهای بتنی (Gupta, Y. A. Lin, et al. 2021)

می‌کند. این روش یک شبکه مقاومت معادل را که با هندسه سازه ای مطابقت دارد، می‌سازد (Downeya et al. 2017). شبکه برای ولتاژهای گره‌ای تحت یک جریان اعمال شده حل می‌شود. با تنظیم مقادیر مقاومت مقاومت‌های شبکه، مدل می‌تواند اندازه‌گیری‌های ولتاژ تجربی را شبیه‌سازی کند. معرفی مقاومت‌های نوع آسیب امکان یافتن رسانایی کاهش یافته از ترک‌ها را فراهم می‌کند (Hou and Lynch 2009). این روش مبتنی بر مدل، تغییرات مقاومت را مستقیماً به آسیب مرتبط می‌کند. این روش مکمل تکنیک‌های پیزو مقاومتی است که کرنش را از تغییرات مقاومت ویژه پیش‌بینی می‌کنند. مدل شبکه مقاومتی امکان تشخیص آسیب با استفاده از اندازه‌گیری‌های الکتریکی ساده و محاسبات محدود را فراهم می‌کند. بهینه‌سازی بیشتر پارامترهای شبکه می‌تواند قدرت تفکیک و تشخیص را برای ترک‌های ریز مرحله اولیه را افزایش دهد.

تکنیک‌های نظارتی مانند انتشار صدا می‌توانند میکروتُرک‌ها را تشخیص دهند (Saeedifar and Zarouchas 2020). با این حال، برای مکان‌یابی نیاز به شبکه ای از حسگرها دارند (Saeedifar and Zarouchas 2020). ترکیبات سیمانی پیزومقاومتی امکان تشخیص میکروتُرک‌ها از طریق تغییرات مقاومت الکتریکی را فراهم می‌کنند (Gupta, Y. A. Lin, et al. 2021). مدل مش مقاومتی نشان دهنده توانایی موقعیت‌یابی میکروتُرک‌ها از نقاط حسگر محدود (Downeya et al. 2017) است. با حساسیت کافی، این مدل می‌تواند میکروتُرک‌های زیرسطحی در بتن را قبل از تخریب داخلی جدی شناسایی و مکان‌یابی کند و این امکان را فراهم می‌کند تا قبل از ظهور ترک‌های سطح قابل رؤیت، اقدامات پیشگیرانه زودرس انجام شود. مدل مش مقاومتی نشان داده شده در شکل ۲۳، یک رویکرد محاسباتی برای تشخیص آسیب در مواد سیمانی خودحسگر فراهم



شکل ۲۳. عملکرد روش پیزو مقاومتی در تشخیص محل خسارت را نشان می‌دهد (Downeya et al. 2017)

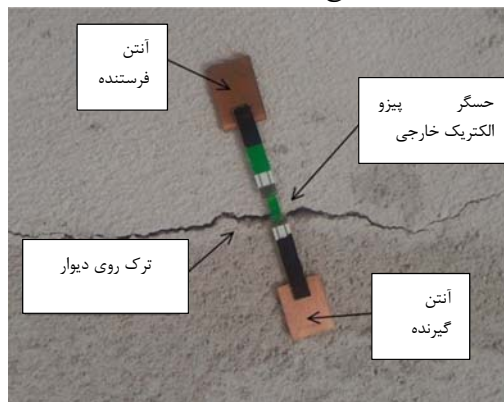
مخلوط و مواد افزودنی بر خلاء ماتریکس و توزیع نقص تأثیر می‌گذارند و ترک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تنش‌های باقیمانده از گرادیان دما در مراحل سیکلی، ایجاد میکروترک را تشدید می‌کنند. بارهای چرخه‌ای و پایدار اثرات خستگی را ایجاد می‌کنند که آستانه آغاز ترک خوردگی را کاهش می‌دهند. تمرکز تنش در نقص‌ها و عیوب موجود که توسط هندسه سازه متمرکز می‌شود نیز به ترک‌زنی محلی کمک می‌کند. بهینه‌سازی طراحی مخلوط، روش‌های ترتیب و تنظیمات سازه می‌تواند آغاز ترک را کندتر کند. هنگامی که ترک تشکیل شده، انتشار ترک بستگی به مقاومت ماتریکس، تقویت با الیاف و الگوهای بارگذاری ادامه‌دار دارد. تجزیه و تحلیل پارامترهای متعدد در تعامل با یکدیگر، در فهم جلوگیری از آغاز و رشد ترک‌ها در سازه‌های بتن کمک می‌کند. پایش سلامت سازه در مطالعات شکست نقش حیاتی در شناسایی، ارزیابی و پیش‌بینی رفتار ترک‌ها و آسیب‌های سازه‌ای ایفا می‌کند. این روش‌ها امکان بررسی دقیق مکانیزم‌های شکست، از مرحله آغاز میکروترک‌ها تا گسترش و در نهایت شکست کامل را فراهم می‌آورند. در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوینی برای این منظور توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به حسگرهای فرکانس رادیویی (RF) و بتن‌های خودحسگر اشاره کرد. حسگرهای فرکانس رادیویی (RF) از امواج الکترومغناطیسی برای شناسایی و مکان‌یابی آسیب‌های کوچک در سازه‌های بزرگ استفاده می‌کنند. این فناوری به دلیل هزینه پایین نصب و نگهداری نسبت به حسگرهای متصل سنتی، پتانسیل بالایی در

روش‌هایی مانند مدل مش مقاومتی، امکان تشخیص ترک خوردگی زیرسطحی را فراهم می‌کنند. ترک‌های میکروسکوپی مقاومت الکتریکی بتن را افزایش می‌دهند (M. Leite, Slowik, and Mihashi 2004). نقشه‌برداری از این اثر پیزو مقاومتی می‌تواند محل آسیب را قبل از تشکیل ترک‌های قابل مشاهده شناسایی کند (Shahidan and et al. 2017). با تراکم حسگر کافی، مدل‌های مش مقاومتی امیدوارکننده برای شناسایی ترک‌های میکروسکوپی و جلوگیری از تشکیل ترک‌های ماکروسکوپی از طریق اقدامات اصلاحی زودهنگام هستند.

#### ارتباط بین خواص پیزومقاومتی و خصوصیات مکانیک شکست مصالح

پارامترهای مختلفی بر آغاز و گسترش ترک در مواد بر پایه سیمان تأثیر می‌گذارند (Shahidan and et al. 2017). خواص ماده مانند مقاومت کششی، انرژی شکست و سختی شکست بر آغاز و رشد ترک تأثیرگذار هستند (Bazant and Planas 2019). عوامل هندسی مانند شکل و اندازه نمونه نیز در تشکیل ترک نقش دارند (Vavasis et al. 2013). تشکیل ترک در سازه‌های بتنی توسط چندین پارامتر مرتبط با ترکیب مواد، شرایط ترتیب و تأثیرات بارگذاری تحت‌التأثیر قرار می‌گیرد. شرایط محیطی مانند تغییرات دما و بارهای پایدار می‌توانند تنش‌های منجر به ترک خوردگی ایجاد کنند (Vavasis et al. 2013). نسبت آب به سیمان، نوع سنگ

تحلیل داده‌ها روبرو است (Laflamme et al. 2023). از سوی دیگر، بتن‌های خودحسگر با ترکیب قابلیت‌های سازه‌ای و حسگری در خود ماده، امکان پایش مداوم و یکپارچه را فراهم می‌آورند، که می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های روش‌های سنتی را برطرف کند.

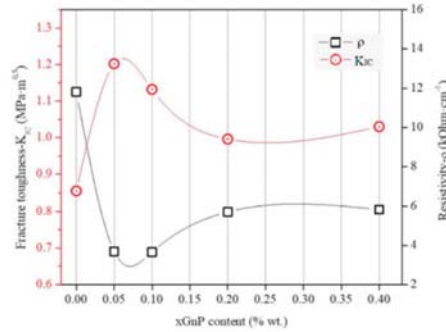


شکل ۲۴. نمونه‌ای از حسگر ترک‌خوردگی مبتنی بر RFID غیرفعال در سازه‌های آجری که توسط دونلی (Donelli 2018) پیشنهاد شده است.

به روش غیرمخرب از طریق اندازه‌گیری‌های الکتریکی فراهم می‌کند. مدل‌سازی تحلیلی و عددی بیشتری برای استانداردسازی این همبستگی به منظور پایش سلامت سازه قابل اعتماد مورد نیاز است (Tziviloglou et al. 2022). آن‌ها تغییرات کسری مقاومت الکتریکی (FCR) با مشتق‌گیری از مقادیر مقاومت الکتریکی را محاسبه و با دوز GNP و مقادیر مقاومت شکست مرتبط کردند که در شکل ۲۵ نشان داده شده است. آنالیز رگرسیون برای به دست آوردن معادله همبستگی خطی بین مقاومت الکتریکی معکوس ( $\rho/l$ ) و KIC انجام شد. نتایج، یک رابطه معکوس بین این دو پارامتر را نشان دادند. مدل‌سازی ریزساختاری برای توضیح تأثیر افزودن GNP بر مقاومت الکتریکی و مکانیزم‌های آن انجام شد (Tziviloglou et al. 2022). با این حال، کار تحلیلی بیشتری برای استانداردسازی همبستگی برای ارزیابی قابل اعتماد سلامت سازه از طریق خصوصیات مکانیکی-الکتریکی یکپارچه مورد نیاز است (Tziviloglou et al. 2022).

صنعت ساخت و ساز دارد (شکل ۲۴). حسگرهای RF امکان ایجاد شبکه‌های حسگر متراکم را فراهم می‌کنند که می‌تواند به طور مداوم وضعیت سازه را مانیتور کند (Donelli 2018; Laflamme et al. 2023; J. Zhang et al. 2017). با این حال، این فناوری با چالش‌هایی مانند مصرف انرژی، مینیاتوری‌سازی، دوام بلندمدت و پیچیدگی در استخراج

تزیولوگلو و همکاران (Tziviloglou et al. 2022) ترکیب آزمایش‌های مکانیکی و اندازه‌گیری‌های الکتریکی برای بررسی همبستگی بین مقاومت شکست و مقاومت الکتریکی در کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با نانوصفحات گرافن (GNP) استفاده کردند. نمونه‌های منشوری با افزودن ۰،۴-۰،۰۵ درصد وزنی GNP تهیه و تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند تا مقاومت شکست KIC بر اساس بار اوج و هندسه نمونه تعیین شود. اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) با اعمال سیگنال متناوب در یک طیف فرکانسی و اندازه‌گیری مقدار و زاویه امپدانس انجام شد (Tziviloglou et al. 2022). نمودارهای نایکوئیست به دست آمده برای تعیین مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌ها تحلیل شدند. نتایج نشان داد افزودن ۰،۰۵ درصد GNP موجب افزایش تا ۲۹ درصدی KIC و کاهش تا ۶۸ درصدی مقاومت الکتریکی می‌شود که نشان‌دهنده اثر تقویتی نانوکربن‌ها است. علاوه بر این، یک رابطه معکوس بین مقاومت شکست و مقاومت الکتریکی به دست آمد که امکان ارزیابی سریع KIC را



شکل ۲۵. ارتباط بین داده‌های مقاومت الکتریکی و ضریب تمرکز تنش برای نمونه‌های کامپوزیتی سیمانی با گرافن هستند.

(Tziviloglou et al. 2022)

همچنین باعث کاهش جمع شدگی می‌شود ( Vlachakis et al. 2023).

#### چالش‌های موجود در روش پایش سلامت سازه مبتنی بر خاصیت پیزو مقاومتی

بتن‌های خودحسگر به عنوان مواد هوشمند سازه‌ای، قابلیت‌هایی مانند خودحسگری و نظارت بر وضعیت داخلی تنش و کرنش را دارند. این مواد با استفاده از نانو و میکروتقویت‌کننده‌هایی مانند نانولوله‌های کربنی و گرافن ساخته می‌شوند که هدایت الکتریکی و حساسیت آنها را افزایش می‌دهند (Laflamme et al. 2023). با این حال، چالش‌های مهمی در مسیر استفاده گسترده از این مواد وجود دارد که نیاز به توجه ویژه دارند.

**استقرار و مقیاس‌پذیری:** برای حل مشکل پراکندگی نانوذرات در حجم‌های بزرگ، تحقیقات بیشتر در زمینه روش‌های جدید تولید و اختلاط ضروری است. توسعه روش‌های صنعتی برای تولید بتن خودحسگر در مقیاس بزرگ می‌تواند این چالش را برطرف کند.

**هزینه‌ها:** برای کاهش هزینه‌های تولید، می‌توان بر روی یافتن جایگزین‌های ارزان‌تر برای نانومواد گران‌قیمت و بهینه‌سازی فرآیند تولید تمرکز کرد. همچنین، استفاده از روش‌های جاسازی‌شده و چسبیده، مانند سنگ‌دانه‌های هوشمند بتن، می‌تواند راهکار مقرون به صرفه‌تری باشد.

**الکترودها و سیم‌کشی‌ها:** توسعه روش‌های جدید برای جاسازی الکترودها در حین ساخت و حرکت به سمت فناوری‌های بی‌سیم می‌تواند این مشکل را حل کند.

با توجه به نتایج گزارش شده، میتوان نتیجه گرفت که رفتار مقاومت الکتریکی حین آزمایش‌های شکست با رفتار مکانیکی همبستگی خوبی نشان داد. به طور خاص، شروع افزایش غیرخطی مقاومت الکتریکی به نظر می‌رسد با شروع ناحیه فرایند شکست هم‌زمان بود ( Tziviloglou et al. 2022). افزایش خطی مقاومت با گسترش ترک، همان‌طور که توسط پروفیل‌های جابه‌جایی ترک نشان داده شده، هم‌راستا بود (Tziviloglou et al. 2022). بنابراین، داده‌های مقاومت بینشی در مورد توسعه و رشد ناحیه فرایند شکست و ترک فیزیکی فراهم کرد. به طور کلی، نتایج نشان داد که تکنیک‌های مقاومت الکتریکی می‌توانند ابزار مفیدی در مطالعات مکانیک شکست کامپوزیت‌های لیاف کربنی سیمان باشند. در مطالعه انجام شده توسط والاچاکیس و همکاران در مورد پاسخ فشاری ژئوپلیمرهای خودحسگر بر پایه متاکائولین بدون پرکننده در حالت توده‌ای و لایه‌ای، آنها پیشنهاد کردند به جای استفاده از مقادیر زیاد مواد خودحسگر، از یک لایه پوششی روی نمونه‌ها استفاده شود تا مصرف و هزینه کاهش یابد (Vlachakis et al. 2023). بدین منظور، ابتدا خواص ژئوپلیمر خودحسگر توده‌ای حاوی لیاف پلی‌پروپیلن به دست آمد، سپس خواص لایه‌های خودحسگر ژئوپلیمری بر روی بتن بررسی شد (Vlachakis et al. 2023). در نهایت، ضریب کرنش برای نمونه‌های توده‌ای خودحسگر با و بدون لیاف بین ۱۸,۳ تا ۳۸,۳ و برای نمونه‌های حاوی لایه خودحسگر بین ۲۰,۷ تا ۴۳,۲ به دست آمد. لازم به ذکر است که وجود متاکائولین

محیطی مانند دما و رطوبت ضروری است. استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند در این زمینه کمک‌کننده باشد.

همچنین، طراحی الکترودهای سازگار با میلگردهای فولادی می‌تواند تداخل‌ها را کاهش دهد.

-پردازش سیگنال و اختلالات محیطی: توسعه الگوریتم‌های پیشرفته برای پردازش سیگنال و حذف اثرات

## ۵- نتیجه‌گیری

انواع مختلف سازه‌ها و شرایط محیطی را دارند. این انعطاف‌پذیری، کاربرد آن‌ها را در طیف وسیعی از پروژه‌های عمرانی امکان‌پذیر می‌سازد. از ساختمان‌های مسکونی گرفته تا زیرساخت‌های صنعتی پیچیده، بتن‌های خودحسگر می‌توانند به عنوان یک راهکار جامع برای پیش سلامت سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه، چالش‌هایی نیز وجود دارد که نیازمند توجه و تحقیقات بیشتر است. مسائلی مانند هزینه‌های بالای تولید، پیچیدگی‌های فنی در استقرار در مقیاس بزرگ و نیاز به بهبود در پردازش و تفسیر داده‌ها، از جمله موانعی هستند که باید برای گسترش استفاده از این فناوری برطرف شوند. در مجموع، نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که بتن‌های خودحسگر پیرومقاومتی پتانسیل بالایی برای تحول در صنعت ساخت و ساز و مدیریت زیرساخت‌ها دارند. با ادامه تحقیقات و نوآوری‌ها در این زمینه، انتظار می‌رود که این فناوری نقش مهم‌تری در آینده مهندسی عمران و مدیریت سازه‌ها ایفا کند. با اجرای این راهکارها و ادامه تحقیقات، انتظار می‌رود که بتن‌های خودحسگر و سایر مصالح هوشمند سازه‌ای نقش مهمی در آینده صنعت ساخت و ساز و مدیریت زیرساخت‌ها ایفا کنند. این فناوری‌ها می‌توانند به ساخت سازه‌های ایمن‌تر، پایدارتر و هوشمندتر منجر شوند که قادر به نظارت مداوم بر وضعیت خود و اعلام هشدار زودهنگام در صورت بروز مشکلات احتمالی هستند.

بتن‌های خودحسگر، به‌ویژه از نوع پیرومقاومتی، نقش مهمی در پیشرفت صنعت ساخت و ساز و مدیریت زیرساخت‌ها ایفا می‌کنند. این فناوری نوآورانه، با ترکیب قابلیت‌های سازه‌ای بتن و ویژگی‌های حسگری، امکان پایش مداوم و دقیق سلامت سازه‌ها را فراهم می‌آورد. نتایج پژوهش‌های گسترده در این زمینه نشان می‌دهد که بتن‌های خودحسگر می‌توانند به طور مؤثری در تشخیص زودهنگام آسیب‌های احتمالی و ارزیابی عملکرد سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین مزایای بتن‌های خودحسگر، قابلیت آن‌ها در ارائه اطلاعات دقیق و به‌موقع درباره وضعیت سازه است. این ویژگی به مهندسان و مدیران زیرساخت‌ها اجازه می‌دهد تا تصمیمات آگاهانه‌تری در مورد تعمیر، نگهداری و بهسازی سازه‌ها اتخاذ کنند. در نتیجه، استفاده از این فناوری می‌تواند منجر به افزایش طول عمر سازه‌ها، کاهش هزینه‌های نگهداری و بهبود ایمنی عمومی شود. علاوه بر این، بتن‌های خودحسگر پیرومقاومتی قابلیت تشخیص تغییرات جزئی در ساختار بتن را دارند. این حساسیت بالا امکان شناسایی مشکلات بالقوه را در مراحل اولیه فراهم می‌کند، پیش از آنکه به آسیب‌های جدی و پرهزینه تبدیل شوند. این ویژگی به‌ویژه در سازه‌های حیاتی مانند پل‌ها، سدها، روسازی‌ها و نیروگاه‌ها که ایمنی و پایداری آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، بسیار ارزشمند است. پژوهش‌ها همچنین نشان می‌دهند که بتن‌های خودحسگر قابلیت سازگاری با

## ۶- مراجع

سازه‌های بتنی. دهمین کنفرانس ملی بتن.

-حاجی محمد رضایی، رامین و نادرپور، حسین (۱۳۹۷). ارزیابی روش‌های پایش سلامت و شناسایی خرابی در

- Civil and Environmental Engineering* 51(4).
- Adresi, Mostafa, Alireza Yamani, Mojtaba Karimaei Tabarestani, and Hamed Rooholamini. (2023). A Comprehensive Review on Pervious Concrete. *Construction and Building Materials* 407(133308).
- Adresi, Mostafa and Mohammad Yekrangnia. (2021). Properties and Mechanisms of the Self-Sensing Piezoelectric Concrete Sensor for Structural Health Monitoring (In Persian). *Journal of Structural and Construction Engineering* 8(9).
- An, Yun Kyu and Hoon Sohn. (2012). Integrated Impedance and Guided Wave Based Damage Detection. *Mechanical Systems and Signal Processing* 28:50–62.
- Barkataki, N., S. Mazumdar, P. B. D. Singha, J. Kumari, B. Tiru, and U. Sarma. (2021). Classification of Soil Types from GPR B Scans Using Deep Learning Techniques. *Proceedings of the 2021 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT)* 840-844.
- Barnes, R., J. F. Trottier, and D. Forgeron. (2008). Improved Concrete Bridge Deck Evaluation Using GPR by Accounting for Signal Depth-Amplitude Effects. *NDT & E International*, 427–33.
- Bažant, Zdeněk P. and Jaime Planas. (2019). Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*.
- Ground-Penetrating Radar Signal Processing Techniques for Road Inspections. *Signal Processing* 132, 201–209.
- Bentur, A. (1947). Cracks in Concrete. *ACI Journal Proceedings* 43(2).
- Bisschop, J. and J. G. M. Van Mier. (2002). How to Study Drying Shrinkage Microcracking in Cement-Based Materials Using Optical and Scanning Electron Microscopy? *Cement and Concrete Research* 32(2):279–87.
- Boaretto, Neury and Tania Mezzadri Centeno (2017). Automated Detection of Welding Defects in Pipelines from Radiographic Images DWDI. *NDT and E International* 86:7–13.
- Carden, E. Peter and Paul Fanning. (2004). Vibration Based Condition Monitoring: A Review. *Structural Health Monitoring* 3(4):355–77.
- Cassese, Paolino, Carlo Rainieri, and Antonio Occhiuzzi. (2021). Applications of Cement-Based Smart Composites to Civil Structural Health Monitoring: A Review. *Applied Sciences* 11(18).
- Chakraborty, Joyraj and Marek Stolinski (2022). Signal-Level Fusion Approach for Embedded Ultrasonic Sensors in Damage Detection of Real RC Structures. *Mathematics* 10(5):724.
- Abedi, Mohammadmahdi, Mohammad Jawed Roshan, Federico Gulisano, Javad Shayanfar, Mostafa Adresi, Raul Figueiro, and António Gomes Correia. (2024). An Advanced Cement-Based Geocomposite with Autonomous Sensing and Heating Capabilities for Enhanced Intelligent Transportation Infrastructure. *Construction and Building Materials* 411:134577.
- Adhreena, M. S. N. A. and Z. M. Hafizi (2023). A Review on the Application of Fiber Bragg Grating Sensors in Bolted Joints Health Monitoring. *Lecture Notes in Electrical Engineering* 882:655–67.
- Adresi, Mostafa. (2017). Concrete Pavement Prediction Life Model Based on Electrical Response of Concrete - CNTs Sensors under Fatigue Loading. *Politecnico di Torino*.
- Adresi, Mostafa, Mohammadmahdi Abedi, Wenkui Dong, and Mohammad Yekrangnia. (2024). A Review of Different Types of Weigh-in-Motion Sensors: State-of-the-Art. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 225.
- Adresi, Mostafa, Amin Ahmadi, Mohsen Ahamadi, Maoud Forsat, and Mohammad Taghipour (2018). “Methodology of Damage Detection and Weight in Motion Performance under Traffic Loading Based on Self-Sensing Concrete. *Quarterly Journal of Transportation Engineering* 9(2):139–54.
- Adresi, Mostafa, Abolfazl Hassani, Jean-Marc Tulliani, Giuseppe Lacidogna, and Paola Antonaci. (2017). A Study on the Main Factors Affecting the Performance of Self-Sensing Concrete. *Advances in Cement Research* 29(5):216–26.
- Adresi, Mostafa and Hamed Moradi. (2022). A Review of Laboratory Test and Interpretation Methods Regarding the Investigation of Concrete Behavior under Sulfate and Acid Attacks. *Road*, 31(116).
- Adresi, Mostafa and Fatemeh Pakhirehzan. (2023). Evaluating the Performance of Self-Sensing Concrete Sensors under Temperature and Moisture Variations- a Review. *Construction and Building Materials* 404:132923.
- Adresi, Mostafa, Behrad Sabagh, and Somaye Sharifi. (2022). A Review Study on the Novel Methods in Pavement Damage Detection Based on Piezo-Resistance Capability in Self-Sensing Concrete (In Persian). *Road* 31(115).
- Adresi, Mostafa, Jean Marc Tulliani, Giuseppe Lacidogna, and Paola Antonaci. (2021). A Novel Life Prediction Model Based on Monitoring Electrical Properties of Self-Sensing Cement-Based Materials. *Applied Sciences (Switzerland)* 11.
- Adresi, Mostafa, Mostafa Vamegh, and Mehdi Ebrahimzadeh Shiraz. (2021). Evaluation of Durability Properties of Cement Stabilized Base Mixtures Contains Different Amounts of RAP during Wet and Dry Cycles (In Persian). *Journal of*

- of Carbon Black Cement-Based Sensors with Layer-Distributed Conductive Rubber Fibres. *Materials and Design* 182.
- Downey, Austin, Enrique Garcia-Macias, Antonella D'Alessandro, Simon Laflamme, Rafael Castro-Triguero Ubertini, and Filippo Ubertini. (2017). Continuous and Embedded Solutions for SHM of Concrete Structures Using Changing Electrical Potential in Self-Sensing Cement-Based Composites. in *Proceedings* Vol. 10169, *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure*.
- Downey, Austin, Antonella D'Alessandro, Micah Baquera, Enrique Garcia-Macias, Daniel Rolfes, Filippo Ubertini, Simon Laflamme, and Rafael Castro-Triguero. (2017). Damage Detection, Localization and Quantification in Conductive Smart Concrete Structures Using a Resistor Mesh Model. *Engineering Structures Journal* 148:924-35.
- Du, Bolun, Yigang He, Yunze He, and Chaolong Zhang. (2020). Progress and Trends in Fault Diagnosis for Renewable and Sustainable Energy System Based on Infrared Thermography: A Review. *Infrared Physics and Technology* 109:103383.
- Fan, Wei and Pizhong Qiao. (2011). Vibration-Based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study. *Structural Health Monitoring* 10(1):83-111.
- Fang, Y., L. Lin, H. Feng, Z. Lu, and G. W. Emms. (2017). Review of the Use of Air-Coupled Ultrasonic Technologies for Nondestructive Testing of Wood and Wood Products. *Comput. Electron. Agric.* 79-87.
- Farrar, C. R., T. A. Duffey, S. W. Doebling, and D. A. Nix. (1999). A Statistical Pattern Recognition Paradigm for Vibration-Based Structural Health Monitoring. *Structural Health Monitoring*, 41-56.
- Feng, Dongming and Maria Q. Feng. (2017). Experimental Validation of Cost-Effective Vision-Based Structural Health Monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 88:199-211.
- Foaleng, Stella M. and Luc Thévenaz. (2011). Impact of Raman Scattering and Modulation Instability on the Performances of Brillouin Sensors. *21st International Conference on Optical Fiber Sensors* 7753:77539V.
- Fu, Chenghua, Yanfang Pan, and Haoran Shi. (2021). Research on Non-Destructive Testing Technology of Hydraulic Engineering Based on Improved ALO Algorithm and Wireless Network. *Alexandria Engineering Journal* 60(5):4505-15.
- Gagar, D., M. Martinez, P. Foote, and P. Irving. (2021). Structural Health Monitoring (SHM) Implementation on Live Structures: A Review. *Struct. Health Monit.* 1863-1897.
- Galos, J., B. Ghaffari, E. T. Hetrick, M. H. Jones, -Chen, Bing and Juanyu Liu. (2004). Experimental Study on AE Characteristics of Three-Point-Bending Concrete Beams. *Cement and Concrete Research* 34(3):391-97.
- Chen, Y., Y. Kang, B. Feng, Y. Li, X. Cai, and S. Wang. n.d. (2019). Automatic Defect Identification in Magnetic Particle Testing. *Measurement* 111427.
- Cho, H. S., J. E. Oh, S. I. Choi, H. M. Cho, Y. O. Park, D. K. Hong, M. S. Lee, Y. J. Yang, U. K. Je, D. S. Kim, T. H. Woo, B. S. Lee, and H. K. Lee. (2011). Performance Evaluation of a Gamma-Ray Imaging System for Nondestructive Testing of Welded Pipes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 652(1):650-53.
- Cho, Oh Hoon, Jong Chan Kim, and Eung Kon Kim. (2016). Context-Aware High-Rise Structure Cracks Image Monitoring System Using Unmanned Aerial Vehicles. *International Journal of Control and Automation* 9(9):11-18.
- Chu, Pak L. (2005). Recent Development of a Polymer Optical Fiber and Its Applications. *Guided Wave Optical Components and Devices: Basics, Technology, and Applications*, 27-40.
- Chung, D. D. L. and Shoukai Wang. (2003). Self-Sensing of Damage and Strain in Carbon Fiber Polymer-Matrix Structural Composites by Electrical Resistance Measurement. *Polymers and Polymer Composites* 11(7):515-25.
- Dackermann, Ulrike, Wade A. Smith, and Robert B. Randall. (2014). Damage Identification Based on Response-Only Measurements Using Cepstrum Analysis and Artificial Neural Networks. *Structural Health Monitoring* 13(4):430-44.
- Dackermann, Ulrike, Yang Yu, Ernst Niederleithinger, Jianchun Li, and Herbert Wiggenhauser. (2017). Condition Assessment of Foundation Piles and Utility Poles Based on Guided Wave Propagation Using a Network of Tactile Transducers and Support Vector Machines. *Sensors (Switzerland)* 17(12):2938.
- Dehui, Wu, Yang Fan, Wang Teng, and Chen Wenxiong. (2021). A Novel Electromagnetic Nondestructive Testing Method for Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates Based on Power Loss. *Composite Structures* 276:114421.
- Deng, Zhizhong, Wengui Li, Wenkui Dong, Zhihui Sun, Jayantha Kodikara, and Daichao Sheng. (2023). Multifunctional Asphalt Concrete Pavement toward Smart Transport Infrastructure: Design, Performance and Perspective. *Composites Part B: Engineering* 265:110937.
- Donelli, Massimo. (2018). An RFID-Based Sensor for Masonry Crack Monitoring. *Sensors (Switzerland)* 18(12).
- Dong, Wenkui, Wengui Li, Luming Shen, and Daichao Sheng. (2019). Piezoresistive Behaviours

- Additive Manufacturing: Defect Evaluation, Material Characterization, and Process Control. *Ultrasonics* 108:106227.
- Hosseini Lavassani, Seyed Hossein, Mahtab Mardani, and Mostafa Adresi. (2022). Piezoresistivity and Mechanical Properties of Self-Sensing Cnt Cementitious Nanocomposite S: Optimizing the Effects of Cnt Dispersion and Surfactants. *Construction and Building Materials* (April):128127.
- Hou, Tsung Chin and Jerome P. Lynch. (2009). Electrical Impedance Tomographic Methods for Sensing Strain Fields and Crack Damage in Cementitious Structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20(11):1363–79.
- Hughes, S., H. Kazemi, A. Marble, D. Wisch, and M. Antonopoulos-Domis. (1994). Microwave Diagnostics and Cure Monitoring of Chemically Cured Composites. *Nondestructive Characterization of Materials IV*, 87–94.
- Ibrahim, T. B. (2017). Strain Gauge Technologies for Civil Infrastructure Monitoring.” *Procedia Eng.* 9-17.
- Kan, L. L., H. S. Shi, A. R. Sakulich, and V. C. Li. (2010). Cement and Concrete Research.” *Cement and Concrete Research*, 1673–83.
- Kang, Munhwa, Min-Chang Kang, Aidarus Yonis, Prabhat Vashistha, and Sukhoon Pyo. (2024). Effect of Steel Slag on the Mechanical Properties and Self-Sensing Capability of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Developments in the Built Environment*, 17:100342.
- Kashyap, Raman. (2010). Fiber Bragg Gratings. *Fiber Bragg Gratings*, 4309–41.
- Keddam, M., H. Takenouti, X. R. Nóvoa, C. Andrade, and C. Alonso (1997). Impedance Measurements on Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 27(8):1191–1201.
- Kersey, Alan D., Michael A. Davis, Heather J. Patrick, Michel LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. Joseph Friebele (1997). Fiber Grating Sensors. *Journal of Lightwave Technology* 15(8):1442–62.
- Klein, Lawrence a, Milton K. Mills, and David R. P. Gibson. (2006). Traffic Detector Handbook. *Operations Research*, I(October):462.
- Ko, J. M. and Y. Q. Ni. (2005). Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-Scale Bridges. *Engineering Structures* 27, (12 SPEC. ISS.):1715–25.
- Koch, Christian and Ioannis Brilakis. (2011). Pothole Detection in Asphalt Pavement Images. *Advanced Engineering Informatics* 25(3):507–15.
- Koh, Hyun Moo, Wonsuk Park, and Jinkyoo F. Choo. (2009). Achievements and Challenges in Bridge Health Monitoring Systems and Intelligent Infrastructures in Korea. *Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure - Proceedings of the 4th International Conference on*
- M. J. Benoit, T. Wood, P. G. Sanders, M. A. Easton, and A. P. Mouritz. (2021). Novel Non-Destructive Technique for Detecting the Weld Fusion Zone Using a Filler Wire of High x-Ray Contrast. *NDT and E International* 124:102537.
- Giurgiutiu, V. (2020). Structural Health Monitoring (SHM) of Aerospace Composites. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, 491-558.
- Górszczyk, Jarosław, Konrad Malicki, and Teresa Zych. (2019). Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials* 12(15):2349.
- Gowshikan, A., K. Kariyawasam, X. Xu, C. Kechavarzi, N. de Battista, N. Ferdinando, S. Acikgoz, N. D. Gunawardana, and M. Ranasinghe. (2023). A Review on the Advances in Distributed Fibre Optic Sensing Technology for Structural Health Monitoring. *Lecture Notes in Civil Engineering* 266:145–59.
- Guo, S., Ding, H., Li, Y., Feng, H., Xiong, X., Su, Z., Feng, and W. (2022). A Hierarchical Deep Convolutional Regression Framework with Sensor Network Fail-Safe Adaptation for Acoustic-Emission-Based Structural Health Monitoring. *Mech. Syst. Signal Process.* 109508.
- Gupta, Sumit, Yun-An Lin, Han-Joo Lee, Jeff Buscheck, Rongzong Wu, Jerome P. Lynch, Navneet Garg, and Kenneth J. Loh. (2021). In Situ Crack Mapping of Large-Scale Self-Sensing Concrete Pavements Using Electrical Resistance Tomography. *Cement and Concrete Composites* 122:104154.
- Gupta, Sumit, Yun An Lin, Han Joo Lee, Jeff Buscheck, Rongzong Wu, Jerome P. Lynch, Navneet Garg, and Kenneth J. Loh. (2021). In Situ Crack Mapping of Large-Scale Self-Sensing Concrete Pavements Using Electrical Resistance Tomography. *Cement and Concrete Composites* 122:104154.
- Han, Baoguo, Siqi Ding, and Xun Yu. (2015). Intrinsic Self-Sensing Concrete and Structures: A Review.” *Measurement* 59:110–28.
- Hansen, H. N. and H. S. Hansen. (2004). Electromechanical Properties of Doped Silicon under Large Deformation. *J. Mater. Sci.* 5051-5055.
- Hassani, Sahar and Ulrike Dackermann. (2023). Systematic Review of Advanced Sensor Technologies for Non-Destructive Testing and Structural Health Monitoring. *Sensors* 23(4).
- Hearn, Nataliya. (1999). Effect of Shrinkage and Load-Induced Cracking on Water Permeability of Concrete. *ACI Materials Journal* 96(2):234–41.
- Hillemeier, B. and H. Scheel. (1977). Crack Formation and Fracture Energy for Matrix Cracking and Delamination in Concrete. *Materials and Structures* 23–29.
- Honarvar, F. and A. Varvani-Farahani. (2020). A Review of Ultrasonic Testing Applications in

- Vibration Digest* 38(2):91–128.
- Lynch, J. P. (2012). An Overview of Wireless Structural Health Monitoring for Civil Structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 345–72.
- Lynch, Jerome P., Aaron Partridge, Kincho H. Law, Thomas W. Kenny, Anne S. Kiremidjian, and Ed Carryer. (2003). Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring. *Journal of Aerospace Engineering* 16(3):108–14.
- Masri, Y. El and T. Rakha. (2020). A Scoping Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques in Building Performance Diagnostic Inspections. *Constr. Build. Mater.* 120542.
- McCann, D. M. and M. C. Forde. (2001). Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures. *NDT & E International* 71–84.
- Mehta, P. K. and P. J. M. Monteiro. (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (3rd Edition). *McGraw-Hill*.
- Mehta, P., V. Shisode, P. Bhor, and K. Sujeet. (2020). Microwave NDT Methods for Health Monitoring: A Review. *AIP Conference Proceedings* 20027.
- Meserkhani, A., S. M. Jafari, and A. Rahi. (2021). Experimental Comparison of Acoustic Emission Sensors in the Detection of Outer Race Defect of Angular Contact Ball Bearings by Artificial Neural Network. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 168.
- Mohammadmahdi Abedi, Mohammad Jawed Roshan, Mostafa Adresi, Mohammed Seddik Meddah, Baoguo Han, Raul Fanguero, António Gomes Correia. (2024). Influence of Cement and Water Content on the Multifaceted Capabilities of a Self-Sensing Cement-Based Geocomposite: A Comprehensive Analysis. *Measurement Science and Technology* 35(8).
- Moskovchenko, Alexey, Vladimir Vavilov, Michal Švantner, Lukáš Muzika, and Šárka Houdková. (2020). Active IR Thermography Evaluation of Coating Thickness by Determining Apparent Thermal Effusivity. *Materials* 13(18):4057.
- Mustapha, Samir, Ye Lu, Ching Tai Ng, and Pawel Malinowski. (2021). Sensor Networks for Structures Health Monitoring: Placement, Implementations, and Challenges—A Review. *Vibration* 4(3):551–85.
- Nadzri, Muhammad Muzakkir Mohd and Afandi Ahmad. (2022). Design Issues and Challenges of Long-Range Ultrasonic Testing (LRUT) for Pipeline Inspection. *Lecture Notes in Electrical Engineering* 770:115–26.
- Nalon, Gustavo Henrique, Rodrigo Felipe Santos, Gustavo Emilio Soares de Lima, Igor Klaus Rocha Andrade, Leonardo Gonçalves Pedroti, José Carlos Lopes Ribeiro, and José Maria Franco de Carvalho. (2022). Recycling Waste Materials to Produce Self-Sensing Concretes for Smart and Sustainable *Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 2009*.
- Kriesz, H. (1979). Radiographic NDT-A Review. *NDT Int.* 270–73.
- Kumar, N. Pavan and V. H. Patankar. (2022). Design and Development of Water-Immersible Two-Channel High-Voltage Spike Pulser for under-Water Inspection and Gauging of Pipes. *Review of Scientific Instruments* 93(1):14703.
- Laefer, Debra F., Linh Truong-Hong, Hamish Carr, and Manmeet Singh. (2014). Crack Detection Limits in Unit Based Masonry with Terrestrial Laser Scanning. *NDT and E International* 62:66–76.
- Laflamme, Simon, Filippo Ubertini, Alberto Di Matteo, Antonina Pirrotta, Marcus Perry, Yuguang Fu, Jian Li, Hao Wang, Tu Hoang, Branko Glisic, Leonard J. Bond, Mauricio Pereira, Yening Shu, Kenneth J. Loh, Yang Wang, Siqi Ding, Xinyue Wang, Xun Yu, Baoguo Han, Yiska Goldfeld, Donghyeon Ryu, Rebecca Napolitano, Fernando Moreu, Giorgia Giardina, and Pietro Milillo. (2023). Roadmap on Measurement Technologies for next Generation Structural Health Monitoring Systems. *Measurement Science and Technology* 34(9).
- Leite, J. P. B., V. Slowik, and H. Mihashi. (2004). Computer Simulation of Fracture Processes of Concrete Using Mesolevel Models of Lattice Structures. *Cement and Concrete Research* 34(6):1025–33.
- Leite, M., V. Slowik, and H. Mihashi. (2004). Cement and Concrete Research. *Cement and Concrete Research* 1881–90.
- Li, Chunyu and Tsu-Wei Chou. (2008). Modeling of Damage Sensing in Fiber Composites Using Carbon Nanotube Networks. *Composites Science and Technology* 68(15–16):3373–79.
- Li, Lin, Huan Wei, Yazhen Hao, Yizheng Li, Wei Cheng, Yusuf Abshir Ismail, and Zhuangzhuang Liu. (2023). Carbon Nanotube (CNT) Reinforced Cementitious Composites for Structural Self-Sensing Purpose: A Review. *Construction and Building Materials* 392:131384.
- Li, W., C. B. Li, G. B. Song, Z. J. Yan, Z. L. Wang, and Y. G. She. (2016). Self-Compensated Temperature Sensor Based on Fiber Bragg Grating and Fiber Resonator. *IEEE Photonics Technology Letters* 711–14.
- Li, Xu Feng, Jie Sun, Shengzi Lu, and Lei Wang. (2022). Application of On-Line Digital Radiographic Inspection for Pipeline with Insulation. *Journal of Physics: Conference Series* 2366(1):12006.
- Loh, Kenneth J. and et al. (2006). Carbon Nanotube-Based Structural Health Monitoring Composites. *Nanotechnology and Nanomaterials: Nanoengineering of Structural, Functional and Smart Materials* 371–88.
- Lynch, J. P. (2006). A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and*

- Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 3(1):3–18.
- Pujadas, P., S. Blanco, Á., Cavalaro, A. de la Fuente, and A. Aguado. (2014). Cement and Concrete Research.” *Cement and Concrete Research*, 27–38.
- Pujadas, P., Á. Blanco, S. Cavalaro, A. de la Fuente, and A. Aguado. (2014). Fibre-Reinforced Concrete under Compression: A 3D Damage Model. *Cement and Concrete Research*, 27–38.
- Rajibul Islam, Md, Muhammad Mahmood Ali, Man Hong Lai, Kok Sing Lim, and Harith Ahmad. (2014). Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review. *Sensors (Switzerland)* 14(4):7451–88.
- Rauscher, F., S. Sugimoto, and W. Liao. (2021). Combination of Guided Waves and Ultrasonic Testing for Advanced Composite Damage Characterization. *J. Acoust. Soc. Am.* A11.
- Reagan, Daniel, Alessandro Sabato, and Christopher Niezrecki. (2017). Unmanned Aerial Vehicle Acquisition of Three-Dimensional Digital Image Correlation Measurements for Structural Health Monitoring of Bridges. *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2017* 10169:1016909.
- Rezazadeh, Nima, Alessandro De Luca, and Donato Peretto. (2022). Unbalanced, Cracked, and Misaligned Rotating Machines: A Comparison between Classification Procedures throughout the Steady-State Operation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(10):450.
- Rivard, C. and G. Ballivy. (2000). Corrosion Monitoring in Concrete Structures by Electrochemical Sensors and Probes.” *Construction and Building Materials*, 419–25.
- Rodríguez, Jaime, María T. Martín, Pedro Arias, Celestino Ordóñez, and José Herráez. (2008). Flat Elements on Buildings Using Close-Range Photogrammetry and Laser Distance Measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(7):541–45.
- Rooholamini, H., R. Sedghi, B. Ghobadipour, and M. Adresi. (2019). Effect of Electric Arc Furnace Steel Slag on the Mechanical and Fracture Properties of Roller-Compacted Concrete. *Construction and Building Materials* 211:88–98.
- Roopa, A. K., A. M. Hunashyal, and R. R. M. Mysore. (2022). Development and Implementation of Cement-Based Nanocomposite Sensors for Structural Health Monitoring Applications: Laboratory Investigations and Way Forward. *Sustainability (Switzerland)* 14(19).
- Roy, S., K. Lonkar, V. Janapati, and F. K. Chang (2015). A Novel Physics-Based Temperature Compensation Model for Resonant Frequency Shift-Based Damage Detection in Composite Plates. *Struct. Health Monit.* 426–38.
- Structures: A Review. *Construction and Building Materials* 325:126658.
- Nalon, Gustavo, José L. Ribeiro, Leonardo Pedroti, Eduardo Araujo, José Maria de Carvalho, G. Lima, and Diogo de Oliveira. (2021). Self-Sensing Mortars: Effect of Moisture and Nanocarbon Black Content. *Aci Materials Journal* 118:131–41.
- Nijssen, R. and D. Lekou. (2016). Materials and Structures. *Research Topics in Wind Energy* 6:1–7.
- Opoku, O. S., A. D. Russell, M. C. Breen, J. R. Morante, A. Dutta, K. E. Kaspar, C. G. Malito, Y. Wang, and B. Ross. (2019). Innovative Chloride Sensors for Long Term Monitoring of Reinforced Concrete Structures. *Materials* 17.
- Othonos, Andreas, Kyriacos Kalli, and Glenn E. Kohnke. (2000). Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. *Physics Today* 53(5):61–62.
- Ožbolt, Joško, Yijun Li, and Ivica Kožar. (2001). Microplane Model for Concrete with Relaxed Kinematic Constraint. *International Journal of Solids and Structures* 38(16):2683–2711.
- Pan, Yong, Qin Molin, Tengxiao Guo, Lin Zhang, Bingqing Cao, Junchao Yang, Wen Wang, and Xufeng Xue. (2020). Wireless Passive Surface Acoustic Wave (SAW) Technology in Gas Sensing. *Sensor Review* 41(2):135–43.
- Papatsimpa, C. and J. P. M. G. Linnartz. (2018). Propagating Sensor Uncertainty to Better Infer Office Occupancy in Smart Building Control. *Energy and Buildings* 179:73–82.
- Park, Seunghee, Sohaib Ahmad, Chung-Bang Yun, and Yongrae Roh. (2006). Multiple Crack Detection of Concrete Structures Using Impedance-Based Structural Health Monitoring Techniques. *Experimental Mechanics* 46:609–18.
- Part, J. and F. Lars. (2002). GPR Inspection of Structures. *Interface-Road Surface-Subsurface*, 9–16.
- Parveen, Shama, Sohel Rana, and Raul Fanguero. (2013). A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Nanomaterials*, 1–19.
- Perry, Charles C. and Herbert R. Lissner. (1962). The Strain Gage Primer. *McGraw-Hill* 332.
- Peters, K. J. and D. Inaudi. (2014). Fiber Optic Sensors for Assessing and Monitoring Civil Infrastructures. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* 1:121–58.
- Pham, Dao Quang, Tuan Ngoc Nguyen, Son Tay Le, Tung Thanh Pham, and Tuan Duc Ngo. (2021). The Structural Behaviours of Steel Reinforced Geopolymer Concrete Beams: An Experimental and Numerical Investigation. *Structures* 33:567–80.
- Porco, Francesco, Andrea Fiore, Giacinto Porco, and Giuseppina Uva. (2013). Monitoring and Safety for Prestressed Bridge Girders by SOFO Sensors.

- Tian, Z., L. Yu, and C. A. C. Leckey. (2022). A Review of Hybrid SHM Techniques with Combined NDE Methods for Enhanced Damage Characterization. *Appl. Sci.* 2477.
- Tian, Zhuang, Yancheng Li, Jiajia Zheng, and Shuguang Wang. (2019). A State-of-the-Art on Self-Sensing Concrete: Materials, Fabrication and Properties Zhuang. *Composites Part B: Engineering* 177:107437.
- Torres-Acosta, Andrés A. and Miguel Martínez-Madrid. (2003). Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment. *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(4):344–53.
- Tosti, Fabio and Chiara Ferrante. (2020). Using Ground Penetrating Radar Methods to Investigate Reinforced Concrete Structures. *Surveys in Geophysics* 41(3):485–530.
- Tziviloglou, E., Z. S. Metaxa, G. Maistros, S. K. Kourkoulis, and N. D. Alexopoulos. (2022). Evaluation of Fracture Toughness in Graphene-Based Cementitious Nanocomposites via Electrical Impedance. *Procedia Structural Integrity* 42:1700–1707.
- Usamentiaga, Rubén, Pablo Venegas, Jon Guerediaga, Laura Vega, Julio Molleda, and Francisco G. Bulnes. (2014). Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors (Switzerland)* 14(7):12305–48.
- Vavasis, A., D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, and T. E. Matikas. (2013). Examining Crack Propagation in Reinforced Concrete Using Digital Image Correlation. *Engineering Fracture Mechanics*, 153–69.
- Vélez, W., F. Matta, and P. H. Ziehl. (2015). Electrical Resistance Change Monitoring for Assessment of Steel Corrosion in Cracked Concrete. *ACI Materials Journal*.
- Villatoro, Joel, Oskar Arrizabalaga, Enrique Antonio-Lopez, Joseba Zubia, and Idurre Saez De Ocáriz. (2017). Multicore Fiber Sensors. *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, OFC 2017 - Proceedings*.
- Vlachakis, Christos, Xueying Wang, and Abir Al-Tabbaa. (2023). Investigation of the Compressive Self-Sensing Response of Filler-Free Metakaolin Geopolymer Binders and Coatings. *Construction and Building Materials* 392:131682.
- Wai-Lok Lai, Wallace, Xavier Dérobert, and Peter Annan. (2018). A Review of Ground Penetrating Radar Application in Civil Engineering: A 30-Year Journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT and E International* 96:58–78.
- Wang, Lining and Farhad Aslani. (2019). A Review on Material Design, Performance, and Practical Application of Electrically Conductive Cementitious Composites. *Construction and Building Materials* 229:116892.
- Saafi, Mohammed (2009). Wireless and Embedded Carbon Nanotube Networks for Damage Detection in Concrete Structures. *Nanotechnology* 20(39):395502.
- Saeedifar, Milad and Dimitrios Zarouchas (2020). Damage Characterization of Laminated Composites Using Acoustic Emission: A Review. *Composites Part B: Engineering* 195.
- Safizadeh, M. S. and S. K. Latifi. (2014). Using Multi-Sensor Data Fusion for Vibration Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings by Accelerometer and Load Cell. *Information Fusion* 18(1):1–8.
- Santos-Assuncao, Sonia, Vega Perez-Gracia, Oriol Caselles, Jaume Clapes, and Victor Salinas. (2014). Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies. *Remote Sensing* 6(9):8220–37.
- Shahidan, Shahiron and et al. (2017). Damage Classification in Reinforced Concrete Beam by Acoustic Emission Signal Analysis. *Construction and Building Materials*, 1026–33.
- Shang, F., M. Sonebi, and C. Lim. (2022). Hybrid Electrical and Self-Sensing Methods for Steel Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete Structures. *Smart Materials and Structures* 75014.
- She, Saibo, Yifang Chen, Yunze He, Zhongji Zhou, and Xiang Zou. (2021). Optimal Design of Remote Field Eddy Current Testing Probe for Ferromagnetic Pipeline Inspection. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 168:108306.
- Shi, Zeng Qiang and D. D. L. Chung. (1999). Carbon Fiber-Reinforced Concrete for Traffic Monitoring and Weighing in Motion. *Cement and Concrete Research* 29(3):435–39.
- Siringoringo, D. M. and Y. Fujino. (2008). System Identification of Suspension Bridge from Ambient Vibration Response. *Engineering Structures*, 462–77.
- Song, H. W. and V. Saraswathy. (2007). Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures-A. *International Journal of Electrochemical Science*, 1–28.
- Soto, Marcelo A., Gabriele Bolognini, Fabrizio Di Pasquale, and Luc Thévenaz. (2010). Simplex-Coded BOTDA Fiber Sensor with 1 m Spatial Resolution over a 50 Km Range. *Optics Letters* 35(2):259.
- Swiderski, Waldemar. (2019). Non-Destructive Testing of Light Armours of CFRP after Ballistic Impacts by IR Thermography Methods. *Composite Structures* 224:111086.
- Teng, Shuai, Gongfa Chen, Zhaocheng Yan, Li Cheng, and David Bassir. (2023). Vibration-Based Structural Damage Detection Using 1-D Convolutional Neural Network and Transfer Learning. *Structural Health Monitoring* 22(4):2888–2909.

- Yu, X. and E. Kwon. (2012). *Carbon Nanotube Based Self-Sensing Concrete for Pavement Structural Health Monitoring*. Vol. 7.
- Yuan, Fuh-Gwo, Sakib Ashraf Zargar, Qiuyi Chen, and Shaohan Wang. (2020). Machine Learning for Structural Health Monitoring: Challenges and Opportunities. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2020* 11379:1137903.
- Zhang, Hong, Ruizhen Yang, Yunze He, Ali Foudazi, Liang Cheng, and Guiyun Tian. (2017). A Review of Microwave Thermography Nondestructive Testing and Evaluation. *Sensors (Switzerland)* 17(5):309–27.
- Zhang, Jinrui, Youyuan Lu, Zeyu Lu, Chao Liu, Guoxing Sun, and Zongjin Li. (2015). A New Smart Traffic Monitoring Method Using Embedded Cement-Based Piezoelectric Sensors. *Smart Materials and Structures* 24(2):025023.
- Zhang, Jun, Zebin Chen, Jie Cao, Chutian Huang, and Guiyun Tian. (2020). A Cylindrical Ring Dielectric Resonator Based Passive Wireless Sensor for Position Insensitive Crack Monitoring. *Sensors and Actuators, A: Physical* 316:112420.
- Zhang, Jun, Gui Yun Tian, Adi M. J. Marindra, Ali Imam Sunny, and Ao Bo Zhao. (2017). A Review of Passive RFID Tag Antenna-Based Sensors and Systems for Structural Health Monitoring Applications. *Sensors (Switzerland)* 17(2).
- Zhang, Ziyi and Xiaoyi Bao. (2008). Distributed Optical Fiber Vibration Sensor Based on Spectrum Analysis of Polarization-OTDR System. *Optics Express* 16(14):10240.
- Zhao, Xuefeng, Ruicong Han, Yanbing Ding, Yan Yu, Quanhua Guan, Weitong Hu, Mingchu Li, and Jinping Ou. (2015). Portable and Convenient Cable Force Measurement Using Smartphone.” *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 5(4):481–91.
- Zhou, H., H. Ji, W. Chen, Z. Ouyang, Y. Wang, and R. E. Jones. (2020). Piezoresistive Effect in Silicon-Based Sensors. *Journal of Semiconductors* 11301.
- Zhou, Jun. (2011). A Study of Acoustic Emission Technique for Concrete Damage Detection. 1–47.
- Zhu, Hong Ping, Bo He, and Xiao Qiang Chen. (2005). Detection of Structural Damage through Changes in Frequency. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. 10(6):1069–73.
- Wang, Ming L., Jerome P. Lynch, and Hoon Sohn. (2014). Sensor Technologies for Civil Infrastructures. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* 1:1–699.
- Wang, Ping, Yan Yan, Gui Yun Tian, Omar Bouzid, and Zhiguo Ding. (2012). Investigation of Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *Journal of Sensors* 2012.
- Wang, Shoukai and D. D. L. Chung. (2006). Self-Sensing of Flexural Strain and Damage in Carbon Fiber Polymer-Matrix Composite by Electrical Resistance Measurement. *Carbon* 44(13):2739–51.
- Wang, Y. and R. X. Gao. (2006). Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing. *Springer Science & Business Media*.
- Wen, Sihai and D. D. L. Chung. (2000). Damage Monitoring of Cement Paste by Electrical Resistance Measurement. *Cement and Concrete Research* 30(12):1979–82.
- Wen, Sihai and D. D. L. Chung. (2006). Self-Sensing of Flexural Damage and Strain in Carbon Fiber Reinforced Cement and Effect of Embedded Steel Reinforcing Bars. *Carbon* 44(8):1496–1502.
- Wevers, M., Rippert, L., Van Huffel, and S. (2000). Optical Fibres for in Situ Monitoring the Damage Development in Composites and the Relation with Acoustic Emission Measurements. *J. Acoust. Emiss.* 41.
- Yang, Li, Amin Rida, Rushi Vyas, and Manos M. Tentzeris. (2007). RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate Using Inkjet-Printing Technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 55(12):2894–2901.
- Yang, Yi, Haiyan Tan, Bei Cheng, Jiajie Fan, Jianguo Yu, and Wingkei Ho. (2021). Near-Infrared-Responsive Photocatalysts. *Small Methods* 5(4):2001042.
- Ye, X. W., T. Jin, and C. B. Yun. (2019). A Review on Deep Learning-Based Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures. *Smart Structures and Systems* 24(5):567–85.
- Yoon, D. J., D. Heider, J. W. Gillespie Jr, C. P. Ratcliffe, R. M. Crane, and J. S. Popovics. (2005). Local Damage Detection Using the Two-Dimensional Gapped Smoothing Method. *Journal of Sound and Vibration*, 119–39.

# Health Monitoring of Infrastructure Equipped with Self-Sensing Concrete Sensors-a Review

*Behrad Sabagh, M.Sc., Student, Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Tarbiat Deir Shahid Rajaee University, Tehran, Iran.*

*Mostafa Adresi, Associate Professor, Road and Transportation Eng. Civil Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.*

*E-mail: adresi@sru.ac.ir*

Received: January 2025- Accepted: April 2025

## **ABSTRACT**

Recent advancements in self-sensing technologies have revolutionized pavement health monitoring. Innovative materials, such as carbon nanotube-modified asphalt and conductive composites, possess inherent capabilities to detect stress, micro-cracks, and moisture ingress by measuring variations in electrical resistance. These materials provide real-time data on pavement conditions. Smart systems equipped with optical fiber sensors or Internet of Things (IoT) networks can identify microscopic changes in underlying road layers. By transferring data to cloud platforms, these systems enable automated analysis and early detection of failures before damage propagates. This approach reduces operational costs and the need for physical inspections and significantly enhances monitoring accuracy. Integrating sensor data (e.g., stress, temperature, and vibrations) with artificial intelligence (AI) and deep learning algorithms has improved the precision of predicting pavement weaknesses. For instance, continuous monitoring of stress distribution and vibrational frequency in high-traffic roads allows timely warnings about reduced load-bearing capacity or cumulative damage in base layers. Implementing these technologies enhances pavement safety and durability while enabling data-driven optimization. By integrating pavement health data into smart traffic management systems and autonomous vehicles, optimal routes can be selected based on real-time road conditions. On a macro level, combining monitoring data with international road construction standards supports the development of novel protocols for designing more resilient and cost-effective pavements. These advancements represent a critical step toward sustainable infrastructure development and improved efficiency in transportation networks. By merging cutting-edge technologies with strategic data utilization, the future of pavement engineering promises smarter, safer, and more durable road systems aligned with global sustainability goals.

**Keywords:** Self-Sensing, Cementitious Materials, Structural Health Monitoring, Non-Destructive Testing