مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مهر 1399، دوره 7، شماره 7، ص‌ص. 59 - 70

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی عوامل مؤثر بر تشخیص عیب ناشی از خوردگی در پایش سلامتی تیر یکسرگیردار به روش امپدانس الکترومکانیکی

سیدرضا حمزه لو[1*]، بهنام آخوندی[2]، مرتضی فاتحی[3]

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

2- دانش‌آموخته دکتری مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

3- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

*تهران، کدر پستس 1678815811، rehamzeloo@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 آذر 1398

داوری اولیه 22 اسفند 1398

پذیرش: 16 فروردین 1399

کلیدواژگان:

پایش سلامتی سازه

خوردگی

امپدانس

معیار آسیب

تیر یکسرگیردار

چکیده

پایش سلامتی سازه بر اساس امپدانس الکترومکانیکی یکی از روش های پایش وضعیت و تشخیصِ بلادرنگ آسیب سازه می‌باشد که از خواصِ کوپل مواد پیزوالکتریک بهره می‌برد. هنگام قرارگیری یک سازه در معرض خوردگی، یک فرایند الکتروشیمیایی آغاز شده و با گذشت زمان عیوبی در سطحِ سازه ایجاد می‌گردد. در سازه در معرض خوردگی، با این‌که کاهش جرم ناچیزی در سازه ایجاد می‌گردد ولی باعث کاهشی چشمگیر در استحکام مکانیکی، یکپارچگی و عمرخستگی آن می‌شود. بنابراین پایش دقیق سلامتی سازه بمنظور تشخیص عیوب سطحیِ ناشی از خوردگی و پیش بینی اثر خوردگی بر روی خواص مکانیکی و پیوستگی یک سازه حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله از روش امپدانس الکترومکانیکی برای بررسی عیب خوردگی در پایش سلامتی تیر یکسرگیردار استفاده‌شده و تشخیص و بررسی عوامل مؤثر بر معیار آسیبِ ناشی از خوردگی صورت گرفته است. بدین منظور آزمایش‌هایی جهت اندازه‌گیری طیف‌های امپدانس بر روی یک تیر آلومینیومی انجام گرفته و خوردگی مد نظر نیز توسط اسید بصورت کنترل شده بر روی تیر تحمیل گشته‌است. جهت تشخیص کمّی عیب، از معیار آسیب اسکالر استفاده شده‌است. نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌ها انجام گرفته بر روی تیر یکسرگیردار نشان می‌دهد عوامل شدت عیب، مکان تکیه‌گاه و فاصله آسیبِ تا محل تکیه‌گاه بر معیار آسیب ناشی از خوردگی مؤثر می‌باشند. بررسی نتایج، بیانگر وجود رابطه بین مکان تکیه‌گاه و محل عیب با معیار آسیب می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار معیار آسیب به‌کار رفته بصورت جذر میانگین مجموع مربعات شکل امپدانس با شدت خوردگی رابطه‌ای مستقیم دارد.

Diagnosis and evaluation of factors affecting corrosion damage detection in health monitoring of cantilever beam by electromechanical impedance method

Seyed Reza Hamzeloo[1*], Behnam Akhondi[2], Morteza Fatehi[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1678815811 Tehran, Iran, rehamzeloo@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 December 2019

First Decision: 12 March 2020

Accepted: 4 April 2020

Keywords:

Structural Health Monitoring

Corrosion

Impedance

Damage index

Cantilever beam

Abstract

Structural health monitoring based on electromechanical impedance is one of the methods for real-time monitoring and detection of structural damage using the coupling properties of piezoelectric materials. When a structure is exposed to corrosion, an electrochemical process is initiated and defects occur over the surface of the structure. In corrosion-prone structures, although a slight decrease in the mass is produced, it results in a significant decrease in its mechanical strength, integrity and fatigue life span. Therefore, the precise monitoring of structural health is important for detecting corrosion-induced surface defects and predicting the effect of corrosion on the mechanical properties and integrity of a structure. In this paper, the electromechanical impedance method is used to investigate the corrosion defect in the health monitoring of a cantilever beam and to identify and determine the factors affecting the damage index of corrosion. Experiments carried out to measure the impedance spectra on an aluminum beam, and a controlled acid corrosion has been imposed on the beam. The scalar damage index was used to quantify the defect. Empirical results obtained from experiments on cantilever beam show that factors like damage intensity, support positions and damage distance to the support location are effective on damage index caused by corrosion. The results show that there is a relationship between the support location and the damage location with the damage index. Also, it is observed that applied damage index as root-mean-square deviation of impedance has a direct relationship with the intensity of corrosion damage.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S.R. Hamzeloo, B. Akhondi, M. Fatehi, Diagnosis and evaluation of factors affecting corrosion damage detection in health monitoring of cantilever beam by electromechanical impedance method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 7, pp. 59- 70, 2020 (in Persian)

1- مقدمه

خوردگی از بین رفتن مواد غیرقابل‌برگشت فلز توسط واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی با محیط اطراف آن است. از بین رفتن مواد ناشی از خوردگی در سازه‌های فلزی یک مشکل گسترده و فوری در صنایع مختلف ازجمله نفت و گاز، هوافضا، ساخت‌وساز، معدن و تولید است. یکی از آسیب‌های قابل‌توجه در برابر خوردگی فلز از بین رفتن ضخامت است و با ادامه خوردگی، یکپارچگی سازه تضعیف می‌شود و ظرفیت تحمل بار به خطر می‌افتد. خسارت‌های مربوط به خوردگی، خسارات اقتصادی زیادی را به بار می‌آورد. سازمان جهانی خوردگی، هزینه خوردگی را در سراسر جهان حدود 2/5 تریلیون دلار آمریکا تخمین زده است که بیش از 3 درصد از تولید ناخالص داخلی کشورهای صنعتی را تشکیل می‌دهد، اما اگر اقدامات متقابل مناسب انجام شود، می‌توان هزینه خوردگی را یک‌سوم کاهش داد[1]. بنابراین تهیه روش‌های نظارت بر خوردگی برای شناسایی و تعیین مقدار خوردگی در سازه‌های فلزی بسیار مهم است.

در طول دهه‌های گذشته، روش‌های بی‌شماری از نظارت بر خوردگی در اصول مختلف کاری توسعه داده‌شده است. لی و همکاران[1] بر اساس روش امپدانس الکترومکانیکی ، مفهوم کوپن خوردگی هوشمند برای نظارت بر خوردگی را پیشنهاد نموده و تجزیه‌وتحلیل المان محدود برای مطالعه پاسخ امپدانس الکترومکانیکی انجام داده‌اند. برای بررسی عیب خوردگی، کازینز و همکارانش از روش کوپن خوردگی برای تخمین میزان خوردگی استفاده کردند که در آن کوپن‌های خوردگی در مکان‌های بحرانی نصب می‌شوند و وزن کوپن‌ها به‌صورت دوره‌ای اندازه‌گیری می‌شوند[2]. مارجا و همکاران[3] از روش پروب مقاومت الکتریکی استفاده کرد که بر این اصل استوار است که یک سیم، مقاومت الکتریکی خود را در اثر کاهش سطح مقطع با خوردگی افزایش می‌دهد، اگرچه این روش به‌طور عمومی قابل‌استفاده است ولی پروب در مایعات کمتر مؤثر است. لیو و همکاران[4] روش‌های اندازه‌گیری خوردگی را موردبررسی قرارداد و از روش‌های رایج در بین این گروه، روش‌های الکتروشیمیایی را برای بهبود دقت ارزیابی خوردگی پیشنهاد کرد که ازجمله می‌توان اندازه‌گیری پتانسیل نیمه سلولی، اندازه‌گیری مقاومت در برابر قطبی شدن خطی، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی ، نویز الکتروشیمیایی و آنالیز هارمونیک را نام برد. این روش‌های الکتروشیمیایی قادر به نظارت بر خوردگی در جنبه خاصی هستند، بااین‌حال، آن‌ها تنها می‌توانند امکان خوردگی را ارزیابی کنند درحالی‌که قادر به ارزیابی کمّی از مقدار خوردگی نیستند. در سال‌های اخیر، توسعه مواد هوشمند برای پایش سلامت سازه‌ای، روش‌های جدیدی از نظارت بر خوردگی را فراهم کرده است. ژاوو یک نوع روش جدید برای نظارت بر گسترش خوردگی میلگرد فولادی در سازه‌های بتونی مسلح فولادی به نام روش سیم‌پیچ فیبر نوری پیشنهاد کرد که این روش بر اساس سنجش فیبر نوری بریلوئین[1] است[5]. علاوه بر این روش‌های پایش خوردگی تازه‌تاسیس عبارت‌اند از پایش انتشار آکوستیک[6] و آزمایش فراصوتی[7]. اگرچه ثابت‌شده است که این روش‌های جدید امیدوارکننده هستند، اما هنوز هم در مرحله اولیه توسعه هستند و آزمایش‌های تجربی بیشتری قبل از این‌که این روش‌ها در پایش خوردگی واقعی به کار رود، موردنیاز است. علاوه بر این، بسیاری از نتایج این روش‌ها فقط کیفی هستند که نیاز به توسعه روش جدیدی برای تعیین میزان خوردگی به‌صورت کمّی را نشان می‌دهند. فان و همکاران[8] تحقیقات عددی و تجربی برای نظارت بر شل شدن سازه‌های متصل شده توسط پین با استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی انجام دادند. علاوه بر این فان و همکاران با استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی، روشی جدید را ارائه دادند که در آن آسیب ناشی از ضربه به یک سازه، شبیه‌سازی‌شده تا رابطه بین نسبت حجم خسارت به معیار آسیب به دست آید و از رابطه می‌توان برای پیش‌بینی میزان خسارت واقعی استفاده کرد[9]. وو و همکاران امکان استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی برای تشخیص آسیب لغزش بین لایه‌ای را مورد بررسی قراردادند که نتایج تجربی، امکان‌سنجی و عملی بودن استفاده از این روش را برای تشخیص آسیب لغزش بین‌لایه‌ای تأیید نمود[10]. نا [11] و همکاران در بررسی عیب خوردگی در خطوط لوله در نیروگاه‌های هسته‌ای با دمای بالا روش امپدانس الکترومکانیکی را انتخاب نموده و برای جلوگیری از اتصال مبدل پیزوالکتریک به‌طور مستقیم بر روی سازه هدف از یک سیم فلزی برای تشخیص آسیب در دمای بالا استفاده نمودند. آیرس[12] و همکاران توسط روش امپدانس مکانیکی خسارات واقعی زیرساخت‌های شهری مانند اتصالات پل را موردبررسی قراردادند که با تبدیل اندازه‌گیری‌های امپدانس به یک معیار آسیب اسکالر, پیاده‌سازی بلادرنگ روش مبتنی بر امپدانس ثابت‌شده است. تالاکوکولا و همکاران فرایند خوردگی میلگردهای بتون را به‌وسیله روش امپدانس الکترومکانیکی ارزیابی کردند[13] که نتایج تجربی نشان داد خروجی‌های

[1] Brillouin

استخراج‌شده از علائم ورودی در تشخیص و کمّی کردن مقدار خوردگی مؤثر هستند . نا [14] امکان تشخیص کاهش ضخامت دیوار تأسیسات خط لوله بر پایه فلز با استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی را موردبررسی قرارداد.

همان‌طور که اشاره شد در تحقیقات قبلی روش امپدانس الکترومکانیکی برای تشخیص و ارزیابی کمّی و کیفی عیب خوردگی به‌طور کامل بررسی نشده است. روش امپدانس الکترومکانیکی به عنوان یک روش بلادرنگ محسوب شده که به طور کلی این روش در فرکانس‌های بالا (معمولا 10-500 کیلوهرتز) استفاده می شود که در این فرکانس‌ها، طول موج تحریک خیلی پایین است و لذا برای تشخیص تغییرات بسیار کوچک در سازه حساسیت کافی را دارد که در مقایسه با روش‌های دیگر تشخیص عیب، این روش برای تشخیص عیوب کوچک ناشی از خوردگی مناسب بوده و به صورت کمّی مکان و مقدار عیب را مشخص می‌کند. هدف اصلی از این مقاله بررسی روش امپدانس الکترومکانیکی به‌عنوان یک ابزار مفید برای تشخیص و تعیین خوردگی و مکان قرارگیری آن می‌باشد. اهمیت این پژوهش در این امر بیان می‌گردد که آسیب سازه، که از خوردگی ناشی می‌گردد به‌صورت موضعی و کوچک بوده، و ممکن است به دلیل بالا بودن نرخ رشد عیب، رویکردهای سنتی برای پیدا نمودن و ترمیم سازه به شکست‌های فاجعه انگیز و لطمات جبران‌ناپذیری منجر گردد. بنابراین پایش دقیق سلامتی سازه به‌منظور کشف عیوب سطحی ناشی از خوردگی جهت فهم و پیش‌بینی اثر خوردگی بر روی خواص مکانیکی و پیوستگی یک سازه و نیز عمر آن حائز اهمیت می‌باشد. بدین منظور از یک تیر یکسر گیردار آلومینیومی استفاده شد که دو پیزوالکتریک در دو سر آن نصب گردید. برای ایجاد عیب خوردگی از محلولِ اسید خورنده در چهار مرحله استفاده شد. اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک‌ها به‌منظور پایش تغییرات در شکل امپدانس در اثر پیشرفت خوردگی در حالات مختلف گیره‌بندی از دو پیزوالکتریک به‌صورت جداگانه صورت گرفت. مقایسه شکل امپدانس در هر مرحله باحالت سالم شیفت راستای افق و تغییر در دامنه را نشان داد که درجه عیب، محل تکیه‌گاه و فاصله عیب تا تکیه‌گاه تأثیر معناداری بر این شکل امپدانس داشت. برای کمّی سازی نمودنِ تشخیص عیب از یک معیار آسیب اسکالر استفاده شد که نتایج تجربی حاصله نشان داد با افزایش عمق خوردگی مقدار معیار آسیب افزایش‌یافته و فاصله عیب تا تکیه‌گاه و محل تکیه‌گاه بر نرخ تغییرات معیار آسیب تأثیر بسزایی دارد.

2- روش امپدانس الکترومکانیکی

در سال‌های اخیر پایش سلامتی سازه‌ها[1] در حین کار و تکنیک های تشخیص آسیب، بسیاری از تحقیقات صنعتی و دانشگاهی را معطوف خود داشته است. پایش سلامتی سازه به بررسی وضعیت و سلامتی سازه پرداخته و با تفسیر داده‌ها قادر به تعیین وضعیت کنونی سازه و تخمین عمر آن می‌باشد. با استفاده از پایش سلامتی می‌توان سیستم‌ها و سازه‌ها را در حین کار و سراسر طول عمر کاریشان پایش نمود تا از شکست‌های فاجعه انگیز جلوگیری شده و با رعایت حق تقدم وظایف تعمیر و نگهداری، هزینه‌ها کمینه گردد[15].

پایش وضعیت سازه‌ها یک ابزار قوی برای صرفه‌جویی در زمان کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد که می‌تواند خطاهای انسانی را کاهش دهد. پایش سلامتی سازه به دو روش صورت می‌گیرد : 1- پایش سلامتی سازه به‌صورت فعال[2] و 2- پایش سلامتی سازه به‌صورت غیرفعال[3].

پایش سلامتی سازه به‌صورت غیرفعال پارامترهای مختلفی از سازه را اندازه‌گیری و سپس با استفاده از این پارامترها سلامتی سازه را تعیین می‌کند. پایش به‌صورت غیرفعال مفید است ولی نمی‌تواند به‌طور مستقیم مشکل را مشخص نماید. برای مثال نمی‌تواند به‌طور مستقیم نتیجه دهد که سازه دچار آسیب شده است و یا خیر. به‌طور عکس پایش به‌صورت فعال، به‌طور مستقیم با حالات سلامت سازه در ارتباط است که هدف از این ارتباط، تلاش برای کشف وجود و یا گسترش عیب یا آسیب می‌باشد .روش پایش سلامتی سازه بر اساس امپدانس الکترومکانیکی یک تکنیک تشخیص آسیب به‌صورت فعال است که از توانایی‌های خود دریافتِ مواد هوشمند بهره می‌گیرد تا به‌صورت غیرمخرب سلامتی سازه را بازرسی و ارزیابی نماید. پایش سلامتی سازه بروش امپدانس با بهره‌گیری از خواص کوپلِ الکترومکانیکی مواد پیزوالکتریک توسعه‌یافته و یک روش ارزیابی غیر مخرب[4] جدید را عرضه داشته است. مفهوم اساسی این رویکرد پایش تغییرات در امپدانس مکانیکی سازه است که به‌واسطه حضور عیب و آسیب مانند ترک و خوردگی در سازه حاصل می‌گردد. ازآنجایی‌که اندازه‌گیری امپدانس مکانیکی سازه مشکل می‌باشد، روش امپدانس از اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی مواد پیزوالکتریک بهره می‌برد. این امپدانس الکتریکی به‌طور مستقیم با امپدانس مکانیکی سازه میزبان مرتبط بوده و از

[1] Structural Health Monitoring
[2] Active
[3] Passive
[4] Nondestructive Evaluation

حضور عیب در سازه تأثیر می‌پذیرد [16]. از طریق پایش امپدانس الکتریکی اندازه‌گیری شده و مقایسه آن باحالت بدون عیب می‌توان به‌صورت کیفی تعیین نمود که عیب در سازه ایجادشده و یا وقوع آن حتمی است. . به‌منظور اطمینان از حساسیت بالای این روش در تشخیص آسیب‌ها در مراحل ابتدایی شکل‌گیری، امپدانس الکتریکی در فرکانس‌های بالا(کیلوهرتز) اندازه‌گیری می‌گردد. در چنین فرکانس‌هایی طول‌موج تحریک کوچک بوده و به مقدار کافی برای پایش تغییرات کوچک در پیوستگی سازه، حساس می‌باشد. مهم‌تر این‌که سیگنال‌های فرکانس بالا نیاز به ولتاژ خیلی کمی دارند تا بتوانند یک تحریک امپدانس مفید را در سازه میزبان ایجاد نمایند. روش امپدانس که از مواد هوشمند خود دریافت بهره می‌جوید، برای دامنه وسیعی از کاربردهای پایش سلامتی سازه مناسب می‌باشد. انجام آزمایش تکنیک پایش سلامتی به روش امپدانس با موفقیت بر روی چندین سازه پیچیده انجام‌شده است. یک خرپا، سازه‌های هواپیمایی، قطعات دقیق و پیچیده، کاربردهای دما متغیر، اتصالات جوش نقطه‌ای یک سازه، اجزای سازه‌های عمرانی، پل بتنی تقویت‌شده، خطوط لوله و ... تعدادی از این سازه‌ها می‌باشند [17]. ازآنجایی‌که اندازه‌گیری امپدانس مکانیکی یک سازه مشکل می‌باشد، تکنیکِ پایش سلامتی سازه بر اساس امپدانس الکترومکانیکی، از اندازه‌گیری امپدانس الکتریکیِ مواد پیزوالکتریک بهره می‌برد. همان‌گونه که در شکل 1 نشان داده‌شده است، این امپدانس الکتریکی به‌طور مستقیم با امپدانس مکانیکی سازه میزبان مرتبط بوده و از حضور عیب در سازه تأثیر می‌پذیرد.

3- معیار آسیب

زمانی که پاسخ امپدانس طرح‌ریزی می‌گردد یک رویکرد کیفی از شناسایی عیب فراهم می‌شود. تشخیص کمی عیب با استفاده از یک معیار آسیب اسکالر فراهم می‌شود. در این پژوهش از یک الگوریتم آماری ساده که در رابطه (1) آمده و به نام جذر انحراف میانگین مربعات[1] می‌باشد [17]، استفاده می‌شود.

$$M = \sum_{I=1}^{n}\left[\frac{(Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,2}))^2}{Re(Z_{i,1})^2}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

که در این رابطه M بیان‌گر معیار آسیب، $Z_{i,1}$ امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک در حالت سالم در فرکانس i ام، $Z_{i,2}$ امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک در شرایط کنونی سازه در فرکانس i ام می‌باشد.

[1] RMSD

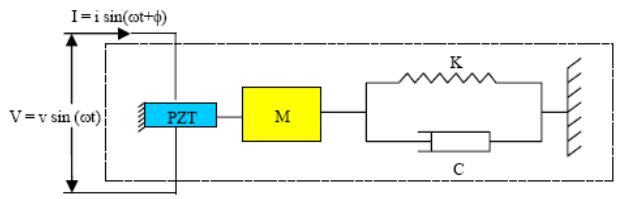

Fig. 1 One D.O.F model demonstrating structural dynamic with piezoelectric [17].

شکل 1 مدل یک درجه آزادی که دینامیک سازه را توسط پیزوالکتریک نشان می‌دهد[17]

4- روش تحقیق

برای بررسی کارایی روش امپدانس الکترومکانیکی در تشخیص عیوب ناشی از خوردگی، آزمایش‌های پایش سلامتی سازه به روش امپدانس بر روی یک تیر از جنس آلیاژ آلومینیوم 1050 و در شرایط مرزی یکسر گیردار انجام می‌گیرد. ابعاد تیر 2×25×340 میلی‌متر می‌باشد. مشخصات تیر مورد آزمایش در جدول 1 آورده شده است.

برای بررسی بهترِ اثر فاصله و نزدیک نمودن شرایط دو آزمایش بر روی تیر دو پیزوالکتریک مقید می‌گردد. دو پیزو الکتریک مورداستفاده از جنس PSI – 5H4E و ابعاد حس گر پیزوالکتریک 20×20×0/267 میلی‌متر است. مشخصات پیزوالکتریک نیز در جدول 2 آورده شده است.

لازم به ذکر است که علائم به‌کاررفته در جداول 1 و 2 در شکل 3 نشان داده‌شده است.

بازه فرکانسی موردنظر که دربرگیرنده بیشترین تعداد پیک می‌باشد، بازه فرکانسی 12 تا 22 کیلوهرتز هست. در حالت یکسر گیردار، همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده‌شده تیر یک‌بار از سمت یک پیزوالکتریک گیره‌بندی شده و سپس از سمت پیزوالکتریک دیگر گیره‌بندی می‌گردد.

محلولِ اسید خورنده ترکیبی از اسید هیدروکلریک، اسید نیتریک و اسید سولفوریک می‌باشد که مقدار هر یک از این اسیدها برحسب درصد در جدول 3 آمده است. از این محلول برای ایجاد عیب خوردگی بر روی تیر استفاده می‌گردد.

جدول 1 ابعاد و مشخصات تیر یک‌سرگیردار در آزمایش اول

Table 1 Dimensions and characteristics of a single-coped beam in the first experiment

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
طول مؤثر تیر	L	33	cm
عرض	b	2/5	cm
ضخامت	h	2	mm
چگالی	ρ	2700	Kg/m³
مدول الاستیسیته	E	70	GPa

جدول 2 خواص و پارامترهای پیزوالکتریک مورداستفاده برای آزمایش اول

Table 2 Properties and Piezoelectric Parameters Used for the First Experiment

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
طول	L_p	2	cm
عرض	b_p	2	cm
ضخامت	h_p	0/267	mm
فاصله ابتدای پیزوالکتریک از تیر	x_1	1/5	cm
فاصله انتهای پیزوالکتریک از تیر	x_2		cm
چگالی	ρ_p	7749/985	Kg/m³
مدول تسلیم	S_{11}^{E}	$1/64\times10^{-11}$	Pa⁻¹
ضریب کرنش	d_{31}	$-320/026\times10^{-12}$	m/V
ثابت دی‌الکتریک	ε_{33}^{T}	$3800\,\varepsilon_0$	F/m
ثابت دی‌الکتریک در هوا	ε_0	$8/85\times10^{-12}$	F/m

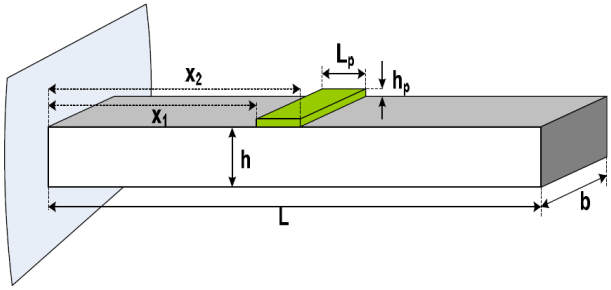

Fig. 3 Schematic figure of a cantilever beam

شکل 3 تصویر شماتیک تیر یک‌سرگیردار

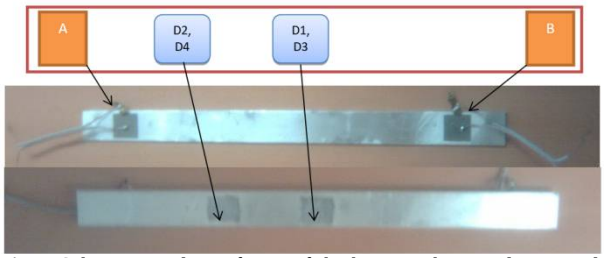

Fig. 4 Schematic and true figure of the beam with piezoelectric and defect locations created

شکل 4 شکل شماتیک و حقیقی تیر به همراه پیزوالکتریک و مکان‌های عیوب ایجادشده

جدول 3 محلول مورداستفاده برای تحمیل خوردگی

Table 3 Solution used to impose corrosion

H_2SO_4 اسید %10	HCL اسید %40	HNO_3 اسید %50

شکل عیب خوردگی به‌صورت مستطیل به ابعاد 20×25 میلی‌متر است و در پشت تیر و در دو منطقه مختلف و با دو عمق مختلف بر روی تیر تحمیل می‌گردد. عمق متوسط خوردگی به ترتیب به‌اندازه 10 و 20 درصد ضخامت تیر در هر مکان می‌باشد. اندازه‌گیری امپدانس در ابتدا در حالت سالم و سپس بعد از تحمیل هر مورد خوردگی انجام می‌پذیرد. مشخصات عیوب خوردگی در جدول 4 آمده است. عیوب D1 و D3 در وسط تیر و عیوب D2 و D4 مابین عیوب D1 و D3 و پیزوالکتریک سمت چپ در شکل 2 یا همان A می‌باشند.

اندازه‌گیری امپدانس در موارد سالم و معیوب توسط برد اندازه‌گیری امپدانس AD5933 انجام می‌گیرد که تصویر آن در شکل 5 آمده است. با استفاده از اتصال USB و نرم‌افزار ارائه‌شده توسط شرکت، کاربر می‌تواند اندازه‌گیری امپدانس را در بازه فرکانسی 10 تا 100 کیلوهرتز انجام دهد.

5- نتایج و بحث

5-1- گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک A و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک A

در ابتدا حالتی بررسی می‌گردد که گیره‌بندی مطابق شکل 6 از سمت پیزوالکتریک A است و اندازه‌گیری نیز از پیزوالکتریک A می‌باشد.

جدول 4 مشخصات خوردگی

Table 4 Corrosion characteristics

شماره	توضیح	عمق خوردگی	علامت
1	سالم	-	Healthy
2	خوردگی 1	0/2 میلی‌متر	D1
3	خوردگی 2	0/2 میلی‌متر	D2
4	خوردگی 3	0/4 میلی‌متر	D3
5	خوردگی 4	0/4 میلی‌متر	D4

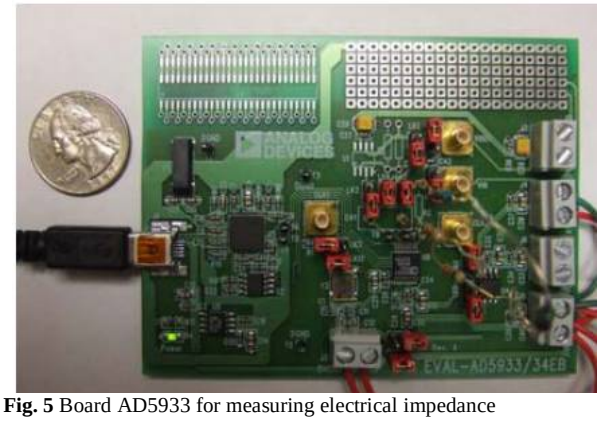

Fig. 5 Board AD5933 for measuring electrical impedance

شکل 5 برد AD5933 برای اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی

Fig. 6 Schematic figure of beam with piezoelectric and clamping

شکل 6 شکل شماتیک تیر به همراه پیزوالکتریک و گیره‌بندی

در ابتدا شکل امپدانس حاصل از پیزوالکتریک A در حالت سالم و حالات معیوب بررسی می‌گردد. در شکل 7 شکل امپدانس در حالت سالم آمده است. در بررسی بازه فرکانسی 12 تا 16 کیلوهرتز پیک در شکل امپدانس دیده نمی‌شود که می‌توان علت آن را قرارگیری گیره‌بندی و اندازه‌گیری بر روی پیزوالکتریک A بیان نمود.

در شکل 8 امپدانس برای عیب D1 نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با ایجاد اولین عیب، پیک‌های امپدانس در مقایسه باحالت سالم به سمت چپ حرکت نموده و دامنه دچار تغییر شده است. شکل امپدانس ناشی از عیوب D2، D3، D4 در شکل‌های 9 تا 11 آمده است.

برای فهم بهتر، در شکل 12 تمامی اشکال امپدانسِ مربوط به حالت سالم و معیوب به همراه یکدیگر در یک بازه فرکانسی کوچک آمده‌اند. همان‌گونه که در شکل 12 مشخص است شکل امپدانس با افزودن هر عیب تغییر می‌کند که این تغییر به‌صورت شیفت فرکانسی و تغییر در دامنه مشاهده می‌گردد.

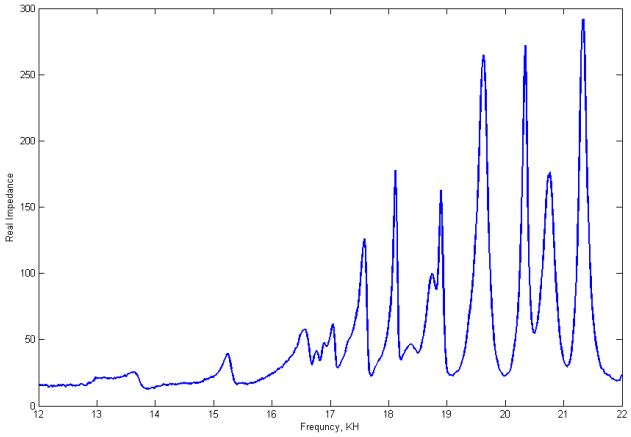

Fig. 7 Cantilever beam impedance in healthy state obtained from piezoelectric A

شکل 7 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم حاصل از پیزوالکتریک A

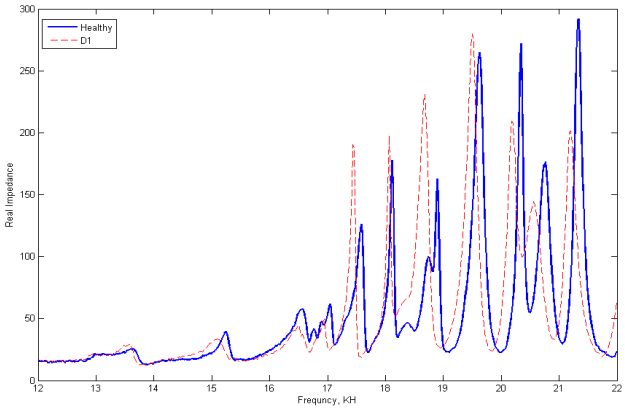

Fig. 8 The real impedance for defect D1

شکل 8 قسمت حقیقی امپدانس برای عیب D1

این تغییر در شکل امپدانس بیان‌گر تغییر در جرم، سفتی و یا میرایی سازه است و این بدان معناست که سازه دچار تغییر شده و یا به‌عبارت‌دیگر عیبی در سازه ایجادشده است.

برای تشخیص کمّی عیب می‌بایست از یک آسیب متریکِ اسکالر تحت عنوان معیار آسیب استفاده گردد.

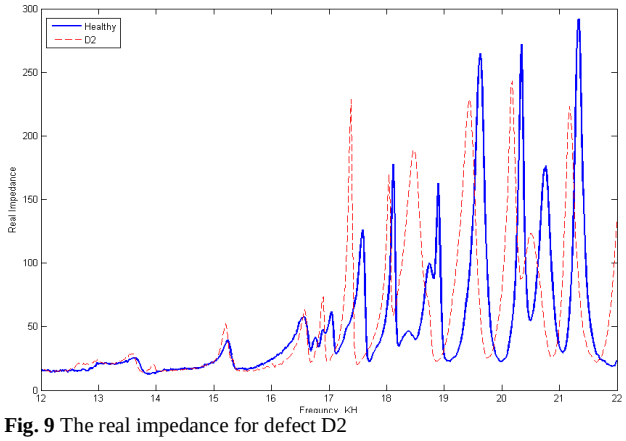

Fig. 9 The real impedance for defect D2

شکل 9 قسمت حقیقی امپدانس برای عیب D2

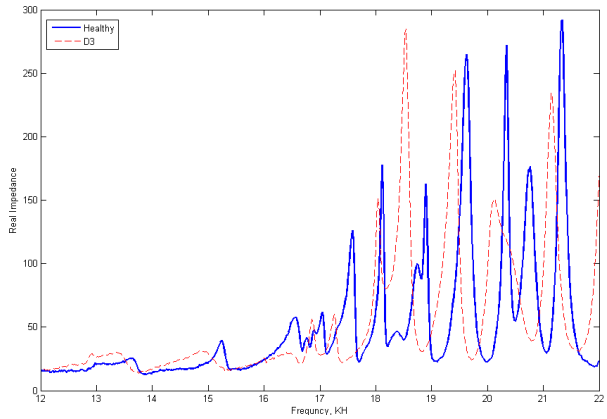

Fig. 10 The real impedance for defect D3

شکل 10 قسمت حقیقی امپدانس برای عیب D3

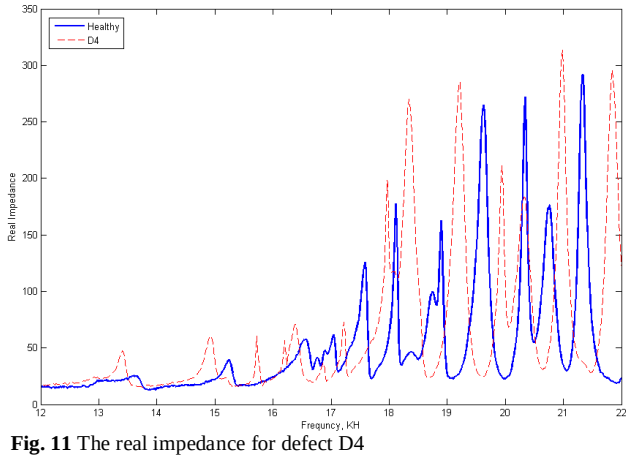

Fig. 11 The real impedance for defect D4

شکل 11 قسمت حقیقی امپدانس برای عیب D4

در نمودار معیار آسیب که در شکل 13 آمده است، مشاهده می‌گردد که با افزودن هر عیب، مقدار معیار آسیب افزایش می‌یابد که شیب افزایش معیار از D1 به D2 و از D3 به D4 نسبت به D2 به D3 بیشتر است که می‌توان این مورد را با تغییر فاصله عیب تا مکان گیره‌بندی مرتبط دانست.

5-2- گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک A و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک B

در بخش دوم حالتی بررسی می‌گردد که گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک A و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک B می‌باشد. شکل امپدانس حاصل از پیزوالکتریک B در حالت سالم در شکل 14 و نتایج معیار آسیب در شکل 15 نمایش داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در هر دو حالت، مقادیر معیار آسیب، موارد آسیب‌دیده را از موارد سالم شناسایی نموده و اختلاف بین میزان درجات خوردگی نیز آشکار می‌باشد.

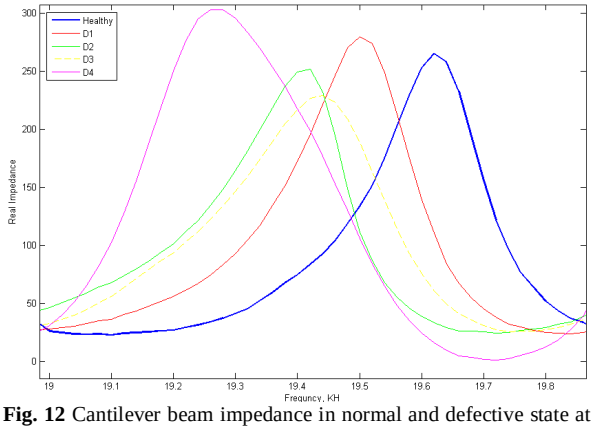

Fig. 12 Cantilever beam impedance in normal and defective state at frequency range 19 to 20 kHz from piezoelectric A

شکل 12 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم و معیوب در بازه فرکانسی 19 تا 20 کیلوهرتز حاصل از پیزوالکتریک A

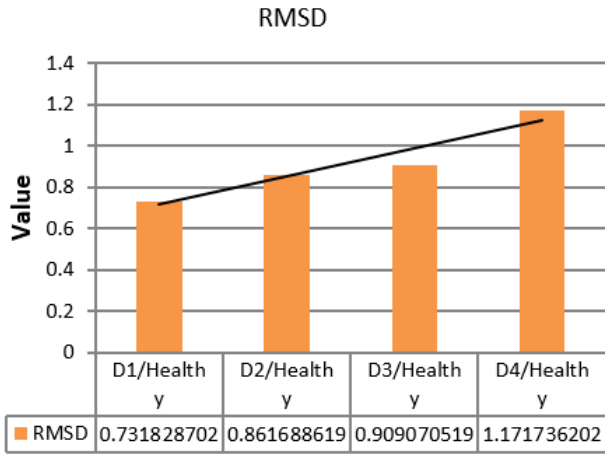

Fig. 13 Damage index for Piezoelectric obtained Beam A

شکل 13 معیار آسیب برای تیر یکسرگیردار حاصل از پیزوالکتریک A

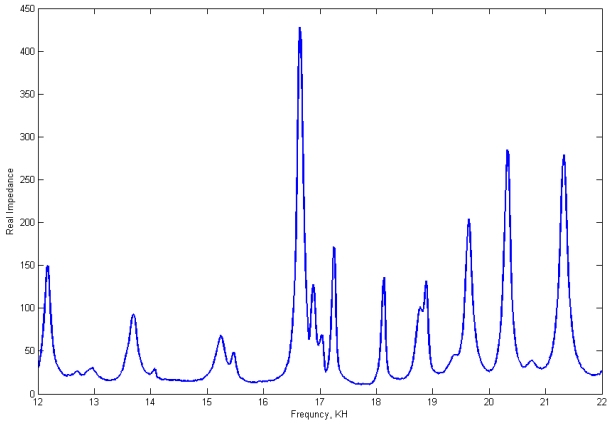

Fig. 14 Impedance spectrum for the healthy state of the piezoelectric B

شکل 14 امپدانس برای حالت سالم حاصل از پیزوالکتریک B

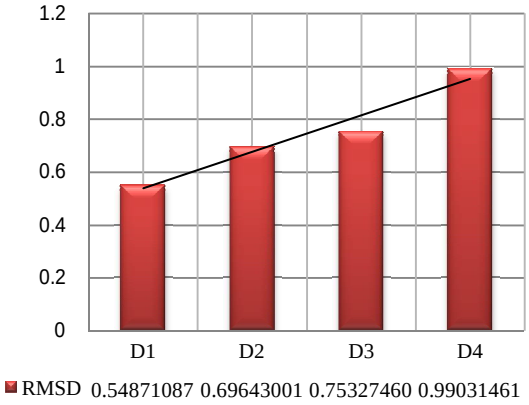

Fig. 15 Damage index of piezoelectric B when clamping is from piezoelectric A

شکل 15 معیار آسیب حاصل از پیزوالکتریک B در شرایطی که گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک A می‌باشد.

با مقایسه معیار آسیب دو حالت قبل مشاهده می‌شود که مقادیر معیار آسیب حاصل برای پیزوالکتریک A بیشتر از پیزوالکتریک B می‌باشد. باید توجه داشت که در هر دو حالت اندازه‌گیری، گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک A می‌باشد. این مطلب را می‌توان با افزایش سفتی سازه در نزدیکی پیزوالکتریک A که موجب رخ دادن فرکانس‌های طبیعی در فرکانس‌های بالاتری تر می‌شود توجیه نمود.

5-3- گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک B و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک B

همان‌گونه که در شکل 16 نشان داده‌شده است، شرایط مرزی یکسرگیردار به این صورت است که تیر از سمت پیزوالکتریک B گیره‌بندی شده و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک B می‌باشد. شکل امپدانس حاصل‌شده از پیزوالکتریک B در حالت سالم در شکل 17 و شکل‌های امپدانس با افزودن هر عیب در شکل‌های 18 تا 21 قابل‌مشاهده می‌باشد.

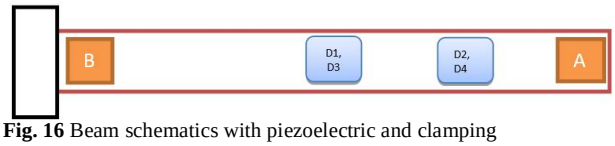

Fig. 16 Beam schematics with piezoelectric and clamping

شکل 16 شماتیک تیر به همراه پیزوالکتریک و گیره‌بندی

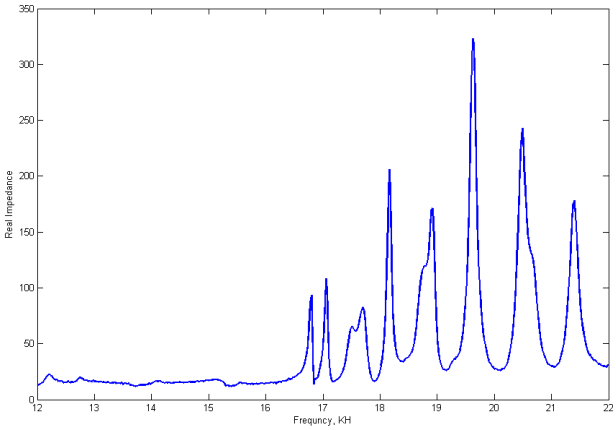

Fig. 17 Cantilever beam impedance in healthy state obtained from piezoelectric B

شکل 17 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم حاصل از پیزوالکتریک B

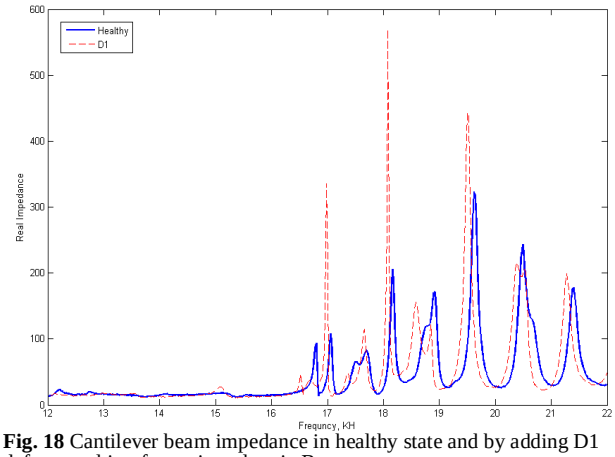

Fig. 18 Cantilever beam impedance in healthy state and by adding D1 defect resulting from piezoelectric B

شکل 18 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم و با افزودن عیب D1 حاصل از پیزوالکتریک B

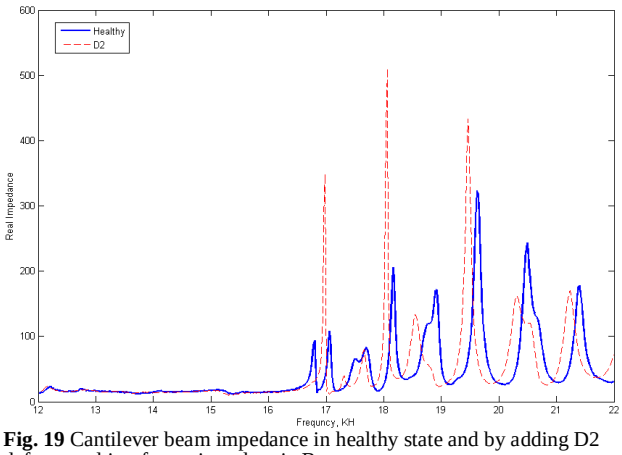

Fig. 19 Cantilever beam impedance in healthy state and by adding D2 defect resulting from piezoelectric B

شکل 19 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم و با افزودن عیب D2 حاصل از پیزوالکتریک B

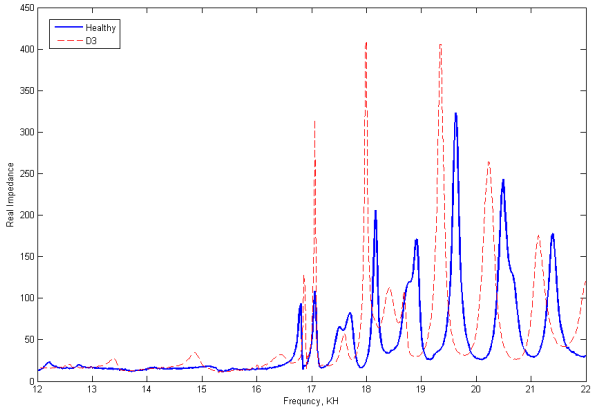

Fig. 20 Cantilever beam impedance in healthy state and by adding D3 defect resulting from piezoelectric B

شکل 20 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم و با افزودن عیب D3 حاصل از پیزوالکتریک B

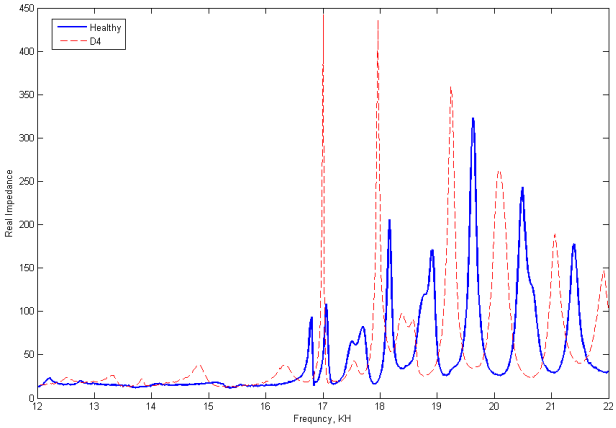

Fig. 21 Cantilever beam impedance in healthy state and by adding D3 defect resulting from piezoelectric B

شکل 21 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم و با افزودن عیب D4 حاصل از پیزوالکتریک B

برای فهم بهتر در شکل 22 تمامی اشکال امپدانسِ حاصل از پیزوالکتریک B در حالت سالم و حالات معیوب به همراه یکدیگر در یک بازه فرکانسی کوچک آمده‌اند. در نمودار معیار آسیب که در شکل 23 آمده است، مشاهده می‌گردد که با افزودن هر عیب، مقدار معیار آسیب افزایش می‌یابد.

5-4- گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک B و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک A

در این حالت گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک B صورت گرفته و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک A انجام می‌گیرد. شکل امپدانس حاصل از پیزوالکتریک A در شکل 24 و نتایج معیار آسیب حاصل در شکل 25 آمده است.

با مقایسه معیار آسیب دو حالت نشان داده‌شده در شکل‌های 23 و 25 مشاهده می‌شود که مقادیر معیار آسیب حاصل برای پیزوالکتریک B بیشتر از پیزوالکتریک A می‌باشد. درهر دو

حالت اندازه‌گیری، گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک B می‌باشد. با گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک B سفتی سازه در نزدیکی پیزوالکتریک B افزایش‌یافته که موجب رخ دادن فرکانس‌های طبیعی در فرکانس‌های بالاتری تر می‌شود.

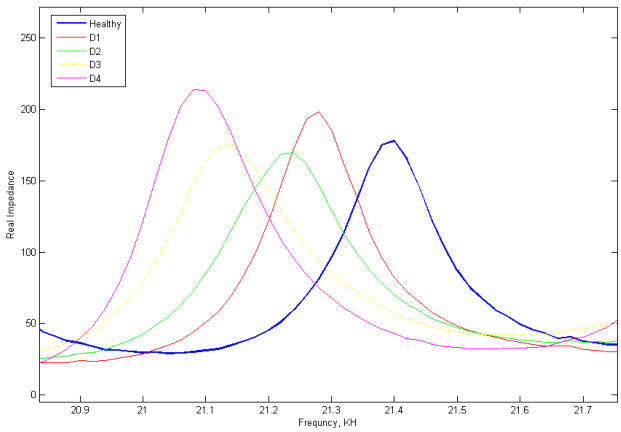

Fig. 22 Cantilever beam impedance in normal and defective state in the frequency range 20.8 to 21.8 kHz of piezoelectric B

شکل 22 امپدانس تیر یکسرگیردار در حالت سالم و معیوب در بازه فرکانسی 20.8 تا 21.8کیلوهرتز حاصل از پیزوالکتریک B

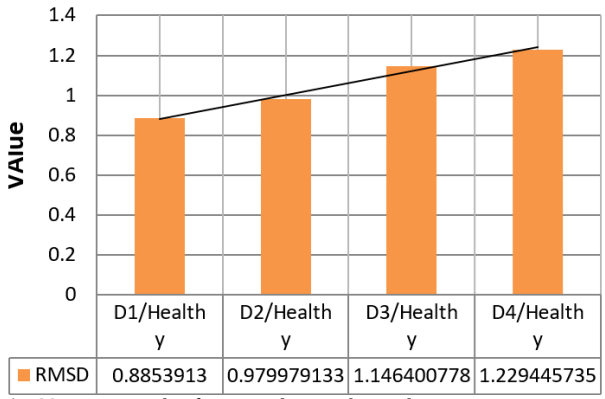

Fig. 23 Damage index for Piezoelectric obtained Beam B

شکل 23 معیار آسیب برای تیر یکسرگیردار حاصل از پیزوالکتریک B

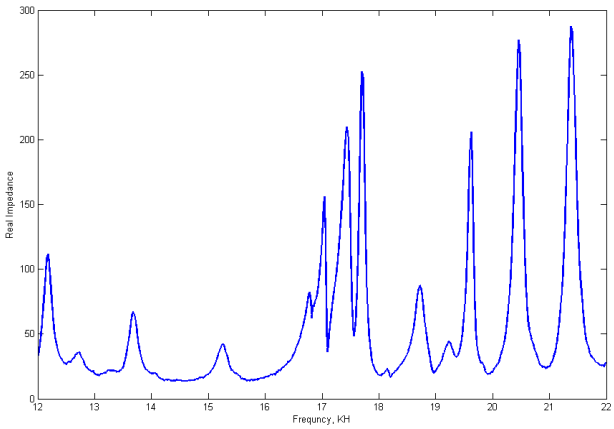

Fig. 24 Cantilever beam impedance in healthy state obtained from piezoelectric A

شکل24 امپدانس برای حالت سالم حاصل از پیزوالکتریک A

در شکل 26 نتایج حاصل از پیزوالکتریک‌های A و B در حالت سالم برای گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک B که در شکل‌های 17 و 24 آورده شده نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشخص است اختلاف دو نمودار در پیک‌های ایجادشده در بازه فرکانسی 12 تا 16 کیلوهرتز است که تنها در مورد پیزوالکتریک A مشاهده می‌گردد. می‌توان دلیل وجود این پیک‌ها را این‌گونه توجیه نمود که به دلیل دور بودن پیزوالکتریک A از محل گیره‌بندی، مقدار سفتی سازه در آن ناحیه بر اساس رابطه (2) کمتر بوده فرکانس‌های طبیعی تیر بر اساس رابطه (3) در فرکانس‌های پایین‌تری روی می‌دهند.

$$k = \frac{F}{\delta} \tag{2}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3}$$

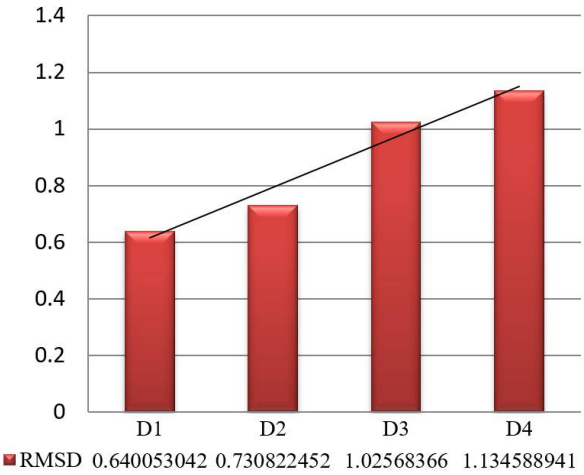

Fig. 25 Damage index for Piezoelectric obtained Beam A

شکل 25 معیار آسیب حاصل برای اندازه‌گیری از پیزوالکتریک A

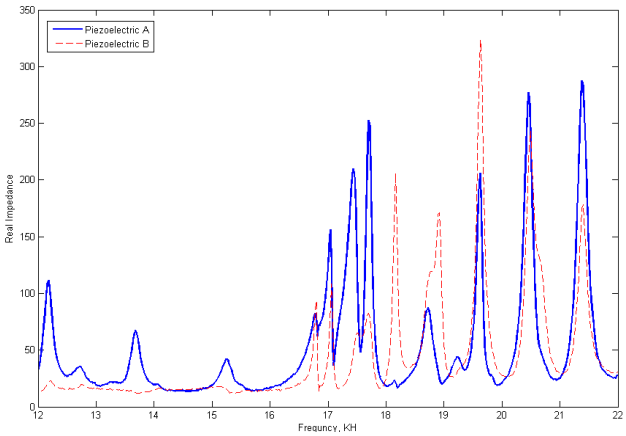

Fig. 26 The impedance obtained from piezoelectric A and B when clamping is from piezoelectric B.

شکل 26 امپدانس حاصل از پیزوالکتریک **A** و **B** در شرایطی که گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک **B** می‌باشد

همان‌طور که عنوان شد معیار آسیب بیان‌گر اختلاف بین دو شکل امپدانس می‌باشد. هر چه مقدار معیار آسیب بیشتر باشد یعنی شکل امپدانس در وضعیت کنونی سازه در مقایسه باحالت سالم تغییر بیشتری از خود نشان داده است که این به‌صورت تغییر در دامنه و یا شیفت فرکانسی در شکل امپدانس مشاهده می‌گردد. با بررسی نتایج حاصل از معیار آسیب برای عیوب خوردگی ایجادشده، عامل فاصله عیب تا مکان تکیه‌گاه بر معیار آسیب تأثیرگذار می‌باشد. در این آزمایش برای بررسی اثر فاصله عیب بر روی شکل امپدانس و مقدار معیار آسیب، کافی است که حالت‌های گیره‌بندی و اندازه‌گیری از سمت پیزوالکتریک A و گیره‌بندی و اندازه‌گیری از سمت پیزوالکتریک B باهم مقایسه گردند، زیرا در این صورت شرایط گیره‌بندی یکسان و تنها می‌توان بر روی اثر فاصله عیب از پیزوالکتریک مانور داد. در حالت اول گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک A است و اندازه‌گیری امپدانس نیز از این پیزوالکتریک انجام می‌گیرد و در حالت بعدی گیره‌بندی از سمت پیزوالکتریک B است و اندازه‌گیری امپدانس از پیزوالکتریک B انجام می‌گیرد. شکل 27 نمای شماتیکی از تیر یکسرگیردار را در حالت‌های اول و دوم نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که هر چه عیب نزدیک‌تر به پیزوالکتریک باشد، تغییرات در شکل امپدانس شدیدتر بوده و درنتیجه معیار آسیب دارای مقدار بزرگ‌تری باشد. درنتیجه در حالت اول مقدار معیار آسیب می‌بایست برای عیب‌های D2 و D4 قابل‌توجه‌تر و برای حالت دوم نیز مقدار معیار آسیب برای عیب‌های D1 و D3 بزرگ‌تر باشد. در شکل 28 مقادیر معیار آسیب برای دو حالت آورده شده است.

در نمودار مربوط به حالت اول مشاهده می‌شود که مقدار شیب نمودار بین حالت D1 به D2 و حالت D3 به D4 از شیب نمودار در حالت D2 به D3 بیشتر است و این بدان معناست که اختلاف بین شکل امپدانس برای عیب‌های دوم و چهارم بیشتر بوده است. برای فهم بهتر اختلاف بین مقادیر معیار آسیب و میزان درصد افزایش آن‌ها در حالت نسبی و در حالت مطلق برای حالت اول در جدول 5 آورده شده است.

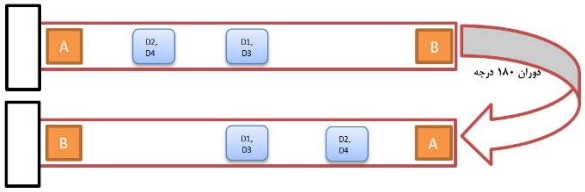

Fig. 27 Schematic figure of the beam in the first and second case

شکل 27 شکل شماتیک تیر یکسرگیردار در حالت اول و دوم

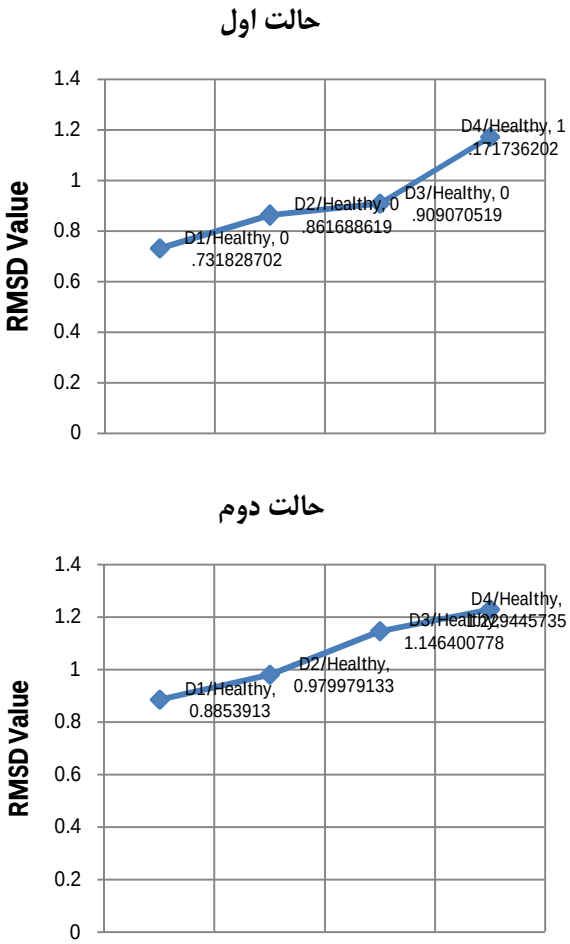

Fig. 28 Damage index in the first and second case

شکل 28 معیار آسیب در حالت اول و دوم

جدول 5 اختلاف مابین معیارهای آسیب برای حالت اول در حالت نسبی و مطلق

Table 5 Difference between damage index for the first case in relative and absolute state

توضیح	مقدار	توضیح	مقدار
اختلاف بین D1 و D2	%17/73	اختلاف بین D1 و D2	%17/73
اختلاف بین D2 و D3	%5/51	اختلاف بین D1 و D3	%24/44
اختلاف بین D3 و D4	%28/19	اختلاف بین D1 و D4	%60/01

همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه عیب به پیزوالکتریک نزدیک‌تر باشد به دلیل این‌که سبب تغییرات بیشتری در شکل امپدانس می‌گردد، موجب بزرگ‌تر شدن مقدار معیار آسیب شده و درنتیجه موجب بروز اختلاف بیشتری بین هر مورد از آسیب‌ها می‌گردد. در نمودار مربوط به حالت دوم نیز مشاهده می‌شود که مقدار شیب نمودار بین حالت D2 به D3 از شیب نمودار در حالت D3 به D4 بیشتر است و این بدان معناست که اختلاف بین شکل امپدانس برای عیب سوم بیشتر است. برای فهم بهتر اختلاف بین مقادیر معیار آسیب و میزان درصد افزایش آن‌ها در

حالت نسبی و در حالت مطلق برای حالت دوم در جدول 6 آورده شده است.

جدول 6 اختلاف مابین معیارهای آسیب برای حالت دوم در حالت نسبی و مطلق

Table 6 Difference between damage index for the second case in relative and absolute state

توضیح	مقدار	توضیح	مقدار
اختلاف بین D1 و D2	%10/68	اختلاف بین D1 و D2	%10/68
اختلاف بین D2 و D3	%17	اختلاف بین D1 و D3	%29/5
اختلاف بین D3 و D4	%7/24	اختلاف بین D1 و D4	%38

در این حالت نیز مشاهده می‌شود که به دلیل نزدیک‌تر بودن عیب D3 به پیزوالکتریک B تغییرات بیشتری در شکل امپدانس ایجاد می‌گردد که این امر موجب بزرگ‌تر شدن مقدار معیار آسیب شده و درنتیجه موجب بروز اختلاف بیشتری بین هر مورد از آسیب‌ها می‌گردد.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش امپدانس الکترومکانیکی برای تشخیص عیب خوردگی استفاده‌شده است. تا کنون عیب یابی خوردگی، که یک آسیب غیریکنواخت و افزاینده تدریجی محسوب می‌گردد در سازه هایی مانند تیر و لوله با روش‌های مختلف و بصورت محدود با روش امپدانس الکترومکانیکی صورت گرفته است. ولیکن اثر پارامترهای مؤثر در عیب‌یابی خوردگی و اندازه‌گیری امپدانس و کمّی‌سازی اثر هر پارامتر صورت نگرفته است. بدین منظور در این تحقیق آزمایش‌های پایش سلامتی سازه به روش امپدانس بر روی یک تیر از جنس آلیاژ آلومینیوم و در شرایط مرزی یکسرگیردار انجام گرفت. عیوب خوردگی توسط محلول اسید خورنده ترکیبی ایجادشده و با استفاده از دو پیزوالکتریک و حالات مختلف گیره‌بندی شکل امپدانس مورد بررسی قرارگرفته و نتایج حاکی از کارآمدی این روش در تشخیص بلادرنگ خوردگی است. شکل امپدانس به‌دست‌آمده در حالات مختلف بررسی‌شده، اثرگذاری عوامل اصلی درجه عیب، وضعیت گیره‌بندی و فاصله آسیبِ ناشی از خوردگی تا مکان گیره‌بندی را بر معیار آسیب نشان می‌دهد. با افزودن هر عیب به تیر یکسر گیردار تغییر در شکل امپدانس به‌وضوح دیده‌شده و مقدار معیار آسیب متریک نیز زیاد می‌گردد. در ضمن با افزایش مقدار عیب، مقدار معیار آسیب نیز زیاد شده که این امر نشان می‌دهد که رابطه‌ای بین مقدار معیار آسیب و درجه عیب وجود دارد. از طرفی اثر شرایط مرزی که در اینجا وضعیت گیره‌بندی می‌باشد بر روی شکل امپدانس و معیار آسیب تاثیرگذاربوده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در یک حالت گیره‌بندی مقدار معیار آسیب محاسبه‌شده از شکل امپدانسِ پیزوالکتریکی که به گیره نزدیک‌تر است بیشتر از پیزوالکتریک دورتر خواهد بود که این امر را می‌توان به افزایش سفتی سازه نسبت داد. با بررسی شرایط گیره‌بندی و اندازه‌گیری یکسان، تأثیر اثر فاصله آسیبِ ناشی از خوردگی تا مکان گیره‌بندی بر معیار آسیب، مشخص می‌گردد. از نتایج تجربی حاصله مشاهده می‌شود هر چه عیب به پیزوالکتریک نزدیک‌تر باشد به دلیل این‌که سبب تغییرات بیشتری در شکل امپدانس می‌گردد، موجب بزرگ‌تر شدن مقدار معیار آسیب شده و درنتیجه موجب بروز اختلاف بیشتری بین هر مورد از آسیب‌ها می‌گردد.

7- مراجع

[1] W. Li, T. Liu, D. Zou, J. Wang, T. H. Yi, PZT based smart corrosion coupon using electromechanical impedance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 129, pp. 455–469, 2019.

[2] A. Cousins, A. Ilyushechkin, P. Pearson, A. Cottrell, S. Huang, P.H. Feron, Corrosion coupon evaluation under pilot-scale CO2 capture conditions at an Australian coal-fired power station, *Greenhouse Gases Sci. Technol.* Vol.3, pp. 169–184, 2013.

[3] M. Marja-aho, P. Rajala, E. Huttunen-Saarivirta, A. Legat, A. Kranjc, T. Kosec, L. Carpén, Copper corrosion monitoring by electrical resistance probes in anoxic groundwater environment in the presence and absence of sulfate reducing bacteria, Sens. *Actuators*, pp. 252–274, 2018.

[4] D. Luo, Y. Li, J. Li, K.S. Lim, N.A.M. Nazal, H. Ahmad, A recent progress of steel bar corrosion diagnostic techniques in RC structures, *Sensors 19*, 2019.

[5] X. Zhao, P. Gong, G. Qiao, J. Lu, X. Lv, J. Ou, Brillouin corrosion expansion sensors for steel reinforced concrete structures using a fiber optic coil winding method, *Sensors 11*, pp. 10798–10819, 2011.

[6] Y. Kawasaki, T. Wakuda, T. Kobarai, M. Ohtsu, Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission, *Constr. Build. Mater*, Vol. 48, pp. 1240–1247, 2013.

[7] S. Sharma, A. Mukherjee, Ultrasonic guided waves for monitoring corrosion in submerged plates, *Struct. Control Health Monit*, Vol. 22, pp. 19–35, 2015.

[8] S. Fan, W. Li, Q. Kong, Q. Feng, G. Song, Monitoring of pin connection loosening using eletromechanical impedance: Numerical simulation with experimental verification, *J. Intell. Mater. Syst. Struct*, Vol. 29, pp. 1964–1973, 2018.

[9] S. Fan, S. Zhao, B. Qi, Q. Kong, Damage evaluation of concrete column under impact load using a

piezoelectric-based EMI technique, *Sensors*, Vol. 18, 2018.

[10] J. Wu, W. Li, Q. Feng, Electro-mechanical impedance (EMI) based interlayer slide detection using piezoceramic smart aggregates—a feasibility study, *Sensors*, Vol. 18, 2018.

[11] W.S. Na, H. Lee, Experimental investigation for an isolation technique on conducting the electromechanical impedance method in high-temperature pipeline facilities, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 383, pp. 210-22, 2016

[12] J. W. Ayres, F. Lalande, Z. Chaudhry, C. A. Rogers, Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, 1997.

[13] V. Talakokula, S. Bhalla, A. Gupta, Corrosion assessment of reinforced concrete structures based on equivalent structural parameters using electromechanical impedance technique, *J. Intell. Mater. Syst. Struct*, Vol. 25, pp. 484–500, 2013.

[14] W.S. Na, Possibility of detecting wall thickness loss using a PZT based structural health monitoring method for metal based pipeline facilities, *NDT E Int*. 88 pp. 42–50, 2017

[15] Myung, H. KIM, A Smart Health Monitoring System with Application to Welded Structures using Piezoceramic and Fiber Optic Transducer, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 35-42, 2006.

[16] C. Liang, F.P. Sun, C.A. Rogers, Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material System – Determination of Actuator Power Consumption and System Energy Transfer", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 21-26, 1994.

[17] F. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang, Rogers, Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensors-Actuator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, pp. 134-139, 1995.