مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، شهریور 1399، دوره 7، شماره 6، ص‌ص. 8 - 17

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

پایش و تشخیص عیب خوردگی در جداره داخلی لوله فلزی به روش غیرمخرب امپدانس الکترومکانیکی

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

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

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

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 آذر 1398

داوری اولیه: 14 دی

پذیرش: 30 دی 1398

کلیدواژگان:

پایش سلامتی سازه

خوردگی

امپدانس الکترومکانیکی

پیزوالکتریک

لوله

چکیده

خوردگی، نوعی تخریب 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. لوله‌های مورداستفاده در صنایع نفت و گاز و همچنین لوله‌های آلومینیومی مورداستفاده به‌منظور انتقال حرارت در سیستم‌های سردکننده در معرض خوردگی قرار دارند. ازاین‌رو، بررسی و تشخیص خوردگی که آسیبی پیش‌رونده می‌باشد به‌صورت کیفی و کمّی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش از روش نوین اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی برای تشخیص خوردگی در داخل یک لوله آلومینیومی استفاده شده است. وجود عیب و یا تغییر در یکپارچگی سازه باعث تغییر در امپدانس مکانیکی سازه شده و با توجه به خواص کوپلینگ الکترومکانیکی پیزوالکتریک، این تغییر به‌صورت تغییر در امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک نشان داده می‌شود. برای این تحقیق، مقطع خوردگی دایره‌ای با ایزولاسیون محیط اطراف در جدار داخلی لوله توسط محلولِ اسید خورنده در طی بازه زمانی 180 دقیقه تا سوراخ شدن لوله ایجاد شد. اندازه‌گیری طیف امپدانس در بازه 10 تا 20 کیلوهرتز به‌منظور پایش تغییرات طیف امپدانس در اثر پیشرفت خوردگی هر 20 دقیقه انجام گرفت که با مقایسه شکل امپدانس در هر مرحله باحالت سالم، در فرکانس‌های تشدید و دامنه در طیف امپدانس تغییراتی مشاهده و به‌صورت کمّی توسط معیار آسیب استخراج گشت. نتایج تجربی حاصل از معیار آسیب اسکالر به‌خوبی و به‌صورت خطی با افزایش عمق خوردگی افزایش یافت که بیانگر کارایی این روش در تشخیص بلادرنگ آسیب ناشی از خوردگی در لوله می‌باشد.

Monitoring and detection of corrosion defect in the inner wall of the metal tube by non-destructive 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 :11 Desember 2019

First Decision: 4 January 2020

Accepted: 20 January 2020

Keywords:

Structural Health Monitoring

Corrosion

Electromechanical Impedance

Piezoelectric

Pipe

Abstract

Corrosion is a type of irreversible destruction of a metal by chemical or electrochemical reaction with ambient. The loss of materials caused by corrosion in metallic structures is a widespread and urgent problem in various industries including petroleum, gas, aerospace, construction, mining, and manufacturing. Pipes used in the oil and gas industry as well as aluminum pipes used for heat transfer in cooling systems are subject to corrosion. Therefore, the evaluation and detection of corrosion, progressive damage, is of particular importance both qualitatively and quantitatively. In this study, a new electromechanical impedance measurement method was used to detect corrosion inside an aluminum tube. Defects or changes in the structure integrity cause changes in the mechanical impedance of the structure which shown as the alteration in the piezoelectric electrical impedance, due to the piezoelectric coupling characteristics. For this study, a circular corrosion cross-section with insulation of the surrounding environment on the inner wall of the tube was created by the corrosive acid solution in a period of 180 minutes until the tube was pierced. Measurement of impedance spectrum in the range of 10-20 kHz was performed to monitor changes in impedance shape as a result of corrosion progress in steps of 20 minutes. Comparing the impedance spectrum at each step with a healthy state, changes in amplitude and resonance frequencies revealed and extracted quantitatively. Experimental results from the scalar damage criteria increased linearly with increasing corrosion depth, indicating the effectiveness of this method in real-time detection of corrosion damage in the pipe.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. R. Hamzeloo, B. Akhondi, M. Fatehi, Monitoring and detection of corrosion defect in the inner wall of the metal tube by non-destructive electromechanical impedance method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 8- 17, 2020 (in Persian)

1- مقدمه

سلامت خطوط لوله انتقال و توزیع نفت، گاز، مواد شیمیایی، آب، بخار، فرآورده‌های نفتی و سایر مواد از اهمیت اساسی برای اکثر اقتصادهای جهان برخوردار است. یکپارچگی این دارایی‌های بنیادی و زیرساخت‌ها، به‌شدت توسط خرابی الکتروشیمیایی که عموماً به‌عنوان خوردگی شناخته می‌شود، تهدید می‌گردد که در شکل 1 آسیب‌های متداول ناشی از خوردگی در خط لوله نشان داده‌شده است[1].

خوردگی خط لوله و خرابی‌های حاصل از آن و همچنین هزینه‌های موردنیاز جهت تعمیرات احتمالی و نظارت، سالیانه میلیاردها دلار هزینه برای اقتصاد جهانی به دنبال دارد. در طول دهه‌های گذشته، روش‌های بی‌شماری برای نظارت برخوردگی در اصول مختلف کاری توسعه داده‌شده است. برای تخمین میزان خوردگی، روش کوپن خوردگی ایجاد شده است، که در آن کوپن‌های خوردگی در مکان‌های بحرانی نصب می‌شوند و وزن کوپن‌ها به‌صورت دوره‌ای اندازه‌گیری می‌شوند[2]. روش ساده دیگر، پروب مقاومت الکتریکی بوده که بر این اصل استوار است که یک سیم، مقاومت الکتریکی خود را در اثر کاهش سطح مقطع با خوردگی افزایش می‌دهد[3]. اگرچه این روش به‌طور عمومی قابل‌استفاده است ولی استفاده از پروب در مایعات کمتر مؤثر است.

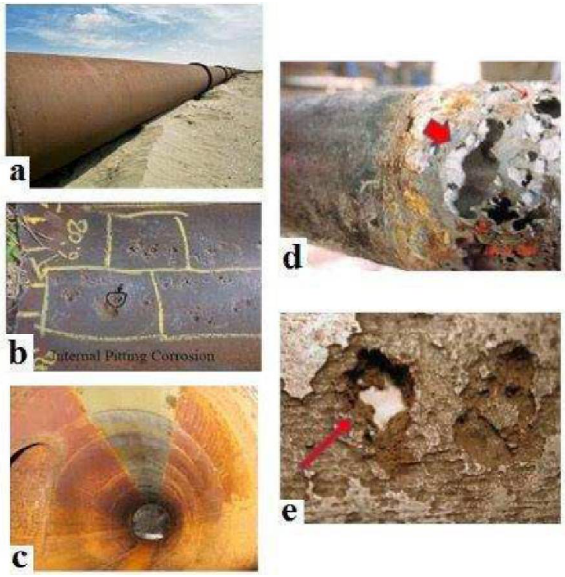

Fig. 1 Common forms of corrosion in oil and gas pipelines: a) Uniform corrosion, b) pitting corrosion, c) cavitation and erosion corrosion, d) stray current corrosion, e) microbiologically-influenced corrosion [1]

شکل 1 اشکال معمول خوردگی در خطوط لوله‌های گاز و نفت: (a) خوردگی یکنواخت، (b) خوردگی حفره‌ای، (c) خوردگی فرسایشی، (d) خوردگی جریان‌سرگردان، (e) خوردگی متأثر از میکروبیولوژیکی[1]

روش‌های رایج در بین این گروه روش‌های الکتروشیمیایی هستند[4]، که می‌توان ازجمله 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 برخوردگی هریک با جنبه خاصی هستند. بااین‌حال، آن‌ها تنها می‌توانند امکان خوردگی را ارزیابی کنند درحالی‌که قادر به ارزیابی کمّی از مقدار خوردگی نیستند. در سال‌های اخیر پایش سلامتی سازه‌ها در حین کار و روش‌های 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. روش پایش سلامتی سازه بر اساس امپدانس الکترومکانیکی یک روش 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 به روش امپدانس الکترومکانیکی، با بهره‌گیری از خواص کوپلِ الکترومکانیکی مواد پیزوالکتریک توسعه‌یافته و یک روش ارزیابی غیر مخرب 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 حضور عیب در سازه تأثیر می‌پذیرد. بنابراین به‌منظور بررسی عیب ناشی از خوردگی در لوله‌ها به‌صورت کیفی و کمّی، روش امپدانس الکترومکانیکی می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد.

لی و همکاران با استفاده از اندازه‌گیری امپدانس مکانیکی مبتنی بر لیزر، یک روش تشخیص آسیب را پیشنهاد می‌کند که پایش سلامت ساختاری خطوط لوله را تحت دمای بالا و در محیط‌های رادیواکتیو نیروگاه‌های هسته‌ای تأمین می‌کند[5]. اسکویی و همکاران از روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای بررسی پیشرفت ترک‌خوردگی تنشی در فولادهای خط لوله X70 استفاده کردند که درنهایت یک مدل مدار الکتروشیمیایی برای تشخیص ترک‌خوردگی پیشنهاد دادند[6]. هان و همکاران از روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی موضعی برای بررسی خوردگی الکتروشیمیایی فولاد کربن X65 در خطوط انتقال قیر رقیق‌شده استفاده

کردند[7]. عزیززاده و همکاران از روش نشتی شار مغناطیسی برای تشخیص خوردگی در خطوط انتقال گاز استفاده نمودند[8]. نا و همکاران[9] 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 و همکاران توسط روش امپدانس مکانیکی خسارات واقعی زیرساخت‌های شهری مانند اتصالات پل را مورد بررسی قراردادند که با تبدیل اندازه‌گیری‌های امپدانس به یک معیار آسیب اسکالر، پیاده‌سازی بلادرنگ روش مبتنی بر امپدانس ثابت‌شده است[10]. لی و همکاران 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[11]. تالاکوکولا و همکاران فرایند خوردگی میلگردهای بتون را به‌وسیله روش امپدانس الکترومکانیکی ارزیابی کردند[12]. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که خروجی‌های استخراج‌شده از علائم ورودی در تشخیص و کمّی کردن مقدار خوردگی مؤثر هستند. نا و همکاران[13] امکان تشخیص کاهش ضخامت دیوار تأسیسات خط لوله بر پایه فلز با استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی را موردبررسی قراردادند. سون و همکاران مسائل سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پایش سلامت سازه‌ای مبتنی بر امپدانس را بر اساس مواد پیزوالکتریک موردبررسی قرار دادند[14]. حمزه‌لو و همکاران[15] به بررسی تشخیص عیب شیاری در استوانه‌های جدارنازک فلزی با کمک روش امپدانس الکترومکانیکی پرداختند و اثر ضخامت استوانه‌های توخالی بر فرایند را موردبررسی قراردادند. فان و همکاران[16] 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[17]. وو و همکاران امکان استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی برای تشخیص آسیب لغزش بین‌لایه‌ای را موردبررسی قراردادند که نتایج تجربی، امکان‌سنجی و عملی بودن استفاده از این روش را برای تشخیص آسیب لغزش بین‌لایه‌ای تأیید نمود[18].

همان‌طور که اشاره شد در تحقیقات قبلی روش امپدانس الکترومکانیکی برای تشخیص و ارزیابی عیب خوردگی در داخل لوله بررسی نشده است. هدف نهایی از این مقاله بررسی روش امپدانس به‌عنوان یک ابزار مفید برای تشخیص و تعیین خوردگی در لوله فلزی 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 و پیش‌رونده بودن خوردگی، 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. در این تحقیق خوردگی در جداره داخلی لوله آلومینیومی با نرخ بالا توسط محلولِ اسید خورنده ایجاد گردیده و تغییرات طیف امپدانس الکترومکانیکی با کمک وصله پیزوالکتریک نصب‌شده در جدار بیرونی لوله اندازه‌گیری می‌شود تا کارایی این روش در تشخیص بلادرنگ آسیب ناشی از خوردگی در لوله بررسی گردد.

1-1- روش امپدانس الکترومکانیکی

روش پایش سلامتی سازه بروش امپدانس الکترومکانیکی با بهره‌گیری از خواص کوپلِ الکترومکانیکی مواد پیزوالکتریک توسعه‌یافته و یک روش ارزیابی غیر مخرب جدید را عرضه داشته است. روش امپدانس الکترومکانیکی به‌عنوان یک روش کلی برای تشخیص تغییرات امپدانس مکانیکی ناشی از وجود آسیب استفاده‌شده است. پاسخ امپدانس الکترومکانیکی توسط یک مبدل پیزوالکتریک منفرد که به یک ساختار میزبان متصل است اندازه‌گیری می‌شود تا هم به‌عنوان یک محرک و هم یک حس‌گر عمل کند. خاصیت اتصال الکترومکانیکی مواد پیزوالکتریک اجازه می‌دهد تا مقاومت امپدانس مکانیکی ساختار میزبان در پاسخ امپدانس الکترومکانیکی منعکس شود و از این طریق امکان استخراج طیف معین فرکانس بالا از یک ساختار میزبان با محدوده‌ی صفر تا بیش از صدها کیلوهرتز فراهم شود. به‌طورکلی، ماده پیزوالکتریک مورداستفاده برای روش امپدانس الکترومکانیکی یک نوع سرامیک نرم به نام تیتانات زیرکونات سرب با ثابت‌های پیزوالکتریک با مقادیر نسبتاً بزرگ است که بیانگر خواص مطلوب کوپلینگ الکتریکی و مکانیکی هست[1]. برای یک نقطه در سیستم ارتعاشی، امپدانس مکانیکی مطابق رابطه (1)، نسبت نیروی تحریک هارمونیک به‌سرعت هارمونیک

می‌باشد.

$$Z = \frac{F(j\omega)}{v(j\omega)} \quad (1)$$

که در این رابطه F و v به‌صورت روابط (2) و (3) می‌باشند.

$$F = F_0 e^{j\omega t} \quad (2)$$

$$v = v_0 e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (3)$$

ازآنجایی‌که اندازه‌گیری امپدانس مکانیکی یک سازه مشکل می‌باشد، روش پایش سلامتی سازه بر اساس امپدانس الکترومکانیکی، از اندازه‌گیری امپدانس الکتریکیِ مواد پیزوالکتریک بهره می‌برد. این امپدانس الکتریکی به‌طور مستقیم با امپدانس مکانیکی سازه میزبان مرتبط بوده و از حضور عیب در سازه تأثیر می‌پذیرد[19]. مدل الکترومکانیکی که به‌صورت کیفی فرایند را تشریح می‌کند در شکل 2 آمده است. پیزوالکتریک که به‌صورت افقی قرار دارد، توسط یک چسب با استحکام بالا به سطح سازه مقید شده است. سطح مقید شده پیزوالکتریک در ارتعاشات محوری که به خاطر اعمال ولتاژ متناوب حاصل می‌گردد، به‌عنوان یک بسته نازک در نظر گرفته می‌شود. انتهای یک بسته ثابت در نظر گرفته‌شده و این در حالی است که انتهای دیگر به سازه خارجی متصل می‌باشد.

حل معادله موج برای پیزوالکتریکِ متصل به سازه، معادله (4) را ایجاد می‌کند. این معادله، معادله هدایت الکتریکی در حوزه وابسته به فرکانس می‌باشد [19].

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i\omega\, a \left\{ \bar{\varepsilon}_{33}^{T}(1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)}\, d_{3x}^2\, \hat{Y}_{xx}^{E} \right\} \quad (4)$$

در این معادله $Y(\omega)$ ادمیتانس الکتریکی است که معکوس امپدانس الکتریکی می‌باشد. $Z_a(\omega)$ و $Z_s(\omega)$ به ترتیب امپدانس مکانیکی مواد پیزوالکتریک و سازه می‌باشند.

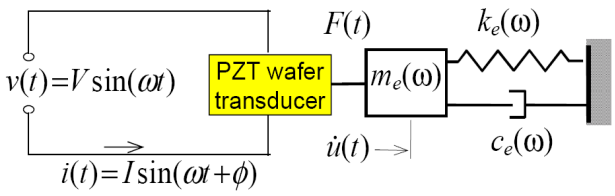

Fig. 2 One d.o.f model demonstrating structural dynamic with piezoelectric

شکل 2 مدل یک درجه آزادی که دینامیک سازه را توسط پیزوالکتریک نشان می‌دهد.

$\hat{Y}_{xx}^{E}$ مدول مختلط یانگ پیزوالکتریک در میدان الکتریکی صفر است، d_{3x} ثابت کوپلینگ پیزوالکتریک در جهت اختیاری x در تنش صفر، $\bar{\varepsilon}_{33}^{T}$ ثابت دی‌الکتریک در تنش صفر، a ثابت هندسی پیزوالکتریک و δ ضریب اتلاف تماسی دی‌الکتریک پیزوالکتریک می‌باشد. آسیب دیدن یک سازه به‌طور مستقیم سفتی یا دمپینگ و یا هر دو را در سازه تغییر داده و درنتیجه مشخصات دینامیکی موضعی دستخوش تغییر می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر امپدانس مکانیکی با آسیب دیدن سازه تغییر می‌کند. ازآنجایی‌که تمامی خواص پیزوالکتریک ثابت می‌مانند، این امپدانس ساختار خارجی است که به‌صورت منحصربه‌فرد ادمیتانس را تعیین می‌کند. بنابراین هر تغییر در نمودار امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک نشان‌دهنده یک تغییر در سلامتی و پیوستگی سازه است. از طریق پایش امپدانس الکتریکی اندازه‌گیری شده از پیزوالکتریک و مقایسه آن باحالت بدون عیبِ سازه می‌توان به‌صورت کیفی تعیین نمود که عیب در سازه ایجادشده و یا در حال وقوع است. روش امپدانس برای دامنه وسیعی از کاربردهای پایش سلامتی سازه بکار گرفته‌شده 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 [19].

2- روش تحقیق

در این بخش روش پایش سلامتی سازه به روش امپدانس الکترومکانیکی را برای تشخیص خوردگی در یک لوله آلومینیومی به کار گرفته می‌شود. از لوله‌های آلومینیومی اغلب برای لوله‌های انتقال حرارت در سیستم‌های سردکننده استفاده می‌شود. از عمده‌ترین مشکلات سیستم‌های سردکننده خوردگی هست. یکی از عوامل اصلی در خورده شدن فلزات در سیستم‌های سردکننده غلظت‌های نمک محلول در آب می‌باشد. بالا رفتن غلظت‌های نمک محلول، خوردگی را شدت می‌بخشد، زیرا زیاد بودن غلظت موادِ در آب، غلظت یونی را افزایش می‌دهد که نتیجه آن بالا رفتن فعل‌وانفعالات یونی و احتمالاً تشکیل نمک‌های خورنده از طریق جابجایی نمک‌های محلول می‌باشد. از نمک‌های محلول در آب، کلرورها بیشترین سهم را در افزایش میزان خورندگی دارند.

2-1- آماده‌سازی نمونه و نحوه آزمایش

جنس لوله مورد آزمایش، از آلومینیوم آلیاژی 2024 بوده و ابعاد آن عبارت است از: قطر خارجی لوله برابر 55 میلی‌متر، قطر داخلی لوله برابر 51 میلی‌متر و طول آن برابر 300 میلی‌متر. بنابراین ضخامت لوله برابر 2 میلی‌متر است. خواص فیزیکی و

مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024 در جدول 1 و ترکیب شیمیایی آن در جدول 2 آورده شده است.

بازه فرکانسی موردنظر برای این بررسی، بازه فرکانسی10 تا 20 کیلوهرتز می‌باشد. جنس پیزوالکتریک مورد استفاده PSI-5H4E و ابعاد آن 0/267×7×36 میلی‌متر است که فاصله ابتدای آن از لبه لوله 74 میلی‌متر می‌باشد. مشخصات پیزوالکتریک نیز در جدول 3 آورده شده است.

در شکل 3 مکان نصب سنسور پیزوالکتریک بر روی جداره خارجی لوله و محل ایجاد خوردگی نشان داده شده است. محل خوردگی با فاصله طولی و محیطی از سنسور قرارگرفته تا حساسیت و قابلیت این روش اندازه‌گیری موردبررسی قرار گیرد.

جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024

Table 1 Physical and mechanical properties of aluminum 2024 alloy

چگالی	سختی	تنش تسلیم	مدول الاستیسته	ضریب پواسون	استحکام نهایی
2780 kg/m³	75 HRB	324 MPa	73/1 GPa	0/33	469 MPa

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024 برحسب درصد وزنی

Table 2 Chemical components of aluminum 2024 alloy as percentage

Al	90/7 -94/7
Cr	حداکثر 0/1
Cu	3/8 -4/9
Fe	حداکثر 0/5
Mg	1/2 -1/8
Mn	0/3 -0/9
Si	حداکثر 0/5
Ti	حداکثر 0/15
Zn	حداکثر 0/25
سایر	حداکثر 0/15

جدول 3 مشخصات و ابعاد پیزوالکتریک به‌کار برده شده

Table 3 Characteristics and dimensions of the employed piezoelectric wafer

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
طول	L_p	36	cm
عرض	b_p	7	cm
ضخامت	h_p	0/267	mm
چگالی	ρ_p	7749/985	Kg/m³
مدول تسلیم معکوس پیزوالکتریک	S_{11}^E	$1/64\times10^{-11}$	Pa⁻¹
ضریب کرنش	d_{31}	$8/85\times10^{-12}$	m/V
ثابت دی‌الکتریک	ε_{33}^T	$3800\,\varepsilon_0$	F/m
ثابت دی‌الکتریک در هوا	ε_0	$8/85\times10^{-12}$	F/m

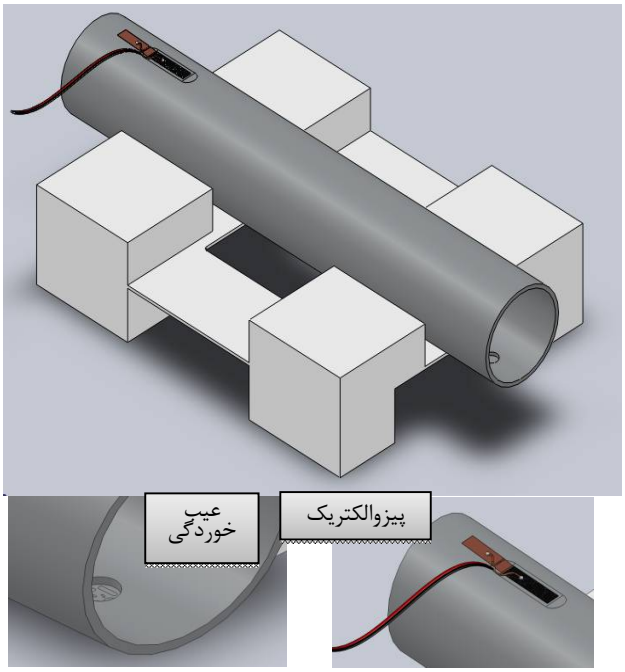

Fig. 3 Location of piezoelectric sensor on outer and corrosion damage on inner wall of pipe

شکل3 تصویر موقعیت سنسور پیزوالکتریک در جداره بیرونی و عیب خوردگی با فاصله طولی در جداره داخلی لوله

محلول خورنده ترکیبی از اسیدها به‌صورت 50% اسید نیتریک (HNO_3)، 40% اسید هیدروکلریک (HCL) و 10% اسید سولفوریک (H_2SO_4) می‌باشد. مقطع خوردگی دایره‌ای تقریباً به قطر 16 میلی‌متر می‌باشد. و مرکز آن در فاصله 28 میلی‌متری از انتهای دیگر لوله است و در قسمت پایین و در داخل لوله ایجاد می‌گردد. محیط اطراف مکان عیب مصنوعی ایجادشده در حین خوردگی با کمک چسب آکواریوم محافظت شد تا خوردگی فقط به‌صورت عمقی در قطعه رخ دهد و از گسترش سطحی آن جلوگیری به عمل آید. نمایی از لوله مورد آزمایش و عیب ایجادشده در شکل 4 و بستر آزمایشگاهی در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود شرایط مرزی لوله به‌صورت دو سر آزاد و بر روی یک بستر نرم می‌باشد تا حالت تکیه‌گاه ساده ایجاد گردد.

مدت‌زمان لازم برای سوراخ شدن سازه در اثر خوردگی 3 ساعت می‌باشد. اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک به‌منظور پایش تغییرات در طیف امپدانس در اثر پیشرفت خوردگی هر 20 دقیقه انجام می‌گیرد. نرخ خوردگی در حدود 0.0138 میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. زیرا در مدت‌زمان 3 ساعت 2 میلی‌متر ضخامت لوله خورده شد. بنابراین می‌توان به‌طور تقریبی گفت که نرخ خوردگی در یک دقیقه مطابق جدول 4 می‌باشد.

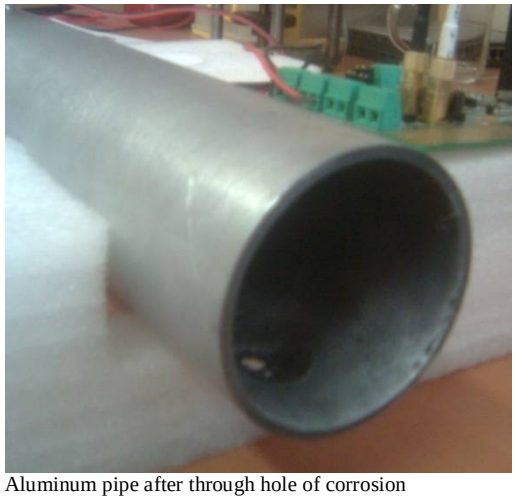

Fig. 4 Aluminum pipe after through hole of corrosion

شکل 4 تصویر لوله آلومینیومی مورد آزمایش بعد از سوراخ شدن کامل

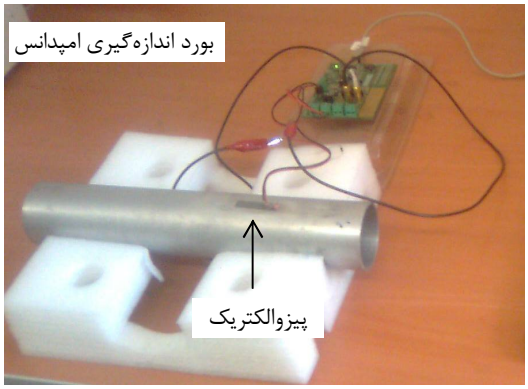

Fig. 5 Test set-up for health monitoring and damage detection in aluminum pipe

شکل 5 بستر آزمایشگاهی برای پایش سلامتی و تشخیص عیب در لوله آلومینیومی

جدول 4 محاسبه تقریبی نرخ خوردگی

Table 4 Approximation of corrosion rate

خوردگی	زمان
2 میلی‌متر	180 دقیقه
0/0111 میلی‌متر	1 دقیقه

اندازه‌گیری طیف امپدانس در 10 مرحله و با فواصل زمانی 20 دقیقه صورت گرفت که اولین اندازه‌گیری مربوط به قبل از ایجاد خوردگی و حالت سالم و مبنای مقایسه هست. مابقی حالت‌ها از شماره 2 تا 10 مربوط به خوردگی ایجاد شده و افزایش‌یافته در راستای عمق قطعه هست. توضیحات مربوط به زمان بررسی و میزان عمق خوردگی در جدول 5 آمده است.

2-2- کمّی سازی نمودنِ تشخیص عیب

زمانی که پاسخ امپدانس طرح‌ریزی می‌گردد یک رویکرد کیفی از شناسایی عیب فراهم می‌شود. تشخیص کمّی عیب با استفاده از یک معیار آسیب اسکالر فراهم می‌شود. در این پژوهش از دو الگوریتم آماری استفاده می‌گردد. الگوریتم اول که در رابطه (5) آمده است، بر اساس مقایسه فرکانس به فرکانس است و به نام جذر انحراف میانگین مربعات (RMSD[1]) می‌باشد [20].

$$M = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{(Re(Z_{i.1}) - Re(Z_{i.2}))^2}{Re(Z_{i.1})^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

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. معیار آسیب دوم معیار ضرایب همبستگی (CC[2]) نام داشته که می‌تواند جهت تفسیر و تعیین اطلاعات از مجموعه داده‌های مختلف به کار گرفته شود. ضرایب همبستگی بین دو مجموعه از داده‌ها، درجه ارتباطِ خطی بین دو نمودار امپدانس را معین می‌سازد[20].

$$CC = \frac{1}{\sigma_{z.1}\sigma_{z.2}}\sum_{i=1}^{n}[Re(Z_{i.1}) - Re(\bar{Z}_{i.1})][Re(Z_{i.2}) - Re(\bar{Z}_{i.2})] \quad (6)$$

که در این رابطه $Z_{i.1}$ بیان‌گر امپدانس اندازه‌گیری شده پیزوالکتریک در شرایط سالم و $Z_{i.2}$ امپدانس اندازه‌گیری شده در شرایط فعلی و برای مقایسه می‌باشد. هر دو در بازه فرکانسی i می‌باشند. $\bar{Z}_{i.1}$ و $\bar{Z}_{i.2}$ مقدار میانگین مقادیر ذکرشده و $\sigma_{z.1}$ و $\sigma_{z.2}$ انحراف معیار را نشان می‌دهند.

جدول 5 عیوب ایجادشده بر روی لوله آلومینیومی

Table 5 Applied damage states inside aluminum pipe

شماره	توضیح	زمان (دقیقه)	عمق خوردگی (mm)	علامت نشان‌دهنده
1	حالت سالم	0	-	Healthy
2	خوردگی 1	20	0/222	D1
3	خوردگی 2	40	0/444	D2
4	خوردگی 3	60	0/666	D3
5	خوردگی 4	80	0/888	D4
6	خوردگی 5	100	1/111	D5
7	خوردگی 6	120	1/333	D6
8	خوردگی 7	140	1/555	D7
9	خوردگی 8	160	1/777	D8
10	خوردگی 9	180	2	D9

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج طیف امپدانس و مودهای ارتعاشی در لوله آلومینیومی

شکل 6 طیف اندازه‌گیری شده امپدانس لوله در حالت سالم را

[1] Root Mean Square Deviation
[2] Correlation Coefficient

نمایش می‌دهد که در بازه 10 تا 20 کیلوهرتز هست. این بازه پس از اندازه‌گیری در بازه‌های 10 تا 100 کیلوهرتز و با بررسی تعدد پیک‌های تشدید فرکانسی و دامنه مناسب آن‌ها در بازه‌های مختلف تعیین گردید. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در این بازه حدود 12 پیک با دامنه بزرگ‌تر از 150 اهم و تعدادی پیک با دامنه‌های کوچک‌تر وجود دارد که این تعداد پیک در این بازه بیشتر از مابقی بازه‌ها بوده و برای فرایند تشخیص عیب مناسب هست. دلیل وجود قله و دره در طیف امپدانس لوله، وجود مودهای ارتعاشی متنوع شامل مودهای طولی، حلقوی، پیچشی، خمشی و ...برای استوانه توخالی هست.

باید توجه شود که یکی از مزایای روش امپدانس الکترومکانیکی نسبت به روش‌هایی نظیر اولتراسونیک این است که علیرغم تحریک مودهای ارتعاشی متنوع، بازهم در این روش امکان تشخیص عیب وجود دارد و مانند روش‌های اولتراسونیک تحریک فقط مود ارتعاشی مدنظر نیست که این کار در استوانه توخالی به دلیل وجود مودهای مختلف در هر بازه فرکانسی مشابه شکل 7 بسیار سخت خواهد بود. نمودار شکل 7 که بیانگر سرعت گروهی موج‌های مختلف درون ضخامت استوانه توخالی هست، از طریق یک کد در نرم‌افزار متلب برای استوانه توخالی با ابعاد مشابه با لوله مورد آزمایش در این تحقیق تا بازه 1 مگاهرتز رسم شده است تا بیانگر انواع مودهای ارتعاشی و پیچیدگی موج‌های ایجادشده در لوله باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد هرچه فرکانس تحریک کمتر باشد تعداد مودهای ارتعاشی موجود کمتر بوده و برای عیب‌یابی بر روی لوله مناسب‌تر هست. ولی محدودیت دیگر در انتخاب بازه فرکانسی حداقل وجود چندین پیک با دامنه مناسب در طیف امپدانس ناشی از تشدید و ارتعاش سیستم هست و نمی‌توان این بازه را از چند کیلوهرتز کمتر انتخاب نمود. بازه انتخاب‌شده در این آزمون بازه 10 تا 20 کیلوهرتز هست.

یادآوری می‌گردد که در روش امپدانس الکترومکانیکی به دلیل اینکه سیگنال تحریک شامل یک بازه فرکانسی می‌گردد می‌تواند به‌صورت هم‌زمان باعث تحریک مودهای ارتعاشی مختلف موجود در آن بازه فرکانسی گردد. در شکل 7 منحنی پراکندگی سرعت گروهی موج‌های حاصل از مودهای ارتعاشی متنوع در استوانه توخالی با ابعاد لوله موردنظر انتخاب‌شده در این تحقیق مشاهده می‌شود و این مودها در بازه فرکانسی زیر 100 کیلوهرتز شامل مودهای طولی L(0,1)، مودهای پیچشی نظیر T(0,1)، مودهای خمشی نظیر F(1,1)، F(2,1) و F(3,1) هست و دلیل عمده نوسانات زیاد در طیف امپدانس الکترومکانیکی استوانه توخالی وجود، ترکیب و تبدیل این مودهای ارتعاشی به یکدیگر هست. در شکل 8 شکل ظاهری این مودها مشاهده می‌گردد.

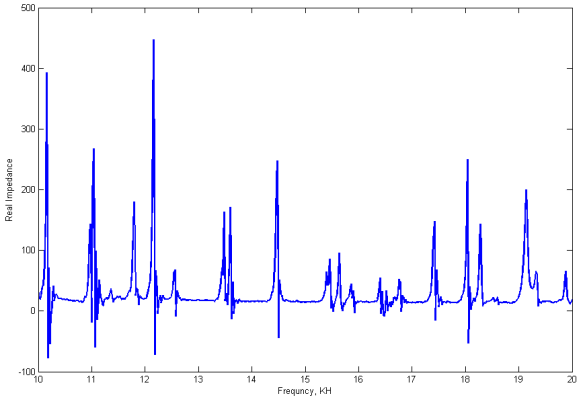

Fig. 6 Impedance spectrum of healthy state pipe

شکل 6 شکل امپدانس لوله در حالت سالم

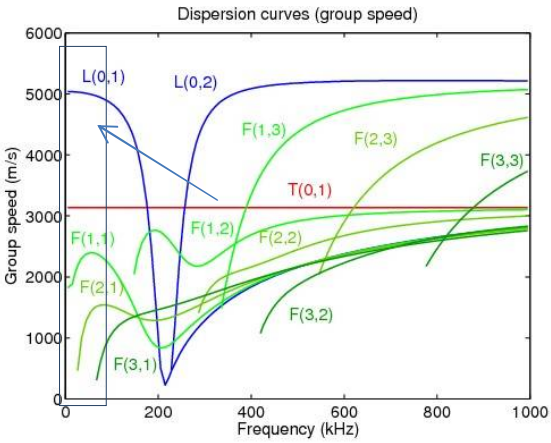

Fig. 7 Dispersion curves for phase velocity of hollow aluminum cylinder with 51 mm inner and 55mm outer diameters

شکل7 منحنی پراکندگی برای سرعت فاز در مورد استوانه توخالی آلومینیومی با قطر بیرونی 55 و قطر داخلی 51 میلی‌متر

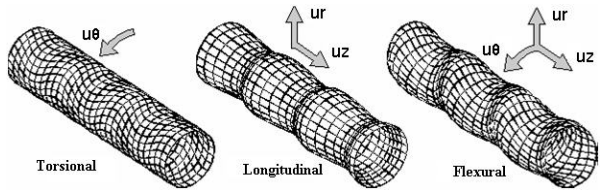

Fig. 8 Vibration modes of hollow cylinder

شکل 8 انواع مودهای ارتعاشی موجود در استوانه توخالی

3-2- نتایج تغییرات در طیف امپدانس ناشی از رشد خوردگی در لوله آلومینیومی

در شکل‌های ۹، ۱۰ و11طیف امپدانس الکتریکیِ پیزوالکتریک در حالت سالم و در برخی از حالات معیوب نشان داده‌شده است تا تغییر در پیک‌های تشدید مشاهده گردد. در شکل 12 نیز شکل

امپدانس در حالت سالم و تمامی حالات معیوب آورده شده است.

در شکل 9 مشاهده می‌شود که با ایجاد عیب خوردگی در لوله، شکل امپدانس در راستای افق شیفت پیدا نموده و تغییر در دامنه ایجاد می‌شود. 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 ایجاد شده است. با گذشت زمان و افزایش عیب خوردگی، مطابق شکل‌های 10 و 11 این تغییرات در شکل امپدانس افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود با افزایش عمق خوردگی و درنهایت سوراخ شدن لوله، شکل امپدانس در راستای افق و دامنه در مقایسه با حالات با عمق خوردگی کمتر، تغییر بیشتری در آن ایجادشده است. برای درک بهتر این تغییرات در فرکانس‌های بین 19 تا 20 کیلوهرتز بزرگنمایی شکل امپدانس صورت گرفته است.

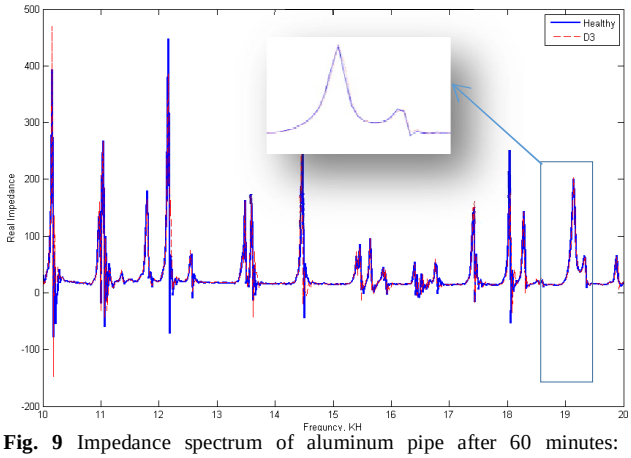

Fig. 9 Impedance spectrum of aluminum pipe after 60 minutes: corrosion depth about 0.66 mm

شکل9 شکل امپدانس لوله بعد از گذشت 60 دقیقه: عمق خوردگی در حدود 0/666 میلی‌متر

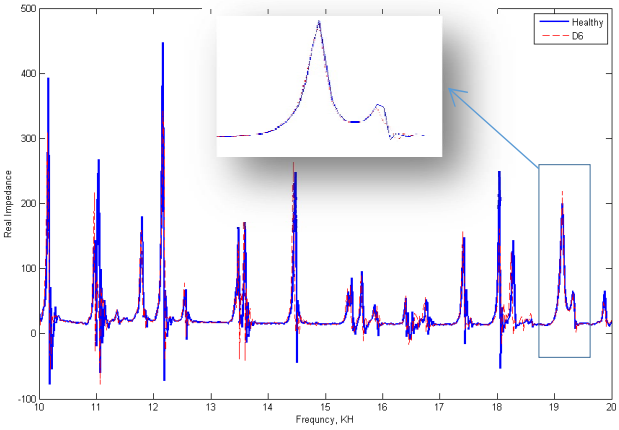

Fig. 10 Impedance spectrum of aluminum pipe after 120 minutes: corrosion depth about 1.33 mm

شکل10 شکل امپدانس لوله بعد از گذشت 120 دقیقه: عمق خوردگی در حدود 1/333 میلی‌متر

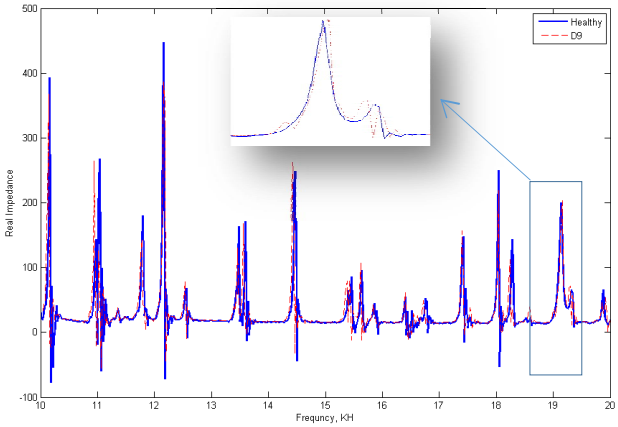

Fig. 11 Impedance spectrum of aluminum pipe after 180 minutes: corrosion depth about 2 mm

شکل 11 شکل امپدانس لوله بعد از گذشت 180 دقیقه : عمق خوردگی 2 میلی‌متر

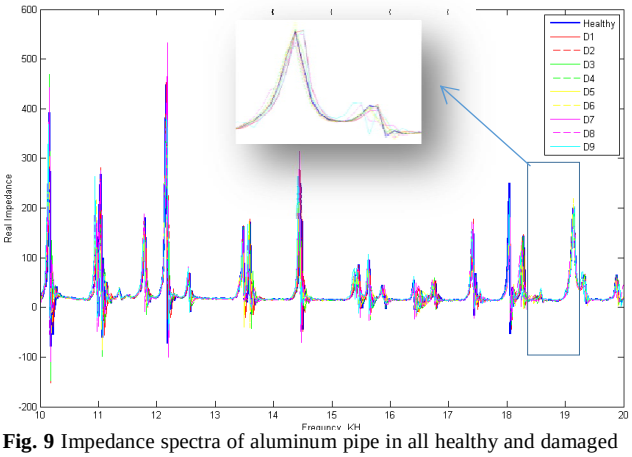

Fig. 9 Impedance spectra of aluminum pipe in all healthy and damaged states

شکل12 شکل امپدانس برای حالت سالم و تمامی حالات معیوب لوله آلومینیومی

در تصاویر شکل‌های 9 تا 12 مشاهده می‌گردد که با افزودن هر عیب طیف امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک دچار تغییر می‌گردد که این تغییر به‌صورت شیفت افقی و کاهش در دامنه مشهود می‌باشد که این تغییر در شکل امپدانس ناشی از خوردگی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی عنوان شده توسط لی و همکاران[11] برای کوپن‌های هوشمند مطابقت دارد. این تغییر بیانگر تغییر وضعیت سازه می‌باشد که از خوردگی ناشی می‌گردد و بنابراین تشخیص خوردگی به روش امپدانس الکترومکانیکی در لوله امکان‌پذیر است.

3-3- نتایج کمّی سازی در تشخیص عیب

همان‌طور که از تصاویر 9 تا 12 مشخص است با افزودن هر عیب شکل سیگنال امپدانس دچار تغییر می‌گردد و بنابراین تشخیص خوردگی به روش امپدانس الکترومکانیکی در لوله

امکان‌پذیر است. برای فهم بهترِ تغییرات در اشکال امپدانس شکل 13 مقادیر معیارهای آسیب RMSD و CC را به‌طور هم‌زمان نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که هر دو معیار با افزایش عمق خوردگی افزایش می‌یابند ولی مقادیر شاخص RMSD بزرگ‌تر بوده و حساسیت بیشتری به تغییرات در حین رشد خوردگی ایجاد کرده است که می‌تواند در فرایند عیب‌یابی و پایش وضعیت به‌صورت کاربردی‌تر مورداستفاده قرار بگیرد.

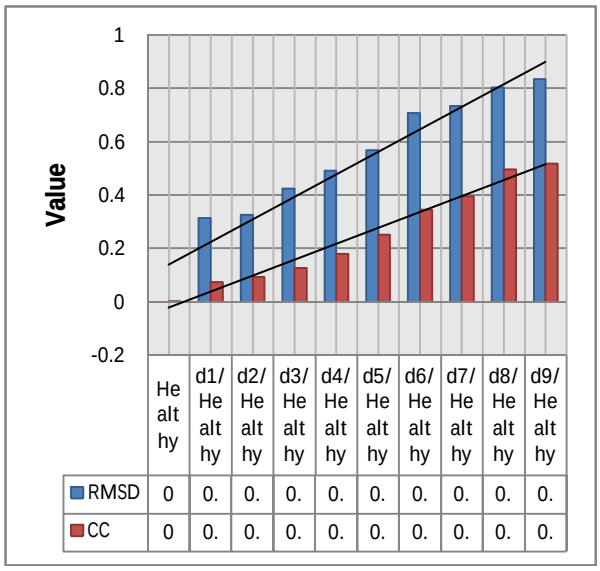

Fig. 13 RMSD and CC damage indexes for quantifying the difference of impedance spectra in corrosion of aluminum pipe

شکل 13 معیار آسیب RMSD و CC برای کمّی‌سازی نمودن تفاضل طیف‌های امپدانس در خوردگی لوله آلومینیومی

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش توانایی روش امپدانس الکترومکانیکی برای پایش سلامتی و تشخیص بلادرنگ عیبِ ناشی از خوردگی در یک لوله آلومینیومی موردمطالعه و بررسی قرار گرفت. عیب ایجادشده از نوع خوردگی شیمیایی با نرخ بالا و در جداره داخلی لوله بوده که توسط ایزولاسیون محیط اطراف، خوردگی آن فقط در جهت ضخامتی لوله رشد داده شد. محل سنسور پیزوالکتریک بکار رفته در جداره بیرونی لوله و با فاصله طولی و محیطی حداکثر نسبت به مکان خوردگی در نظر گرفته شد. در ابتدا به‌منظور بررسی عیب خوردگی، مقطع خوردگی دایره‌ای شکل توسط محلولِ اسید خورنده در طی بازه زمانی 180 دقیقه تا سوراخ شدن لوله ایجاد شد. اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی پیزوالکتریک به‌منظور پایش تغییرات در شکل طیف امپدانس در اثر پیشرفت خوردگی هر 20 دقیقه انجام گرفت. با افزودن هر عیب به لوله آلومینیومی تغییر در شکل امپدانس الکتریکی خروجی از پیزوالکتریک به‌وضوح دیده شد. طیف امپدانس استخراج شده در بازه 10 تا 20 کیلوهرتز و بر اساس تعدد پیک‌های با دامنه بزرگ در محدوده فرکانسی بزرگ‌تر انتخاب گردید. طیف امپدانس استخراج‌شده برای لوله آلومینیومی دارای قله‌ها و دره‌های مختلف هست و برخلاف سازه‌هایی نظیر تیر و صفحه که از تنوع مودهای ارتعاشی کمتری برخوردارند، در استوانه توخالی تنوعی از مودهای طولی، محیطی، خمشی، پیچشی و ... مشاهده می‌شوند و به‌همین دلیل طیف ایجاد شده دارای نوسان بیشتری بود و در برخی موارد مقادیر عددی منفی برای امپدانس مشاهده می‌گردد. در کل می‌توان عنوان نمود به دلیل اینکه فرایند پایش وضعیت یک فرایند مقایسه‌ای هست مهم‌ترین نکته تغییرات ایجادشده در شکل این طیف امپدانس و بخصوص در مکان فرکانس‌های تشدید هست که به‌صورت قله و دره ظاهرشده است. مقایسه طیف امپدانس در هر مرحله باحالت سالم شیفت راستای افق و تغییر در دامنه را نشان داد. برای کمّی‌سازی نمودنِ تشخیص عیب از یک معیار آسیب اسکالر استفاده شد و طیف امپدانس هر مرحله پس از رشد عیب خوردگی، با طیف سازه سالم مقایسه گردید. نتایج تجربی حاصله از اندیس‌های خرابی نشان داد که با افزایش عمق خوردگی، مقدار معیارهای آسیب انتخاب شده تغییرات خطی و افزاینده در حین رشد کنترل‌شده خوردگی از خود نشان می‌دهند که برای عملیات پایش وضعیت و مشاهده رشد عیب خوردگی بسیار مناسب و ایده‌آل هست. یکی دیگر از مزایای روش امپدانس الکترومکانیکی به‌کاررفته علاوه بر سهولت اندازه‌گیری یک سیگنال الکتریک، قابلیت تشخیص عیوب داخلی لوله باضخامت‌های مختلف و از روی جداره داخلی و به‌صورت پیوسته در هرلحظه (پایش بلادرنگ) هست.

5- مراجع

[1] H.R. Vanaei, A. Eslami, A. Egbewande, A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models; *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 149, January 2017, Pages 43-54.

[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*, 3, 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*, A 274, 252–261, 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 (Basel) 19, 2019.

[5] H. Lee, H. Sohn, S. Yang, J. Yang, Monitoring of pipelines in nuclear power plants by measuring laser-based mechanical impedance, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, 2014.

[6] A.A. Oskuie, T. Shahrabi, A. Shahriari, E. Saebnoori, Electrochemical impedance spectroscopy analysis of X70 pipeline steel stress corrosion cracking in high pH carbonate solution, *Corrosion Science*, Vol. 61, pp. 111-122, 2012

[7] D. Han, R.J. Jiang, Y.F. Cheng, Mechanism of electrochemical corrosion of carbon steel under deoxygenated water drop and sand deposit, *Electrochimica Acta*, Vol.. 114, pp. 403-408, 2013.

[8] T. Azizzadeh, M.S. Safizadeh, Design and Manufacturing of the Magnetic Flux Leakage Inspection System for Detection of Pitting Corrosion in Gas Pipelines, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 43-49 ,2018 (in Persianفارسی)

[9] 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. 210-220, 2016.

[10] J.W. Ayres, F. Lalande, Z. Chaudhry, C. A Rogers, Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 5, 1998.

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

[12] 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.

[13] 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*, Vol. 88, pp. 42–50, 2017.

[14] H. Sohn, Ch. Farrar, D. Inman, Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35(6), pp. 451-463, 2003.

[15] S.R. Hamzeloo, M. Shamshirsaz, S.M. Rezaei, Damage detection in hollow cylinder by Electromechanical Impedance method, Experiment and Finite Element Modeling, *Comptes Rendus Mecanique journal*, Vol. 340, pp. 668-677, 2012.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

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