

مطالعه مروری بر انواع روش‌های نوین تشخیص خرابی در روسازی بر اساس قابلیت پیرو-مقاومتی در بتن خودحسگر

مقاله علمی - پژوهشی

مصطفی آدرسی*، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر رجایی، تهران، ایران
بهراد صباغ، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر رجایی، تهران، ایران
سمیه شریفی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر رجایی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.adresi@sru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

صفحه ۱۲۸-۱۱۵

چکیده

نظارت و رصد سلامت سازه قبل و حین مرحله‌ی بهره‌برداری به ناظران این امکان را می‌دهد که نسبت به خسارات مالی و جانی احتمالی رویارویی بهتری داشته باشند برای تشخیص خرابی در سازه‌های بتنی از جمله روسازی‌ها نیاز به بررسی سطحی و زیر سطحی است. در این مقاله سعی شده مرور خلاصه‌ای از چند روش توسعه یافته شده بر مبنای خاصیت پیرو مقاومتی در بتن‌ها به منظور ارزیابی سطح خسارت در بتن از دیدگاه مقاومت شکست، روش الکترودهای متوالی، روش مش مقاومتی و روش توموگرافی مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور عملکرد بتن‌های خود حسگر با روش‌های تشخیص خرابی متفاوت، برای شرایط بارگذاری مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در نهایت به موضوع استفاده از این بتن‌های خودحسگر در نظارت بر وضعیت خرابی در روسازی‌ها پرداخته شده است که طبق ارزیابی‌های صورت گرفته این روش‌ها برای نظارت بر وضعیت خرابی روسازی‌ها مناسب هستند. همچنین در انتها به بررسی روش توموگرافی امیدانسن الکترونیکی و استفاده از آن در تشخیص خرابی در یک دال بتنی تحت بارگذاری تسریع شونده پرداخته شد. نتایج نشان داد این روش نظارت تصویری توانایی دقیقی در تشخیص خرابی حتی از زیر سطح رویه بتنی و قبل از اینکه خرابی به روی سطح بیاید و دیده شود، ارائه می‌دهد. از این رو دقت و پیشبینی اینگونه روش‌ها قطعاً کلید توسعه زیرساخت‌های هوشمند و راه‌های آینده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بتن خودحسگر، مش مقاومتی، پایش سلامت سازه، تشخیص خرابی

۱- مقدمه

مدل‌های پیش بینی می‌شود که خسارات جبران ناپذیری را به وجود خواهند آورد. به همین دلایل خلا وجود یک ابزار ناظر که بتواند بطور پیوسته با صرف انرژی ناچیز فرایند پایش را انجام دهد حس می‌شود. به عنوان مثال، اطمینان حاصل کردن از روسازی‌های سالم فرودگاه‌ها بسیار پر اهمیت است و در چند دهه‌ی اخیر به دلیل افزایش وزن و اندازه‌ی هواپیماها و همچنین افزایش تقاضاهای حمل و نقل هوایی اهمیت بازرسی و نگهداری روسازی‌ها بیشتر

روشی که معمولاً در بحث پایش سلامت سازه مورد استفاده در سازه‌های بتنی از جمله روسازی‌ها قرار می‌گیرد استفاده از روش‌های ارزیابی غیرمخرب است که اکثراً به دلیل هزینه زیاد، گسسته بودن فرایند برداشت در طول زمان، تفاوت در کیفیت ابزار برداشت اطلاعات در بازه‌های زمانی مختلف و حتی تفاوت در اپراتورهای برداشت کننده داده‌ها موجب دقت‌های ناکافی در اندازه‌گیری‌ها و افزایش ریسک پیشبینی صحیح شرایط سازه و

که به مواد پرکننده معروف هستند ساخته می‌شوند باعث ایجاد خاصیت پیرو - مقاومتی (متناسب بودن تغییرات مقاومت اندازه گیری شده از دو سمت حسگر به تغییرات تنش اعمال شده به حسگر) امکان نظارت بر سازه‌های بتنی از جمله روسازی‌ها را فراهم می‌کند. در این مقاله سعی به بررسی انواع حسگرهای موجود، مکانیزم‌های عملکرد این حسگرهای بتنی خودحسگر و در نهایت مروری بر روش‌های مختلف ارزیابی خرابی بر اساس خاصیت پیرو- مقاومتی در بتن‌های خودحسگر مورد توجه است.

۲- انواع حسگرهای تشخیص آسیب

در این بخش ابتدا به معرفی انواع حسگرهای مورد استفاده در سازه‌های بتنی (از جمله روسازی‌ها) پرداخته شده است و بطور خلاصه نحوه عملکرد آن‌ها در جدول ۱ ارایه شده است.

شده است. به این علت که وجود نقص و خرابی در روسازی‌ها منجر به وارد شدن خسارات به بدنه‌ی تجهیزات گران قیمت مانند تجهیزات هواپیماها می‌شود. به عنوان نمونه در فرودگاه آنکنی در آیوا وجود خرابی و برآمدگی در روسازی باند فرودگاه منجر به وارد شدن خسارت به تجهیزات فرود جت پیشرفته‌ی شرکت رایتون شد (Mullen, 2001). همچنین عدم حضور تجهیزات نظارتی می‌تواند باعث وقوع حوادثی شود که منجر به از دست رفتن یا آسیب بر جان بهره‌برداران گردد. از این رو اخیراً روش‌های مبتنی بر خاصیت پیرومقاومتی در حوزه نظارت بر بتن توسعه پیدا کرده است به عنوان مثال استفاده کردن از کامپوزیت‌های سیمانی یا بتنی در بتن اخیراً منجر به ورود تست‌های مقاومت الکتریکی با استفاده از بتن‌های خود حسگر (self-sensing concrete) به این زمینه یعنی پایش سلامت سازه شد (Shah, Swartz and Ouyang, 1995; Shi and Chung, 1999; Peled et al., 2001; Reza et al., 2001, 2003) و این حسگرهای بتنی یا بتن‌های خودحسگر که در اثر افزودن برخی از مواد رسانا کننده به خمیر بتن

جدول ۱. انواع حسگرهای تشخیص آسیب در نمونه‌های بتنی

نام روش	توضیحات
۱. استفاده از گیج‌های کرنشی	در لایه‌های روسازی با استفاده از تعبیه کردن یک مکانیزم حسگر مدفون (به صورت گیج مکانیکی یا الکتریکی) در بتن می‌تواند از وضعیت سلامت سازه‌های نمونه با خبر بشود (Zhao et al., 2014).
۲. رادارهای نفوذکننده به سطح زمین و تحلیل طیفی امواج سطح	با فرستادن امواج و دریافت بازتاب امواج از وضعیت زیر روسازی اطلاعات از سلامت سازه را کسب می‌کنند. (Hugenschmidt, Partl and de Witte, 1998).
۳. حرارت سنجی مادون قرمز	برای ارزیابی سطحی و زیر سطحی روسازی‌ها استفاده می‌شود و با استفاده از تصویر برداری حرارتی مادون قرمز و تحلیل تصویر برداری‌ها از وضعیت روسازی با خبر خواهند شد (Tomblor et al., 2000).
۴. لیزر تداخل سنج هولوگرافیک	برای نظارت بر انتشار وجه ترک خوردگی کاربردی هستند (Shah, Swartz and Ouyang, 1995).
۵. انتشار آکوستیک	کارآمد برای ارزیابی ایجاد میکروتُرک‌ها و رشد آن‌ها در محیط بتن (Shah, Swartz and Ouyang, 1995).
۶. تزریق رنگ	کارآمد برای ارزیابی شکل ترک (Shah, Swartz and Ouyang, 1995).
۷. حسگرهای پیرومقاومتی	با استفاده از به کارگرفتن مواد رسانا توانایی برقراری جریان الکتریکی در نمونه‌های بتنی ایجاد می‌شود. و این امکان وجود دارد که با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه، مقدار تنش وارده در لحظات مختلف بارگذاری، را تخمین زد و سپس اطلاعات مقاومت الکتریکی را به پارامترهای مختلف سازه‌ای چون جابه‌جایی، تنش، کرنش، نحوه‌ی رشد ترک و پارامترهایی از این قبیل تبدیل می‌کنند.

۳- حسگرهای پیرومقاومتی

مدفون و در تماس با دو لایه بتن اطرافشان هستند در تمام جهات یا برخی از جهات در نمونه‌های بتنی بکار می‌روند) باعث برقراری رسانایی در بتن می‌شوند، ایجاد رسانایی بطوری است که بتوان تغییرات مقاومت را به صورت قابل قبولی مشاهده کرد تا بتوان پارامترهای مهم از قبیل جابه‌جایی، کرنش، وضعیت و نحوه‌ی رشد

با افزودن فیلرهای هادی به بتن، بتن از حالت نارسا به نیمه رسانا تبدیل شده و با قرار دادن الکتروود که به صورت تماسی صورت می‌گیرد (توری‌های فیبری براگ که این توری‌ها بصورت

هادی، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. برقراری ارتباط بین رشد خسارت و تغییرات مقاومت الکتریکی یا ولتاژ خروجی از دو سر حسگر در صورتی که دارای تکرارپذیری، حساسیت مناسب و هیستریزس ناچیز باشد نشان دهنده عملکرد مناسب بتن هادی به عنوان یک حسگر خرابی خواهد بود. از آنجایی که خود بتن تبدیل به حسگر شده است عنوان خود-حسگر برای این دسته از حسگرها اطلاق می‌شود (Mostafa Adresi, Ahmadi, Ahamadi, et al., 2017; Mostafa Adresi, Ahmadi, et al., 2021). تغییرات مقاومت الکتریکی در اینگونه حسگرها نشان دهنده پارامترهایی نظیر کرنش، تغییر شکل، دما، رطوبت، دوام، وضعیت ترک و توسعه ترک است. در این راستا در ادامه مثال‌هایی از چگونگی استفاده از این حسگرها و قابلیت پیرو-مقاومتی در پایش زیرساخت‌های بتنی ارائه خواهد شد.

۴-۱- مکانیزم نظارت بر توسعه ترک کششی (مکانیک شکست

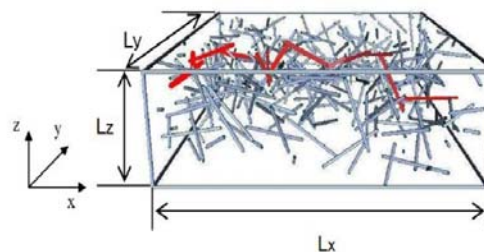
بتن) با استفاده از بتن‌های خود حسگر

در مکانیک شکست فولاد در لحظه گسترش ترک در نوک ترک رفتار الاستیک غیر خطی منجر به نوعی میراگری می‌شود. اما، در بتن مکانیزم‌های سخت‌شدگی اتفاق می‌افتد که مکانیزم‌های پیچیده‌تری است که به دلیل وجود میکرو ترک‌هایی در مدیای بتن نسبت به محیط فولاد وجود دارند که خود عموماً به دلیل وجود نقص‌های اولیه مثل منافذ پر شده با آب یا حفره‌های هوا و یا شکاف‌های انقباضی بوجود آمده اند، و می‌توانند در اطراف ترک اصلی ایجاد شوند و آنها به توسعه ترک مقاومت نشان دهند، در صورت مسلح شدن بتن با فیبر کربن، فیبرکربن می‌تواند یک نوع مکانیزم سخت‌شدگی ایجاد کند. زیرا مواد فیبری با ایجاد پل‌های فیبری در بتن در لحظه ترک خوردگی می‌توانند تنش کششی را در دو طرف ترک انتقال دهند یا از بین برونند، به عنوان مکانیزم دیگر می‌توان به اصطکاک بین دو صفحه ترک و همچنین مکانیزم ترک شاخه‌ای که از گسترش میکروترک‌ها ایجاد شده‌اند که به ترک اصلی پیوسته‌اند منجر به این شده است که افزایش سختی اتفاق بیافتد. در مطالعاتی که در بتن‌های خودحسگر به منظور تشخیص نحوه توسعه ترک در آزمایش نمونه‌ی دارای شیار و آماده‌ی ترک خوردن که تحت کشش قرار گرفته انجام شد نوع پرکننده‌ی مورد استفاده در بتن خودحسگر از نوع فیبر کربن بود و با استفاده از

ترک و ... را با استفاده از این داده‌های مقاومت الکتریکی با تقریب مناسبی تخمین زد. به عنوان نمونه انواع افزودنی‌های رایج به منظور هادی سازی محیط بتن می‌توان به نانو لوله‌های کربنی تک دیواره (Gupta et al., 2021)(Ferrara and Meda, 2006)، نانو لوله‌های چند دیواره کربنی (Adresi, Hassani, Javadian, et al., 2016; Adresi, Hassani, Mohammad reza Soleimani, et al., 2016; Adresi, 2017; Adresi, Hassani and Yazdian, 2017; M. Adresi et al., 2017; Adresi et al., 2019; Hosseini Lavassani, Mardani and Adresi, 2022)، پودر نیکل (Chung, 2005)، پودر مس (Hallaji, Seppänen and Pour-Ghaz, 2014; Seppänen, Hallaji and Pour-Ghaz, 2017)، پودر نقره و نانو فیبر کربن‌ها (Reza, Yamamuro and Batson, 2004; Chung, 2007; Tallman et al., 2014) اشاره کرد.

۴-۲- مکانیزم‌های تشخیص انواع آسیب‌های وارد بر سازه با استفاده از روش بتن خود حسگر

استفاده از بتن خود حسگر یک روش پیرو مقاومتی است. با استفاده از مواد پرکننده هادی یک شبکه هادی در بتن ایجاد می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است (Adresi and Yekrangnia, 2021).



شکل ۱. مکانیزم کارکرد حسگر بتنی با پخش مناسب الیاف هادی

با قراردادن الکترودهای هادی در اطراف بتن، می‌توان جریان الکتریکی را از داخل بتن عبور داد. در این حالت بتن هادی می‌تواند مانند یک حسگر عمل کند. اگر میزان الیاف به اندازه‌ای باشد که افزایش بیشتر میزان الیاف تاثیری بر مقاومت الکتریکی بتن نداشته باشد آستانه تراوایی حاصل شده است. در این حالت همانند شکل ۱ اتصال الیاف به هم مسیرهای هادی تصادفی را داخل محیط بتن ایجاد نموده است. رشد نقص یا ترک در داخل بتن باعث قطع ارتباط این مسیرهای هادی می‌شود. با قطع تعداد بیشتر مسیرهای

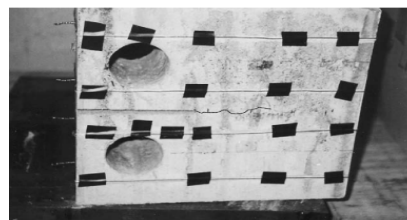
۴-۲- تعیین آسیب با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

در کامپوزیت پلیمری فیبر کربن از آنجایی که الیاف کربن از نظر الکتریکی رسانایی بسیار بیشتری نسبت به پلیمر دارد، هدایت الکتریکی یک کامپوزیت تحت تأثیر آسیب قرار می‌گیرد (Schulte and Baron, 1989; Kemp, 1994; DiFonzo and Chung, 1987; Bordia, 1998; Chung, 2007) Prabhakaran, 1990; Kaddour et al., 1994; Sugita, Yanagida and Muto, 1995; Ceysson, Salvia and Vincent, 1997; Wang and Chung, 1999; Abry et al., 2001; Kupke, Schulte and Schüler, 2001; Mei et al., 2002; Chung and Wang, 2003).
شکستن، باعث کاهش هدایت الکتریکی در جهت فیبر کامپوزیت می‌شود؛ از طرف دیگر، آسیب به شکل لایه لایه شدن (در ورق‌های کامپوزیتی چند لایه)، باعث می‌شود که هدایت الکتریکی (نقطه متقابل مقاومت الکتریکی) در جهت ضخامت کامپوزیت کاهش یابد. در نتیجه تغییرات در رسانایی الکتریکی نشانگر آسیب است. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نیاز به الکترودهای الکتریکی دارد. با قراردادن این اتصال‌ها در مناطق منتخب می‌توان مقاومت الکتریکی را در آن‌ها اندازه‌گیری کرد. این اتصال‌ها به چهار روش درون کامپوزیت قرار می‌گیرند که نحوه اعمال جریان را مشخص می‌کنند (Wang and Chung, 2006).

۱. الکترودهای جریان در صفحه نمونه‌ی چند لایه‌ای روی یک سطح هستند، به طوری که جریان فقط در ناحیه سطح است (شکل ۳-الف).
۲. الکترودهای جریان بر روی سطوح مخالف در صفحه نمونه‌ی چند لایه‌ای قرار دارند، در نتیجه یک جریان مایل ایجاد می‌کنند (شکل ۳-ب).
۳. الکترودهای جریان روی سطوح نمونه و داخل نمونه بطور ترکیبی قرار دارند، به طوری که جریان از درون و روی سطح مقطع می‌گذرد و از روی سطح مقطع نمونه خوانده می‌شود (شکل ۳-ج).
۴. الکترودهای جریان در سوراخ‌هایی هستند که از ضخامت عبور می‌کنند به طوری که جریان درون صفحه نمونه‌ی چند لایه‌ای عبور می‌کند و از درون سطح مقطع نمونه خوانده می‌شود (شکل ۳-د).

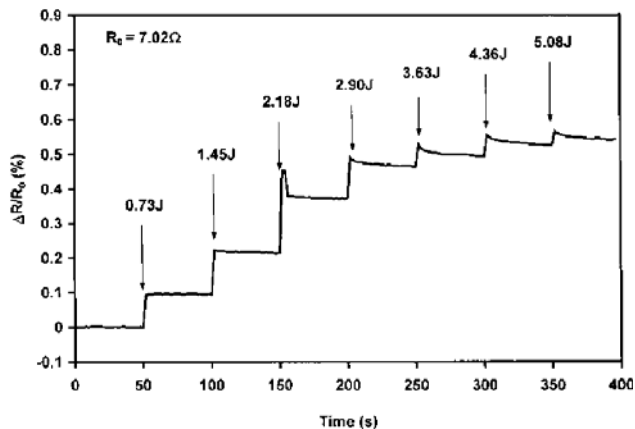
اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تحت فرکانس‌های مختلف در یک جریان متناوب AC، اطلاعات مقاومتی (آمپدانس شامل بخش واقعی که بیشتر نشان دهنده مقاومت الکتریکی ناشی از ساختار بتن و مقاومت موهومی که نشان دهنده مقاومت متأثر از وجود مواد هادی) به دست می‌آید و در نهایت با نتایج گیج‌های کرنشی که از نوع LVDT بودند صحت سنجی شدند و همچنین با بررسی تصاویر تغییرات وضعیت ترک با نتایج روش پیزو مقاومتی سعی در تخمین طول ترک، بازشدگی دهانه ترک، سخت شدگی ناحیه ترک شد. با صحت سنجی و مقایسه هر دو روش نتایج قابل قبول تشخیص داده شد.

در شکل ۲ تصاویری از شماتیک نمونه‌ی بتنی مورد آزمایش و تصویر نمونه در آزمایشگاه ارائه شده است (Reza, Yamamuro and Batson, 2004).



شکل ۲. الف) نمونه تحت بارگذاری در آزمایشگاه (ب) شماتیک آزمایش و جانمایی گیج‌های کرنشی LVDT (Reza, Yamamuro and Batson, 2004)

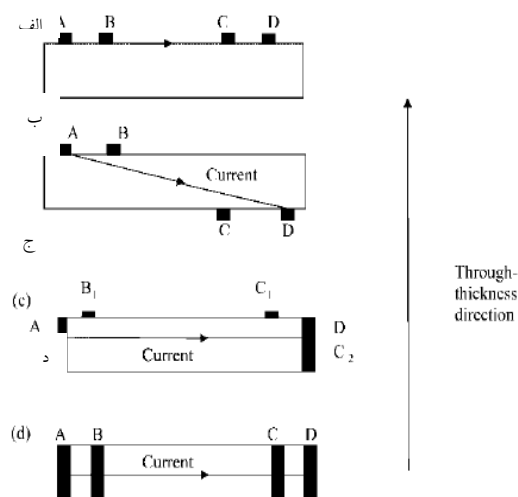
همانطور که اشاره شد ارزیابی‌های صورت گرفته حاکی از این بودند که این روش پیزو مقاومتی پتانسیل خوبی برای کمک به مطالعات مکانیک شکست دارد و همانند فلزات، در بتن‌ها هم تغییرات مقاومت را میتوان متناسب با رشد ترک آزاد کششی در فرایند شکست مرتبط نمود. بنابراین می‌تواند برای تخمین طول ترک نیز مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین نتایج در فرکانس‌های جریان الکتریکی پایین به شکل‌گیری مکانیزم سخت‌شدگی نوک ترک به صورت میکروتوک حساس بود و در فرکانس‌های بالا به مکانیزم افزایش اتصال فیبری حساس بودند (Reza, Yamamuro and Batson, 2004).



شکل ۴. اعمال ضربات مختلف به تیر بتنی در زمان‌های مختلف و اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی مایل

۴-۲-۳- حس آسیب فشاری

مقاومت فشاری باعث فشرده‌سازی در راستای ضخامت اجزای کامپوزیت می‌شود. اثر فشرده‌سازی نه تنها در سطح مشترک اتصال است، بلکه در اجزای در حال اتصال نیز می‌باشد. مقاومت الکتریکی حجمی یک کامپوزیت با فشرده‌سازی در راستای ضخامت، به دلیل کاهش فاصله بین فیله‌های هادی و کاهش مقاومت در برابر جهش الکترون بین دو ذره هادی که با فاصله بین دوزره هادی رابطه دارد، کاهش می‌یابد (Leong, Wang and Chung, 2006; Wang and Chung, 2007) و با افزایش فشار و رشد ریزترک‌ها در کامپوزیت موانعی در جهت حرکت الکترون‌ها بوجود می‌آید. لذا، در این حالت وجود خسارت روند کاهش مقاومت را تغییر می‌دهد. بدین معنی که سه حالت بسته به میزان تراکم ذرات هادی و میزان خسارت ممکن است روی دهد. در حالت اول (الف) شیب کاهش مقاومت کم می‌شود، ولی باز همچنان روند کاهش مقاومت وجود دارد در حال دوم (ب) شیب کاهش مقاومت صفر می‌شود و در حالت سوم (ج) شیب کاهش مقاومت مثبت می‌شود. بدین معنی که اثر خسارت بر اثر افزایش فشار و کاهش فاصله بین ذرات هادی غالب می‌شود. شکل ۵ را ببینید.



شکل ۳. تنظیمات تماس الکتریکی برای سنجش بدون تفکیک مکانی خرابی

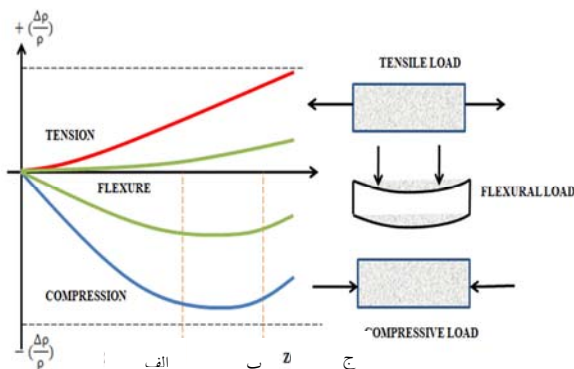
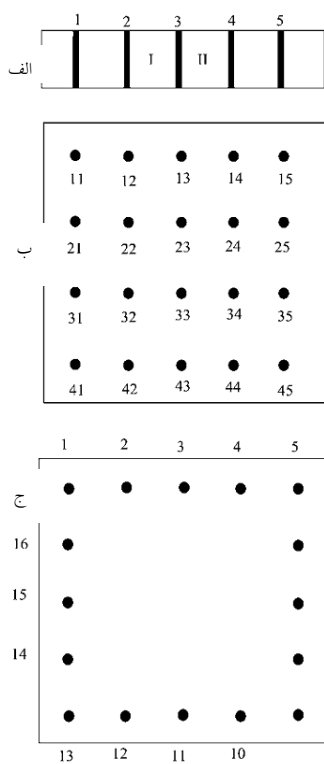
۴-۲-۱- حس آسیب خمشی

مقاومت‌های الکتریکی سطح بالایی و سطح پایینی و مقاومت مایل در نمونه‌های آزمایش خمش سه محوری به دست آمد (شکل ۳-۲-۱a, b). نتایج آزمایش نشان‌داد که مقاومت مایل بهتر از مقاومت سطحی است، زیرا داخل نمونه را بررسی می‌کند، در حالی که مقاومت سطحی فقط ناحیه سطح را بررسی می‌کند (Chung, 2007).

۴-۲-۲- حس آسیب ضربه

برای سنجش آسیب ضربه با اندازه‌گیری مقاومت سطحی در بالا و پایین نمونه و همچنین مقاومت در داخل ضخامت و مایل اندازه‌گیری شد که مقاومت‌های داخل ضخامت و مایل حساسیت بیشتری نسبت به مقاومت‌های سطحی بالایی و پایینی داشتند و در نهایت هم مشخص شد که اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به روش مایل مناسب‌ترین روش در حس آسیب ضربه است. همچنین باید اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی مایل در ناحیه‌ای انجام شود که حاوی نقطه ضربه باشد. پس از آسیب ضربه، مقاومت به طور برگشت ناپذیر افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش انرژی ضربه، مقاومت به طور یکنواخت افزایش می‌یابد (Angelidis, Khemiri and Irving, 2004; Wang, Chung and Chung, 2005; Angelidis and Irving, 2007) شکل ۴ را ببینید.

روسازی، در صورتی که از پیکربندی شکل (۵-ج) استفاده شود بهتر است (Wang and Chung, 2006).



شکل ۵. تغییرات نسبی مقاومت الکتریکی در مقابل انواع حالات بارگذاری

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در خمش و در فشار تاثیر دو معیار یکی کاهش مقاومت و دیگری افزایش مقاومت بطور همزمان می‌تواند دو حالت را بوجود آورد. در حالت اول نمودار نهایی شکل یک معادله درجه ۲ با یک نقطه حداقل را می‌گیرد و حالت دوم نمودار نهایی صعودی خواهد بود. میزان فشار وارده، میزان تراکم ذرات/الیاف هادی و خصوصیت ماده در میزان و تعداد ترک و رشد ترک‌ها تعیین کننده شکل یکی از این دو حالت خواهد بود.

شکل ۶. پیکربندی تماس الکتریکی برای سنجش با تفکیک فضایی (الف) روش مقاومت یک بعدی، (ب) روش مقاومت دو بعدی، و (ج) روش مقاومت سه بعدی

۴-۲-۴- توزیع و تشخیص محل آسیب

تعیین توزیع مقاومت یک بعدی، برای حس توزیع آسیب لازم است، که شامل یک آرایه یک بعدی از اتصال‌های الکتریکی است، همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، که در آن تماس‌ها به شکل نوارهایی هستند که در تمام عرض نمونه امتداد دارند (Wang and Chung, 2006). این چیدمان برای تیرهای بتنی می‌تواند موثر باشد. در این چیدمان جریان از بین الکترودهای ۱ و ۵ وارد و خارج می‌شود و برای تشخیص خرابی در محدوده I و II ولتاژ بین الکترودهای ۲ و ۳ یا ۳ و ۴ و ۴ اندازه گیری می‌شوند.

برای به دست آوردن اطلاعات در مورد محل آسیب در سطوح بتنی مانند سطح رویه‌های بتنی، توزیع مقاومت الکتریکی دوبعدی باید تعیین شود. که شامل یک آرایه دو بعدی از اتصال‌های الکتریکی است (Wang and Chung, 2006). در این خصوص دو چیدمان الکترودها همانند (شکل ۵-ب) و (۵-ج) نشان داده شده است، در چیدمان ۵-ب دقت تخمین محل ترک دقیق‌تر خواهد بود ولی به منظور جلوگیری از تداخلی عملکردی با وظیفه سازه‌ای

۴-۲-۵- تعیین آسیب با استفاده از مدل مش مقاومتی

یکی دیگر از روش‌هایی که بر پایه تغییرات مقاومت الکتریکی استوار است و هدف آن تعیین سطوح آسیب در زیرساخت‌های بتنی است مدل مش مقاومتی است.

از این مدل برای تشخیص محلی‌سازی و کمی‌سازی آسیب در کامپوزیت سیمانی حاوی نانولوله‌های کربنی چند دیواره تحت آسیب کنترل شده و بارگذاری چهار نقطه‌ای استفاده شد (Downeya et al., 2017). آسیب استاتیکی با استفاده از اره برقی ایجاد شد؛ در مورد بارگذاری چهار نقطه‌ای، یک مدل تحلیل المان محدود برای به روزرسانی مدل مقاومت با تغییرات مقاومت ناشی از کرنش برای هر مود بارگذاری توسعه داده شده است (Downeya et al., 2017).

باشد. در مش مقاومت همان‌طور که توسط هان و همکاران (Han, Guan and Ou, 2007) نشان داده شده است، مقاومت تماسی بین خمیر سیمان و الکتروود بر اساس مطالعات هان محاسبه می‌شود. مقدار مقاومت تماسی از طریق نظارت بر داده‌های آزمایشی تنظیم می‌شود و همراه با مقدار مقاومت مقاومت‌های حساس به کرنش تنظیم می‌شود (Downeya et al., 2017).

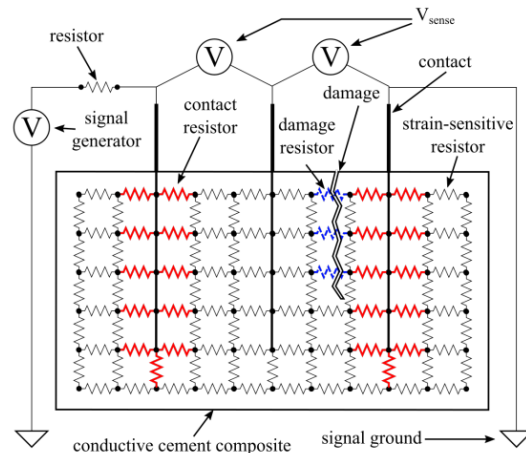
مقاومت‌های آسیب، در شکل ۶ نشان داده شده‌اند، این مقاومت را در مکان‌های ترک مشاهده شده یا برای بازسازی یک آزمایش اندازه‌گیری آسیب وارد می‌کنند. در اینجا، ترک‌ها درون مواد خودحسگر عامل کاهش شدید رسانایی در نظر گرفته می‌شوند، زیرا ممکن است ترک‌ها هنگام باز شدن نارسانا باشند. مقاومت‌های آسیب با عناصر غیررسانا در مدل جایگزین می‌شوند. زیرا ممکن است ترک‌ها غیرقابل تغییر باشند (Downeya et al., 2017).

مدل مش مقاومت به درستی اجرا شده را می‌توان برای هر ولتاژ مجهول به عنوان یک سیستم معادلات جبری خطی حل کرد (Downeya et al., 2017). بر این اساس ورودی مدل ولتاژ اعمال شده و خروجی مدل شدت جریان و ولتاژ در محل اتصال با الکتروود می‌باشد. در نهایت این روش مش مقاومتی به خوبی توانایی نشان دادن پاسخ الکتریکی اعضای سازه‌ای هوشمند بتنی را دارد و در هر لحظه امکان تشخیص، جانمایی، و اندازه‌گیری خرابی انواع ترک‌ها را با یک سخت افزار ارزان قیمت و هزینه‌ی محاسبه‌ی محدود را فراهم می‌کند (Downeya et al., 2017).

۵-توموگرافی امپدانس الکتریکی و روش‌های نظارت بر روسازی

همان‌طور که در بخش بالا معرفی شد تکنیک برداشت داده از خصوصیات الکتریکی توده بتن رسانا با عبور امواج الکتریکی که منجر به ایجاد یک تصویر دوبعدی از مقاومت الکتریکی و تغییرات آن در سطح مقطع نمونه می‌شود، توموگرافی الکتریکی یا تصویربرداری مقاومت الکتریکی می‌نامند. که می‌توان از داده‌های مقاومت الکتریکی جهت جانمایی خسارات در داخل نمونه‌ها استفاده کرد. همچنین می‌توان روابط همبستگی مناسبی میان داده‌های مقاومت الکتریکی و پارامترهای مورد نیاز مثل تغییرشکل، کرنش، وضعیت ترک و گسترش ترک را پیدا کرد. در این بخش به برخی از این روش‌های توموگرافی پرداخته خواهد شد و به نحوه‌ی بکار بردن آن‌ها در نظارت بر روسازی‌ها ارایه خواهد شد.

یک مدل مش مقاومتی ابتدا مطابق با شکل هندسی نمونه رسانا ساخته می‌شود؛ این مدل منحصرًا روی ساخت شبکه‌های مقاومت مستطیلی دو بعدی تمرکز دارد (Downeya et al., 2017). استفاده از مش‌های سه بعدی با اشکال مختلف هیچ تغییر اساسی در روش ایجاد نمی‌کند. الکتروودها به عنوان عناصر غیر مقاومتی بین گره‌های مدل وارد مدل می‌شوند. اندازه‌گیری ولتاژ به عنوان ولتاژ حسگر تفاضلی بین الکتروودها همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است انجام می‌شود.



شکل ۷. شماتیک از مدل مش مقاومت

در این مدل از سه نوع مقاومت برای تشخیص، محلی‌سازی و کمی‌سازی آسیب استفاده می‌شود (Downeya et al., 2017). (الف): مقاومت الکتریکی حساس به کرنش. (ب): مقاومت الکتریکی تماسی. (ج): مقاومت الکتریکی حساس به آسیب. در نظر گرفتن صحیح نوع مقاومت و محل قرارگیری، آن می‌تواند به طور دقیق کرنش و حالت آسیب کامپوزیت‌های سیمانی رسانا را محاسبه کند (Downeya et al., 2017).

مقاومت‌های الکتریکی حساس به کرنش، در شکل ۶ نشان داده شده‌اند، از آن جا که با تغییرات کرنش (فواصل بین الیاف هادی کاهش یا افزایش می‌یابد) مقاومت الکتریکی نیز تغییر خواهد کرد در نتیجه این نوع مقاومت‌ها در واقع شبیه ساز خواص پیزو-مقاومتی می‌باشند. با مدل سازی میزان کرنش مدل بر اساس مقدار واقعی در مدل تحلیل المان محدود (FEA) و داشتن رابطه بین تغییرات کرنش و تغییرات مقاومت الکتریکی (خاصیت پیزو-مقاومتی) می‌توان مقادیر این مقاومت‌های الکتریکی را تنظیم نمود. مقاومت‌های تماسی، در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. مقاومت‌های تماسی فقط در جایی اضافه می‌شوند که یک انتهای مقاومت در تماس مستقیم با الکتروود تعبیه شده باشد و انتهای مقاومت مخالف، با آن در تعامل

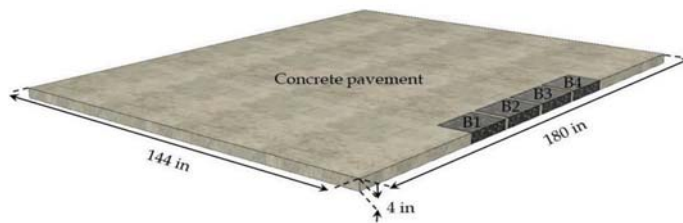
جدول ۲. انواع روش‌های نظارت بر روسازی‌ها و توضیحات و معایب آن‌ها

معایب	نحوه‌ی عملکرد	روش
هزینه بالا و نیاز به نفر ساعت زیادی دارد و باعث از کار افتادن بخشی از پروژه می‌شود و همچنین تشخیص خسارت زیرسطح روسازی شناسایی نمی‌شود.	ناظران در محل پروژه حاضر می‌شوند و شروع به برداشت اطلاعات و یافتن انواع خرابی می‌کنند.	بازرسی بصری میدانی (Kong and Li, 2018)
هزینه بالا و همچنین قادر به تشخیص خسارات زیر سطحی نیستند.	با نصب دوربین‌های پیشرفته و تحلیل تصاویر روند خرابی‌ها و خسارات را متوجه شدند.	بازرسی بصری تصویری (Radopoulou and Brilakis, 2015; Gopalakrishnan et al., 2017)
نسبت به موارد بالا در این روش اکثر معایب بر طرف شده و همچنین نسبت به آن‌ها مقرون بصره‌تر است.	با استفاده از حسگرها و تجهیزات توموگرافی الکتریکی می‌توان از وضعیت ترک‌ها و ناهنجاری‌ها در سطح و زیرسطح روسازی‌ها با خبر شد.	بازرسی بصری با ارزیابی غیرمخرب (Hugenschmidt, Partl and de Witte, 1998)

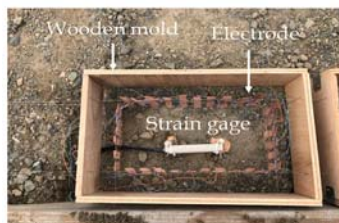
۶- استفاده از روش توموگرافی جهت نظارت بر روسازی‌ها

بر اساس مطالعات انجام شده با بهره‌گیری از حسگرهای پیزو-مقاومتی در مجاورت یک دال روسازی بتنی مطابق شکل ۸-الف و چیدمان الکترودها بصورت غشایی در اطراف هر حسگر شکل ۸-ب و بارگذاری لبه روسازی در مجاورت حسگرها با دستگاه بارگذاری تسریع شونده (HVS) امکان برداشت تصاویر توموگرافی آمپدانس الکتریکی و تشخیص ترک‌های شروع شده و گسترش یافته در روسازی فراهم شد (Gupta et al., 2021).

انواع روش‌های نظارت بر روسازی‌ها در جدول ۲ آمده است در بین این روش‌ها روش ارزیابی غیر مخرب که با استفاده از روش‌های تصویربرداری مقاومت الکتریکی یا توموگرافی مقاومت الکتریکی انجام می‌شود طبق ارزیابی‌های به عمل آمده در مطالعات، روش بهتری نسبت به بقیه روش‌های موجود است و در بین روش‌هایی که از تلفیق روش پیزو-مقاومتی با روش‌های توموگرافی مقاومت الکتریکی استوارند مناسب‌ترین روش به حساب آمده است (Reza, Yamamuro and Batson, 2004; Gupta et al., 2021) و این روش پیزو-مقاومتی پتانسیل بالایی برای کمک کردن به نظارت بر روسازی‌ها را دارد.



الف



ب

شکل ۸. روسازی بتنی حاوی حسگرهای پیزو-مقاومتی (Gupta et al., 2021)

۷- سپاسگزاری

استفاده اصولی از آنها در دقت برآورد و نتایج بدست آمده به شدت موثر است.

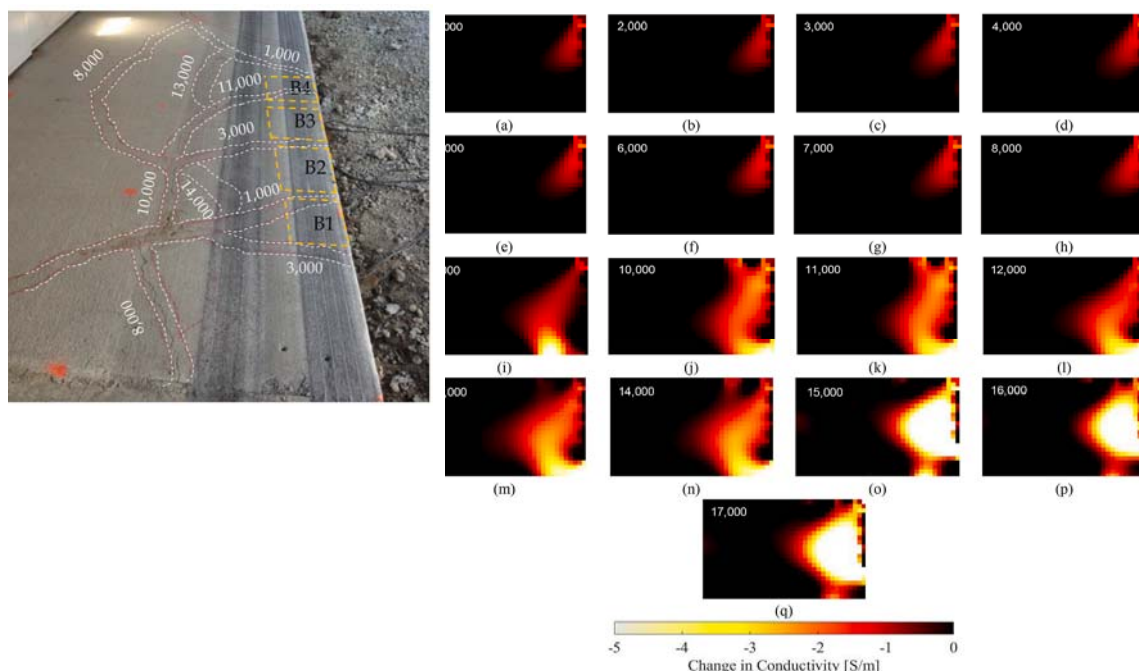
بر این اساس در روش نظارت تصویری به روش ارزیابی غیر مخرب استفاده از روش پیزو-مقاومتی بتن‌های خود حسگر با افزودنی‌های هادی کننده توانسته در مطالعات انجام‌گرفته جواب‌های دقیق و نزدیک به وضعیت خرابی‌ها و ترک‌ها حتی از زیر سطح رویه بتنی و قبل از اینکه خرابی به روی سطح بیاید و دیده شوند، ارایه دهد. از این رو دقت و پیش بینی اینگونه روش‌ها قطعاً کلید توسعه زیرساخت‌های هوشمند و راه‌های آینده خواهد بود.

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گزنت شماره ۳۵۶۷ مورخ ۱۴۰۱/۰۳/۰۷ انجام گردیده است. همچنین این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) به شماره قرارداد ۹۹۰۲۲۷۵۵ تحت حمایت قرار گرفته است. موارد مطرح شده در این مقاله به خوبی مبین توانمندی حسگرهای پیزو-مقاومتی و روش‌های ارزیابی که بر اساس خواص الکتریکی استوار هستند و اینکه تا چه اندازه می‌توانند به عنوان روش‌های نوین ارزیابی سلامت سازه‌ای و حتی بطور دقیق در علت یابی خرابی‌ها موثر باشند، هستند. در این روش‌ها متغیرهای زیادی وجود دارد که

۸- نتیجه‌گیری

ترک بعد تعداد نشان داده شده بارگذاری است. بر اساس نتایج بدست آمده از بلوک‌های مختلط حسگر پیزو مقاومتی، تشخیص خرابی به درستی و در جهت درست انجام شده است شکل ۹-ب به عنوان مثال نتایج بلوک ب-۱ را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج بدست آمده بعد از عبور ۱۷۰۰۰ بار بر روی روسازی خرابی‌هایی مطابق شکل ۹-الف بر روی روسازی ایجاد شد. در این شکل حسگرهای پیزو مقاومتی در بلوک‌های ۱-ب الی ۴-ب نشان داده شده است. اعداد روی شکل نشان دهنده شروع



الف

ب

شکل ۹. رشد خرابی تحت بارگذاری در لبه روسازی بتنی و تشخیص خرابی بر اساس تکنیک توموگرافی آمپدانس الکتریکی در حسگرهای پیزو مقاومتی

- Materials", Applied Sciences, 11(5080).
Doi.org/10.3390/app11115080.
- Adresi, M., Hassani, A. and Yazdian, A., (2017), "Construction and evaluation of damage detection concrete sensor consistent with concrete pavement (In Persian)", Modares Civil Engineering Journal, 17(2), pp. 1–9.
- Adresi, M. and Yekrangnia, M., (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).
Doi: 10.22065/JSCE.2020.232648.2150.
- Angelidis, N. and Irving, P. E., (2007), "Detection of impact damage in CFRP laminates by means of electrical potential techniques", Composites Science and Technology, 67(3), pp. 594–604.
Doi: org/10.1016/j.compscitech.2006.07.033.
- Angelidis, N., Khemiri, N. and Irving, P. E., (2004), "Experimental and finite element study of the electrical potential technique for damage detection in {CFRP} laminates", Smart Materials and Structures. {IOP} Publishing, 14(1), pp. 147–154.
Doi: 10.1088/0964-1726/14/1/014.
- Ceysson, O., Salvia, M. and Vincent, L., (1997), "Damage mechanisms characterization of carbon fiber/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis", NDT and E International, 30(2), p. 107.
- Chung, D. D., (2005) "Dispersion of short fibers in cement", Journal of materials in civil engineering, American Society of Civil Engineers, 17(4), pp. 379–383.
- Chung, D. D. L., (1987), "Exfoliation of graphite", Journal of Materials Science, 22(12), pp. 4190–4198. doi: 10.1007/BF01132008.
- Chung, D. D. L., (2007), "Damage detection using self-sensing concepts", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. IMECHE, 221(4), pp. 509–520.
Doi: 10.1243/09544100JAERO203.
- Chung, D. D. L. and Wang, S., (2003), 'Self-sensing of Damage and Strain in Carbon Fiber Polymer-Matrix Structural Composites by Electrical Resistance Measurement', Polymers and Polymer Composites. SAGE Publications Ltd STM, 11(7), pp. 515–525.
Doi: 10.1177/096739110301100701.
- Abry, J. C. et al. (2001) 'In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements', Composites Science and Technology, 61(6), pp. 855–864.
Doi: https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00181-0.
- Adresi, M., Hassani, A., Javadian, S., et al., (2016), "Determining the Surfactant Consistent with Concrete in order to Achieve the Maximum Possible Dispersion of Multiwalled Carbon Nanotubes in Keeping the Plain Concrete Properties", Journal of Nanotechnology. Edited by B. I. Yakobson. Hindawi Publishing Corporation, 2016, pp. 1–9.
Doi: 10.1155/2016/2864028.
- Adresi, M., Hassani, A., Mohammad reza Soleimani, et al., (2016), 'Investigation of carbon nanotube and energy levels effects on Self-sensing Concrete Sensor Performance in Dynamic Loading Pattern (In Persian)', Transportation Infrastructures Engineering Journal, 2(3), pp. 17–34.
Doi: 10.22075/JTIE.2016.509.
- Adresi, M. et al., (2017), 'A study of the main factors affecting the performance of self-sensing concrete', Advances in Cement Research, 29(5).
Doi: 10.1680/jadcr.15.00147.
- Adresi, M., (2017), "Concrete pavement prediction life model based on electrical response of concrete-CNTs sensors under fatigue loading", (March), Doi: 10.6092/polito/porto/2687875.
- Adresi, Mostafa, Ahmadi, A., Ahmadi, M., et al., (2017), "Methodology of Damage Detection and Weight in Motion Performance under Traffic Loading Based on Self-Sensing Concrete (In Persian)", Quarterly Journal of Transportation Engineering, 9(2), pp. 139–154.
Doi: 20.1001.1.20086598.1396.9.2.1.9.
- Adresi, Mostafa, Ahmadi, A., Ahmadi, M., et al. (2017), "Methodology of damage detection and weight in motion performance under traffic loading in based selfon self-sensing concrete", Quarterly Journal of Transportation Engineering, 9(2), pp. 139–154.
Doi: 20.1001.1.20086598.1396.9.2.1.9.
- Adresi, M. et al., (2019), "Concrete pavement prediction life model based on self-sensing concrete ability", in 3th national conference on concrete pavements (3NCCP), Tehran-Iran.
- Adresi, M. et al., (2021), "A Novel Life Prediction Model Based on Monitoring Electrical Properties of Self-Sensing Cement-Based

Doi: org/10.1016/0266-3538(94)90107-4.

-Kemp, M., (1994), "Self-sensing composites for smart damage detection using electrical properties", in Proc.SPIE.

Doi: 10.1117/12.184809.

-Kong, X. and Li, J., (2018), "Vision-Based Fatigue Crack Detection of Steel Structures Using Video Feature Tracking", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(9), pp. 783–799.

Doi: org/10.1111/mice.12353.

-Kupke, M., Schulte, K. and Schüler, R., (2001), "Non-destructive testing of FRP by d.c. and a.c. electrical methods", *Composites Science and Technology*, 61(6), pp. 837–847.

doi: org/10.1016/S0266-3538(00)00180-9.

-Leong, C.-K., Wang, S. and Chung, D. D. L., (2006), "Effect of through-thickness compression on the microstructure of carbon fiber polymer-matrix composites", as studied by electrical resistance measurement', *Journal of Materials Science*, 41(10), pp. 2877–2884.

Doi: 10.1007/s10853-005-5121-7.

-Mei, Z. et al., (2002), "Mechanical damage and strain in carbon fiber thermoplastic-matrix composite", sensed by electrical resistivity measurement', *Polymer Composites*, 23(3), pp. 425–432. doi: Doi.org/10.1002/pc.10444.

-Mullen, M. (2001) 'Special Inspections of Paved Areas during Excessive Heat Periods', *Central Region Airport Certification Bulletin*, Federal Aviation Administration, Central Region, Airports Division, Kansas City, MO.

-Peled, A. et al., (2001), "Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites", *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, 98(4), pp. 313–322.

- "Piezoresistivity in continuous carbon", fiber.pdf (no date).

-Prabhakaran, R., (1990), "Damage assessment through electrical resistance measurement in graphite fiber-reinforced composites", *Experimental Techniques*, 14(1), pp. 16–20.

Doi: 10.1111/j.1747-1567.1990.tb01059.x.

-Radopoulou, S. C. and Brilakis, I., (2015), "Patch detection for pavement assessment", *Automation in Construction*, 53, pp. 95–104.

Doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.010.

-Reza, F. et al., (2001), "Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites", *Materials Journal*, 98(1), pp. 25–35.

-Reza, F. et al., (2003), "Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites", *Journal of Materials in Civil Engineering*.

-DiFonzo, N. and Bordia, P., (1998), 'Reproduced with permission of the copyright owner . Further reproduction prohibited without', *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 130(2), p. 556.

-Downeya, A. et al., (2017), "Damage detection, localization and quantification in conductive smart concrete structures using a resistor mesh model', *Engineering Structures journal*, 148, pp. 924–935.

Ferrara, L. and Meda, A. (2006) 'Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements', *Materials and Structures*. Springer, 39(4), pp. 411–420.

-Gopalakrishnan, K. et al., (2017), "Deep Convolutional Neural Networks with transfer learning for computer vision-based data-driven pavement distress detection', *Construction and Building Materials*, 157, pp. 322–330. Doi:org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.110.

-Gupta, S. et al., (2021), "In situ crack mapping of large-scale self-sensing concrete pavements using electrical resistance tomography", *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 122, p. 104154.

Doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104154.

-Hallaji, M., Seppänen, A. and Pour-Ghaz, M., (2014), "Electrical impedance tomography-based sensing skin for quantitative imaging of damage in concrete", *Smart Materials and Structures*. {IOP} Publishing, 23(8), p. 85001.

Doi: 10.1088/0964-1726/23/8/085001.

-Han, B., Guan, X. and Ou, J., (2007), "Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors", *Sensors and Actuators A: Physical*, 135(2), pp. 360–369.

Doi: https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.08.003.

-Hosseini Lavassani, S. H., Mardani, M. and Adresi, M., (2022), 'Piezoresistivity and Mechanical Properties of Self- Sensing Cnt Cementitious Nanocomposite S: Optimizing the Effects of Cnt Dispersion and Surfactants', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, (April), p. 128127. Doi: 10.2139/ssrn.4078405.

-Hugenschmidt, J., Partl, M. N. and de Witte, H., (1998), "GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland", *Journal of Applied Geophysics*, 40(1), pp. 95–104.

Doi: org/10.1016/S0926-9851(97)00032-3.

-Kaddour, A. S. et al., (1994), "Electrical resistance measurement technique for detecting failure in CFRP materials at high strain rates", *Composites Science and Technology*, 51(3), pp. 377–385.

- Tomblor, T. W. et al., (2000), "Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local-probe manipulation", *Nature*. Nature Publishing Group, 405(6788), pp. 769–772.
- Wang, D. and Chung, D. D. L., (2006), "Comparative evaluation of the electrical configurations for the two-dimensional electric potential method of damage monitoring in carbon fiber polymer-matrix composite", *Smart Materials and Structures*. {IOP} Publishing, 15(5), pp. 1332–1344.
Doi: 10.1088/0964-1726/15/5/023.
- Wang, D. and Chung, D. D. L., (2007), "Through-thickness stress sensing of a carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement", *Smart Materials and Structures*. {IOP} Publishing, 16(4), pp. 1320–1330.
Doi: 10.1088/0964-1726/16/4/046.
- Wang, S., Chung, D. D. L. and Chung, J. H., (2005), "Effects of composite lay-up configuration and thickness on the damage self-sensing behavior of carbon fiber polymer-matrix composite", *Journal of Materials Science*, 40(3), pp. 561–568.
Doi: 10.1007/s10853-005-6289-6.
- Wang, X. and Chung, D. D. L., (1999), "Fiber breakage in polymer-matrix composite during static and fatigue loading, observed by electrical resistance measurement", *Journal of Materials Research*. Cambridge University Press, 14(11), pp. 4224–4229. Doi: 10.1557/JMR.1999.0572.
- Zhao, H. et al., (2014), "Pavement Condition Monitoring System at Shanghai Pudong International Airport", in *Pavement Materials, Structures, and Performance*, pp. 283–295.
Doi: 10.1061/9780784413418.029.
- American Society of Civil Engineers, 15(5), pp. 476–483.
- Reza, F. A., Yamamuro, J. A. and Batson, G. B., (2004), "Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites", *Cement & Concrete Composites*, 26, pp. 873–881.
- Schulte, K. and Baron, C., (1989), "Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements", *Composites Science and Technology*, 36(1).
- Seppänen, A., Hallaji, M. and Pour-Ghaz, M., (2017), "A functionally layered sensing skin for the detection of corrosive elements and cracking", *Structural Health Monitoring*, 16(2), pp. 215–224.
Doi: 10.1177/1475921716670574.
- Shah, S. P., Swartz, S. E. and Ouyang, C., (1995), "Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete", rock and other quasi-brittle materials. John Wiley & Sons.
- Shi, Z. Q. and Chung, D. D. L., (1999), "Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion", *Cement and Concrete Research*, 29(3), pp. 435–439.
Doi: 10.1016/S0008-8846(98)00204-X.
- Sugita, M., Yanagida, H. and Muto, N., (1995), "Materials design for self-diagnosis of fracture in {CFGFRP} composite reinforcement", *Smart Materials and Structures*. {IOP} Publishing, 4(1A), pp. A52-A57.
Doi: 10.1088/0964-1726/4/1a/007.
- Tallman, T. N. et al., (2014), "Damage detection and conductivity evolution in carbon nanofiber epoxy via electrical impedance tomography", *Smart Materials and Structures*. {IOP} Publishing, 23(4), p. 45034.
Doi: 10.1088/0964-1726/23/4/045034.

A Review Study on the Novel Methods in Pavement Damage Detection Based On Piezo-Resistance Capability in Self-Sensing Concrete

Mostafa Adresi, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Behrad Sabagh, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Somaye Sharif, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Email:m.adresi@sru.ac.ir

Received: January 2023- Accepted: June 2023

ABSTRACT

The structural health monitoring of the infrastructure before and during the operation allows the supervisors to detect damage in concrete structures in the first stage of damage initiation and help the society economically and sustainably. This article investigates pavement surface and subsurface monitoring methods using piezo-resistance sensors inside the concrete. At first, self-sensing concrete sensors' damage detection mechanisms were studied and investigated for different loading conditions. Next, the article focused on the reviews of several methods developed based on the piezo-resistive properties in concrete to evaluate the level of damage. These methods, such as fracture mechanics, sequential electrodes, resistor mesh model, and tomography methods, were considered in this research. In the end, the tomography method used to detect crack propagation in a concrete pavement under an accelerated loading test in the real-world example was investigated. The results showed that the tomography method could accurately detect damage even from the subsurface of the concrete pavement when the damages come up to the surface. Therefore, the accuracy and prediction of such methods will be the key to developing smart infrastructure and future ways.

Keywords: Self Sensing Concrete, Resistor Mesh Model, Pavement, Damage Detection