



Research Article

A review of the application of the Electromechanical Impedance Technique as a Novel Method for Structural Health Monitoring

Zeinab Gharianpour¹, Ramezanali Izadifard^{2*}

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2* - Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 25 May 2024; Revised: 01 June 2024; Accepted: 02 July 2024; Published: 02 July 2024

Abstract:

Structures during construction and operation phases may be affected by various factors such as earthquakes, wind, penetration of harmful ions, and adverse environmental conditions. These factors can lead to a decrease in the quality and service life of structures. Although the emergence of highly durable engineering materials and recent advances in structural design theories have made it possible to construct more efficient engineering structures, acquiring a proper understanding of structural health, identifying and timely addressing failures, and preventing their collapse, have always been the focus of researchers. Therefore, laboratory controls are particularly crucial in evaluating structures' performance, safety, durability, and stability. The Electromechanical Impedance (EMI) method, based on piezoelectric materials, as a novel and non-destructive testing (NDT) technique, evaluates changes occurring in the electromechanical impedance of structures as an indicator for identifying faults. In this technique, electromechanical admittance, due to the structural interaction between the piezoelectric transducer and the host sample, is measured as the inverse function of impedance under high-frequency structural excitations and the presence of an electric field. This article provides a comprehensive review of the application of the Electromechanical Impedance (EMI) method in Structural Health Monitoring (SHM). It emphasizes the importance of this method in detecting and predicting faults, while also addressing some of the research challenges. Moreover, it provides an inspiring foundation for future studies.

Keywords: *Electromechanical-impedance (EMI), Smart sensor, Structural health monitoring, Piezoceramic transducer, Safety and reliability*

Cite this article as: harianpour,Z. and Izadifard,R. (2024). A review of the application of the Electromechanical Impedance Technique as a Novel Method for Structural Health Monitoring. (e197201). Civil and Project, 6(9), e197201. <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.459427.1297>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: izadifard@eng.ikiu.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

مروری بر کاربرد روش امیدانس الکترومکانیکی به عنوان روشی نوین در کنترل سلامت سازه

زینب قاریان پور^۱، رمضانعلی ایزدی فرد^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۰۵ خرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۲ خرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۲ تیر ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۲ تیر ۱۴۰۳

چکیده:

سازه‌ها در طول دوره‌ی ساخت و بهره‌برداری، ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر زلزله، باد، نفوذ یون‌های مخرب و شرایط محیطی نامساعد قرار گیرند. این عوامل می‌توانند به کاهش کیفیت و عمر مفید سازه‌ها منجر شوند. اگرچه ظهور مواد مهندسی بسیار بادوام و پیشرفت‌های اخیر در تئوری‌های طراحی سازه‌ها، ساخت سازه‌های مهندسی کارآمدتری را ممکن ساخته است، با این حال داشتن درک درستی از سلامت سازه‌ها، شناسایی و رفع به موقع خرابی‌ها و جلوگیری از فروپاشی آن‌ها، همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. به همین دلیل، کنترل‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی کارایی، ایمنی، دوام و استحکام سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. روش امیدانس الکترومکانیکی (EMI) مبتنی بر مواد پیزوالکتریک، به عنوان روشی نوین و غیرمخرب (NDT)، تغییرات رخ داده در امیدانس الکترومکانیکی سازه‌ها را، به عنوان شاخصی برای شناسایی خرابی، مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این تکنیک، ادمیتانس الکترومکانیکی به دلیل تعامل ساختاری مبدل پیزوالکتریک و نمونه‌ی میزبان، به عنوان تابع معکوسی از امیدانس، تحت تحریکات ساختاری با فرکانس بالا و حضور میدان الکتریکی، اندازه‌گیری می‌شود. این مقاله با مرور جامعی بر کاربرد روش امیدانس الکترومکانیکی (EMI) در زمینه‌ی نظارت بر سلامت سازه‌ها (SHM) و همچنین بیان اهمیت این روش در تشخیص و پیش‌بینی خرابی‌ها و برخی از چالش‌های تحقیقاتی، زمینه‌ای الهام‌بخش را برای مطالعات آینده فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی:

امیدانس الکترومکانیکی، سنسور هوشمند، کنترل سلامت سازه، مبدل پیزوالکتریک، ایمنی و قابلیت اطمینان.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

سیستم‌های نظارت بر سلامت سازه‌ها^۱، از جمله عناصر حیاتی زیرساخت‌های مهندسی هوشمند می‌باشند، به طوری که توسعه‌ی روش‌هایی به منظور نظارت مستمر، اعتبارسنجی و تجزیه و تحلیل داده‌های فنی برای تسهیل و مدیریت تصمیم‌گیری‌ها در طول عمر یک سازه، دارای روندی رو به رشد است. SHM، یک سیستم شناسایی، جهت تشخیص آسیب‌های کلی و یا محلی در ساختار سازه‌ها، با استفاده از داده‌های خروجی متغیر با زمان، در طول یک دوره می‌باشد (Farrar & Worden, 2007)، که می‌تواند هزینه‌های کلی تعمیر و نگهداری یک سازه را با تشخیص آسیب در سنین پایین به حداقل برساند و امکان انجام اقدامات اولیه برای جلوگیری از آسیب بیش‌تر را فراهم سازد (Park et al., 2006). تکنیک‌های بسیاری برای تعیین کمیت و مکان‌یابی آسیب‌های کلی و یا محلی در سازه‌ها توسعه یافتند (Adams et al., 1978; Tan & Tong, 2004; Kisa, 2004). اگرچه این روش‌ها مزایای خاص خود را برای تشخیص آسیب در سازه‌ها دارند، با این حال معایب موجود، ممکن است کاربرد آن‌ها را در برخی جنبه‌ها محدود سازد. به عنوان مثال، در تکنیک‌های دینامیکی، سازه‌ها تحت تحریکات فرکانسی پایین قرار می‌گیرند و تنها می‌توان چند شکل مودی اول و فرکانس‌های طبیعی متناظر آن‌ها را با دقت استخراج نمود. از آنجایی که در اثر آسیب‌های موضعی، تغییرات رخ داده در پارامترهایی مانند فرکانس طبیعی، انحنای شکل‌های مودی، به سختی قابل تشخیص هستند، تنها می‌توان آسیب‌های بزرگ را با به کارگیری این روش‌ها تشخیص داد. همچنین سایر روش‌های معمول مانند تکنیک‌های اولتراسونیک، انتشار آکوستیک و آزمایش ضربه، نیازمند تجهیزات گران‌قیمت، پیچیده و همچنین اپراتورهای حرفه‌ای می‌باشند (Bhalla et al., 2005). ظهور مواد هوشمند مانند مواد پیزوالکتریک باعث ایجاد تحول عظیمی در زمینه‌ی نظارت بر سلامت سازه‌ها (SHM) بر اساس روش‌های غیرمخرب (NDT) شده است. توانایی مواد پیزوالکتریک برای ایجاد میدان الکتریکی تحت تأثیر تنش مکانیکی را اثر پیزوالکتریک مستقیم، به طوری که از این خاصیت برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. در مقابل اثر پیزوالکتریک مستقیم، اثر پیزوالکتریک معکوس قرار دارد که در آن کرنش مکانیکی در پاسخ به یک میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. اثر مستقیم، استفاده از این مبدل‌ها را به عنوان حسگر و اثر معکوس استفاده از آن‌ها را به عنوان محرک ممکن می‌سازد. تکنیک امپدانس الکترومکانیکی (EMI) به عنوان روشی نوین در زمینه‌ی آزمایش‌های غیرمخرب، توجه محققین زیادی را در دو دهه‌ی گذشته به خود جلب نموده است. از جمله مزایای این تکنیک می‌توان به توانایی آن در تشخیص آسیب‌های داخلی با هزینه‌ی نسبتاً کم اشاره نمود. علاوه بر این، از آنجایی که در این روش از تحریک در دامنه‌ی فرکانسی بالا استفاده می‌شود، ارتعاشات ناشی از محیط بیرون مانند وسایل نقلیه و باد، تأثیر قابل توجهی بر نتایج بدست‌آمده با استفاده از تکنیک EMI نخواهند داشت. با این حال این روش به دلیل بسیاری از محدودیت‌های موجود، هنوز به طور کامل تجاری‌سازی نشده است (Yang et al., 2008; Annamdas & Soh, 2010). در روش EMI وصله‌های پیزوالکتریک به عنوان حسگر و محرک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مبدل‌ها که به ساختار میزبان متصل شده و یا درون آن مدفون گشته اند، تحت تأثیر یک میدان الکتریکی متناوب قرار می‌گیرند. در این روش، امپدانس الکترومکانیکی، که برابر است با نسبت ولتاژ اعمال‌شده به جریان حاصل از آن، توسط یک تحلیلگر امپدانس اندازه‌گیری می‌شود. بدست‌آوردن امپدانس مکانیکی یک سازه، که با خواصی مانند سختی و میرایی مرتبط می‌باشد، در ابتدا بسیار دشوار است. با این حال امپدانس الکتریکی اندازه‌گیری‌شده برای مبدل‌های پیزوالکتریک مستقیماً با امپدانس مکانیکی سازه‌ی نظارت‌شده مرتبط بوده و تحت تأثیر وجود آسیب‌های سازه‌ای قرار می‌گیرد. این مطالعه عمدتاً بر تحقیقات انجام‌شده با استفاده از این تکنیک در زمینه‌ی نظارت بر سلامت سازه‌ها متمرکز است، تا زمینه‌ای برای آشنایی خوانندگان با این روش باشد. در بخش دوم، به بررسی تئوری تکنیک EMI پرداخته شده و بخش بعدی، کاربردها و مطالعات انجام‌شده در محدوده‌های فرکانسی مختلف را مورد بررسی قرار داده است. همچنین در برخی از مطالعات به چگونگی انتخاب یک محدوده‌ی فرکانسی مناسب، در صورتی که هیچ مرجعی برای انتخاب وجود نداشته باشد، پرداخته شده است.

¹ Structural Health monitoring (SHM)

۲- روش امیدانس الکترومکانیکی

تکنیک امیدانس الکترومکانیکی^۱ مبتنی بر مبدل‌های پیزوالکتریک، روشی امیدوارکننده در توسعه سیستم‌های کنترل سلامت سازه (SHM) می‌باشد، که هدف آن نظارت و تشخیص آسیب‌های اولیه است، تا ایمنی سازه‌ها را افزایش و هزینه‌های نگهداری از آن‌ها را کاهش دهد. بنابراین سیستم‌های SHM، از دو منظر علمی و صنعتی حائز اهمیت می‌باشند (Maurya et al., 2023). مواد پیزوالکتریک مواد دی‌الکتریکی هستند که، دارای قابلیت تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی و بالعکس می‌باشند. این مواد، با اعمال تنش، بار الکتریکی تولید می‌کنند (اثر مستقیم^۲) و با اعمال میدان الکتریکی، تغییر شکل‌های مکانیکی از خود نشان می‌دهند (اثر معکوس^۳). مبدل‌های پیزوالکتریک در تکنیک EMI، به عنوان محرک و یا حسگر به دو صورت، متصل شده بر سطح سازه‌ی میزبان و یا مدفون شده در ساختار آن، مورد استفاده قرار می‌گیرند. امیدانس مکانیکی ساختار میزبان، ارتباط نزدیکی با امیدانس الکتریکی مبدل‌های پیزوالکتریک مانند تیتانات زیرکونات سرب^۴ دارد، به طوری که تغییرات رخ داده در پاسخ‌های ثبت شده با استفاده از اثر مستقیم پیزوالکتریک، بر اثر تحریک این مبدل‌ها در بازه‌ی فرکانسی بالا با استفاده از دستگاه‌هایی مانند LCR Meter و یا آنالیزگر امیدانس^۵، نشان‌دهنده‌ی آسیب‌های رخ داده در ساختار سازه‌ی میزبان می‌باشند. ادمیتانس ثبت شده به عنوان پاسخ با استفاده از دستگاه‌های نامبرده، نشان‌دهنده‌ی راحتی عبور جریان متناوب است، به طوری که شامل قسمت‌های موهومی^۶ و حقیقی^۷ می‌باشد. ادمیتانس الکترومکانیکی (معکوس امیدانس الکترومکانیکی) در یک حوزه‌ی فرکانسی با استفاده از رابطه‌ی ریاضی (۱) قابل محاسبه می‌باشد (Liang et al., 1994).

$$\bar{Y} = \left[2j\omega \frac{Wl}{h} \left(\epsilon_{33}^T - d_{31}^2 Y_{11}^E + \frac{d_{31}^2 Y_{11}^E Z_P \tan(kl)}{Z_P + Z_S} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن Z_S و Z_P به ترتیب امیدانس وصله‌ی پیزوالکتریک و ساختار میزبان، W ، h و L به ترتیب عرض، ارتفاع و طول پیزوی مورد استفاده، ϵ_{33}^T ثابت دی‌الکتریک، Y_{11}^E مدول کمپلکس و d_{31} ثابت پیزوالکتریک، می‌باشند. علاوه بر آن k یا عدد موج که به صورت تابعی از فرکانس دورانی ω می‌باشد، از رابطه‌ی $\frac{\omega^2 \rho}{Y_{11}^E}$ قابل محاسبه خواهد بود.

در این تکنیک انحراف در ادمیتانس اندازه‌گیری شده، یعنی جابجایی اوج‌ها به سمت راست و یا چپ و یا ایجاد اوج‌هایی مرتفع‌تر، نسبت به حالتی که نمونه کاملاً سالم است، نشان‌دهنده‌ی رخ دادن آسیب‌های اولیه در سازه‌ی مورد بررسی می‌باشد (Soh et al., 2012). شاخص‌های آسیب مورد استفاده در این مطالعات، عبارتند از خطای جذر مربعات میانگین^۸، ضریب همبستگی^۹، ضریب تغییرات^{۱۰}، میانگین درصد مطلق انحراف‌ها^{۱۱}.

$$CC = \frac{Cov(G_0, G_1)}{\sigma_0 \sigma_1} \quad (2)$$

$$RMSD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i^1 - G_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i^0)^2}} \times 100 \quad (3)$$

¹ Electromechanical impedance

² Direct effect

³ converse effect

⁴ Pb-Zr-Ti (PZT)

⁵ Impedance analyzer

⁶ SUSCEPTANCE

⁷ CONDUCTANCE

⁸ Root-Mean-Square Deviation (RMSD)

⁹ Correlation coefficients (CC)

¹⁰ coefficient of variation (Cv)

¹¹ mean absolute percentage deviation

$$Cov(G_0 - G_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_i^0 - \bar{G}^0)(G_i^1 - \bar{G}^1) \quad (4)$$

$$MAPD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{G_i^1 - G_i^0}{G_i^0} \right| \quad (5)$$

که در آن ها ، G_i^1 مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده پس از آسیب، در اندازه‌گیری i ام و G_i^0 مقدار همان متغیر، مربوط به قبل از آسیب است. مقدار انحراف معیار به ترتیب قبل و پس از آسیب با σ_0 و σ_1 و مقدار میانگین در حالت سالم و آسیب به ترتیب با G^0 و G^1 ، نشان داده می‌شود و n تعداد کل گام‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. شاخص‌های نامبرده رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند، به عنوان مثال شاخص RMSD به تغییرات در دامنه‌ی امیدانس الکتریکی حساس‌تر است. از سوی دیگر، شاخص CC نسبت به تغییرات شکل امیدانس الکتریکی، مانند تغییر فرکانس، حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. با این حال، همه‌ی آن‌ها به طور قابل توجهی تحت تاثیر تغییرات و آسیب‌های رخ داده در سازه می‌باشند.

۳- کنترل سلامت سازه

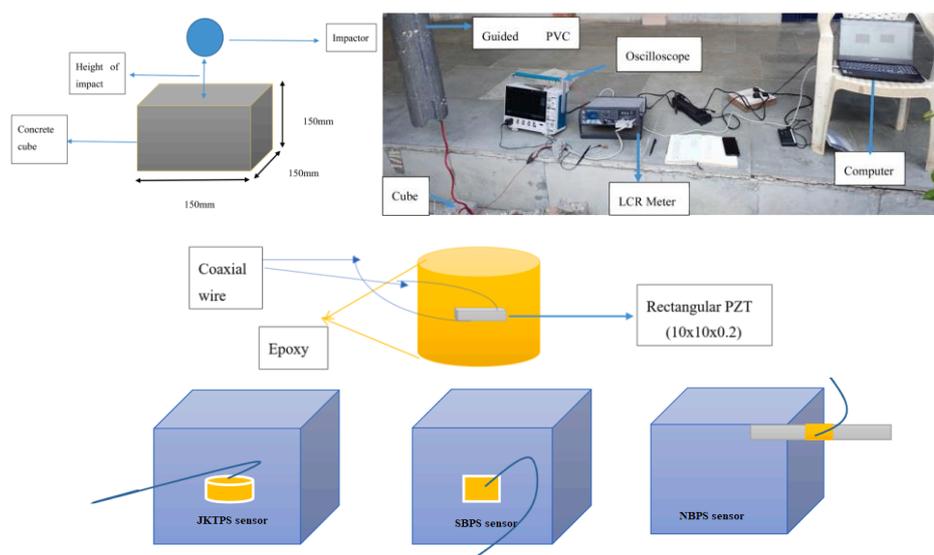
سازه‌ها ممکن است در طول دوره‌ی ساخت و یا بهره‌برداری، به دلیل استفاده، افزایش سن و یا به تأثیر از بارهای دینامیکی مانند باد، زلزله، بارهای ساکن و یا ورود یون‌های مخرب در ساختار آن‌ها، پایداری و دوام خود را از دست بدهند. استراتژی‌های نظارت بر سلامت سازه‌ها¹ (SHM)، برای تشخیص هرگونه نقص یا آسیبی که ممکن است در ساختار سازه‌ها رخ دهد، با استفاده از فناوری‌های جدید، توسعه داده شده‌اند، به طوری که می‌توانند در پروژه‌های ساختمانی جدید یا موجود مورد استفاده قرار گیرند. هدف SHM ارائه‌ی اطلاعات قابل اعتماد در مورد یکپارچگی سازه در زمان واقعی است، تا بتوان درک صحیحی از وضعیت سازه‌ی آسیب‌دیده و اتخاذ روش‌های مناسب برای ترمیم آن داشت (Cabeza et al., 2013). استفاده از تکنیک امیدانس الکترومکانیکی مبتنی بر مواد پیزوالکتریک، می‌تواند سازه‌ها را حتی در مقیاس‌های بزرگ، با استفاده از تغییراتی که در سیگنال‌های دریافتی به وجود می‌آیند، مورد ارزیابی قرار دهد، به طوری که این تغییرات، حتی در اثر آسیب‌های اولیه‌ی (به ویژه ترک‌های اولیه) رخ داده در بتن سخت‌شده نیز، قابل تشخیص هستند.

۳-۱- بررسی سلامت سازه و تشخیص آسیب در بتن، تحت اثر حرارت‌های مختلف و بارگذاری ضربه‌ای

در سال‌های اخیر، سازه‌ها بیش‌تر در معرض بارگذاری‌های دینامیکی مانند حملات تروریستی، امواج انفجاری، زلزله و حوادث صنعتی قرار گرفته‌اند، به طوری که این رویدادها اغلب با آتش‌سوزی نیز همراه می‌باشند. سازه‌های بتنی تحت بارگذاری ضربه‌ای نسبت به سایر بارگذاری‌ها، آسیب شدیدتری می‌بینند و دو نوع شکست موضعی و کلی را تجربه می‌کنند. در صورتی که این آسیب‌ها با افزایش دما همراه باشند، خطرناک‌تر شده و تلفات جانی و مالی بیش‌تری را در پی خواهند شد (Banthia et al., 1989). تأثیر دماهای پایین و بالا بر روی بتن، پیش‌تر توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است (Savva, Manita, & Sideris, 2005; Yang, Zhao, & Liu, 2018; Ye et al., 2012; Potha Raju, Srinivasa Rao, & Raju, 2007; Powęzka, Szulej, & Ogrodnik, 2020; Khan, Prasad, & Abbas, 2013; Lau & Anson, 2006; Abdi Moghadam & Izadifard, 2022). مقاومت بتن در برابر دماهای بالا، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن به عنوان مصالح ساختمانی است، به طوری که هرگونه اختلال در آن باعث ایجاد ترک خوردگی و پوسته‌شدن سطح بتن می‌گردد (Mine, 2011). تحقیقات بسیاری اثر هم‌زمان ضربه و دما را بدون استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک، مورد بررسی قرار داده‌اند، که نتایج آن‌ها نشان دهنده‌ی کاهش ۸۰٪ مقاومت

¹ Structural health monitoring (SHM)

بتن، تحت اثر این دو عامل می‌باشند (Khalique, 2018). تکنیک امپدانس الکترومکانیکی به عنوان روشی نوین، قادر به شناسایی آسیب در طیف گسترده‌ای از دماها می‌باشد. آسیب‌های وارد شده بر سازه در اثر افزایش دما، منجر به تغییر در امپدانس الکترومکانیکی و فرکانس تشدید می‌گردند (Park et al., 1998; Dias et al., 2023). سینگ و همکارانش (Singh et al., 2022)، با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی و سه نوع پیکربندی مختلف برای سنسورهای پیزوالکتریک، به بررسی سلامت سازه و تشخیص آسیب در بتن، تحت اثر حرارت‌های مختلف و بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌ای، یک توپ آهنی به وزن ۵/۴۵ کیلوگرم از ارتفاع ثابتی برابر با ۳ متر، نسبت به سطح بالای نمونه‌های آزمایشی، رها شد. نمونه‌های مکعبی ساخته شده با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر و مقاومت ۲۸ روزه‌ای برابر با ۳۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع، برای رسیدن به دماهای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، در کوره‌ای به ابعاد $605 \times 605 \times 910$ میلی‌متر قرار داده شدند. در این مطالعه از سه نوع پیکربندی مختلف برای سنسورهای پیزوالکتریک استفاده شده بود. مطابق شکل ۱، وصله‌های PZT به ابعاد $10 \times 10 \times 2$ میلی‌متر، از بالا و پایین به وسیله‌ی رزین اپوکسی برای محافظت در برابر آب و شرایط محیطی روکش شدند. این سنسورها به مدت ۲۴ ساعت به منظور گیرش اپوکسی در محیط نگهداری شده و قبل از بتن‌ریزی در مرکز نمونه‌ها قرار داده شدند، به طوری که نهایتاً پیکربندی ایجاد شده با نام (JKTPS)^۱، دارای قطری برابر با ۲۵ میلی‌متر و ارتفاعی برابر با ۲۰ میلی‌متر بود. برای ساخت سنسورهای غیرپیوندی (NBPS)^۲، وصله‌های PZT به وسیله‌ی رزین اپوکسی بر روی سطح تمیز شده‌ی میله‌های آلومینیومی به ابعاد $10 \times 10 \times 1$ میلی‌متر ثابت گشتند، به طوری که دقت ویژه‌ای به منظور اطمینان از پیوند سطحی آن‌ها و انتقال صحیح سیگنال‌ها مبذول شده بود. زیرا انتقال نیرو از وصله‌های PZT، از طریق مکانیسم برشی، توسط لایه‌ی پیوند سطحی انجام می‌پذیرد (Bansal et al., 2021, 2022). نهایتاً میله‌های آلومینیومی به وسیله‌ی اپوکسی به نمونه‌های بتنی چسبانده شدند. همچنین در سنسورهای (SBPS)^۳، وصله‌های PZT مستقیماً به وسیله‌ی اپوکسی با برقراری پیوند سطحی، به نمونه‌ها متصل شده بودند (شکل ۱). برای ثبت قسمت حقیقی ادمیتانس (G) conductance و موهومی ادمیتانس (B) susceptance، در بازه‌ی فرکانسی ۵۰ تا ۶۰۰ کیلوهرتز با استفاده از دستگاه Keysight E4980A Precision LCR meter، ولتاژی برابر با ۱ ولت، به هریک از سنسورهای به کار گرفته شده اعمال شده بود. هر کدام از سنسورها با استفاده از سیم‌های کواکسیال^۴، به دستگاه LRC Meter متصل شده بودند. جدول ۱ و ۲، به ترتیب مشخصات وصله‌های PZT و خلاصه‌ای از نمونه‌های آزمایشی شده با سنسورهای مختلف و تعداد ضربه‌هایی که منجر به شکست آن‌ها در دماهای مختلف شده‌اند را، ارائه می‌دهند.



شکل ۱: مراحل کلی اعمال بارگذاری ضربه‌ای بر نمونه‌ها و قرارگیری سنسورهای مختلف بر روی آن‌ها (Singh et al., 2022)

¹ jacketed piezo sensors (JKTPS)
² non-bonded piezo sensors (NBPS)
³ Surface-bonded piezo sensors (SBPS)
⁴ Coaxial wire

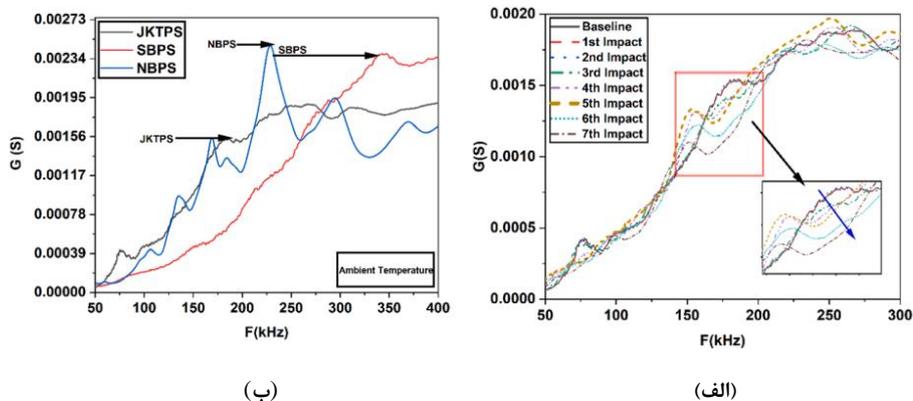
جدول ۱: خلاصه‌ای از پیکربندی سنسورهای مختلف در دمای متفاوت و تعداد ضرباتی که منجر به خرابی شده‌اند (Singh et al., 2022)

S. No.	Sensors Configuration	Height of Impact	Temperature	No. of impact up to failure
1	JKTPS (Embedded)	3 m	Ambient	7
			50 °C	6
			100 °C	7
			150 °C	10
2	SBPS (Surface Bonded)	3 m	Ambient	8
			50 °C	8
			100 °C	7
			150 °C	12
3	NBPS (Non Bonded)	3 m	Ambient	11
			50 °C	11
			100 °C	9
			150 °C	7

جدول ۲: مشخصات وصله‌ی پیزوالکتریک (Singh et al., 2022)

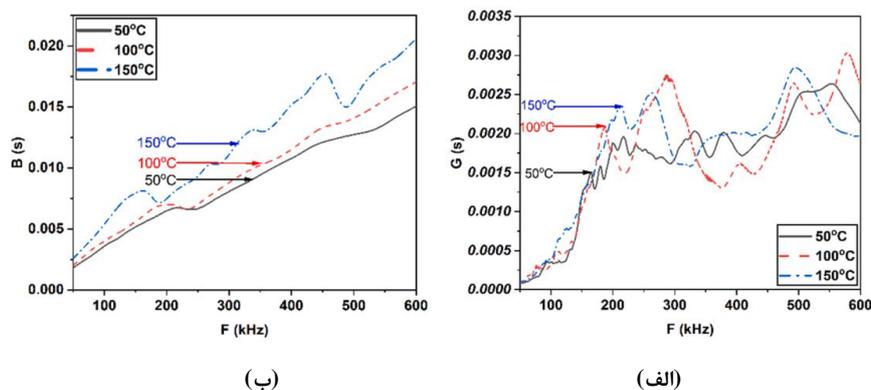
Material parameters Piezoelectric	Value
Piezoelectric charge coefficient $d_{33}(10^{-12} \text{ C/N})$	500
Piezoelectric voltage constants $(g_{33}, 10^{23} \text{ Vm/N})$	21.2
Young's modulus $YE^{33} (10^{10} \text{ N/m})$	5.0
Mechanical quality factor Q_m	76
Curie temp ($^{\circ}\text{C}$)	240
Density (10^3 kg/m^3)	7400
Dielectric constant	2500
Poisson's ratio	0.35
Dissipation factor at 1KHz	0.02

شکل ۲- الف، نمونه‌ای از نمودارهای بدست‌آمده برای قسمت حقیقی ادmittانس در برابر فرکانس را، در شرایطی که هنوز هیچ حرارتی به نمونه‌ها اعمال نشده بود، تحت اثر ضربه‌های متعدد تا خرابی، نشان می‌دهند. تغییرات رخ داده در جرم، میرایی و سختی، ناشی از ایجاد ترک، آسیب، خوردگی و عوامل دیگر با استفاده از قسمت حقیقی ادmittانس به خوبی قابل ارزیابی می‌باشد، به طوری که این پارامتر نقش به‌سزایی را در ارزیابی آسیب وارده بر سازه‌ها ایفا می‌کند. این درحالی است که وضعیت وصله‌ی پیزوالکتریک مورد استفاده، با قسمت موهومی ادmittانس قابل ارزیابی است، بدین صورت که اگر این وصله‌ها در طول آزمایش دچار آسیب گردند، با افزایش فرکانس، تغییرات ناهموار و رو به پایینی را از خود نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست‌آمده برای قسمت حقیقی ادmittانس، در حالتی که نمونه‌ها هنوز تحت هیچ‌گونه حرارت و ضربه‌ای قرار نگرفته‌اند، سنسورهای JKTPS، SBPS و NBPS، به ترتیب اولین اوج خود را در بازه‌های فرکانسی ۳۰۰ تا ۳۷۵ کیلوهرتز، ۱۵۰ تا ۲۲۵ کیلوهرتز و ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوهرتز تجربه کردند، که دلیل تفاوت در بازه‌های ذکرشده، تفاوت در قابلیت حسی این سنسورها با یکدیگر بود (شکل ۲-ب).



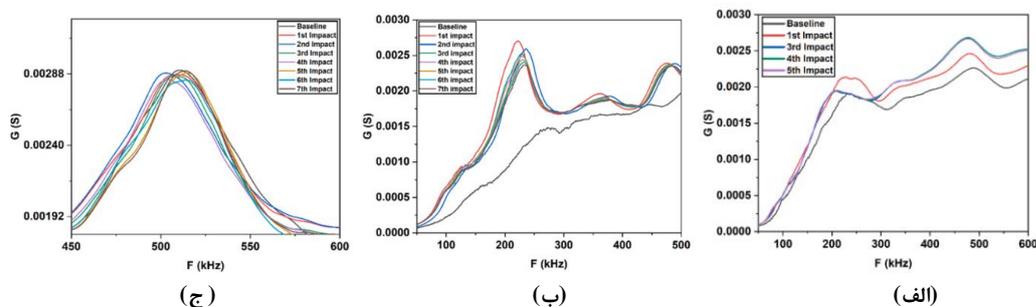
شکل ۲: الف) تغییرات conductance در برابر فرکانس برای سنسور JKTPS در دمای محیط، ب) تغییرات conductance در برابر فرکانس در حالت پایه برای پیکربندی سنسورهای مختلف (Singh et al., 2022)

شکل ۳، نمودارهای بدست آمده برای نمونه‌هایی می‌باشند، که به مدت دو ساعت برای رسیدن به دماهایی برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در داخل کوره گذاشته شده و سپس به مدت یک ساعت در فضای باز به جهت خنک‌شدن، نگهداری شده‌اند. نتایج این بخش دامنه‌های بالاتری را برای قسمت حقیقی و موهومی ادمیتانس، با افزایش دما از خود نشان دادند، که دلیل آن حساسیت هرچه بیشتر سنسورهای پیزوالکتریک به تغییرات دمایی است.



شکل ۳: الف) تغییرات conductance در برابر فرکانس برای سنسور NBPS، ب) تغییرات susceptance در برابر فرکانس برای سنسور SBPS در شرایط دمایی مختلف (Singh et al., 2022)

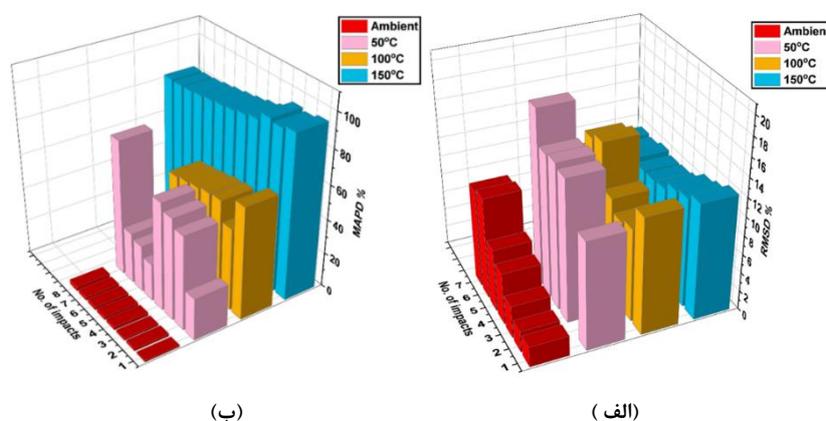
نمودارهای نشان داده شده در شکل ۴، مربوط به نمونه‌هایی می‌باشند که، پس از رسیدن به دمای مورد نظر، تحت اثر بارگذاری ضربه‌ای قرار گرفته‌اند، تا نهایتاً دچار خرابی شوند. در این بخش، تمام سنسورهای مورد استفاده، الگوی یکسانی را دنبال کردند، به طوری که در مقایسه با نمونه‌ی حرارت دیده‌ای که هنوز تحت هیچ بار ضربه‌ای قرار نگرفته بود، پس از وارد شدن اولین ضربه، نمودارها به سمت بالا جابه‌جا شدند، که دلیل آن حرارت اعمال شده به نمونه بیان شده بود. سپس با وارد شدن ضربات دیگر تا زمان رخ دادن خرابی در نمونه‌ها، نمودارها به سمت پایین جابه‌جا شدند.



شکل ۴: الف) تغییرات conductance در برابر فرکانس برای سنسور JKTPS در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ب) تغییرات conductance در برابر فرکانس برای سنسور NBPS در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ج) تغییرات conductance در برابر فرکانس برای سنسور NBPS در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (Singh et al., 2022)

نتایج نشان دهنده‌ی قدرت بالای این تکنیک در ارزیابی سلامت و تشخیص آسیب در سازه‌ها می‌باشند، به طوری که هر دو شاخص RMSD، MAPD، ابزار آماری قابل اعتمادی برای محاسبه‌ی آسیب‌های اولیه و پیشرونده در بتن، تحت اثر بارگذاری ضربه‌ای در دماهای مختلف ارزیابی شدند. در این بررسی مقادیر RMSD و MAPD کمتری، در دماهای مختلف برای سنسور NBPS، به دلیل عدم تماس مستقیم این سنسور با ساختار نمونه‌ی میزبان، نسبت به دو نوع SBPS و JKTPS، ثبت شده بودند. حال آنکه سنسورهای تعبیه‌شده در داخل نمونه‌ها (JKTPS)، نتایج دقیق‌تری را به دلیل تماس هر چه بیشتر با ساختار مورد بررسی، ارائه دادند. هر یک از شاخص‌های RMSD و MAPD، از الگوی متمایزی در دماهای بالا (۱۵۰ درجه‌ی

سانتیگراد)، برای هر یک از سنسورها پیروی کردند، در حالی که مقادیر MAPD از الگوی هماهنگ‌تری نسبت به مقادیر RMSD تبعیت می‌کردند (شکل ۵).



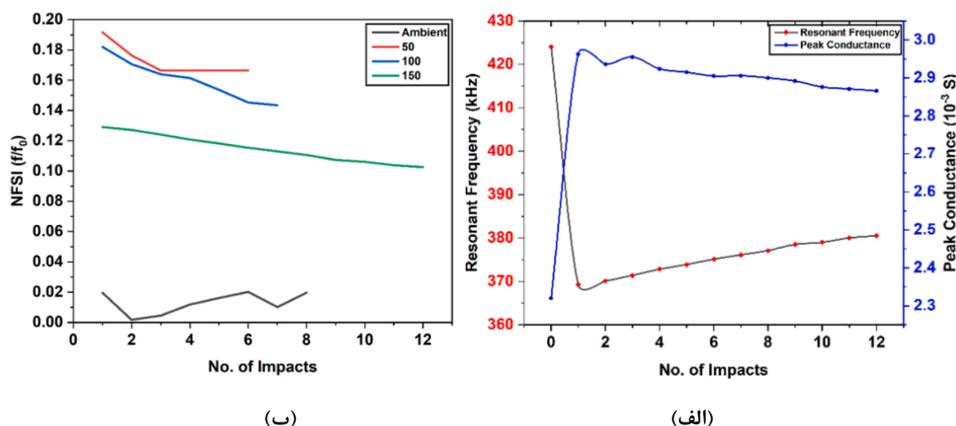
شکل ۵: الف) مقدار RMSD برای سنسور JKTPS با افزایش تعداد ضربات وارده برای دماهای مختلف، ب) مقدار MAPD برای سنسور SBPS با افزایش تعداد ضربات وارده برای دماهای مختلف (Singh et al., 2022)

با توجه به تغییر رخ داده در پیک‌های فرکانس تشدید با افزایش تعداد ضربات وارده، در این مطالعه شاخص بدون بعدی به نام NFSI^۱، با هدف بررسی این تغییرات نسبت به حالت پایه، با در نظرگیری هر دو عامل حرارت و بارگذاری ضربه‌ای، تعریف شد. به طوری که در شاخص NFSI متناظر با ضربه n ام، مقدار Δf نشان‌دهنده تغییر در فرکانس تشدید می‌باشد. این مقدار با اختلاف فرکانس تشدید رخ داده در ضربه n ام و فرکانس تشدید در حالت پایه، که نمونه‌ی حرارت‌دیده هنوز تحت تاثیر هیچ ضربه‌ای قرار نگرفته است، برابر می‌باشد. همچنین f_0 فرکانس تشدید در حالت پایه می‌باشد.

$$NFSI_{nth} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (6)$$

شاخص NFSI، با افزایش حرارت و تعداد ضربات وارده، به دلیل کاهش مقاومت نمونه‌های بتنی، روندی کاهشی را نشان داد. همچنین فرکانس تشدید و مقدار اوج conductance ثبت‌شده، با افزایش تعداد ضربات وارده، الگویی خلاف یکدیگر ارائه نمودند، به طوری که این رابطه در دماهای بالا نیز، همچنان برقرار بود. فرکانس تشدید در دماهای مختلف، با وارد شدن اولین ضربه، ابتدا کاهش یافته و پس از آن افزایش یافت، در حالی که عکس این روند برای مقدار اوج conductance قابل مشاهده بود. در این بررسی رفتار کاهشی مشاهده‌شده در مقدار conductance، به دلیل افزایش عرض و عمق ترک‌ها و کاهش سختی نمونه، ناشی از افزایش تعداد ضربات وارده بود. همچنین از دست دادن میرایی پس از برخورد اولین ضربه به نمونه، دلیل افزایش اولیه‌ی رخ داده در فرکانس تشدید ارزیابی شده بود (شکل ۶) (Negi et al., 2019).

^۱ normalized frequency shift index



شکل ۶: الف) تغییر فرکانس تشدید و اوج conductance با افزایش تعداد ضربات برای سنسور SBPS در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ب) تغییر شاخص NFSI با افزایش تعداد ضربات برای سنسور NBPS در دمای محیط و حرارت‌های مختلف (Singh et al., 2022)

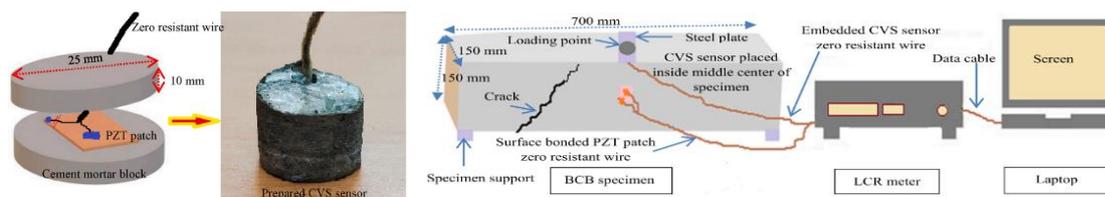
۲-۳- بررسی سلامت سازه و ارزیابی کیفی ترمیم ترک‌ها، در بتن باکتریایی

وجود ترک در سازه سبب کاهش استحکام آن می‌شود و در صورت عدم بازسازی آن‌ها در بازه‌ی زمانی مناسب، ممکن است سازه دچار فروریزش گردد. ادغام باکتری در مخلوط بتن با هدف تولید CaCO_3 یکی از روش‌های موثر برای ترمیم ترک‌ها و جلوگیری از رشد آن‌ها و حفظ دوام و عملکرد سازه می‌باشد (Tziviloglou et al., 2016; Luo & Qian, 2016). پس از ترمیم ترک یا آسیب وارد شده بر سازه، باید از میزان بهبود آسیب مورد نظراطمینان حاصل نمود. از آنجا که تکنیک‌های مرسوم، توانایی اندازه‌گیری میزان ترمیم را به صورت دقیق ندارند و به آسیب‌های اولیه حساس نیستند، روش امپدانس الکترومکانیکی EMI می‌تواند روش جایگزین خوبی برای رفع این چالش‌ها باشد. موریوا و همکارانش (Maurya et al., 2023)، به بررسی سلامت سازه و ارزیابی کیفی ترمیم ترک‌ها، در نمونه‌های تیر بتنی مسلح باکتریایی، با به کارگیری تکنیک امپدانس الکترومکانیکی و با استفاده از سنسورهای PZT، به دو صورت متصل به سطح سازه و سنسورهای تعبیه شده در بتن^۱، پرداختند. پس از قرار دادن سنسورهای PZT (جدول ۳) در بین ملات سیمان مطابق با شکل ۷، قطعات CVS ساخته شده به قطر و ارتفاعی به ترتیب برابر با ۲۵ و ۲۰ میلی‌متر، به مدت ۷ روز عمل‌آوری شده و سپس در مرکز هر نمونه، در زمان آماده‌سازی آن، به جهت ارزیابی آسیب و ترک‌های داخلی قرار داده شده بودند. همچنین قطعات PZT متصل شده به سطح سازه، دارای ابعادی برابر با $10 \times 10 \times 0.3$ میلی‌متر بودند، که پس از گذشت ۲۸ روز از عمل‌آوری نمونه‌ی ساخته شده، به وسیله‌ی اپوکسی‌ای با استحکام بالا، در مرکز تیر و روی سطح آن چسبانده شدند. لازم به ذکر است که سنسورهای سطحی ممکن است با کوچک‌ترین ضربه‌ی ناشناخته‌ای آسیب ببینند، به طوری که در چنین شرایطی امکان نصب مجدد وصله‌ی سالم، و به کارگیری مجدد آن‌ها وجود ندارد، به همین دلیل سنسورهای CVS، ایمن‌تر از انواع سطحی آن‌ها می‌باشند. اما باید قبل از مرحله‌ی بتن‌ریزی در محل مناسب نصب گردند زیرا امکان جایگذاری آن‌ها پس از سفت شدن بتن وجود ندارد. جهت ایجاد آسیب در سازه‌های مسلح ساخته‌شده، روش بارگذاری سه نقطه‌ای^۲، برای اعمال بارهای ۱۰ کیلوتن (LR1) تا ۹۰ کیلوتن (LR9)، به صورت بازه‌هایی با فاصله‌ی ۱۰ کیلوتن، به کار گرفته شده بود. شکل ۷، نمایی کلی از انجام این آزمایش را، بر روی یکی از شش قطعه‌ی مورد مطالعه، نشان می‌دهد، که برای مسلح‌سازی آن‌ها از میلگردهایی با قطر ۱۲ میلی‌متر و خاموت‌هایی با قطر ۸ میلی‌متر استفاده شده بود. در این بررسی باکتری گرم مثبت باسیلوس سوبتیلیس^۳ جهت ترمیم ترک‌ها، در آب مخلوط بتن ادغام شده بود.

¹ concrete vibration sensor (CVS)

² Three-point flexural test

³ Bacillus subtilis

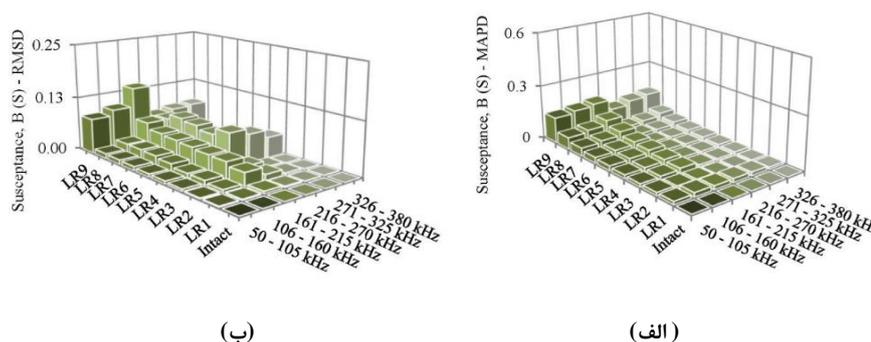


شکل ۷: شماتیک آزمایش بررسی ترمیم ترک از طریق تکنیک EMI و ساخت CVS (Maurya et al., 2023)

جدول ۳: مشخصات مکانیکی وصله پیزو (Maurya et al., 2023)

Parameters	Notations	Quantity
PZT size, m x m	l x w	0.01 x 0.01
PZT thickness, m	H	0.0003
Density, kg/m ³	ρ	7800
Young's modulus, x 10 ¹⁰ N/m ²	γ^E	6.667
Piezoelectric strain coefficient, x 10 ⁻¹⁰ m/V	d_{31}	-2.10
Compliance, x 10 ⁻¹² m ² /N	S_{11}	15.00
Electric permittivity, x 10 ⁻⁸ F/m	ϵ_{11}^T	1.750
Mechanical loss factor	η	0.0325
Dielectric loss factor	δ	0.02

قسمت حقیقی و موهومی ادمیتانس برای هر دو سنسور به کار گرفته شده، با استفاده از دستگاه LRC meter (IM3536, HIOKI) در بازه‌ی فرکانسی ۳۰ کیلوهرتز تا ۴۰۰ کیلوهرتز، اندازه‌گیری شده بودند. همچنین در این بررسی از چهار شاخص آسیب، انحراف جذر میانگین مربعات (RMSD)، میانگین درصد مطلق انحراف‌ها (MAPD)، کواریانس (COV) و ضریب همبستگی (CC) استفاده شده است. برای تمام بارگذاری‌ها، فرکانس‌هایی برابر با ۵۰ تا ۳۸۰ کیلوهرتز به صورت بازه‌هایی به طول ۵۵ کیلوهرتز اعمال شده و نهایتاً برای هر دو نوع سنسور، مقادیر حقیقی و موهومی ادمیتانس، در شرایط دمایی ۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد به منظور عدم ایجاد تغییر در مواد، اندازه‌گیری شده بود. با هدف ایجاد اطمینانی برابر با ۹۶٪ و کاهش خطای آزمایش، برای هر نمونه، ۳ بار آزمایشات تکرار شده و از میانگین آن‌ها استفاده شده است. برای هر دو مقدارهای حقیقی و موهومی ادمیتانس بدست‌آمده در بازه‌های فرکانسی اعمال شده، شاخص‌های خرابی نامبرده، برای هر دو سنسور استفاده شده، محاسبه شده بودند (شکل ۸).

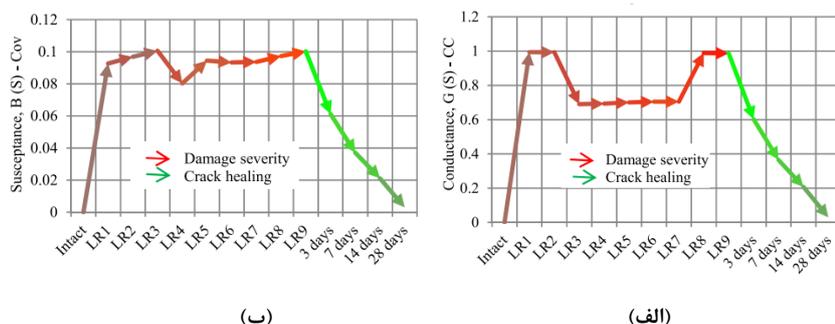


شکل ۸: الف) شاخص MAPD محاسبه شده با استفاده از قسمت موهومی ادمیتانس برای سنسور PZT متصل شده به سطح سازه

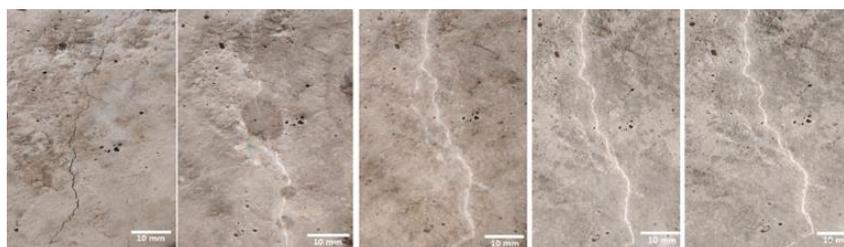
ب) شاخص RMSD محاسبه شده با استفاده از قسمت موهومی ادمیتانس برای سنسور CVS (Maurya et al., 2023)

نتایج بدست‌آمده از هر دو سنسور نشان دادند که، با افزایش شدت خرابی‌ها در یک باند فرکانسی مشخص، میزان شاخص‌های خرابی افزایش می‌یابند. در این مطالعه، باند فرکانسی زمانی بهینه در نظر گرفته شد که در آن بازه، شاخص‌های آسیب بیش‌ترین حساسیت را نسبت به آسیب‌های وارده نشان دادند. شیب خط، در مدل خطی برازش داده شده بین شاخص و

شدت آسیب، نشان‌دهنده‌ی حساسیت بوده و از این رو باند فرکانسی با حداکثر شیب، همان باند فرکانسی بهینه در نظر گرفته شد. به این ترتیب باند فرکانسی ۱۶۱ تا ۲۱۵ کیلوهرتز، به دلیل داشتن بیش‌ترین شیب و بالاترین حساسیت، به عنوان باند فرکانسی بهینه لحاظ شد. تغییر در مقدار شاخص‌های خرابی بدست‌آمده با استفاده از مقادیر حقیقی و موهومی ادمیتانس، نشان‌دهنده‌ی وجود خرابی و ترک در سازه می‌باشد، به طوری که اگر تغییری رخ ندهد نشان‌دهنده‌ی عدم خرابی است. حال آنکه بیش‌ترین مقدار شاخص، نشان‌دهنده‌ی شدیدترین خرابی در آن بازه‌ی فرکانسی می‌باشد. در بین شاخص‌های خرابی، ضریب همبستگی به دلیل حساسیت بالا و نشان‌دادن نوسان‌ها و تغییرات بیش‌تر، بهترین شاخص برای شناسایی ترک و آسیب در سازه است. در این بررسی پس از یافتن باند فرکانسی بهینه، با هدف ارزیابی میزان ترمیم ترک‌ها با استفاده از باکتری‌های موجود در مخلوط بتن در حضور کربن دی‌اکسید و رطوبت، تغییرات قسمت موهومی و حقیقی ادمیتانس در این بازه مورد بررسی قرار گرفتند. پس از ایجاد ترک در نمونه‌ها با استفاده از بارگذاری‌های مختلف، نمونه‌ها در داخل آب به منظور ترمیم ترک‌های ایجادشده عمل‌آوری شدند و در روزهای ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ عمل‌آوری آن‌ها، مقادیر حقیقی و موهومی ادمیتانس و متعاقباً شاخص‌های خرابی نظیر آن‌ها، اندازه‌گیری شدند (شکل ۹). نتایج بدست‌آمده از سنسورهای PZT متصل به سطح سازه و CVS مدفون در سازه، به ترتیب حاکی از خود ترمیمی ترک‌های سطحی و ترک‌های داخلی بودند. همچنین لازم به ذکر است که، تصاویر SEM و XRD^۲، نتایج بدست‌آمده در این مقاله را، هم برای ترک‌های سطحی و هم برای ترک‌های داخلی تایید کردند (شکل ۱۰).



شکل ۹: الف) بررسی عملکرد بهبود از نظر شاخص آسیب CC محاسبه شده با استفاده از قسمت حقیقی ادمیتانس در باند فرکانس بهینه برای سنسور سطحی PZT، ب) بررسی عملکرد بهبود از نظر شاخص آسیب COV با استفاده از قسمت موهومی ادمیتانس در باندهای فرکانسی بهینه برای سنسور CVS تعبیه شده در سازه (Maurya et al., 2023)



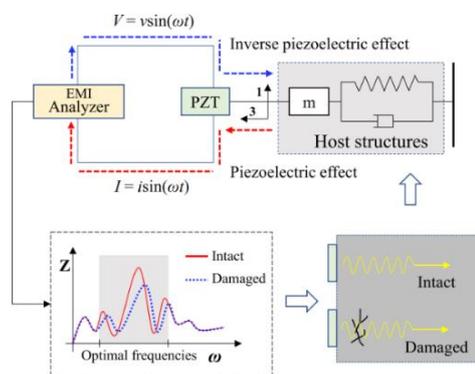
شکل ۱۰: به ترتیب از چپ به راست، ترکی به عرض ۰/۳۱ میلی‌متر و روند ترمیم آن پس از ۳ روز، ۷ روز، ۱۴ روز و نهایتاً پس از ۲۸ روز (Maurya et al., 2023)

¹ Spectroscopic electron microscope
² X-ray diffraction

۳-۳- کنترل سلامت تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP

با توجه به اینکه تخریب در سازه‌های بتنی مسلح تحت اثر عوامل محیطی و بارهای مکانیکی می‌تواند ایمنی سازه و سرویس‌دهی آن را مختل کند، مقاوم‌سازی و تقویت سازه‌ها نسبت به جایگزینی کامل آن‌ها، از جهت مصرف کم منابع و انرژی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از پلیمرهای فیبرکربن^۱ و یا پلیمرهای تقویت شده با الیاف^۲، به دلیل خواص مکانیکی خوبی که دارند، یکی از روش‌های قابل اعتماد برای مقاوم‌سازی و تقویت سازه‌ها می‌باشد. یکی از کاربردهای CFRP و FRP، اتصال آن‌ها به سطح خارجی نمونه بتنی بوده، که به عنوان تقویت‌کننده کششی تاثیر به سزایی در تقویت خمشی و برشی تیرهای بتنی دارد (Hu et al., 2020; Kotynia et al., 2021; Naser et al., 2019; Yuan et al., 2012; Guo et al., 2005; Dai et al., 2021; Zou et al., 2021; Lu et al., 2006; Biscaia et al., 2015). قرارگرفتن در معرض عوامل محیطی و بارهای مکانیکی می‌تواند باعث تخریب سطح اتصال بین CFRP یا FRP ها با بتن شود و نهایتاً منجر به شکست زود هنگام سازه بتنی تقویت شده با این پلیمرها گردد.

استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی برای ارزیابی سطح اتصال بین بتن و FRP یا CFRP، به دلیل دقت بالا و قابلیت اعتماد آن در شناسایی تغییرات ساختاری، به‌طور گسترده‌ای مورد توجه محققین قرار گرفته است (Zapris et al., 2023; Li et al., 2023). زو و همکارانش (Zhu et al., 2023)، سلامت تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP را، در شرایطی که نمونه‌ها در معرض بارهای طولانی مدت، و چرخه‌های مرطوب و خشک شدن‌های^۳ متوالی قرار می‌گیرند، با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی EMI مورد بررسی قرار دادند. تکنیک‌های نظارتی مختلفی برای اطمینان از اثر بخشی تقویت سازه‌ها با استفاده از FRP و یا CFRP، از جمله ترموگرافی (Zou et al., 2021; Ghosh & Karbhari, 2011)، حسگرهای فیبر نوری (Antonucci et al., 2005)، روش‌های مبتنی بر موج (Perera et al., 2017; Wang et al., 2019; Jiang et al., 2019) و روش امپدانس الکترومکانیکی EMI (Park et al., 2011; Sun et al., 2015; Deng et al., 2021) وجود دارند. با این حال در بین روش‌های ذکر شده، روش EMI مبتنی بر مواد پیزوالکتریک، به عنوان یک جایگزین خوب و آینده‌نگر، برای نظارت طولانی مدت بر وضعیت اتصال سطحی بتن با CFRP یا FRP، ظاهر شده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: نمایش شماتیک یک سیستم تک بعدی به عنوان ساختار میزبان مجهز به PZT (Zhu et al., 2023)

هنگامی که نمونه دچار آسیب می‌شود، استحکام در محل آسیب کاهش می‌یابد و باعث کاهش امپدانس می‌شود. همچنین در صورت جذب آب، امپدانس افزایش خواهد یافت. بازه‌ی فرکانسی مناسب جهت بررسی یک نمونه با استفاده از تکنیک EMI، تحت تاثیر ساختار نمونه‌ی میزبان و آسیب رخ داده است (Tseng & Naidu, 2002; Annamdas & Radhika, 2013; Hu)

¹ Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)

² fiber-reinforced polymer (FRP)

³ wetting-drying (WD)

(Yang, 2007) و باید طوری انتخاب گردد، که طول موج تنش، کمتر از طول مشخصه‌ی آسیب باشد، تا پاسخ‌های بدست‌آمده با استفاده از این تکنیک حساسیت خوبی نسبت به آسیب رخ داده داشته باشند (Giurgiutiu & Rogers, 1998).

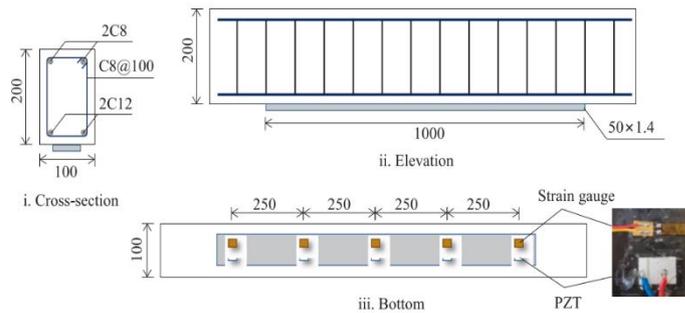
یکی از راه‌های عملی، برای یافتن بازه‌ی فرکانسی مناسب، استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی در محدوده‌ی وسیعی از فرکانس‌ها برای سازه‌ی مورد نظر می‌باشد، به طوری که پس از آن، بازه‌ی فرکانسی با حساسیت بالا، به عنوان محدوده‌ی فرکانسی مناسب، استخراج می‌شود. بر اساس مطالعات انجام‌شده، محدوده‌ی فرکانسی ۱۰۰-۵۰۰ کیلوهرتز، برای مشخص کردن آسیب‌های سطحی‌ای که بین CFRP و بتن رخ داده است، مناسب می‌باشد (Zhu et al., 2022). در این بررسی زو و همکارانش، شش تیر بتنی به ابعاد $1500 \times 200 \times 100$ میلی‌متر را، که برای ساخت و مسلح‌سازی آن‌ها، به ترتیب از مخلوط بتن آماده C30 و میلگردهایی به قطر ۱۲ و ۸ میلی‌متر و خاموت‌هایی به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شده بود، از جهت سلامت ناحیه‌ی اتصال سطحی با پلیمرهای فیبر کربن به کار گرفته شده، مورد بررسی قرار دادند. از آن‌جا که مسلح‌سازی این تیرها به گونه‌ای بود که، نسبت آرماتورگذاری ۱/۹٪ را در مقطع ایجاد می‌کرد، شکست خمشی‌ای با شکل‌پذیری معمولی برای نمونه‌ها پیش‌بینی شده بود. همچنین تمامی تیرهای ساخته‌شده، در حالت خمشی با اتصال CFRP هایی به ابعاد $100 \times 1/4 \times 50$ میلی‌متر، در قسمت زیرین خود به کمک اپوکسی، تقویت شده بودند (شکل ۱۲) در هر نمونه، پنج مبدل PZT، بر روی CFRP نصب شده بودند و توسط پوشش‌های پلاستیکی، برای محافظت از آن‌ها در برابر رطوبت، پوشانده شده بودند.

روند اتخاذشده برای چرخه‌های تر و خشک‌شدن‌های متوالی، شامل ۱۰ ساعت غوطه‌وری در مخلوط سدیم کلرید ۳/۵٪ و ۱۴ ساعت خشک‌شدن در هوایی با دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود. منحنی‌های امپدانس در بازه‌ی فرکانسی ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز، پس از هر بار طی شدن این چرخه‌ها، به مدت ۱۸۰ روز برای نمونه‌هایی که تنها در معرض این چرخه‌ها قرار داشتند و به مدت ۲۷۰ روز برای نمونه‌هایی که علاوه بر چرخه‌های ذکرشده، تحت تاثیر بارگذاری طولانی مدت نیز بودند، بدست آمدند و متعاقباً شاخص آسیب RMSD برای آن‌ها محاسبه گشته بود (جدول ۴) (شکل ۱۳). جهت اعمال بارگذاری طولانی مدت، مطابق شکل ۱۳، یک جفت تیر تقویت‌شده، به طوری که سطح کششی آن‌ها رو به روی یکدیگر بود، روی هم قرار گرفتند و توسط تکیه‌گاه‌های انتهایی از هم جدا شدند. طبق نمونه‌های آماده‌شده مطابق جدول ۴، نمونه‌های BS(#) تنها تحت بارگذاری طولانی مدت قرار گرفتند، در حالی که نمونه‌های BSH(#)، علاوه بر قرارگیری تحت بارگذاری طولانی مدت، در معرض چرخه‌های غرقاب‌شدن و خشک‌شدن نیز قرار گرفتند، تا اثر هم‌زمان این دو پدیده مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۴: آزمایش‌های فرسایشی برای نمونه‌های ساخته‌شده (Zhu et al., 2023)

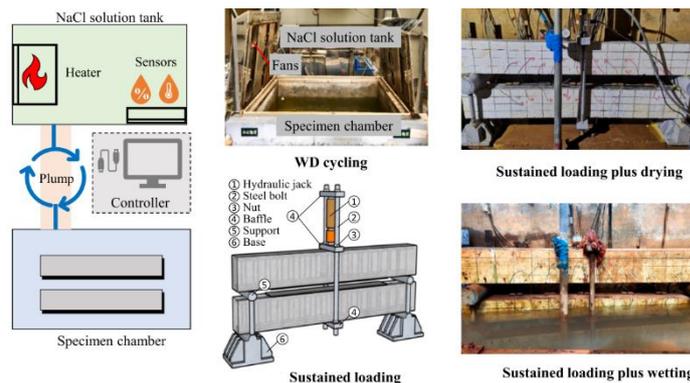
Aging tests for strengthened beams.			
ID	WD cycling (days)	Sustained loading (days)	Note
BO	/	/	Reference beam
BH	180	/	Allow to study effects of hydrothermal conditioning
BS	270	/	Allow to study effects of sustained
BS#	270	/	loading
BSH	270	270	Allow to study effects of hydrothermal
BSH#	270	270	conditioning and sustained loading

Note: In specimens' identification, B, H and S represent beam, hydrothermal conditioning and sustained loading, respectively, and # indicates the parallel specimen.

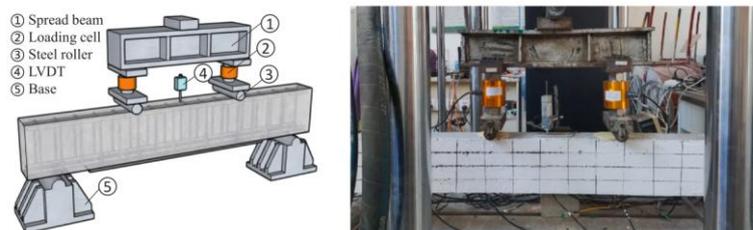


شکل ۱۲: تیر بتنی مسلح که به CFRP مجهز شده است (Zhu et al., 2023)

در نهایت با هدف بررسی عملکرد سطح اتصال بین بتن و CFRP، آزمون خمش ۴ نقطه‌ای^۱ بر روی نمونه‌هایی که در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن و بارگذاری طولانی مدت قرار گرفته بودند و همچنین نمونه‌ی مرجع، انجام شد. این آزمایش به صورت کنترل‌شونده توسط نیرو، با سرعت بارگذاری‌ای برابر با ۴ کیلونیوتن بر دقیقه انجام شده بود. پاسخ‌های EMI برای این نمونه‌ها، در بازه‌ی فرکانسی ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز ثبت گردیدند. لازم به ذکر است در هر گام، هنگام ثبت نتایج EMI، بارگذاری خمشی در آن سطح مشخص، متوقف شده بود (شکل ۱۴).



شکل ۱۳: روند چرخه‌ی تر و خشک شدن و اعمال بارگذاری طولانی مدت (Zhu et al., 2023)

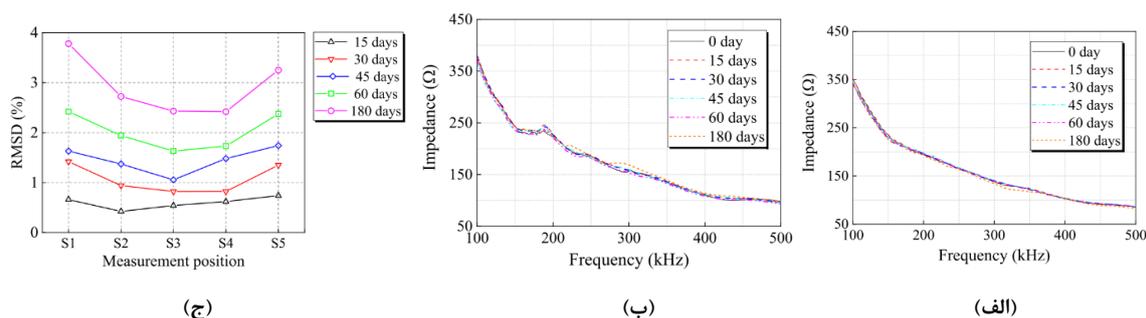


شکل ۱۴: آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای (Zhu et al., 2023)

منحنی‌های EMI مربوط به نمونه‌های BH، که تنها تحت تاثیر چرخه‌های متوالی غوطه‌وری و خشک شدن قرار گرفته بودند، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن بودند که، تغییرات رخ داده در این منحنی‌ها در قسمت انتهایی

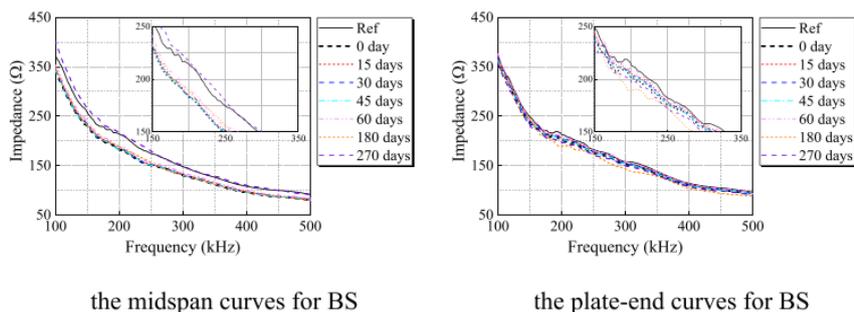
¹ Four- point- bending test

صفحه‌ی CFRP نسبت به وسط دهانه، بسیار قابل توجه‌تر است. منحنی EMI مربوط به انتهای صفحه‌ی CFRP، در روز ۴۵ ام، تغییرات جزئی را از خود نشان داد، حال آنکه این منحنی‌ها پس از گذشت ۱۸۰ روز، به طرز محسوسی تغییر کرده بودند. این امر نشان‌دهنده‌ی تخریب قابل توجهی در پیوند و تغییرات جرم در سطح مشترک بتن و CFRP، به دلیل جذب آب توسط چسب و بتن بود. تخریب پیوند در فصل مشترک بتن و CFRP، منجر به کاهش EMI خواهد شد، حال آنکه جذب آب باعث افزایش امپدانس می‌گردد. بنابراین اثرات معکوس این دو موضوع بر پاسخ‌های EMI، می‌تواند تا حدی با یکدیگر تداخل داشته باشند. با افزایش تعداد این چرخه‌ها، شاخص خرابی RMSD محاسبه‌شده برای تیرهای BH، روندی افزایشی را از خود نشان داد. این روند افزایشی، برای انتهای صفحات CFRP بیش‌تر از مرکز آن بود، که این موضوع نشان‌دهنده‌ی تخریب بیش‌تر در اثر چرخه‌های ذکرشده، به دلیل دسترسی آسان‌تر به رطوبت و آب، می‌باشد.

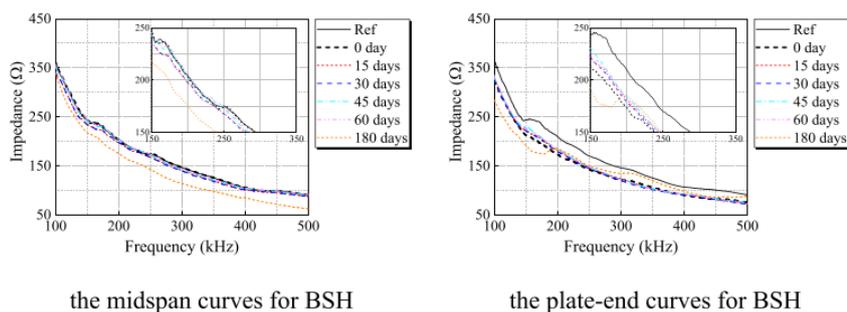


شکل ۱۵: منحنی‌های امپدانس الکترومکانیکی (الف) در دهانه‌ی میانی، (ب) انتهای صفحه‌ی CFRP برای تیرهای BH در طول چرخه‌ی WD، (ج) شاخص خرابی RMSD برای نمونه‌ی BH در طول چرخه‌ی WD (Zhu et al., 2023)

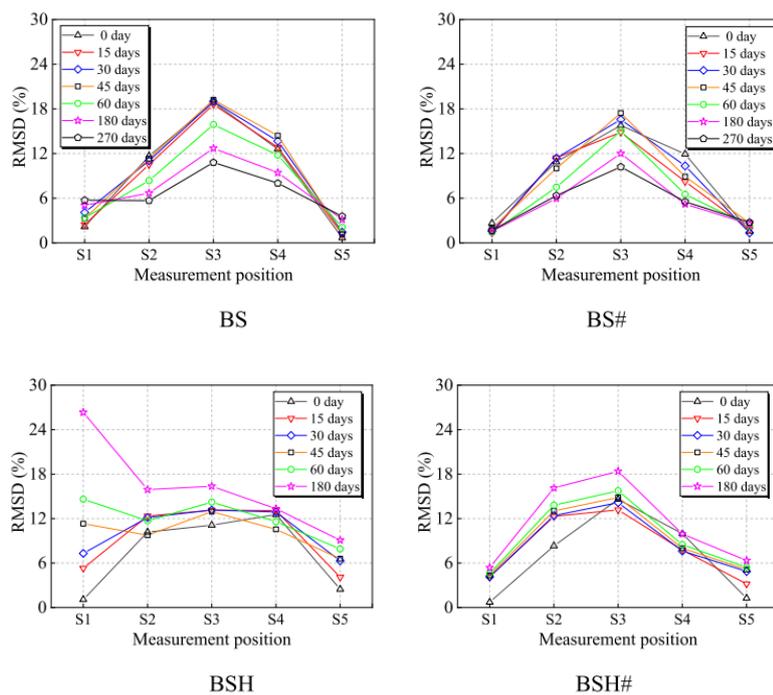
شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب نمونه‌هایی از نمودارهای EMI و شاخص خرابی RMSD بدست‌آمده برای نمونه‌های BS(#) و BSH(#) و همچنین نمونه‌ی مرجع را، نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در نمونه‌های BSH و BSH#، نتایج مربوط به روز ۲۷۰ ام به دلیل از کار افتادن سنسورهای PZT، در اثر قرارگرفتن در معرض هر دو عامل مخرب بارهای طولانی مدت و چرخه‌های تر و خشک‌شدن، قابل ثبت نبودند. پس از اعمال بارگذاری طولانی مدت بر نمونه‌های BS، منحنی‌های EMI یک تغییر رو به پایین را نشان دادند، که این امر نشان‌دهنده‌ی وقوع آسیب سطحی می‌باشد، به طوری که این تغییرات در وسط دهانه نسبت به انتهای صفحات CFRP، به دلیل ترک‌خوردگی و انحراف قابل توجهی که در وسط دهانه پس از بارگذاری طولانی مدت رخ می‌دهد، آشکارتر است. اما با توسعه‌ی خواص بتن، کاهش رخ داده در منحنی‌های EMI می‌تواند خنثی شود، به طوری که این منحنی‌ها می‌توانند به سطح قبل از بارگذاری، یعنی همانند نمودار مربوط به نمونه مرجع، بازیابی شوند. از آنجا که بازرسی‌های صورت‌گرفته از نمونه‌های BSH، حاکی از آغاز جدا شدن اتصال CFRP از بتن در انتهای این صفحات بودند، منحنی‌های مربوط به این نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های BS، به طور قابل توجه‌تری به سمت پایین در حال تغییر بودند. لازم به ذکر است که اگر این جدایی در انتهای صفحه‌ی CFRP رخ دهد، شکل نمودار EMI نیز تغییر خواهد کرد. با توجه به شکل ۱۷، می‌توان افزایش مداومی را در شاخص خرابی RMSD، در قسمت میانی و انتهای صفحه‌ی CFRP، برای نمونه‌های BSH و BSH# مشاهده کرد، این امر نشان‌دهنده‌ی تخریب ناشی از چرخه‌های متوالی تر و خشک‌شدن، در سطح اتصال CFRP و بتن می‌باشد، که در واقع چنین رشد قابل توجهی، به دلیل جدا شدن سطح مشترک چسب و بتن رخ داده است.



شکل ۱۶: نمودارهای EMI برای نمونه‌های BS و BSH در طول اعمال بارگذاری بلند مدت (Zhu et al., 2023)



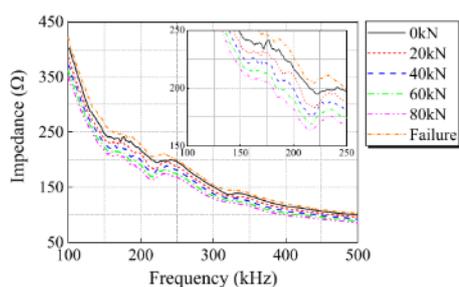
ادامه‌ی شکل ۱۶: نمودارهای EMI برای نمونه‌های BS و BSH در طول اعمال بارگذاری بلند مدت (Zhu et al., 2023)



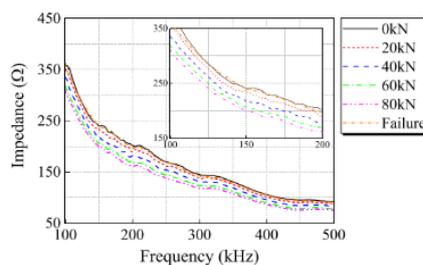
شکل ۱۷: شاخص آسیب RMSD برای تیرهای BS (#) و BSH# (Zhu et al., 2023)

شکل ۱۸، نمونه‌هایی از منحنی‌های EMI بدست آمده برای تیرهای تقویت شده را، در طول آزمایش خمش نشان می‌دهد. منحنی‌های مربوط به نمونه‌ی مرجع (B0) تحت اثر خمش، تغییر قابل توجهی را به سمت پایین، با افزایش نیروی اعمالی از خود نشان می‌دهند، که دلیل آن را می‌توان ترک خوردگی در بستر بتنی و آسیب در نزدیکی این ترک‌ها دانست. جدا شدن صفحات CFRP باعث تغییر در امپدانس الکترومکانیکی بدست آمده در نزدیکی انتهای این صفحات می‌شود. در این بررسی، قبل از اینکه

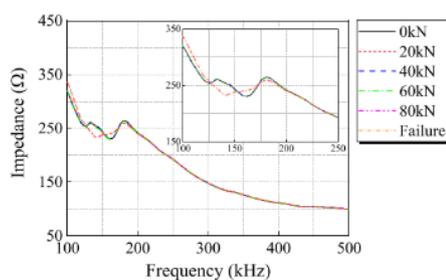
پیوند میان صفحات CFRP و بتن از بین برود، تغییرات جزئی در نمودارهای EMI بدست آمده برای انتهای این صفحات، ثبت شده بود. با این حال، این منحنی‌ها برای نمونه‌های BSH و BSH# در طول آزمایش‌های خمشی تغییر ناچیزی داشتند، زیرا ترک‌ها و آسیب‌های سطحی، در طول بارگذاری طولانی مدت و چرخه‌های تر و خشک شدن، رخ داده بودند. شاخص خرابی RMSD در این حالت، تا زمانی که شکست در اثر اعمال بار در آزمایش خمشی رخ دهد، روندی افزایشی داشت. شاخص RMSD نشان‌دهنده آسیب، ناشی از بارهای اعمال شده در هنگام شکست است و برای بازیابی تغییر شکل نمونه پس از شکست دارای اعتبار می‌باشد. در صورتی که تیرهای تقویت شده در معرض بارگذاری طولانی مدت و چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی قرار گیرند، انتقال تنش سطحی به طور قابل توجهی دچار اختلال می‌شود، که این امر می‌تواند با کاهش مقدار RMSD در قسمت میانی و انتهای صفحه منعکس شود. این امر نشان‌دهنده این است که روش EMI، در نظارت بر وضعیت سطح بین بتن و صفحات CFRP بسیار موثر است (شکل ۱۹). شکل ۲۰-ج، تفاوت شاخص آسیب RMSD بین دهانه‌ی میانی و انتهای صفحه CFRP را برای تیرهای تقویت شده در طول آزمایشات خمشی نشان می‌دهد، به طوری که بیشترین مقدار شاخص در دو انتهای صفحه، در محاسبه این اختلاف، برای هر تیر استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش این اختلاف با افزایش نیروی اعمالی بودند، در حالی که نمودار مربوط به نمونه‌ی مرجع B0، دارای بیشترین شیب در بین نمودارهای بدست آمده بود. نتایج نشان دادند که اگر تیرهای تقویت شده، از آسیب قابل توجهی، مانند نمونه‌های BSH و BSH# رنج ببرند، تفاوت در مقدار شاخص آسیب RMSD، بین مکان‌های مختلف در طول بارگذاری، بیش از ۳/۶٪ نیست. نتیجه‌ی این یافته، برای تخمین وضعیت سطحی، در تیرهای موجود تقویت شده با صفحات CFRP بسیار سودمند می‌باشد، به ویژه برای مواردی که نمی‌توان تاریخچه‌ی امپدانس را برای نمونه‌ی مورد بررسی بدست آورد (شکل ۲۰).



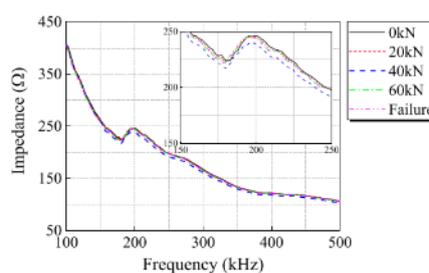
the midspan curves for BS



the midspan curves for B0

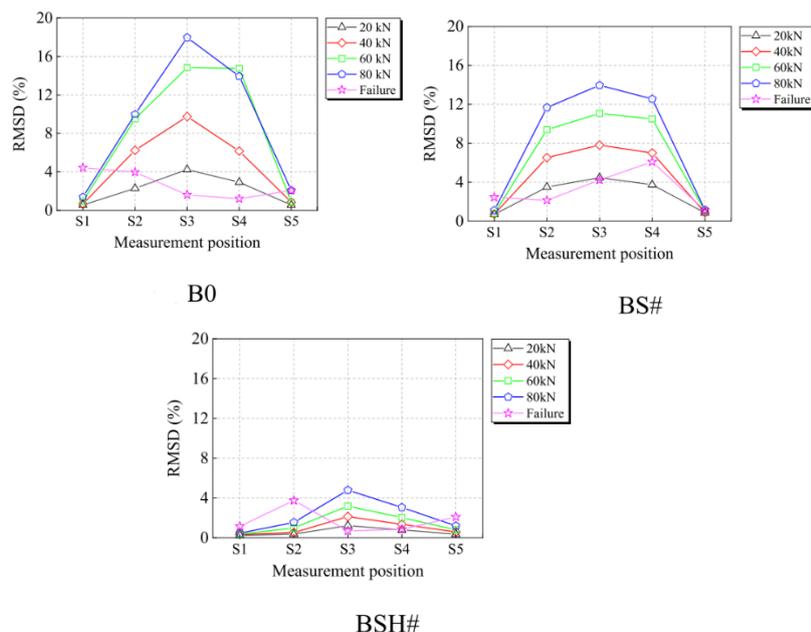


the plate-end curves for BH

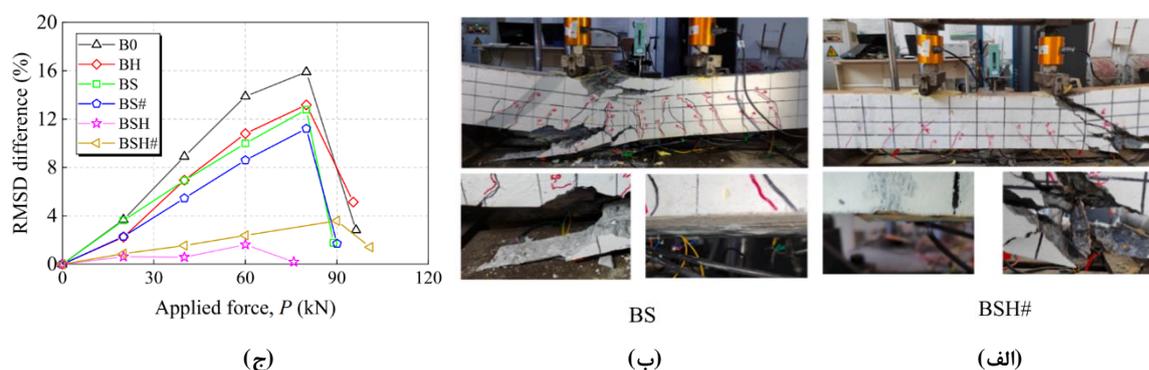


the plate-end curves for BSH

شکل ۱۸: منحنی‌های EMI برای تیرهای تقویت شده در طول آزمایشات خمشی (Zhu et al., 2023)



شکل ۱۹: شاخص آسیب RMSD برای تیرهای تقویت‌شده در طول آزمایش خمشی (Zhu et al., 2023)



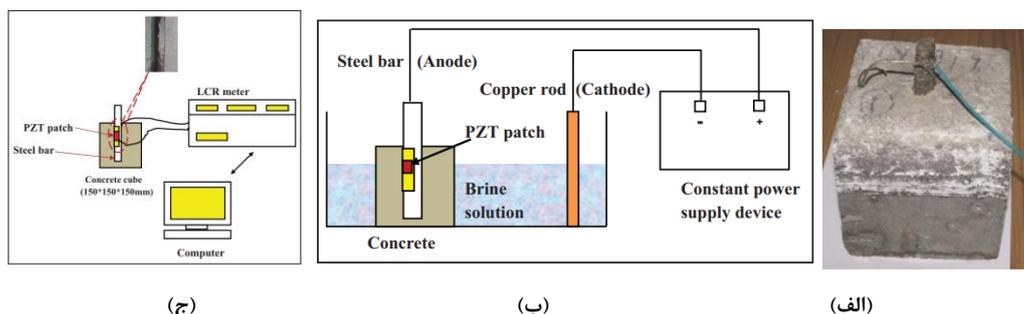
شکل ۲۰: الف و ب) حالت‌های خرابی مشاهده شده در آزمایش خمشی، ج) مقایسه شاخص آسیب RMSD برای وسط دهانه و انتهای صفحه CFRP در نمونه‌های مختلف (Zhu et al., 2023)

۴-۳- ارزیابی خوردگی با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی

خوردگی آرماتورهای فولادی یکی از عوامل اصلی آسیب و شکست زودرس سازه‌های بتنی مسلح است، که هزینه‌های زیادی را برای بازرسی، نگهداری، ترمیم و جایگزینی زیرساخت‌ها در سراسر جهان تحمیل می‌کند. رویکردهای مرسوم برای تشخیص خوردگی بر اساس تکنیک‌های الکتروشیمیایی عبارتند از پتانسیل نیمه سلولی^۱، طیف‌سنجی امپدانس^۲ و پلاریزاسیون خطی^۳. این تکنیک‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرند و نیاز به تماس مستقیم با سطح مشترک بتن و فولاد دارند. خوردگی این آرماتورهای فولادی، اغلب در نتیجه‌ی شکست لایه‌ی غیرفعال تشکیل شده در محیط بسیار قلیایی بتن، ناشی از تحریک کلریدی می‌باشد (Pradhan, Hussain et al., 1995; Dehwah et al., 2002; Broomfield, 2023; Moreno et al., 2004). در سال‌های اخیر استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی برای ارزیابی آسیب‌های رخ داده در سازه‌ها، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (Yu et al., 2023; Zhu et al., 2017). آی و همکاران (Ai et al., 2022)، با به کارگیری سه گروه از مبدل‌های PZT شبیه‌سازی شده در جهت‌های عمق، عرض و طولی یک تیر بتنی مسلح، پارامترهای آسیب خوردگی مرتبط با

¹ half-cell potential
² impedance spectroscopy
³ linear polarization

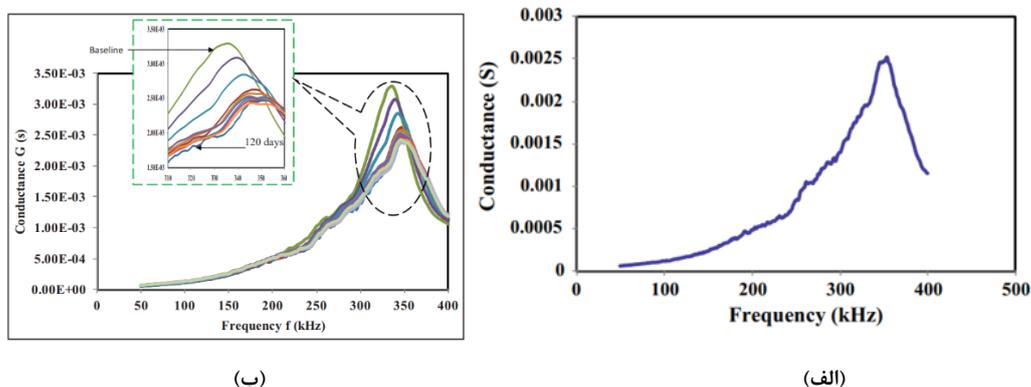
بتن یا میلگرد، از جمله افت جرم، افت سطح مقطع، مدول الاستیک، استحکام و پیوند در سطح مشترک فولاد و بتن را، مورد ارزیابی عددی قرار دادند. تالاکوکولا و همکارانش (Talakovula et al., 2014)، از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی، به جهت غلبه بر مشکلاتی که با آن‌ها در تکنیک‌های مرسوم روبه‌رو بودند، برای ارزیابی خوردگی در نمونه‌های بتنی به ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر، استفاده نمودند. در مرکز هر یک از نمونه‌های مکعبی مورد بررسی در این مطالعه، قبل از بتن‌ریزی، میلگردی به قطر 16 میلی‌متر و طول 200 میلی‌متر قرار داده شده بود، به طوری که همانند ساختار نشان داده شده در شکل ۲۱-ج، در وسط طول هر یک از این میلگردها، در جایی که یک سطح صاف کوچک توسط ماشین‌کاری ایجاد شده بود تا امکان اتصال را فراهم کند، وصله‌ی PZT (PIC 151) به ابعاد $10 \times 10 \times 3$ میلی‌متر به وسیله‌ی لایه‌ی نازکی از اپوکسی چسبانده شده بود. میلگردهای مجهز شده به وصله‌های PZT قبل از اینکه در نمونه‌های بتنی جایگذاری شوند، به مدت 24 ساعت در محیط، به جهت گیرش اپوکسی نگهداری شدند. و بعد از لحیم نمودن سیم‌های مورد نیاز بر این وصله‌ها، مجدداً لایه‌ی نازکی از اپوکسی برای ایجاد شرایط اندازه‌گیری حفاظت شده، بر روی این وصله‌ها اعمال شده بود (شکل ۲۱-الف).



شکل ۲۱: الف) نمونه‌ی شماره ۵ در حالت بکر و بدون اعمال هیچ گونه شرایط تسریع کننده‌ی خوردگی (ب) تنظیم شرایط اعمال خوردگی تسریع شده (ج) تنظیم روند اندازه‌گیری به وسیله‌ی دستگاه LCR Meter (Talakovula et al., 2014)

در نهایت نمونه‌های ساخته شده، با استفاده از سیم‌هایی که یک سر آن‌ها پیش‌تر به وصله‌ها لحیم شده بودند، به دستگاه (LCR meter (model E4980, Agilent Technologies, 2011) متصل شدند، تا در بازه‌ی فرکانسی 50 تا 400 کیلوهرتز، مورد ارزیابی قرار گیرند و پارامترهای موهومی و حقیقی ادمیتانس در فواصل فرکانسی 100 هرتز، برای آن‌ها ثبت گردند. نمونه‌ها بعد از گذشت 28 روز از بتن‌ریزی، مورد ارزیابی قرار گرفتند، تا عمل‌آوری نمونه‌ها تأثیری بر روند و نتایج ارزیابی خوردگی نگذارد. همچنین قبل از اعمال هرگونه شرایط تسریع شده‌ای که باعث ایجاد خوردگی شود، پارامترهای ادمیتانس، به عنوان شرایط پایه بدست آمدند (شکل ۲۲-الف). برای ایجاد خوردگی در کوتاه‌ترین زمان ممکن، مطابق شکل ۲۱-ب، نمونه‌ها درون محلول حاوی 3% سدیم کلرید (NaCl) غوطه‌ور شدند و شرایط خوردگی با استفاده از ایجاد جریان ثابت موثری برابر با 150 میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع، از طریق روش آندی به مدت چهار ماه تسریع شد، تا نشانه‌هایی از ترک بر روی نمونه‌ها، ناشی از خوردگی پدید آیند (Ahmad, 2009; Caré & Raharinaivo, 2007). در طول این 4 ماه نمونه‌ها در فواصل زمانی مشخصی از محلول خارج شده و پس از خشک شدن توسط فن، مقادیر موهومی و حقیقی ادمیتانس برای آن‌ها اندازه‌گیری شدند. به منظور بررسی نمونه‌های مسلح شده تحت شرایط خوردگی، تغییرات رخ داده در مقدار conductance و فرکانس تشدید، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند (شکل ۲۲-ب). نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش در مقدار دامنه‌ی conductance در فرکانس تشدید، در طول فرآیند خوردگی بودند. مطابق شکل ۲۳-الف، بعد از گذشت 45 روز، تجمعی از خوردگی بر روی نمونه‌ها پدید آمده بود. به همین دلیل نمونه‌ی شماره‌ی 5 از محلول خارج شده و پس از شکستن نمونه، آثار خوردگی به وضوح در ناحیه‌ی اتصال آرماتور و بتن قابل مشاهده بود. پس از گذشت 120 روز از قرارگیری سایر نمونه‌ها در این محلول، ترک‌هایی بر روی سطح آن‌ها گسترش پیدا کردند، که علت آن ایجاد تنش انبساطی‌ای بیشتر از توان کششی بتن، به دلیل تجمع محصولات خوردگی می‌باشد (شکل ۲۳-ب). نمونه‌ها بعد از گذشت 120 روز شکسته شدند و نتایج حاصل از محاسبه‌ی وزن کاهش یافته‌ی میلگردها، حاکی از رسیدن سطح خوردگی به حد هشدار دهنده‌ای بودند. در این مطالعه شاخص خرابی RMSD، روند پراکنده‌ای را برای نمونه‌های مختلف نشان داد. از این رو این شاخص قادر به ارائه‌ی یک تغییر ثابت در طول پیشرفت خوردگی نیست. لازم به ذکر است روند مشابهی برای مقادیر RMSD در نمونه‌های فولادی در مطالعات گذشته نیز مشاهده شده بود (Bhalla et al., 2012). یکی از موضوعاتی

که کمتر مورد توجه محققین در استفاده از روش امیدانس الکترومکانیکی (EMI) قرار گرفته است، تعیین دقیق محل آسیب رخ داده می‌باشد. مکان‌یابی آسیب رخ داده، نقش بسیار مهمی در پایش سلامت یک سازه دارد. آی و همکاران (Ai et al., 2024)، رویکرد جدیدی را برای مکان‌یابی آسیب رخ داده، با استفاده از ادغام تکنیک امیدانس و یا ادمیتانس الکترومکانیکی با الگوریتم تصویربرداری وزن‌دار احتمالاتی مبتنی بر توزیع گاوسی^۱ ارائه نمودند. این الگوریتم روشی برای پردازش سیگنال و تشخیص آسیب است، که از توزیع گاوسی برای وزندهی به داده‌ها و بهبود دقت مکان‌یابی آسیب استفاده می‌کند. رویکرد پیشنهادی شامل پنج مرحله می‌باشد که عبارتند از اندازه‌گیری امیدانس و یا ادمیتانس الکترومکانیکی با استفاده از (PZT)، محاسبه شاخص خرابی، ایجاد مدل رگرسیون برای شاخص محاسبه شده، تصویرسازی آسیب از طریق توزیع گاوسی و در نهایت مکان‌یابی آسیب رخ داده. در این مطالعه صحت رویکرد ارائه شده، بر روی یک دال بتنی مسلح دارای ترک‌های مصنوعی، با استفاده از مجموعه‌ای از وصله‌های PZT متصل به سطح دال، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در رویکرد ارائه شده، دقت مکان‌یابی آسیب، با استفاده از شاخص‌هایی مانند خطای جذر مربعات میانگین (RMSD)، ضریب همبستگی (CC)، میانگین درصد مطلق انحراف‌ها (MAPD) و همچنین شاخص $RMSDk^2$ که شاخص RMSD با خط مبنای قابل تغییر می‌باشد، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی می‌تواند مکان آسیب رخ داده را با خطایی نزدیک به صفر مشخص نماید. از آنجایی که شاخص $RMSDk$ حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات دارد، در میان شاخص‌های به کار برده شده در این مطالعه بالاترین دقت را برای مکان‌یابی آسیب، ارائه نموده است.



شکل ۲۲: الف) قسمت حقیقی ادمیتانس بدست آمده توسط سنسورهای پیزوالکتریک تعبیه شده در نمونه‌های RC برای نمونه‌ی شماره‌ی ۱،

ب) تغییر قسمت حقیقی ادمیتانس نمونه‌ی شماره‌ی ۱ در طول پیشرفت خوردگی تسریع شده (Talakovula et al., 2014)



شکل ۲۳: وضعیت نمونه‌ی RC: الف) نمونه ۵ پس از ۴۵ روز، ب) نمونه‌ی ترک‌خورده‌ی شماره‌ی ۱ بعد از ۱۲۰ روز (Talakovula et al., 2014)

¹ Probability-Weighted Imaging Algorithm Based on Gaussian Distribution

² baseline-changeable RMSD

۴- نتیجه گیری

- داشتن درک صحیحی از سلامت سازه‌ها و قابلیت اطمینان از ایمنی و عملکرد آن‌ها، به خصوص در سازه‌هایی که دارای ترافیک انسانی و سرمایه‌گذاری‌های عظیم هستند، جزو مهم‌ترین چالش‌ها و نگرانی‌ها در علوم مهندسی بوده و نظارت با کیفیت بر سلامت آن‌ها همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. شناسایی آسیب یک تکنیک است که برای نظارت بر ساختارهای عمرانی استفاده می‌شود، به طوری که می‌تواند ایمنی را بهبود بخشد و ماندگاری را تضمین کند. در این مقاله‌ی مروری، نقش ماده‌ی PZT به عنوان یک ماده‌ی کارآمد و به کارگیری روش EMI برای نظارت بر سلامت سازه‌ها و تشخیص آسیب در آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. امروزه با توجه به افزایش تقاضا برای نظارت بر سلامت سازه‌ها، استفاده از PZT در مهندسی عمران به خصوص در زمینه‌ی SHM، به طور قابل توجهی افزایش یافته است.
- این روش با تکیه بر مبدل‌های پیزوالکتریک و با ایجاد تعامل با ساختار نمونه‌ی میزبان، تحت تحریکات ساختاری در فرکانس‌های بالا، منعکس‌کننده‌ی سلامت سازه و یا آسیب‌های رخ داده در آن می‌باشد. تغییرات چشمگیری که در شاخص‌های آماری مورد استفاده در این روش، مانند شاخص RMSD، رخ می‌دهد، می‌تواند زنگ هشدار برای وقوع آسیب، حتی در سنین اولیه باشد.
- اگرچه مدتی است که تکنیک EMI مورد توجه محققین قرار گرفته است، با این حال همچنان مشکلات مختلفی در کاربرد آن وجود دارد. برخی از این مشکلات عبارتند از، نیاز به انتخاب محدوده‌ی فرکانسی مناسب، نیاز به جبران عوامل محیطی مانند تغییرات دما، و استفاده از معیارهای آماری کارآمد، که باید برای دستیابی به اهداف نهایی مانند مکان‌یابی و شناسایی نوع آسیب، رفع گردند. توجه محققان به شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد آنها در پیش‌بینی دقیق، تشخیص الگو، و حل مسائل پیچیده، منجر به موفقیت‌های چشم‌گیر در زمینه‌های علمی و مهندسی شده است. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به همراه روش EMI، می‌تواند در زمینه‌های مختلفی از جمله انتخاب محدوده‌ی فرکانسی مناسب و جبران تغییرات دما، بسیار مفید واقع گردد.
- ادغام تکنیک امیدانس الکترومکانیکی مبتنی بر مبدل‌های PZT با سایر تکنیک‌ها، به ویژه فناوری‌های کنترل از راه دور، امکان نظارت موثرتر بر سلامت سازه‌ها را در آینده فراهم خواهد نمود. همچنین پیشرفت‌های رخ داده در به کارگیری این روش، به طور قابل توجهی به رفع محدودیت‌های موجود در تکنیک‌های غیرمخرب مرسوم می‌پردازد، به طوری که حتی در آینده امکان رفع و یا کاهش ضرورت استفاده از روش‌های مخرب، به طور بالقوه وجود دارد. این فناوری می‌تواند نقش مهمی در نسل بعدی سیستم‌های SHM در زیرساخت‌های شهری هوشمند داشته باشد.

مراجع

Abdi Moghadam, M., & Izadifard, R. A. (2021). Prediction of the tensile strength of normal and steel fiber reinforced concrete exposed to high temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1), 47.

Abdi Moghadam, M., Izadifard, R. A., & Khalighi, A. (2022). Microstructural and Mechanical Characteristics of Fiber-Reinforced Cementitious Composites under High-Temperature Exposure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(9), 04022208.

- Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J., & Stone, B. J. (1978). A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures. *Journal of mechanical engineering science*, 20(2), 93-100.
- Ahmad, S. (2009). Techniques for inducing accelerated corrosion of steel in concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(2), 95.
- Ai, D., Du, L., Li, H., & Zhu, H. (2022). Corrosion damage identification for reinforced concrete beam using embedded piezoelectric transducer: Numerical simulation. *Measurement*, 192, 110925.
- Ai, D., Zhang, D., & Zhu, H. (2024). Damage localization on reinforced concrete slab structure using electromechanical impedance technique and probability-weighted imaging algorithm. *Construction and Building Materials*, 424, 135824.
- Annamdas, V. G., & Radhika, M. A. (2013). Electromechanical impedance of piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(9), 1021-1042.
- Annamdas, V. G. M., & Soh, C. K. (2010). Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues. *Journal of Intelligent material systems and structures*, 21(1), 41-59.
- Antonucci, V., Giordano, M., & Prota, A. (2005). Fiber Optics Technique for Quality Control and Monitoring of FRP Installations. *Special Publication*, 230, 195-208.
- Bansal, T., & Talakokula, V. (2021). Deterioration of structural parameters due to corrosion in prestressed concrete identified by smart probe-based piezo sensor. *Engineering Research Express*, 3(1), 015011.
- Bansal, T., Talakokula, V., & Mathiyazhagan, K. (2022). Equivalent structural parameters based non-destructive prediction of sustainable concrete strength using machine learning models via piezo sensor. *Measurement*, 187, 110202.
- Banthia, N., Mindess, S., Bentur, A., & Pigeon, M. (1989). Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine. *Experimental mechanics*, 29, 63-69.
- Bhalla, S., Soh, C. K., & Liu, Z. (2005). Wave propagation approach for NDE using surface bonded piezoceramics. *NDT & E International*, 38(2), 143-150.
- Bhalla, S., Vittal, P. A., & Veljkovic, M. (2012). Piezo-impedance transducers for residual fatigue life assessment of bolted steel joints. *Structural Health Monitoring*, 11(6), 733-750.
- Biscaia, H. C., Chastre, C., & Viegas, A. (2015). A new discrete method to model unidirectional FRP-to-parent material bonded joints subjected to mechanical loads. *Composite Structures*, 121, 280-295.
- Broomfield, J. P. (2023). *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. Crc Press.
- Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., & Fernández, A. I. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 536-542.
- Caré, S., & Raharinaivo, A. (2007). Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel. *Cement and concrete research*, 37(12), 1598-1612.
- Dai, J., Ueda, T., & Sato, Y. (2005). Development of the nonlinear bond stress–slip model of fiber reinforced plastics sheet–concrete interfaces with a simple method. *Journal of composites for construction*, 9(1), 52-62.

- Dehwah, H. A., Maslehuddin, M., & Austin, S. A. (2002). Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 24(1), 17-25.
- Deng, J., Li, X., Zhu, M., Rashid, K., & Wang, Q. (2021). Debonding damage detection of the CFRP-concrete interface based on piezoelectric ceramics by the electromechanical impedance method. *Construction and Building Materials*, 303, 124431.
- Dias, L. L., Lopes, K. W., Bueno, D. D., & Gonzalez-Bueno, C. G. (2023). An enhanced approach for damage detection using the electromechanical impedance with temperature effects compensation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(4), 228.
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303-315.
- Ghosh, K. K., & Karbhari, V. M. (2011). Use of infrared thermography for quantitative non-destructive evaluation in FRP strengthened bridge systems. *Materials and structures*, 44, 169-185.
- Giurgiutiu, V., & Rogers, C. A. (1998, July). Recent advancements in the electromechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE. In *Smart Structures and Materials 1998: Smart Structures and Integrated Systems* (Vol. 3329, pp. 536-547). SPIE.
- Guo, Z. G., Cao, S. Y., Sun, W. M., & Lin, X. Y. (2005, December). Experimental study on bond stress-slip behaviour between FRP sheets and concrete. In *FRP in construction, proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures* (pp. 77-84).
- Hu, Y., & Yang, Y. (2007, April). Sensing region of PZT transducers bonded to concrete. In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007* (Vol. 6529, pp. 93-103). SPIE.
- Hu, W., Li, Y., & Yuan, H. (2020). Review of experimental studies on application of FRP for strengthening of bridge structures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-21.
- Hussain, S. E., Al-Musallam, A., & Al-Gahtani, A. S. (1995). Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1543-1555.
- Jiang, T., Hong, Y., Zheng, J., Wang, L., & Gu, H. (2019). Crack detection of FRP-reinforced concrete beam using embedded piezoceramic smart aggregates. *Sensors*, 19(9), 1979.
- Khaliq, W. (2018). Mechanical and physical response of recycled aggregates high-strength concrete at elevated temperatures. *Fire safety journal*, 96, 203-214.
- Khan, M. S., Prasad, J., & Abbas, H. (2013). Effect of high temperature on high-volume fly ash concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, 1369-1378.
- Kisa, M. (2004). Free vibration analysis of a cantilever composite beam with multiple cracks. *Composites Science and Technology*, 64(9), 1391-1402.
- Kotynia, R., Oller, E., Marí, A., & Kaszubska, M. (2021). Efficiency of shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP materials—State-of-the-art in the experimental tests. *Composite Structures*, 267, 113891.
- Lau, A., & Anson, M. (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and concrete research*, 36(9), 1698-1707.
- Liang, C., Sun, F. P., & Rogers, C. A. (1994). Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems—determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of intelligent material systems and structures*, 5(1), 12-20.

- Li, X., Zhu, M., Liu, Z., & Deng, J. (2023). EMI-based interfacial damage evolution of CFRP plates-strengthened RC beams under low-cycle fatigue loading and wetting/drying cycles. *Composite Structures*, 307, 116653.
- Lu, X. Z., Jiang, J. J., Teng, J. G., & Ye, L. P. (2006). Finite element simulation of debonding in FRP-to-concrete bonded joints. *Construction and building materials*, 20(6), 412-424.
- Luo, M., & Qian, C. (2016). Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 121, 659-663.
- Maurya, K. K., Rawat, A., & Shanker, R. (2023). Health monitoring of bacterial concrete structure under dynamic loading using electro-mechanical impedance technique: a numerical approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 25382-25401
- Maurya, K. K., Rawat, A., & Shanker, R. (2023). Performance evaluation concept for crack healing in bacterial concrete structure using electro mechanical impedance technique with PZT patch. *Developments in the Built Environment*, 15, 100196.
- Mine, U. C. (2011). United States Department Of Labor Mine Safety And Health Administration Coal Mine Safety And Health.
- Moreno, M., Morris, W., Alvarez, M. G., & Duffó, G. S. (2004). Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content. *Corrosion Science*, 46(11), 2681-2699.
- Naser, M. Z., Hawileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2019). Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Engineering Structures*, 198, 109542.
- Negi, P., Chhabra, R., Kaur, N., & Bhalla, S. (2019). Health monitoring of reinforced concrete structures under impact using multiple piezo-based configurations. *Construction and Building Materials*, 222, 371-389.
- Park, G., Kabeya, K., Cudney, H. H., & Inman, D. J. (1998, July). Removing effects of temperature changes from piezoelectric impedance-based qualitative health monitoring. In *Smart Structures and Materials 1998: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials* (Vol. 3330, pp. 103-114).
- Park, S., Kim, J. W., Lee, C., & Park, S. K. (2011). Impedance-based wireless debonding condition monitoring of CFRP laminated concrete structures. *NDT & E International*, 44(2), 232-238.
- Park, S., Yun, C. B., Roh, Y., & Lee, J. J. (2006). PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components. *Smart Materials and Structures*, 15(4), 957.
- Perera, R., Sun, R., Sevillano, E., & Ruiz, A. (2017). A multi-objective electromechanical impedance technique to identify debonding in RC beams flexural strengthened with FRP. *Procedia engineering*, 199, 2232-2237.
- Potha Raju, M., Srinivasa Rao, K., & Raju, P. S. N. (2007). Compressive strength of heated high-strength concrete. *Magazine of Concrete Research*, 59(2), 79-85.
- Powężka, A., Szulej, J., & Ogrodnik, P. (2020). Effect of high temperatures on the impact strength of concrete based on recycled aggregate made of heat-resistant cullet. *Materials*, 13(2), 465.
- Pradhan, B. (2007). Performance of TMT and CTD steel bars, OPC and induced rebar corrosion in concrete. Doctoral dissertation.
- Savva, A., Manita, P., & Sideris, K. K. (2005). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 239-248.

Singh, I., Dev, N., & Pal, S. (2022). Impedance based damage assessment of concrete under the combined effect of impact and temperature using different piezo configurations. *Sensors and Actuators A: Physical*, 345, 113763.

Soh, C. K., Yang, Y., & Bhalla, S. (Eds.). (2012). *Smart materials in structural health monitoring, control and biomechanics*. Springer Science & Business Media.

Sun, R., Sevillano, E., & Perera, R. (2015). Debonding detection of FRP strengthened concrete beams by using impedance measurements and an ensemble PSO adaptive spectral model. *Composite Structures*, 125, 374-387.

Talakokula, V., Bhalla, S., & Gupta, A. (2014). Corrosion assessment of reinforced concrete structures based on equivalent structural parameters using electro-mechanical impedance technique. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(4), 484-500.

Tan, P., & Tong, L. (2004). Identification of delamination in a composite beam using integrated piezoelectric sensor/actuator layer. *Composite Structures*, 66(1-4), 391-398.

Tseng, K. K., & Naidu, A. S. (2002). Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. *Smart Materials and Structures*, 11(3), 317.

Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (2016). Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. *Construction and Building Materials*, 122, 118-125.

Wang, Y., Li, X., Li, J., Wang, Q., Xu, B., & Deng, J. (2019). Debonding damage detection of the CFRP-concrete interface based on piezoelectric ceramics by the wave-based method. *Construction and Building Materials*, 210, 514-524.

Yang, H., Zhao, H., & Liu, F. (2018). Residual cube strength of coarse RCA concrete after exposure to elevated temperatures. *Fire and Materials*, 42(4), 424-435.

Yang, Y., Lim, Y. Y., & Soh, C. K. (2008). Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. Experiment. *Smart Materials and Structures*, 17(3), 035008.

Ye, H. W., Feng, N. Q., Ling-hu, Y., Ran, Z. W., Lin, L. X., Qi, S. K., & Dong, Y. (2012). Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012.

Yuan, H., Lu, X., Hui, D., & Feo, L. (2012). Studies on FRP-concrete interface with hardening and softening bond-slip law. *Composite Structures*, 94(12), 3781-3792.

Yu, H., Guo, C., Li, N., & Lu, S. (2023). Research on bolt looseness monitoring based on electromechanical impedance transmissibility technology. *Smart Materials and Structures*, 32(9), 095009.

Zapris, A. G., Naoum, M. C., Kytinou, V. K., Sapidis, G. M., & Chalioris, C. E. (2023). Fiber reinforced polymer debonding failure identification using smart materials in strengthened T-shaped reinforced concrete beams. *Polymers*, 15(2), 278.

Zhu, M., Li, X., Deng, J., & Peng, S. (2023). Electrochemical impedance based interfacial monitoring for concrete beams strengthened with CFRP subjected to wetting–drying cycling and sustained loading. *Construction and Building Materials*, 366, 130238.

Zhu, M., Li, X., Deng, J., Ye, Z., & Li, J. (2022). Bond degradation and EMI-based monitoring of CFRP to concrete interfaces exposed to wet-dry cycling. *Engineering Structures*, 260, 114225.

Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, Z., & Yao, Y. (2017). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of hydration process and drying shrinkage for cement paste with W/C of 0.25 affected by high range water reducer. *Construction and Building Materials*, 131, 536-541.

Zou, X., D'Antino, T., & Sneed, L. H. (2021). Investigation of the bond behavior of the fiber reinforced composite-concrete interface using the finite difference method (FDM). *Composite Structures*, 278, 114643.

Zou, X., Mirala, A., Sneed, L. H., Al Qaseer, M. T., & Donnell, K. (2021). Detection of CFRP-concrete interfacial debonding using active microwave thermography. *Composite Structures*, 260, 113261.

جدول : مطالعات انجام شده در زمینه‌ی کنترل سلامت سازه با بکارگیری روش امیدانس الکترومکانیکی

مرجع	هدف	ساختار مورد بررسی	مبدل پیزوالکتریک
Ai et al., 2022	شناسایی آسیب خوردگی مطالعه عددی	تیر بتنی مسلح	مبدل پیزوالکتریک تعبیه شده درون سازه
Ai et al., 2024	مکان‌یابی آسیب (ادغام تکنیک امیدانس الکترومکانیکی با الگوریتم تصویربرداری وزن‌دار احتمالاتی مبتنی بر توزیع گاوسی)	دال بتنی مسلح	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Bansal et al., 2021	بررسی زوال پارامترهای ساختاری مانند سختی معادل، جرم و میرایی ناشی از خوردگی	تیر بتنی پیش‌تنیده	مبدل پیزوالکتریک تعبیه شده درون سازه
Bhalla et al., 2005	شناسایی و مکان‌یابی آسیب‌های اولیه در سازه‌ها	صفحه‌ی آلومینیومی	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Bhalla et al., 2012	ارزیابی عمر خستگی باقیمانده	اتصالات فولادی پیچ و مهره‌ای در صفحه‌ی آلومینیومی	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Deng et al., 2021	تشخیص آسیب سطح اتصال بتن و CFRP	ستون بتنی مربع و تیربتنی تقویت شده به وسیله‌ی CFRP	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Dias et al., 2023	ارائه یک رویکرد پیشرفته برای تشخیص آسیب که اثرات دما را بر امیدانس الکترومکانیکی کاهش می‌دهد	تیر آلومینیومی	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Hu & Yang, 2007	یافتن بازه‌ی فرکانسی مناسب	قاب بتنی دو طبقه	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح بتن
Jiang et al., 2019	تشخیص ترک	تیر بتن مسلح شده با FRP	مبدل پیزوالکتریک تعبیه شده درون سازه
Li et al., 2023	تشخیص آسیب سطح اتصال بتن و CFRP تحت بارگذاری خستگی و سیکل‌ها تر و خشک شدن	تیر بتن مسلح شده با CFRP	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Maurya et al., 2023	نظارت بر سلامت سازه مطالعه عددی	تیر بتنی مسلح باکتریایی	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Maurya et al., 2023	ارزیابی عملکرد ترمیم ترک	تیر بتنی مسلح باکتریایی	به دو صورت متصل به سطح سازه و سنسورهای تعبیه شده در بتن

ادامه‌ی جدول : مطالعات انجام شده در زمینه‌ی کنترل سلامت سازه با بکارگیری روش امیدانسی الکترومکانیکی

Negi et al., 2019	نظارت بر سلامت سازه	دال بتنی مسلح	۴ پیکربندی مختلف مبدل پیزوالکتریک تعبیه شده درون سازه
Park et al., 2006	تشخیص آسیب	پل فولادی	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Perera et al., 2017	تشخیص آسیب سطح اتصال بتن و FRP	تیر بتن مسلح شده با FRP	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Singh et al., 2022	ارزیابی آسیب تحت اثر بارگذاری ضربه ای و حرارت	نمونه‌های مکعبی بتنی	پیکربندی های مختلف پیزو الکتریک به صورت‌های متصل به سطح سازه، تعبیه شده درون سازه و متصل به میله‌ی فولادی
Sun et al., 2015	تشخیص آسیب سطح اتصال بتن و FRP	تیر بتن مسلح شده با FRP	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Talakokula et al., 2014	ارزیابی خوردگی	نمونه های مکعبی مسلح بتنی	مبدل پیزوالکتریک تعبیه شده درون سازه
Yu et al., 2023	نظارت بر شل شدگی پیچ	پل‌های فولادی	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Zapris et al., 2023	تشخیص آسیب سطح اتصال بتن و FRP	تیر بتن مسلح شده با FRP	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Zhu et al., 2023	تشخیص آسیب سطح اتصال بتن و CFRP، تحت بارهای طولانی مدت، و چرخه‌های مرطوب و خشک شدن‌های متوالی	تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه
Zhu et al., 2022	تشخیص آسیب سطح اتصال بتن و CFRP، در معرض چرخه‌های مرطوب و خشک شدن‌های متوالی	تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP	مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح سازه